



วารสารวิชาการ

# พลังงาน ทดแทน สู่ชุมชน

ปีที่ 9 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม- เมษายน 2569

**J-REC**

JOURNAL  
OF RENEWABLE  
ENERGY FOR  
COMMUNITY

**J-REC BY TRECA**

**1**



วารสารวิชาการ

# พลังงานทดแทน สู่ชุมชน



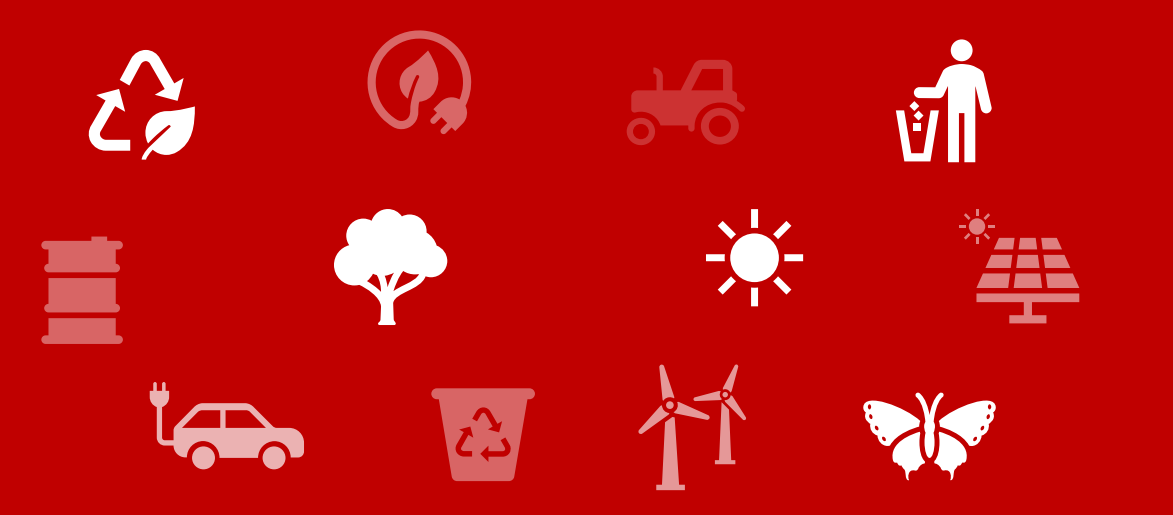
## J-REC

JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY  
FOR COMMUNITY



## วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการและงานวิจัยทางด้านพลังงานทดแทน  
ในเครือข่ายพลังงานของประเทศไทย
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ และงานวิชาการใหม่ๆ  
ด้านพลังงานทดแทนระหว่างนักวิจัยและผู้ใช้งานในภาครัฐและเอกชน
3. เพื่อส่งเสริมสนับสนุนให้คณาจารย์ บุคลากรทางการศึกษา นิสิต นักศึกษา  
และผู้สนใจทำผลงานทางด้านพลังงานทดแทนที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ
4. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมรายงานวิจัยและบทความทางวิชาการที่มีคุณภาพและมีคุณค่า  
ทางด้านพลังงานทดแทนสู่การใช้



เจ้าของและลิขสิทธิ์ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ที่ตั้งสมาคมฯ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 ม.1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

โทร. 0-2549-3497 [www.reca.or.th/jrec](http://www.reca.or.th/jrec)

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

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

ติดต่อขอรับเป็นสมาชิกได้โดยตรงที่ สมาคมพลังงานทดแทนแห่งประเทศไทย

# วัตถุประสงค์สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน แห่งประเทศไทย

- เพื่อส่งเสริมความร่วมมือ ทางด้านวิชาการระหว่างภาครัฐ ภาคเอกชนและภาคประชาชน ในด้านพลังงาน ทดแทน การอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชนต่างๆ ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ
- เพื่อจัดหาทุนเพื่อสนับสนุนการศึกษาวิจัย ฝึกอบรม การดำเนินโครงการด้านพลังงานทดแทนให้กับ ภาครัฐ ภาคเอกชนและภาคประชาชน จากแหล่งทุนทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ
- ไม่ดำเนินการส่งเสริมและพัฒนากิจกรรมใดๆ ที่มุ่งไปสู่การดำเนินงานทางการเมือง
- ไม่ดำเนินการให้มีการจัดตั้งโต๊ะบิลเลียดหรือกระทำการอันผิดต่อขนบธรรมเนียมและจารีต ประเพณีที่ดีของสังคมไทย
- เพื่อส่งเสริมให้สมาคมมีรายได้จากโควต้าสลากกินแบ่งรัฐบาล หรือสลากการกุศลของรัฐบาลที่พิมพ์ ออกจำหน่าย เพื่อนำรายได้มาใช้ในการดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของสมาคม
- เพื่อส่งเสริมกิจกรรมทางสังคมด้านสาธารณะประโยชน์ด้านต่างๆ รวมถึงกิจกรรมเพื่อการจัดสวัสดิการให้กับสมาชิก

## หลักการและเหตุผล

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

## จุดมุ่งหมาย

การทำงานกันทั้งส่วนภาครัฐและประชาชนในการใช้พลังงานทดแทน การอนุรักษ์พลังงานและใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมของชุมชนในประเทศไทย ตลอดจนการศึกษาวิจัย ดำเนินการหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมต่างๆ มาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อความเหมาะสมและให้เกิดความยั่งยืนของชุมชนและประชาชนในประเทศไทย

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน  
JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY FOR COMMUNITY  
คณะกรรมการจัดทำวารสารวิชาการสู่ชุมชน

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กองบรรณาธิการ

หัวหน้ากองบรรณาธิการ	รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช โยชนรินทร์ คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองบรรณาธิการ	นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (รศ.ดร.พิเชษฐ มณีโชติ)
ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ	กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (ผศ.ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ)
กองบรรณาธิการ	ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ ศาสตราจารย์ ดร.ทงกียรติ เกียรติศิริโรจน์ ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล รองศาสตราจารย์ ดร.ประพิธาร์ ธนารักษ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรพงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ศรีประภาคาร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วารุณี อริยะวิริยะนันท์ ดร.ชานนท์ บุญมีพิพิธ

เลขานุการ

นางสาวกิ่งกานต์ พันธุ์วานิชย์

ผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวกชมาศ แม่นยำ

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ศรีประภาคาร	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรเมษฐ์ จันทร์เพ็ง	ภาควิชาฟิสิกส์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ดร.นิติศักดิ์ ปาสาจะ	ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิชาติ อากกล้า	หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย ฮะทะโชติ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร
ดร.ประจวบ พิระพงศ์	ภาควิชาวิศวกรรมการบิน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองยศ เกตุรักษา	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พาศิกา เตมีประเสริฐกิจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระพงษ์ บุญรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จารุกิตต์ พิบูลนฤดม	สาขาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร
ดร.ชนิษฐา วรรณคำ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ไพฑูรย์ เหล่าดี	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรหมพัทธ์ บุญรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ดร.ชนิษฐา วรรณคำ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา คงจัน	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด	สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ดร.อำพล อาภาธนากร	สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

## บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนโดยร่วมมือของเครือข่ายสมาชิกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (TRECA) ซึ่งเป็นฉบับที่ 1 ของปีที่ 9 และนับเป็นการตีพิมพ์วารสารในรูปแบบออนไลน์ ISSN 2773-8693 (Online) วารสารฉบับนี้เป็นเนื้อหาของบทความทางวิชาการมุ่งสร้างผลงานที่เด่นทางด้านวิจัยและมุ่งสู่การใช้งานจริง ซึ่งได้รวบรวมความรู้ทางวิชาการที่สามารถถ่ายทอดให้แก่สังคมทางด้านพลังงานทดแทนในสาขาต่างๆ เพื่อให้วารสารนี้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนวิชาการและแนวความคิด ในแวดวงวิชาการทั้งผู้วิจัยและผู้ใช้งาน อันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างผลงานทางวิชาการสู่ชุมชนและสังคม โดยดำรงไว้ซึ่งความเป็นตัวตนทางวิชาการของผู้เขียนและวัตถุประสงค์ของสมาคมฯ ที่ทรงคุณค่า บทความในวารสารฉบับนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 10 บทความ ซึ่งในแต่ละบทความมีความเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันของรูปแบบพลังงานทดแทนต่างๆ ครอบคลุมกระบวนการในการวิจัยและการศึกษาสู่ภาคการใช้งาน ผู้อ่านจะได้รับความรู้ที่หลากหลายจากการอ่านวารสารฉบับนี้ ในแนวทางที่จะจุดประกายความคิด หรือการต่อยอดความคิดทางด้านพลังงานทดแทนสาขาต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอ่านอย่างวิพากษ์ และตั้งคำถามเพื่อให้เกิด การแลกเปลี่ยนในทางวิชาการอย่างสร้างสรรค์ อันจะช่วยให้ความรู้และความคิดเดิมถูกแพร่ขยายออกไปได้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งให้วารสารฉบับนี้เป็นแหล่งความรู้ในทุกระดับภาคส่วน ของทุกคนในสังคมไทยโดย ไม่ยึดติดตนเองและอยู่กับความรู้ความคิดของตนเองอยู่เสมอมิอย่างมิดชิด และท้ายที่สุดแล้วความรู้ความคิด ที่ถูกต่อขยายออกไปนั้น ก็จะนำไปสู่การปรับเปลี่ยนกระบวนการทัศนทางความคิดของสังคมและชุมชน อย่างกว้างขวาง อันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางวิชาการของสังคมเพื่อความยั่งยืนของประเทศไทย กองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคุณธำรงทำงานทุกท่าน คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการและทุกภาคส่วนที่ได้สละเวลาอันมีค่าอ่านบทความ เพื่อความถูกต้องทางวิชาการ และเป็นวารสารที่ดีต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งนี้หากผู้อ่านมีความประสงค์จะตีพิมพ์บทความทางออนไลน์ที่ [www.reca.or.th/jrec](http://www.reca.or.th/jrec) เพื่อการพิจารณาและตีพิมพ์ในวารสารฉบับต่อไป

กองบรรณาธิการ

# สารบัญ

## นวัตกรรมด้านพลังงาน

กระบวนการไฟโรไลซิสสำหรับการเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง.....	9
การผลิตไฮโดรไลเสตจากชีวมวลแหล่งพลังงานความร้อนจากระบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน.....	19
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ เพื่อเพิ่มผลผลิตและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากกาบหมาก.....	31
แบบจำลองและจำลองสถานการณ์ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า กระแสตรงสำหรับแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ.....	44

## พลังงานเพื่อการเกษตร

การพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด.....	53
การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการบริหารจัดการน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีศึกษา : เกษตรกรผู้ปลูกยางพาราเขตนิคมสร้างตนเองบ้านกรวด อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์.....	62
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร : กรณีศึกษาการปลูกกระเจี๊ยบแดง.....	77

## พลังงานเพื่อชุมชน

การศึกษาตัวประสานในเทคนิคอัดเย็นที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจู้รี.....	85
การใช้ประโยชน์เชิงมูลค่าอย่างยั่งยืนจากก้อนเชื้อเห็ดใช้แล้ว: ความเป็นไปได้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวภาพ...94	

## การบริหารจัดการพลังงานชุมชน

การควบคุมกระบวนการผลิตไบโอชาร์สำหรับชุมชนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	103
---	-----

## กระบวนการไพโรไลซิสสำหรับการเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง

## Pyrolysis process for converting waste plastic into fuel oil

ฉันทวิช เจริญสุข<sup>1</sup> สุระพล ริยะนา<sup>2</sup> นิกราน หอมดวง<sup>2</sup> เตชัส พรมตา<sup>3</sup> และ กิตติกร สาสุจิตต์<sup>2\*</sup>Chatawat Charoensuk<sup>1</sup> Surapon Riyana<sup>2</sup> Nigran Homdoug<sup>2</sup> Techut promta<sup>3</sup> and Kittikorn Sasujit<sup>2\*</sup><sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมการอนุรักษ์พลังงาน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290<sup>3</sup>ห้องปฏิบัติการพลังงานสะอาดและเกษตรอัจฉริยะ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290<sup>1</sup>Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290<sup>2</sup>Energy Conservation Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290<sup>3</sup>Clean Energy & Smart Agricultural Laboratory, Maejo University, Chiang Mai 50290<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 089-9988203. E-mail address: k.sasujit@yahoo.com

## Abstract

The pyrolysis process has gained significant attention as a method for converting plastic waste into energy. This study aims to investigate the pyrolysis process using high-density polyethylene plastic for the conversion into pyrolysis oil. Plastic waste, specifically 5 kg of plastic bottle caps, was processed using a 200-liter batch reactor along with a 50-liter water-cooled gas condensation system. The experiments were conducted at pyrolysis temperatures of  $190\pm 5^{\circ}\text{C}$ ,  $280\pm 5^{\circ}\text{C}$ , and  $340\pm 5^{\circ}\text{C}$ . The results indicated that increasing the temperature led to higher pyrolysis oil yields. At  $340\pm 5^{\circ}\text{C}$  and a reaction time of 140 min, the maximum oil yield reached 12.90% by weight. The properties of the pyrolysis oil included an acidity with a pH of 5.0, a density of  $737\text{ kg/m}^3$ , and a heating value of 52.23 MJ/kg. The energy conversion efficiency was 14.68%, the specific oil production rate was 174 liters per tonne, and the energy consumption for oil production was 79 MJ/liter. Therefore, this plastic waste management process not only offers an effective means of converting waste into energy but also serves as a viable environmental solution for waste management and energy transformation.

**Keywords:** pyrolysis, pyrolysis oil, hot air, waste plastic

## บทคัดย่อ

กระบวนการไพโรไลซิสถือว่าเป็นกระบวนการหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในการเปลี่ยนรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงาน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษากบวนการไพโรไลซิสโดยใช้พลาสติกประเภทโพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูง สำหรับการเปลี่ยนเป็นน้ำมันไพโรไลซิส ขยะพลาสติกใช้ฟางขวดน้ำดื่มจำนวน 5 kg โดยใช้เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาด ปริมาตร 200 liter รวมกับชุดควบแน่นแก๊สไพโรไลซิสแบบใช้น้ำหมุนเวียนในถังขนาดปริมาตร 50 liter โดยทำการศึกษาที่ อุณหภูมิไพโรไลซิสที่  $190\pm 5^{\circ}\text{C}$   $280\pm 5^{\circ}\text{C}$  และ  $340\pm 5^{\circ}\text{C}$  จากผลการศึกษาพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลทำให้ได้น้ำมันไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิ  $340\pm 5^{\circ}\text{C}$  ที่ระยะเวลาทำปฏิกิริยา 140 min จะให้ผลผลิตน้ำมันสูงสุดเท่ากับ 12.90 %wt และสมบัติน้ำมันไพโรไลซิสมีความเป็นกรดที่ pH เท่ากับ 5.0 ความหนาแน่นของน้ำมันเท่ากับ  $737\text{ kg/m}^3$  และให้ค่าความร้อนน้ำมันไพโรไลซิส เท่ากับ 52.23 MJ/kg มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานเท่ากับ 14.68% อัตราการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจำเพาะเท่ากับ 174 liter/tonne และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 79 MJ/liter ดังนั้นจะเห็นได้ว่ากระบวนการจัดการขยะพลาสติกโดยนำมาเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานด้วยวิธีการนี้สามารถจัดการขยะพลาสติกได้ และถือว่าเป็นแนวทางการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมและการเปลี่ยนรูปขยะเป็นพลังงานอีกทางหนึ่งเช่นกัน

**คำสำคัญ:** ไพโรไลซิส น้ำมันไพโรไลซิส ขยะพลาสติก

## บทนำ

จากสถานการณ์ปัจจุบันขยะพลาสติกถือว่ามีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งนี้เนื่องจากการเติบโตทางภาค เศรษฐกิจและอุตสาหกรรมต่าง ๆ ส่งผลทำให้ต้องหาแนวทางในการจัดการขยะพลาสติกเหล่านี้ จากรายงานแผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะพลาสติก ระยะที่ 2 (พ.ศ.2566 – 2570) ของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและ สิ่งแวดล้อม พบว่าในปี 2564 มีปริมาณขยะมูลฝอยเกิดขึ้นประมาณ 24.98 ล้านตัน มีเพียงประมาณ 3.89 ล้านตัน (16%) ที่ถูกคัดแยก ณ ต้นทางเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ก่อนนำไปเข้าสู่กระบวนการกำจัด และอีกส่วนที่อยู่ตามบ้านเรือนหรือ เทศบาล ที่ดำเนินการกำจัดเองประมาณ 1.58 ล้านตัน (6%) และมีขยะที่กำจัดอย่างไม่ถูกต้องอีก 6.23 ล้านตัน (25%) อย่างไรก็ตามเมื่อสำรวจพบว่าขยะประเภทพลาสติกมีปริมาณถึง 28% ประกอบไปด้วยขยะพลาสติกใช้ครั้งเดียว (Single use Plastics) เป็นถุงพลาสติก เช่น ถุงร้อน ถุงเย็น ถุงหูหิ้ว รองลงมาได้แก่ฟิล์มพลาสติก เช่น ฟิล์มหุ้มสินค้า ของไปรษณีย์ พลาสติก ส่วนที่เหลือเป็น ขวด ฟางขวด แก้ว ขาม กล่องกระดาษ กล่องโฟม เป็นต้น ทั้งนี้เมื่อเทียบปริมาณขยะพลาสติกเฉพาะ ฟางขวดน้ำ จะมีปริมาณ 1.88% ของปริมาณขยะพลาสติกทั้งหมด 2.76 ล้านตัน [1] ในส่วนของการจัดการขยะพลาสติกใน ปัจจุบันพบว่าการส่งเสริมรณรงค์ในเรื่องการคัดแยก การนำกลับมาใช้ใหม่ การรีไซเคิล และการนำไปฝังกลบ ซึ่งถือว่าเป็น วิธีการในการจัดการระดับต้นน้ำ ปัจจุบันมีการนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบของขยะอัดแท่ง หรือ RDF เพื่อนำไปเป็น เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ในเตาเผาระดับอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างไรก็ตามยังคงมีต้นทุนในการผลิตที่ยังคงสูง และเรื่องมลพิษ ที่เกิดจากการใช้เชื้อเพลิงประเภทนี้ [2] อีกแนวทางหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในปัจจุบันคือการนำขยะพลาสติกเปลี่ยนรูป เป็นพลังงาน (Waste to energy) นั้นโดยนำมาผลิตเป็นน้ำมันขยะพลาสติกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านเชื้อเพลิง หรือการ นำไปสังเคราะห์ทางด้านเคมีอื่น ๆ ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) จากงานวิจัยของ พนธกร และคณะ (2568) ได้ ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งจากขยะประเภทโพลีเอธิลีนในระดับ

ห้องปฏิบัติการ พบว่าให้ปริมาณน้ำมันขยะพลาสติกถึง 16.54 %wt ที่อุณหภูมิ 500°C และให้ค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 52-55 MJ/kg [3] และ Kluska et al., (2014) ได้ศึกษาการนำขยะพลาสติกประเภทเชื้อเพลิง RDF มาผลิตน้ำมันผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 500°C โดยให้อัตราการให้ความร้อน 3°C/min พบว่าให้ผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิส 34%wt ของแข็ง 26%wt และแก๊สไพโรไลซิส 40%wt [4] ขณะเดียวกันงานวิจัยของ ซินภัทร์ และคณะ (2021) ได้ทำการศึกษานำน้ำมันขยะพลาสติกไปใช้ในเครื่องยนต์ พบว่าเครื่องยนต์ที่กำลังเบรกสูงสุด 11.4 hp โดยให้ค่าความร้อนน้ำมันขยะพลาสติก เท่ากับ 42.7 MJ/kg และมีอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงสุด 14.5 kg/kWh [5] จากงานวิจัยจะเห็นได้ว่าแนวทางการนำกระบวนการไพโรไลซิสมาใช้ในการเปลี่ยนรูปขยะพลาสติกเป็นพลังงานนั้นถือว่ามีที่น่าสนใจในเชิงเทคนิคและการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในเชิงพลังงานและยังเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการขยะพลาสติกอีกทางหนึ่งได้ด้วยเช่นกัน

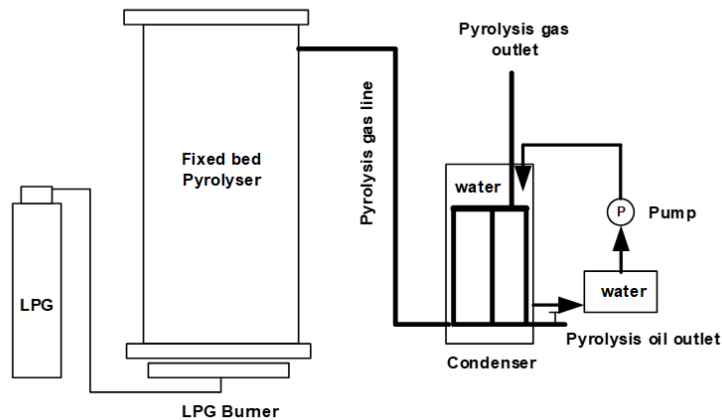
ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาระบบการเปลี่ยนขยะพลาสติกเป็นน้ำมันผ่านกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้ขยะประเภท HDPE ซึ่งเลือกใช้ฝาขวดน้ำดื่ม โดยทำการศึกษาลักษณะของอุณหภูมิที่ใช้ในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดนิ่ง และทำการควบแน่นแก๊สไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ของเหลวในรูปของน้ำมันไพโรไลซิส การประเมินผลผลิตที่ได้ในเชิงพลังงาน สมบัติทางกายภาพ ค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิส ซึ่งผลการศึกษานี้จะนำไปพัฒนาต่อยอดในเชิงการขยายขนาดของระบบ หรือการพัฒนาเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ให้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นการพัฒนาต่อยอด รวมถึงการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวเพื่อจัดการขยะพลาสติกโดยการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานต่อไป

## วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้เลือกใช้ขยะพลาสติกประเภท พอลิเอธิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) ซึ่งเป็นฝาขวดน้ำดื่ม โดยนำมาล้างทำความสะอาด ตากให้แห้ง และทำการทดลองปริมาณครั้งที่ 5 kg ซึ่งมีค่าความร้อนเท่ากับ 45.9 MJ/kg [6] ดังภาพที่ 1 โดยเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสชนิดเบดนิ่ง (Fixed bed) ใช้ถังขนาดปริมาตร 200 ลิตร โดยใช้แหล่งความร้อนจากแก๊สหุงต้ม (LPG) ขนาดถัง 15 kg ซึ่งในการทดลองจะทำการศึกษาอุณหภูมิในช่วง 150 – 350°C โดยทำปฏิกิริยาจนเกิดแก๊สไพโรไลซิสสิ้นสุดจึงหยุดทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ทั้งนี้แก๊สไพโรไลซิส (Pyrolysis gas) ที่ได้จะถึงส่งมายังชุดควบแน่นผ่านน้ำเย็นอุณหภูมิแวดล้อมในช่วง 28-33°C และมีระบบหมุนวนน้ำผ่านปั๊ม โดยใช้น้ำขนาด 50 liter ภายหลังจากการควบแน่นเป็นของเหลวแล้วจะถูกนำออกจากชุดควบแน่นเป็นน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis oil) ส่วนของแข็ง (Solid) ก็จะถูกนำออกหลังจากถังปฏิกรณ์เย็นตัวลง ก็จะนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาสัดส่วนของผลผลิตไพโรไลซิส โดยแผนผังการทดลองของงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 2 ในส่วนของการตรวจวัดอุณหภูมิใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิลประเภท K (Thermocouple type K) ที่ช่วงการตรวจวัดสูงสุดไม่เกิน 1,200°C และบันทึกอุณหภูมิลงในเครื่องบันทึก (Datalogger) ยี่ห้อ GRAPHTEC รุ่น GL240 ในส่วนของอุณหภูมิผิวถังเตาปฏิกรณ์และถังควบแน่น ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ยี่ห้อ HIOKI FT3700-20 ช่วงการวัดอุณหภูมิ -60°C ถึง 550°C ที่ระดับความแม่นยำ 0.1°C ในส่วนของค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิส จะใช้เครื่องวัดพลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 ในการวิเคราะห์ค่าความร้อนเชื้อเพลิงจากน้ำมัน



ภาพที่ 1 ขยะพลาสติกประเภท HDPE ที่ใช้ในการทดลองงานวิจัยนี้



ภาพที่ 2 แผนผังของระบบผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกขนาด 200 liter

### ประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน

การวิเคราะห์หาค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน (Conversion Efficiency) ของน้ำมันไพโรไลซิสหาได้จากสัดส่วนของน้ำมันไพโรไลซิสกับค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิส และปริมาณขยะพลาสติกกับค่าความร้อนของพลาสติก ดังแสดงในสมการที่ 1 [7]

$$\text{Conversion efficiency} = \frac{\mathcal{E}_{\text{pyrolysis oil}}}{\mathcal{E}_{\text{plastic}}} \times 100 \quad (1)$$

โดย Conversion Efficiency คือประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน (%)  $\mathcal{E}_{\text{pyrolysis oil}}$  คือสัดส่วนของน้ำมันพลาสติกกับค่าความร้อนของน้ำมัน (MJ/kg)  $\mathcal{E}_{\text{plastic}}$  คือปริมาณขยะพลาสติกกับค่าความร้อนของพลาสติก (MJ/kg)

### อัตราการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจำเพาะ

อัตราการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจำเพาะ หาได้จากน้ำหนักน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้ต่อค่าความหนาแน่นของน้ำมันไพโรไลซิส หาได้จากสมการที่ 2 [7,8]

$$\text{Specific pyrolysis oil} = \frac{M_{\text{pyrolysis oil}}}{\rho_{\text{pyrolysis oil}}} \quad (2)$$

โดยที่ *Specific pyrolysis oil* คือ อัตราการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส (liter/tonne)  $M_{\text{pyrolysis oil}}$  คือ น้ำหนักของน้ำมันไพโรไลซิสโดยสัดส่วนส่วน (%wt)  $\rho_{\text{pyrolysis oil}}$  คือ ความหนาแน่นน้ำมันไพโรไลซิส (kg/liter)

### อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption) คือพลังงานที่ใช้ในกระบวนการได้แก๊สหุงต้ม และไฟฟ้าจากปั้มน้ำหมุนเวียนในชุดควบแน่นน้ำมัน ดังสมการที่ 3

$$SEC = \frac{3.6 P_e + E_{lpg}}{M_{\text{pyrolysis oil}}} \quad (3)$$

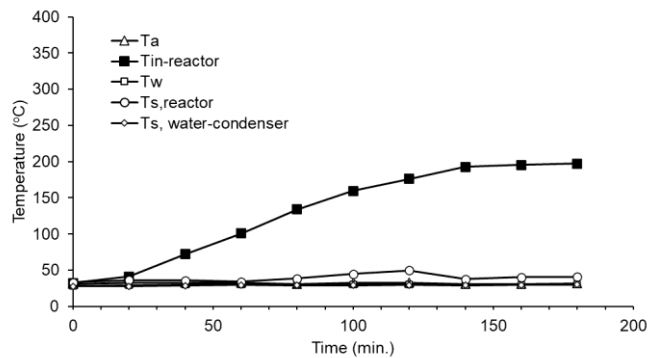
โดยที่ *SEC* คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)  $M_{\text{pyrolysis oil}}$  คือน้ำหนักของน้ำมันไพโรไลซิส (kg)  $P_e$  คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh) และ  $E_{lpg}$  คือค่าพลังงานของแก๊สหุงต้ม (MJ)

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

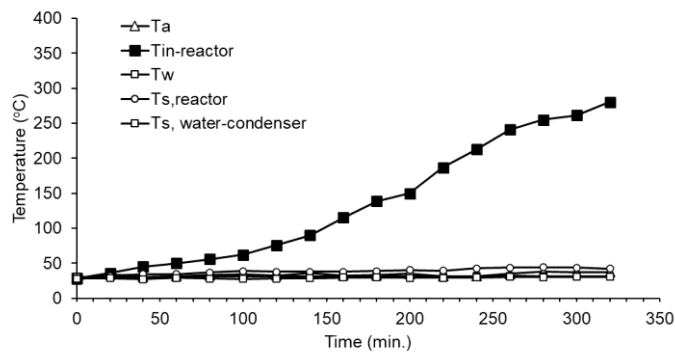
### ผลการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

จากผลการทดสอบการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกผ่านกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ  $190 \pm 5^\circ\text{C}$   $280 \pm 5^\circ\text{C}$  และ  $340 \pm 5^\circ\text{C}$  พบว่ามีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันที่ 180 min 320 min และ 140 min ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา  $190 \pm 5^\circ\text{C}$  นั้นพบว่าเมื่อให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องจนถึง 130 min อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์มีอุณหภูมิสูงประมาณ  $176^\circ\text{C} - 197^\circ\text{C}$  จนถึงระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 180 min ปริมาณแก๊สไพโรไลซิสทั้งหมดลดลง ในส่วนของอุณหภูมิของน้ำในชุดควบแน่น อุณหภูมิผิวของเตาปฏิกรณ์ อุณหภูมิผิวของชุดควบแน่น มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม โดยค่าอยู่ในช่วง  $29^\circ\text{C} - 39^\circ\text{C}$  ดังภาพที่ 4 (ก.) ในส่วนของอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่  $280 \pm 5^\circ\text{C}$  พบว่ามีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานถึง 320 min และเริ่มจุดติดไฟของแก๊สไพโรไลซิสที่เวลา 160 min อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเท่ากับ  $138^\circ\text{C}$  ดังภาพที่ 4 (ข.) และในส่วนของการทำงานไพโรไลซิสที่  $340 \pm 5^\circ\text{C}$  พบว่าใช้

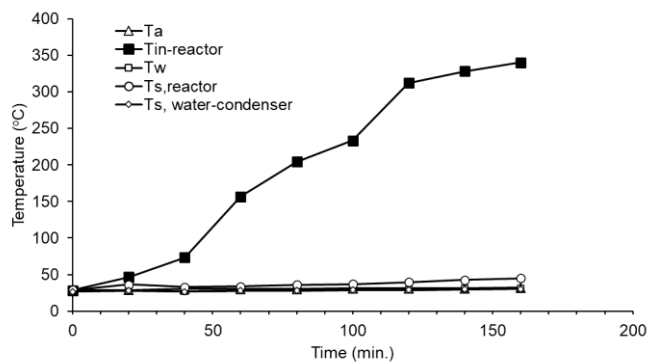
ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส 160 min และเริ่มจุดติดไฟของแก๊สไพโรไลซิสที่ 60 min อุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์เท่ากับ 156°C ดังภาพที่ 4 (ค.) ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่แตกต่างกันมีผลทำให้ผลผลิตที่ได้ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาแตกต่างกัน



ก.) ผลการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและชุดควบแน่นที่อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์  $190 \pm 5^{\circ}\text{C}$



ข.) ผลการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและชุดควบแน่นที่อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์  $280 \pm 5^{\circ}\text{C}$

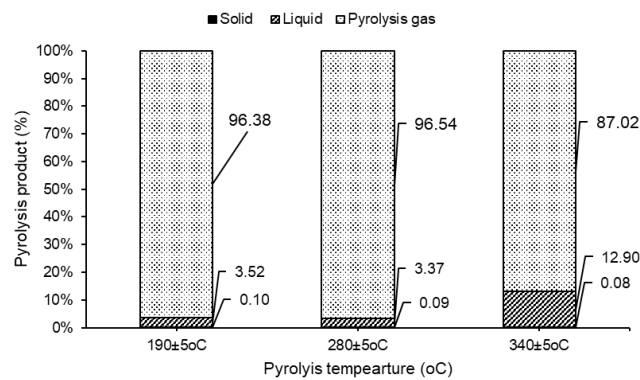


ค.) ผลการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและชุดควบแน่นที่อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์  $340 \pm 5^{\circ}\text{C}$

ภาพที่ 4 ผลการกระจายอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสในช่วงอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ต่าง ๆ

## ผลการประเมินผลผลิตของกระบวนการไพโรไลซิส

จากผลการทดลองผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อผลผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสตามเงื่อนไขการทดลอง พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ได้ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส  $340\pm 5^{\circ}\text{C}$  จะได้ผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิส 12.90 %wt และได้ของแข็งที่เหลือในเตาปฏิกรณ์ 0.08 %wt และแก๊สไพโรไลซิส 87.02 %wt ดังแสดงในภาพที่ 5 สอดคล้องกับงานวิจัยของ พนธกร และคณะ (2568) ที่ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิสโดยที่อุณหภูมิประมาณ  $500^{\circ}\text{C}$  จะให้ผลผลิตน้ำมันไพโรไลซิส 16.54 %wt ของแข็ง 2.85 %wt และแก๊สไพโรไลซิส 80.61 %wt [3] อย่างไรก็ตามเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปพลังงาน พบว่ามีค่าเท่ากับ 14.68 % ให้อัตราการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจำเพาะเท่ากับ 174.30 liter/tonne และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในกระบวนการเท่ากับ 79.33 MJ/liter ที่เงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์เท่ากับ  $340\pm 5^{\circ}\text{C}$  ในส่วนของการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สไพโรไลซิส พบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกจะต้องประกอบด้วยแก๊ส ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เท่ากับ 9.08 % ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) เท่ากับ 6.56 % ก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) เท่ากับ 4.10 % สำหรับขยะพลาสติก RDF [4] หากเป็นยางรถยนต์พบว่าองค์ประกอบแก๊สมีเทน เท่ากับ 2.6 % ก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 3.4 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เท่ากับ 14.0 % [9] ดังแสดงผลการวิเคราะห์กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 5 ผลผลิตของกระบวนการไพโรไลซิสที่ช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิสต่าง ๆ

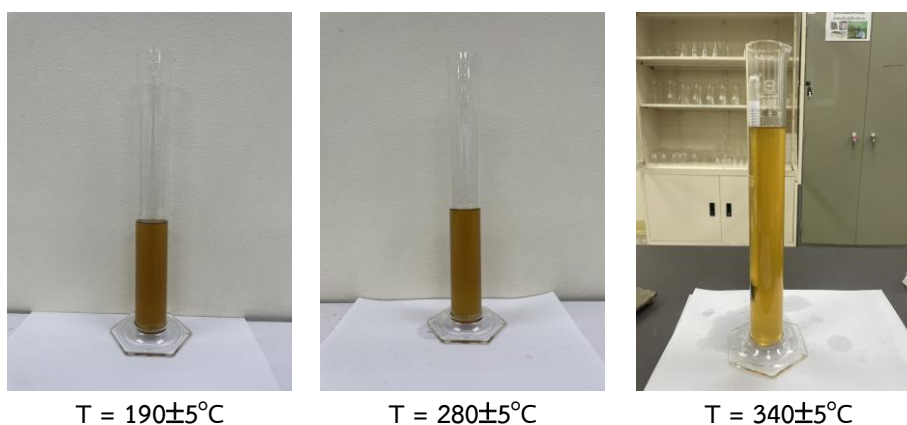
ตารางที่ 1 ผลการประเมินเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

รายละเอียด	อุณหภูมิไพโรไลซิส (°C)		
	190±5°C	280±5°C	340±5°C
Conversion Efficiency (%)	3.81	3.71	14.68
อัตราการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจำเพาะ (liter/ton)	49.60	46.16	174.30
อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/liter)	239.97	399.93	79.33
ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา (min)	180	320	140

## ผลการวิเคราะห์สมบัติน้ำมันไพโรไลซิส

จากผลการทดลองกระบวนการไพโรไลซิสขยะพลาสติกตามเงื่อนไขในส่วนนี้จะแสดงลักษณะของสื่อน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการที่อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ต่าง ๆ ดังภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าได้ของเหลว น้ำมันไพโรไลซิสมี

ลักษณะสีส้มแดงคล้ายกับน้ำมันที่ได้จากพืช อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์สมบัติพบว่าน้ำมันไพโรไลซิสยังมีความเป็นกรดสูงมีค่าพีเอช 4.0-5.0 โดยมีความหนาแน่นของน้ำมันในช่วง 707-737 kg/m<sup>3</sup> และให้ค่าความร้อนของน้ำมันในช่วง 49-52 MJ/kg ดังตารางที่ 2 อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ พนธกร และคณะ (2568) พบว่าน้ำมันขยะพลาสติกมีความหนาแน่นเท่ากับ 660-720 kg/m<sup>3</sup> [3] และงานวิจัยของ Zoram et al., (2021) พบว่าน้ำมันไพโรไลซิสจากยางรถยนต์นั้น มีค่าความหนาแน่น 937 kg/m<sup>3</sup> และค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 42.4 MJ/kg ขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับ Commercial No.2 Diesel พบว่ามีความหนาแน่น 820-860 kg/m<sup>3</sup> และค่าความร้อนเท่ากับ 44-46 MJ/kg [9] ดังนั้นจะเห็นได้ว่าลักษณะและสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากงานวิจัยนี้ถือว่ามีความใกล้เคียงกับการศึกษา งานวิจัยที่ทำการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติก



ภาพที่ 6 ลักษณะของน้ำมันจากขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันไพโรไลซิส

สมบัติทางเคมี	อุณหภูมิไพโรไลซิส (°C)		
	190±5°C	280±5°C	340±5°C
pH	4.0	4.0	5.0
Specific gravity (SG)	0.71	0.73	0.74
Density (kg/m <sup>3</sup> )	707.87	727.81	737.78
High heating value (MJ/kg)	49.64	50.51	52.23

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาการผลิตน้ำมันจากขยะพลาสติกประเภท HDPE ซึ่งใช้ฝาขวดน้ำดื่มมาทำการศึกษาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่ง โดยใช้ปริมาณพลาสติก 5 kg ที่อุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ในช่วง 190 – 340°C พบว่าเงื่อนไขการทำปฏิกิริยาในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 340±5°C ที่ระยะเวลา 140 min จะให้ผลผลิตน้ำมันสูง เท่ากับ 12.90 %wt หรือประมาณ 0.87 liter โดยให้สมบัติน้ำมันไพโรไลซิสมีความเป็นกรดที่ pH เท่ากับ 5.0 ความหนาแน่นของน้ำมันเท่ากับ 737 kg/m<sup>3</sup> และให้ค่าความร้อนน้ำมันไพโรไลซิส เท่ากับ 52.23 MJ/kg มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานเท่ากับ 14.68% อัตราการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจำเพาะเท่ากับ 174 liter/tonne และมีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานในการ

ผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเท่ากับ 79 MJ/liter จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถกำจัดขยะพลาสติกประเภท HDPE หรือขยะพลาสติกชนิดที่เป็นฝาขวดน้ำ โดยสามารถเปลี่ยนขยะเป็นพลังงาน (Waste to Energy) ในรูปแบบน้ำมันไพโรไลซิสได้ ซึ่งถือว่าเป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการจัดการขยะพลาสติกเพื่อเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากโครงการผลิตและพัฒนาศัภษาบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และห้องปฏิบัติการพลังงานสะอาดและเกษตรอัจฉริยะ (Clean Energy & Smart Agricultural Laboratory)

### เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. (2023). **แผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะพลาสติก ระยะที่ 2 (พ.ศ.2566 - 2570)**. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.
- [2] สายัน เฝือยา, สมพร เพ็องจันทร์, เพ็ญศิริ ฉิรินัง และ อุดมวิทย์ ไชยสกุลเกียรติ. (2022). การพัฒนารูปแบบการจัดการขยะพลาสติกในจังหวัดสมุทรปราการตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน. **วารสารวิชาการ การจัดการภาครัฐและเอกชน**, 4, 195-209.
- [3] พนธกร เหลี่ยมเคลือบ, กิตติกร สาสุจิตต์, เสมอขวัญ ตันติกุล, พัชรี อินธนู และ นิกราน ทอมดวง. (2525). การทดลองผลิตน้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกด้วยกระบวนการไพโรไลซิสชนิดเบดนิ่ง. **วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน**, 8(2), 27-34,
- [4] Kluska, J., Kardaś, D., Kazimierski, P. and Klein, M., (2014). Pyrolysis of biomass and refuse-derived fuel performance in laboratory scale batch reactor. *Archives of Thermodynamics*, 35(1), 141-152.
- [5] ชินภัทร ธุระการ, เกยูร ดวงอุปมา, กัมปนาท ไชยเพชร, อภิชน มุ่งชู, สุพัตรา บุญโธสง และ สุรสิทธิ์ พ้อคำ. (2021). ผลของน้ำมันขยะพลาสติกจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วต่อแรงม้าเบรกต่ำสุดและอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะเบรกสูงสุดของเครื่องยนต์. **วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน**, 4(2), 14-20.
- [6] Maithomklang, S., Sukjit, E., Srisertpol, J., Klinkaew, N. and Wathakit, K., (2023). Pyrolysis oil derived from plastic bottle caps: characterization of combustion and emissions in a diesel engine. *Energies*, 16, 1-21.
- [7] Javed, N., Muhammad, S., Iram, S., Ramay, M. W., Jaffri, S. B., Damak, M., Fekete, G., Varga, Z., Székács, A. and Aleksza, L., (2022). Analysis of fuel alternative products obtained by the pyrolysis of diverse types of plastic materials isolated from a dumpsite origin in Pakistan. *Polymers*, 15, 2-16.

- [8] Aisien, F. A. and Aisien, E. T., (2023). Production and characterization of liquid oil from the pyrolysis of waste high-density polyethylene plastics using spent fluid catalytic cracking catalyst. *Sustainable Chemistry for Climate Action*, 2, 1-9.
- [9] Čepić, Z., Mihajlović, V., Đurić, S., Milotić, M., Stošić, M., Stepanov, B. and Ilić Mićunović, M., (2021). Experimental analysis of temperature influence on waste tire pyrolysis. *Energies*, 14, 1-11.

การผลิตไฮโดรไลสจากชีวมวลแหล่งพลังงานความร้อนจากระบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กใน  
กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนในเซชัน

Hydrolysate Production from Biomass via Hydrothermal Carbonization Using  
Magnetic Induction Heating

วิทยา ชูเนตร<sup>1</sup>, อลิสา ธรรมฤทธิ<sup>1</sup>, จริญญา ภาคพรม<sup>1</sup>, พิสิษฐ์ จันแปงเงิน<sup>1</sup>, ชาญชัย ทองโสภา<sup>1</sup>, นุชนาฏ สันทาลุนัย<sup>2</sup>  
สำราญ สันทาลุนัย<sup>1</sup> และ สำเร็จ สันทาลุนัย<sup>1\*</sup>

Wittaya ChUNET<sup>1</sup>, Alisa Thammarit<sup>1</sup>, Jariya Pakprom<sup>1</sup>, Pisit Janpangngern<sup>1</sup>, Chanchai Thongsopa<sup>1</sup>,  
Nuchanart Santalunai<sup>2</sup> Samran Santalunai<sup>1</sup> and Samroeng Santalunai<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน  
นครราชสีมา 30000

<sup>1</sup>Electronic Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,  
Nakhonratchasima 30000

<sup>2</sup>Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of  
Technology Isan, Nakhon Ratchasima 30000

<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 08-353100702. E-mail address: Samroeng.js@gmail.com

### Abstract

This study develops an induction-heated hydrothermal carbonization (HTC) system to convert tobacco-residue biomass into hydrochar and hydrolysate. A high-power coil driven by a half-bridge inverter (10–20 kHz, 5,000 W) heats a sealed metal reactor; feedstock (tobacco: water = 50:5, w/w) was run for 2 and 3 h, with temperature logged every 5 min and pressure every 30 min. Products were separated into hydrochar (oven-dried at 105 °C for 3 h) and hydrolysate. During the 2-h run, the temperature reached ~140 °C and the pressure ~4.1 bar, demonstrating the feasibility of induction heating for HTC. Optimizing power density, coil-to-reactor spacing, insulation, and water ratio is still required to achieve conventional HTC temperatures (~200–230 °C) and improve product quality.

**Keywords:** Hydrothermal carbonization; hydrolysate production; Magnetic induction heating; Hydrolysate formation; Tobacco biomass conversion

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ออกแบบและประเมินระบบไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) สำหรับแปรรูปใบยาสูบเหลือทิ้ง โดยใช้การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำแทนการเผาไหม้แก๊ส ต้นแบบประกอบด้วยขดลวดกำลังสูงขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์ฮาร์ฟบริดจ์ (10–20 kHz, 5,000 W) ให้ความร้อนผนังถังโลหะในสภาวะปิด สูตรป้อนใบยาสูบต่อน้ำ 50:5 และทดสอบที่เวลาพัก 2 และ 3 ชั่วโมง โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาที และความดันทุก 30 นาที ผลผลิตแยกเป็นไฮโดรชาร์ (อบที่ 105 °C 3 ชม.) และไฮโดรไลเสต สำหรับการทดสอบ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุด ~140 °C และความดัน ~4.1 bar แสดงศักยภาพของการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำต่อกระบวนการ HTC ทั้งนี้ยังควรปรับความหนาแน่นกำลัง ระยะเวลา-ถึง ฉนวน และสัดส่วนน้ำ เพื่อเข้าใกล้ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม (~200–230 °C) และยกระดับคุณภาพผลิตภัณฑ์

**คำสำคัญ:** การคาร์บอนซ์แบบไฮโดรเทอร์มอล; การผลิตไฮโดรชาร์; การให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก; การสร้างไฮโดรไลเสต; การแปรรูปชีวมวลใบยาสูบ

## บทนำ

ปัญหาการจัดการขยะชีวมวลและของเสียอินทรีย์จากเกษตร อุตสาหกรรมอาหาร และชุมชนที่มีความรุนแรงตามการเติบโตทางเศรษฐกิจและจำนวนประชากร รายงานสหประชาชาติ [1–2] ชี้ว่าปริมาณขยะชีวมวลทั่วโลกเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง ขณะที่วิธีกำจัดแบบดั้งเดิม เช่น ฝังกลบและเผา ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก ซึ่งกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีแปรรูปที่ยั่งยืนเพื่อเปลี่ยนของเสียให้เป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพมูลค่าสูงและนำกลับมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เทคโนโลยีไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน เป็นกระบวนการเคมี-ความร้อนที่แปรรูปชีวมวลขั้นสูง (~60–80%) โดยไม่ต้องอบแห้ง ภายใต้อุณหภูมิ ~150–250 °C และความดันอิมพัชของน้ำ ผลิตภัณฑ์หลักได้แก่ไฮโดรชาร์ (เชื้อเพลิงชีวมวลแข็งหรือวัตถุดิบคาร์บอนฟังก์ชัน), ไฮโดรไลเสต (สารละลายอินทรีย์) และก๊าซจากการแตกสลายอินทรีย์ [3–4] กระบวนการขับเคลื่อนด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ดีคาร์บอกซิเลชัน และดีไฮเดรชัน ที่ย่อยสลายเซลลูโลส-เฮมิเซลลูโลส-ลิกนินให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ทำให้การแปลงของเสียอินทรีย์มีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน

อย่างไรก็ตามงานวิจัย HTC ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้น hydrochar สำหรับพลังงานและวัสดุคาร์บอนฟังก์ชัน แต่ hydrolysate ซึ่งเป็นเศษของเหลวกลับได้รับความสนใจน้อย ทั้งที่มีสารอินทรีย์และธาตุอาหารพืชสำคัญจำนวนมาก (เช่น กรดอินทรีย์ น้ำตาลอนุพันธ์ ฟีนอล และ N-P-K) จึงมีศักยภาพต่อการใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพหรือสารตั้งต้นผลิตพลังงานชีวภาพต่อเนื่อง [5–6]

หนึ่งในข้อจำกัดของกระบวนการ HTC คือการให้ความร้อนแบบดั้งเดิมที่อาศัยการนำ-การพาผ่านผนังถัง ซึ่งทำให้ร้อนช้า กระจายไม่สม่ำเสมอ และกระทบต่อความสมบูรณ์ของปฏิกิริยา [7] แนวทางแก้คือการใช้เทคโนโลยีให้ความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ที่สร้างกระแสไหลวนในผนังโลหะให้เกิดความร้อนโดยตรง จึงร้อนเร็ว สม่ำเสมอ และลดการสูญเสียพลังงาน [8] ผลคือเร่งการย่อยสลายเซลลูโลส-เฮมิเซลลูโลส-ลิกนิน เพิ่มสารอินทรีย์ละลายน้ำ และยกระดับปริมาณ/คุณภาพของไฮโดรไลเสตเมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม

งานวิจัยนี้ประยุกต์การให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ (MIH) ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) เพื่อยกระดับ hydrolysate จากผลพลอยได้ให้เป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพมูลค่าสูง โดยมุ่งพัฒนาและประเมินระบบ HTC ที่ใช้ MIH สำหรับชีวมวลเปียก ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ เวลา และอัตราส่วนชีวมวลต่อน้ำต่อปริมาณ-คุณภาพของ

hydrolysate พร้อมวิเคราะห์สมบัติและสารอาหารที่ละลายน้ำ ได้แก่ pH, COD, TOC, ไนโตรเจน-ฟอสฟอรัส-โพแทสเซียม และกรดอินทรีย์ เพื่อจัดทำองค์ความรู้รองรับการใช้ประโยชน์ hydrolysate อย่างยั่งยืน

## วิธีการวิจัย

### การเตรียมวัตถุดิบสำหรับทดสอบ

ใบยาสูบซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ถูกบดให้ขนาดสม่ำเสมอและผสมน้ำในอัตราส่วน 50:5 (โดยมวล) ก่อนบรรจุในถังปฏิกิริยาโลหะและให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำจากขดลวดกำลังสูงที่ขับเคลื่อนด้วยอินเวอร์เตอร์แบบฮาร์ฟบริดจ์ (10–20 kHz, 5,000 W) การทดลองกำหนดระยะเวลา 2 และ 3 ชั่วโมง โดยบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาทีและความดันทุก 30 นาที หลังสิ้นสุดปฏิกิริยา แยกผลิตภัณฑ์เป็นของแข็ง (ไฮโดรชาร์) และของเหลว (ไฮโดรไลเสต) ด้วยการกรอง และนำไฮโดรชาร์ไปอบที่ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อเตรียมทดสอบ ระบบติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ-ความดัน พร้อมอุปกรณ์ความปลอดภัย (เบรกเกอร์และพัดลมระบายความร้อน) ขึ้นตอนก่อนเริ่มงานประกอบด้วยการปรับอัตราส่วนน้ำ ระยะห่างขดลวด และระดับกำลังจ่ายตามผลการจำลอง เพื่อให้ได้สภาวะปฏิกิริยาที่สม่ำเสมอและปลอดภัย

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดในการวิจัย

รายการ	ค่า
อุณหภูมิเป้าหมาย HTC (°C)	200-300
ความดันเป้าหมาย (บาร์)	16-23
เวลาปฏิกิริยา (นาที)	30-60
กำลังจ่ายทดสอบ (กิโลวัตต์)	5,000

การนำใบยาสูบมาผ่านกระบวนการ Hydrothermal Carbonization (HTC) สามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยกระบวนการ HTC จะเปลี่ยนใบยาสูบให้เป็นถ่านชีวภาพ ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น ลดปริมาณขยะชีวมวลและช่วยกำจัดสารพิษในใบยาสูบ ทำให้ถ่านชีวภาพที่ได้ปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ ถ่านชีวภาพยังสามารถนำไปใช้ในเกษตรกรรมเพื่อปรับปรุงคุณภาพดิน ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์และกักเก็บคาร์บอนในดิน หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีค่าพลังงานสูง ซึ่งช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิล



(ก) ก่อนบด



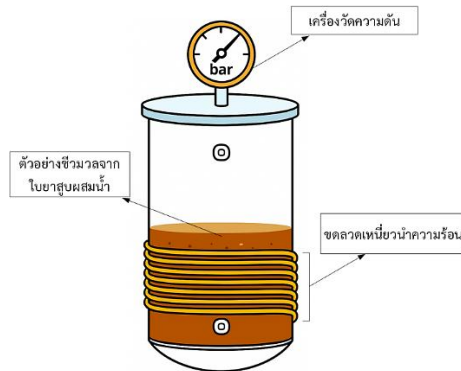
(ข) หลังบด

ภาพที่ 1 ใบยาสูบแห้งสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบชีวมวลในการทดลองกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเนชัน

### ระบบทดสอบผลิตไฮโดรไลเสต

ระบบทดสอบผลิตไฮโดรไลเสตจากชีวมวลด้วยความร้อนจากสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (ภาพที่ 2) ประกอบด้วยภาชนะปฏิกิริยาทรงกระบอกปิดสนิท ทนแรงดัน-อุณหภูมิสูง ติดตั้งเกจวัดความดันแบบเรียลไทม์เพื่อควบคุมสภาวะและ

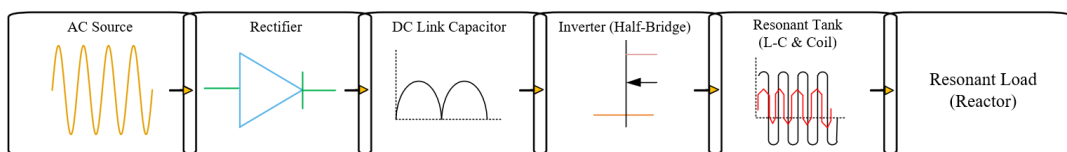
ความปลอดภัย ภายในบรรจุตัวอย่างชีวมวลผสมน้ำให้ระดับครอบคลุมขดลวดทองแดงที่พันรอบภาชนะ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กก่อให้เกิดความร้อนเหนี่ยวนำ ทำให้อุณหภูมิและแรงดันเพิ่มขึ้น กระตุ้นการแตกตัวของสารอินทรีย์จนได้ไฮโดรไลเสตที่พร้อมต่อยอดใช้เป็นวัตถุดิบด้านพลังงานชีวภาพหรือการเกษตร ระบบถูกออกแบบให้ควบคุมได้และรักษาเงื่อนไขปฏิกิริยาให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต



ภาพที่ 2 ระบบทดสอบผลิตไฮโดรไลเสตจากชีวมวลแหล่งพลังงานความร้อนจากระบบเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

### ทฤษฎีและหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

กระบวนการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเป็นเทคนิคให้ความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง โดยใช้ไฟฟ้ากระแสสลับป้อนเข้าขดลวดให้เกิดสนามแม่เหล็กสลับซึ่งเชื่อมต่อกับชิ้นงาน เมื่อชิ้นงาน (ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าและมีสมบัติแม่เหล็ก) อยู่ในสนามดังกล่าว จะเกิดกระแสไหลวน ภายในชิ้นงานตามกฎของเลนซ์ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก กระแสไหลวนนี้สูญเสียพลังงานผ่านความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ ทำให้เกิดความร้อนโดยตรงภายในเนื้อวัสดุ นอกจากนี้ในวัสดุเฟอร์โรแมกเนติกยังมีการสูญเสียจากฮิสเทอรีซิสแม่เหล็กซึ่งเพิ่มการเกิดความร้อนร่วมด้วย จึงไม่ต้องอาศัยการถ่ายเทความร้อนจากผิวภายนอก ส่งผลให้การเพิ่มอุณหภูมิรวดเร็ว ควบคุมได้แม่นยำ และมีประสิทธิภาพพลังงานสูง



ภาพที่ 3 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเหนี่ยวนำความร้อน

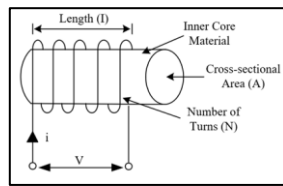
จากภาพที่ 3 ซึ่งเป็นการแสดงลำดับการทำงานของระบบจ่ายพลังงานสำหรับการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำอย่างเป็นขั้นตอน โดยเริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งถูกแปลงเป็นกระแสตรงด้วยวงจรเรกติไฟเออร์ และทำให้แรงดันเรียบด้วยตัวเก็บประจุคัปปลิงฝั่งกระแสตรง ต่อจากนั้นแรงดันกระแสตรงดังกล่าวถูกแปลงกลับเป็นกระแสสลับความถี่สูงด้วยอินเวอร์เตอร์แบบฮาล์ฟบริดจ์แล้วจ่ายเข้าสู่วงจรเรโซแนนซ์ที่ประกอบด้วยตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ (L-C) ร่วมกับคอยล์เหนี่ยวนำ เพื่อให้เกิดสภาวะเรโซแนนซ์และการถ่ายโอนพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง สุดท้ายพลังงานความถี่สูงถูกส่งต่อไปยังโหลดแบบเรโซแนนซ์ เพื่อก่อให้เกิดความร้อนภายในรีแอกเตอร์ตามเงื่อนไขที่กำหนด [9]

กระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสามารถถ่ายเทพลังงานไปยังวัสดุได้โดยตรงผ่านสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการป้อนไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงเข้าสู่ขดลวด เมื่อสนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำในวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก (Ferromagnetic) จะทำให้เกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ภายในวัสดุ ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าสูญเสียไปในรูปของความร้อนตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน [11] หลักการทำงานของระบบเหนี่ยวนำสามารถอธิบายได้ผ่านบล็อกไดอะแกรม เริ่มจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ ผ่านวงจรเรียงกระแสและตัวกรอง เพื่อให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงเรียบ ก่อนเข้าสู่วงจรถอนเวอร์เตอร์ที่แปลงกลับเป็นกระแสสลับความถี่สูงโดยใช้ MOSFET ทำหน้าที่เป็นสวิตช์กำลัง และจ่ายเข้าสู่วงจรรเรโซแนนซ์ซึ่งเชื่อมต่อกับโหลด เพื่อก่อให้เกิดความร้อนในวัสดุเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ( $L$ ) เป็นปัจจัยกำหนดขนาดของการเหนี่ยวนำในระบบ โดยขึ้นกับพารามิเตอร์ทางกายภาพของคอยล์และแกนอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ จำนวนรอบของขดลวด ( $N$ ) พื้นที่หน้าตัดของแกนที่ใช้พันขดลวด ( $A$ ) และคุณสมบัติของวัสดุแกนผ่านค่าความซึมซาบแม่เหล็ก ( $\mu$ ) รวมถึงความยาวเชิงแม่เหล็กของแกน ( $l$ ) ซึ่งความสัมพันธ์เชิงปริมาณสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) [12]

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (1)$$

โดยที่  $N$  คือจำนวนขดลวด,  $\mu$  คือค่าความซึมซาบของวัสดุแกน,  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของแกน และ  $l$  คือความยาวของแกน



ภาพที่ 4 แสดงขดลวดเหนี่ยวนำ

### เรโซแนนซ์

เรโซแนนซ์ (Resonance) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อระบบไฟฟ้าหรือระบบกลทางกายภาพได้รับแรงกระตุ้นที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของระบบนั้น ส่งผลให้เกิดการสั่นหรือการตอบสนองที่มีแอมพลิจูดสูงสุดในบริบทของวงจรไฟฟ้า เรโซแนนซ์จะเกิดขึ้นเมื่อค่าความเหนี่ยวนำ (Inductance) และค่าคาปาซิแตนซ์ (Capacitance) มีผลทำให้รีแอกแตนซ์รวมในระบบเป็นศูนย์ หรือสมดุลกัน ส่งผลให้ค่าความต้านทานรวมของวงจรมีค่าต่ำที่สุดในวงจร RLC แบบอนุกรม และมีค่ามากที่สุดใวงจร RLC แบบขนาน ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 [13]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

โดยที่  $f$  คือความถี่เรโซแนนซ์ (เฮิร์ตซ์),  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำ (เฮนรี) และ  $C$  คือค่าคาปาซิแตนซ์ (ฟาร์ัด)

### การถ่ายโอนความร้อน

ในการวิเคราะห์และออกแบบระบบให้ความร้อน ต้องคำนึงถึงกลไกการถ่ายโอนพลังงานความร้อน 3 รูปแบบ ได้แก่ (1) การนำความร้อน ซึ่งพลังงานเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุจากบริเวณร้อนสู่บริเวณเย็นโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของตัวกลาง (2) การพาความร้อน ซึ่งพลังงานถูกพาไปพร้อมการไหลเคลื่อนที่ของของไหลหรือลม และ (3) การแผ่รังสีความร้อน ซึ่งส่งผ่านพลังงานโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง สำหรับการให้ความร้อนด้วยการเหนี่ยวนำ จะเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการออกแบบวงจร เรโซแนนซ์ ให้ทำงานที่ความถี่เฉพาะซึ่งถ่ายโอนพลังงานสู่โหลดได้สูงสุด ส่งผลให้สร้างกระแสสลับความถี่สูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการสูญเสีย และยกระดับประสิทธิภาพการแปลงพลังงานโดยรวม

ปริมาณพลังงานที่ต้องใช้ในกระบวนการให้ความร้อน เป็นพลังงานที่ต้องใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของวัสดุให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งปริมาณพลังงานความร้อนในช่วงเพิ่มอุณหภูมิ สามารถหาได้จากสมการที่ 3 [14]

$$Q = mc\Delta T \quad (3)$$

โดยที่  $Q$  คือปริมาณความร้อน (จูล),  $m$  คือมวลของสาร (กิโลกรัม),  $c$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ 4.186 กิโลจูลต่อกิโลกรัมต่อองศาเซลเซียส และ  $\Delta T$  คือความแตกต่างของอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )

เมื่อต้องการคำนวณเป็นกำลังงานไฟฟ้าเทียบกับเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$P = \frac{Q}{t} \quad (4)$$

โดยที่  $P$  คือกำลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์),  $Q$  คือปริมาณพลังงานในหน่วยชั่วโมง (กิโลวัตต์ชั่วโมง) และ  $t$  คือเวลาในหน่วยชั่วโมง (h)

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันต้องควบคุมตัวแปรเวลา อุณหภูมิ และความดันเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์และไฮโดรไลสเสตอย่างมีประสิทธิภาพ โดยงานนี้ตั้งเงื่อนไขเวลาศึกษา 2 และ 3 ชั่วโมง ภายใต้กำลังจ่าย 5,000 วัตต์ และบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาทีควบคู่กับการบันทึกความดันทุก 30 นาที สำหรับรอบทดลอง 2 ชั่วโมง พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ถึงปฏิกิริยาอยู่ที่ประมาณ 140 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดประมาณ 4.1 บาร์ โดยแนวโน้มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตั้งแต่ช่วงเริ่มทดลองและชะลอตัวใกล้จุดสูงสุด ขณะเดียวกันความดันเพิ่มขึ้นเป็นขั้นตามช่วงเวลา (stepwise) จนถึงค่าดังกล่าวเมื่อสิ้นสุดรอบ 2 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบ HTC ที่ต้องอาศัยการกักเก็บพลังงานความร้อนและการเกิดไอน้ำภายในถังเพื่อขับเคลื่อนปฏิกิริยา

### ผลการทดลองวัดค่าความเป็นกรดต่างของไฮโดรไลสเสต

โดยทั่วไปแล้ว pH ของปุ๋ยน้ำที่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูกควรอยู่ระหว่าง 5.5–7.5 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจริญเติบโตของพืชส่วนใหญ่ ถ้าค่า pH ของปุ๋ยที่ต่ำกว่า 5.5 จะเป็นกรดมากเกินไป และถ้า pH สูงกว่า 7.5 จะมีความเป็นด่างมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้พืชเติบโตได้ไม่ดี การปรับค่า pH ของปุ๋ยควรสอดคล้องกับดิน เพื่อให้เกิดการดูดซึมสารอาหารที่มีประสิทธิภาพ

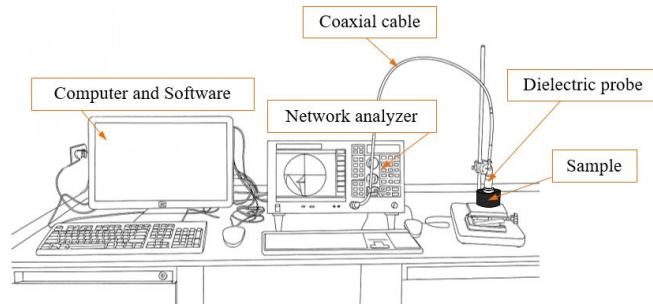


ภาพที่ 5 ผลการทดสอบวัดค่าความเป็นกรดต่างของน้ำใบยาสูบที่เวลาต่าง ๆ (ก) 30 นาที (ข) 120 นาที และ (ค) 180 นาที

จากกราฟภาพที่ 5 พบว่าค่า pH ของไฮโดรไลเสตเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาปฏิกิริยา โดยเริ่มจากประมาณ 6.2 ที่เวลา 30 นาที และสูงขึ้นเป็นราว 7.0 และ 7.8 เมื่อครบ 120 และ 160 นาทีตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงเหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชส่วนใหญ่ (pH 5.5–7.5) และมีแนวโน้มเป็นด่างเล็กน้อยในช่วงเวลาท้าย การเพิ่มขึ้นของ pH สะท้อนถึงการสลายตัวของสารอินทรีย์ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชันที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารประกอบต่าง เช่น แอมโมเนียหรือสารประกอบไนโตรเจน รวมถึงการละลายของธาตุอาหารหลักอย่างโพแทสเซียมและแคลเซียมซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง ทั้งนี้ค่า pH ที่เกิน 7.5 แม้ยังไม่เป็นปัญหารุนแรง แต่หากนำไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำควรปรับให้สอดคล้องกับชนิดดินเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหาร นอกจากนี้แนวโน้มค่า pH ที่สูงขึ้นยังบ่งชี้ว่าการเพิ่มเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการอาจเร่งการย่อยสลายสารประกอบพอลิเมอร์ เช่น เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีฤทธิ์ต่างมากขึ้น การสังเกตนี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่รายงานว่าผลิตภัณฑ์ไฮโดรไลเสตที่มี pH ใกล้เคียงกลางถึงด่างเล็กน้อย ซึ่งเป็นลักษณะพึงประสงค์สำหรับการใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพหรือสารปรับปรุงดินที่ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์และเสถียรภาพของดิน

### ผลการวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

การวัดค่าไดอิเล็กตริกได้นำไฮโดรไลเสตไปวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล (dielectric constant) และค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) เพื่อทดสอบคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของไฮโดรไลเสต ซึ่งการวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุทำโดยใช้ชุดวัดประกอบด้วยเครื่อง Network Analyzer สำหรับกำเนิดสัญญาณและวัด S-parameters เชื่อมต่อกับหัววัดไดอิเล็กตริก (dielectric probe) ผ่านสายโคแอกเซียลความถี่สูง โดยมีคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ควบคุมการทำงานและประมวลผลผลลัพธ์ ตัวอย่าง (ของเหลวหรือของแข็งผิวเรียบ) ถูกนำมาสัมผัสกับปลายหัววัดโดยตรง ขั้นตอนเริ่มจากการปรับเทียบระบบด้วยมาตรฐานอ้างอิง (เช่น open/short และน้ำกลั่น) เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อน จากนั้นสแกนความถี่ในช่วงที่กำหนด ข้อมูลการสะท้อน/ส่งผ่านที่วัดได้จะถูกแปลงในซอฟต์แวร์เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน ได้แก่ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant) และค่าปัจจัยการสูญเสีย (dielectric loss factor) ของวัสดุอย่างต่อเนื่องตามความถี่ ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 6 การวัดค่าไดอิเล็กตริกของวัสดุด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติไดอิเล็กตริก

ค่าไดอิเล็กตริกเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของการตอบสนองของวัสดุต่อสนามไฟฟ้า โดยจำแนกเป็นส่วนเชิงจริงหรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'$ ) ซึ่งสะท้อนความสามารถในการกักเก็บประจุ และส่วนเชิงจินตภาพหรือค่าปัจจัยการสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\epsilon''$ ) ซึ่งบ่งชี้พลังงานที่สูญเสียระหว่างการมีปฏิสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า ผลการวัดในงานนี้ให้แนวโน้มของ  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ตามความถี่ แต่เนื่องจากเงื่อนไขการทดลองยังไม่ครอบคลุมช่วงเป้าหมายเชิงทฤษฎี จึงอ้างอิงและเปรียบเทียบแนวโน้มกับวรรณกรรมที่ [15] ซึ่งรายงานการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของไฮโดรคาร์บอนจากเปลือกปาล์ม เพื่อใช้เป็นกรอบอ้างอิงในการประเมินรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของ  $\epsilon'$  และ  $\epsilon''$  ที่คาดหวังจากกราฟ และยืนยันความสอดคล้องของทิศทางแนวโน้มกับกลไกทางวัสดุศาสตร์ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนไนเซชัน

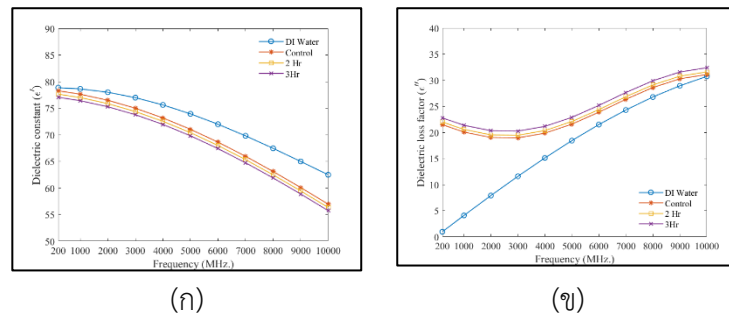
จากภาพที่ 7(ก) เปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงจริง ( $\epsilon'$ ) ของน้ำกลั่น (DI) กับไฮโดรไลเสตทั้งชุดตั้งต้น (Control) และหลังปฏิกิริยา 2 และ 3 ชั่วโมง พบว่า  $\epsilon'$  ของน้ำกลั่นสูงสุด ( $\approx 62-79$ ) ขณะที่ Control อยู่ราว 56-78 ส่วนที่ 2 ชั่วโมงอยู่ 56-77 และที่ 3 ชั่วโมงต่ำสุดราว 55-77 แนวโน้มโดยรวม  $\epsilon'$  คือ ลดลงเมื่อความถี่เพิ่มจาก 200 MHz เป็น 10 GHz อันเนื่องมาจากการตอบสนองการจัดเรียงตัวของโมเลกุลน้ำที่ลดลงในย่านความถี่สูง การลดลงชัดเจนของไฮโดรไลเสตที่ 3 ชั่วโมงอาจสะท้อนการเพิ่มชนิดละลายและไอออนซึ่งรบกวนการหมุนของไดโพลน้ำ ส่งผลให้ความสามารถในการโพลาไรซ์ลดลงเล็กน้อย จึงควรคัดเลือกเวลาปฏิกิริยาให้เหมาะสมกับการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ/คลื่นวิทยุและใช้งานเชิงเกษตรหรือการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้า-แม่เหล็ก

จากภาพที่ 7(ข) ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (dielectric loss factor) จะเห็นว่าไฮโดรไลเสตที่เวลา 3 ชั่วโมง จะมีค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (dielectric loss factor) สูงที่สุด ตามด้วยเส้นกราฟของไฮโดรไลเสตที่เวลา 2 ชั่วโมง และไฮโดรไลเสตตั้งต้น (Control) ส่วน DI Water พบว่ามีค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริก (dielectric loss factor) ลดลงมากที่สุด เมื่อเทียบกับ ไฮโดรไลเสตที่เวลา 3 ชั่วโมง ไฮโดรไลเสตตั้งต้น และไฮโดรไลเสตที่เวลา 2 ชั่วโมง

เมื่อนำน้ำปราศจากไอออน (DI) หรือน้ำกลั่นกับไฮโดรไลเสตตั้งต้น (Control) ที่เวลา 2 ชั่วโมง และ 3 ชั่วโมง จากกราฟภาพที่ 7 มาเปรียบเทียบในรูปแบบตาราง โดยทำการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล และค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกในช่วงความถี่ 200 MHz ถึง 10,000 MHz

เพื่อประเมิน **สมบัติทางไฟฟ้าและพฤติกรรมตอบสนองของวัสดุชีวมวล (ไฮโดรไลเสต)** ต่อสนามไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่าง ๆ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำและไมโครเวฟ เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'$ ) บ่งบอกถึงความสามารถของวัสดุในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า ในขณะที่ค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริก ( $\epsilon''$ ) แสดงถึงความสามารถในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงาน

ความร้อน การเข้าใจค่าทั้งสองนี้จึงช่วยให้สามารถกำหนดช่วงความถี่และกำลังไฟที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทพลังงาน ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์ที่ได้



ภาพที่ 7 กราฟแสดงผลที่ได้จากการทดสอบ (ก) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกยังผล และ (ข) ค่าปัจจัยในการสูญเสียยังผลไดอิเล็กตริกของไฮโดรไลเอส

ตารางที่ 2 แสดงผลการวัดค่าไดอิเล็กตริก

ความถี่ (MHz)	น้ำ DI		Control		2 ชั่วโมง		3 ชั่วโมง	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$	$\epsilon'$	$\epsilon''$
200	78.853	0.9543	78.267	21.482	77.637	21.982	77.047	22.782
1000	78.626	4.0717	77.625	20.062	76.995	20.562	76.405	21.362
2000	77.989	7.8897	76.486	19.021	75.856	19.521	75.266	20.321
3000	76.977	11.580	74.992	18.945	74.362	19.445	73.772	20.245
4000	75.613	15.104	73.162	19.848	72.532	20.348	71.942	21.148
5000	73.933	18.421	71.026	21.584	70.396	22.084	69.806	22.884
6000	71.979	21.495	68.612	23.871	67.982	24.371	67.392	25.171
7000	69.799	24.292	65.959	26.340	65.329	26.840	64.739	27.640
8000	67.450	26.781	63.103	28.593	62.473	29.093	61.883	29.893
9000	64.990	28.935	60.088	30.265	59.458	30.765	58.868	31.565
10000	62.480	30.730	56.957	31.087	56.327	31.587	55.737	32.387

จากตารางที่ 2 เมื่อเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon'$ ) และค่าปัจจัยการสูญเสีย ( $\epsilon''$ ) ในช่วงความถี่ 200-10,000 MHz พบว่าค่า ( $\epsilon'$ ) ของไฮโดรไลเอสทุกกลุ่มตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับน้ำ DI สำหรับการวิเคราะห์ค่าปัจจัยการสูญเสีย ( $\epsilon''$ ) ซึ่งบ่งชี้ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นความร้อน พบว่ากลุ่มตัวอย่างไฮโดรไลเอสที่ผ่านกระบวนการ 3 ชั่วโมงมีค่า ( $\epsilon''$ ) สูงที่สุดในทุกย่านความถี่ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ยืนยันว่าระยะเวลาในกระบวนการ HTC ส่งผลต่อค่า ( $\epsilon''$ ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ 10 GHz ค่า ( $\epsilon''$ ) ของกลุ่ม 3 ชั่วโมง (32.387) สูงกว่ากลุ่มน้ำ DI (30.730) และกลุ่มควบคุม (31.087) อย่างชัดเจน การเพิ่มขึ้นนี้ชี้ให้เห็นว่าการยืดระยะเวลาปฏิกิริยาช่วยเพิ่มปริมาณสารประกอบอินทรีย์และไอออนในไฮโดรไลเอส ส่งผลให้วัสดุมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานไมโครเวฟได้ดีขึ้น และมีศักยภาพสูงในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารดูดซับไมโครเวฟหรือวัสดุในการแปรรูปพลังงาน

โดยตัวแปรหลักที่มีผลต่อค่าคงที่และการสูญเสียไดอิเล็กตริกคือ ค่าความถี่ ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระที่ควบคุมการตอบสนองของโมเลกุลน้ำและสารละลายต่อสนามไฟฟ้า ยิ่งความถี่เพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลดลงเนื่องจากโมเลกุลไม่สามารถจัดเรียงตามการเปลี่ยนแปลงของสนามได้ทัน ขณะที่เวลา (2 และ 3 ชั่วโมง) และ ค่า Control เป็นปัจจัยรองที่ส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีของไฮโดรไลเสต เช่น ปริมาณสารอินทรีย์และไอออนที่ละลายน้ำ ซึ่งมีผลต่อค่าการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในระดับรอง ดังนั้นค่าความถี่จึงเป็นตัวแปรสำคัญที่สุดต่อค่าเป้าหมายที่ต้องการ ส่วนค่าควบคุมและเวลาเป็นตัวแปรเสริมที่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงภายในระบบ โดยค่าที่แสดงในบทสรุปเป็นค่าโดยประมาณจากการวัดเชิงทดลองในช่วงความถี่ 200–10,000 MHz ภายใต้เงื่อนไขจริงของกระบวนการทดลอง

จากแนวโน้มของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าการสูญเสียไดอิเล็กตริกที่ได้จากการทดลอง ซึ่งสะท้อนพฤติกรรมของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลและการเปลี่ยนแปลงของพันธะไฮโดรเจนได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงและค่าการสูญเสียเพิ่มขึ้น แสดงถึงการลดลงของการจัดเรียงเชิงระเบียบของโมเลกุลน้ำและการอ่อนแรงของพันธะไฮโดรเจนภายในระบบ การวิเคราะห์แนวโน้มเหล่านี้สามารถใช้เป็นหลักฐานสนับสนุนเชิงอ้างอิง โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลจากงานวิจัยก่อนหน้า เช่น งานของ [15] ซึ่งแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงคล้ายคลึงกันภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล จึงสามารถยืนยันผลการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างได้

### สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดปัญหาการจัดการขยะชีวมวลจากไบยาสูบด้วยการพัฒนาเทคโนโลยีไฮโดรเทอร์มอลคาร์บอนเซชัน (HTC) ที่ใช้การให้ความร้อนด้วยสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ (Magnetic Induction Heating: MIH) แทนวิธีการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ระบบต้นแบบประกอบด้วยขดลวดกำลังสูงและวงจรฮาร์ฟบริดจ์อินเวอร์เตอร์ 10–20 kHz กำลัง 5,000 วัตต์ โดยออกแบบให้อุ่นถึงปฏิกิริยาโลหะโดยตรงภายใต้เงื่อนไขทดสอบ 2 และ 3 ชั่วโมง อัตราส่วนไบยาสูบ:น้ำ เท่ากับ 50:5 (โดยมวล) พร้อมการบันทึกอุณหภูมิทุก 5 นาที และความดันทุก 30 นาที ผลการทดลองพบว่าในรอบ 2 ชั่วโมง อุณหภูมิสูงสุดภายในถังปฏิกิริยาประมาณ 140 °C และความดันสูงสุดประมาณ 4.1 บาร์ โดยอุณหภูมิและความดันเพิ่มขึ้นอย่างเป็นลำดับสอดคล้องกับพฤติกรรมของระบบ HTC ผลผลิตถูกแยกเป็นไฮโดรซาร์และไฮโดรไลเสต โดยไฮโดรซาร์อยู่ที่ 105 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อเตรียมทดสอบสมบัติเพิ่มเติม ผลการวิเคราะห์ยืนยันว่าการใช้ MIH สามารถสร้างความร้อนสม่ำเสมอและรวดเร็ว ลดการสูญเสียพลังงาน และมีศักยภาพในการเพิ่มปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไฮโดรไลเสตเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการให้ความร้อนแบบเดิม ทั้งนี้การปรับปรุงพารามิเตอร์ระบบ เช่น ความหนาแน่นระยะห่างขดลวด และอัตราส่วนน้ำ จะช่วยให้กระบวนการเข้าใกล้ช่วงอุณหภูมิ HTC ที่เหมาะสม ( $\approx 200\text{--}230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณค่าการใช้งานของผลิตภัณฑ์ชีวภาพ

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมือทดลอง และทรัพยากรวิจัย ตลอดจน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา ที่ให้คำแนะนำทางวิชาการและความร่วมมือในการวิเคราะห์ผล นอกจากนี้ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และสาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในกระบวนการทดลองอย่างต่อเนื่อง รวมถึงนักศึกษาที่มีส่วนร่วมในการจัดเตรียมวัสดุและดำเนินการทดสอบในทุกขั้นตอน

ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกหน่วยงานและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องที่ให้ข้อมูลและการสนับสนุนตลอดโครงการ ซึ่งมีส่วนสำคัญให้ผลการวิจัยครั้งนี้บรรลุเป้าหมายตามวัตถุประสงค์

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Toplicean, I. M., & Datcu, A. D. (2024). An overview on bioeconomy in agricultural sector, biomass production, recycling methods, and circular economy considerations. *Agriculture*, 14(7), 1143.
- [2] Şerban LR, Păucean A, Chiş MS, Pop CR, Man SM, Puşcaş A, Ranga F, Socaci SA, Alexa E, Berbecea A, et al. Metabolic Profile of Einkorn, Spelt, Emmer Ancient Wheat Species Sourdough Fermented with Strain of *Lactiplantibacillus plantarum* ATCC 8014. *Foods*. 2023; 12(5):1096. <https://doi.org/10.3390/foods12051096>
- [3] Huang, J., Zhao, B., Liu, T., Mou, J., Jiang, Z., Liu, J., ... & Liu, M. (2019). Wood-derived materials for advanced electrochemical energy storage devices. *Advanced Functional Materials*, 29(31), 1902255.
- [4] Zoppi, G., Tito, E., Bianco, I., Pipitone, G., Pirone, R., & Bensaid, S. (2023). Life cycle assessment of the biofuel production from lignocellulosic biomass in a hydrothermal liquefaction–aqueous phase reforming integrated biorefinery. *Renewable Energy*, 206, 375-385.
- [5] Li, J., Zhu, X., Li, Y., Tong, Y. W., Ok, Y. S., & Wang, X. (2021). Multi-task prediction and optimization of hydrochar properties from high-moisture municipal solid waste: Application of machine learning on waste-to-resource. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123928.
- [6] Liu, Y., Sun, Y., Wan, Z., Jing, F., Li, Z., Chen, J., & Tsang, D. C. (2021). Tailored design of food waste hydrochar for efficient adsorption and catalytic degradation of refractory organic contaminant. *Journal of Cleaner Production*, 310, 127482.
- [7] Volpe, M., & Fiori, L. (2017). From olive waste to solid biofuel through hydrothermal carbonisation: The role of temperature and solid load on secondary char formation and hydrochar energy properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124, 63-72.
- [8] Yuan, J., Liu, N., Zhang, W., Peng, B., & Dong, W. (2022). Study on the effect of changing stator structure on wind permanent magnet eddy current heating device. *Energy Reports*, 8, 592-600.
- [9] Trip, N. D., Burca, A., Leuca, T., & Dudrik, J. (2014, November). Considerations on the analysis of an induction heating system. In *2014 11th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)* (pp. 1-4). IEEE.
- [10] จีระศักดิ์ วงศา, จีระศักดิ์ ส่งบุญแก้ว, & วันชัย ทรัพย์สิงห์. (2014). นวัตกรรมทำให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ. *Journal of Humanities and Social Sciences Thonburi University*, 8(17), 111-117.

- [11] Zinn, S., & Semiatin, S. L. (1988). Coil design and fabrication: basic design and modifications. *Heat treating*, 12(3), 32-36.
- [12] Knight, D. W. (2013). Solenoid inductance calculation. DW Knight.
- [13] Shen, L., Long, S., Allarding, M. R., & Walton, M. (1977). Resonant frequency of a circular disc, printed-circuit antenna. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 25(4), 595-596.
- [14] Wang, Z., & Zhu, Z. (2021). Experimental study on the effects of different heating rates on coalbed methane desorption and an analysis of desorption kinetics. *ACS omega*, 6(50), 34889-34903.
- [15] Nizamuddin, S., Mubarak, N. M., Tiripathi, M., Jayakumar, N. S., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2015). Chemical, dielectric and structural characterization of optimized

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยการกระตุ้นทางกายภาพ  
เพื่อเพิ่มผลผลิตและค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากกาบหมาก

Study of Optimal Conditions for Physical Activation in Activated Carbon Production  
to Enhance Yield and BET Surface Area from Areca Spathe

ลลิตา เพชรใจหาญ<sup>1</sup> ธเนศ ไชยชนะ<sup>1</sup> กิตติกร สาสุจิตต์<sup>2</sup> ขจรเกียรติ กันทะหล้า<sup>2</sup> และ ภคมน ปินตนา<sup>2\*</sup>  
Lalita Petchaihan<sup>1</sup> Tanate Chaichana<sup>1</sup> Kittikorn Sasujit<sup>2</sup> Kajonkiat Kantala<sup>2</sup> and Pakamon Pintana<sup>2\*</sup>

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

<sup>1</sup> Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน (ต่อเนื่อง) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

<sup>2</sup> Energy Conservation Engineering (Continuing Program), School of Renewable Energy,  
Maejo University, Chiang Mai 50290

<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 09-86196155. E-mail address: p.pintana@gmail.com

### Abstract

This study aimed to determine the optimal conditions for producing activated carbon from areca spathe via physical steam activation, to enhance the yield and BET surface area of the produced activated carbon. The experiments were designed using the Response Surface Methodology (RSM) with the Box–Behnken Design (BBD) under three main factors: activation temperature (700–900 °C), activation time (1–3 h), and steam flow rate (50–100 cm<sup>3</sup>/min). The results showed that activation temperature and time significantly influenced the characteristics of the activated carbon, particularly yield and surface area. Increasing the temperature and activation time improved surface area and pore development but reduced the yield due to carbon structure decomposition. The steam flow rate had less influence; however, excessively high values led to material degradation and ash formation. From the mathematical model and experimental results, the optimal conditions were found to be 800 °C, two hours, and a steam flow rate of 50 cm<sup>3</sup>/min, yielding approximately 60% and achieving a maximum BET surface area of 652.97 m<sup>2</sup>/g. These values are consistent with the standard range for biomass-based activated carbon and are suitable for adsorption and environmental treatment applications. Moreover, the process does not involve chemical agents, making it environmentally friendly.

**Keywords:** Activated Carbon, Physical Activation, Yield, BET Surface Area, Areca Spathe

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากหมากด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ เพื่อเพิ่มผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) แบบ Box-Behnken Design (BBD) ภายใต้ตัวแปรสำคัญ 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ 700–900 °C เวลา 1–3 h และอัตราการไหลของไอน้ำ 50–100 cm<sup>3</sup>/min ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิและเวลาการกระตุ้น เป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะค่าพื้นที่ผิวและผลผลิต การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาช่วยเพิ่มค่าพื้นที่ผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แต่ทำให้ผลผลิตลดลงเนื่องจากการสลายโครงสร้างคาร์บอน ส่วนอัตราการไหลของไอน้ำมีผลน้อยกว่า แต่หากสูงเกินไปจะทำให้ถ่านสลายตัวเป็นเถ้า จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคืออุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 ชั่วโมง และอัตราการไหลของไอน้ำ 50 ตารางเซนติเมตรต่อนาที ซึ่งให้ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 60% และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 652.97 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของถ่านกัมมันต์จากชีวมวล และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานดูดซับและบำบัดสิ่งแวดล้อม ทั้งยังเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้สารเคมี จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

**คำสำคัญ:** ถ่านกัมมันต์ การกระตุ้นทางกายภาพ ผลผลิต พื้นที่ผิวจำเพาะ กากหมาก

## บทนำ

ในปัจจุบันแนวทางการส่งเสริมให้ชุมชนมีส่วนร่วมในการผลิตและการใช้พลังงานทดแทนนั้นมีอยู่มากมายหลายประเภท เช่น การผลิตถ่านจากชีวมวล การผลิตพืชพลังงาน การผลิตเตาชีวมวล การผลิตจานกากหมากทดแทนการใช้โฟมและพลาสติก และอีกมากมายหลากหลายการผลิต เป็นต้น [1] จากการศึกษา รวบรวม และสำรวจข้อมูล พบว่ามีเครือข่ายรัฐวิสาหกิจชุมชนการผลิตจานกากหมากหลายแห่งทั่วประเทศ อีกทั้งมีแหล่งเพาะปลูกหมากที่มาก จากสถิติของกรมส่งเสริมการเกษตร ในปี 2558 พบว่าประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกหมากมากกว่า 36,489,600 m<sup>2</sup> โดยส่วนใหญ่อยู่ในจังหวัดทางภาคใต้ และมีมูลค่าการส่งออกหมากแห้งไปยังต่างประเทศมากกว่า 1.04 B เพิ่มขึ้นจากปี 2557 สูงถึง 255.01 M และจากแหล่งเพาะปลูกที่ใหญ่ที่สุดในภาคเหนือ นั่นก็คือ หมู่บ้านเป็งเค็ง อำเภออุ้มผาง จังหวัดตาก ซึ่งเป็นแหล่งผลิตหมากส่งออกประเทศสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาร์หรือพม่าสูงสุด เป็นต้น และเพื่อแก้ปัญหาเศษวัสดุจากกากหมากคงเหลือที่มากจากกระบวนการผลิตจานกากหมาก จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำวัสดุนี้มาเพิ่มมูลค่าและสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ให้กับวิสาหกิจชุมชน ช่วยในเรื่องการทำให้เศษวัสดุเป็นศูนย์ (Zero waste) เป็นการใช้ประโยชน์จากกากหมากให้คุ้มค่าทั้งด้านต้นทุนและการขนส่ง เป็นแนวทางการส่งเสริมก่อให้เกิดรายได้แก่เกษตรกรและวิสาหกิจชุมชนเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต ช่วยส่งเสริมพืชทางเลือกใหม่ในการเพาะปลูกและเพิ่มรายได้ในภาคพื้นเกษตรกรรมของไทยได้ [2]

ในอดีตมีการพัฒนาและใช้งานเตาผลิตถ่านประเภทตั้งเดิมอยู่แล้ว เช่น เตาถังขนาด 200 L เตาดิน เตาอิฐถาวร เतालาน หรือเตาแบบปิด มักมีการสูญเสียความร้อนสูง ทำให้ไม้ไม่ถูกแปรสภาพเป็นถ่านอย่างสมบูรณ์ เกิดการเผาไหม้ไม่ทั่วถึง เตาเหล่านี้มักมีประสิทธิภาพต่ำ การกระจายอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ถ่านที่ได้มีคุณภาพไม่คงที่ บางส่วนกลายเป็นเถ้า ขณะที่บางส่วนยังเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้ได้ผลผลิตน้อย ใช้ระยะเวลาสั้นเปลืองเชื้อเพลิง และต้องใช้แรงงานเฝ้าเตาอย่างต่อเนื่อง เตาแบบเปิดหรือเตาที่ไม่มีระบบจัดการก๊าซ จะปล่อยควันดำที่มีสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (VOCs) และเขม่าคาร์บอนสู่สิ่งแวดล้อม ปัจจุบันมีการพัฒนาเตารูปแบบใหม่หลากหลายรูปแบบ เช่น เตาเผาถ่านไร้

ควัน หรือเตาเผาแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มผลผลิตและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดของการใช้เทคโนโลยีดังกล่าว ใช้งานยาวรวมไปถึงผลิตแล้วไม่สามารถตรวจวัดคุณภาพของถ่านได้เอง ซึ่งถ่านไม้ในปัจจุบันถูกนำไปใช้ประโยชน์ในหลายด้าน ไม่เพียงแต่เป็นเชื้อเพลิงในภาคครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กเท่านั้น แต่ยังรวมถึงธุรกิจที่ต้องการถ่านคุณภาพสูงสู่การผลิตถ่านกัมมันต์ ให้ความร้อนรุกรุน สารระเหยต่ำ และประสิทธิภาพการดูดซับสูง

ถ่านกัมมันต์ (Activated Charcoal) คือ ถ่านที่ผ่านกระบวนการพิเศษเพื่อให้มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี ทำให้ถูกนำมาใช้ประโยชน์หลากหลาย ทั้งในทางการแพทย์ การบำบัดน้ำเสีย การกรองอากาศ และอื่น ๆ [3] กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ ประกอบไปด้วย 2 กระบวนการ คือ การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation) การนำถ่านที่ผ่านการเผาไหม้ในสภาพอ็อกซิเจนหรือจำกัดอากาศทำให้มีออกซิเจนน้อยมากระตุ้นโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) หรือไอน้ำที่มีอุณหภูมิกระตุ้น (Activation temperature) ประมาณ 600-950°C การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical activation) การเปลี่ยนวัตถุดิบโดยใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ซิงค์คลอไรด์ (Zinc chloride) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 550-950°C [4-5] ถ่านกัมมันต์ผลิตจากวัสดุคาร์บอน เช่น ถ่านหิน กะลามะพร้าว หรือไม้ไผ่ โดยผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยความร้อนหรือสารเคมี เพื่อสร้างรูพรุนจำนวนมาก ถ่านที่เผาอย่างสมบูรณ์จะมีค่าคาร์บอนคงที่สูง ถ่านจากชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียน หากผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือของเสียจากธุรกิจวิสาหกิจชุมชน จะช่วยลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลการใช้ถ่านหิน และลดปริมาณของเสียทางชีวภาพ เป็นการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ทางเลือกใหม่สำหรับธุรกิจและผู้บริโภค นอกจากนี้การเตรียมถ่านก่อนกระตุ้นสำคัญมาก หากควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต จะสามารถนำไปใช้เป็นตัวดูดซับที่ผิวสูง รูพรุนจำนวนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวมากสำหรับการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับ ดูดซับสารต่าง ๆ ได้ทั้งของเหลวและก๊าซ เช่น สารพิษ กลิ่น สี ส่งเสริมระบบนิเวศอย่างยั่งยืน ช่วยลดภาวะโลกร้อน

แต่ปัญหาของการผลิตถ่านชาร์ การขาดองค์ความรู้และการถ่ายทอดเทคโนโลยี หลายพื้นที่ยังขาดความรู้ในการผลิตถ่านชาร์ที่เหมาะสมกับการผลิตถ่านกัมมันต์ ผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์และถ่านกัมมันต์ยังขาดระบบรับรองคุณภาพที่เป็นสากล ในบางประเทศ ทำให้การนำไปใช้อย่างเป็นทางการหรือเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัด การรับรองมาตรฐานต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องพัฒนาการผลิตถ่านชาร์ให้เหมาะสมกับการนำไปผลิตถ่านกัมมันต์ การนำปัญหาข้อบกพร่องและข้อดีต่าง ๆ มาพัฒนาให้ใช้ทั้งในเชิงพลังงาน การบำบัดน้ำเสีย การกรองน้ำ การกรองอากาศ และอื่น ๆ โดยพัฒนาเตาที่มีการควบคุมอุณหภูมิได้ดีและมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูง จะช่วยให้ได้ถ่านชาร์ที่มีค่าคาร์บอนคงที่และค่ารูพรุนสูงก่อนนำไปกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถตอบโจทย์ต่อความต้องการของตลาดปัจจุบัน ลดการใช้สารเคมี และการใช้ประโยชน์อย่างหลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมไปถึงการนำขยะ (Waste) ที่เหลือทิ้งทางการเกษตรมาแปรรูปให้เพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการผลิตถ่านกัมมันต์จากกาบหมากด้วยกระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ เพื่อศึกษาผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ โดยการออกแบบสภาวะการผลิต ประกอบด้วย อุณหภูมิการกระตุ้น ระยะเวลา และอัตราการไหลของไอน้ำกระตุ้น เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูง มีค่ารูพรุนพัฒนาอย่างเหมาะสม และมีสมบัติการดูดซับตามเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งนี้เพื่อประเมินความเหมาะสมของวัสดุในการประยุกต์ใช้ด้านการดูดซับมลพิษ การกรอง และการใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรมในอนาคต รวมถึงเป็นแนวทางสนับสนุนการพัฒนาและต่อยอดผลผลิตแบบไม่ใช้สารเคมี

## วิธีการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ได้ออกแบบระเบียบวิธีวิจัยและวิธีการดำเนินการอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือและสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริง การศึกษามีเป้าหมายหลัก เพื่อพัฒนาถ่านชาร์จากกากหมากให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะการเพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุน ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

**1. การศึกษากระบวนการคาร์บอนในเซชัน** งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการเตรียมวัสดุก่อนการกระตุ้นทางกายภาพในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพของเตาผลิตถ่านชาร์ขนาด 50 L ที่เน้นการควบคุมการเผาไหม้และการกระจายอุณหภูมิให้สม่ำเสมอ ใช้กากหมาก (*Areca catechu L.*) เป็นวัตถุดิบชีวมวล ตัวแปรสำคัญในการทดลอง ได้แก่ ขนาดรูห้องเผาไหม้ 3.18 mm ระยะเวลา 180 min และปริมาณเชื้อเพลิง 3.5 kg ผลการทดลองและการจำลองด้วย Design Expert วิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) พบว่าสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะเหมาะสมที่สุดของกระบวนการผลิต ผลผลิตถ่านชาร์มีพื้นที่ผิวสูงสุด (BET) 108.61 m<sup>2</sup>/g ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 9.43 และผลผลิต (Yield) เท่ากับ 29.80% เตาถ่านชาร์ที่พัฒนาขึ้นช่วยลดปัญหาการกระจายความร้อนไม่สม่ำเสมอและการไหลเวียนอากาศไม่คงที่ ทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงขึ้น คุ่มค่าทางเศรษฐกิจ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และถือเป็นขั้นตอนแรกในการเตรียมวัสดุก่อนนำไปผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง

**2. การออกแบบการทดลองการผลิตถ่านกัมมันต์** การศึกษาครั้งนี้มุ่งวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเน้นการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation) แทนการใช้สารเคมี (Chemical Activation) เพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน งานวิจัยนี้ต่อยอดองค์ความรู้เดิม สร้างนวัตกรรมและเทคนิคการผลิตถ่านกัมมันต์รูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และช่วยประหยัดพลังงานตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมวัสดุ การออกแบบการทดลองการกระตุ้นถ่านกัมมันต์และการวิเคราะห์ทางสถิติได้ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Design Expert (เวอร์ชัน 2013) โดยอ้างอิงหลักการของวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) ใช้แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (BBD) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ข้อมูลการทดลองเพื่อสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองกับปัจจัยอิสระทั้งสาม ได้แก่ อุณหภูมิ (700–900 °C) เวลา (1–3 h) และอัตราการไหลของไอน้ำ (50–100 cm<sup>3</sup>/min) กำหนดให้แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+1) ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ศึกษาในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

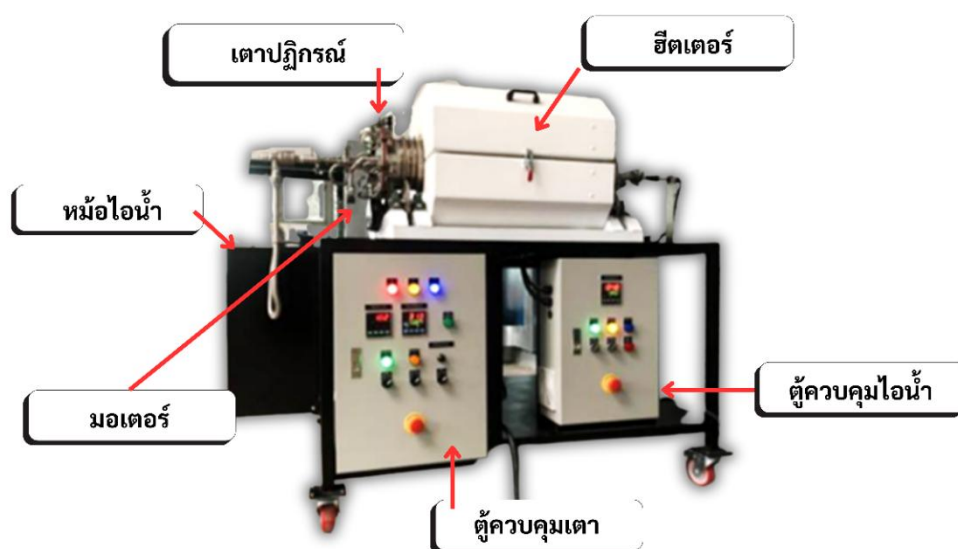
Factors		Level		
		-1	0	+1
อุณหภูมิ (°C)	(A)	700	800	900
เวลา (h)	(B)	1	2	3
อัตราการไหลของไอน้ำ (cm <sup>3</sup> /min)	(C)	50	75	100

แบบจำลองการถดถอยพิจารณาผลกระทบของตัวแปรหลายตัว รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและผลกระทบลำดับสูง ตามที่แสดงในสมการที่ 1 การออกแบบนี้ทำให้สามารถประเมินทั้งผลกระทบหลัก (Main effects) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interactions between factors) ได้ โดยที่ Y คือ ตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม (dependent variable) ที่ต้องการพยากรณ์หรืออธิบาย  $\beta_0$  คือ ค่าคงที่ (Constant term) แทนค่าของ Y เมื่อค่าของตัวแปรอิสระทั้งหมดเป็นศูนย์ A, B, C คือ ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง Y และ  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficients) แสดงผลกระทบของตัวแปรอิสระ A, B, และ C ตามลำดับ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 \quad (1)$$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการผลิตถ่านกัมมันต์ ปริมาณถ่านกัมมันต์ คำนวณหาปริมาณถ่านกัมมันต์ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2 โดยที่  $Y_{AC}$  คือ ปริมาณถ่านกัมมันต์ (%wt)  $w_{af}$  คือ น้ำหนักถ่านกัมมันต์ (g) และ  $w_{be}$  คือ น้ำหนักวัสดุเริ่มต้น (g)

$$Y_{AC} = \frac{w_{be}}{w_{af}} \times 100 \quad (2)$$



ภาพที่ 1 เครื่องผลิตถ่านกัมมันต์

3. เครื่องผลิตถ่านกัมมันต์ ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ เตาปฏิกรณ์ ฮีตเตอร์ หม้อไอน้ำ มอเตอร์ และตู้ควบคุม โดยเตาปฏิกรณ์ (Reactor) ใช้สำหรับบรรจุถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสหรือการคาร์บอนไนเซชันแล้ว ภายในเตาติดตั้งฮีตเตอร์ (Heater) ที่ฝังอยู่ด้านบน พร้อมฉนวนกันความร้อนเพื่อลดการสูญเสียพลังงานระหว่างการทำงาน ส่วนของมอเตอร์ (Motor) ทำหน้าที่ขับเคลื่อนให้เตาปฏิกรณ์หมุน เพื่อให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ หม้อไอน้ำ (Boiler) ทำหน้าที่ผลิตไอน้ำเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบกระตุ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์และตู้ควบคุม (Control Panel) ใช้สำหรับควบคุมอุณหภูมิ อัตราการจ่ายไอน้ำ และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา โดยทั้งหมดถูกติดตั้งและทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบดังแสดงในภาพที่ 1 ในการทดลองการผลิตถ่านกัมมันต์จะทำการทดสอบตามการออกแบบการทดลองโปรแกรม Design Expert ทั้งหมด 17 Run

4. การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน การวิเคราะห์พื้นที่ผิวดำเนินการโดยใช้วิธีฟิสิซอร์ปชัน (Physisorption method) โดยช่วงของ  $P/P_0$  อยู่ระหว่าง 0.05–0.3 และเก็บข้อมูล 80–100 จุด โดยใช้วิธี BET (Brunauer–Emmett–Teller) การวิเคราะห์นี้ใช้เครื่อง ASAP 2460 (Micromeritics, USA) เพื่อหาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุน

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 1. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวแปรตอบสนองสำหรับผลผลิต (Yield)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ตัวแปรตอบสนอง ผลผลิต (Yield) พบว่าค่า F-value ของแบบจำลอง (Model F-value) เท่ากับ 12.53 หมายความว่าแบบจำลองมีความมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีโอกาสเพียง 0.15% ที่ค่า F-value ขนาดนี้จะเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน (Noise) ค่า P-value ที่น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรในแบบจำลองมีนัยสำคัญ ในกรณีนี้ตัวแปร A-อุณหภูมิ และ B-เวลา เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ขณะที่ค่าที่มากกว่า 0.1000 แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีนัยสำคัญ หากมีตัวแปรในแบบจำลองหลายตัวที่ไม่มีนัยสำคัญ ไม่นับตัวแปรที่จำเป็นเพื่อรักษาลำดับชั้นของโมเดล การลดจำนวนตัวแปรอาจช่วยปรับปรุงแบบจำลองให้ดีขึ้น ค่า Lack of Fit F-value เท่ากับ 2.13 หมายความว่า Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับความผิดพลาดบริสุทธิ์ (Pure error) โดยมีโอกาส 23.93% ที่ค่า Lack of Fit F-value ขนาดนี้จะเกิดจากสัญญาณรบกวน การที่ Lack of Fit ไม่มีนัยสำคัญถือเป็นผลดี เพราะแสดงว่าแบบจำลองสามารถพอดีกับข้อมูลทดลองได้ดี ดังแสดงในตารางที่ 2

ค่า Predicted  $R^2 = 0.3896$  ไม่ใกล้เคียงกับค่า Adjusted  $R^2 = 0.8664$  อย่างที่ควรจะเป็น กล่าวคือความแตกต่างระหว่างค่าสองตัวนี้มากกว่า 0.2 ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงผลกระทบของบล็อกขนาดใหญ่ (Large block effect) หรือปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับแบบจำลองหรือข้อมูลการทดลอง สิ่งที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การลดความซับซ้อนของแบบจำลอง (Model reduction) การแปลงตัวแปรตอบสนอง (Response transformation) การตรวจสอบค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นต้น โดยทั่วไป แบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical models) ทุกแบบควรมีการทดสอบยืนยันผลลัพธ์ด้วยการทดลองยืนยัน (Confirmation runs) ค่า Adeq Precision ใช้วัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) โดยค่าที่มากกว่า 4 ถือว่ามีสัญญาณเพียงพอ ในกรณีนี้ ค่า Adeq Precision = 12.739 แสดงว่ามีสัญญาณเพียงพอ ทำให้แบบจำลองนี้สามารถใช้สำรวจพื้นที่การออกแบบ (Design space) ได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3 แบบจำลองนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ได้ และช่วยกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรสำคัญ เช่น อุณหภูมิและระยะเวลาในการกระตุ้น เพื่อเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของถ่านกัมมันต์ได้อย่างเหมาะสม

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ตัวแปรตอบสนองผลผลิต (Yield)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	9618.28	9	1068.70	12.53	0.0015	significant
A-Temperature	8001.12	1	8001.12	93.78	< 0.0001	
B-Time	1458.00	1	1458.00	17.09	0.0044	
C-Vapor flow rate	3.13	1	3.13	0.0366	0.8537	
AB	16.00	1	16.00	0.1875	0.6780	
AC	6.25	1	6.25	0.0733	0.7945	
BC	0.0000	1	0.0000	0.0000	1.0000	
A <sup>2</sup>	41.12	1	41.12	0.4819	0.5099	
B <sup>2</sup>	41.12	1	41.12	0.4819	0.5099	

C <sup>2</sup>	55.33	1	55.33	0.6485	0.4471	
Residual	597.25	7	85.32			
Lack of Fit	367.25	3	122.42	2.13	0.2393	not significant
Pure Error	230.00	4	57.50			
Cor Total	10215.53	16				

ตารางที่ 3 สถิติที่ใช้ประเมินความสอดคล้องสำหรับผลผลิต (Yield)

Std. Dev.	9.24	R <sup>2</sup>	0.9415
Mean	41.29	Adjusted R <sup>2</sup>	0.8664
C.V. %	22.37	Predicted R <sup>2</sup>	0.3896
		Adeq Precision	12.7392

ผลสมการในรูปของตัวแปรที่เข้ารหัส (Coded factors) สามารถใช้ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตอบสนองสำหรับระดับที่กำหนดของแต่ละปัจจัย โดยค่าเริ่มต้นระดับสูงของตัวแปรจะถูกเข้ารหัสเป็น +1 และระดับต่ำถูกเข้ารหัสเป็น -1 สมการที่เข้ารหัสนี้มีประโยชน์ในการประเมิน ผลกระทบสัมพัทธ์ของตัวแปรปัจจัย เพราะสามารถเปรียบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์แต่ละตัวแปรได้โดยตรง สมการชี้ว่าอุณหภูมิมีผลกระทบมากที่สุดต่อผลผลิต การเพิ่มอัตราการไหลของไอน้ำมีผลน้อย แต่ยังสามารถปรับเล็กน้อยร่วมกับอุณหภูมิได้ ผลผลิตมี Non-linear response ต่อทุกตัวแปร (Quadratic terms) ซึ่งบ่งชี้ว่ามีจุดสูงสุดของผลผลิตในช่วงตัวแปรบางช่วง แสดงดังสมการที่ 3

$$Y_{\text{Physical Activation}} = + 43 - 31.62(A_1) - 13.50(B_2) + 0.625(C_3) - 2.00(A_1B_2) + 1.25(A_1C_3) - 0.00(B_2C_3) - 3.13A_1^2 + 3.12B_2^2 - 3.62C_3^2 \quad (3)$$

การที่ตัวแปรหลักมีอุณหภูมิและเวลาเป็นปัจจัยสำคัญสอดคล้องกับความรู้พื้นฐานของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ ซึ่งอุณหภูมิและระยะเวลาในการไพโรไลซิสและกระตุ้นมีผลโดยตรงต่อการสลายสารอินทรีย์และการพัฒนารูพรุน ส่วนอัตราการไหลของไอน้ำไม่มีนัยสำคัญในช่วงค่าที่ศึกษา อาจเนื่องจากค่าที่ใช้มีผลจำกัดต่อการเกิดปฏิกิริยากับวัสดุ ซึ่งโมเดลสามารถอธิบายข้อมูลทดลองได้ดี (R<sup>2</sup> สูง) แต่ความสามารถพยากรณ์ข้อมูลใหม่ยังต่ำ (Predicted R<sup>2</sup> ต่ำ) หากในอนาคตจะนำไปใช้งาน แนะนำให้ลดความซับซ้อนของโมเดล เพื่อยืนยันความถูกต้องของโมเดล การปรับปรุงเหล่านี้จะช่วยให้ Predicted R<sup>2</sup> สูงขึ้น ทำให้โมเดลเชื่อถือได้ทั้งสำหรับการอธิบายและพยากรณ์ผลผลิตในชีวิตจริงอื่นที่จะนำมาศึกษาต่อ

## 2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตัวแปรตอบสนองสำหรับพื้นที่ผิว (BET)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ตัวแปรตอบสนองพื้นที่ผิว (BET) ข้อมูลเหล่านี้ถูกยกเว้นในการวิเคราะห์นี้ Run 14, 7, 6 เนื่องจากการทดลองที่อุณหภูมิ 900°C ตัวอย่างเกิดการสลายตัวของถ่านกัมมันต์จนกลายเป็นเถ้า จึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ผลพื้นที่ผิวและรูพรุนได้

**ตารางที่ 4** การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) ตัวแปรตอบสนองพื้นที่ผิว (BET)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
<b>Model</b>	1.035E+05	9	11503.45	13.94	0.0110	significant
A-Temperature	6388.08	1	6388.08	7.74	0.0497	
B-Time	10061.09	1	10061.09	12.20	0.0251	
C-Vapor flow rate	6257.60	1	6257.60	7.59	0.0512	
AB	10213.58	1	10213.58	12.38	0.0245	
AC	1921.54	1	1921.54	2.33	0.2017	
BC	2477.55	1	2477.55	3.00	0.1581	
A <sup>2</sup>	53074.61	1	53074.61	64.34	0.0013	
B <sup>2</sup>	4478.08	1	4478.08	5.43	0.0803	
C <sup>2</sup>	1598.28	1	1598.28	1.94	0.2363	
Pure Error	3299.74	4	824.94			
<b>Cor Total</b>	1.068E+05	13				

โดยที่ค่า Model F-value = 13.94 หมายความว่าแบบจำลองมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีโอกาสเพียง 1.10% ที่ค่า F-value ขนาดนี้จะเกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวน ค่า P-value ที่น้อยกว่า 0.0500 แสดงว่าตัวแปรในแบบจำลองมีนัยสำคัญ ในกรณีนี้ตัวแปร A-อุณหภูมิ, B-เวลา, AB-อุณหภูมิและเวลา, และ A<sup>2</sup>-เทอมกำลังสองของตัวแปรอุณหภูมิ เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญ ขณะที่ค่าที่มากกว่า 0.1000 แสดงว่าตัวแปรนั้นไม่มีนัยสำคัญ หากมีตัวแปรในแบบจำลองหลายตัวที่ไม่มีนัยสำคัญ ไม่นับตัวแปรที่จำเป็นเพื่อรักษาลำดับขั้นของโมเดล การลดจำนวนตัวแปรอาจช่วยปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลองได้ ดังแสดงในตารางที่ 4 ค่า Adeq Precision ใช้วัดอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-noise ratio) โดยค่าที่มากกว่า 4 ถือว่ามีสัญญาณเพียงพอ ในกรณีนี้ ค่า Adeq Precision = 11.231 แสดงว่ามีสัญญาณเพียงพอ ทำให้สามารถใช้แบบจำลองนี้เพื่อสำรวจพื้นที่การออกแบบ (Design space) ได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 5

**ตารางที่ 5** สถิติที่ใช้ประเมินความสอดคล้องสำหรับพื้นที่ผิวและรูพรุน (BET)

Std. Dev.	28.72	R <sup>2</sup>	0.9691
Mean	520.53	Adjusted R <sup>2</sup>	0.8996
C.V. %	5.52	Predicted R <sup>2</sup>	NA <sup>(1)</sup>
		Adeq Precision	11.2312

<sup>(1)</sup> กรณีที่มี leverage = 1.0000: ค่า Predicted R<sup>2</sup> และสถิติ PRESS ไม่สามารถกำหนดได้

สมการในรูปของตัวแปรที่เข้ารหัส (Coded factors) สามารถใช้ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตอบสนองสำหรับระดับที่กำหนดของแต่ละปัจจัย โดยค่าเริ่มต้นระดับสูงของตัวแปรจะถูกเข้ารหัสเป็น +1 และระดับต่ำถูกเข้ารหัสเป็น -1 สมการที่เข้ารหัสนี้มีประโยชน์ในการประเมิน ผลกระทบสัมพัทธ์ของตัวแปรปัจจัย เพราะสามารถเปรียบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์แต่ละตัวแปรได้โดยตรง สมการนี้ช่วยให้พยากรณ์พื้นที่ผิวได้ตามระดับตัวแปรที่กำหนด และยังชี้ให้เห็นตัวแปร

ที่สำคัญที่สุดต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ แสดงดังสมการที่ 4 แบบจำลอง Quadratic สำหรับพื้นที่ผิว เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงและวิเคราะห์ผลผลิตพื้นที่ผิว และรูพรุน แต่ต้องระวังช่วงอุณหภูมิสูงที่ทำให้ถ่านสลายตัวและควรยืนยันผลด้วยการทดลองเพิ่มเติมสำหรับชีวมวลอื่น ๆ

$$Y_{\text{BET Surface Area}} = + 602.74 - 69.22(A_1) - 50.15(B_2) - 39.55(C_3) - 87.52(A_1B_2) - 37.96(A_1C_3) + 24.89(B_2C_3) - 213.96A_1^2 - 40.29B_2^2 - 24.07C_3^2 \quad (4)$$

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์จากกาบหมาก

ผลของการศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ ประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลา และอัตราการไหลของไอน้ำ ในการกระตุ้น พบว่าโมเดลพื้นผิวการตอบสนองสามมิติของอุณหภูมิต่อผลผลิตและพื้นที่ผิวรูพรุน ดังแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 2 การเพิ่มอุณหภูมิจาก 700 °C เป็น 800 °C ทำให้ผลผลิตลดลงจาก 80% เป็น 55% เนื่องจากคาร์บอนสูญเสียมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวรูพรุนเพิ่มจาก 380.34 เป็น 652.97 m<sup>2</sup>/g แสดงว่าอุณหภูมิสูงช่วยพัฒนารูพรุน การเพิ่มเวลา 1–2 h ช่วยให้รูพรุนและพื้นที่ผิวสูงขึ้น (591.12–630.27 m<sup>2</sup>/g) แต่เวลานานเกิน 3 h ทำให้ผลผลิตลดลงเหลือ 20% หรือต่ำสุดจนเหลือเพียง 2% เพราะโครงสร้างถูกกัดกร่อน อัตราการไหลของไอน้ำต่ำทำให้ผลผลิตสูงแต่พื้นที่ผิวน้อย ขณะที่อัตราสูงช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว แต่สูงเกินไปร่วมกับอุณหภูมิสูงทำให้ถ่านสลายเป็นเถ้า ปัจจัยสำคัญที่สุดคืออุณหภูมิ รองลงมาคือเวลาและอัตราการไหลของไอน้ำ สภาวะเหมาะสมคือ 800 °C เวลา 2 h และอัตราการไหล 50 cm<sup>3</sup>/min ให้ผลผลิตประมาณ 60% และพื้นที่ผิวสูงสุด 652.97 m<sup>2</sup>/g เป็นสภาวะเหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ที่สมดุลระหว่างการรักษามวลคาร์บอนและการพัฒนารูพรุน การทดลองบางจุดที่อุณหภูมิและอัตราการไหลสูงเกินไปทำให้ ถ่านสลายเป็นเถ้า ทำให้ข้อมูลสูญหาย ผลของอัตราการไหลของไอน้ำ แม้มีแนวโน้มเพิ่มพื้นที่ผิว แต่ก็ยังไม่ชัดเจนจะต้องมีการทำซ้ำหรือขยายช่วงทดสอบเพื่อยืนยันเพิ่มเติม อีกทั้งข้อมูลยังเป็นการศึกษาในระดับเล็ก (Lab scale) การสรุปเชิงปริมาณในเชิงอุตสาหกรรมอาจต้องปรับค่าพารามิเตอร์อีก งานวิจัยนี้ให้เห็นแนวทางที่ชัดเจนและใช้ได้จริงสำหรับการเตรียมถ่านกัมมันต์คุณภาพสูง แต่ต้องระวังอุณหภูมิและอัตราการไหลสูงเกินไป และควรยืนยันผลด้วยการทดลองเพิ่มเติม

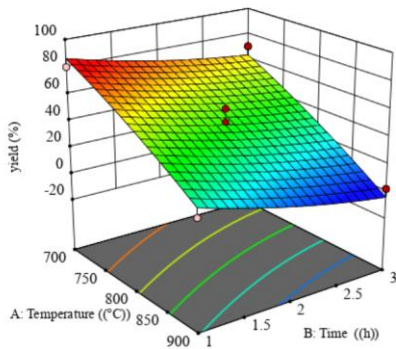
จากการรวบรวมงานวิจัยหลายฉบับ พบว่าการกระตุ้นทางกายภาพยังคงเป็นกระบวนการหลักในเชิงพาณิชย์ เช่นกัน เนื่องจากเป็นวิธี 2 ขั้นตอนที่ไม่ใช้สารเคมี การคาร์บอนเซชัน ในสภาวะบรรยากาศก๊าซเฉื่อยประเภทต่าง ๆ และการกระตุ้นในก๊าซออกซิไดซ์ เช่น ไอน้ำ หรือก๊าซ CO<sub>2</sub> ที่อุณหภูมิ 800–1100 °C ทำให้ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างพรุนดี พื้นที่ผิวสูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [5] การใช้วิธีพื้นผิวการตอบสนอง (RSM) กับกระบวนการกระตุ้นด้วยกรดฟอสฟอริก ให้ผลพื้นที่ผิว 473 m<sup>2</sup>/g และผลผลิต 54% [6] ซึ่งเป็นผลลัพธ์ดีในระดับห้องปฏิบัติการ แต่ยังคงประเมินการใช้งานจริงและต้นทุนหรือการผลิตการใช้วัสดุเหลือทิ้ง เช่น เปลือกพิสตาชิโอ เมล็ดอินทผาลัม กิ่งพืช ก้านหรือต้นข้าวโพด สามารถให้ พื้นที่ผิว 350–789 m<sup>2</sup>/g และผลผลิตสูง 65–83% [7–9] แสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้ชีวมวลเหลือทิ้งผลิตถ่านกัมมันต์คุณภาพดี แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะการผลิตเพื่อให้ชีวมวลดังกล่าวเกิดประโยชน์สูงสุด สภาวะการกระตุ้นด้วยก๊าซ CO<sub>2</sub> มักให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนสูงกว่าไอน้ำ เช่น ฟางข้าวบาร์เลย์ให้ผลพื้นที่ผิว 789 m<sup>2</sup>/g สำหรับก๊าซ CO<sub>2</sub> และ 552 m<sup>2</sup>/g สำหรับไอน้ำ [9]

**ตารางที่ 6** ผลการทดลองการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำต่อค่าผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิว (BET) ของถ่านกัมมันต์

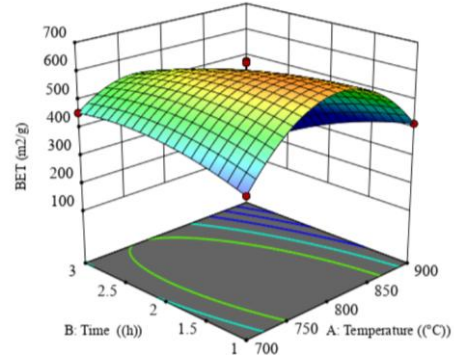
Std.	Run	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (h)	อัตราการไหลของไอน้ำ (cm <sup>3</sup> /min)	Yield (%)	BET (m <sup>2</sup> /g)
1	1	700	1	75	80	380.34
14	2	800	2	75	55	571.51
10	3	800	3	50	20	502.89
16	4	800	2	75	35	636.03
11	5	800	1	100	65	524.09
8	6	900	2	100	5	-
6	7	900	2	50	5	-
2	8	900	1	75	20	416.95
12	9	800	3	100	25	473.56
9	10	800	1	50	60	652.97
7	11	700	2	100	65	432.34
5	12	700	2	50	70	435.52
17	13	800	2	75	45	630.27
4	14	900	3	75	2	-
15	15	800	2	75	40	591.12
3	16	700	3	75	70	455.08
13	17	800	2	75	40	584.76

ถ่านกัมมันต์จากแกลบด้วยการกระตุ้นทางกายภาพด้วยก๊าซ CO<sub>2</sub> ให้พื้นที่ผิวสูงสุด 502 m<sup>2</sup>/g และรูพรุนขนาดหลากหลาย ผลชี้ชัดว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรสำคัญ สำหรับการพัฒนาพื้นที่ผิวและโครงสร้างรูพรุน [10] เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ ส่วนการกระตุ้นทางกายภาพโดยปรับสัดส่วนไอน้ำ การเพิ่มสัดส่วนไอน้ำทำให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นจากถ่านชาร์ 89 m<sup>2</sup>/g เป็นถ่านกัมมันต์ 653 m<sup>2</sup>/g (ไอน้ำ) [11] นอกจากนี้ตัวแปรดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าการใช้แรงดันหรือความดันภายในห้องกระตุ้นสูงกว่าบรรยากาศ จะช่วยให้สารกระตุ้นเข้าปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ดียิ่งขึ้น ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนรวม [12] ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเศษไม้และกะลาผลไม้มีพื้นที่ผิว 308–367 m<sup>2</sup>/g และเหมาะกับการดูดซับสารต่าง ๆ ได้ดี [13–14] การใช้ RSM กับการออกแบบการทดลองแบบ BBD สำหรับถ่านกัมมันต์จากเปลือกเมล็ดปาล์มสามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมเพื่อดูดซับ CO<sub>2</sub> ได้ 2.13 mg/g ที่อุณหภูมิ 850 °C เวลา 60 min และผลผลิต 25.15 %wt [15] ถ่านกัมมันต์จากกะลามะเขาคายด้วยคาร์บอนในเซชัน 500 °C เวลา 90 min และกระตุ้นด้วยไอน้ำ 800 °C เวลา 60 min ได้ผลผลิต 68.81% พื้นที่ผิว 1,245.76 m<sup>2</sup>/g และสมบัติใกล้เคียงถ่านกัมมันต์เชิงพาณิชย์ [16] ความแตกต่างระหว่างผลผลิต (Yield) กับพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ของถ่านกัมมันต์เกิดจากลักษณะของกระบวนการผลิตและกลไกทางเคมี-กายภาพที่เกี่ยวข้อง คือปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ได้เทียบกับวัสดุต้นกำเนิด ชีวมวลแต่ละชนิดมีโครงสร้างเซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสต่างกัน จะเกิดผลผลิตสูงสุดเมื่อการสูญเสียคาร์บอนและสารระเหยต่ำ การคาร์บอนในเซ

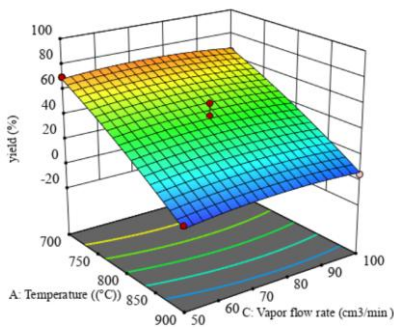
ชั้นหรือการกระตุ้นที่มากเกินไป อุณหภูมิสูง เวลานาน มักทำให้ผลผลิตลดลง เพราะวัสดุถูกเผาไหม้หรือสลายเป็นก๊าซ ส่วนพื้นที่ผิวจำเพาะแสดงถึงจำนวนพื้นที่ผิวที่พร้อมสำหรับการดูดซับจะสูงขึ้น เมื่อเกิดการสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Micropores) การเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาการกระตุ้นมากขึ้นจะช่วยเปิดรูพรุน ทำให้พื้นที่ผิวสูงขึ้น แม้ผลผลิตจะลดลง ดังนั้น การปรับสภาวะการกระตุ้นต้องหาจุดสมดุล เพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่ทั้งพื้นที่ผิวสูงและผลผลิตดี ซึ่งมวลแต่ละชนิดมีโครงสร้างทางกายภาพและเคมีเฉพาะ ส่งผลต่อการสร้างรูพรุนและพื้นที่ผิวจึงแตกต่างกัน แม้กระบวนการผลิตเหมือนกันการปรับอุณหภูมิ เวลา และชนิดตัวกระตุ้น สามารถปรับเงื่อนไขการทดสอบให้เหมาะสมกับวัสดุแต่ละชนิดได้



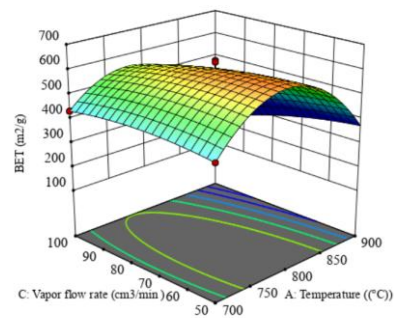
Yield-AB



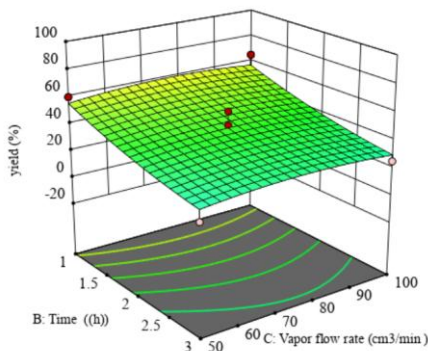
BET-AB



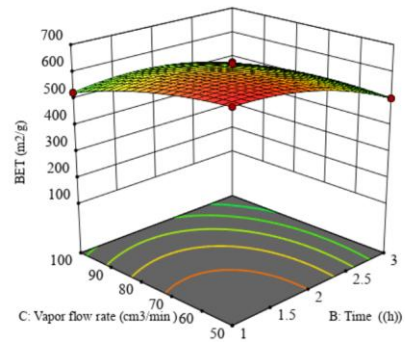
Yield-AC



BET-AC



Yield-BC



BET-BC

ภาพที่ 2 โมเดลพื้นผิวการตอบสนองสามมิติของผลผลิตและพื้นที่ผิวในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากหมาก (Yield-AB และ BET-AB) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลา (Yield-AC และ BET-AC) ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการไหลของไอน้ำ และ (Yield-BC และ BET-BC) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา และอัตราการไหลของไอน้ำ

## สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกากหมากโดยใช้กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพด้วยไอน้ำ เพื่อเพิ่มผลผลิต (Yield) และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET Surface Area) ของถ่านกัมมันต์ โดยออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวการตอบสนอง (RSM) แบบ Box-Behnken Design (BBD) ภายใต้ตัวแปร 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ 700–900 °C เวลา 1–3 h อัตราการไหลของไอน้ำ 50–100 cm<sup>3</sup>/min ผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิและเวลาการกระตุ้น มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะค่าพื้นที่ผิวและผลผลิต การเพิ่มอุณหภูมิและเวลา ช่วยเพิ่มค่าพื้นที่ผิวและรูพรุน แต่ทำให้ผลผลิตลดลงเนื่องจากการสลายโครงสร้างคาร์บอน อัตราการไหลของไอน้ำมีผลน้อยกว่าปัจจัยอื่น แต่หากสูงเกินไปจะทำให้ถ่านสลายตัวเป็นเถ้า จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุด คืออุณหภูมิ 800 °C เวลา 2 h และอัตราการไหลของไอน้ำ 50 cm<sup>3</sup>/min ให้ผลผลิตเฉลี่ยประมาณ 60% และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุด 652.97 m<sup>2</sup>/g ค่าพื้นที่ผิวดังกล่าวเป็นไปตามค่ามาตรฐานทั่วไปของถ่านกัมมันต์จากชีวมวล และเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในงานดูดซับและบำบัดสิ่งแวดล้อม ทั้งยังเป็นกระบวนการที่ไม่ใช้สารเคมีจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ แบบจำลองที่พัฒนาในงานวิจัยสามารถใช้ในการทำนายและปรับปรุงกระบวนการผลิตในอนาคต เพื่อเพิ่มคุณภาพและความคุ้มค่าทางพลังงานของถ่านกัมมันต์จากชีวมวลอื่นได้เช่นกัน ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัย ควรทำการศึกษาระดับถ่านกัมมันต์ในช่วงตัวแปรที่มีความละเอียดมากขึ้น เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้นและมีผลต่อสมมูลเรื่องปริมาณผลผลิต คุณภาพ และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณ ทูสนับสนุนงานวิจัยภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิต วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนสิ่งอำนวยความสะดวกและงบประมาณการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). *งานพลังงานทดแทน/การอนุรักษ์พลังงาน*. สืบค้นจาก <https://www.dede.go.th/>.
- [2] สถานีวิทยุกระจายเสียงเพื่อการเกษตร. (2556). *เกษตร ขับเคลื่อน BCG Model หนุนวิสาหกิจชุมชนโฮมฮักตาก*. สืบค้นจาก <https://www.am1386.com/>.
- [3] สัมฤทธิ์ ไม้พวง. (2564). ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [4] วาโยฟาร์ม. (2565). *ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) คืออะไร?*. สืบค้นจาก <https://farm.vayo.co.th/>.
- [5] Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393-415.
- [6] Yirdaw, G., Dessie, A., & Birhan, T. A. (2023). Optimization of process variables to prepare activated carbon from Noug (*Guizotia abyssinica* cass.) stalk using response surface methodology. *Heliyon*, 9(6).

- [7] Faramarzi, A. H., Kaghazchi, T., Ebrahim, H. A., & Ebrahimi, A. A. (2015). A mathematical model for prediction of pore size distribution development during activated carbon preparation. **Chemical Engineering Communications**, 202(2), 131-143.
- [8] El-Raie, A. E. S., Abdelbary, K. M., Ismail, N. K., & Amer, M. A. (2016). Production of Activated Carbon from Agricultural Residues. **International Journal of ChemTech Research**, 9(8), 62-69.
- [9] Pallares, J., Gonzalez-Cencerrado, A., & Arauzo, I. (2018). Production and characterization of activated carbon from barley straw by physical activation with carbon dioxide and steam. **Biomass and bioenergy**, 115, 64-73.
- [10] Wazir, A. H., Wazir, I. U., & Wazir, A. M. (2020). Preparation and characterization of rice husk based physical activated carbon. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 1-11.
- [11] Mai, N. T., Nguyen, M. N., Tsubota, T., Nguyen, P. L., & Nguyen, N. H. (2021). Evolution of physico-chemical properties of Dicranopteris linearis-derived activated carbon under various physical activation atmospheres. **Scientific reports**, 11(1), 1-9.
- [12] Yi, H., Nakabayashi, K., Yoon, S. H., & Miyawaki, J. (2021). Pressurized physical activation: A simple production method for activated carbon with a highly developed pore structure. **Carbon**, 183, 735-742.
- [13] Lee, S. M., Choi, S. S., & Tiwari, D. (2017). Simultaneous removal of Hg (II) and phenol using functionalized activated carbon derived from areca nut waste. **Metals**, 7(7), 248.
- [14] Arena, N., Lee, J., & Clift, R. (2016). Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. **Journal of Cleaner Production**, 125, 68-77.
- [15] Rashidi, N. A., & Yusup, S. (2019). Production of palm kernel shell-based activated carbon by direct physical activation for carbon dioxide adsorption. **Environmental Science and Pollution Research**, 26(33), 33732-33746.
- [16] จตุรภัทร เลิศวิภาภัทร (2554). การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะเขาวินโดยการกระตุ้นด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. Chulalongkorn University Thesis and Dissertations (Chula ETD). 61245.

แบบจำลองและจำลองสถานการณ์ระบบอิเล็กโทรไลซิสแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอนที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับแหล่งน้ำประเภทต่าง ๆ

Modeling and Simulation of PEM Electrolysis System Powered by DC Power Supply Using Different Water Sources

ชญศ คิตเมตตากุล<sup>1</sup> บุญยัง ปลั่งกลาง<sup>1\*</sup>

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

\*Corresponding author: Tel.: 02-5493433. E-mail address: boonyang.p@en.rmutt.ac.th

### Abstract

This paper investigates the performance of a Proton Exchange Membrane (PEM) electrolysis system under fixed operational parameters (15V, 26A) using four different water sources: tap water (130 ppm TDS), deionized (DI) water, reverse osmosis (RO) water, and distilled water. A comprehensive model was developed to simulate hydrogen production rates, system efficiency, and long-term electrode degradation. The results demonstrated that water conductivity significantly affected electrolysis performance, with higher-purity water sources improving energy efficiency and reducing electrode degradation. This research provides valuable insights for optimizing PEM electrolysis systems in both industrial and research applications.

**Keywords:** PEM Electrolysis, Hydrogen Production, Solar Power, Water Quality, Energy Efficiency

### บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาประสิทธิภาพของระบบอิเล็กโทรไลซิสแบบ Proton Exchange Membrane (PEM) ภายใต้พารามิเตอร์การทำงานคงที่ (15V, 26A) โดยใช้แหล่งน้ำ 4 ประเภท ได้แก่ น้ำประปา (130 ppm TDS) น้ำปราศจากไอออน (DI) น้ำ RO และน้ำกลั่น การพัฒนาแบบจำลองที่ครอบคลุมเพื่อจำลองอัตราการผลิตไฮโดรเจน ประสิทธิภาพของระบบ และการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดในระยะยาว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการนำไฟฟ้าของน้ำส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการอิเล็กโทรไลซิส โดยแหล่งน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงให้ประสิทธิภาพด้านพลังงานที่ดีขึ้นและการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดที่น้อยลง งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีค่าสำหรับการปรับปรุงระบบอิเล็กโทรไลซิส PEM ทั้งในการใช้งานด้านอุตสาหกรรมและการวิจัย

**คำสำคัญ:** อิเล็กโทรไลซิส PEM, การผลิตไฮโดรเจน, พลังงานแสงอาทิตย์, คุณภาพน้ำ, ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

### บทนำ

การผลิตไฮโดรเจนผ่านกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสของน้ำได้กลายเป็นเทคโนโลยีสำคัญสำหรับการกักเก็บพลังงานหมุนเวียนและการผลิตเชื้อเพลิงสะอาด เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานยั่งยืนที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก (International Energy Agency [IEA], 2022)[1] อิเล็กโทรไลซิสแบบเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane: PEM)

ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากข้อได้เปรียบมากมาย ได้แก่ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูง การออกแบบที่กะทัดรัด และความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนบริสุทธิ์สูง (Wang et al., 2021)[2] เทคโนโลยีนี้แสดงให้เห็นถึงเส้นทางที่มีแนวโน้มดีสำหรับการผลิตไฮโดรเจนสีเขียว พร้อมการประยุกต์ใช้ที่มีศักยภาพในการกักเก็บพลังงาน การขนส่ง และกระบวนการอุตสาหกรรม (Stetson et al., 2022)[3] ความก้าวหน้าล่าสุดได้เน้นย้ำถึงบทบาทสำคัญของคุณภาพน้ำต่อประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลซิส PEM อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ครอบคลุมซึ่งกล่าวถึงแง่มุมเฉพาะนี้ยังมีอยู่อย่างจำกัด (Rodriguez et al., 2021)[4] ในขณะที่งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้สำรวจพารามิเตอร์การดำเนินงานต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น อุณหภูมิ ความดัน และวัสดุเยื่อหุ้ม (Briguglio et al., 2021)[5] แต่ให้ความสนใจน้อยกว่าต่อผลกระทบที่ละเอียดอ่อนของลักษณะแหล่งน้ำต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของระบบ (Choi et al., 2022)[6] ความแตกต่างหลากหลายของแหล่งน้ำก่อให้เกิดความท้าทายที่ซับซ้อนในประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลซิส โดยไอออนที่ละลายอยู่ การนำไฟฟ้า และสิ่งเจือปนอาจมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่ออัตราการผลิตไฮโดรเจนและการเสื่อมสภาพของระบบ (Kim et al., 2022)[7] ความแปรปรวนนี้เน้นย้ำถึงความจำเป็นสำหรับการตรวจสอบอย่างเป็นระบบที่วัดความแปรปรวนของประสิทธิภาพข้ามแหล่งน้ำที่แตกต่างกัน ภายใต้สภาวะที่ควบคุม (Lee et al., 2023)[8]

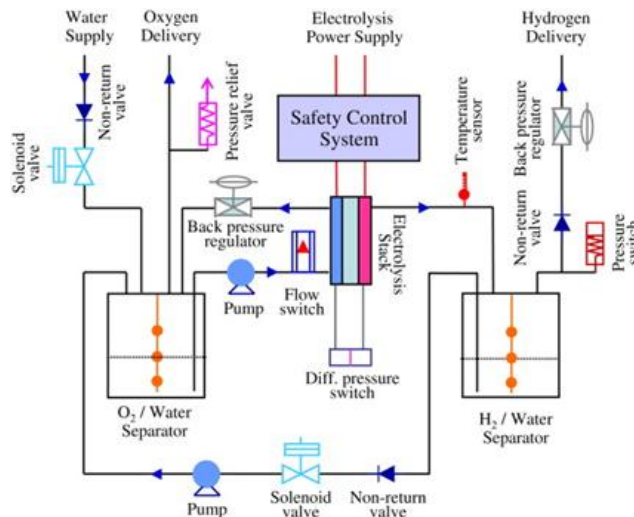
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลกระทบของคุณภาพน้ำต่อประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลซิส PEM อย่างครอบคลุม โดยวิเคราะห์แหล่งน้ำที่แตกต่างกันสี่แหล่งอย่างเป็นระบบ ได้แก่ น้ำประปา (130 ppm TDS) น้ำปราศจากไอออน น้ำจากระบบบอสมอสซิสย้อนกลับ และน้ำกลั่น การศึกษานี้ใช้ทั้งการสร้างแบบจำลองทางทฤษฎีและการตรวจสอบผลด้วยการทดลองที่ระบบการดำเนินงานคงที่ (15V, 26A) โดยมีเป้าหมายอัตราการผลิตไฮโดรเจน 1,000 มล./นาที่ ด้วยการตรวจสอบอัตราการผลิตไฮโดรเจน ประสิทธิภาพของระบบ และการเสื่อมสภาพของอิเล็กโทรดในระยะยาว งานวิจัยนี้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่สำคัญสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอิเล็กโทรไลซิส PEM ในการประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมและงานวิจัย (Nguyen et al., 2023; Zhao et al., 2022)[9] (Zhao, Chen, & Zhang, 2022)[10]

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวัดปริมาณอัตราการผลิตไฮโดรเจนข้ามแหล่งน้ำต่าง ๆ วิเคราะห์ผลกระทบของการนำไฟฟ้าของน้ำและปริมาณแร่ธาตุต่อประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลซิส ประเมินการเสื่อมสภาพของระบบในระยะยาว ภายใต้สภาวะน้ำที่แตกต่างกัน และให้ข้อมูลเชิงลึกสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบระบบอิเล็กโทรไลซิส PEM และการเลือกแหล่งน้ำ

## ขั้นตอนการวิจัย

### 1. จำลองการติดตั้งเครื่องมือทดลอง

ระบบทดลองประกอบด้วยเซลล์อิเล็กโทรไลซิส PEM ที่มีพื้นที่ใช้งาน 25 cm<sup>2</sup> เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีความแม่นยำ (15V, 26A) การหมุนเวียนน้ำรักษาไว้ที่อัตราการไหลคงที่ 100 mL/min ระบบควบคุมอุณหภูมิที่ 70±1°C การผลิตไฮโดรเจนวัดด้วยเครื่องวัดการไหลที่สอบเทียบแล้วด้วยความแม่นยำ ±1%



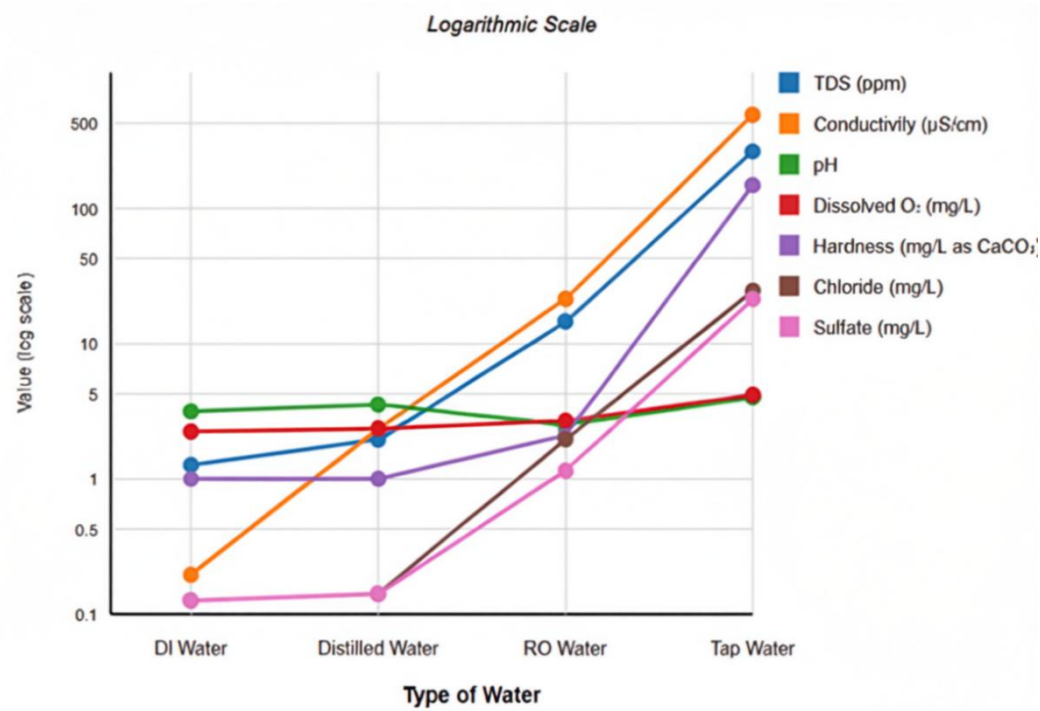
ภาพที่ 1 แผนผังแสดงระบบอิเล็กโทรไลซิสแบบ PEM. (Clarke, et al.,2010) [11]

## 2. แหล่งน้ำและการหาลักษณะเฉพาะ

การศึกษาใช้โปรโตคอลการวิเคราะห์แหล่งน้ำที่ครอบคลุมเพื่อประเมินน้ำ 4 ประเภทที่แตกต่างกัน: น้ำประปา, น้ำจากกระบวนการ Reverse Osmosis (RO), น้ำกลั่น, และน้ำปราศจากไอออน (DI) น้ำแต่ละแหล่งได้รับการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมีอย่างเข้มงวด โดยวัดปริมาณพารามิเตอร์ที่สำคัญ รวมถึงปริมาณของแข็งที่ละลายทั้งหมด (TDS), ความนำไฟฟ้า, ค่า pH, ปริมาณออกซิเจนที่ละลาย และองค์ประกอบของไอออน การวิเคราะห์ห้เป็นระบบช่วยให้สามารถประเมินความแปรปรวนของคุณภาพน้ำได้อย่างแม่นยำ และผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลซิส PEM โดยมีคุณสมบัติโดยละเอียดระบุไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปคุณสมบัติหลักของน้ำแต่ละชนิด

Parameter	Tap Water	RO Water	Distilled Water	DI Water
TDS (ppm)	130 ± 5	15 ± 2	3 ± 1	<1
Conductivity (µS/cm)	210 ± 8	22 ± 3	5 ± 1	0.8 ± 0.2
pH	7.8 ± 0.2	6.5 ± 0.1	6.9 ± 0.1	7.0 ± 0.1
Dissolved O <sub>2</sub> (mg/L)	8.1 ± 0.3	6.4 ± 0.2	5.2 ± 0.2	4.8 ± 0.2
Hardness (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	85 ± 5	4 ± 1	<1	<1
Chloride (mg/L)	22 ± 2	3 ± 1	<0.5	<0.1
Sulfate (mg/L)	18 ± 2	2 ± 0.5	<0.5	<0.1



ภาพที่ 2 กราฟเปรียบเทียบคุณสมบัติน้ำชนิดต่างๆ (Choi et al., 2022) [6]

### 3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าของระบบอิเล็กโทรไลซิส PEM ถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้การวิเคราะห์เส้นโค้งโพลาร์ไรเซนซ์ แรงดันเซลล์ (V) สามารถแสดงเป็น

$$V = E_{rev} + \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc} \quad (1)$$

เมื่อ :  $E_{rev}$  คือแรงดันเซลล์ที่ย้อนกลับได้ (1.23v ที่สภาวะมาตรฐาน)

$\eta_{act}$  คือค่าศักย์เกินเนื่องจากการกระตุ้น (Activation Overpotential)

$\eta_{ohm}$  คือศักย์เกินแบบโอห์มิก (Ohmic overpotential)

$\eta_{conc}$  คือศักย์เกินแบบความเข้มข้น (Concentration overpotential)

โอเวอร์โพเทนเชียลการกระตุ้นถูกสร้างแบบจำลองโดยใช้สมการ Butler-Volmer

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha F} \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (2)$$

เมื่อ : R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

$\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนประจุ

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์

i คือ ความหนาแน่นกระแส

$i_0$  คือ ความหนาแน่นกระแสแลกเปลี่ยน

ค่าการสูญเสียศักย์ไฟฟ้าแบบโอห์มิก ซึ่งได้รับผลกระทบอย่างมากจากค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ ได้ถูกคำนวณดังนี้

$$\eta_{ohm} = i \times (r = R_{mem} + R_{elec} + R_{connect} + R_{sol}) \quad (3)$$

เมื่อ :  $R_{mem}$  คือ ความต้านทานของเมมเบรน

$R_{elec}$  คือ ความต้านทานของอิเล็กโทรด

$R_{connect}$  คือ ความต้านทานของจุดเชื่อมต่อ

$R_{sol}$  คือ ความต้านทานของสารละลาย

อัตราการผลิตไฮโดรเจนคำนวณโดยใช้กฎของฟาราเดย์:

$$\eta H_2 = \frac{\eta F \times I}{2F} \quad (4)$$

เมื่อ :  $\eta H_2$  คืออัตราการไหลเชิงโมลของก๊าซไฮโดรเจน

$\eta F$  คือค่าประสิทธิภาพฟาราเดย์

$I$  คือกระแสไฟฟ้ารวม

$F$  คือค่าคงที่ของฟาราเดย์

จากนั้น อัตราการไหลเชิงปริมาตรภายใต้สภาวะมาตรฐานถูกคำนวณเป็น

$$\dot{V}H_2 = \eta H_2 \times V_m \quad (5)$$

เมื่อ :  $V_m$  คือ ปริมาตรโมลของไฮโดรเจนที่สภาวะมาตรฐาน (22.4 ลิตร/โมล)

ประสิทธิภาพระบบกับแหล่งน้ำที่แตกต่างกัน ที่เงื่อนไขการทำงานคงที่ 15V และ 26A แหล่งน้ำทั้งสี่ประเภทสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ แต่มีความแตกต่างที่สังเกตเห็นในประสิทธิภาพของระบบ น้ำ DI ให้ค่าอัตราการผลิตไฮโดรเจนสูงสุดอย่างสม่ำเสมอ (985 mL/min) ตามมาด้วยน้ำกลั่น (970 mL/min), น้ำ RO (935 mL/min) และน้ำประปา (880 mL/min) ความแตกต่างเหล่านี้ส่วนใหญ่เกิดจากค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณไอออนละลายที่แตกต่างกันของแต่ละแหล่งน้ำ

#### 4. ข้อจำกัดของแบบจำลอง

- สมมติฐานสภาวะคงตัว - แบบจำลองสมมติว่าระบบทำงานที่สภาวะคงตัว ไม่รวมการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกในช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดการทำงาน
- การกระจายอุณหภูมิ - สมมติว่าอุณหภูมิกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งเซลล์ ซึ่งอาจไม่สะท้อนการกระจายอุณหภูมิที่แท้จริงในการทำงานจริง
- ผลกระทบของฟองก๊าซ - แบบจำลองไม่ได้รวมผลกระทบของการก่อตัวของฟองและการเคลื่อนที่ของฟองที่อาจส่งผลต่อการถ่ายเทมวล
- การเสื่อมสภาพระยะยาว - แบบจำลองการเสื่อมสภาพใช้อัตราการเสื่อมสภาพเชิงเส้น ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมกลไกการเสื่อมสภาพที่ซับซ้อนทั้งหมด
- สิ่งเจือปนเฉพาะ - การศึกษาวัดพารามิเตอร์หลักของน้ำ แต่ไม่ได้วิเคราะห์สิ่งเจือปนทุกชนิดที่อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพ

- ขอบเขตการใช้งาน - แบบจำลองได้รับการตรวจสอบที่เงื่อนไขการทำงานเฉพาะ (15V, 26A, 70°C) และอาจต้องปรับเทียบใหม่สำหรับเงื่อนไขอื่น

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

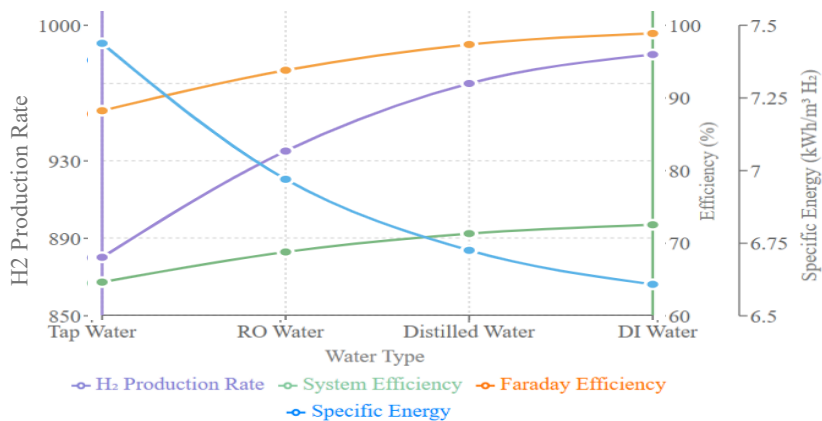
#### 1. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงาน

ประสิทธิภาพระบบคำนวณเป็นอัตราส่วนของเนื้อหาพลังงานไฮโดรเจน (ตามค่าความร้อนสูง) ต่อพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้า:

$$\eta_{sys} = \frac{\dot{m} H_2 \times HHV}{V \times I} \quad (6)$$

ตารางที่ 2 เมตริกซ์ประสิทธิภาพระบบภายใต้เงื่อนไขการทำงานคงที่ (แรงดัน 15V, กระแส 26A , พลังงาน 390W)

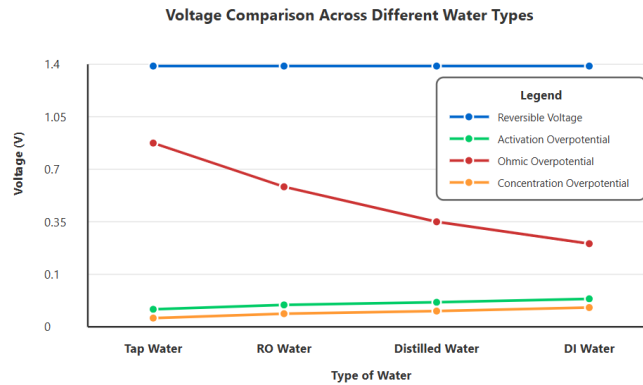
พารามิเตอร์	น้ำประปา	น้ำ RO	น้ำกลั่น	น้ำ DI
อัตราการผลิต H <sub>2</sub> (mL/min)	880 ± 15	935 ± 10	970 ± 8	985 ± 5
ประสิทธิภาพระบบ (%)	64.5 ± 1.2	68.6 ± 0.8	71.1 ± 0.6	72.3 ± 0.4
ประสิทธิภาพฟาราเดย์ (%)	87.8 ± 1.5	93.3 ± 1.0	96.8 ± 0.8	98.3 ± 0.5
พลังงานจำเพาะ (kWh/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> )	7.38 ± 0.13	6.94 ± 0.07	6.71 ± 0.06	6.60 ± 0.03



ภาพที่ 3 อัตราการผลิตไฮโดรเจนจากแหล่งน้ำ 4 ประเภทภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่เหมือนกัน

#### 2. การวิเคราะห์โอเวอร์โพเทนเชียล

การกระจายของการสูญเสียแรงดันถูกวิเคราะห์เพื่อเข้าใจผลกระทบของคุณภาพน้ำต่อองค์ประกอบโอเวอร์โพเทนเชียลที่แตกต่างกัน โอเวอร์โพเทนเชียลโอห์มิกแสดงการลดลงอย่างต่อเนื่องจากน้ำประปา (0.62 V) ไปยังน้ำ DI (0.20 V) ซึ่งชี้ให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความบริสุทธิ์ของน้ำและความต้านทานไฟฟ้า



ภาพที่ 4 การวิเคราะห์เปรียบเทียบส่วนประกอบแรงดันไฟฟ้าในระบบอิเล็กโทรเคมีของแหล่งน้ำต่าง ๆ

กราฟเส้นแสดงการกระจายของส่วนประกอบแรงดันไฟฟ้าพื้นฐานในระบบอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้แหล่งน้ำ 4 ประเภท ได้แก่ น้ำประปา น้ำอาร์โอ (RO) น้ำกลั่น และน้ำดีไอ (DI) แกนตั้งแทนค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ในขณะที่แกนนอนแทนประเภทของแหล่งน้ำ มีการวิเคราะห์ส่วนประกอบแรงดันไฟฟ้าที่สำคัญสี่ประการ ได้แก่

- สีฟ้า แรงดันไฟฟ้าแบบย้อนกลับ (reversible voltage)
- สีเขียว แรงดันไฟฟ้าเกินจากการกระตุ้น (activation overpotential)
- สีแดง แรงดันไฟฟ้าเกินจากความต้านทาน (ohmic overpotential)
- สีส้ม แรงดันไฟฟ้าเกินจากความเข้มข้น (concentration overpotential)

โดยสังเกตว่า แรงดันไฟฟ้าเกินจากความต้านทาน (ohmic overpotential) มีแนวโน้มลดลงจากน้ำประปา (0.62 V) ไปจนถึงน้ำ DI (0.20 V) ซึ่งบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างความบริสุทธิ์ของน้ำกับความต้านทานทางไฟฟ้า ส่วนแรงดันไฟฟ้าแบบย้อนกลับและแรงดันไฟฟ้าเกินจากการกระตุ้นมีค่าเท่าเดิมในทุกแหล่งน้ำ ขณะที่แรงดันไฟฟ้าเกินจากความเข้มข้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย การแสดงผลนี้ช่วยให้เข้าใจลักษณะทางอิเล็กโทรเคมีของแหล่งน้ำต่าง ๆ และชี้ให้เห็นถึงผลกระทบที่เป็นไปได้ขององค์ประกอบน้ำต่อประสิทธิภาพของระบบอิเล็กโทรไลต์

### 3. ประสิทธิภาพระยะยาวและการเสื่อมสภาพ

การทำงานเป็นเวลานาน (100 ชั่วโมง) เผยให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในอัตราการเสื่อมสภาพระหว่างแหล่งน้ำต่างๆ กรณีน้ำประปาแสดงการเสื่อมสภาพที่เร่งขึ้นด้วยประสิทธิภาพที่ลดลง 12% ในช่วง 100 ชั่วโมง ในขณะที่น้ำ DI รักษาประสิทธิภาพที่ค่อนข้างเสถียรด้วยการลดลงเพียง 2% [7]

การตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของชิ้นตัวเร่งปฏิกิริยาแอโนดหลังการทดสอบเผยให้เห็นการสะสมแร่ธาตุอย่างมากในกรณีน้ำประปา โดยมีการสะสมที่ลดลงเป็นลำดับในกรณี RO น้ำกลั่น และน้ำ DI

### 4. ความหมายและความสำคัญ

การศึกษานี้เน้นย้ำถึงผลกระทบที่สำคัญของลักษณะแหล่งน้ำต่อประสิทธิภาพของการอิเล็กโทรไลซิส PEM โดยเน้นบทบาทของคุณภาพน้ำในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน การลดการเสื่อมสภาพของระบบระยะยาว และการปรับปรุงการทำงานของระบบโดยรวม แม้ว่าน้ำปราศจากไอออนจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพเล็กน้อยต้องสมดุลกับต้นทุนของการทำให้บริสุทธิ์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าน้ำ RO หรือน้ำกลั่นอาจเป็นทางเลือกที่ปฏิบัติได้ โดยให้ความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจสำหรับการใช้งานในโลกแห่งความเป็นจริง

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้พบว่าคุณภาพของแหล่งน้ำมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบอิเล็กโทรไลซิส PEM โดยน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่าจะให้อัตราการผลิตไฮโดรเจนและประสิทธิภาพระบบที่ดีกว่า ซึ่งน้ำ DI ให้ผลผลิตไฮโดรเจนสูงกว่าน้ำประปาถึง 12% สูงน้ำ RO ประมาณ 5% และสูงกว่า น้ำกลั่น ประมาณ 1.5% เนื่องจากมีความต้านทานสารละลายต่ำกว่าและไม่มีการสะสมแร่ธาตุที่จะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาและเมมเบรน แม้ว่าน้ำ DI จะให้ประสิทธิภาพสูงสุด แต่การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลประโยชน์แสดงว่าน้ำ RO หรือน้ำกลั่นอาจเป็นทางเลือกที่คุ้มค่ากว่าในบางการใช้งานที่การเพิ่มประสิทธิภาพเพียง 1.5-5% จากการใช้ DI อาจไม่คุ้มกับต้นทุนการทำให้บริสุทธิ์ที่สูงขึ้น ผลการศึกษานี้เน้นย้ำความสำคัญของการเลือกใช้น้ำที่มีคุณภาพเหมาะสมสำหรับการทำงานระยะยาวของระบบอิเล็กโทรไลซิส PEM

## สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าคุณภาพของน้ำมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ PEM electrolysis ภายใต้สภาวะการทำงานเดียวกัน เนื่องจากน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงช่วยลดความต้านทานของสารละลายและป้องกันการสะสมของแร่ธาตุที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาและเมมเบรนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น แม้ว่าน้ำกลั่นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด แต่การวิเคราะห์ต้นทุน-ผลตอบแทนอาจสนับสนุนการใช้น้ำ RO หรือน้ำกลั่นในบางกรณี เนื่องจากประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นเพียง 1.5-5% อาจไม่คุ้มกับต้นทุนการทำให้บริสุทธิ์ที่สูงขึ้น และงานวิจัยในอนาคตจะมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าแบบหมุนเวียนเพื่อลดการเสื่อมสภาพเมื่อนำน้ำที่มีคุณภาพต่ำกว่า

## เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency. (2022). *Global hydrogen review 2022*. IEA Publications.
- [2] Wang, Z., Liu, X., & Chen, Z. (2021). Advanced proton exchange membrane electrolysis technologies. *Nature Energy*, 6(9), 879–890. <https://doi.org/10.1038/s41560-021-00889-9>
- [3] Stetson, N., US Department of Energy, & National Renewable Energy Laboratory. (2022). Hydrogen production technologies: Current status and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, Article 112438. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112438>
- [4] Rodriguez, M., Garcia, A., & Lopez, R. (2021). Water quality parameters in electrolysis: A critical review. *Water Research*, 204, Article 117654. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117654>
- [5] Briguglio, N., Brunaccini, G., Ruiz-Aldrete, J., & Antonucci, V. (2021). Performance evaluation of PEM electrolysis systems under varying water quality conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(58), 29345–29356. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.123>
- [6] Choi, Y., Kim, S., & Park, J. (2022). Water quality impacts on proton exchange membrane electrolysis efficiency. *Renewable Energy*, 195, 1127–1140. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.089>
- [7] Kim, H., Lee, J., & Song, M. (2022). Comprehensive analysis of water source effects on PEM electrolysis performance. *Energy Conversion and Management*, 264, Article 115752. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115752>

- [8] Lee, S., Cho, H., & Kim, D. (2023). Advanced water purification strategies for enhanced hydrogen production. *Journal of Clean Energy Technologies*, 11(2), 87–102. <https://doi.org/10.18178/jocet.2023.11.2.587>
- [9] Nguyen, T., Rodriguez, P., & Martinez, L. (2023). Optimization of PEM electrolysis systems: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55, Article 103127. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103127>
- [10] Zhao, L., Chen, Y., & Zhang, W. (2022). Water source impacts on electrolyzer performance and durability. *Applied Energy*, 320, Article 119298. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119298>
- [11] Clarke, R. E., Giddey, S., & Badwal, S. P. S. (2010). Stand-alone PEM water electrolysis system for fail safe operation with a renewable energy source. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(3), 928–935. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.100>

## การพัฒนาบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด

## Development of a smart hydroponic vegetable growing system combined with smart microgrid technology

พิพัฒน์ วงศ์จักร<sup>1\*</sup>, จริญญา คนแรง<sup>1</sup>, ธนพล แสงสุวรรณ<sup>1</sup>, ชูชาติ ม่วงโกสัย<sup>2</sup> และ วิภพ ใจแข็ง<sup>1</sup>Pipat Wongjak<sup>1\*</sup>, Jarun Khonrang<sup>1</sup>, Thanapon Saengsuwan<sup>1</sup>, Chuchart Mongkosa<sup>2</sup> and Wipobh Jaikhang<sup>1</sup><sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและสมาร์ทกริดเทคโนโลยี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เชียงราย 57100

<sup>2</sup> แผนกวิชาช่างไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคเชียงราย เชียงราย 57000<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering and Smart Grid Technology, Faculty of Industrial Technology,

Chiang Rai Rajabhat University, Chiang Rai 57100

<sup>2</sup> Electrical Power Department, Chiang Rai Technical College, Chiang Rai 57000<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 0860969055. E-mail address: pipat@cmtc.ac.th

## Abstract

This research aimed to develop an intelligent hydroponic vegetable growing system integrated with smart microgrid technology, focusing on the integration of precision agriculture technology and efficient energy management. The system comprises two components: 1. An automatic hydroponic vegetable growing control system that utilizes intelligent sensors to measure and control key factors; and 2. A smart microgrid system that integrates solar power and energy storage systems. Test results showed that the smart microgrid system reduced energy consumption by up to 42.62% and maintained stable performance. The hydroponic vegetable growing system accurately controlled pH and nutrient solution concentration, averaging 6.38 and EC values averaging 1.50 mS/cm, compared to traditional growing methods. The integration of these two technologies successfully improved the control efficiency of key cultivation factors and significantly reduced energy costs at the 0.05 statistical significance level, representing an important approach for the future development of sustainable smart agriculture.

**Keywords:** Smart microgrid, Hydroponics, genius

## บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด โดยมุ่งเน้นบูรณาการระหว่างเทคโนโลยีการเกษตรแม่นยำและการจัดการพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ องค์ประกอบของระบบประกอบด้วย 2 ส่วน 1. ระบบควบคุมการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัตโนมัติที่ใช้เซนเซอร์อัจฉริยะในการตรวจวัดและควบคุมปัจจัยสำคัญ 2. ระบบสมาร์ทไมโครกริดที่ผสมผสานการใช้พลังงานแสงอาทิตย์และระบบกักเก็บพลังงาน ผลการทดสอบพบว่าระบบสมาร์ทไมโครกริดช่วยลดการใช้พลังงานได้ถึงร้อยละ 42.62 และยังมีเสถียรภาพในการทำงาน สำหรับระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์สามารถควบคุมค่า pH ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร เหลืออยู่ที่ 6.38 และค่า EC เหลืออยู่ที่ 1.50 mS/cm ได้อย่างแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการปลูกแบบดั้งเดิม การบูรณาการเทคโนโลยีทั้ง 2 ส่วนนี้ประสบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมปัจจัยสำคัญในการเพาะปลูก และลดต้นทุนพลังงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการพัฒนาการเกษตรอัจฉริยะที่ยั่งยืนในอนาคต ต่อไป

**คำสำคัญ:** สมาร์ทไมโครกริด, ไฮโดรโปนิคส์, อัจฉริยะ

## บทนำ

ปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกส่งผลให้เกิดความท้าทายในการผลิตอาหารที่มีคุณภาพและเพียงพอต่อความต้องการ การปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถควบคุมสภาพแวดล้อมการเพาะปลูก ลดการใช้พื้นที่ และประหยัดน้ำได้มากกว่าการเกษตรแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม การปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์มีต้นทุนการดำเนินงานที่สูง โดยเฉพาะต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบและการหมุนเวียนสารละลายธาตุอาหาร ต้นทุนด้านพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการดำเนินธุรกิจของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนผู้ปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ โดยต้นทุนค่าไฟฟ้าคิดเป็นร้อยละ 25-30 ของต้นทุนการดำเนินงานทั้งหมด ซึ่งส่งผลกระทบต่อกำไรและความยั่งยืนของธุรกิจ นอกจากนี้ การพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากระบบกริดหลักยังทำให้เกิดความเสี่ยงในกรณีที่เกิดไฟฟ้าดับหรือแรงดันไฟฟ้าไม่เสถียร ซึ่งอาจส่งผลเสียหายต่อผลผลิตได้ [1]

การแก้ปัญหาด้านพลังงานโดยการนำระบบพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้กับปั๊มหมุนเวียนสารละลายธาตุอาหาร ผลการศึกษาพบว่าสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบหลักได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องความเสถียรของระบบเมื่อสภาพอากาศไม่เอื้ออำนวย การพัฒนาระบบจัดการพลังงานให้มีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องมีการ บูรณาการเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริดเข้ากับระบบควบคุมการปลูก [2] การออกแบบและการนำไปใช้ของระบบจัดการความเชื่อมโยงระหว่างพลังงานและน้ำในระบบปลูกพืชไร้ดินแบบ NFT (Nutrient Film Technique) ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า ระบบดังกล่าวไม่เพียงแต่ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเท่านั้น แต่ยังใช้น้ำน้อยกว่าการเกษตรแบบดั้งเดิมถึง 90% ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบสำคัญในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านทรัพยากรน้ำ นอกจากนี้ การใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานและบริหารจัดการน้ำได้อย่างเหมาะสม [3]

จากหลักการและเหตุผลข้างต้นการวิจัยการพัฒนาการพัฒนาระบบไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะที่ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด นี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะที่ทำงานร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์อัจฉริยะ ระบบควบคุมอัตโนมัติ และการจัดการพลังงานแบบบูรณาการ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ลดต้นทุนด้านพลังงาน และสร้างความยั่งยืนในการทำเกษตรสมัยใหม่ พร้อมทั้งเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาระบบที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และผลการวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อ

เกษตรกรและผู้ประกอบการในการพัฒนาธุรกิจการเกษตรที่ยั่งยืน สามารถลดต้นทุนการผลิต อีกทั้งยังสอดคล้องกับนโยบายการพัฒนาเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) และการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย

## วิธีการวิจัย

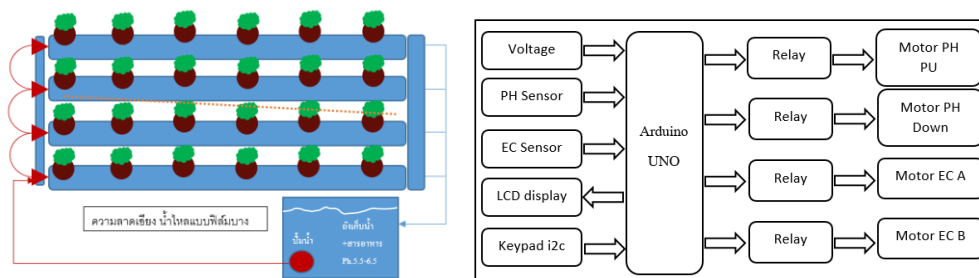
การดำเนินงานวิจัยการพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด ประกอบด้วย ดังนี้

### 1. ศึกษาข้อมูลและปัญหา

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลและปัญหาจากเกษตรกรผู้ปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ พบว่าการปลูกผักระบบไฮโดรโปนิกส์เป็นเทคโนโลยีการเกษตรสมัยใหม่ที่ใช้สารละลายธาตุอาหารแทนดิน มีข้อดีคือประหยัดน้ำ และเพิ่มผลผลิต ยังมีปัญหาสำคัญหลายประการ ได้แก่ ต้นทุนการลงทุนพลังงานสูง ความรู้เฉพาะทางในการจัดการสารละลายธาตุอาหาร การควบคุมค่า pH และ EC ปัญหาขัดข้องของระบบไฟฟ้า

### 2. ออกแบบระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์

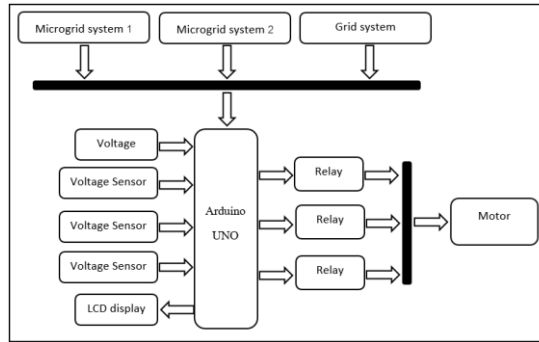
ระบบไฮโดรโปนิกส์เทคนิคฟิล์มน้ำอาหาร (Nutrient Film Technique: NFT) เป็นหนึ่งในระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด ในระบบนี้ได้ออกแบบระบบไฮโดรโปนิกส์ที่พร้อมคุณสมบัติอัตโนมัติ ระบบควบคุมสภาพแวดล้อมอย่างแม่นยำ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น ค่า pH ของน้ำ เพื่อให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างเหมาะสม เทคนิคไฮโดรโปนิกส์คือการเพาะปลูกโดยใช้น้ำแทนดิน โดยเน้นให้พืชได้รับสารอาหารครบถ้วน ใช้พื้นที่น้อยรองรับให้ผู้อยู่อาศัยในพื้นที่เคหะสถานสามารถปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์ได้ [4-5] จึงได้นำเอาระบบการหมุนเวียนของน้ำที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในระบบ NFT เพื่อให้ประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค Provincial Electricity Authority (PEA) เมื่อเปรียบเทียบกับระบบเดิม



ภาพที่ 1 ออกแบบรางปลูกผักระบบ NFT และระบบควบคุม

### 3. ออกแบบระบบเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด

เทคโนโลยีสมาร์ทกริดช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับระบบโครงข่ายไฟฟ้าเพื่อให้สามารถรองรับการเพิ่มขึ้นของพลังงานหมุนเวียนรวมถึงการบูรณาการเชื่อมต่อ และใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานแบบกระจายศูนย์ (Distributed Energy Resources) ประเภทต่างๆ ร่วมกับระบบโครงข่ายไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด การพัฒนาให้ระบบไฟฟ้าตอบสนองต่อการทำงานได้อย่างชาญฉลาดโดยเป็นการประยุกต์ใช้ ระบบเซ็นเซอร์ และเทคโนโลยีทางการควบคุมอัตโนมัติ [6]



ภาพที่ 2 ออกแบบระบบไมโครกริด

จากภาพที่ 2 การออกแบบระบบเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด เป็นการนำระบบพลังงานไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กมาใช้ร่วมกับระบบกริด เพื่อให้สามารถเลือกจ่ายพลังงานที่เหมาะสมให้กับระบบควบคุมการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะ และช่วยลดการพึ่งพาพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค PEA ให้น้อยลง

#### 4. สร้างระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับระบบเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด

การผสมผสานระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะเข้ากับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริดเป็นนวัตกรรมการเกษตรยุคใหม่ที่สามารถตอบสนองความต้องการอาหารที่เพิ่มขึ้นและปัญหาพลังงาน ระบบนี้ใช้เซ็นเซอร์ ควบคุมสภาพแวดล้อม ป้อนน้ำ ขณะที่ไมโครกริดจัดการพลังงานจากแผงโซลาร์เซลล์ และแบตเตอรี่อย่างอัตโนมัติ



ภาพที่ 3 สร้างระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับระบบเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด

#### 5. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยการพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับระบบเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริดครั้งนี้ ประกอบด้วย

1. มัลติมิเตอร์ดิจิทัล LINI-T รุ่น UT203 มัลติมิเตอร์ดิจิทัลเครื่องนี้สามารถใช้วัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้ทั้ง DC และ AC

2. เครื่องตรวจวัดค่า pH, EC 5/1 Model Number EZ-9909SP

#### 6. การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลแบ่งกลุ่มเป็น กลุ่มควบคุม (ปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ทั่วไป) กลุ่มทดลอง (ใช้ระบบเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด) การหาการผลิตพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ หาได้จากผลคูณระหว่างแรงดันไฟฟ้า (V) กับกระแสไฟฟ้า (A) พลังงานไฟฟ้า คือ ปริมาณไฟฟ้าของแหล่งจ่ายหรือโหลดทางไฟฟ้าที่ถูกใช้พลังงานทั้งหมด คิดในช่วงเวลา

ใดเวลาหนึ่ง มีหน่วยเป็นวัตต์/ชั่วโมง สถิติทดสอบ Independent – Sample T – Test เพื่อทดสอบความแตกต่างค่าเฉลี่ยระหว่าง 2 กลุ่มใช้สำหรับทดสอบสมมติฐาน โดยใช้โปรแกรม SPSS version 22 ในการวิเคราะห์ข้อมูล [7]

สมมติฐานทางสถิติ

$H_0 : U_1 \leq U_2$  คือ ผลทดสอบ กลุ่มทดลอง ได้ผลน้อยกว่า กลุ่มควบคุม หรือไม่แตกต่างกัน

$H_1 : U_1 > U_2$  คือ ผลทดสอบ กลุ่มทดลอง ได้ผลที่ดีกว่า กลุ่มควบคุม

การกำหนดค่าอัลฟา (ค่าความเชื่อมั่น) เท่ากับ 95%

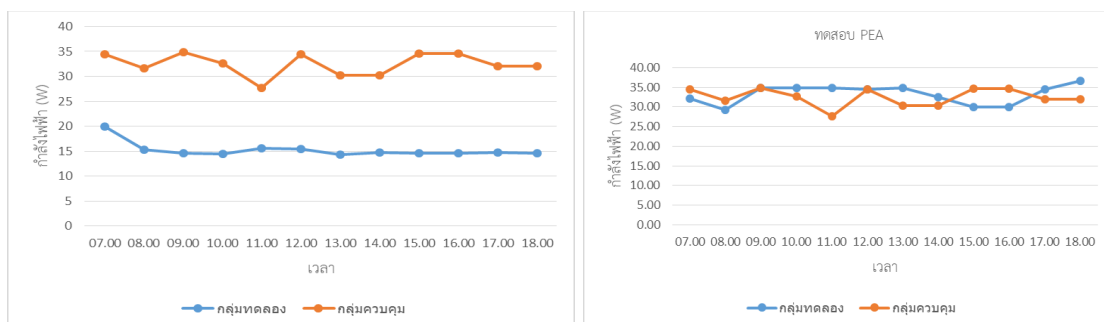
## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด เปรียบเทียบกับการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์แบบเดิม ด้านการใช้พลังงาน ด้านสารอาหาร ค่า EC และความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า pH รวมถึงผลลัพธ์การเจริญเติบโต ประกอบด้วย

1. การทดสอบเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ระหว่าง 2 กลุ่ม
2. การทดสอบเปรียบเทียบสารอาหารในน้ำ ค่า EC, pH ระหว่าง 2 กลุ่ม
3. การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลลัพธ์การเจริญเติบโต ระหว่าง 2 กลุ่ม

### 1. การทดสอบเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ระหว่าง 2 กลุ่ม

ผลการวิจัยการพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด เปรียบเทียบกับการปลูกผักแบบเดิม ด้านการใช้พลังงาน พบว่าการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบ Photovoltaic (PV) ของระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริดใน 12 ชั่วโมงเฉลี่ยอยู่ที่ 15.24 W และพลังงานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค Provincial Electricity Authority (PEA) เฉลี่ยอยู่ที่ 13.84 W ในส่วนของการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ระบบเดิมจะอาศัยพลังงานไฟฟ้าจาก PEA เพียงพลังงานเดียว เฉลี่ยอยู่ที่ 32.47 W

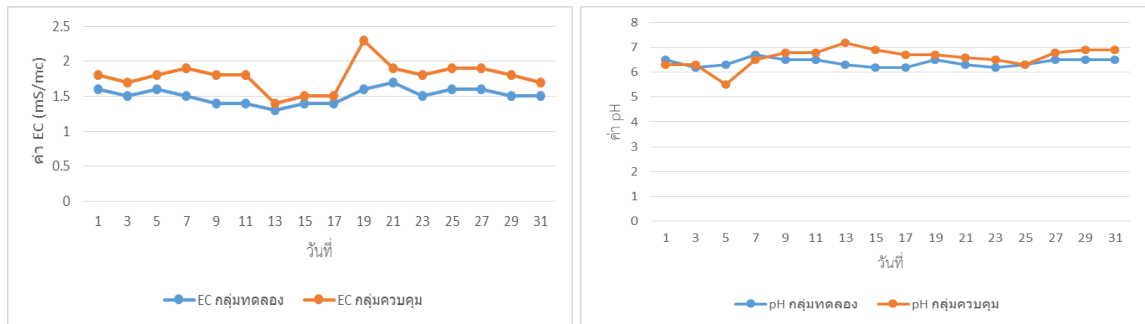


ภาพที่ 4 การใช้พลังงานไฟฟ้าของทั้งสองกลุ่ม

### 2. การทดสอบเปรียบเทียบสารอาหารในน้ำ ค่า EC, pH ระหว่าง 2 กลุ่ม

ผลการวิจัยด้านสารอาหาร ค่า EC และความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า pH พบว่าระบบปลูกผักไฮโดรโปนิคส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด ด้านสารอาหาร ค่า EC ในน้ำ เฉลี่ยอยู่ที่ 1.50 mS/cm และความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า

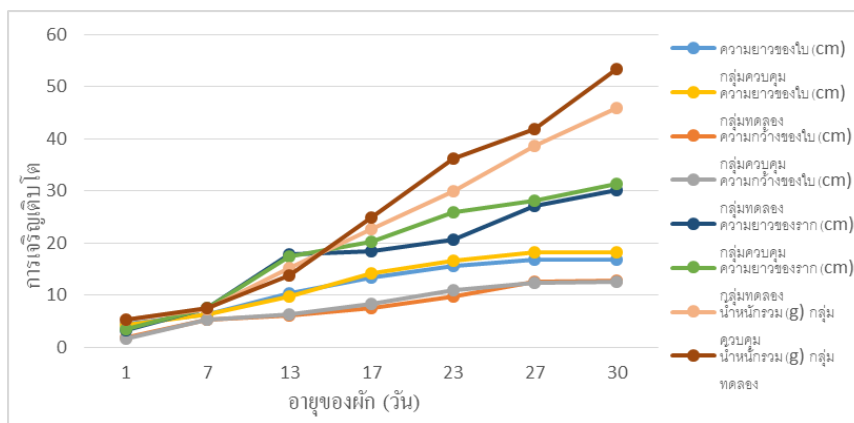
pH ในน้ำ เฉลี่ยอยู่ที่ 6.38 ในส่วนของการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ระบบเดิมจะอาศัยการเติมสารอาหาร ค่า EC ในน้ำ โดยมนุษย์ เฉลี่ยอยู่ที่ 1.78 mS/cm และปรับความเป็นกรดเป็นด่าง โดยมนุษย์ ค่า pH ในน้ำ เฉลี่ยอยู่ที่ 6.60



ภาพที่ 5 ค่า EC สารอาหาร และค่า pH ความเป็นกรดเป็นด่างของทั้งสองกลุ่ม

### 3. การทดสอบเปรียบเทียบผลลัพธ์การเจริญเติบโต ระหว่าง 2 กลุ่ม

ผลการวิจัยผลลัพธ์การเจริญเติบโตระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริดการเจริญเติบโต ด้านความยาวของใบ เฉลี่ยอยู่ที่ 12.49 cm ด้านความกว้างของใบ เฉลี่ยอยู่ที่ 8.19 cm ด้านความยาวของราก เฉลี่ยอยู่ที่ 19.11 cm และน้ำหนักรวม เฉลี่ยอยู่ที่ 26.12 g ในส่วนของการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ระบบเดิมการเจริญเติบโต ด้านความยาวของใบ เฉลี่ยอยู่ที่ 11.97 cm ด้านความกว้างของใบ เฉลี่ยอยู่ที่ 7.96 cm ด้านความยาวของราก เฉลี่ยอยู่ที่ 17.84 cm และน้ำหนักรวม เฉลี่ยอยู่ที่ 23.56 g ดังตารางที่ 13



ภาพที่ 6 ผลลัพธ์การเจริญเติบโตของทั้งสองกลุ่ม

### ตารางที่ 1 ทดสอบเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ระหว่าง 2 กลุ่ม

การทดสอบ	N	X-Bar	S.D.	t	Sig
กลุ่มทดลอง	12	15.24	1.52	21.84	.000

กลุ่มควบคุม	12	32.47	2.26		
-------------	----	-------	------	--	--

จากตารางที่ 1 พิจารณาค่า Sig.(2-tailed) มีค่าต่ำกว่า .01 จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ .01 ดังนั้นการทดสอบเปรียบเทียบการใช้พลังงาน ของกลุ่มทดลองสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจาก PAE ได้มากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

ตารางที่ 2 ทดสอบเปรียบเทียบสารอาหารในน้ำ ค่า EC ระหว่าง 2 กลุ่ม

การทดสอบ	N	X-Bar	S.D.	t	Sig
กลุ่มทดลอง	16	1.50	0.10	4.72	.000
กลุ่มควบคุม	16	1.78	0.20		

จากตารางที่ 2 พิจารณาค่า Sig.(2-tailed) มีค่าต่ำกว่า .01 จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ .01 ดังนั้นการทดสอบเปรียบเทียบสารอาหารในน้ำ ค่า EC ของกลุ่มทดลองสามารถควบคุมสารอาหารในน้ำ ค่า EC ได้ดีกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

ตารางที่ 3 ทดสอบเปรียบเทียบความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า pH ระหว่าง 2 กลุ่ม

การทดสอบ	N	X-Bar	S.D.	t	Sig
กลุ่มทดลอง	16	6.38	0.10	2.09	.045
กลุ่มควบคุม	16	6.60	0.30		

จากตารางที่ 3 พิจารณาค่า Sig.(2-tailed) มีค่าต่ำกว่า .05 จึงมีนัยสำคัญทางสถิติ .05 ดังนั้นการทดสอบเปรียบเทียบความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า pH ของกลุ่มทดลองสามารถควบคุมความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า pH ได้ดีกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .05

ตารางที่ 4 ทดสอบเปรียบเทียบผลลัพธ์การเจริญเติบโตระหว่าง 2 กลุ่ม

การเจริญเติบโต	N	กลุ่มควบคุม		กลุ่มทดลอง	
		X-Bar	S.D.	X-Bar	S.D.
ความยาวของใบ (cm)	7	11.97	5.05	12.49	5.80
ความกว้างของใบ (cm)	7	7.96	3.98	8.19	4.07
ความยาวของราก (cm)	7	17.84	9.70	19.11	10.48

น้ำหนักรวม (g)	7	23.56	15.47	26.12	18.35
รวม		15.35	5.24	16.48	6.39

จากตารางที่ 4 พิจารณาการทดสอบเปรียบเทียบการเจริญเติบโต ของกลุ่มทดลอง และกลุ่มควบคุมมีความจะเห็นว่า การเจริญเติบโตของผักในกลุ่มทดลอง มีการเจริญเติบโต ทั้ง 4 ด้านได้ดีกว่ากลุ่มควบคุม



ภาพที่ 7 ผักสลัด (ผักฟิลเลย์ ไอซ์เบิร์ก) พร้อมเก็บผลผลิต

ผลการวิจัยการพัฒนาระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด ครั้งนี้สอดคล้องกับ งานวิจัย Abdoulaye Sidibe, และคณะ เกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาระบบไฮโดรโปนิกส์แบบ Nutrient Film Technique (NFT) ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โดยมุ่งเน้นการลดการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผ่านการจัดการพลังงานและน้ำร่วมกัน

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสรุปผลได้ว่าระบบปลูกผักไฮโดรโปนิกส์อัจฉริยะร่วมกับเทคโนโลยีสมาร์ทไมโครกริด ผลที่ได้ พบว่า กลุ่มทดลองสามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าจาก PEA ได้ดีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 โดยใช้พลังงาน เฉลี่ย 15.24 W จากระบบ Photovoltaic และ 13.84 W จาก PEA เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ใช้พลังงาน 32.47 W จาก PEA เพียงอย่างเดียว สามารถประหยัดพลังงานได้ 42.62% และการเติมสารอาหาร EC เฉลี่ยอยู่ที่ 1.50 mS/cm และความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า pH เฉลี่ยอยู่ที่ 6.38 ยังลดการใช้กำลังงานมนุษย์ที่จะเข้าไปตรวจสอบ และปรับปรุงของ สารอาหาร EC และความเป็นกรดเป็นด่าง ค่า pH ได้ดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และส่งผลการ เจริญเติบโตของผักในกลุ่มทดลองได้ดีกว่ากลุ่มควบคุม

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สวนผึ้งเพราะฟาร์มรัก สวนผักไฮโดรโปนิกส์ เชียงใหม่ ที่ได้ให้ข้อมูลต่างในการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่สนับสนุนการทำวิจัย ทำให้งานวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ทิพย์วรรณ ทนไนไซ, ละเอียด ศรีหาเหง่า, นิรุช บุญยฤทธิฐานนท์, สัชฌุกรเศรษฐ์ เรืองเดชสุวรรณ. (2565). แนวทางการบริหารต้นทุนการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์แบบมีส่วนร่วมของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนปลูกผักปลอดสารพิษ ตำบลยางนึ่ง อำเภอสารภี จังหวัดเชียงใหม่. วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 41(2), 31-48. <https://so03.tci-thaijo.org/index.php/humsujournal/article/view/256208>
- [2] ทรงชัย วิริยะอำไพวงศ์, จินดำพร จำรัสเลิศลักษณ์. (2559). ระบบปลูกพืชแบบไร้ดินที่ใช้ปัมพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับหมุนเวียนสารละลายธาตุอาหาร. Engineering and Technology Horizons, 33(2), 92-97. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej/article/view/241355>
- [3] Abdoulaye Sidibé, Rehema Ndeda, Evan Murimi, Urbanus N. Mutwiwa, Lukas Simon Kriem, Marc Beckett, Peter Fischer. (2023). Design and Implementation of Energy-Water Nexus Management in a Solar-Powered NFT Hydroponic System. Universal Journal of Agricultural Research, 11(3), 664-672. [https://www.hrpub.org/journals/article\\_info.php?aid=13378](https://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=13378)
- [4] Kanishka Tharindu Rathnayake, Tharaga Sharmilan. (2023). Design and Development of an Agricultural Parameter Monitoring System for Hydroponics. European Modern Studies Journal, 7(5), 238-247. <https://lorojournals.com/index.php/emsj/article/view/1037>
- [5] Yanita Mila Ardiani, Noegroho. (2020). Layout housing typology using hydroponics system. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 426(3), 1-7. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/426/1/012106>
- [6] อธิศักดิ์ ศรีดำ. (2563). การพัฒนาเทคโนโลยีสารสนเทศเพื่อรองรับระบบสมาร์ทกริดในอนาคต.วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 39(1), 54-64. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/scimsujournal/article/view/190945>
- [7] ฉัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์. (2559). การใช้ IBM SPSS Statistics เพื่อการวิเคราะห์ข้อมูล สืบค้นเมื่อ 14 มิถุนายน 2568, จาก <https://sornorpoom.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/06/e0b8a3e0b8a7e0b8a1spss.pdf>.

การใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งในการบริหารจัดการน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์  
กรณีศึกษา : เกษตรกรผู้ปลูกยางพาราเขตนิคมสร้างตนเองบ้านกรวด อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์

Utilizing Internet of Things Technology for Enhanced Solar Energy Water  
Management : Case Study Rubber Farming in the Ban Kruat Self-Help Settlement,  
Ban Kruat District, Buriram Province

ณัฐวุฒิ พจนปริญา และ ดุสิต อุทิศสุนทร\*  
Natthawut Potparinya and Dusit Uthitsunthorn\*

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ บุรีรัมย์ 31000  
Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,  
Buriram Rajabhat University, Buriram 31000

<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 08-60258810. E-mail address: dusit.ut@bru.ac.th

### Abstract

This research aims to apply Internet of Things (IoT) technology to connect environmental irrigation data for solar-powered water management by rubber farmers in the Ban Kruat Self-Help Settlement, Buriram Province. The rubber plantation area measures 14 meters in width and 42 meters in length. The experimental system was installed with a solar cell system designed to store electrical energy in a 24-volt battery, which was then used to power a 24-volt, 375-watt DC sprinkler water pump. In addition, an inverter was installed to convert DC to AC power for network equipment that distributes Internet connectivity for data transmission and collection through a data logger operating continuously for 24 hours. This system enabled online monitoring and control of irrigation devices. The experimental results showed that the battery was fully charged within 7 hours. The sprinkler pump operated automatically based on sensor thresholds set at 70% relative humidity, 25% soil moisture, and a temperature of 28°C. The rubber yield increased by approximately percentage average of 28.33. The automated irrigation system successfully operated according to the conditions required for efficient water management in the rubber plantation.

**Keywords:** Internet of Things, Solar energy, Water management

### บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ในการเชื่อมต่อข้อมูลการให้น้ำตามสภาพแวดล้อมเพื่อการบริหารจัดการน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ของเกษตรกรผู้ปลูกยางพาราพื้นที่ปลูก

ยางพาราขนาด กว้าง 14 เมตร ยาว 42 เมตร เขตนิคมสร้างตนเองบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ ระบบทดสอบทำการติดตั้งระบบโซล่าเซลล์เพื่อเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่แล้วนำมาใช้กับปั๊มน้ำสปริงเกอร์กระแสตรงขนาด 24 โวลต์ 375 วัตต์ที่ อีกทั้งติดตั้งอินเวอร์เตอร์แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับให้กับอุปกรณ์เครือข่ายที่ทำหน้าที่กระจายสัญญาณเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตในการส่งและเก็บรวบรวมบันทึกค่าข้อมูล(Data logger) ในเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อประเมินผลควบคุมอุปกรณ์แบบออนไลน์ จากการทดสอบพบว่าระบบทำการอัดประจุแบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ จนเต็มใช้ระยะเวลา 7 ชั่วโมง ปั๊มน้ำสปริงเกอร์สามารถทำงานตามขอบเขตปรับตั้งเช่นเซอร์ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ 70 % ความชื้นในดิน 25% และอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส มีผลผลิตยางพาราเพิ่มขึ้นปริมาณเฉลี่ยร้อยละ 28.33 ระบบการให้น้ำในสวนยางแห่งนี้สามารถทำงานตามเงื่อนไขในการบริหารจัดการน้ำในสวนยางพารา

**คำสำคัญ:** อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง พลังงานแสงอาทิตย์ การบริหารจัดการน้ำ

## บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ประชาชนประกอบอาชีพเกษตรกรรมซึ่งส่วนใหญ่ใช้น้ำในกระบวนการผลิตทางการเกษตรจากแหล่งน้ำธรรมชาติเป็นสำคัญ ยางพาราเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทยที่ให้ผลตอบแทนสูงคุ้มค่ากับการลงทุนสร้างรายได้ การปลูกยางพาราก่อให้เกิดประโยชน์แก่ประเทศหลายด้าน นอกจากเสริมสร้างสิ่งแวดล้อมอนุรักษ์ดินและน้ำแล้วยังช่วยพัฒนาและยกระดับคุณภาพชีวิตของคนในท้องถิ่น มีการผลิตและแปรรูปผลิตภัณฑ์จากน้ำยางพาราหลากหลายรูปแบบ แต่เนื่องมาจากปัญหาภัยแล้งในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อการผลิตของผลผลิต เช่น พื้นดินขาดความชุ่มชื้น ต้นยางขาดน้ำทำให้ชะงักการเจริญเติบโต ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้มีคุณภาพต่ำรวมถึงปริมาณลดลงเกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ

เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกประสบกับปัญหาภัยแล้งทุก ๆ ปี สภาพภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝนที่ลดลงทำให้เกษตรกรมีผลผลิตน้ำยางพาราลดลงตามด้วย [1] ทั้งนี้การปลูกยางพาราน้ำจึงเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกซึ่งเกษตรกรในพื้นที่ส่วนใหญ่พึ่งพาน้ำฝนเป็นหลัก แหล่งน้ำธรรมชาติที่มีอยู่มีจำนวนจำกัดไม่เพียงพอต่อพื้นที่ทำการเกษตร จากปัญหาการขาดแคลนน้ำผิวดินฤดูแล้งทำให้น้ำไม่พอใช้ในการเกษตรจึงทำให้การเกษตรขาดรายได้ในช่วงฤดูแล้งดังภาพที่ 1



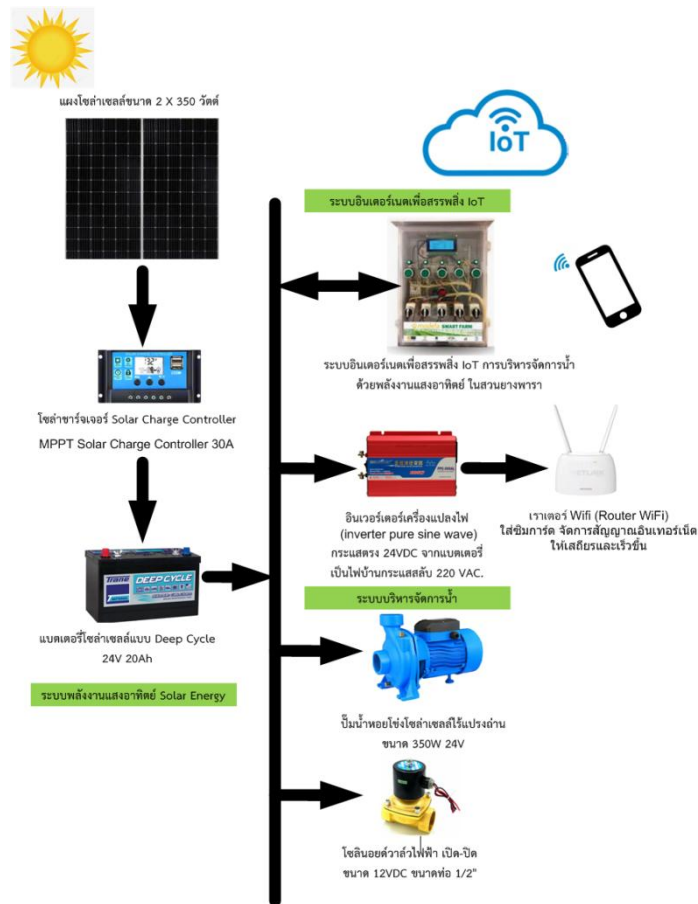
ภาพที่ 1 ปัญหาภัยแล้งของสวนยางพาราจากสภาพภูมิอากาศและปริมาณน้ำฝนลดลง

น้ำจึงเป็นปัจจัยสำคัญเกษตรกรส่วนใหญ่ที่อยู่ห่างไกลจากอ่างกักเก็บน้ำจึงต้องสูบน้ำระยะไกลมาใช้เพิ่มความชื้น ทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายพลังงานสูง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการสำรวจแหล่งน้ำใต้ดินมาบรรเทาปัญหาการขาดแคลนน้ำในหน้าแล้งมาใช้เพื่อการเกษตร โดยการใช้งานพลังงานแสงอาทิตย์โดยไม่มีค่าใช้จ่ายในการลดต้นทุนค่าพลังงาน ในการใช้น้ำในปริมาณมากและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร อีกทั้งการติดตั้งโซลาร์เซลล์เพื่อทำการเกษตรนั้นก็เป็นที่ติดต่อกันที่ยังไม่มีไฟฟ้าเข้าถึงทำให้ยังต้องการใช้งานยังเป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มรายได้ของเกษตรกร ซึ่งปัจจุบันมีการพัฒนาให้เกษตรกรไทยก้าวสู่ยุคใหม่โดยใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing :IoT) เป็นระบบโครงข่ายที่จะเชื่อมต่อข้อมูลการทำงานเข้าด้วยกันผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อทางการเกษตร [2]-[3] เกษตรกรต้องเป็นบุคคลที่มีความรู้ในด้านเกษตรกรรมและเทคโนโลยีสามารถแก้ไขปัญหาได้ มีความคิด รู้จักการวางแผนงาน สามารถเรียกดูข้อมูล การติดตามและประเมินผล การสั่งการในการบริหารจัดการแปลงเพาะปลูกแบบฟาร์มอัจฉริยะ (Smart farming)

จากปัญหาดังกล่าวบทความวิจัยนี้นำเสนอการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Green Energy) จากแสงอาทิตย์มาใช้แทนพลังงานไฟฟ้ามาแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยใช้น้ำใต้ดินในการเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนค่าพลังงานไฟฟ้า การติดตามประเมินผลสภาพแวดล้อมทั่วไปแบบอัตโนมัติจากฐานข้อมูลเพื่อบริหารจัดการน้ำพื้นที่ปลูกยางพาราของเกษตรกร เพื่อสร้างความเข้มแข็งของเศรษฐกิจของชุมชนในการเรียนรู้และปรับใช้นวัตกรรมสามารถนำความรู้ไปใช้ในการเปลี่ยนแปลงและจัดการปัญหาชุมชนอย่างยั่งยืน ทำให้เกษตรกรมีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น อีกทั้งเพิ่มพื้นที่สีเขียวในการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมให้มีความชุ่มชื้น

## วิธีการวิจัย

ผู้วิจัยทำการค้นคว้ารวบรวมข้อมูลพื้นฐานเพื่อทำการออกแบบและพัฒนาระบบการจัดการน้ำพลังงานแสงอาทิตย์โดยนำแนวคิดอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการติดตามและประเมินผลโดยความร่วมมือกับกลุ่มสมาชิกของสหกรณ์กองทุนสวนยางนิคมบ้านกรวด พื้นที่ของเกษตรกรผู้ปลูกสวนยางพาราขนาด กว้าง 14 เมตร ยาว 42 รวม 588 ตารางเมตร ภายในเขตนิคมสร้างตนเองบ้านกรวด อำเภอบ้านกรวด จังหวัดบุรีรัมย์ โดยส่วนมากจะปลูกบริเวณพื้นที่ที่เทือกเขาพนมดงรักติดชายแดนไทย-กัมพูชา เมื่อได้ผลลัพธ์ความต้องการแล้วจากชุมชนจึงนำมาออกแบบระบบสั่งการผ่านวงจรควบคุมทำงานร่วมกันกับเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่งในการเชื่อมต่อข้อมูลการให้น้ำตามสภาพแวดล้อมตามกรอบแนวคิด ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 กรอบแนวความคิดดำเนินการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบโดยการนำกรอบแนวคิดอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และพลังงานแสงอาทิตย์เข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อการจัดการน้ำในสวนยางพาราประกอบด้วย

### 1. การออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบทำการติดตั้งโซลาร์เซลล์โดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าที่ได้จากโซลาร์เซลล์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ผลิตไฟฟ้าได้เฉพาะช่วงเวลากลางวันขณะที่มีแสงแดดเท่านั้นโดยผ่านโซลาร์ชาร์จเจอร์ควบคุมการอัดประจุเก็บพลังงานไว้ในแบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ เมื่อต้องการใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับจะต้องใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อจ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ากับเราเตอร์ (Router Wifi) จัดการสัญญาณอินเทอร์เน็ต ระบบนี้เหมาะสำหรับพื้นที่ห่างไกลในการเกษตรที่ไม่มีไฟฟ้า[4]-[5]

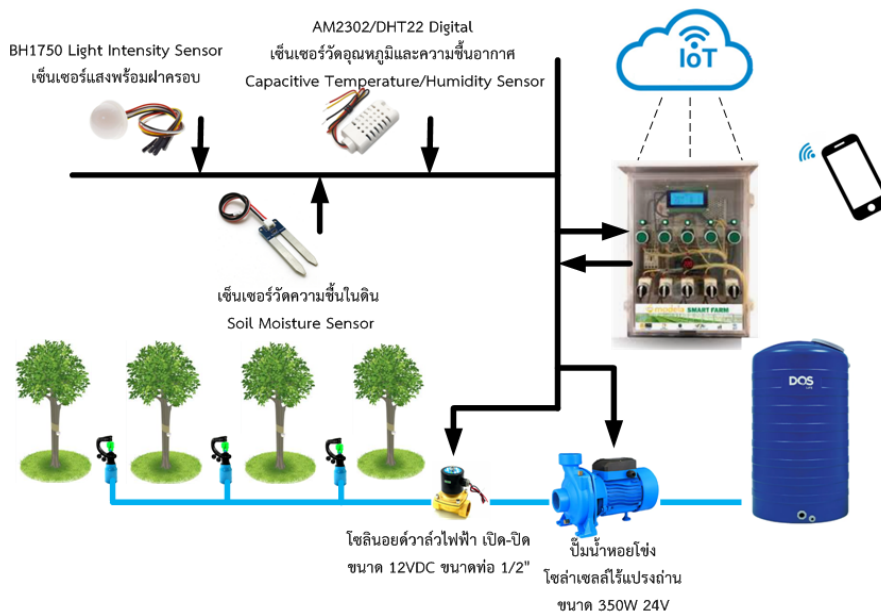
### 2. ระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อสรรพสิ่ง (Internet of Things :IoT)

ระบบนี้สามารถที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ในการเก็บรวบรวมและรับส่งข้อมูล ส่งการเพื่อควบคุมอุปกรณ์ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตอย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ยังมีระบบคลาวด์ที่จัดเก็บและประมวลผลข้อมูลผ่านออนไลน์สามารถควบคุมและสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ตลอดเวลา ซึ่งนำมาใช้ในการจัดการด้านการเกษตรเช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นในดิน นอกจากนั้นสามารถบันทึกข้อมูลค่า (Data logger) เพื่อการวางแผนการจัดการน้ำ[6]-[7]

### 3. การออกแบบระบบบริหารจัดการน้ำในสวนยางพารา

การติดตั้งระบบการให้น้ำในสวนยางแห่งนี้จะมีการใช้ระบบการให้น้ำแบบสปริงเกอร์ที่สวนยาง ช่วงเวลา 7.00 – 18.00 น. เมื่อต้นยางพาราได้น้ำก็มีความสมบูรณ์ทำให้การร่วงของใบจะช้าลง แต่ใบใหม่ได้เร็วและแก่ช้าลงทำให้เริ่มกรีดได้เร็วขึ้น ในช่วงแรกเริ่มของการกรีดยังต้องมีการบำรุงดูแลให้ปุ๋ยและปราบวัชพืชให้มีความโล่งเตียนอยู่เสมอ ก็จะทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบเก็บข้อมูลระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตลอด 1 สัปดาห์ ซึ่งขณะทำการทดสอบสภาพอากาศมีเมฆเล็กน้อย ท้องฟ้าโล่งแจ่มมีแสงแดดเพียงพอผ่านเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่าต่าง ๆ ดังภาพที่ 3 จากนั้นทำการวัดค่าความส่องสว่างของแสงแดดในการเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ กำหนดค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่เหมาะสมสำหรับต้นยางพาราเท่ากับ 70 % โดยยางพาราจะเจริญเติบโตในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นในอากาศสูงอย่างสม่ำเสมอ กำหนดค่าความชื้นในดินที่ 25 % ระบบทำการปรับตั้งค่าควบคุมอุณหภูมิในดินของแปลงปลูกเท่ากับ 28 องศาเซลเซียส [8]-[9] เพื่อใช้ในการกำหนดขอบเขตการทำงานของปั้มน้ำสปริงเกอร์ในการรดน้ำต้นยางพารา



ภาพที่ 3 ระบบการรดน้ำต้นยางด้วยสปริงเกอร์

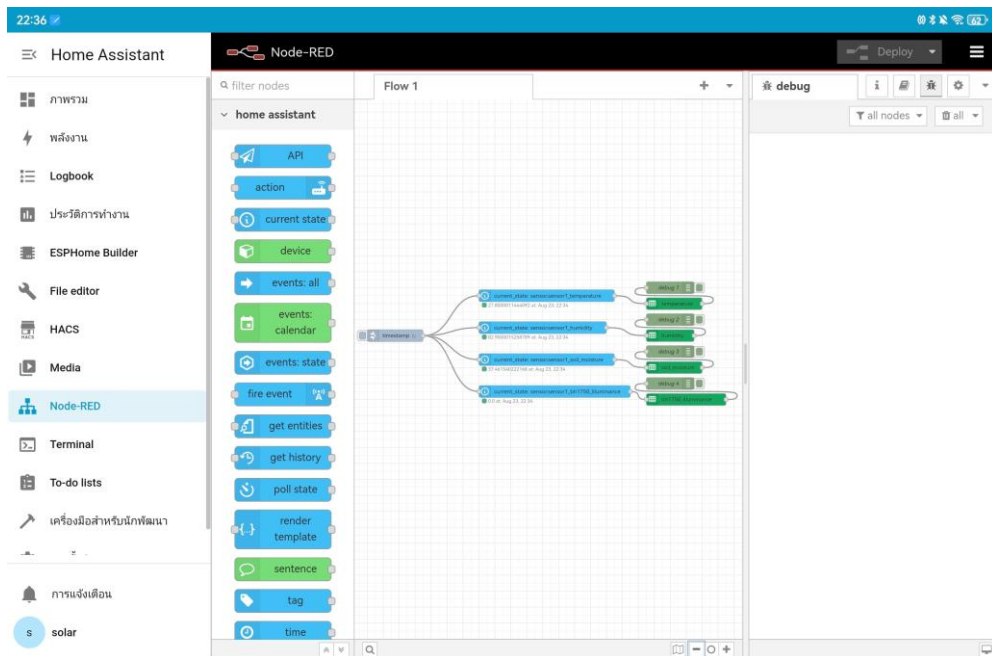
ผู้วิจัยออกแบบระบบสามารถเก็บข้อมูลข้อมูลที่ต้องการหรือเหตุการณ์ที่เป็นปัญหาผ่านระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things : IoT ) ส่งข้อมูลทำการบันทึก แก้ไข ปรับปรุง อัปเดต สามารถควบคุมและติดตามผลเพื่อการวางแผนในการสังเกตการณ์ช่วยเหลือเกษตรกรผ่านเซ็นเซอร์ ดังตารางที่ 1 การตรวจสอบการบริหารจัดการน้ำด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ให้เหมาะสมกับการปลูกยางพาราเพื่อตัดสินใจในการวางแผนการปลูก มีรายละเอียดดังนี้

- เซ็นเซอร์วัดความเข้มแสง LUX ขอบเขตการทำงานวัดค่าความสว่างต่ำสุด (Emin) 0 lux ค่า ความสว่างสูงสุด (Emax) 34,000 lux สามารถตั้งเงื่อนไขการเปิด-ปิด การรดน้ำได้

- เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นสัมพัทธ์ 70 % ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในอากาศติดตามสภาพอากาศวิเคราะห์และคาดการณ์สภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน เพื่อช่วยให้เกษตรกรลดต้นทุนจากความเสียหายของผลผลิตจากปัญหาภัยธรรมชาติได้
- เซ็นเซอร์วัดความชื้นในดิน 25 % ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในดินของแปลงปลูก ปริมาณน้ำในดินติดตามสภาพอากาศเซ็นเซอร์วัดค่าความชื้นและปริมาณน้ำในดิน เพื่อใช้ในการคำนวณปริมาณและเวลาในการรดน้ำได้
- ระยะเวลาส่องสว่างจากพลังงานแบตเตอรี่ใช้ระยะเวลาใช้ในการ ชาร์จ 7 ชั่วโมง ประสิทธิภาพการจ่ายประจุแบตเตอรี่(Discharge) ด้วย Load 100% ที่กำลังไฟฟ้า 40 วัตต์ เวลา 9 ชั่วโมง

ตารางที่ 1 อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) ตามสภาพแวดล้อมของแปลงเพาะปลูกยางพารา

อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor)	ปริมาณที่วัด	รุ่น Model
วัดความเข้มแสง	ค่าแสงสว่าง	BH1750
ความชื้นสัมพัทธ์	%RH	AM2302/ DHT22
วัดความชื้นดิน	%	Soil Moisture Sensor SNP-00030
วัดอุณหภูมิ	องศาเซลเซียส	DHT22

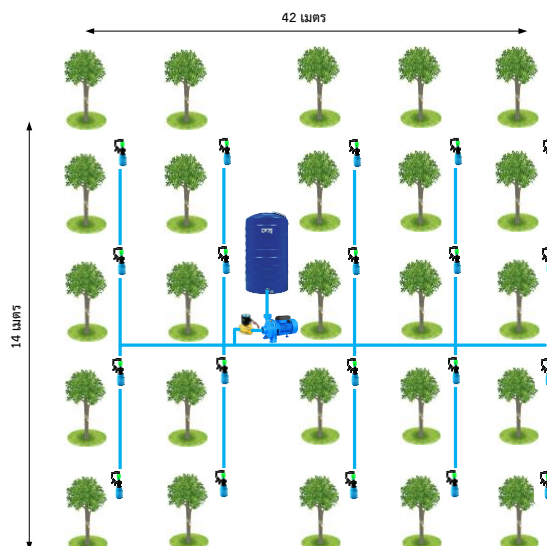


ภาพที่ 4 การออกแบบฐานข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ

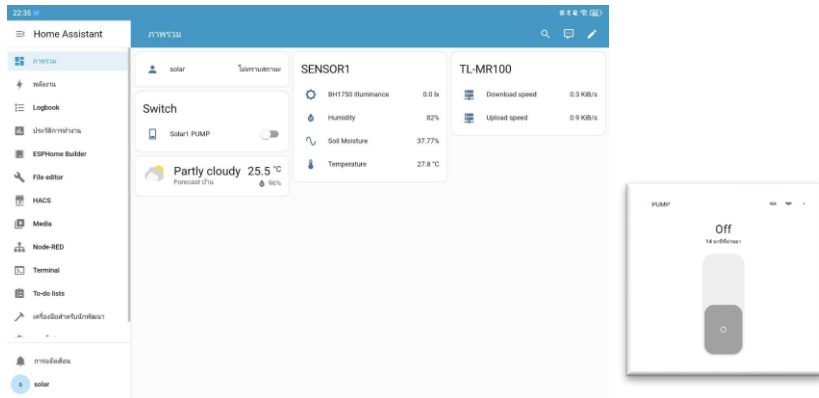
จากการออกแบบฐานข้อมูลของระบบติดตามและควบคุมสามารถบันทึกการตรวจวัดค่าสภาพแวดล้อมด้วยเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ด้วยการส่งข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อเก็บบันทึกข้อมูล โดยใช้คลาวด์เซิร์ฟเวอร์ของ Google เชื่อมต่อกับอุปกรณ์แบบเวลาจริง (Real time) เข้ากับบอร์ด Raspberry Pi สามารถแสดงผลของสภาพแวดล้อมบน Dashboard การจัดเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์จะทำงานโปรแกรม Home Assistant ซึ่งกำหนดตัวแปรในการเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดตรวจสอบข้อมูลเซนเซอร์ต่างๆที่ส่งเข้ามาจาก Node-RED ดังภาพที่ 4 ประกอบด้วยแสงสว่าง ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นในดิน และอุณหภูมิ ของแปลงปลูกสวนยางพารามาสร้างรายงานอัตโนมัติ รายวัน รายสัปดาห์ รายเดือน ซึ่งใช้เซิร์ฟเวอร์ของ Google Sheet เป็น Cloud Database ไม่ต้องตั้งค่า Database Server ใช้ Home Assistant Automation ช่วยจัดการสร้าง Custom Report ดังภาพที่ 6 – ภาพที่ 10 ส่งออกไฟล์ในรูปแบบ Excel (.xlsx) ดังภาพที่ 11 เพื่อใช้วิเคราะห์ข้อมูลเชื่อมต่ออุปกรณ์อัจฉริยะจากอุปกรณ์ IoT เชื่อมต่อกับบอร์ด ESP32 แล้วสร้างรายงานตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังได้ควบคุมการส่งอีเมลตามเงื่อนไขกำหนด

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

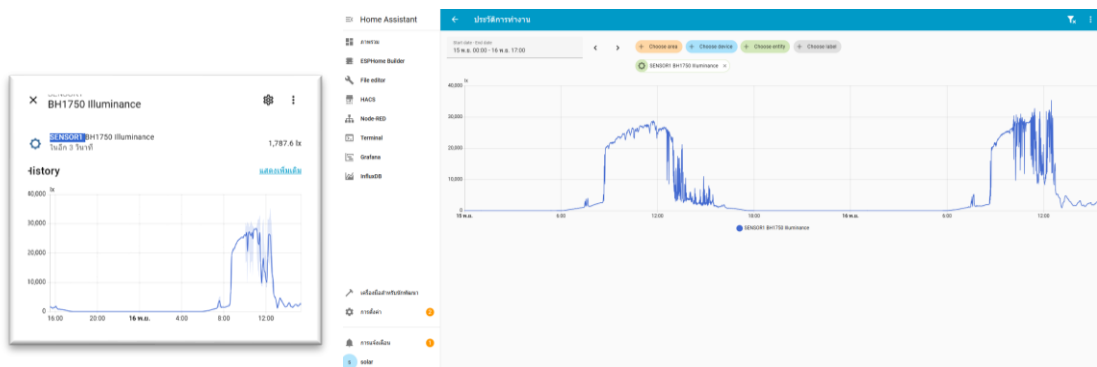
การเก็บรวบรวมข้อมูลของสวนยางพารานั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วยระบบการส่งและบันทึกข้อมูลของระบบระยะเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Raspberry Pi) และระบบปั้มน้ำสปริงเกอร์ในการให้น้ำยางพาราเริ่มตั้งแต่เวลา 7.00 – 18.00 ต้องพิจารณาค่าต่าง ๆ ประกอบด้วยค่าความส่องสว่าง แรงดันอัดประจุของแบตเตอรี่ ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นในดิน และอุณหภูมิ ทำการบันทึกไฟล์ข้อมูล (Data logger) ไว้เพื่อการวางแผนติดตามและประเมินค่าในแต่ละวันบนพื้นที่สวนยางพาราขนาดกว้าง 14 เมตร ยาว 42 เมตร ติดตั้งสปริงเกอร์เพื่อรดน้ำ ดังภาพที่ 5 ผู้วิจัยทำการออกแบบการเชื่อมต่อข้อมูลจากเซนเซอร์ตรวจวัดค่าต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบหรือสังเกตการณ์สิ่งที่เกิดขึ้นผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ตลอดเวลา



ภาพที่ 5 แผนผังการวัดวางสปริงเกอร์รดน้ำในการบริหารจัดการน้ำสวนยางพารา



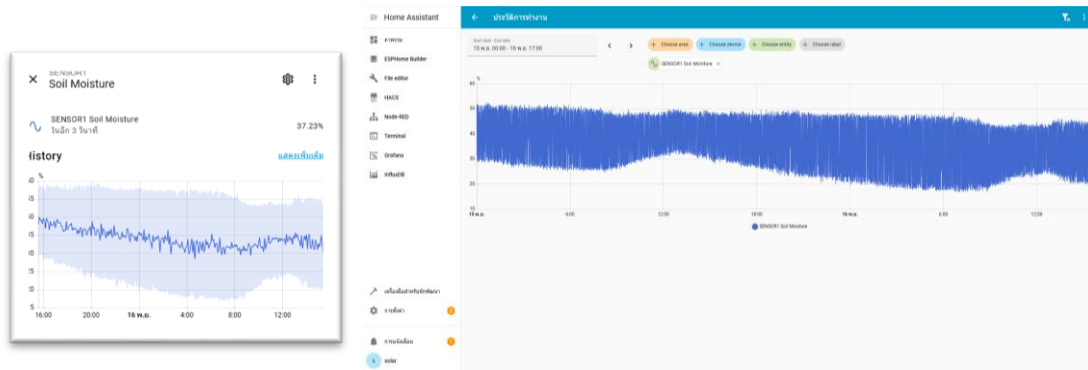
ภาพที่ 6 การควบคุมจากมือถือทำการเปิด - ปิด รีเลย์การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ



ภาพที่ 7 ค่าความเข้มแสงแสดงผลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อสรุพล้าง



ภาพที่ 8 ความชื้นสัมพัทธ์แสดงผลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อสรุพล้าง



ภาพที่ 9 ค่าความชื้นในดินแสดงผลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อสรุพล้าง



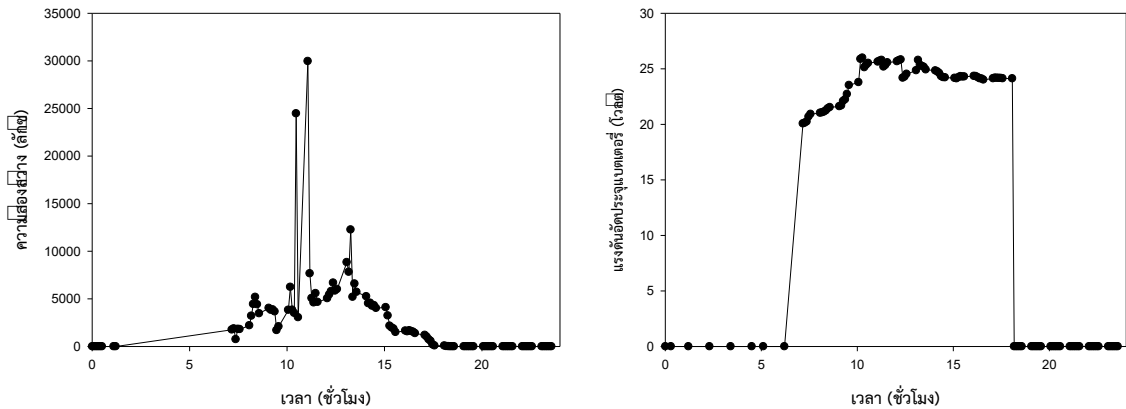
ภาพที่ 10 ค่าอุณหภูมิแสดงผลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อสรุพล้าง

exported-data.csv - Microsoft Excel

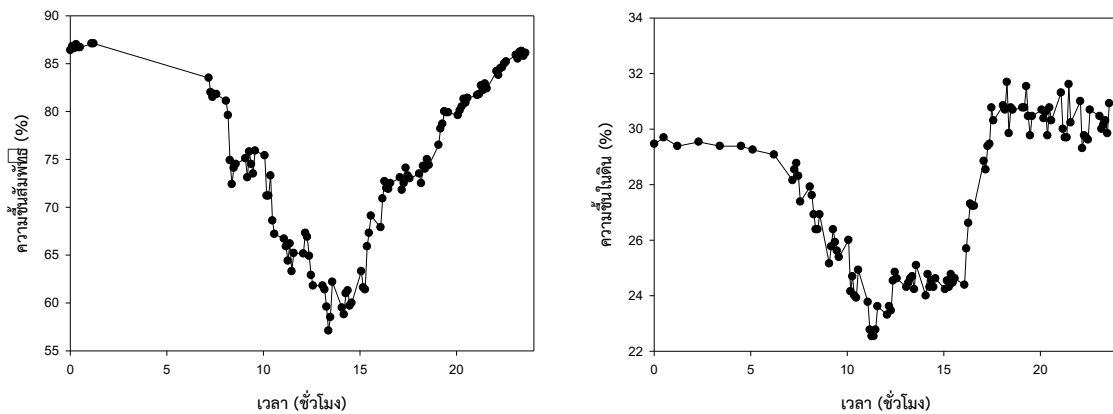
	A1	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
		Value 1	Unit 1	Sensor Name	Value 2	Unit 2	Sensor Name	Value 3	Unit 3	Sensor Name	Value 4	Unit 4	Sensor Name	Value 5	Unit 5	Sensor Name	Value 6	Unit 6	updated_at
1		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.7	%	Temp	27.3	C	Temp	28.44	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:00
2		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.3	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:01
3		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.3	C	Temp	28.44	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:02
4		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.3	C	Temp	28.44	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:03
5		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.3	C	Temp	28.44	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:04
6		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.4	C	Temp	28.44	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:05
7		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	68.1	%	Temp	27.4	C	Temp	28.44	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:06
8		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	68	%	Temp	27.3	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:07
9		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.3	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:08
10		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:09
11		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:10
12		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.7	%	Temp	27.3	C	Temp	28.44	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:11
13		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:12
14		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:13
15		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	68	%	Temp	27.3	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:14
16		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:15
17		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:16
18		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:17
19		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:18
20		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:19
21		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:20
22		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.8	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:21
23		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:22
24		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:23
25		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:24
26		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:25
27		0.17	lux	PPFD	0	umol/m2	Humidity	67.9	%	Temp	27.4	C	Temp	28.5	C	Moisture	1	%	15/5/2025 0:26

ภาพที่ 11 ผลการอ่านค่าของเซนเซอร์จะถูกบันทึกไว้ในไฟล์ Excel .xlsx

จากการทดสอบระบบข้อมูลความส่องสว่างในภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่า ระบบส่งข้อมูลที่เวลา 7.00 น.มีค่าความส่องสว่างที่ 1,754.65 ลักซ์ จากนั้นค่อยเพิ่มขึ้นที่เวลา 11.00 น. มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 29,958.09 ลักซ์ และระบบหยุดการทำงานที่เวลา 18.00 น. มีค่าความส่องสว่างที่ 2.82 ลักซ์ ในช่วงเวลาเดียวกันทดสอบการชาร์จไฟวัตแรงดันเริ่มต้นจากแบตเตอรี่มีค่า 20 โวลต์ แรงดันจากพลังงานแสงอาทิตย์ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ที่เวลา 7.00 น. มีขนาดแรงดัน 21 โวลต์ สูงกว่าขนาดแรงดันแบตเตอรี่จึงเกิดการอัดประจุเข้าแบตเตอรี่ จากนั้นขนาดแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเวลา 14.00 น. แรงดันค่อยๆ ลดระดับลงจนกระทั่งวันที่ 24 โวลต์ ใช้ระยะเวลาในการอัดประจุ 7 ชั่วโมง



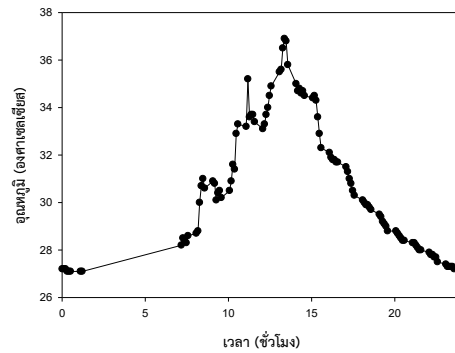
ภาพที่ 12 ค่าความส่องสว่างและแรงดันอัดประจุแบตเตอรี่ขนาด 24 โวลต์ จากพลังงานแสงอาทิตย์



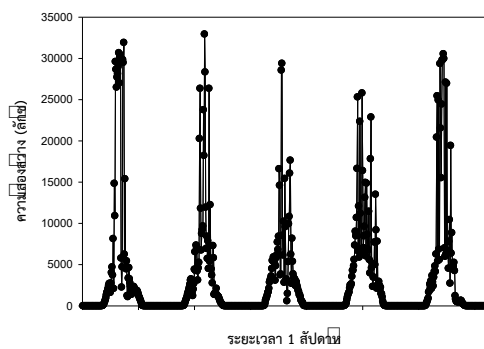
ภาพที่ 13 ค่าความชื้นสัมพัทธ์และค่าความชื้นในดินของพื้นที่เพาะปลูกยางพารา

จากการทดสอบระบบข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ในภาพที่ 13 จะเห็นได้ว่า ระบบทำงานที่เวลา 7.00 น. ค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 83.5 % จากนั้นมีค่าลดลงมาเรื่อยๆ จนกระทั่งเวลา 10.00 น. มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ 70% ทำให้สปริงเกอร์ทำงานรดน้ำต้นยางพารา ที่เวลา 14.00 น. มีค่าต่ำสุดเท่ากับ 58.5% จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 70% ที่เวลา 16.00 น. ป้อนน้ำจึงหยุดทำงาน ผลทดสอบระบบข้อมูลค่าความชื้นในดินจะเห็นได้ว่าระบบทำงานที่เวลา 7.00 น.ช่วงเช้ามีค่าความชื้นในดินเท่ากับ 28% จากนั้นความชื้นในดินค่อยลดลงที่เวลา 10.00 น. จนมีค่าน้อยกว่า 25% ดินแห้งทำให้สปริงเกอร์ทำงานรดน้ำ จึงถึงเวลา 16.00 น. มีค่ามากกว่า 25% ดินมีความชุ่มชื้นจึงหยุดการทำงาน

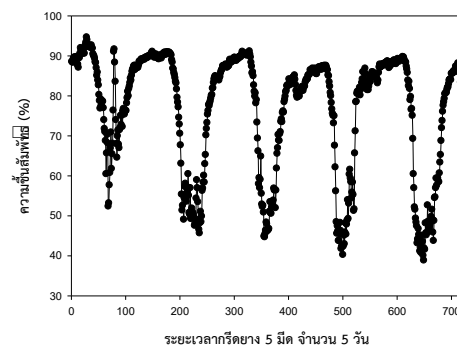
จากการทดสอบระบบข้อมูลอุณหภูมิ ในภาพที่ 14 จะเห็นว่าระบบทำงานที่เวลา 7.00 น. มีค่าอุณหภูมิที่ 28 องศาเซลเซียส เกินค่าปรับตั้งทำให้สปริงเกอร์ทำงานรดน้ำต้นยางพาราและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่เวลา 14.00 น. อุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ 36.9 องศาเซลเซียส จนกระทั่งเวลา 17.00 น. อุณหภูมิมีค่าลดลงที่ 28 องศาเซลเซียส ระบบจึงหยุดการทำงาน



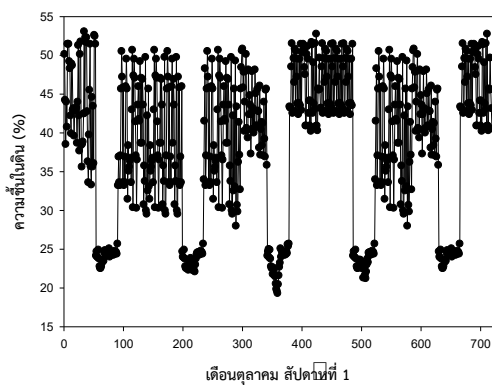
ภาพที่ 14 ค่าความอุณหภูมิของพื้นที่เพาะปลูกยางพารา



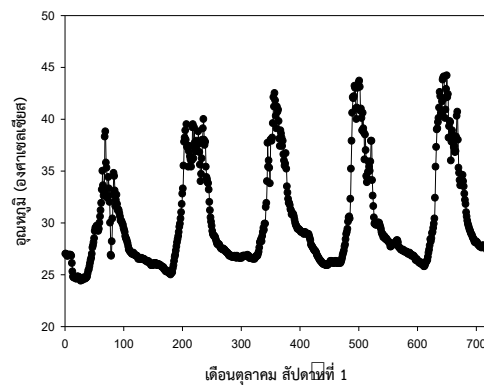
ก. ค่าความส่องสว่าง



ข. ค่าความชื้นสัมพัทธ์



ค. ค่าความชื้นในดิน



ง. ค่าอุณหภูมิ

ภาพที่ 15 ข้อมูลจากแปลงเพาะปลูกยางพาราระยะเวลา 1 สัปดาห์

ปัจจัยแวดล้อมต่างๆ ดังภาพที่ 15 เป็นการเก็บข้อมูลระยะเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อติดตามควบคุมและประเมินผล ประกอบตามสภาพอากาศ ความชื้น และความอุดมสมบูรณ์ของดิน ซึ่งมีผลต่อปริมาณน้ำยางพันธุ์ยางที่แตกต่างกันจะให้ ผลผลิตน้ำยางไม่เท่ากัน ในส่วนพื้นที่เขตนิคมสร้างตนเองบ้านกรวดนิยมทำการเก็บผลผลิตโดยเปิดกรีดยาง 5-6 మీด ต่อ สัปดาห์ ประกอบไปด้วยกรีด 2 วัน เว้น 1 วัน น้ำยางนิยมทำแบบน้ำยางก้อนถ้วย (Cup Lump Rubber) เป็นการนำน้ำ ยางสดมาเติมน้ำกรดซัลฟิวริกเจือจาง เพื่อให้ยางจับตัวเป็นก้อนในถ้วยรองรับน้ำยางหลังจากเกษตรกรกรีดยางและทิ้งไว้ ตามระยะเวลาที่เหมาะสมเป็นรูปแบบผลผลิตยางพาราที่นิยมผลิตอย่างแพร่หลาย ดังภาพที่ 16 – ภาพที่ 17 เนื่องจากมี กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนและจำหน่ายได้รวดเร็วผลผลิตยางก้อนถ้วยขึ้นอยู่กับ ความสมบูรณ์อายุต้นยางและปัจจัย แวดล้อม



ภาพที่ 16 การกรีดน้ำยางพาราระยะเวลา 5 మీด



ภาพที่ 17 ผลผลิตยางก้อนถ้วยพื้นที่เพาะปลูกยางพารา

ตารางที่ 2 นำหนักรวมผลผลิตยางก้อนถ้วย 5 มีด ระยะเวลา 1 สัปดาห์

วัน เดือน ปี	น้ำหนักรวมยางก้อนถ้วยของแปลงเพาะปลูก (กิโลกรัม)		ผลผลิต เพิ่มขึ้น
	ก่อนติดตั้งระบบ	หลังใช้ระบบ IOT	
	ปี 2567	ปี 2568	ร้อยละ
เดือนกันยายน			
1 ก.ย. – 5 ก.ย. 68	18	25	38.88
8 ก.ย. – 12 ก.ย. 68	15	20	33.33
15 ก.ย. – 19 ก.ย. 68	17	22	29.41
22 ก.ย. – 26 ก.ย. 68	17	23	35.29
เดือนตุลาคม			
29 ก.ย. – 3 ต.ค. 68	15	20	33.33
6 ต.ค. – 3 ต.ค. 68	16	20	25
13 ต.ค. – 17 ต.ค. 68	17	21	23.52

20 ต.ค. – 24 ต.ค. 68	18	20	11.11
ค่าเฉลี่ย	16.62	21.37	28.33

การเปรียบเทียบน้ำหนักของผลผลิตยางก้อนถ้วยแสดงในตารางที่ 2 ระหว่างเดือนกันยายน – เดือนตุลาคม พิจารณาก่อนติดตั้งระบบในปี 2567 และหลังติดตั้งระบบทั้งหมด 8 สัปดาห์ พบว่ามีผลผลิตเพิ่มขึ้นสัปดาห์วันที่ 1 – 5 กันยายน 2568 มีค่ามากที่สุดร้อยละ 38.88 และผลผลิตมีค่าต่ำสุดสัปดาห์วันที่ 20 – 24 ตุลาคม 2568 มีค่าต่ำที่สุดร้อยละ 11.11 มีผลผลิตยางก้อนถ้วยเพิ่มขึ้นเฉลี่ยร้อยละ 28.33

### สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

ระบบเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสามารถเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์ต่าง ๆ สั่งการและจัดเก็บข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตสามารถตั้งเวลาส่งและเก็บข้อมูลตลอดวัน เมื่อมีพลังงานแสงอาทิตย์ส่องสว่างระบบทำการอัดประจุแบตเตอรี่จนเต็มขนาดแรงดัน 24 โวลต์ ใช้ระยะเวลา 7 ชั่วโมง ต้นยางพาราเป็นต้นไม้เขตร้อนขึ้นต้องการความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงเพื่อการเจริญเติบโต สามารถทำงานตามขอบเขตของระบบที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่า 70 % ความชื้นในดิน 25 % อุณหภูมิไม่เกิน 28 องศาเซลเซียส เมื่อเซ็นเซอร์วัดค่ามีค่าเกินขอบเขตที่กำหนดจะทำให้ปั๊มน้ำสปริงเกอร์ทำการรดน้ำจนกระทั่งมีค่าอยู่ในขอบเขตจึงหยุดการทำงานมีผลผลิตยางพาราเพิ่มขึ้นปริมาณ 20 กิโลกรัมต่อสัปดาห์ ทั้งนี้พบปัญหาที่สำคัญเกี่ยวกับความแม่นยำของตำแหน่งและความลึกของเซ็นเซอร์ที่ปักลงดินต้องเพิ่มจำนวนมากขึ้นเพื่อลดการทำงานที่ผิดพลาด นอกจากนี้ควรเพิ่มจำนวนแผงโซลาร์เซลล์และขนาดความจุของแบตเตอรี่ให้มากขึ้นเพื่อลดระยะเวลาในการชาร์จ หากไม่มีแสงแดดหรือมีพายุเข้าหลายวันติดต่อกันจะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่เก็บไว้ในแบตเตอรี่หมด ดังนั้นจึงทำการกำหนดช่วงเวลาการทำงานที่เหมาะสมในแต่ละพื้นที่เพื่อประหยัดพลังงานโดยเหลือเพียงแต่ระบบส่งและเก็บข้อมูลของคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก ทั้งนี้จากผลการทดสอบต้นยางพาราเหมาะกับดินที่ระบายน้ำได้ดีมีอุณหภูมิไม่ร้อนมากต้องการค่าความชื้นในดินจะอยู่ในระดับที่เหมาะสมสามารถอุ้มน้ำได้ดีแต่ต้องไม่มีน้ำขังหรือดินแฉะ ระบบดังกล่าวใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นแหล่งเรียนรู้จัดการน้ำแบบอัตโนมัติของชุมชนเกษตรกรรมยางพารา

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณเพื่อสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund; FF) จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2568 หน่วยวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สายณัฏ สดุดี และบัญชา สมบูรณ์สุข. (2556). ผลกระทบของสภาวะโลกร้อนที่มีต่อการผลิตยางพาราในจังหวัดสงขลา (ระยะที่ 2) กรณีศึกษาการปรับตัวของเกษตรกรชาวสวนยาง. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่, หาดใหญ่.
- [2] นิรมล แสงจันทา และคณะ.(2557). ผลของภูมิอากาศต่อการเจริญเติบโตและลักษณะทางสรีรวิทยา บางประการของยางพาราในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย. วารสารแก่นเกษตร. 42 (ฉบับพิเศษ 1),160-165
- [3] สมนึก วัฒนากลาง. (2554). ความต้องการความรู้เทคโนโลยีการผลิตยางพาราของเกษตรกรอำเภอโนนสุวรรณ จังหวัด บุรีรัมย์ .วิทยานิพนธ์ปริญญาเกษตรศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช, นนทบุรี.
- [4] มณฑล พักแอม, เกียรติชัย บรรลุผลสกุล, กิตติศักดิ์ คงสีไพบ และ อภิรักษ์ ทัดสอน. (2559). ระบบให้น้ำพืชอัตโนมัติด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีศึกษาแปลงเพาะพันธุ์ข้าว. วารสารวิจัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม. 1(1),55-66.
- [5] กฤติกร แก้ววงศ์ศรี และคณะ .(2023). การประยุกต์ใช้อินเตอร์เน็ตออฟติงร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ กรณีศึกษา : ระบบรดน้ำอัตโนมัติ .วารสารก้าวทันโลกวิทยาศาสตร์. 23(1), 1-16.
- [6] รัฐศิลป์ รานอกภาณุวัชร. (2561). ระบบควบคุมโรงเรือนผักไฮโดรโปนิคส์อัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยี IoT และ เครื่องมือการเรียนรู้เชิงลึก. Journal of Information Science and Technology, 8(2), 74-82.
- [7] อธิศักดิ์ โพธิ์ทอง, ประสิทธิ์ เมฆอรุณ, และ สิทธิชัย ชูสำโรง. (2562). การพัฒนาระบบฟาร์มอัจฉริยะสำหรับเกษตรกรยุคใหม่ด้วยซอฟต์แวร์รหัสเปิดและอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง. วารสารเกษตรนเรศวร.16(20),10-17.
- [8] สุจิตรา จันทคุณ นิสาทันโคกกรวด และปิยะดา วชิระวงศกร.(2557). สมบัติทางกายภาพและความอุดมสมบูรณ์ของดินในสวนยางพาราใน ตำบลบ่อโพธิ์อำเภอนครไทย จังหวัดพิษณุโลก. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52.
- [9] กนกพร ภาควิชา, บัญชา สมบูรณ์สุข และอรอนงค์ ลองพิชัย. (2556). การใช้เทคโนโลยีในการจัดการฟาร์มสวนยางพาราขนาดเล็กระหว่างเขตนิเวศยางพารา.วารสารเกษตรศาสตร์(สังคม). 34 (2) ,195-209

## การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้

ระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร : กรณีศึกษาการปลูกกระเจี๊ยบแดง

Performance Evaluation of Conventional PV and Colored PV (Red) Panels on  
Electricity Generation and Roselle Growth under an Agrivoltaics Systemรุ่งเพชร ก่องนอก<sup>1</sup> ศศิวิมล ทรงไตร<sup>2\*</sup>, พีระวุฒิ ชินวรรังสี<sup>3</sup>, สิริมงคล สังฆะวงศ์<sup>2</sup>, สุพจน์ โสदारัตน์<sup>3</sup>, นพดล นันทวงศ์<sup>2</sup>,  
เกรียงไกร โมสาสัยานนท์<sup>4</sup> และ กอบศักดิ์ ศรีประภา<sup>2</sup>Rungphet Kongnok<sup>1</sup> Sasiwimon Songtra<sup>2\*</sup>, Perawut Chinnavornrunge<sup>3</sup>, Sirimongkon Sangkhawong<sup>3</sup>,  
Supoj Sodarat<sup>3</sup>, Noppadon Nuntawong<sup>2</sup>, Kriengkrai Mosaleeyanon<sup>4</sup> and Kobsak Sriprapha<sup>2</sup><sup>1</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา 30000<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120<sup>3</sup>ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120<sup>4</sup>ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปทุมธานี 12120<sup>1</sup> Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan,  
Nakhon Ratchasima 30000<sup>2</sup>National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC),  
National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120<sup>3</sup>National Energy Technology Center (ENTEC),  
National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120<sup>4</sup>National Center for Genetic Engineering and Biotechnology (BIOTEC),  
National Science and Technology Development Agency (NSTDA), Pathum Thani, 12120

\*Corresponding author: Tel.: 02-5647000 ext. 2718. E-mail address: sasiwimon.songtra@nectec.or.th

## Abstract

This study investigates the effects of different photovoltaic (PV) panel structures on plant growth under an agrivoltaics system, using roselle, an economically important crop, as a case study. The experiment was conducted at the National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), Pathum Thani, Thailand, over 30 days under two PV configurations: Conventional PV and Colored PV (Red). The results showed that the Conventional PV system generated a higher average electricity output of 84 kWh/day, compared with 40 kWh/day from the Colored PV (Red). However, both systems exhibited similar performance ratios (PR) of approximately 70%. Notably, the Colored PV (Red) transmittance (%TT) exceeded 55% for infrared light, and the system maintained a lower temperature, which enhanced light availability for photosynthesis. As a result, roselle grown under the Colored PV

(Red) panels exhibited superior crop quality, with an average inflorescence length of 57 cm and a fresh weight of 10 g, outperforming both field conditions and growth under Conventional PV. These findings suggest that although the Colored PV (Red) produces less electricity, it significantly supports plant growth and crop quality, demonstrating strong potential for agrivoltaics applications that balance energy generation, food security, and environmental sustainability.

**Keywords:** Photovoltaic, Solar Cell, Colored PV, Agrivoltaics System, Roselle

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตของพืชภายใต้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร (Agrivoltaics System) โดยใช้พืชเศรษฐกิจ คือ กระจับแดง เป็นกรณีศึกษา การดำเนินการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี เป็นระยะเวลา 30 วัน ภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชนิด คือ Conventional PV และ Colored PV (Red) พบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีปริมาณการผลิตไฟฟ้ามากกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) แต่ค่า Performance Ratio (PR) ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 70% โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) สามารถส่งผ่านแสงในช่วง Infrared ได้มากกว่า 55% และมีอุณหภูมิต่ำกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ซึ่งทำให้ส่งผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช เป็นผลให้กระจับแดงที่ปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีคุณภาพผลผลิตที่ดีกว่า โดยมีความยาวช่อดอกเฉลี่ย 57 cm และน้ำหนักเปียกประมาณ 10 g มากกว่าการปลูกแบบกลางแจ้งและการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ดังนั้นถึงแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) จะผลิตไฟฟ้าได้น้อย แต่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชและมีคุณภาพผลผลิตที่ดีกว่า จึงมีศักยภาพต่อการประยุกต์ใช้ในระบบ Agrivoltaics

**คำสำคัญ:** แผงเซลล์แสงอาทิตย์, ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร, กระจับแดง, แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีส้มสวยงาม

## บทนำ

จากสถานการณ์ในปัจจุบันความต้องการพลังงานและความมั่นคงทางอาหารที่มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องและเป็นสิ่งที่ทั่วโลกให้ความสำคัญ การพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการขับเคลื่อนเศรษฐกิจและสังคม โดยเฉพาะการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นหนึ่งในพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูง และสามารถตอบสนองความต้องการพลังงานได้อย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในส่วนของ การลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas Emissions) และการเปลี่ยนผ่านสู่พลังงานสะอาด (Energy Transition) [1-2]

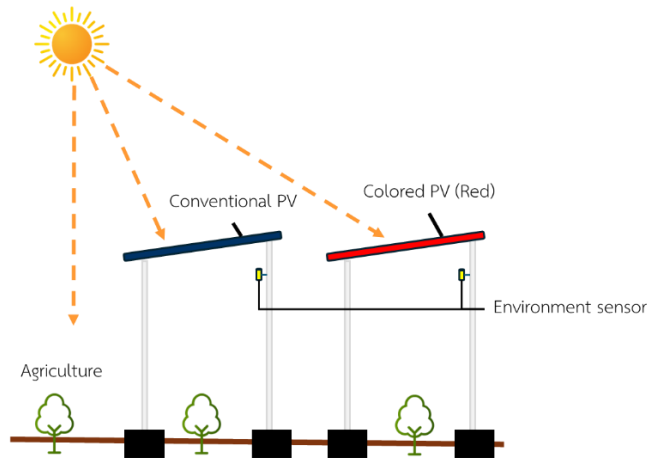
อย่างไรก็ตามการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่เกษตรกรรมมักก่อให้เกิดปัญหาการใช้ที่ดินระหว่างการผลิตพลังงานกับการเกษตร เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว แนวคิดระบบเกษตรร่วมกับการผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Agrivoltaics System) จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น โดยมีเป้าหมายในการใช้พื้นที่ได้อย่างสมดุลทั้งในด้านการผลิตไฟฟ้าและการเกษตร และจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบ Agrivoltaics อาทิเช่น การปลูกพืชภายใต้โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ที่ดิน (Land Equivalent Ratio, LER) ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับการทำการเกษตรหรือการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว [3] ขณะที่ผลกระทบจากเงาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สามารถช่วยลดความเครียดจากอุณหภูมิและการสูญเสียน้ำของพืชได้ [4-6] อีกทั้งสามารถรักษาระดับผลผลิตให้ใกล้เคียงกับการเพาะปลูกกลางแจ้ง พร้อมกับการผลิตไฟฟ้าได้ควบคู่กัน [7] เป็นต้น และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติแสงต่อการเจริญเติบโตของพืช ผลงานวิจัยมีระบุว่า แสงสีแดง (600 nm – 700 nm) มีความสำคัญต่อการยึดตัวของลำต้น และการกระตุ้นการออกดอก ในขณะที่แสงสีน้ำเงิน (400 nm – 500 nm) มีผลต่อการพัฒนาใบและการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ [8-10] แต่เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดั้งเดิม (Conventional PV) มีโครงสร้างที่บดบังแสงมีผลให้ปริมาณแสงที่ผ่านลงสู่พื้นที่เพาะปลูกไม่เพียงพอ ทำให้ส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโตของพืช เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ทางคณะวิจัยจึงมีแนวคิดในการใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV ที่ได้พัฒนาขึ้น มาประยุกต์ใช้ในระบบ Agrivoltaics เนื่องจากแผงดังกล่าว มีคุณสมบัติโปร่งแสง และสามารถปรับแต่งการส่องผ่านสเปกตรัมแสงบางช่วงได้ ทำให้มีผลต่อการสังเคราะห์แสงของพืช และสามารถเพิ่มผลผลิตได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการผลิตไฟฟ้า

## วิธีการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง (ex-perimetral research) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกันต่อการเจริญเติบโตของพืชภายใต้ระบบผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับการเกษตร (Agrivoltaics System) โดยดำเนินการทดลองที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ จังหวัดปทุมธานี เป็นระยะเวลา 30 วัน ภายใต้สภาวะสิ่งแวดล้อมเดียวกัน โดยโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด ได้แก่ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ที่มีโครงสร้างแผงประกอบด้วย Front (Glass)/Encapsulant/Solar Cell/ Encapsulant /Black sheet (Opaque) ขนาดกำลังการผลิตเท่ากับ 260 Wp พื้นที่แผงเท่ากับ 1.57 m<sup>2</sup> และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) ซึ่งมีโครงสร้าง Front (Glass)/Encapsulant/Solar Cell/ Encapsulant (Color) /Black sheet (Translucent) ขนาดกำลังการผลิตเท่ากับ 150 Wp พื้นที่แผงเท่ากับ 1.64 m<sup>2</sup> และจากภาพที่ 1 ภายใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 2 ชนิดได้มีการปลูกพืชทดลองชนิดเดียวกัน คือ กระเจี๊ยบแดง ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรและพืชเศรษฐกิจที่ท้องตลาดมีความต้องการค่อนข้างมาก เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลของโครงสร้างแผงต่อการเจริญเติบโตของพืชดังกล่าว

ในการเก็บข้อมูลในการทดลอง ประกอบด้วย ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ค่าการส่องผ่านแสง อุณหภูมิ และ ปริมาณการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากระบบ เป็นต้น และ ข้อมูลด้านการเจริญเติบโตของพืช เช่น ค่าความสูง จำนวนใบ ขนาดของดอก และน้ำหนักเปียก เป็นต้น โดยข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการทดลองถูกบันทึกอย่างเป็นระบบและนำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพของระบบ Agrivoltaics ที่ใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละชนิด



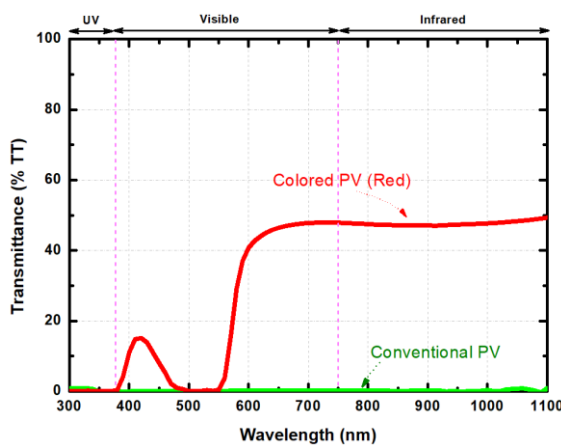
ภาพที่ 1 แบบจำลองของการทดสอบผลของโครงสร้างแผงต่อการเจริญเติบโตของพืช

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

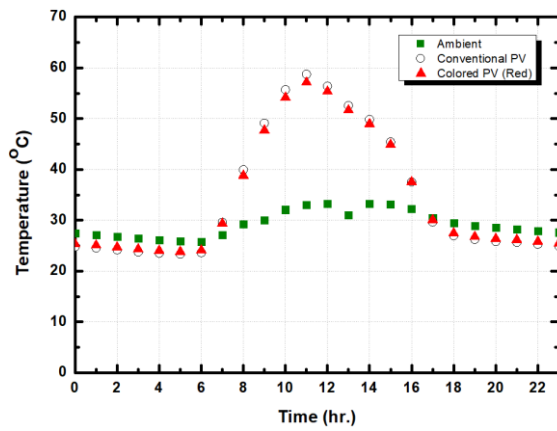
#### 1. ผลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

##### 1.1 ผลของการส่องผ่านแสง และอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากภาพที่ 2 (ก) ผลการศึกษาค่าการส่องแสง (Transmittance, %TT) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่า ในช่วงความยาวคลื่น 300 nm-1,100 nm แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีค่าการส่องผ่านแสงต่ำกว่า 5% ซึ่งเป็นผลมาจากแผ่นหลัง (Black Sheet) ที่มีความทึบแสงทำให้แสงไม่สามารถส่องผ่านได้ ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีค่าการส่องผ่านแสงสูงกว่า 55% ในช่วง Infrared (780 nm -1,100 nm) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) สามารถส่องผ่านแสงมายังพืชที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช และในภาพที่ 2 (ข) ผลของอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิของแผง แสดงให้เห็นว่า ในช่วงเวลาประมาณ 12:00 น. ค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าประมาณ 33 °C ในขณะที่อุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV อยู่ที่ประมาณ 57 °C และอุณหภูมิแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) อยู่ที่ประมาณ 55 °C ซึ่งน้อยกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV แสดงให้เห็นว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) สามารถช่วยลดการสะสมความร้อนที่ด้านใต้แผงได้



(ก)

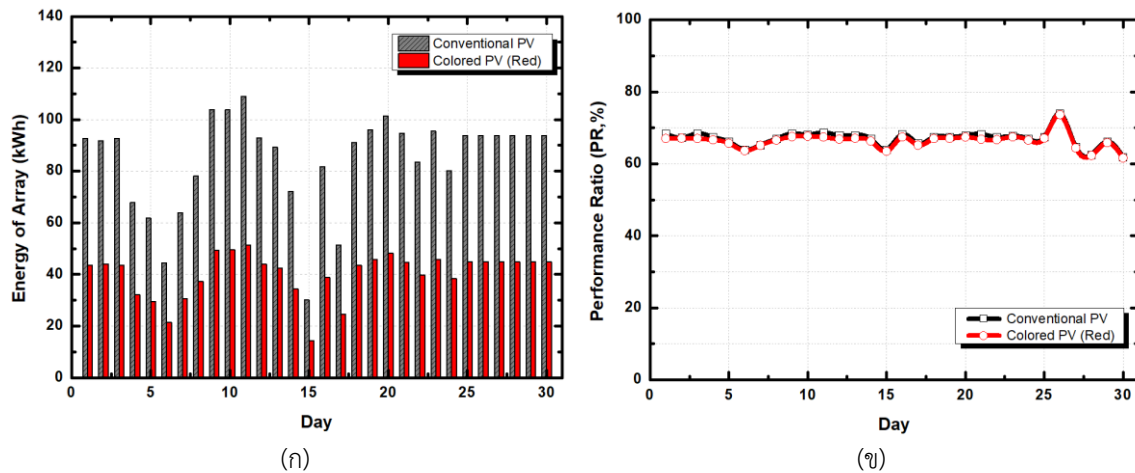


(ข)

ภาพที่ 2 (ก) ค่าการส่องแสง (Transmittance, %TT) และ (ข) ค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมและอุณหภูมิของแผง

## 1.2 ผลของการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

จากการทดลองในช่วงระยะเวลา 30 วัน พบว่า ปริมาณการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีค่าเฉลี่ยประมาณ 84 kWh/day ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) มีค่าเฉลี่ยประมาณ 40 kWh/day โดยที่ค่า Performance Ratio (PR) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีค่าเฉลี่ยประมาณ 67% และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 66% เป็นค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเทียบเท่ากับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ดังภาพที่ 3

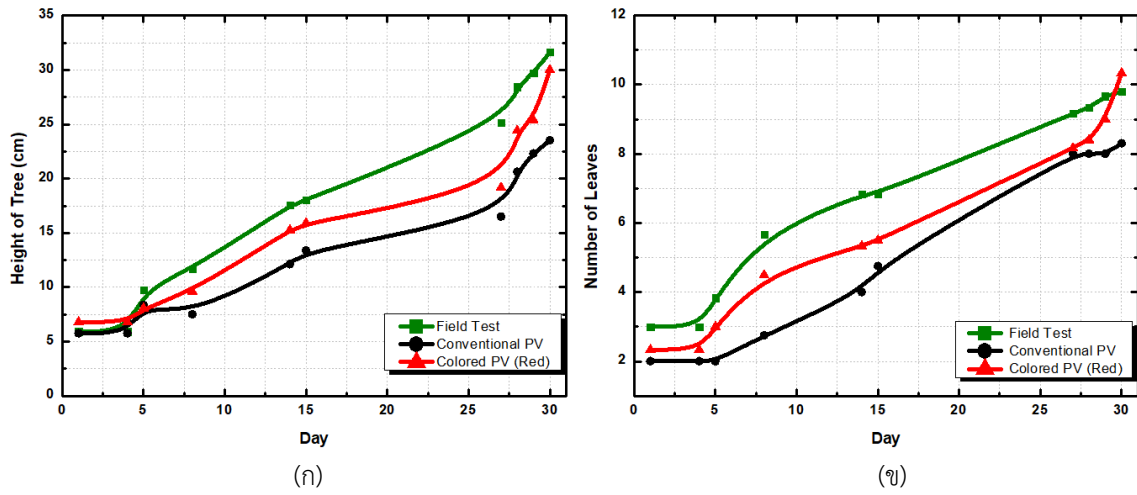


ภาพที่ 3 (ก) ค่าปริมาณการผลิตไฟฟ้า และ (ข) ค่า Performance Ratio (PR) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

## 2. ผลของการเจริญเติบโตของกระเจียวแดง

### 2.1 ผลอัตราการเจริญเติบโตของกระเจียวแดง

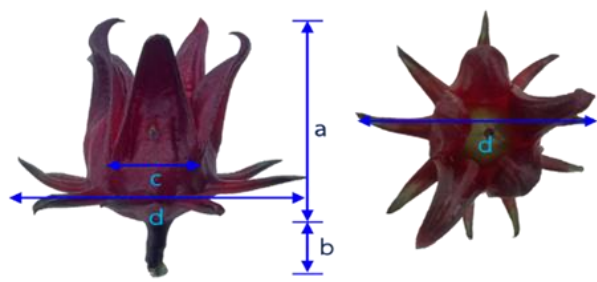
ผลการทดลองการเจริญเติบโตของกระเจียวแดงภายใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่างชนิด ในสภาวะการปลูกแบบกลางแจ้ง การปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV และชนิด Colored PV (Red) เป็นเวลา 30 วัน พบว่า จากภาพที่ 4 การปลูกกระเจียวแดงแบบกลางแจ้ง (Field Test) มีค่าความสูงมากที่สุด ซึ่งมีค่าประมาณ 33 cm รองมาเป็นการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) มีความสูงประมาณ 30 cm และการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV ที่มีความสูงประมาณ 24 cm ตามลำดับ ในขณะที่ผลของจำนวนใบ พบว่า การปลูกแบบกลางแจ้ง มีประมาณ 11 ใบ รองมาเป็นการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ที่มีประมาณ 10 ใบ และแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Conventional PV ที่มีประมาณ 8 ใบ ตามลำดับ ซึ่งจากผลความสูง และจำนวนใบ แสดงให้เห็นว่า การปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ได้ผลดีกว่าการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV คาดว่าน่าจะมาจากคุณสมบัติในการส่งผ่านแสงของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ซึ่งทำให้พืชได้รับแสงที่เพียงพอและเหมาะสมจึงส่งผลทำให้มีการเจริญเติบโตได้ดี



ภาพที่ 4 (ก) ความสูงของต้น และ (ข) จำนวนใบของกระเจี๊ยบแดง

2.1 ผลลักษณะและคุณภาพของดอกกระเจี๊ยบแดง

ผลการวิเคราะห์ลักษณะของดอกกระเจี๊ยบแดง พบว่า การปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ให้ค่าความยาวช่อดอกยาวเฉลี่ย 57 cm และมีน้ำหนักเปียกเฉลี่ย 10 g เป็นค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปลูกแบบกลางแจ้ง ที่มีค่าความยาวช่อดอกเฉลี่ย 52 cm และน้ำหนักเปียกเฉลี่ย 9 g และการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Conventional PV ที่มีค่าความยาวช่อดอกเฉลี่ย 54 cm และน้ำหนักเปียกเฉลี่ย 7 g ดังตารางที่ 1 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ลักษณะของดอกกระเจี๊ยบแดง แสดงให้เห็นว่าการปลูกกระเจี๊ยบแดงใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Colored PV (Red) ให้ดอกที่มีคุณลักษณะที่ดี คาดว่าเป็นผลมาจากมีคุณสมบัติการส่งผ่านแสงที่เหมาะสมต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ทำให้ส่งผลต่อคุณภาพของดอก และปริมาณของผลผลิตที่ได้



ภาพที่ 5 ลักษณะของกระเจี๊ยบแดง

ตารางที่ 3 ขนาดของส่วนประกอบของกระเจี๊ยบแดง

พื้นที่ปลูก	ค่าเฉลี่ยขนาดของดอกกระเจี๊ยบแดง (cm)				ดอก [d]	น้ำหนักเปียก (g)
	ดอก [a]	ก้านดอก [b]	ช่อดอก [a+b]	กลีบเลี้ยงดอก [c]		
Field Test	47.8	4.3	52.0	18.0	30.5	9.3
Colored PV (Red)	48.3	8.8	57.0	18.5	29.0	10.0
Conventional PV	44.5	9.5	54.0	15.8	25.5	7.4

## สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV และชนิด Colored PV (Red) ภายใต้ระบบ Agrivoltaics System โดยใช้พืชเศรษฐกิจ คือ กระเจี๊ยบแดงเป็นตัวอย่งทดลอง ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่างกันส่งผลทั้งต่อการผลิตไฟฟ้าและการเจริญเติบโตของพืชอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งพบว่า ในด้านคุณสมบัติทางการส่องผ่านแสงและอุณหภูมิ แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) มีค่าการส่องผ่านแสงมากกว่า 55% ในช่วง 780 nm – 1,100 nm และสามารถช่วยลดอุณหภูมิได้แผงได้ในขณะที่ด้านการผลิตพลังงานไฟฟ้า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV มีปริมาณการผลิตไฟฟ้าเฉลี่ย 84 kWh/day ซึ่งมากกว่ากว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) ที่มีค่าเฉลี่ย 40 kWh/day แต่ในขณะที่ค่า PR ของทั้ง 2 ระบบมีค่าใกล้เคียงกันที่ประมาณ 70% และส่วนด้านการเจริญเติบโตของพืช พบว่า การปลูกกลางแจ้งให้ความสูงและจำนวนใบมากที่สุด แต่ในการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) ให้คุณภาพดอกที่ดีกว่า โดยมีความยาวช่อดอกเฉลี่ย 57 cm และน้ำหนักเปียก 10 g ซึ่งมากกว่าการปลูกแบบกลางแจ้งและการปลูกใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Conventional PV แสดงให้เห็นว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิด Colored PV (Red) ถึงจะผลิตไฟฟ้าได้น้อยกว่า แต่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิตของพืชได้มากกว่า ซึ่งเหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้ในระบบ Agrivoltaics ได้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] O. Alšauskas, “World Energy Outlook 2024”.
- [2] F. J. M. M. Nijse et al., “The momentum of the solar energy transition,” *Nat. Commun.*, vol. 14, no. 1, p. 6542, Oct. 2023, doi: 10.1038/s41467-023-41971-7.
- [3] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard, “Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2725–2732, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.renene.2011.03.005.
- [4] H. Marrou, J. Wery, L. Dufour, and C. Dupraz, “Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels,” *Eur. J. Agron.*, vol. 44, pp. 54–66, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.eja.2012.08.003.
- [5] G. A. Barron-Gafford, R. L. Minor, N. A. Allen, A. D. Cronin, A. E. Brooks, and M. A. Pavao-Zuckerman, “The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 35070, Oct. 2016, doi: 10.1038/srep35070.
- [6] A. Ali Abaker Omer et al., “Impacts of agrivoltaic systems on microclimate, water use efficiency, and crop yield: A systematic review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 221, p. 115930, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115930.
- [7] C. De Francesco, L. Centorame, G. Toscano, and D. Duca, “Opportunities, Technological Challenges and Monitoring Approaches in Agrivoltaic Systems for Sustainable Management,” *Sustainability*, vol. 17, no. 2, p. 634, Jan. 2025, doi: 10.3390/su17020634.
- [8] H. Dinesh and J. M. Pearce, “The potential of agrivoltaic systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 299–308, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.024.

- [9] R. Paradiso et al., “Spectral dependence of photosynthesis and light absorptance in single leaves and canopy in rose,” *Sci. Hortic.*, vol. 127, no. 4, pp. 548–554, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.scienta.2010.11.017.
- [10] E. J. Stalknecht et al., “Designing plant-transparent agrivoltaics,” *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 1903, Feb. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-28484-5.

การศึกษาตัวประสานในเทคนิคอัดเย็นที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจุรี  
Study of Binders in Cold-Press Technique Affecting the Properties of Charcoal  
Briquettes from *SAMANEA SAMAN* Wood Chips

รุ่งฤดี ชนูดหอม<sup>1</sup>, ธเนศ ไชยชนะ<sup>1</sup>, กิตติกร สาสุจิตต์<sup>1</sup>, ลลิตา เพชรใจหาญ และ ภคมน ปินตนา<sup>1\*</sup>

Rungrudee Chanoodhom<sup>1</sup>, Tanate Chaichana<sup>1</sup>, Kittikorn Sasujit<sup>1</sup>, Lalita Petchaihan and Pakamon  
Pintana<sup>1\*</sup>

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

<sup>1</sup> Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290

\*Corresponding author: Tel.: 09-86196155. E-mail address: p.pintana@gmail.com

### Abstract

This study aimed to investigate the effect of binder type on the physical, chemical, and thermal properties of charcoal briquettes produced from *Samanea saman* wood chips using the cold-press technique. Waste wood chips from a wood processing industry in Lampang Province were carbonized in a 200 L vertical kiln at 400–500 °C for 5 hr under limited oxygen, cooled overnight, ground, and sieved through a 679 µm mesh. Two binder types were used (1) dry tapioca starch mixed with water, and (2) gelatinized tapioca starch paste, each blended with charcoal powder at a ratio of 0.9 : 0.1 : 1 (charcoal : starch : water, by weight). Briquettes of 70 g were molded in a cylindrical die diameter is 50 mm using a hydraulic press at 5 MPa for 10 s, then oven-dried at 105 ± 2 °C for 2 hr. Physical properties (density, shatter index), chemical properties (moisture, volatile matter, ash, fixed carbon), and thermal property (high heating value, HHV) were analyzed according to ASTM standards. Results showed that briquettes with dry starch had a higher density of 586.05 kg/m<sup>3</sup> but lower shatter index of 87.27% , compared to briquettes using tapioca starch paste as a binder, which had a density of 526.29 kg/m<sup>3</sup> and a shatter index of 99.69%. Moisture content of all samples was below the Thai Community Product Standard (≤8%). The high heating value exceeded 6,000 cal/g for both binder types, above the standard minimum of 5,000 cal/g, indicating high energy quality. The results suggest that while binder type affects physical durability, it has negligible influence on calorific value, which is primarily determined by feedstock quality and carbonization process.

**Keywords:** Charcoal briquettes, *Samanea saman* wood, Binder, Cold-press technique

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดตัวประสานที่แตกต่างกันต่อสมบัติทางกายภาพ เคมี และสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจู้รี (Samanea saman) โดยใช้เทคนิคการอัดเย็น เศษไม้จามจู้รีจากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ในจังหวัดลำปางถูกเผาในเตาเผาแนวตั้งขนาด 200 ลิตร ที่อุณหภูมิ 400–500 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ภายใต้สภาวะมีออกซิเจนจำกัด จากนั้นปล่อยให้เย็นข้ามคืน นำมาบดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดรู 679 µm เพื่อให้ได้ผงถ่านที่มีขนาดสม่ำเสมอ ตัวประสานที่ใช้มี 2 แบบ ได้แก่ (1) แป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำ (แป้งแห้ง) และ (2) แป้งมันสำปะหลังต้มเคี้ยวจนสุก (แป้งเปียก) โดยผสมกับผงถ่านในอัตราส่วน 0.9 : 0.1 : 1 (ผงถ่าน : แป้ง : น้ำ โดยน้ำหนัก) นำส่วนผสมน้ำหนัก 70 กรัม ไปอัดขึ้นรูปในแม่พิมพ์ทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่แรงอัด 5 MPa เป็นเวลา 10 วินาที และนำไปอบที่ 105 ± 2 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพประกอบด้วย ความหนาแน่นและค่าดัชนีการแตกร่วน คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความชื้น, สารระเหย, เถ้า และคาร์บอนคงตัว คุณสมบัติทางความร้อนวิเคราะห์ค่าความร้อน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน (Bomb Calorimeter) ตามมาตรฐาน ASTM ผลการวิจัยพบว่า ถ่านอัดแท่งที่ใช้แป้งมันสำปะหลังแห้งเป็นตัวประสานมีค่าความหนาแน่น 586.05 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งสูงกว่าถ่านอัดแท่งที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเปียกเป็นตัวประสาน ซึ่งมีค่าความหนาแน่น 526.29 kg/m<sup>3</sup> อย่างไรก็ตาม ถ่านอัดแท่งสูตรแป้งแห้งมีค่าดัชนีการแตกร่วน 87.27% ซึ่งต่ำกว่าสูตรแป้งเปียกที่มีค่า 99.69% แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างด้านความทนทานเชิงกล ความชื้นของถ่านอัดแท่งทั้งสองสูตรมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ที่กำหนดไว้ไม่เกินร้อยละ 8 ขณะที่ค่าความร้อนสูงสุดของทั้งสองสูตรมากกว่า 6,000 cal/g ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ที่กำหนดค่าความร้อนของถ่านอัดแท่งต้องไม่น้อยกว่า 5,000 cal/g สะท้อนถึงคุณภาพด้านพลังงานที่ดีของผลิตภัณฑ์ สรุปได้ว่า ชนิดของตัวประสานมีผลต่อสมบัติด้านความทนทานเชิงกลของถ่านอัดแท่ง แต่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความร้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัตถุดิบและสภาวะกระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นสำคัญ

**คำสำคัญ:** ถ่านอัดแท่ง ไม้จามจู้รี ตัวประสาน เทคนิคอัดเย็น

## บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ รวมถึงการดำรงชีวิตของประชาชนทั่วโลก ความต้องการพลังงานที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการเติบโตของประชากร การขยายตัวของเมือง และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ปัจจุบัน ประเทศไทยพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลัก ซึ่งอาจนำไปสู่ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและความไม่มั่นคงทางพลังงาน [1] ดังนั้น การพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนและสามารถผลิตได้ภายในประเทศจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำวัตถุดิบเหลือใช้ทางการเกษตร ตามศักยภาพพื้นที่ที่มีอยู่มาผลิตเป็นพลังงานทดแทน สร้างความเข้มแข็งต่อเศรษฐกิจฐานราก

ชีวมวล (biomass) เป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างยั่งยืน โดยได้จากวัสดุอินทรีย์ เช่น เศษไม้ เศษพืช และกากผลผลิตทางการเกษตร ซึ่งสามารถนำไปแปรรูปเป็นพลังงานความร้อนและเชื้อเพลิงอัดแท่งได้ การผลิตถ่านอัดแท่งจากชีวมวลนอกจากช่วยลดปริมาณของเสียแล้ว ยังได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความร้อนสูง เผาไหม้สม่ำเสมอ และมีปริมาณเถ้าต่ำ

จังหวัดลำปางเป็นพื้นที่ที่มีอุตสาหกรรมแปรรูปไม้จามจู้ (*Samanea Saman*) อยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดเศษไม้เหลือใช้ในปริมาณมาก หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม การนำเศษไม้เหล่านี้มาผลิตเป็นถ่านอัดแท่งจึงเป็นวิธีเพิ่มมูลค่าและใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า อย่างไรก็ตาม คุณภาพของถ่านอัดแท่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของวัตถุดิบ สภาพการคาร์บอนซ์ แรงอัด และชนิดของตัวประสาน (binder)

ตัวประสานมีบทบาทสำคัญในการยึดเกาะผงถ่านให้คงรูปและเพิ่มความทนทานเชิงกล ปัจจุบันนิยมใช้แป้งมันสำปะหลังในรูปแบบแห้งหรือเปียก ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพและเคมีแตกต่างกัน อาจส่งผลต่อทั้งความแข็งแรงและสมบัติด้านพลังงานของถ่านอัดแท่ง ดังนั้น การศึกษาผลของชนิดตัวประสานต่อคุณสมบัติของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจู้จึงมีความสำคัญเพื่อให้ได้สูตรและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมต่อการใช้งานจริงและตอบโจทย์ด้านคุณภาพพลังงาน

## วิธีการวิจัย

### 1. ขั้นตอนการเผาถ่านเศษไม้จามจู้

นำเศษไม้จามจู้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ในจังหวัดลำปาง ตากภายใต้แสงแดดเพื่อกำจัดความชื้นเป็นเวลา 5 วัน จากนั้นนำมาเผาด้วยเตาเผา 200 L แบบแนวตั้ง [2] ให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 400-500°C เผาภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้แก๊ส LPG เป็นเวลา 5 hr ทิ้งไว้ 1 คืน เพื่อให้ถ่านเย็น



ภาพที่ 1 การนำเศษไม้จามจู้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ มาเผาในถัง 200 ลิตร

### 2. ขั้นตอนการอัดถ่าน

2.1 ถ่านที่รวบรวมได้จากการเผาจะถูกนำมาบดด้วยหม้อบด มอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า จนได้ผงถ่าน และนำไปร่อนด้วยตะแกรงขนาดรู 679  $\mu\text{m}$

2.2 เตรียมแป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำ ในอัตราส่วน 0.1 : 1 นำไปใช้ 2 แบบ 2 แบบที่ 1 นำไปผสมกับผงถ่านแบบที่ 2 นำไปต้มและเคี่ยวจนได้แป้งเปียก

2.3 นำผงถ่านผสมกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำ ในอัตราส่วน 0.9 : 0.1 : 1 (แป้งแห้ง 10 %) โดยน้ำหนัก และผงถ่านผสมกับแป้งมันสำปะหลังและน้ำ (แป้งเปียก 10 %) ในอัตราส่วน 0.9 : 0.1 : 1 โดยน้ำหนัก

2.4 นำส่วนผสมใส่ลงในเครื่องอัดไฮดรอลิกแบบลูกสูบ (Hydraulic Press) มอเตอร์ขนาด 4.5 kW ขึ้นรูปถ่านปริมาณ 70 g/ก้อน ในแม่พิมพ์ทรงกระบอก ให้ได้ถ่านอัดแท่งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 mm ใช้แรงอัด 5 Mpa กดอัดในระยะเวลา 10 s แล้วนำถ่านอัดแท่งไปอบในเตาอบ ขนาด 100 L มอเตอร์ขนาด 1.5 kW ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 3 hr เพื่อไล่ความชื้น



(ก) ผงถ่านผสมกับแป้งมันสำปะหลังแห้ง 10 %



(ข) ผงถ่านผสมกับแป้งมันสำปะหลังเปียก 10 %

## ภาพที่ 2 เชื้อเพลิงที่ผลิตได้

### 3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านอัดแท่ง

การวิเคราะห์สมบัติของถ่านอัดแท่งจะแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางความร้อน โดยการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่งนั้นจะวิเคราะห์การค่าความหนาแน่น (Densification) ค่าดัชนีการแตกร่วน (% Shatter index) ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM D-3033 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีจะวิเคราะห์โดยประมาณ ได้แก่ ความชื้น (Moisture) สารระเหยได้ (Volatile matter) เถ้า (Ash) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ตามมาตรฐาน ASTM D 3172-3175 และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่งเป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการให้พลังงานของถ่านอัดแท่งที่แสดงในรูปค่าความร้อน (High Heating value, HHV) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อน (LECO /AC500) ตามมาตรฐาน ASTM D 5865 [3-8] ทดสอบระยะเวลาการติดไฟ และการใช้งานของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจู้รี เพื่อดูประสิทธิภาพของการติดไฟ

### 4. การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงาน

การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานทำขึ้นเพื่อประเมินประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้พลังงานในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการผลิตถ่านอัดแท่ง โดยคำนวณเป็น ต้นทุนพลังงานต่อถ่าน 1 กิโลกรัม (baht/kg) ซึ่งจะสะท้อนถึงความคุ้มค่าเชิงเทคนิคของกระบวนการผลิต

การคำนวณต้นทุนเชิงพลังงานในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งสามารถทำได้โดยใช้สูตร

$$EC = \sum(E_i \times C_i) \quad (1)$$

เมื่อ EC คือ ต้นทุนพลังงานรวม (Baht/kg)

$E_i$  คือ ปริมาณพลังงานที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน (kWh หรือ MJ)

$C_i$  คือ ค่าใช้จ่ายต่อหน่วยพลังงาน (Baht /kWh หรือ Baht /MJ)

$$\text{Energy ratio} = \frac{\text{พลังงานรวมที่ใช้ในการผลิตค่าความร้อนสูงสุด (HHV)}}{\text{พลังงานรวมที่ใช้ในการผลิต (EC)}} \quad (2)$$

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 1. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

#### 1.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่น

ผลการทดสอบความหนาแน่นพบว่า ถ่านอัดแท่งที่ใช้แป้งมันสำปะหลังแห้งเป็นตัวประสานมีค่าความหนาแน่น 586.05 kg/m<sup>3</sup> ในขณะที่ถ่านอัดแท่งที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานมีค่าความหนาแน่น 526.29 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งค่าความหนาแน่นของถ่านอัดแท่งที่ใช้แป้งมันสำปะหลังแห้งสูงกว่าเล็กน้อย สาเหตุอาจมาจากการที่แป้งมันแห้งสามารถกระจายตัวและยึดเกาะผงถ่านได้แน่นขึ้นระหว่างกระบวนการอัด ทำให้ลดช่องว่างรูพรุนภายใน ส่งผลให้ความหนาแน่นสูงกว่า ในขณะที่แป้งเปียกมีโครงสร้างเจลซึ่งแม้จะให้การยึดเกาะที่ดีแต่มีความหนืดสูง ทำให้การกระจายตัวของผงถ่านภายในก้อนไม่สม่ำเสมอเท่าแป้งมันแห้ง จึงได้ค่าความหนาแน่นต่ำกว่า

#### 1.2 การวิเคราะห์ดัชนีการแตก่วน

ดัชนีการแตก่วน เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดแท่งแสดงถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งส่งผลต่อความทนทาน การแตก่วนในการขนส่ง โดยค่ามาตรฐานอยู่ระหว่าง 90% - 99% ผลการทดสอบพบว่าค่าดัชนีการแตก่วนของถ่านอัดแท่งที่ใช้แป้งมันสำปะหลังแห้งเป็นตัวประสานมีค่า 87.27% ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานเชื้อเพลิงอัดแท่ง (90-99%) [9] บ่งชี้ว่ามีความทนทานต่อแรงกระแทกต่ำ อาจเกิดจากการที่เนื้อถ่านไม่สามารถยึดเกาะกันแน่นเพียงพอ ทำให้เกิดการแตกหรือร่วนง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก ขณะที่ถ่านอัดแท่งที่ใช้แป้งเปียกเป็นตัวประสานมีค่าดัชนีการแตก่วนสูงถึง 99.69% อยู่ในช่วงมาตรฐานและมีความทนทานสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุคือแป้งเปียกผ่านกระบวนการ gelatinization ทำให้โมเลกุลแป้งพองตัวและสร้างโครงสร้างกาวที่เหนียวแน่น สามารถยึดเกาะผงถ่านได้ดีขึ้น ส่งผลให้ทนต่อแรงกระแทกและการขนส่งได้ดีกว่า

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางความร้อนของเศษไม้จามจรี

	ปริมาณ ความชื้น (%)	ปริมาณสาร ระเหย (%)	ปริมาณเถ้า (%)	ปริมาณ คาร์บอน (%)	ค่าความร้อน (cal/g)
เศษไม้จามจรี	6.70±0.13	74.89±0.35	2.80±0.13	15.61±0.15	4,178.29±249.66

### 2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

#### 2.1 การวิเคราะห์ความชื้น

เศษไม้จามจรีมีปริมาณความชื้นเฉลี่ย 6.70±0.13% ขณะที่ถ่านอัดแท่งที่ใช้ตัวประสานแป้งมันสำปะหลังแห้งและแป้งเปียกมีค่าความชื้นเฉลี่ย 5.61±0.09% และ 5.11±0.05% ตามลำดับ ซึ่งค่าทั้งหมดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 238/2547 (≤8%) แสดงว่าผลิตภัณฑ์ถ่านอัดแท่งมีความชื้นต่ำ ช่วยให้ติดไฟง่ายและเก็บรักษาได้นาน โดยค่าที่ต่ำในสูตรแป้งเปียกอาจเกิดจากโครงสร้างเนื้อถ่านที่แน่นกว่า ทำให้กักเก็บความชื้นได้น้อย [10]

#### 2.2 การวิเคราะห์สารระเหย

เศษไม้จามจรีมีสารระเหยสูงถึง 74.89±0.35% ซึ่งเป็นลักษณะปกติของไม้ดิบที่ยังมีองค์ประกอบอินทรีย์สูง ส่วนถ่านอัดแท่งทั้งสองสูตรมีสารระเหยลดลงเหลือ 44.05±3.43% (แป้งแห้ง) และ 43.73±2.97% (แป้งเปียก) เนื่องจากผ่านกระบวนการคาร์บอนที่อุณหภูมิ 400-500°C ทำให้ส่วนหนึ่งของสารอินทรีย์สลายตัว

## 2.3 การวิเคราะห์เถ้า

ปริมาณเถ้าของเศษไม้จามจรีมีค่า  $2.80 \pm 0.13\%$  ซึ่งสะท้อนถึงการมีสิ่งเจือปนน้อยและความบริสุทธิ์ของเนื้อไม้ แม้ค่านี้อาจสูงกว่าเกณฑ์ทั่วไปของไม้เนื้อแข็งคุณภาพสูงบางชนิดที่มักมีปริมาณเถ้าต่ำกว่า 2% แต่ยังคงสอดคล้องกับข้อมูลจาก FAO [11] ที่ระบุว่าถ่านจากไม้เนื้อแข็งคุณภาพดีควรมีปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงต่ำ (ประมาณ 3%) เพื่อรักษาคุณภาพการให้ความร้อน สำหรับถ่านอัดแท่งสูตรแป้งแห้งและแป้งเปียก มีค่าเถ้าเพิ่มขึ้นเป็น  $3.63 \pm 0.05\%$  และ  $3.94 \pm 0.15\%$  ตามลำดับ ปริมาณเถ้าที่สูงขึ้นในถ่านอัดแท่งเกิดจากการเผาไหม้ตัวประสานและการสะสมของแร่ธาตุจากกระบวนการผลิต

## 2.4 การวิเคราะห์คาร์บอนคงตัว

คาร์บอนคงตัวของเศษไม้จามจรีอยู่ในระดับต่ำเพียง  $15.61 \pm 0.15\%$  เนื่องจากยังไม่ผ่านการคาร์บอนไนซ์ ขณะที่ถ่านอัดแท่งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเป็น  $46.71 \pm 3.42\%$  สำหรับสูตรที่ใช้แป้งแห้งสำหรับปาล์มและ  $47.22 \pm 3.16\%$  สำหรับสูตรที่ใช้แป้งเปียก โดยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าชนิดของตัวประสานไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณคาร์บอนคงตัวอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัวเป็นผลจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์ซึ่งช่วยกำจัดความชื้นและสารระเหยออกจากชีวมวล ทำให้สัดส่วนคาร์บอนคงตัวสูงขึ้น

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และคุณสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่ง

	ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	ดัชนีการ แตกร่วน (%)	ปริมาณ ความชื้น (%)	ปริมาณสาร ระเหย (%)	ปริมาณ เถ้า (%)	ปริมาณ คาร์บอน (%)	ค่าความร้อน ( $\text{cal/g}$ )
ผงถ่าน+แป้งแห้ง 10%	$586.05 \pm 6.91$	$87.27 \pm 1.69$	$5.61 \pm 0.09$	$44.05 \pm 3.43$	$3.63 \pm 0.05$	$46.71 \pm 3.42$	$6,379.9 \pm 169.80$
ผงถ่าน+แป้งเปียก 10%	$526.29 \pm 18.56$	$99.69 \pm 0.14$	$5.11 \pm 0.05$	$43.73 \pm 2.97$	$3.94 \pm 0.15$	$47.22 \pm 3.16$	$6,418.16 \pm 243.55$

## 3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อน

### 3.1 การวิเคราะห์หาค่าความร้อน

จากการทดสอบค่าความร้อนของเศษไม้จามจรีดิบ พบว่ามีค่าเฉลี่ยอยู่ที่  $4,178.29 \pm 249.66 \text{ cal/g}$  ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับชีวมวลประเภทไม้โตเร็ว และแสดงถึงศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ดี เมื่อนำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และแปรรูปเป็นถ่านอัดแท่ง พบว่าค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยถ่านอัดแท่งสูตรแป้งแห้งสำหรับปาล์มมีค่าความร้อน  $6,379.9 \text{ cal/g}$  และสูตรแป้งเปียกมีค่าความร้อน  $6,418.16 \text{ cal/g}$  ซึ่งทั้งสองสูตรมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำของมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 238/2547 ที่กำหนดไว้ว่าต้องไม่น้อยกว่า  $5,000 \text{ cal/g}$

ค่าความร้อนที่สูงขึ้นนี้เป็นผลมาจากการที่ไม้จามจรีผ่านการเผาที่อุณหภูมิ  $400\text{--}500 \text{ }^\circ\text{C}$  ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขับสารระเหย (Volatile Matter) และความชื้นออกไป ส่งผลให้โครงสร้างคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) มีความเข้มข้นสูงขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัย [12] ที่ระบุว่าไม้จามจรี (Samanea saman) มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ และมีค่าความร้อนในระดับที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในอุตสาหกรรมได้

สำหรับการเปรียบเทียบตัวประสาน พบว่าสูตรแป้งเปียกมีค่าความร้อนสูงกว่าสูตรแป้งแห้งเพียงเล็กน้อย (ต่างกันเพียง  $0.6\%$ ) แต่ความแตกต่างน้อยในช่วงที่ไม่มากพอจะมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงอาจกล่าวได้ว่าชนิดของตัวประสาน (แป้ง

มันสำปะหลังแห้งหรือแป้งเปียก) ไม่ได้ส่งผลอย่างชัดเจนต่อค่าพลังงานของถ่านอัดแท่ง แต่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ดัชนีการแตกร่วน ดังที่ได้อภิปรายในส่วนก่อนหน้า

### 3.2 การทดสอบระยะเวลาการติดไฟ และการใช้งาน

ในการทดสอบระยะเวลาการติดไฟ และการใช้งานของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจรี เพื่อดูประสิทธิภาพของการติดไฟ โดยนำถ่านอัดแท่ง 300 กรัม ใส่ในเตาอั้งโล่ขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 20 เซนติเมตร จุดไฟ สังเกตลักษณะการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่ง และระยะเวลาในการเผาไหม้ตั้งแต่เริ่มต้นจนไหมอดดับ

ตารางที่ 3 การทดสอบระยะเวลาการติดไฟ และการใช้งานของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจรี

	ลักษณะของการเผาไหม้	ระยะเวลาเฉลี่ยในการเผาไหม้ (นาที)
ผงถ่าน+แป้งแห้ง 10%	ไม่มีการแตกปะทุขณะติดไฟ, ไม่มีควัน	130
ผงถ่าน+แป้งเปียก 10%	ไม่มีการแตกปะทุขณะติดไฟ, ไม่มีควัน	132

จากผลการทดสอบระยะเวลาการเผาไหม้ของถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจรี พบว่า สูตรที่ใช้แป้งมันสำปะหลังแห้งเป็นตัวประสาน มีระยะเวลาในการเผาไหม้เฉลี่ย 130 นาที สูตรที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเปียกเป็นตัวประสาน มีระยะเวลาในการเผาไหม้เฉลี่ย 132 นาที ทั้งสองสูตรมีลักษณะการติดไฟที่คล้ายคลึงกัน โดย ไม่มีการแตกปะทุขณะติดไฟ และ ไม่เกิดควันในระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งเป็นลักษณะของการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ สะท้อนถึงคุณภาพของถ่านอัดแท่งที่มีความบริสุทธิ์และคาร์บอนคงตัวสูง

ความแตกต่างของระยะเวลาเผาไหม้ระหว่างทั้งสองสูตรมีเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่า ชนิดของตัวประสานไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระยะเวลาการเผาไหม้ กล่าวโดยสรุป ถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจรีทั้งสองสูตรมี ประสิทธิภาพการเผาไหม้และการใช้งานที่ดีมาก สามารถจุดติดไฟได้ง่าย เผาไหม้อย่างสม่ำเสมอโดยไม่เกิดควัน และให้ระยะเวลาเผาไหม้นานกว่า 2 ชั่วโมง ซึ่งเหมาะสมต่อการใช้งานในครัวเรือนหรือเชิงพาณิชย์ โดยสูตรที่ใช้แป้งมันสำปะหลังเปียกเป็นตัวประสานมีคุณภาพโดยรวมดีกว่าเล็กน้อยในด้านความทนทานและความคงตัวของถ่านอัดแท่ง

### 4. การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงาน

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานและ Energy ratio ของการผลิตถ่านอัดแท่ง

	ผงถ่าน+แป้งแห้ง 10%	ผงถ่าน+แป้งเปียก 10%
LPG ที่ใช้ในการเผา (kg LPG/kg charcoal)	0.44	0.44
LPG ที่ใช้ในการต้มแป้ง (kg LPG/kg charcoal)	-	0.01
ไฟฟ้าที่ใช้ในการอบ (kWh/kg)	0.03	0.03
ไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดขึ้นรูป (kWh/kg)	2.14	2.14
ไฟฟ้าที่ใช้ในการอบแห้ง (kWh/kg)	0.75	0.75
พลังงาน LPG ที่ใช้รวม (MJ/kg)	21.69	22.19
พลังงานไฟฟ้า ที่ใช้รวม (MJ/kg)	10.51	10.51
พลังงานรวม ที่ใช้รวม (MJ/kg)	32.20	32.70

ต้นทุนค่าแก๊ส LPG (Baht/kg)	14.08	14.40
ต้นทุนค่าไฟฟ้า (Baht/kg)	12.26	12.26
<b>ต้นทุนพลังงานรวม (Baht/kg)</b>	<b>26.34</b>	<b>26.66</b>
ค่าความร้อน (MJ/kg)	26.69	26.85
<b>Energy ratio</b>	<b>0.83</b>	<b>0.82</b>

ต้นทุนพลังงานของการผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจรีพบว่า กระบวนการผลิตใช้พลังงานรวมเฉลี่ยประมาณ 32.20–32.70 MJ/kg โดยมีสัดส่วนพลังงานจากก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) มากกว่าสองในสามของพลังงานรวมทั้งหมด และอีกประมาณหนึ่งในสามมาจากพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของกระบวนการที่ใช้ LPG เป็นเชื้อเพลิงหลักในขั้นคาร์บอนไนซ์ ส่วนพลังงานไฟฟ้าใช้ในกระบวนการอัด และอบแห้ง โดยเฉพาะในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปซึ่งใช้พลังงานไฟฟ้าสูงที่สุดที่ 2.14 kWh/kg เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างถ่านอัดแท่งที่ใช้ตัวประสานต่างชนิด พบว่าการใช้แป้งมันสำปะหลังเปียกมีการใช้พลังงานรวมสูงกว่าสูตรแป้งแห้งเล็กน้อย (32.70 เทียบกับ 32.20 MJ/kg) เนื่องจากต้องใช้ LPG เพิ่มเติมในขั้นตอนการต้มแป้งเพื่อทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ ส่งผลให้ต้นทุนพลังงานของสูตรแป้งเปียกสูงกว่าสูตรแป้งแห้งราว 0.32 บาทต่อกิโลกรัม แม้ความแตกต่างจะไม่มากนัก แต่สะท้อนถึงภาระพลังงานที่เพิ่มขึ้นจากการเลือกใช้ตัวประสานชนิดเปียก

ในด้านประสิทธิภาพพลังงาน พบว่าถ่านอัดแท่งมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 26.69–26.85 MJ/kg ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน มผช. 238/2547 อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาค่า Energy ratio พบว่าสูตรแป้งแห้งมีค่าเท่ากับ 0.83 และสูตรแป้งเปียกเท่ากับ 0.82 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานที่ได้รับจากถ่านอัดแท่งยังน้อยกว่าพลังงานรวมที่ใช้ในกระบวนการผลิต (เนื่องจากค่า Energy ratio < 1.0) ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาความคุ้มค่าในภาพรวม แม้สูตรแป้งเปียกจะมีต้นทุนพลังงานสูงกว่าเล็กน้อยแต่ข้อได้เปรียบนี้มีนัยสำคัญไม่มากนัก เนื่องจากค่าความร้อนและคุณสมบัติทางเคมีอยู่ในระดับใกล้เคียงกัน ในทางกลับกัน สูตรแป้งเปียกมีค่าดัชนีการแตก่วนสูงถึง 99.69% อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (90–99%) ในขณะที่สูตรแป้งแห้งได้เพียง 87.27% ต่ำกว่ามาตรฐาน แสดงให้เห็นถึงความทนทานเชิงกลที่เหนือกว่า จึงทำให้สูตรแป้งเปียกมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงมากกว่า แม้จะต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในขั้นตอนการต้มแป้ง

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้สรุปได้ว่าการเลือกชนิดตัวประสานมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพของถ่านอัดแท่ง โดยตัวประสานแป้งมันสำปะหลังแห้งให้ความหนาแน่นสูงกว่าที่ 586.05 kg/m<sup>3</sup> แต่มีความทนทานต่อแรงกระแทกต่ำกว่าสูตรแป้งเปียกที่มีค่าดัชนีการแตก่วนสูงถึง 99.69% ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มผช. ในขณะที่สมบัติทางเคมีและพลังงานของทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีความชื้นต่ำกว่า 8% มีค่าความร้อนสูงถึง 6,379–6,418 cal/g และมีคาร์บอนคงตัวประมาณ 46.71%–47.22% ซึ่งเป็นผลจากการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 400–500°C แม้การวิเคราะห์ต้นทุนพลังงานจะพบค่า Energy ratio อยู่ที่ 0.82–0.83 และมีต้นทุน 26.34–26.66 บาทต่อกิโลกรัม แต่การเปลี่ยนแหล่งความร้อนจากก๊าซ LPG มาเป็นฟืนไม้จะช่วยลดต้นทุนได้ถึง 14.08–14.40 บาทต่อกิโลกรัม และเพิ่มค่า Energy ratio ให้สูงกว่า 1.0 ได้ โดยถ่านที่ได้สามารถเผาไหม้ได้นานกว่า 2 ชั่วโมง (130–132 นาที) โดยไม่มีควันและการแตกปะทุ จึงสรุปได้ว่าการใช้ตัวประสานแป้งเปียกมีความเหมาะสมที่สุดในการผลิตถ่านอัดแท่งจากเศษไม้จามจรีเนื่องจากให้ความทนทานเชิงกลตามมาตรฐาน ขณะที่คุณสมบัติด้านพลังงานและต้นทุนต่างจากสูตรแป้งแห้งเพียงเล็กน้อย

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ที่สนับสนุนเงินทุนในด้านการศึกษา และการทำวิจัยวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้และศูนย์วิจัยและพัฒนาวัสดุอุตสาหกรรมสร้างสรรค์ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม ที่สนับสนุนการใช้พื้นที่ ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการวิจัย และขอบคุณคณะอาจารย์ของวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ในการให้คำแนะนำในการวิจัยในครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กระทรวงพลังงาน. (2567). สถานการณ์พลังงานปี 2566 และแนวโน้มปี 2567. สืบค้นเมื่อ 17 กุมภาพันธ์ 2568 จาก <https://www.eppo.go.th>
- [2] วิจิตร เขาวัวนกลาง และพิมพ์ลภา ปาสาจะ (2562). สมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติทางความร้อนของถ่านอัดแท่งโดยใช้น้ำหมักชีวภาพเป็นตัวประสานและถ่านในการหุงต้มในครัวเรือน. รายงานการวิจัยจากทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดินด้านการวิจัย ปีงบประมาณ พ.ศ. 2561. มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม
- [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.
- [5] ASTM Standard. D3174. 1997. Standard test method for ash in the analysis sample. U.S.A.
- [6] ASTM Standard. D3174. 1997. Standard test method for ash in the analysis sample. U.S.A.
- [7] ASTM Standard. D3172. 1997. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. U.S.A.
- [8] ASTM Standard. D5865. 2013. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. U.S.A.
- [9] ASTM Standard. D3033. 2008. Standard Test Methods for Dimensions, Mass, and Density of Preformed Block-Type Thermal Insulation. U.S.A.
- [10] อัจฉรา อัครวิทนสุนัย, ชุตติมา เสมาสัยกุล, นิพนธ์ ประภักดิ์, ญัฐธิดา เปี่ยมสุวรรณศิริ และ นิจวรรณ ชูชาติ. (2554). การนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง. ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ครั้งที่ 49, 162–168.
- [11] สรวิต สอนสารี และฐิติพร เจาะจง. (2567). ความสามารถเชิงความร้อนของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร กรณีศึกษาเปลือกมะขามเปรี้ยวยักษ์. รายงานสืบเนื่องจากการประชุมสัมมนาวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (หน้า 26-32).
- [12] องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ. (2526). การสำรวจไม้เชื้อเพลิง (เอกสารป่าไม้ FAO เลขที่ 41). สืบค้นเมื่อ 1 สิงหาคม 2568 จาก <https://www.fao.org/4/j0926e/J0926e06.htm>
- [13] Suyatno, S., Ghazidin, H., Putra, H. P., et al. (2024). Comprehensive experimental assessment of Samanea saman wood and leaves waste combustion in the aspect of ash-related problem. Bioresource Technology Reports, 26, 101852. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101852>

การใช้ประโยชน์เชิงมูลค่าอย่างยั่งยืนจากก้อนเชื้อเห็ดใช้แล้ว: ความเป็นไปได้ในการผลิต  
เม็ดเชื้อเพลิงชีวภาพ

Sustainable Valorization of Spent Mushroom Substrate: Feasibility of Bio-Pellet  
Production

ปฏิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ<sup>1</sup> ศิวัตม์ กมลคุณานนท์<sup>2</sup> ลลิตา เพชรใจหาญ<sup>3</sup> และ ภคมน ปินตานา<sup>4\*</sup>  
Patipat Thanompongchart<sup>1</sup> Siwat Kamonkunanon<sup>2</sup> Lalita Petchaihan<sup>3</sup> and Pakamon Pintana<sup>4\*</sup>

- <sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมการจัดการพลังงานในงานอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์  
<sup>1</sup> Industrial Energy Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Uttaradit 53000  
<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมบริหารงานก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์  
<sup>2</sup> Construction Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Rajabhat Uttaradit 53000  
<sup>3</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290  
<sup>3</sup> Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290  
<sup>4</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมการอนุรักษ์พลังงาน (ต่อเนื่อง) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290  
<sup>4</sup> Energy Conservation Engineering (Continuing Program), School of Renewable Energy,  
Maejo University, Chiang Mai 50290

\*Corresponding author: Tel.: 09-86196155. E-mail address: p.pintana@gmail.com

### Abstract

This study aimed to evaluate the feasibility of producing fuel pellets from spent mushroom substrate (SMS) of oyster mushrooms, focusing on their physical properties, energy potential, and economic viability. The SMS materials were collected from mushroom farms after six months of use and pelletized using a flat-die biomass pellet machine with a 8 mm die diameter to compare the performance between 2-roller and 3-roller compression systems. SMS was mixed with cassava starch binder at ratios of 100:0, 80:20, and 60:40 (w/w). The results showed that the 3-roller system produced pellets with a density of 426–529 kg/m<sup>3</sup> and significantly reduced moisture content. The heating value of the pellets increased with higher binder proportions, with the 60:40 ratio achieving the highest calorific value of 12.74 MJ/kg. All pellet formulations demonstrated sufficient durability and low dust content, meeting ISO 17829 and DINplus standards. In terms of economics, the 100:0 formulation yielded the lowest production cost, highest profit, and a payback period of 0.20–0.35 years. The 80:20 formulation required a selling price of at least 8 THB/kg to break even, while the 60:40 formulation resulted in losses under all scenarios. Increasing binder content improved the physical and energy characteristics but also raised production costs. In conclusion, fuel pellets produced from spent

mushroom substrate can achieve enhanced density and energy value through appropriate binder ratios and moisture control, making them a suitable and economically viable green fuel alternative to firewood.

**Keywords:** Spent mushroom substrate, Biomass pellets, Feasibility study, Sustainable resource utilization, Renewable energy

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจากก้อนเห็ดนางฟ้าใช้แล้ว (SMS) โดยมุ่งเน้นสมบัติทางกายภาพ พลังงาน และศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ วัสดุใช้ในการทดลองเก็บจากฟาร์มเพาะเห็ดหลังใช้งานครบ 6 เดือน ใช้เครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบ Flat Die ขนาดรูแผ่นอัดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm เพื่อเปรียบเทียบระบบอัด 2 และ 3 ลูกกลิ้ง และทดสอบการผสม SMS กับแป้งมันสำปะหลังสัดส่วน 100:0 80:20 และ 60:40 พบว่า ระบบ 3 ลูกกลิ้ง ให้ความหนาแน่น 426–529 kg/m<sup>3</sup> และลดความชื้นได้อย่างมีนัยสำคัญ ประสิทธิภาพค่าความร้อนของเม็ดเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนตัวประสาน โดยสูตร 60:40 ให้ความร้อนสูงสุด 12.74 MJ/kg ทุกสูตรมีความคงทนและฝุ่นละออง ผ่านมาตรฐาน ISO 17829 และ DINplus ด้านเศรษฐศาสตร์ สูตร 100:0 มีต้นทุนต่ำ กำไรสูงสุด และคืนทุน 0.20–0.35 year สูตร 80:20 ต้องราคาขาย ≥ 8 ฿/kg จึงคืนทุนได้ ส่วนสูตร 60:40 ขาดทุนทุกกรณี การเพิ่มสัดส่วนตัวประสานช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและพลังงาน แต่เพิ่มต้นทุน สรุปได้ว่า เม็ดเชื้อเพลิงจากก้อนเห็ดใช้แล้วสามารถปรับปรุงความหนาแน่นและค่าพลังงานได้ด้วยการเลือกสัดส่วนผสมและควบคุมความชื้นอย่างเหมาะสม ทำให้เหมาะสมต่อการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทดแทนการใช้ฟืนได้และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์

**คำสำคัญ:** ก้อนเห็ดใช้แล้ว เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ความเป็นไปได้ การใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน พลังงานทดแทน

## บทนำ

ในปี 2567 การผลิตพลังงานทั้งหมดอยู่ที่ 36,639 ktoe เพิ่มขึ้น 2.0% จากปีก่อน โดยพลังงานเชิงพาณิชย์คิดเป็น 20,945 ktoe (57.2%) เพิ่มขึ้น 7.3% แบ่งเป็นถ่านหิน 1,866 ktoe ลดลง 1.7% ก๊าซธรรมชาติ 14,873 ktoe เพิ่มขึ้น 10.6% น้ำมันดิบ 2,271 ktoe เพิ่มขึ้น 7.9% และคอนเดนเสท 1,935 ktoe ลดลง 6.7% ส่วนพลังงานหมุนเวียนผลิตได้ 13,141 ktoe (35.8%) ลดลง 4.9% โดยพลังงานหมุนเวียนแบบดั้งเดิม 2,535 ktoe ลดลง 1.2% และพลังงานประเภทอื่น 18 ktoe ลดลง 47.1% [1] การผลิตพลังงานโดยรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยพลังงานเชิงพาณิชย์เติบโตต่อเนื่อง โดยเฉพาะก๊าซธรรมชาติและน้ำมันดิบ ขณะที่พลังงานหมุนเวียนและพลังงานประเภทอื่นลดลงอย่างชัดเจน แตกต่างจากปัจจุบันที่พลังงานชีวมวลได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายทั่วโลกในฐานะพลังงานทดแทน ชีวมวลและอินทรีย์วัตถุสามารถผลิตพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้โดยตรงเพื่อความร้อน การผลิตแก๊สจากชีวมวล (Gasification) การสร้างแก๊สชีวภาพด้วยการหมัก (Biogas) และการผลิตเชื้อเพลิงเหลว เช่น เอทานอลหรือไบโอดีเซลผ่านการสกัดน้ำมันและทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน [2] การเผาไหม้โดยตรง เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแปรรูปวัสดุชีวมวลให้เป็นพลังงานความร้อน โดยการเผาไหม้วัสดุชิ้นในสถานะที่มีออกซิเจนเพียงพอ โดยสามารถใช้วัสดุชีวมวลได้เลยหรือนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เช่น เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล และก้อนเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นต้น [3] การผลิตเม็ดชีวมวลที่มีความหนาแน่นมีความท้าทายเนื่องจากยังขาดกลไกการรวมตัวของอนุภาคและบทบาทของพันธะทางเคมีเชิงโครงสร้างในกระบวนการอัดเม็ด โครงสร้าง

โมเลกุลและสารเติมแต่งประเภทต่าง ๆ [4] การอัดเม็ดจากชีวมวลที่ไม่ใช่ไม้ก็มีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นจากข้อมูล 5 ปีที่ผ่านมา รวมไปถึงการประเมินคุณภาพ มีความสำคัญอย่างยิ่งเมื่อต้องจัดการกับกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง โดยพิจารณาจากวัตถุดิบที่เป็นไปได้มากมายสำหรับการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง [5] การใช้เศษไม้ในปัจจุบันไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด การศึกษาปัจจัยข้อกำหนดตามมาตรฐานอัดเม็ดชีวมวลหรือข้อกำหนดสำหรับลักษณะทางกายภาพและทางกลของเม็ดชีวมวลที่ผลิตได้ ลักษณะของเม็ดชีวมวลที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นเป็นหลัก เช่น ขนาดอนุภาค ความหนาแน่น [6] ปริมาณความชื้น [7] ค่าความร้อน เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว ปริมาณเถ้า [8] อุณหภูมิการติดไฟ [9] สภาวะการทำงานของเครื่องจักรกล ความดันที่ใช้ และอุณหภูมิแม่พิมพ์ เป็นต้น เทคโนโลยีอัดเม็ดชีวมวลยังได้รับความนิยมอย่างรวดเร็วในหลายประเทศ อนาคตของอุตสาหกรรมอัดเม็ดชีวมวลได้รับอิทธิพลอย่างมากจากสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ การเมือง และสังคมต่าง ๆ การจัดหาพลังงานที่ยั่งยืนหรือพลังงานสีเขียวจึงมีความท้าทายอย่างมากในอนาคต [10] การนำพลังงานชีวมวลมาใช้งานมีวิธีที่หลากหลายแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความต้องการในการนำไปใช้ประโยชน์ เกษตรกรส่วนมากในปัจจุบันมีการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาใช้ผลิตเป็นสารตั้งต้นในอาหารในการดำรงชีพ อย่างเช่น การผลิตเห็ดนางฟ้าหรือเห็ดอื่น ๆ ได้หลากหลายชนิด [11] สามารถนำชีวมวลจำพวกฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกมันสำปะหลัง และขี้เลื่อย ซึ่งเป็นผลพลอยได้ทั้งการเกษตรและอุตสาหกรรมชีวมวล ช่วยในการเพาะเห็ดได้อย่างมีประสิทธิภาพ แทนที่จะปล่อยทิ้งเป็นของเสียหรือเผาทำลาย และยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลไม่เพียงแต่มีส่วนสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนในภูมิภาคและการเปลี่ยนผ่านด้านพลังงานในท้องถิ่นเท่านั้น แต่ยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกอีกด้วย [12] การอัดเม็ดชีวมวลเป็นทางเลือกทดแทนที่ได้รับความนิยมและยั่งยืนมากขึ้นสำหรับการผลิตความร้อนและพลังงานทดแทนถ่านหิน [13] รวมไปถึงการนำของเสียจากอุตสาหกรรมการเพาะเห็ดนำมาเป็นแหล่งชีวมวลใหม่ในการผลิตพลังงานทดแทนได้ ช่วยสร้างระบบเศรษฐกิจแบบหมุนเวียน (Circular economy) ในกระบวนการผลิตเห็ดนางฟ้าจะต้องใช้ความร้อนจากไม้ฟืนจำนวนมากเพื่อใช้ในการฆ่าเชื้อเห็ดเป็นเวลามากกว่า 2 h [14] ดังนั้น จึงเกิดแนวคิดในการนำของเสียจากการเพาะเห็ดมาใช้เป็นแหล่งชีวมวลใหม่ โดยเฉพาะการนำก้อนเห็ดใช้แล้วมาศึกษาสภาวะการผลิตในรูปแบบเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลหรือก้อนชีวมวล เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้สามารถใช้ทดแทนไม้ฟืนที่ขาดแคลนในตลาดได้ ทั้งยังช่วยลดต้นทุนการจัดการหาฟืนที่มีราคาสูงให้กับเกษตรกร ประชาชน และวิสาหกิจชุมชนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเห็ดนางฟ้า นอกจากนี้ การดำเนินการดังกล่าวยังมีส่วนช่วยเสริมสร้างความยั่งยืนด้านพลังงาน และสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียนในระดับท้องถิ่นอย่างเป็นรูปธรรม

## วิธีการวิจัย

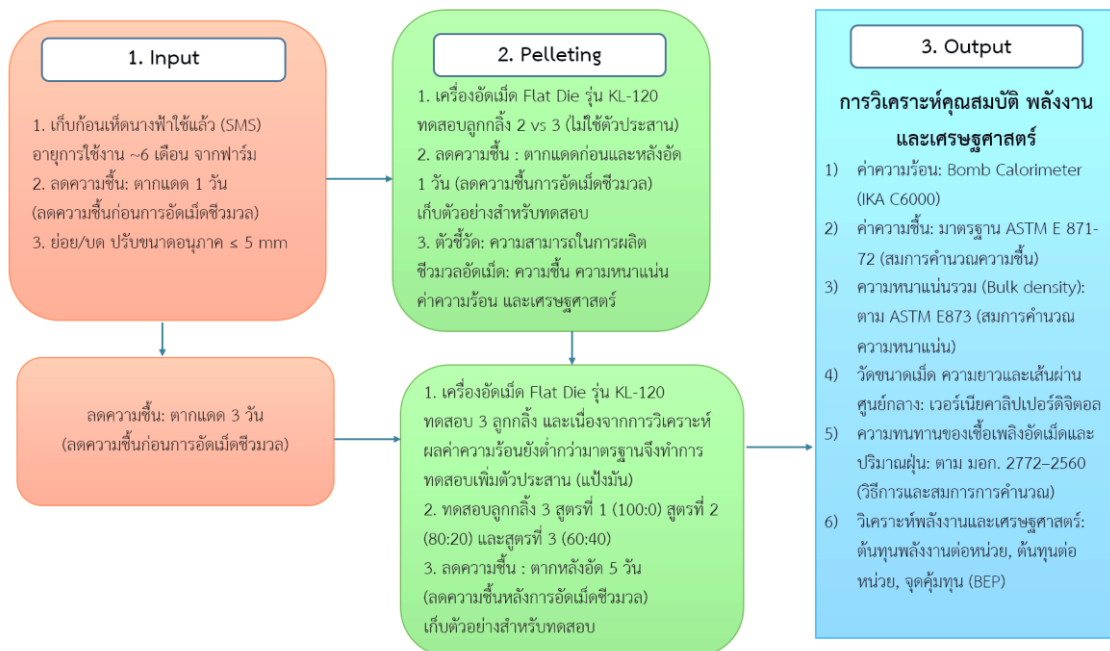
วัสดุที่ใช้ในการศึกษาคือก้อนเห็ดนางฟ้าใช้แล้ว (Spent Mushroom Substrate: SMS) ที่เก็บจากฟาร์มเพาะเห็ดหลังใช้งานครบ 6 เดือน [11,14] โดยใช้อุปกรณ์ ได้แก่ เครื่องย่อยวัตถุดิบ เครื่องผสมวัตถุดิบ และเครื่องอัดเม็ดชีวมวลแบบ Flat Die รุ่น KL-120 ขนาดเม็ด 8 mm ยาว 25.4 mm [5,10,13] การทดลองเริ่มจากการเปรียบเทียบเครื่องอัดเม็ดแบบ 2 และ 3 ลูกกลิ้ง โดยไม่ใช้ตัวประสาน ลดความชื้นของก้อนเห็ดด้วยการตากแดด 1 วัน ก่อนอัดเป็นเม็ด และตากแดดหลังอัดอีก 1 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สมรรถนะการผลิต ความชื้น ความหนาแน่น ค่าความร้อน และด้านเศรษฐศาสตร์ จากผลที่ได้เลือกใช้เครื่องอัดแบบ 3 ลูกกลิ้ง และเพิ่มเงื่อนไขการลดความชื้นก่อนอัดเม็ดด้วยการตากแดด 3 วัน พร้อมทดลองผสมก้อนเห็ดกับแป้งมันสำปะหลังเป็นตัวประสาน ทั้งหมด 3 สูตร ได้แก่ 100:0 80:20 และ 60:40 (ผงก้อนเห็ด: แป้งมัน) [9,14] หลังอัดเม็ดนำไปตากแดด 5 วัน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งในทุกเงื่อนไข แล้วบรรจุถุงซิปล็อค

เพื่อใช้วิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดต่อไป [5,13,15-16] ดังแสดงในภาพที่ 1-2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง ประกอบด้วย การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Bomb Calorimeter) รุ่น C6000 ยี่ห้อ IKA Global Standards Oxygen Bomb Calorimeter เวอร์เนียคาลิเปอร์ดิจิตอล (Digital Vernier Caliper) เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้สำหรับวัดความยาว (Length) เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ความหนาแน่น (Bulk density) สำหรับการหาค่าความหนาแน่นจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E873 ความชื้น ((Moisture content) จะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E 871-72 ความทนทานของเชื้อเพลิงอัดเม็ด (Durability)



ภาพที่ 1 เครื่องอัดเม็ดชีวมวล

และปริมาณฝุ่นละออง (Fines/Dust) จะเป็นไปตามที่มาตรฐานเชื้อเพลิงอัดเม็ด มอก. 2772-2560 รวมไปถึงการวิเคราะห์ต้นทุนทางพลังงานและต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ [7, 15-16] กระบวนการทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 โดอะแกรมกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงอัดเม็ดจากชีวมวล

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 1. การวิเคราะห์ผลการอัดเม็ดชีวมวลจากเครื่องอัดแบบ 2 และ 3 ลูกกลิ้ง

จากการทดสอบพบว่า ก้อนเห็ดนางฟ้าเก่า มีค่าความชื้นเริ่มต้นสูงมาก เท่ากับ  $52.58 \pm 2.85\%$  ความหนาแน่น  $280.98 \pm 10.81 \text{ kg/m}^3$  และค่าความร้อน  $11.46 \text{ MJ/kg}$  หลังผ่านการอัดเม็ดเป็นชีวมวลอัดเม็ดแล้ว พบว่าระบบอัดเม็ดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ให้ค่าความชื้น  $41.62 \pm 0.75\%$  ความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเป็น  $351.69 \pm 9.39 \text{ kg/m}^3$  และค่าความร้อน  $9.86 \text{ MJ/kg}$  ระบบอัดเม็ดแบบ 3 ลูกกลิ้ง ให้ค่าความชื้นลดลงเหลือ  $32.82 \pm 0.90\%$  ความหนาแน่นเพิ่มสูงสุดเป็น  $426.85 \pm 8.28 \text{ kg/m}^3$  และค่าความร้อน  $9.62 \text{ MJ/kg}$  ดังแสดงผลตามตารางที่ 1 ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า การอัดเม็ดสามารถเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในระบบ 3 ลูกกลิ้ง คุณสมบัติของก้อนเห็ดนางฟ้ามีค่าความชื้นสูง ก้อนเห็ดนางฟ้าเก่าเป็นวัสดุที่มีเส้นใยและโครงสร้างรูพรุน สามารถเก็บน้ำได้มาก [14] การอัดเม็ดสามารถลดความชื้นบางส่วนได้ แต่ยังคงเกินมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดสากล (ISO 17225-2 กำหนดไม่เกินประมาณ 10%) [4, 6] ดังนั้นจำเป็นต้องมีการลดความชื้นก่อนหรือหลังการอัดเม็ดเพื่อให้ได้คุณภาพเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น เพราะจะส่งผลต่อค่าพลังงานที่ต่ำลงซึ่งมีผลมาจากการที่ค่ามีความชื้นสูง [7] ผลต่อความหนาแน่น การอัดเม็ดช่วยเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุอย่างชัดเจน [6] โดยเฉพาะการใช้ระบบ 3 ลูกกลิ้งที่ให้แรงอัดสูง ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีความแน่นและคงรูปได้ดีกว่า [9] ทั้งนี้การเพิ่มความหนาแน่นการอัดเม็ดมักทำให้ความชื้นลดลง เพราะมีการให้ความร้อน แรงเฉือน การระเหยบางส่วน [5] ผลของการทดสอบการศึกษาการเปรียบเทียบจำนวนของลูกกลิ้ง 2 และ 3 ลูกกลิ้ง พบว่ามีประเด็นของค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงต่ำกว่าก้อนเชื้อเห็ดนางฟ้าเก่า ซึ่งเป็นประเด็นที่นำมาพิจารณาต่อ เนื่องจากการลดความชื้นก่อนอัดเม็ดเพียง 1 วัน ยังไม่เพียงพอที่จะเพิ่มค่าพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักที่ยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานของมอก. 2772-2560 [4]

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของก้อนเห็ดเก่า และเชื้อเพลิงอัดเม็ดที่ได้จาก 2 ลูกกลิ้ง และ 3 ลูกกลิ้ง

คุณสมบัติ	ก้อนเห็ดนางฟ้าเก่า	ชีวมวลอัดเม็ด 2 ลูกกลิ้ง	ชีวมวลอัดเม็ด 3 ลูกกลิ้ง
ค่าความชื้น (%)	$52.58 \pm 2.85$	$41.62 \pm 0.75$	$32.82 \pm 0.90$
ความหนาแน่น ( $\text{kg/m}^3$ )	$280.98 \pm 10.81$	$351.69 \pm 9.39$	$426.85 \pm 8.28$
ค่าความร้อน ( $\text{MJ/kg}$ )	11.46	9.86	9.62
ความสามารถในการผลิต ( $\text{kg/hr}$ )	-	52	80
ต้นทุนการผลิต ( $\text{฿/month}$ )	-	1,019	1,107
ระยะเวลาคืนทุน (month)	-	7.25	4.23

หมายเหตุ: การกำหนดราคาขายอยู่ที่ 5 ฿/kg

รวมถึงสาเหตุของการลดลงของค่าความร้อนอาจเกิดจากการสูญเสียสารระเหยในระหว่างกระบวนการอัดเม็ด [5,7] ลักษณะของวัตถุดิบก้อนเชื้อเห็ดมีส่วนที่แตกต่างกัน ลักษณะของเนื้อก้อนเห็ดด้านใน และลักษณะผิวของก้อนเห็ดด้านนอก ทำให้ชิ้นส่วนของวัสดุมีความเหนียว ความแข็งแตกต่างกัน และเกิดช่องว่างภายในของเม็ด ส่งผลให้ความหนาแน่นและพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักลดลง [6,9] การปรับปรุงสามารถทำได้โดย พัฒนากระบวนการต่อ โดยการคัดวัตถุดิบให้สม่ำเสมอ และตากหรือลดความชื้นก่อนอัดเม็ดเพิ่มขึ้น 3 วัน [4,14] ซึ่งจะช่วยให้เม็ดมีความหนาแน่นสูงขึ้น ลดช่องว่างภายใน และเพิ่มค่าความร้อนต่อกิโลกรัม แมต้นทุนรวมต่อเดือนของ 3 ลูกกลิ้งจะสูงกว่า 2 ลูกกลิ้ง เล็กน้อย แต่กำลังการผลิตที่สูงขึ้นทำให้ต้นทุนต่อกิโลกรัมลดลง และคืนทุนเร็วขึ้น [7] ซึ่งแสดงถึงการประหยัดต่อขนาดสำหรับการเพิ่ม

อัตราผลิต ถ้ากำลังไฟฟ้าต่อหน่วยกำลังเครื่องเท่ากัน แต่ผลิตได้มากขึ้น แสดงถึงพลังงานต่อกิโกรัมต่ำลง ในกรณี 3 ลูกกลิ้ง ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบด้านต้นทุนพลังงานและความคุ้มค่ามากกว่า

## 2. การประเมินคุณสมบัติเม็ดเชื้อเพลิง ต้นทุน และศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์

ผลการทดสอบคุณสมบัติเม็ดเชื้อเพลิงจากการผสมวัตถุดิบในสัดส่วน 100:0 80:20 และ 60:40 พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดเชื้อเพลิงทั้งแบบยาวและสั้นอยู่ในช่วง 6.8–7.1 mm ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐานเม็ดเชื้อเพลิงที่นิยมผลิต (6–8 mm) ส่วนความยาวของเม็ดเชื้อเพลิงมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยสูตร 60:40 มีค่าเฉลี่ยความยาวสูงที่สุดทั้งในเม็ดยาวและเม็ดสั้น ซึ่งอาจเกิดจากการไหลของวัตถุดิบที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างการอัด ส่งผลให้เม็ดมีการกระจายขนาดมากขึ้น สำหรับความหนาแน่นรวมพบว่าสูตร 60:40 มีค่าสูงสุด 529.5 kg/m<sup>3</sup> บ่งบอกถึงความแน่นและความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิง ในขณะที่สูตร 80:20 มีค่าต่ำสุด 471.9 kg/m<sup>3</sup> ซึ่งอาจมีผลต่อความแข็งแรงและการแตกหักในการขนส่ง ค่าความชื้นของทุกสูตรมีค่าต่ำมาก 0.07–0.21% ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (<10%) ซึ่งเป็นผลดีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ และที่สำคัญค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม โดยสูตร 60:40 ให้ค่าความร้อนสูงสุดที่ 12.74 MJ/kg แสดงถึงสมรรถนะด้านพลังงานที่ดีกว่าสูตรอื่น ๆ นอกจากนี้ค่าความคงทนของเม็ดเชื้อเพลิงทุกสูตรสูงกว่า 99% และค่าฝุ่นละอองอยู่ระหว่าง 1.30–1.45% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็งแรง เหมาะสมต่อการจัดเก็บและขนส่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของชีวมวลอัดเม็ดในสัดส่วนการผสม 100:0 80:20 และ 60:40 อยู่ในช่วงมาตรฐาน ISO 17829 และ DINplus [15-16] ซึ่งเหมาะสมต่อการป้อนเชื้อเพลิงเข้าสู่ระบบเผาไหม้อัตโนมัติได้ เนื่องจากมีขนาดไม่ยาวเกินไปจนเกิดการติดขัดในสกรูป้อนเชื้อเพลิง ความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงแตกต่างกัน โดยสูตร 60:40 มีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด ส่งผลให้มีการอัดตัวแน่นและเพิ่มค่าพลังงานต่อหน่วยปริมาตร ซึ่งเป็นข้อดีต่อการขนส่งและการเก็บรักษา ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการผสม ของตัวประสาน โดยสูตร 60:40 ให้ค่าความร้อนสูงสุด 12.74 MJ/kg รองลงมาคือ สูตร 80:20 เท่ากับ 11.15 MJ/kg และสูตร 100:0 เท่ากับ 9.42 MJ/kg ตามลำดับ



(a)



(b)



(c)

ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของชีวมวลอัดเม็ดที่ไม่มีตัวประสาน 100:0 (a) แบบมีตัวประสาน 80:20 (b) และ 60:40 (c)

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวลอัดเม็ดแบบไม่มีตัวประสานและแบบมีตัวประสาน

คุณสมบัติ	100:0 (a)	80:20 (b)	60:40 (c)
ค่าความชื้น (%)	0.07±0.08	0.10±0.04	0.21±0.07
ความหนาแน่นรวม (kg/m <sup>3</sup> )	500.7±33.0	471.9±16.5	529.5±10.8
ค่าความร้อน (MJ/kg)	9.42	11.15	12.74
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย $D_{50}$ (mm)	7.12±0.07	6.92±0.18	6.83±0.28

คุณสมบัติ	100:0 (a)	80:20 (b)	60:40 (c)
ความยาวเฉลี่ย $L_{ยาว}$ (mm)	21.21±1.72	20.41±3.46	24.04±2.05
เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย $D_{เส้น}$ (mm)	7.13±0.22	6.94±0.26	6.95±0.25
ความยาวเฉลี่ย $L_{สั้น}$ (mm)	7.13±1.60	8.33±1.61	9.55±1.72
ความคงทน (%)	99.32±0.02	99.64±0.06	99.57±0.04
ค่าฝุ่นละออง (%)	1.45±0.57	1.32±0.04	1.30±0.09

แสดงให้เห็นว่าการผสมวัสดุคิบบช่วยปรับปรุงสมบัติด้านพลังงานของเม็ดเชื้อเพลิงได้อย่างมีนัยสำคัญ การเพิ่มสัดส่วนการผสมจาก 100:0 ไปจนถึง 60:40 มีผลต่อการเพิ่มค่าความร้อนและความหนาแน่นรวม โดยสูตร 60:40 มีคุณสมบัติเด่นที่สุดในด้านค่าพลังงาน ความหนาแน่น และความแข็งแรงของเม็ดเชื้อเพลิง แม้จะมีข้อจำกัดเล็กน้อยในเรื่องความยาวเม็ดที่กระจายกว้าง แต่ยังคงเหมาะสมต่อการนำไปใช้ทั้งในเชิงอุตสาหกรรมและการใช้งานทั่วไป [4,5] ดังนั้นการเตรียมและวิเคราะห์ชีวมวลเป็นขั้นตอนพื้นฐานสำคัญ สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลและผลิตภัณฑ์ชีวภาพอื่น ๆ รวมถึงชีวมวลอัดเม็ด ทำให้กระบวนการมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและเหมาะสมกับการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม คุณภาพของวัสดุคิบบชีวมวลเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง การพัฒนาและปรับปรุงควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการนำไปผลิตเชื้อเพลิงทั้งชีวมวลที่เป็นเนื้อไม้และไม้ไผ่เนื้อไม้ได้ในอนาคต [5] การประเมินต้นทุนและศักยภาพทางเศรษฐศาสตร์ของเม็ดเชื้อเพลิงจากสัดส่วนการผสมวัสดุคิบบต่างกัน การวิเคราะห์การผลิตชีวมวลอัดเม็ดทั้ง 3 สูตร (สูตรที่ 1 100:0 สูตรที่ 2 80:20 และสูตรที่ 3 60:40) โดยผลิต 1,120 kg/month และต้นทุนแบริ่งมัน 32 B/kg [17] ส่วนราคาขายชีวมวลอัดเม็ดนั้นมีหลายราคา เช่น ชีวมวลไม้อัดเม็ด 4 B/kg แต่ขายเป็นกระสอบใหญ่ปริมาณ 1 ตัน [18] ในขณะที่ราคาปลีกในออนไลน์มีจำหน่ายที่ราคาประมาณ 40 B/kg [19] ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าสูตรที่ 1 มีต้นทุนต่ำที่สุด ทำให้กำไรสุทธิสูงสุดหากคิดในช่วงราคาขาย 5–8 B/kg (4,493–7,853 B/month) และคืนทุนเร็วที่สุด (0.20–0.35 year) ขณะที่สูตร 2 ขายตอนเมื่อราคาขาย 5–7 B/kg แต่สามารถทำกำไรได้ 735.4 B/month และคืนทุนประมาณ 2.15 year เมื่อราคาขาย 8 B/kg ส่วนสูตรที่ 3 มีต้นทุนสูงสุด ทำให้ขาดทุนทุกกรณีในช่วงราคาขาย 5–8 B/kg และไม่สามารถคืนทุนได้ จุดคุ้มทุน (BEP) ของสูตรที่ 1 ต่ำมากเพียง 17–38 kg/month ทำให้เริ่มคืนทุนได้ทันที ส่วนสูตรที่ 2 จุดคุ้มทุนเป็นลบที่ราคาขาย 5–7 B แต่ราคาขายที่ 8 B จุดคุ้มทุนการผลิตจะได้ประมาณ 204 kg/month (ประมาณ 18% ของกำลังผลิต) ส่วนสูตรที่ 3 ค่าจุดคุ้มทุนติดลบตลอด ทำให้ไม่คืนทุน กล่าวคือ สูตรที่ 1 เหมาะสมที่สุดสำหรับราคาขาย 5–8 B/kg สูตรที่ 2 ต้องราคาขายต้อง  $\geq 8$  B/kg จึงมีกำไร และสูตร 3 ต้องปรับสูตรหรือราคาขายสูงขึ้นเพื่อให้คืนทุนได้ [7,10] ผลเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า แม้การเพิ่มส่วนผสมของตัวประสาน (แบริ่งมันสำหรับหลัง) จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและพลังงานของเม็ดเชื้อเพลิง แต่กลับเพิ่มต้นทุนการผลิต ทำให้บางสูตรไม่เหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์เมื่อราคาขายต่ำ การวิเคราะห์ต้นทุนควบคู่ไปกับสมบัติทางกายภาพจึงมีความสำคัญ เพื่อให้สามารถเลือกสูตรผสมที่สมดุลทั้งด้าน คุณภาพเชื้อเพลิงชีวและความคุ้มค่าเศรษฐกิจ ดังนั้น การควบคุมคุณภาพวัสดุคิบบ การปรับสัดส่วนการผสม และการลดความชื้นก่อนอัดเม็ด ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงที่มีสมบัติทางกายภาพดี มีค่าพลังงานสูง และมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เหมาะสมต่อการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

## สรุปผลการวิจัย

การอัดเม็ดด้วยเครื่อง 3 ลูกกลิ้ง สามารถลดความชื้นและเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงได้ดีกว่าเครื่อง 2 ลูกกลิ้ง เม็ดเชื้อเพลิงมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.8–7.1 mm และความยาวกระจายตามสัดส่วนการผสม โดยสูตร 60:40 ให้ค่าความร้อนสูงสุด 12.74 MJ/kg ความหนาแน่นสูงสุด 529.5 kg/m<sup>3</sup> ความแข็งแรงและความคงทนทุกสูตร >99% และฝุ่นละออง 1.30–1.45% อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน การเพิ่มสัดส่วนตัวประสานช่วยปรับปรุงค่าพลังงานและความหนาแน่น แต่เม็ดมีความยาวกระจายมากขึ้นเล็กน้อย ด้านเศรษฐศาสตร์ สูตร 100:0 มีต้นทุนต่ำที่สุด กำไรสุทธิสูงสุด 4,493–7,853 ฿/month และคืนทุนเร็วที่สุด 0.20–0.35 year สูตร 80:20 ต้องราคาขาย ≥8 ฿/kg จึงคืนทุนได้ ส่วนสูตร 60:40 ขาดทุนทุกกรณี การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพด้วยตัวประสานช่วยเพิ่มพลังงานและความหนาแน่น แต่เพิ่มต้นทุน ทำให้บางสูตรไม่เหมาะสมในราคาขายต่ำ ข้อเสนอแนะคือ การควบคุมคุณภาพวัตถุดิบ การลดความชื้นของก้อนแห้งก่อนการนำไปอัดเม็ด และการควบคุมสัดส่วนตัวประสาน การปรับเปลี่ยนหรือเสริมวัตถุดิบพลังงานสูงมาเพิ่มในการผลิต เป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงคุณภาพสูงเชิงความร้อนและคุ้มค่าได้ในการพัฒนาให้เป็นไปตามมาตรฐานการผลิตเชื้อเพลิง สูตรที่ 1 และ 2 เหมาะที่สุดสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลแทนการซื้อขายไม้ฟืน ขณะที่สูตรที่ 3 อาจต้องปรับสูตรการผลิต ต้นทุน ราคาขาย รวมถึงการวิเคราะห์สมบัติและเศรษฐศาสตร์ควบคู่กันเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้การผลิตยั่งยืนและนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมที่เหมาะสมได้

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ ขอขอบคุณอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ และวิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2568). **สถานการณ์การผลิตพลังงานทั้งหมด**. สืบค้นจาก <https://www.dede.go.th>
- [2] กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ. (2568). **การส่งเสริมการใช้พลังงานชีวมวลในประเทศและต่างประเทศ**. สืบค้นจาก <https://www.ditp.go.th>
- [3]. นคร ทิพย์วาศ์. (2558). **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล** (พิมพ์ครั้งที่ 2). เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [4] Anukam, A., & Berghel, J. (2021). Biomass pretreatment and characterization: a review. **Biotechnological applications of biomass**, 1-17.
- [5] Picchio, R., Latterini, F., Venanzi, R., Stefanoni, W., Suardi, A., Tocci, D., & Pari, L. (2020). Pellet production from woody and non-woody feedstocks: A review on biomass quality evaluation. **Energies**, 13(11), 2937.
- [6] Senila, L., Tenu, I., Carlescu, P., Corduneanu, O. R., Dumitrachi, E. P., Kovacs, E., ... & Roman, C. (2020). Sustainable biomass pellets production using vineyard wastes. **Agriculture**, 10(11), 501.

- [7] Pantaleo, A., Villarini, M., Colantoni, A., Carlini, M., Santoro, F., & Rajabi Hamedani, S. (2020). Techno-Economic Modeling of Biomass Pellet Routes: Feasibility in Italy. *Energies*, 13(7), 1636. <https://doi.org/10.3390/en13071636>
- [8] da Silva, S. B., Arantes, M. D. C., de Andrade, J. K. B., Andrade, C. R., Carneiro, A. D. C. O., & de Paula Protásio, T. (2020). Influence of physical and chemical compositions on the properties and energy use of lignocellulosic biomass pellets in Brazil. *Renewable Energy*, 147, 1870-1879.
- [9] คีร์ต สร้อยทอง, ฉัตรเฉลิม แก้วชมภู, รังสิรินทร์ ณ รังษี, & จารุวัตร เจริญสุข. (2562). ศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงไม้ยางพาราและไม้ไผ่ทอรีไฟต์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33* (2-5 กรกฎาคม 2562, จังหวัดอุดรธานี).
- [10] Malik, B., Pirzadah, T. B., Islam, S. T., Tahir, I., Kumar, M., & Rehman, R. U. (2015). Biomass pellet technology: A green approach for sustainable development. *Agricultural Biomass Based Potential Materials*, 403-433.
- [11] กรมวิชาการเกษตร. (2568). *การผลิตเห็ดนางฟ้าหรือเห็ดอื่น ๆ*. สืบค้นจาก <https://www.doa.go.th>
- [12] Jiang, L., Yuan, X., Xiao, Z., Liang, J., Li, H., Cao, L., ... & Zeng, G. (2016). A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties. *Energy Conversion and Management*, 126, 509-515.
- [13] Mortadha, H., Kerrouchi, H. B., Al-Othman, A., & Tawalbeh, M. (2025). A comprehensive review of biomass pellets and their role in sustainable energy: production, properties, environment, economics, and logistics. *Waste and Biomass Valorization*, 1-33.
- [14] ครูปกรณ์ ละเอียดอ่อน. (2564). การประยุกต์ใช้ขานอ้อย ฟางข้าว และไมยราบยักษ์เป็นวัสดุเพาะเห็ดนางรมเทา. *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*, 39(1): 28-39.
- [15] International Organization for Standardization. (2015). *ISO 17829: Solid biofuels Determination of length and diameter of pellets*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [16] DIN CERTCO. (2015). *DINplus: Requirements for wood pellets for use in small furnaces*. Berlin, Germany: DIN CERTCO Gesellschaft für Konformitätsbewertung mbH.
- [17] Makro PRO. (2568). *เอโร แป้งมันสำปะหลัง 1 กก.* สืบค้นจาก <https://www.makro.pro/th/p/837684-6814743593155>
- [18] บริษัท เอ็น เอส เอ็นเนอร์ยี จำกัด. (2568). *ชีวมวลอัดเม็ดจากไม้ Wood Pellet - Big Bag*. สืบค้นจาก <https://www.nsethailand.com/product/187451-185316>
- [19] Shoopee. (2568). *Wood Pellet 10kg ซึ่เล็ยอัดเม็ด (Size 8 mm.)*. สืบค้นจาก [https://shopee.co.th/Wood-Pellet-10kg-\(Size8mm.\)-i.196077010.16791912617](https://shopee.co.th/Wood-Pellet-10kg-(Size8mm.)-i.196077010.16791912617)

## การควบคุมกระบวนการผลิตไบโอชาร์สำหรับชุมชนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Production Control of Biochar for Community using Microcontroller

นนุช ศรีเล็ก<sup>1</sup>, อนุพงษ์ สมพฤกษ์<sup>2</sup>, มิ่งขวัญ สมพฤกษ์<sup>1</sup>, วิลาสินี ศรีสุวรรณ<sup>1</sup>, ธนพล แสงสุวรรณ<sup>1</sup>, ชัชชัย วรพัฒน์<sup>2</sup>,  
วิภพ ใจแข็ง<sup>1</sup>, จรัญ คนแรง<sup>1</sup>, ประศักดิ์ งามสมภาค<sup>3</sup>, กมลชนก สว่างศิลป์<sup>3</sup>, กิตติภพ เพ็ชรเม็ด<sup>3</sup>, สิทธิกฤต เหล็กพูล<sup>1</sup>,  
นเรศ ใหญ่วงศ์<sup>1</sup>, และ ปรานต์ เมฆอากาศ<sup>1\*</sup>

Nongnoot Srilek<sup>1</sup>, Anuphong Somphruek<sup>2</sup>, Mingkwan Somphruek<sup>1</sup>, Wilasinee Srisuwan<sup>1</sup>, Tanaphon  
Saengsuwan<sup>1</sup>, Chatchai Vorapat<sup>2</sup>, Wipobh Jaikhang<sup>1</sup>, Jarun Khonrang<sup>1</sup>, Porrasak Ngamsompark<sup>3</sup>,  
Kamolchanok Sawangsill<sup>3</sup>, Kittiphop pedmed<sup>3</sup>, Sitthikrit Leckpool<sup>1</sup>, Naret Yaiwong<sup>1</sup>, and Pran Makarkard<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>โปรแกรมวิชาวิศวกรรมพลังงานและเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

<sup>2</sup>สาขาวิชาอุตสาหกรรมศิลป์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย

<sup>3</sup>สำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงราย ศูนย์ราชการกรมโยธาธิการ ตำบลริมกก อำเภอเมืองเชียงราย

<sup>1</sup>Energy Engineering and Electrical Technology Program, Faculty of Industrial Technology  
Chiang Rai Rajabhat University

<sup>2</sup>Industrial Arts Program, Faculty of Industrial Technology, Chiang Rai Rajabhat University

<sup>3</sup>Provincial Energy of Chiang Rai, Chiang Rai Province, Rimkok Sub-district, Muang Chiang Rai

<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 08 4617 9508. E-mail address: pran.mak@cru.ac.th

### Abstract

This study aims to ensure consistent quality control in biochar production and to enable reproducibility by integrating non-complex measurement technologies. These technologies are practical for community implementation and utilize microcontrollers for the application. The reaction temperature was 300 °C and 350 °C, and the reaction duration was 60 minutes. The 200-liter reactor was equipped with a temperature measurement system. Two types of biomasses were used for testing: bamboo (BB) and wasted coffee beans (WCB). The calorific value of bamboo biochar (B-BB) and wasted coffee bean biochar (B-WCB) were  $30.24 \pm 2.74$  and  $33.67 \pm 1.27$  MJ/kg, respectively. The mass yield of B-BB was 32.67 %, while B-WCB yielded 40.00 %. The energy yield was 53.70% and 68.36% for bamboo biochar (B-BB) and wasted coffee bean biochar (B-WCB), respectively. The energy densification ratio of B-WCB was 1.70, which was higher than that of 1.64 of B-BB.

**Keywords:** Biochar, Production control, Renewable energy, Microcontroller

## บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพในการผลิตไบโอชาร์ให้มีคุณภาพคงที่ สามารถทำซ้ำได้ โดยบูรณาการเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดที่ไม่ซับซ้อน ชุมชนสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาเป็น 300 °C และ 350 °C และระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณขนาด 200 ลิตร ติดตั้งระบบตรวจวัดอุณหภูมิ ชีวมวล 2 ชนิดใช้ในการทดสอบได้แก่ ไม้ไผ่ และเมล็ดกาแฟคั่วทั้ง พบว่า ค่าความร้อนของไบโอชาร์จากชีวมวลไม้ไผ่และเมล็ดกาแฟคั่วทั้งเป็น 30.24±2.74 MJ/kg และ 33.67±1.27 MJ/kg สัดส่วนมวลของไบโอชาร์ไม้ไผ่เป็น 32.67 % ส่วนไบโอชาร์จากเมล็ดกาแฟคั่วทั้งเป็น 40.00 % สัดส่วนพลังงานเป็น 53.70 และ 68.36 % สำหรับไบโอชาร์ไม้ไผ่ และไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคั่วทั้ง ตามลำดับ สัดส่วนความหนาแน่นพลังงานของเมล็ดกาแฟคั่วทั้งมีค่า 1.70 ซึ่งสูงกว่าไม้ไผ่ซึ่งมีค่าเป็น 1.64

**คำสำคัญ:** ไบโอชาร์ การควบคุมการผลิต พลังงานทดแทน ไมโครคอนโทรลเลอร์

## บทนำ

ชีวมวล (Biomass) หมายถึง วัสดุที่ได้จากธรรมชาติหรือสิ่งมีชีวิต เช่น พืช และสัตว์ ซึ่งมีวัฏจักรชีวิตที่สั้น เช่น ข้าว ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ยางพารา ปาล์ม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรต่าง ๆ เป็นต้น ชีวมวลเป็นองค์ประกอบเชิงซ้อนของ คาร์บอน-ไฮโดรเจน-ออกซิเจน (C-H-O complex constituents) หากพิจารณาในเส้นใยจะประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมีอย่างง่าย เขียนได้เป็น  $C(H_2O)_{0.83}$ ,  $CH_2O$  และ  $CH_{1.3}O_{0.32}$  [1] ตามลำดับ การปรับปรุงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติชีวมวลด้วยเทคโนโลยีทอริแฟกชัน (Torrefaction technology) ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 °C [2] อัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 °C ต่อนาที [3] ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ถึงหลายชั่วโมง ที่ความดันบรรยากาศ ปราศจากก๊าซออกซิเจน และอาจเกิดขึ้นในสถานะก๊าซตัวกลาง เช่น ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น กระบวนการทอริแฟกชัน เป็นกระบวนการที่ช่วยปรับปรุงคุณภาพของชีวมวล เช่น ค่าความร้อนสูงขึ้น ความชื้นลดลง รวมถึงทำให้สมรรถนะในการบดดียิ่งขึ้น เป็นต้น [4] ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ ประกอบด้วยของแข็ง ของเหลว และก๊าซ สำหรับของแข็งที่ได้จะเรียกว่า ไบโอชาร์ (Biochar) หรือ ถ่านชีวภาพ หรืออาจเรียกว่า ชีวมวลทอริไฟด์ (Torrefied biomass) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง สามารถนำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ด้านพลังงาน และด้านอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ด้านพลังงาน

จากการดำเนินงานร่วมกันระหว่างสำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงราย และ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ในโครงการตามแผนปฏิบัติการประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2567 ของจังหวัดเชียงราย ภายใต้กิจกรรมสัมมนาเชิงปฏิบัติการให้ความรู้ด้านชีวมวลจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ให้กับกลุ่มเป้าหมาย ได้แก่ ศูนย์การเรียนรู้การเพิ่มประสิทธิภาพการเกษตรชุมชน สหกรณ์การเกษตร กลุ่มวิสาหกิจชุมชน กลุ่มเกษตรกรแปลงใหญ่ ศูนย์การเรียนรู้ตำบล/องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น (อปท.) และประชาชนในพื้นที่จังหวัดเชียงราย จำนวน 10 ครั้ง ครั้งละ 40 คน ในปีถัดมาสำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงรายดำเนินโครงการตามแผนปฏิบัติการประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 ของกลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนบน 2 ในพื้นที่จังหวัดเชียงราย โครงการบูรณาการสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุข กิจกรรมหลักปลูกจิตสำนึกและสร้างเครือข่ายการมีส่วนร่วมในการป้องกันและแก้ปัญหาหมอกควันและไฟป่าของกลุ่มจังหวัดภาคเหนือตอนบน 2 กิจกรรมย่อย การพัฒนาองค์ความรู้ด้านการใช้เทคโนโลยีพลังงาน (เตาเผาถ่านไบโอชาร์) เพื่อลดปัญหาหมอกควันและเพิ่มประสิทธิภาพอาสาสมัครพลังงานชุมชนเพื่อการเรียนรู้เทคโนโลยีพลังงานชุมชน โดยจัดกิจกรรม อบรมการเพิ่มประสิทธิภาพอาสาสมัครพลังงานชุมชนเพื่อการเรียนรู้เทคโนโลยีพลังงานชุมชน ร่วมกับคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมต่อเนื่องเป็นปีที่ 2 ให้กับกลุ่มเป้าหมายเช่นเดียวกับในปีงบประมาณ 2567 แต่เป็นพื้นที่ใหม่ จำนวน 15 ครั้ง ครั้งละ 50

คน ระหว่างวันที่ 19 พฤษภาคม 2568 – 13 มิถุนายน 2568 โดยปีงบประมาณ 2567 (ปีที่ 1) ให้ความสำคัญกับการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพิ่มมูลค่าเป็นไบโอชาร์โดยใช้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว (Waste lubricating oil, WLO) [5] เป็นเชื้อเพลิง และขยายผลในปีงบประมาณ 2568 (ปีที่ 2) ซึ่งกลุ่มวิสาหกิจชุมชนหลายแห่งได้ให้ความสนใจเพิ่มมูลค่าเป็นผลิตภัณฑ์ของชุมชนเอง ได้แก่ ไบโอชาร์หรือถ่านชีวภาพเพื่อเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง ถ่านอัดแท่ง และไบโอชาร์เพื่องานวัสดุปรับปรุงดิน ซึ่งคณะผู้วิจัยเห็นว่า การทำผลิตภัณฑ์ควรมีการผลิตไบโอชาร์ที่มีคุณภาพคงที่ ทำซ้ำได้ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายมีคุณภาพคงที่ด้วย ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการควบคุมกระบวนการผลิตไบโอชาร์ให้มีคุณภาพคงที่โดยบูรณาการเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดที่ไม่ซับซ้อน ชุมชนสามารถนำไปปฏิบัติได้ อันเป็นแนวทางในการนำศาสตร์ด้านพลังงานและการตรวจวัดสู่การปฏิบัติ เพื่อให้ชุมชนอยู่ได้ด้วยตนเองอย่างยั่งยืน โดยใช้ทรัพยากรที่มีอย่างจำกัดให้คุ้มค่า การศึกษานี้ได้ใช้ชีวมวลจากชุมชนและถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนต้นแบบและถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับชุมชน

### วิธีการวิจัย

**วัสดุชีวมวล** ที่ใช้ในการทดสอบ 2 ชนิด คือ ไม้ไผ่เป็นวัสดุชีวมวลที่ได้จาก ตำบลจอมหมอกแก้ว อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย และเมล็ดกาแฟคั่วทั้ง จากอำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย ภาพที่ 1

ลดขนาดชีวมวลไม้ไผ่เป็นชิ้นขนาด 2 นิ้ว บรรจุลงในเตาปฏิกรณ์ทอริแฟกซ์ให้เหลือช่องว่างภายในเตาเล็กน้อย และสำหรับเมล็ดกาแฟคั่วทั้งให้เหลือช่องว่างภายในเตามากขึ้นเพื่อไม่ให้มีความหนาแน่นมากเกินไป



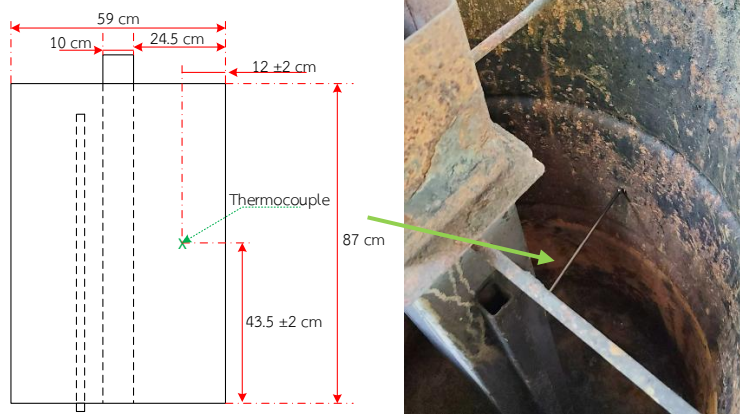
(ก) ไม้ไผ่



(ข) เมล็ดกาแฟคั่วทั้ง

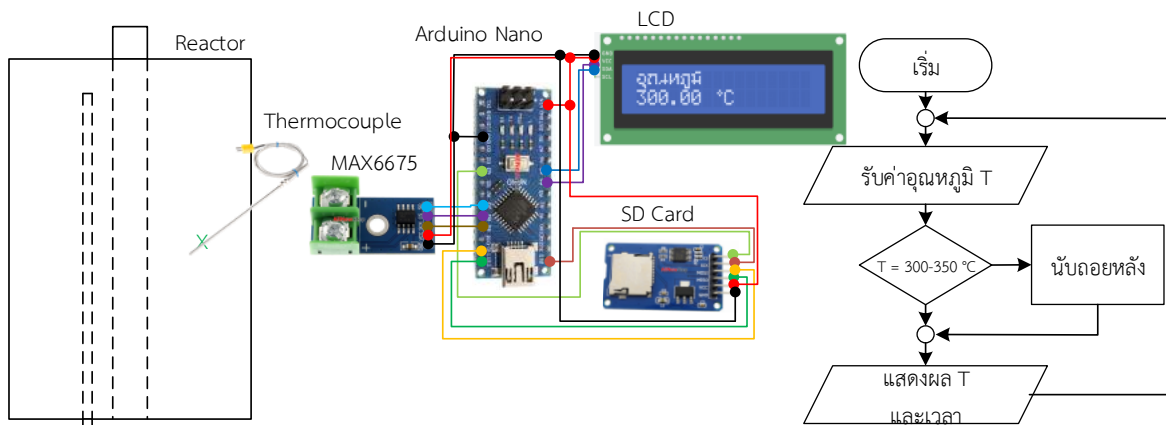
ภาพที่ 1 ชีวมวล (ก) ไม้ไผ่ และ (ข) เมล็ดกาแฟคั่วทั้ง

**เตาปฏิกรณ์ทอริแฟกซ์และการติดตั้งจุดตรวจวัด** เตาปฏิกรณ์ทอริแฟกซ์ในงานวิจัยนี้ใช้เตาปฏิกรณ์ที่ใช้วัสดุจากถังเหล็กทรงกระบอกขนาด 200 ลิตร โดยมีขนาดความกว้างเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 59 เซนติเมตร (cm) สูง 87 เซนติเมตร และทำการเจาะปล่องกลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร (4 นิ้ว) เพื่อใช้ในการให้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงด้านใต้เตาปฏิกรณ์ เปลวไฟจะผ่านปล่องไปยังด้านบนของปล่องและถ่ายเทความร้อนไปยังภายในเตาปฏิกรณ์ เตาปฏิกรณ์ด้านบนปิดสนิทเพื่อจำกัดอากาศ เมื่อชีวมวลได้รับความร้อนในอุณหภูมิที่มากกว่า 110 °C [2] จะเกิดการไล่ความชื้นจากวัสดุชีวมวล เมื่อความชื้นภายในวัสดุชีวมวลหมดไปเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิ 250-300 °C จะปลดปล่อยสารระเหย (Volatile matter) ออกมา เกิดก๊าซเชื้อเพลิงผสม (Syngas) ที่มีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงระบายออกมายังปล่องเล็กภายใน ซึ่งออกแบบให้ก๊าซต่าง ๆ ไหลลงมาด้านล่าง ซึ่งสามารถนำกลับมาเผาไหม้แทนเชื้อเพลิงหลักในการให้ความร้อนในตอนต้นได้ กำหนดอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา 300 °C [6] และระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที จุดตรวจวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-Type Thermocouple) ทำการติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างผิวของปล่องไอร้อนและผนังด้านข้างของเตาปฏิกรณ์ ความสูงจุดตรวจวัดโดยประมาณกึ่งหนึ่งของความสูงเตาปฏิกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ไตอะแกรมเตาปฏิกรณ์ขนาด 200 ลิตรและจุดตรวจวัดอุณหภูมิ

ส่วนประกอบและหลักการทำงานระบบตรวจวัดอุณหภูมิ ระบบตรวจวัดอุณหภูมิใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์ดูโนนาโน (Arduino Nano) เชื่อมต่อกับโมดูล MAX6675 ที่ใช้ในการขยายสัญญาณไฟฟ้าที่มาจากเทอร์มิคัปเปิลชนิดเคเข้ามายังไมโครคอนโทรลเลอร์ แสดงผลไปยังจอแสดงผล LCD20X4 เพื่อทำการแสดงอุณหภูมิและทำการบันทึกข้อมูลในทุก 10 วินาที (s) ไปยังหน่วยความจำผ่านโมดูล Micro SD Card ดังแสดงใน ภาพที่ 3 และภาพที่ 4



ภาพที่ 3 วงจรการเชื่อมต่อระบบตรวจวัดอุณหภูมิ



ภาพที่ 4 ระบบตรวจวัดอุณหภูมิ

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงพลังงาน ได้แก่ ค่าความร้อน (Calorific value) สัดส่วนมวล (Mass yield) สัดส่วนพลังงาน (Energy yield) และสัดส่วนความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification ratio)

ค่าความร้อน (Calorific value หรือ Heating value, MJ/kg) ทดสอบด้วยเครื่องมือ Parr Bomb calorimeters ดัง ภาพที่ 5 ค่าความร้อน (Calorific value) หรือ Heat of combustion หมายถึงปริมาณความร้อนต่อหน่วยมวล ตัวอย่างที่เผาไหม้ด้วยออกซิเจนในห้องเผาไหม้ที่ปริมาตรคงที่



ภาพที่ 5 การวัดค่าความร้อน

สัดส่วนมวล หรือ ผลได้เชิงมวล (Mass yield, MY%) หาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (1)

$$MY(\%) = \frac{TB}{B} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ MY = Mass yield หรือ สัดส่วนมวล หรือ ผลได้เชิงมวล (MY, %)  
 TB = Torrefied biomass หรือ ชีวมวลผ่านการทอริแฟกชัน หรือ ไบโอชาร์ (kg)  
 B = Biomass หรือ ชีวมวล (kg)

สัดส่วนพลังงาน หรือ ผลได้เชิงพลังงาน (Energy yield, %) หาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (2)

$$EY(\%) = \frac{HV_{TB}}{HV_B} \times MY \quad (2)$$

เมื่อ EY = Energy yield หรือ สัดส่วนมวล หรือ ผลได้เชิงมวล (MY, %)  
 HV<sub>TB</sub> = Heating value of torrefied biomass หรือ ค่าความร้อนของชีวมวลผ่านการทอริแฟกชัน หรือ ค่าความร้อนไบโอชาร์ (MJ/kg)  
 HV<sub>B</sub> = Heating value of biomass หรือ ค่าความร้อนของชีวมวล (MJ/kg)

สัดส่วนความหนาแน่นพลังงาน (Energy densification ratio, EDS) หาได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ (3)

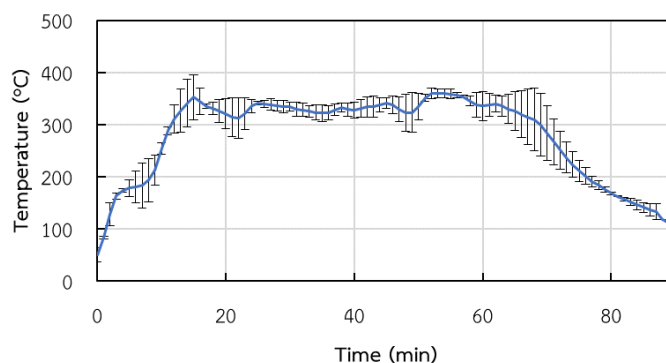
$$EDS = \frac{HV_{TB}}{HV_B} \quad (3)$$

เมื่อ EDS = Energy densification ratio หรือ สัดส่วนความหนาแน่นพลังงาน

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการดำเนินการของเตาปฏิกรณ์ทอริแฟกชัน ซึ่งทำการทดลองวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 2 ชนิดได้แก่ ไม้ไผ่ และเมล็ดกาแฟคั่วคั่ว โดยไม้ไผ่ทำการผลิตเป็นไบโอชาร์นั้นถูกลดขนาดประมาณ 2 นิ้ว บรรจุลงในเตาปฏิกรณ์ให้เหลือ

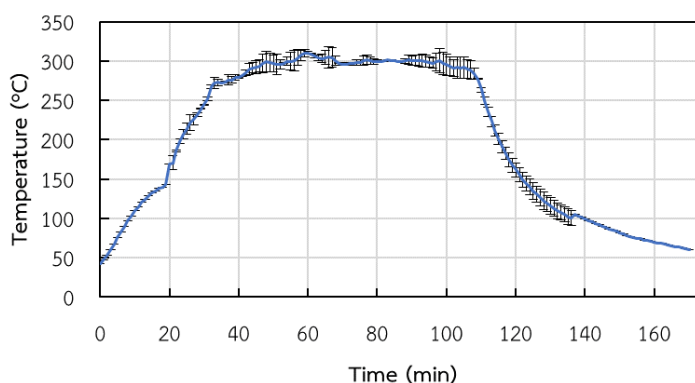
ช่องว่างไว้เล็กน้อย ขั้นตอนถัดไปให้ความร้อน ใช้การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ โดยให้ควบคุมเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ 350 °C ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที (min) ดังแสดงใน ภาพที่ 6



ภาพที่ 6 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ของชีวมวลไม้ไผ่

เมสส์คาแพท์ทำการผลิตเป็นไปโอซาร์นั้นใช้เมสส์คาแพคตัดทิ้งทำการบรรจุลงในเตาปฏิกรณ์บรรจุลงในเตาปฏิกรณ์ให้เหลือช่องว่างไว้เล็กน้อย ให้ความร้อนแล้วบันทึกข้อมูลเช่นเดียวกันไม้ไผ่ โดยให้ควบคุมอุณหภูมิเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ 300 °C ระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที (min) ดังแสดงใน ภาพที่ 7

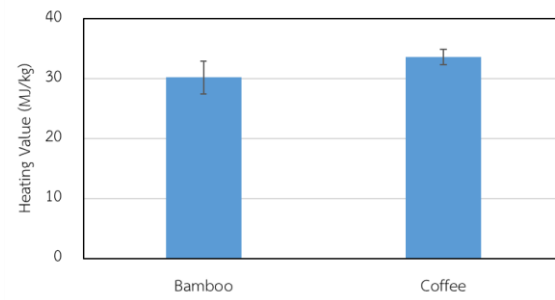
การตรวจวัดอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ซึ่งใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค (K-Type Thermocouple) ติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางระหว่างผิวของปล่องไอร้อนและผนังด้านข้างของเตาปฏิกรณ์ โดยอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์จะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อถึงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาที่กำหนด 300 °C และ 350 °C ผู้ปฏิบัติงานจะควบคุมอุณหภูมิโดยปรับเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าโดยการเพิ่ม ลด เชื้อเพลิงให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ  $300 \pm 10$  °C และ  $350 \pm 10$  °C เมื่อครบตามระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา 60 นาที จะหยุดเพิ่มเชื้อเพลิงและปล่อยให้เย็นลง



ภาพที่ 7 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเตาปฏิกรณ์ของชีวมวลเมสส์คาแพคตัดทิ้ง

ค่าความร้อน หรือ Heat of combustion ที่ได้จากเครื่องมือ Bomb calorimeter เป็นค่าความร้อนแบบกรอส (Gross calorific value หรือ Gross heat of combustion หรือ Higher heating value, HHV) โดยค่าความร้อนของชีวมวลและไปโอซาร์ที่ได้จากปฏิกรณ์ทอริแฟกซ์นี้ดัง ภาพที่ 8 พบว่า มีค่าความร้อนของไปโอซาร์ไม้ไผ่และเมสส์คาแพมีค่า












ภาพที่ 9 ค่าความร้อนของไบโอชาร์ไม้ไผ่และไบโอชาร์เมล็ดกาแฟคั่วทั้ง

ระบบตรวจวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งสำหรับเตาปฏิกรณ์นี้มีต้นทุนประมาณ 695 บาท ดังตารางที่ 2 ซึ่งวิสาหกิจชุมชนสามารถนำไปใช้เพื่อการควบคุมคุณภาพกระบวนการทอริแฟกชั่นเพื่อผลิตไบโอชาร์ได้

ตารางที่ 5 ต้นทุนอุปกรณ์การตรวจวัด

ส่วนประกอบ		ราคา (บาท)
1. Arduino NANO		85
2. LCD 20X4 I <sup>2</sup> C		135
3. MAX6675		110
4. K-type thermocouple		80
5. โมดูลบันทึกข้อมูลลง Micro SD Card		35
6. Adapter 5 V + mini USB		150
7. กล่องกันน้ำเอนกประสงค์ 4"X6"		100
รวม		695

## สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหากระบวนการควบคุมคุณภาพในการผลิตไบโอชาร์ให้มีคุณภาพคงที่ ทำซ้ำได้ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายมีคุณภาพคงที่ด้วย โดยบูรณาการเทคโนโลยีด้านการตรวจวัดที่ไม่ซับซ้อน ต้นทุนไม่สูง ชุมชนสามารถนำไปปฏิบัติได้จริง อันเป็นแนวทางในการนำศาสตร์ด้านพลังงานและการตรวจวัดสู่การปฏิบัติ เพื่อให้ชุมชนอยู่ได้ด้วยตนเองอย่างยั่งยืน โดยใช้ทรัพยากรที่มีอย่างจำกัด ให้มีความคุ้มค่า โดยใช้ชีวมวลจากชุมชน 2 ชนิด คือ ไม้ไผ่และเมล็ดกาแฟคั่วทั้ง โดยใช้เตาปฏิกรณ์ทอริแฟกชันที่ชุมชนสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งพบว่าการผลิตไบโอชาร์จากเมล็ดกาแฟคั่วทั้ง และไม้ไผ่ ใช้อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาที่ 300 °C และ 350 °C ตามลำดับ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที สามารถผลิตไบโอชาร์ที่มีคุณสมบัติด้านความร้อนสอดคล้องกับการศึกษาอื่น ๆ และการศึกษานี้ได้นำสู่กระบวนการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนต้นแบบและถ่ายทอดองค์ความรู้ให้กับชุมชนต่าง ๆ การศึกษานี้สามารถสร้างความเชื่อมั่นในคุณภาพไบโอชาร์ที่คงที่ วิสาหกิจชุมชนบางแห่งได้ขยายผลในการยกระดับการตลาดถ่านอัดแท่ง และขยายผลนำไปใช้ในงานวัสดุปรับปรุงดินต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่สนับสนุนงบประมาณเข้าร่วมประชุมวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย อนุเคราะห์เครื่องมือการหาค่าความร้อน สำนักงานพลังงานจังหวัดเชียงราย สนับสนุนงบประมาณการจัดกิจกรรมสัมมนาเชิงปฏิบัติการ และ วิสาหกิจชุมชนเกษตรสร้างสรรค์ 99 อำเภอแม่ลาว จังหวัดเชียงราย สนับสนุนสถานที่ในการถ่ายทอดเทคโนโลยี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Andreas Hornung. (2014). **Transformation of Biomass - Theory to Practice**. John Wiley & Sons, Ltd. doi:10.1002/9781118693643
- [2] Bimal Acharya, Idris Sule, และ Animesh Dutta. (2012). **A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing**. Biomass Conversion and Biorefinery, 2, 349-369.
- [3] Emanuela Peduzzi, Guillaume Boissonnet, Geert Haarlemmer, Capucine Dupont, และ François Maréchal. (2014). **Torrefaction modelling for lignocellulosic biomass conversion process**. Energy, 70, 58-67.
- [4] Esteves Bruno, Sen Umut, และ Pereira Helena. (2023). **Influence of Chemical Composition on Heating Value of Biomass: A Review and Bibliometric Analysis**. Energies, 16(10), 4226.
- [5] Prabir Basu. (2010). **Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design**. UK: Elsevier Inc.
- [6] Yang Wei, Wu Shengji, Wang Hui, Ma Pengyu, Shimanouchi Toshiniri, Kimura Yuktaka, และ Zhou Jie. (2017). **Effect of Wet and Dry Torrefaction Process on Fuel Properties of Solid Fuels Derived from Bamboo and Japanese Cedar**. BioResources, 12(4), 8629-8640.
- [7] ปรานต์ เมฆอากาศ, วิลาลินี ศรีสุวรรณ, สิทธิกฤต เหล็กพูล, จริญญา คนแรง, ปรศักดิ์ งามสมภาค, กมลชนก สว่างศิลป์, . . . นงนุช ศรีเล็ก. (2567). **การศึกษาการไพโรไลซิสชีวมวลเพื่อผลิตไบโอชาร์ด้วยน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว**. ประชุมวิชาการวิจัยและนวัตกรรมสร้างสรรค์ ครั้งที่ 10. เชียงใหม่ ประเทศไทย.



วารสารวิชาการ  
**พลังงานทดแทน  
สู่ชุมชน**



**J-REC**

JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY  
FOR COMMUNITY



**สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย**

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110 อีเมล : [trecs2012@gmail.com](mailto:trecs2012@gmail.com) โทร : 02 549 3497