



# วารสารวิชาการ พลังงานทดแทน สู่ชุมชน

ปีที่ 7 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน-ธันวาคม 2567

J-REC BY TRECA



**J-REC**  
**JOURNAL OF  
RENEWABLE ENERGY  
FOR COMMUNITY**

ISSN 2773-8639 (Online)

วารสารวิชาการ

**พลังงานทดแทน  
สู่ชุมชน  
J-REC**

**JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY  
FOR COMMUNITY**



# วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานวิชาการและงานวิจัยด้านพลังงานหมุนเวียนในเครือข่ายพลังงานของประเทศไทย
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ทั้งภาคทฤษฎีและปฏิบัติและผลงานวิชาการใหม่ๆ พลังงานทดแทนระหว่างนักวิจัยและผู้ใช้ทั้งภาครัฐและเอกชน
3. เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนคณาจารย์บุคลากรทางการศึกษานักศึกษาและผู้ที่มีสนใจทำงานด้านพลังงานหมุนเวียนที่เป็นประโยชน์ต่อสังคมและประเทศชาติ
4. เพื่อเป็นแหล่งรวมรายงานผลงานวิจัยและบทความวิชาการที่มีคุณภาพและมีคุณค่าของพลังงานทดแทนสู่การใช้งานจริงเพื่อความยั่งยืนด้านพลังงานของประเทศ



เจ้าของลิขสิทธิ์ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

ที่ตั้งสมาคมฯ ศูนย์วิจัยและบริการด้านพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 ม.1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง ปทุมธานี 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 และกันยายน-ธันวาคม ติดต่อขอรับเป็นสมาชิกได้โดยตรงที่ สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

# วัตถุประสงค์สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชน แห่งประเทศไทย

1. เพื่อส่งเสริมความร่วมมือทางด้านวิชาการระหว่างภาครัฐภาคเอกชนและภาคประชาชนในด้านพลังงานทดแทนการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อมเพื่อชุมชนต่างๆทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ
2. เพื่อจัดหาทุนเพื่อสนับสนุนการศึกษาวิจัยฝึกอบรมการดำเนินโครงการด้านพลังงานทดแทนให้กับภาครัฐภาคเอกชนและภาคประชาชนจากแหล่งทุนทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ
3. ไม่ดำเนินการส่งเสริมและพัฒนากิจกรรมใดๆ ที่มุ่งไปสู่การดำเนินงานทางการเมือง
4. ไม่ดำเนินการให้มีการจัดตั้งโต๊ะบิลเลียดหรือกระทำการอันผิดต่อขนบธรรมเนียมและจารีตประเพณีที่ดีของสังคมไทย
5. เพื่อส่งเสริมให้สมาคมมีรายได้จากโควต้าสลากกินแบ่งรัฐบาลหรือสลากการกุศลของรัฐบาลที่พิมพ์ออกจำหน่ายเพื่อนำรายได้มาใช้ดำเนินการตามวัตถุประสงค์ของสมาคม
6. เพื่อส่งไม้กิจกรรมทางสังคมด้านสาธารณะประโยชน์ด้านต่างๆรวมถึงกิจกรรมเพื่อการจัดสวัสดิการให้กับสมาชิก

## หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันทั่วโลกต้องเผชิญกับปัญหาด้านพลังงานที่รุนแรงกว่าในอดีตมากอันเนื่องมาจากความต้องการใช้พลังงานและราคาพลังงานเชื้อเพลิงที่มีการปรับตัวอยู่ในระดับสูงอย่างต่อเนื่อง ผลกระทบที่สำคัญจากปัญหาดังกล่าวคือ ความมั่นคงทางด้านการจัดหาพลังงานขณะเดียวกันการใช้พลังงานที่สูงขึ้นก็ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจนเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (GreenHouseEffects) ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง สภาพภูมิอากาศโลกอย่างรุนแรง ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาด้านพลังงานดังกล่าวจึงได้มีแนวคิดในการส่งเสริมและสนับสนุนให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนกันมากขึ้นโดยเฉพาะพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีการนำมาใช้เป็นระยะเวลายาวนานไม่ก่อให้เกิดมลพิษแสงอาทิตย์อ่อนเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนอีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีวันหมดสิ้น

## จุดมุ่งหมายสำคัญ

การทำงานกันทั้งส่วนภาครัฐและประชาชนในการใช้พลังงานทดแทน การอนุรักษ์พลังงานและใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมของชุมชนในประเทศไทย ตลอดจนการศึกษาวิจัย ดำเนินการหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมต่างๆมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อความเหมาะสมและให้เกิดความยั่งยืนของชุมชนและประชาชนในประเทศไทย



# วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน

## JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY FOR COMMUNITY

### คณะกรรมการจัดทำวารสารวิชาการสู่ชุมชน

#### คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

#### กองบรรณาธิการ

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วิรัช โยชนรินทร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รองบรรณาธิการ

นายกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (รศ.ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ)

ผู้ช่วยกองบรรณาธิการ

กรรมการสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (ผศ.ดร.จิรวดี ผลประเสริฐ)

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช

รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล

รองศาสตราจารย์ ดร. ประพิศาริ ธนารักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรพงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ศรีประภาคา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วารุณี อริยะวิริยะนันท์

ดร.ชานนท์ บุญมีพิพิธ

#### เลขานุการ

นางสาวกิ่งกานต์ พันธวานิชย์

#### ผู้ช่วยเลขานุการ

นางสาวธัญญลักษณ์ ชิดโคกกรวด

## รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์

รองศาสตราจารย์ ดร. วิรัชย์ โยชนรินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร. ธนิต เรืองรุ่งชัยกุล

รองศาสตราจารย์ ดร. พิสิษฐ์ มณีโชติ

รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัช สุริวงษ์

รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพธารี ธนารักษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปรีชา ศรีประภาคาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรวิศ สอนสารี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัทธยา ทองสาร

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฤทธิ์ชาติ อากกล้า

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรจิตต์ เศรษฐพรศักดิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรวดี ผลประเสริฐ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิกราน หอมดวง

ว่าที่ร้อยโท ดร.ศักษ์ชัย เพชรสุวรรณ

ดร.ณัฐวุฒิ ขาวสะอาด

ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา

ดร.พัชรินทร์ เยวรัตน์

ดร.พัฒนโชค สายอ้าย

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร

มหาวิทยาลัยนเรศวร

มหาวิทยาลัยนเรศวร

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

มหาวิทยาลัยนเรศวร

มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด

มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยนเรศวร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

ศูนย์เทคโนโลยีพลังงานแห่งชาติ สวทช.

มหาวิทยาลัยนเรศวร

# บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชนโดยความร่วมมือของเครือข่ายสมาชิกสมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย (TRECA) ซึ่งเป็นฉบับที่ 2 ของปีที่ 7 และนับเป็นการตีพิมพ์วารสารในรูปแบบออนไลน์ปีที่ 4 ISSN 2773-8639 (Online) วารสารฉบับนี้เป็นเนื้อหาของบทความทางวิชาการที่มุ่งสร้างผลงานที่เด่นทางด้านวิจัยและมุ่งสู่การใช้งานจริงซึ่งได้รวบรวมความรู้ทางวิชาการที่สามารถถ่ายทอดให้แก่สังคมทางด้านพลังงานทดแทนในสาขาต่างๆ เพื่อทำให้วารสารนี้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนวิชาการและแนวความคิดในแวดวงวิชาการทั้งผู้วิจัยและผู้ใช้ อันเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการสร้างผลงานทางวิชาการสู่ชุมชนและสังคม โดยดำรงไว้ซึ่งความเป็นตัวตนทางวิชาการของผู้เขียนและวัตถุประสงค์ของสมาคมฯ ที่ทรงคุณค่าบทความในวารสารฉบับนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 10 บทความ ซึ่งในแต่ละบทความมีความเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันของรูปแบบพลังงานทดแทนต่างๆ ครอบคลุมกระบวนการในการวิจัยและการศึกษาสู่ภาคการใช้งาน ผู้อ่านจะได้รับความรู้ที่หลากหลายจากการอ่านวารสารฉบับนี้ในแนวทางที่จะจุดประกายความคิดหรือการต่อยอดความคิดทางด้านพลังงานทดแทนสาขาต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอ่านอย่างวิพากษ์และตั้งคำถามเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนในทางวิชาการอย่างสร้างสรรค์ อันจะช่วยให้ความรู้และความคิดเดิมถูกแพร่ขยายออกไปได้อย่างกว้างขวาง อีกทั้งให้วารสารฉบับนี้เป็นแหล่งความรู้ในทุกระดับภาคส่วนของทุกคนในสังคมไทยโดยไม่ยึดติดตนเองและอยู่กับความรู้ความคิดเพียงบางมุมบางด้านเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้ผู้เขียนและผู้อ่านมีความเป็นตัวตนทางวิชาการที่พร้อมจะพัฒนาตนเองอยู่เสมออย่างไม่หยุดนิ่ง และท้ายที่สุดแล้วความรู้ความคิดที่ถูกต่อขยายออกไปนั้นก็จักนำไปสู่การปรับเปลี่ยนกระบวนการทัศนคติทางความคิดของสังคมและชุมชนอย่างกว้างขวาง อันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางวิชาการของสังคมเพื่อความยั่งยืนของประเทศชาติ กองบรรณาธิการขอขอบพระคุณคณะทำงานทุกท่าน คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิชาการและทุกภาคส่วนที่ได้สละเวลาอันมีค่าอ่านบทความ เพื่อความถูกต้องทางวิชาการ และเป็นวารสารที่ดีต่อการพัฒนาประเทศ ทั้งนี้หากผู้อ่านมีความประสงค์จะตีพิมพ์บทความสามารถขอความกรุณาโปรดจัดเตรียมต้นฉบับให้เป็นไปตามรูปแบบของวารสารและส่งบทความทางออนไลน์ที่ [www.reca.or.th/jrec](http://www.reca.or.th/jrec) เพื่อการพิจารณาและตีพิมพ์ในวารสารฉบับต่อไป

กองบรรณาธิการ

# สารบัญ

## นวัตกรรมด้านพลังงาน

การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับหวดนึ่งข้าวเหนียว ....	8
การปรับปรุงสมบัติถ่านชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับกากไซยาโนแบคทีเรีย ภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส.....	27
การจำลองเชิงตัวเลขรูปแบบและตำแหน่งการไหลของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก.....	36
การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซิงข้าวโพด ที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์.....	49

## พลังงานเพื่อการเกษตร

การประยุกต์ใช้น้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติกสำหรับ เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็ก.....	62
--	----

## พลังงานเพื่อชุมชน

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ระบบทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อการแปรรูป น้ำพริกหนุ่มในระดับวิสาหกิจชุมชน.....	74
การพัฒนาสถานการณ์จำลองสำหรับภาคพลังงานและสิ่งแวดล้อมของเมืองอัจฉริยะ เทศบาลนครเชียงใหม่ด้วยกระบวนการมีส่วนร่วมทางสังคม.....	85

## การบริหารจัดการพลังงานชุมชน

การประเมินศักยภาพและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของโรงไฟฟ้า พลังงานเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก: กรณีศึกษาเทศบาลตำบลลานกระบือ.....	99
ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงาน ตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน.....	114
การพัฒนาแผนยุทธศาสตร์สำหรับเทศบาลนครเชียงใหม่เมืองอัจฉริยะเพื่อส่งเสริม การดำเนินโครงการริเริ่มด้านพลังงานอัจฉริยะและสิ่งแวดล้อม.....	130

การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเทอร์โมไซฟอนกับหวดนึ่งข้าวเหนียว  
Enhancing Glutinous Rice Steaming Efficiency Using a Thermosyphon Heat Exchanger

นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์<sup>1,2</sup>, สมพร หงษ์กง<sup>1,2</sup>, เรืองชัย ตาแสง<sup>2</sup>, สยาม ประจูดทะศรี<sup>2</sup>  
ธวัช กองสี<sup>1,2</sup>, เขตพงศ์ อินทรชัยศรี<sup>1</sup>, ไพโรทูล ไชยวงศา<sup>1</sup>, นิรุต อ่อนสลุง<sup>1,2</sup>, สัมหวัจน์ ทองแดง<sup>1,2</sup>  
กฤษฎากร บุคดาจันทร์<sup>3</sup>, ธัญญา ประเมษฐานวัฒน์<sup>3</sup>, ศรัณย์ บุญโน<sup>1</sup>, สุรเชษฐ สีสำนาน<sup>1,2\*</sup>

Namphon Pipatpaiboon<sup>1,2</sup>, Somporn Hongkong<sup>1,2</sup>, Ruangchai Tasang<sup>2</sup>, Siam Prajudthasri<sup>2</sup>  
Thawach Kongsee<sup>1,2</sup>, Khetpong Inchairi<sup>1</sup>, Praitoon Chaiwongsa<sup>1</sup>, Nirut Onsalung<sup>1</sup>  
Sanhawat Thongdaeng<sup>1,2</sup>, Khridsadakhon Booddachan<sup>3</sup>, Thanya Parametthanuwat<sup>3</sup>  
Saran boonno<sup>1</sup>, Surachet Sichamnan<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร  
199 หมู่ 3 ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

<sup>2</sup>หน่วยวิจัยวิศวกรรมพลังงานความร้อนและการกลั่น (ในกระบวนการและอุปกรณ์ที่ออกแบบ)  
คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร  
199 หมู่ 3 ตำบลพังโคน อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรเพื่ออุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตปทุมธานี  
129 หมู่ 21 ตำบลเนินหอม อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 25230

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industry and Technology  
Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon Campus,

199 Village No. 3, Phang Khon Subdistrict, Phang Khon District, Sakon Nakhon Province 47160

<sup>2</sup>Thermal Energy and Distillation Engineering Research Unit (in the process and equipment designed)  
Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan, Sakonnakhon Campus  
199 Village No. 3, Phang Khon Subdistrict, Phang Khon District, Sakon Nakhon Province 47160

<sup>3</sup>Department of Agricultural Engineering for Industry, Faculty of Industrial Technology and Management  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Prachinburi Campus  
129 Village No. 21, Noen Hom Subdistrict, Mueang District, Prachinburi Province 25230

\*<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 096-8092531. E-mail address: surachet.si@muti.ac.th

Received: 26 July 2024, Revised: 3 October 2024, Accepted: 10 November 2024, Published online: 30 December 2024

### Abstract

This research focuses on the application of a thermosyphon (TPCT) system integrated with a steamer designed for steaming glutinous rice. The study investigated the effects of various factors, including

fuel consumption rates of liquefied petroleum gas (LPG) at 0.50, 1.00, and 1.50 kg/h, and steaming durations of 5.00, 10.00, 15.00, and 20.00 minutes, using the RD6 variety of glutinous rice. The TPCT system installed on the steamer consisted of six pipes made from grade 304 stainless steel, each with a diameter of 21.34 mm and a total length of 200.00 mm. These pipes were divided into an evaporation section and a condensing section, each measuring 100.00 mm in length. Water was used as the working fluid, filled to 50% of the evaporation section's volume. The study found that at a fuel consumption rate of 1.50 kg/h and a steaming time of 15.00 minutes, the use of the TPCT system resulted in an average condensate pipe surface temperature of 130.00 °C, the highest observed in all test conditions. This facilitated effective heat transfer to the glutinous rice, achieving efficiency of 76.61%, which was 15.52% higher than the steamer without TPCT integration. The TPCT system also reduced the steaming time by 2.50 minutes, leading to a decrease in LPG fuel costs of 0.71 baht per use. If used twice daily, this translates to an annual cost saving of 518.30 THB. The texture of the steamed glutinous rice was evaluated using a Texture Analyzer to simulate chewing. The glutinous rice steamed with the TPCT system at a fuel consumption rate of 1.50 kg/h and a steaming time of 15.00 minutes had an average chewing force of 379.00 N, compared to 329.00 N without the TPCT system. The standard deviations were 9.91% and 8.39%, respectively. An economic analysis of the system revealed a payback period of 2.60 years, demonstrating the feasibility and cost-effectiveness of the TPCT-enhanced steaming system.

**Keywords:** Thermosyphon, Sticky Rice, Sticky Rice Steaming Basket, Heat transfer

#### บทคัดย่อ

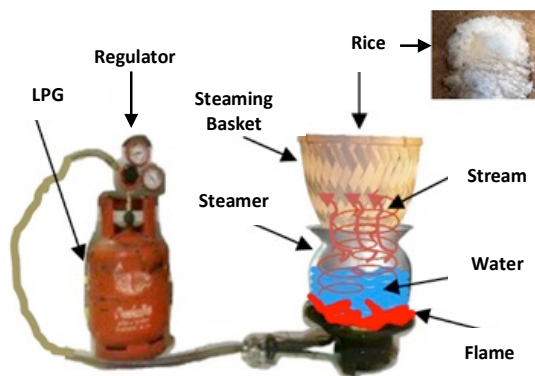
งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) กับหวด ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์เพื่อใช้กับกระบวนการนึ่งข้าวเหนียวสำหรับตัวแปรทดสอบในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย อัตราการป้อนสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (LPG) 0.50, 1.00 และ 1.50 kg/hr เวลาในการนึ่งข้าวเหนียว 5.00, 10.00, 15.00 และ 20.00 minutes ใช้ข้าวเหนียวพันธุ์ กข.6 และ TPCT ที่ติดตั้งเข้ากับหวดทำจากท่อสแตนเลสเกรด 304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 21.34 mm จำนวน 6 ท่อ ความยาวรวมของแต่ละท่อ 200.00 mm แบ่งออกเป็นส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นอย่างละ 100.00 mm ใช้น้ำเป็นสารทำงานที่อัตราการเติม 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย จากการทดสอบพบว่า อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/h ที่เวลาในการนึ่ง 15.00 minutes ที่กรณีประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนกับหวดนึ่งข้าวเหนียว มีอุณหภูมิที่ผิวท่อส่วนควบแน่นเฉลี่ยตลอดการทดสอบ 130.00 °C ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าในทุก ๆ กรณีทดสอบ นำมาซึ่งการถ่ายเทความร้อนสู่ข้าวเหนียวในหวดขณะนึ่งได้ดี โดยมีประสิทธิผลเท่ากับ 76.61% สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ TPCT ถึง 15.52% สามารถลดระยะเวลาความสุกของข้าวเหนียวลงได้ 2.50 minutes นำมาซึ่งการลดค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงแก๊ส LPG ต่อครั้ง 0.71 bath ถ้านึ่งวันละ 2 ครั้ง จะลดค่าใช้จ่าย 518.30 bath/year นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของข้าวเหนียวด้วยวิธี Texture analyzer ด้วยการจำลองการเคี้ยวสำหรับข้าวเหนียวที่นึ่งจากการประยุกต์ใช้ TPCT ที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.5 kg/hr ที่เวลาในการนึ่ง 15 minutes และที่ไม่มีการติดตั้ง TPCT ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยของแรงเคี้ยวเท่ากับ 379.00 N, 329.00 N และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 9.91%, 8.39% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในกรณีทดสอบดังกล่าวนี้จะมีจุดคืนทุนเท่ากับ 2.60 years

**คำสำคัญ:** เทอร์โมไซฟอน ข้าวเหนียว หวดนึ่งข้าวเหนียว การถ่ายเทความร้อน

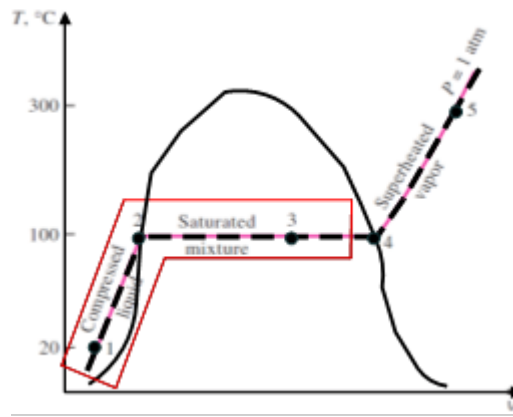


## บทนำ

ข้าวถือเป็นแหล่งอาหารที่ให้พลังงานด้านคาร์โบไฮเดรตเป็นหลักหรือเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการแปรรูปไปสู่รูปแบบของอาหารต่าง ๆ ที่ทั่วโลกให้ความสำคัญ ยิ่งโดยเฉพาะภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงประเทศไทยนั้น ถือเป็นแหล่งปลูกข้าวรายใหญ่ที่มีความสำคัญต่อการเป็นแหล่งอาหารของประชากรทั่วโลก ซึ่งในส่วนของประเทศไทยนั้นโดยเฉพาะภาคอีสานหรือภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีการบริโภคข้าวเหนียวเป็นอาหารหลัก และอาชีพส่วนใหญ่ของประชากรในแถบนี้มีอาชีพเป็นเกษตรกร ทำนาทำสวน ปลูกผัก และเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น ข้าวเหนียวถือเป็นอาหารที่ต้องบริโภคและมีตลอดสามมื้อของการรับประทานอาหาร ซึ่งในกระบวนการและขั้นตอนของการนึ่งข้าวเหนียว ต้องมีการใช้เชื้อเพลิง พลังงานเข้ามาสำหรับกระบวนการ เพื่อทำให้น้ำที่บรรจุอยู่ในหม้อหนึ่งมีการเดือดและกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำจะลอยขึ้น เคลื่อนที่ผ่านข้าวเหนียวที่บรรจุอยู่ในหวดจนข้าวเหนียวสุก สำหรับขั้นตอนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการนึ่งข้าวเหนียวดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงขั้นตอนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการนึ่งข้าวเหนียว จะเห็นว่าแหล่งให้พลังงานนั้นคือการใช้แก๊สหุงต้ม ให้พลังงานความร้อนผ่านเปลวไฟและไปต้มน้ำที่บรรจุอยู่ภายในหม้อหนึ่งจนน้ำเดือดกลายเป็นไอน้ำ ไอน้ำก็จะเคลื่อนที่และลอยตัวผ่านข้าวเหนียวที่บรรจุอยู่ในหวดจนข้าวเหนียวสุกพร้อมรับประทาน ข้าวเหนียวสุกจะมีลักษณะของเม็ดข้าวที่ใสขึ้นเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่า ซึ่งจะเห็นได้ว่านอกจากมีแหล่งให้พลังงานความร้อนแล้วนั้น ยังพบว่ามีแหล่งรับพลังงานความร้อนนั้นคือข้าวเหนียวที่จะนึ่งในหวด ด้วยลักษณะของกระบวนการในการนึ่งข้าวเหนียวจะมีความแตกต่างของอุณหภูมิจากสองแหล่งพลังงาน เพราะฉะนั้นถ้าสามารถนำความร้อนจากน้ำร้อนและไอน้ำที่อยู่ในหม้อหนึ่งที่สถานะของเหลวไม่อึดตัวไปจนถึงสถานะของผสมระหว่างของเหลวและไอน้ำในเส้นกรอบสีแดงดังแสดงในรูปที่ 2 ที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสถานะและสถานะของน้ำที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร (v) กับอุณหภูมิ (T) เพราะฉะนั้นถ้ามีการถ่ายเทความร้อนไปสู่ข้าวเหนียวที่อยู่ในหวดได้เร็วขึ้นเท่าไร ย่อมส่งผลต่อการใช้ระยะเวลาที่สั้นลงในการทำให้ข้าวเหนียวสุก นำมาซึ่งการใช้พลังงานที่น้อยลงและค่าใช้จ่ายในการซื้อแก๊สหุงต้ม ประกอบกับทางผู้วิจัยได้มีการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่งที่เรียกว่า เทอร์โมไซฟอนแบบปิดสองสถานะ (Two Phase Closed Thermosyphon, (TPCT) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า “เทอร์โมไซฟอน” โดยมีแนวคิดที่นำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน [1-3] ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการหรืออุปกรณ์ของการนึ่งข้าวเหนียวที่เรียกว่า “หวด”



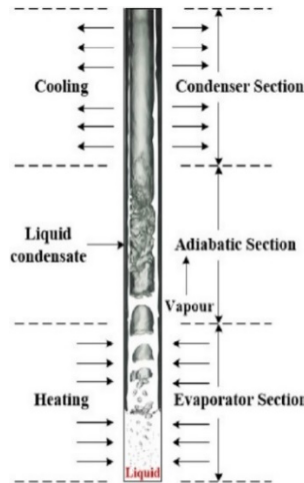
รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนในการนึ่งข้าวเหนียว



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงสถานะและสถานะของน้ำที่ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ( $v$ ) กับอุณหภูมิ ( $T$ ) [4-5]

เทอร์โมไซฟอน (TPCT) คืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดหนึ่ง มีลักษณะที่แบ่งออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย ส่วนทำระเหย (Evaporation section) ส่วนกั้นความร้อน (Adiabatic section) และส่วนควบแน่น (Condenser section) ตามลำดับ วัสดุที่ใช้ในการทำเทอร์โมไซฟอนมีหลายประเภท เช่น ท่อทองแดง ท่อสแตนเลส และท่อเหล็ก เป็นต้น มีการเชื่อมปิดหัวท้ายของท่อดังกล่าว โดยภายในท่อถูกทำให้เป็นสุญญากาศพร้อมๆ กับการบรรจุสารทำงาน (Working fluids) เข้าไปภายในท่อดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งแสดงลักษณะและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน (TPCT) เมื่อส่วนทำระเหยได้รับความร้อน (Heating) จากแหล่งให้ความร้อน (Heat source) ความร้อนจะถ่ายเทสู่ผนังท่อและซึมผ่านผนังท่อสู่สารทำงานที่บรรจุอยู่ภายในส่วนทำระเหย ส่งผลให้สารทำงานที่อยู่ในสถานะของเหลวอ้อมตัว เกิดการเดือดโดยเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ ไอจะลอยผ่านส่วนกั้นความร้อนและเข้าสู่ส่วนควบแน่นตามลำดับ เกิดการระบายความร้อนให้กับแหล่งรับความร้อน (Heat sink) ที่บริเวณส่วนควบแน่น และสารทำงานที่อยู่ในสถานะไอจะเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลลงตามขอบด้านในของผนังท่อด้วยน้ำหนักที่มีมากขึ้นจากสถานะที่เป็นของเหลว ก็จะไหลลงสู่ส่วนทำระเหยด้วยอาศัยหลักการของแรงโน้มถ่วงของโลก [1-3]

ด้วยวัตถุประสงค์และความต้องการที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น นำมาซึ่งแนวคิดที่จะนำความร้อนจากแหล่งให้ความร้อนที่สะสมในน้ำร้อนและไอน้ำที่อยู่ในหม้อน้ำ ให้สามารถถ่ายเทความร้อนไปสู่ข้าวสารที่อยู่ในหวดได้เร็วขึ้น จะลดการใช้พลังงานในขั้นตอนของการนึ่งข้าวเหนียวที่จะนำมาซึ่งข้อดีหลายๆ อย่าง เช่น ค่าใช้จ่ายในการซื้อแก๊สหุงต้มที่ลดลง, มีเงินเก็บสะสมที่มากขึ้นและรายจ่ายที่ลดลงสำหรับครอบครัว, การใช้ระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียวที่ลดลง รวมถึงการกระจายความร้อนที่ทั่วถึงในทุกส่วนพื้นที่ของข้าวสารที่สัมผัสกันที่บรรจุอยู่ในหวด เพราะฉะนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอน (TPCT) กับหวดนึ่งข้าวเหนียว โดยเป็นในลักษณะของการออกแบบและสร้างเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งเข้ากับหวดนึ่งข้าว เพื่อทดสอบหาสถานะที่เหมาะสมต่อการประยุกต์ใช้งาน รวมถึงการได้ผลลัพธ์การสุกของข้าวเหนียวที่มีความเหมาะสมกับการรับประทานด้วยการวิเคราะห์ด้วยรูปแบบ Texture analyzer พร้อม ๆ กับการเปรียบเทียบการสุกของข้าวเหนียวด้วยกับการสุ่มซื้อข้าวเหนียวจากร้านอาหารทั่ว ๆ ไปและนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Texture analyzer เช่นเดียวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบในครั้งนี้



รูปที่ 3 ลักษณะและหลักการทำงานของเทอร์โมไซฟอน (TPCT) [1]

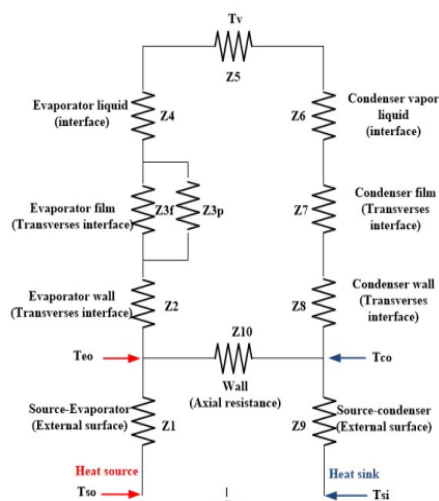
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนของเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ตามทฤษฎี ( $Q_{\text{Theoretical}}$ , (W)) จะสามารถคำนวณค่าการถ่ายเทความร้อนได้จากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างเครื่องส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ( $\Delta T$ , ( $^{\circ}\text{C}$ )) เทียบกับความต้านทานความร้อนรวม ( $Z_{\text{total}}$ , ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )) ดังแสดงในสมการ (1) และ (2) [6]

$$Q_{\text{Theoretical}} = \Delta T / Z_{\text{total}} \quad (1)$$

$$\Delta T = (T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{out}}) - (T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{in}}) / \ln \frac{(T_{h,\text{in}} - T_{c,\text{out}})}{(T_{h,\text{out}} - T_{c,\text{in}})} \quad (2)$$

กำหนดให้  $Z_{\text{total}}$  คือความต้านทานความร้อนรวมที่ส่วนต่างๆ ของเทอร์โมไซฟอน ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) แบ่งได้เป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้  $Z_1, Z_9$  เป็นความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งทำความร้อนและพื้นผิวท่อภายนอกที่ส่วนทำระเหยและความต้านทานความร้อนระหว่างแหล่งตัวรับความร้อนและพื้นผิวท่อด้านนอกของส่วนควบแน่น ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) ตามลำดับ  $Z_2, Z_8$  เป็นความต้านทานการนำความร้อนที่ไหลผ่านผนังท่อบริเวณส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่น ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) ตามลำดับ  $Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_{10}$  เป็นความต้านทานความร้อนของชิ้นงานของเหลวภายในท่อของสหรน้ำเดือดและฟิล์ม ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ) ซึ่งสามารถพิจารณาจากแบบจำลองความต้านทานความร้อนรวมของเทอร์โมไซฟอนดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แบบจำลองความต้านทานความร้อนรวมเทอร์โมไซฟอน (TPCT) [7, 8]

สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอน (TPCT) กับหวดหนึ่งข้าวเหนียวนั้น จะคำนวณได้ด้วยลักษณะของการพาความร้อนและการนำความร้อนดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ ซึ่งการนำความร้อนนั้นจะพิจารณาที่ส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอนสู่เมล็ดข้าวเหนียว ซึ่งถูกวางและเรียงตัวแบบแนบแน่นและติดกัน พร้อม ๆ กันกับการนำความร้อนระหว่างตัวเมล็ดข้าวสู่เมล็ดข้าว

$$Q_{\text{sticky rice}} = m_{\text{sticky rice}} c_{p,\text{sticky rice}} (T_{\text{paddy,intial}} - T_{\text{paddy,final}}) \quad (3)$$

โดยที่  $Q_{\text{sticky rice}}$  คือพลังงานความร้อนที่ใช้ทำให้ข้าวเหนียวสุก (kJ)  
 $m_{\text{sticky rice}}$  คือมวลของข้าวเหนียว (kg)  
 $c_{p,\text{sticky rice}}$  คือค่าความจุความร้อนของข้าวเหนียว (kJ/kg · °C)  
 $T_{\text{paddy,intial}}, T_{\text{paddy,final}}$  คืออุณหภูมิข้าวเหนียวก่อนนึ่งสุกและหลังนึ่งสุก (°C)  
 สำหรับพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำเดือด ที่บรรจุในส่วนของหม้อหนึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$Q_{\text{boiling water}} = m_{\text{water}} L_{\text{water}} \quad (4)$$

โดยที่  $Q_{\text{boiling water}}$  คือปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำเดือด (kJ)  
 $m_{\text{water}}$  คือมวลของน้ำที่บรรจุในหม้อหนึ่ง (kg)  
 $L_{\text{water}}$  คือความร้อนแฝงจำเพาะของน้ำที่กลายเป็นไอ (kJ/kg)

ประสิทธิภาพของเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ที่ติดตั้งเข้าไปในหวดหนึ่งข้าวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (5) และ (6)

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{sticky rice}}}{Q_{\text{boiling water}}} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{sticky rice}}}{C_{\min} (T_{\text{evaporation section}} - T_{\text{condenser section}})}$$

$$C_{\min} = (\dot{m}C_p)_{\min} \quad (6)$$

กำหนด  $\varepsilon$  คือประสิทธิภาพของเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งเข้าไปในหวดหนึ่งข้าว  
 $C_{\min}$  คือ การคำนวณระหว่าง  $C_c = \dot{m}_c C_{p,c}$  และ  $C_h = \dot{m}_h C_{p,h}$   
 $Q_{\text{sticky rice}}$  คือปริมาณความร้อนที่ใช้ทำให้ข้าวเหนียวสุก (kJ)  
 $Q_{\text{boiling water}}$  คือปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้น้ำเดือด (kJ)  
 $\dot{m}_c = \dot{m}_{\text{sticky rice}}$  คือมวลของข้าวเหนียวต่อระยะเวลาที่ใช้ในการนึ่งที่ส่วนของหวด (kg/s)  
 $C_{p,c}$  คือความจุความร้อนจำเพาะของข้าวเหนียวที่นึ่งบริเวณหวด (kJ/kg · °C)  
 $\dot{m}_h = \dot{m}_{\text{water}}$  คือมวลของน้ำต่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้น้ำเดือดที่ส่วนของหม้อหนึ่ง (kg/s)  
 $C_{p,h}$  คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำที่บริเวณหม้อหนึ่ง (kJ/kg · °C)

สำหรับการวิเคราะห์หาค่าการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงหรือพลังงาน (แก๊สหุงต้ม (LPG)) เป็นถึงขนาดคำนวณได้จากสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$\text{Fuel consumption/minute} = \frac{\text{Fuel consumption}}{\text{Test time in each case}} \quad (7)$$

$$\text{Energy consumption when rice is cooked} = \text{Rice cooking time} \times \frac{\text{Fuel consumption}}{\text{(minute)}} \quad (8)$$

โดยที่ Fuel consumption/minute คือ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อนาที, (kg/min)  
 Fuel consumption คือ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง, (kg)  
 Test time in each case คือ เวลาทดสอบในแต่ละกรณีทดสอบ, (min)  
 Energy consumption when rice is cooked คือ การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงตอนที่ข้าวสุก, (kg)  
 Rice cooking time คือ เวลาที่ข้าวสุก, (min)

สำหรับกรณีการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 5 แสดงลักษณะและโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียว ซึ่งการติดตั้งและจัดเรียงท่อดังแสดงในรูปที่ 5 ในส่วนของรูป (A) และ (B) ตามลำดับ โดยที่ระยะของ  $S_D, A_i, A_o$  สามารถคำนวณได้จากสมการ (9) – (11) ตามลำดับ [8]

$$S_D = \left[ S_L^2 + \left( \frac{S_T}{2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$A_i = S_T L \quad (10)$$

$$A_o = (S_o - D_o) L \quad (11)$$

โดยที่  $S_T$  คือระยะตามขวาง (m)  
 $S_L$  คือระยะพตามยาว (m)  
 $S_D$  คือระยะพิทช์แนวทแยง (m)  
 L คือความยาวของท่อ (m)

#### การติดตั้งชุดทดสอบและขั้นตอนการทดสอบ

จากรูปที่ 5 แสดงลักษณะและโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียวโดยใช้เทอร์โมไซฟอน TPCT จำนวน 6 ท่อประกอบขึ้นเป็นชุด ซึ่ง TPCT ทำจากสแตนเลสสตีล (SS304) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.70 mm มีความยาวรวมของท่อ 200.00 mm แบ่งเป็นส่วนทำระเหยและส่วนควบแน่นอย่างละ 100.00 mm โดยแต่ละท่อนั้นมีการเชื่อมปิดหัวท้าย และที่ส่วนปลายอีกด้านเชื่อมต่อเข้ากับท่อเติมสารทำงาน ดังแสดงรูปที่ 5 ของรูป (A) สำหรับลักษณะของแผ่นพื้น (PLATE) ที่จะติดตั้งเข้ากับ TPCT ทำมาจาก SS304 มีความหนา 1.00 mm มีขนาดรูที่เป็นลักษณะของตาข่ายขนาดรูละ 3.00 mm เส้นผ่าศูนย์กลาง 170.00 mm มีระยะของ  $S_L, S_T, A_i, S_D$  และ  $A_D$  เท่ากับ 42.50, 42.50, 42.50, 34.66 และ 34.66 mm ตามลำดับ

ในส่วนของการติดตั้งและประกอบชุดเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียวดังแสดงในรูปที่ 6 เริ่มด้วยการทำสุญญากาศภายในชุดเทอร์โมไซฟอนดังแสดงในรูปที่ 6 ในส่วนของรูป (A) โดยต่อร่วมเข้ากับชุดเติมสารทำงานและปั๊มทำสุญญากาศ หลังจากทำสุญญากาศภายในท่อเสร็จ ก็เติมสารทำงานผ่านชุดเติมสารทำงานผ่านท่อแก้ว สารทำงานเติม 50% ของปริมาตรส่วนทำระเหย โดยใช้สารทำงานที่เป็นน้ำ ด้วยคุณสมบัติของสารทำงานที่เป็นน้ำนั้น จะมีอุณหภูมิของสารทำงาน

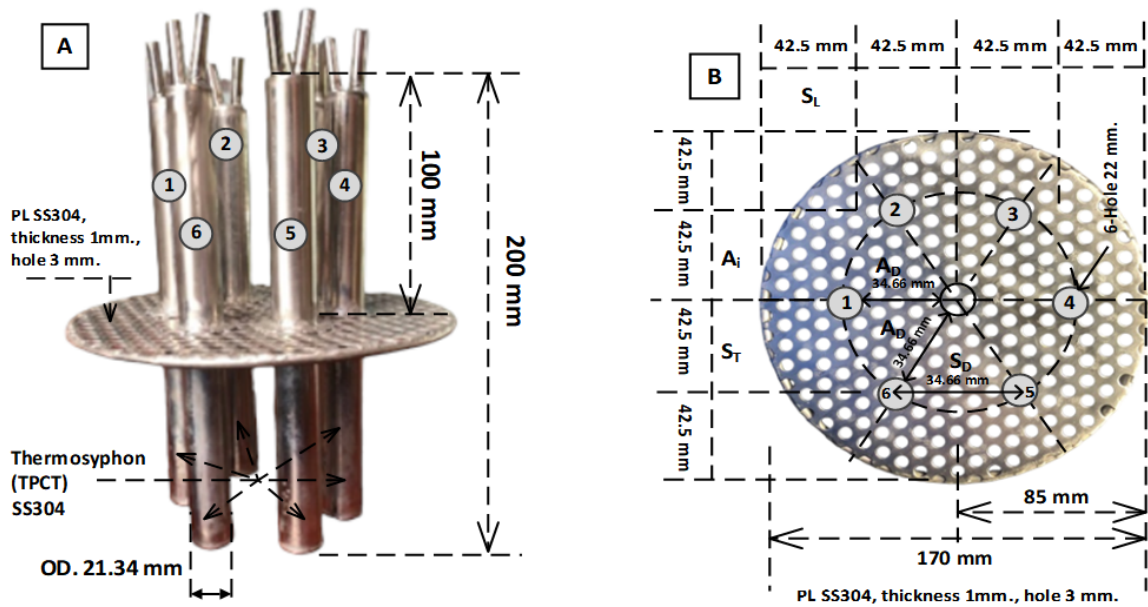
อยู่ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (Low temperature range) อยู่ในช่วง 200.00 ถึง 550.00 (K, Kelvin) ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิของสารทำงานการใช้งานเทอร์โมไซฟอนจะอยู่ในช่วงนี้เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งน้ำเป็นสารทำงานที่มีความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอและความตึงผิวสูงตลอดจนมีความปลอดภัยขณะใช้งาน [6]

และทำการเชื่อมปิดดังแสดงในรูปที่ 6 ในส่วนของรูป (B) โดยมีการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K เซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ สามารถวัดได้ - 200.00 °C -1372.00 °C ความคลาดเคลื่อน  $\pm 1.50$  °C ที่ส่วนควมแน่นบริเวณผิวท่อ 6 จุด ส่วนทำระเหยบริเวณส่วนทำระเหยผิวท่อ 6 จุด น้ำในส่วนของหม้อหนึ่ง 1 จุด และที่บริเวณเนื้อข้าวเหนียวในหวด 6 จุด และอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม 1 จุด ต่อเข้ากับเครื่องวัดอุณหภูมิหรือ Datalogger ยี่ห้อ Lutron BTM-4208SD สำหรับใช้แสดงผลอุณหภูมิตามจุดที่ต้องการ และบันทึกค่าอุณหภูมิ และทำการประกอบชุดเทอร์โมไซฟอนเข้ากับหวดดังแสดงในรูปที่ 6 ในส่วนของรูป (C), (D) และ (E) ตามลำดับ

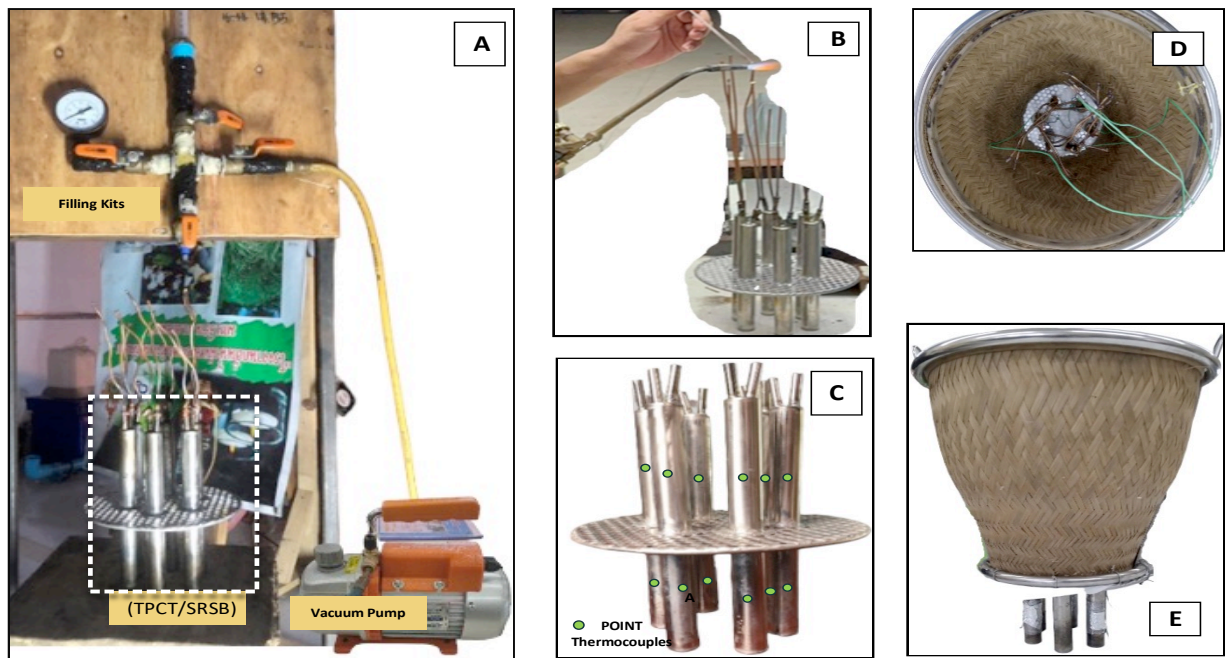
ขั้นตอนการทดสอบงานวิจัยนี้มีการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียว ซึ่งในแต่ละกรณีทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับหวดหนึ่งข้าวที่ไม่มีการติดตั้งเทอร์โมไซฟอน สำหรับตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้ดังแสดงในตารางที่ 1 สำหรับขั้นตอนการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7

- 1) นำข้าวเหนียวปริมาณ 1 kg มาแช่น้ำด้วยปริมาณน้ำที่เท่ากัน และระยะเวลาที่เท่า ๆ กันในทุกกรณีทดสอบ ทั้งในกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ดังแสดงในรูปที่ 7
- 2) นำข้าวที่ได้จากการแช่น้ำ ยกออกจากน้ำและนำไปใส่ในหวด ทั้งในกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ดังแสดงในรูปที่ 7 ในส่วนของรูป (A)
- 3) นำหวดที่บรรจุข้าวเหนียวพร้อมวางบนหม้อ โดยมีการใส่น้ำในหม้อหนึ่งปริมาณที่เท่ากันในทุก ๆ กรณีทดสอบ หลังจากนั้นนำไปวางบนหัวเตาแก๊สที่มีการต่อสายแก๊สเข้ากับถังเชื้อเพลิงแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 7 ในส่วนของรูป (B) และ (C) ทั้งในกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT)
- 4) ต่อสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับดาต้าล็อกเกอร์ ทำการปิดฝาหวด หลังจากนั้นทำการเปิดแก๊ส จุดไฟ ปรับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง โดยต้องทำการชั่งแก๊สก่อนและหลังการทดสอบในทุก ๆ กรณี และทดสอบตามระยะระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียวให้ครบ ตามขอบเขตและตัวแปรที่ทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1 พร้อม ๆ กับบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิผ่านดาต้าล็อกเกอร์ตั้งแต่แรกเริ่มของการทดสอบ รวมถึงการใช้อุปกรณ์การยิง Thermal Scanned วัดค่าสิ้นความร้อนทั้งในกรณีที่ตั้งและไม่ได้ติดตั้งชุด TPCT ดังแสดงในรูปที่ 7 ในส่วนของรูป (D) สำหรับข้าวสารที่ใช้ในการทดสอบสำหรับงานวิจัยนี้คือข้าวเหนียวสายพันธุ์ กข6 เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวหอม ที่ไว ต่อช่วงแสงดังแสดงในรูปที่ 8 เป็นพันธุ์ข้าวเหนียวที่ได้รับการปรับปรุงจากพันธุ์จากข้าวเจ้าพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่มีการคัดเลือกทั้งข้าวสายพันธุ์ดีทั้งสายพันธุ์ของข้าวเจ้าและข้าวเหนียว มีการปลูกทดสอบผลผลิตระหว่างสถานีและในนาของเกษตรกรในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือระหว่างปี พ.ศ. 2514-2519 ผล ปรากฏว่า สายพันธุ์ KDML 105'65-G3U-68-254 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ข้าวเหนียว นุ่ม มีกลิ่นหอม ทนแล้ง และมีคุณภาพการหุงต้มรับประทานดี ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุด กรมวิชาการเกษตรจึงพิจารณาให้เป็นพันธุ์รับรองและแนะนำให้เกษตรกรปลูก [9, 10]

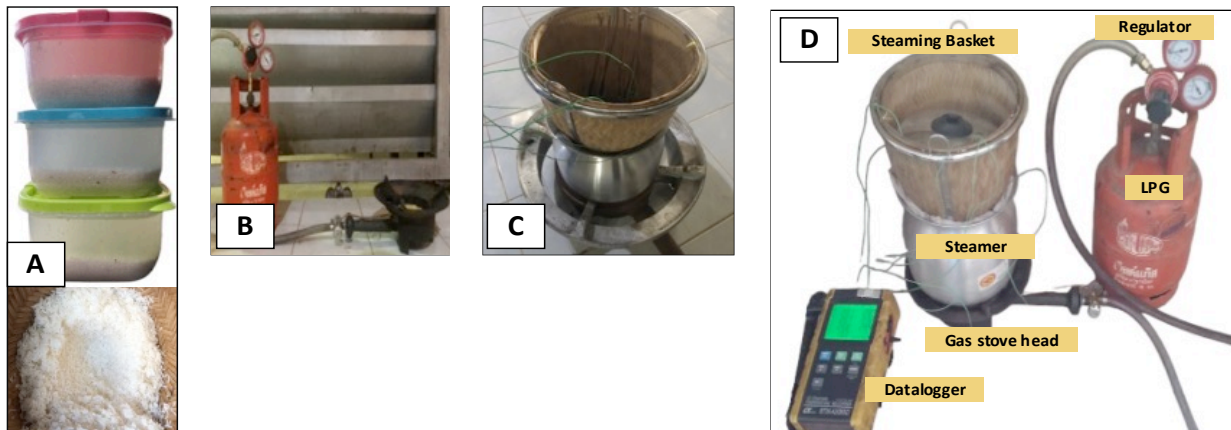




รูปที่ 5 ลักษณะและโครงสร้างของเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียว  
 (A) การติดตั้ง TPCT เข้ากับแผ่น PLATE (B) และ (B) ลักษณะ PLATE ที่จะติดตั้งเข้ากับ TPCT



รูปที่ 6 แสดงการติดตั้งและประกอบชุดเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียว



รูปที่ 7 การติดตั้งชุดทดสอบและการทดสอบ

ตารางที่ 1 ขอบเขตงานวิจัยและตัวแปรที่ทดสอบ

ประเภท	รายละเอียด
ตัวแปรต้น	-ระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียว (minutes) 5.00, 10.00, 15.00 และ 20.00 -อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง LPG (kg/hr) 0.50, 1.00 และ 1.50 -กรณีติดตั้งและไม่ติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT)
ตัวแปรตาม	-การลดลงของพลังงานเชื้อเพลิง LPG -การกระจายอุณหภูมิความร้อน -ค่าใช้จ่ายการนึ่งข้าวที่ลดลงต่อปี -เนื้อสัมผัสของข้าวเหนียว (Texture analyzer) -ประสิทธิภาพของชุดเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งเข้าไปในหวดนึ่งข้าว
ตัวแปรควบคุม	-ระยะเวลาในการแช่ข้าวเหนียวก่อนนึ่งที่เท่ากัน -ปริมาณน้ำในการแช่ข้าวเหนียวที่เท่ากัน -ปริมาณของข้าวเหนียวที่เท่ากัน 1.00 kg -แหล่งที่มาของข้าวเหนียวเดียวกัน -ข้าวเหนียวพันธุ์ กข6 -หวดนึ่งข้าวมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านบนและด้านล่าง 240.00 mm และ 150.00 mm ตามลำดับ และมีความสูง 280.00 mm

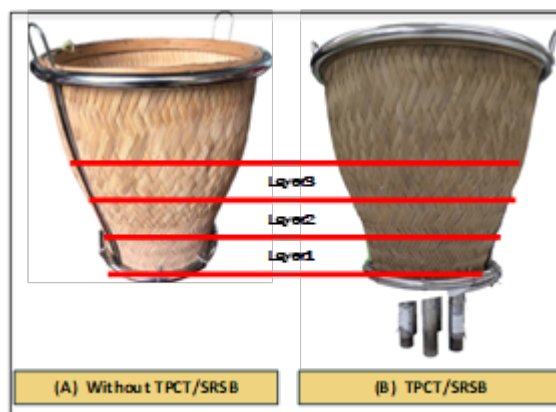


รูปที่ 8 ข้าวเหนียวสายพันธุ์ กข6

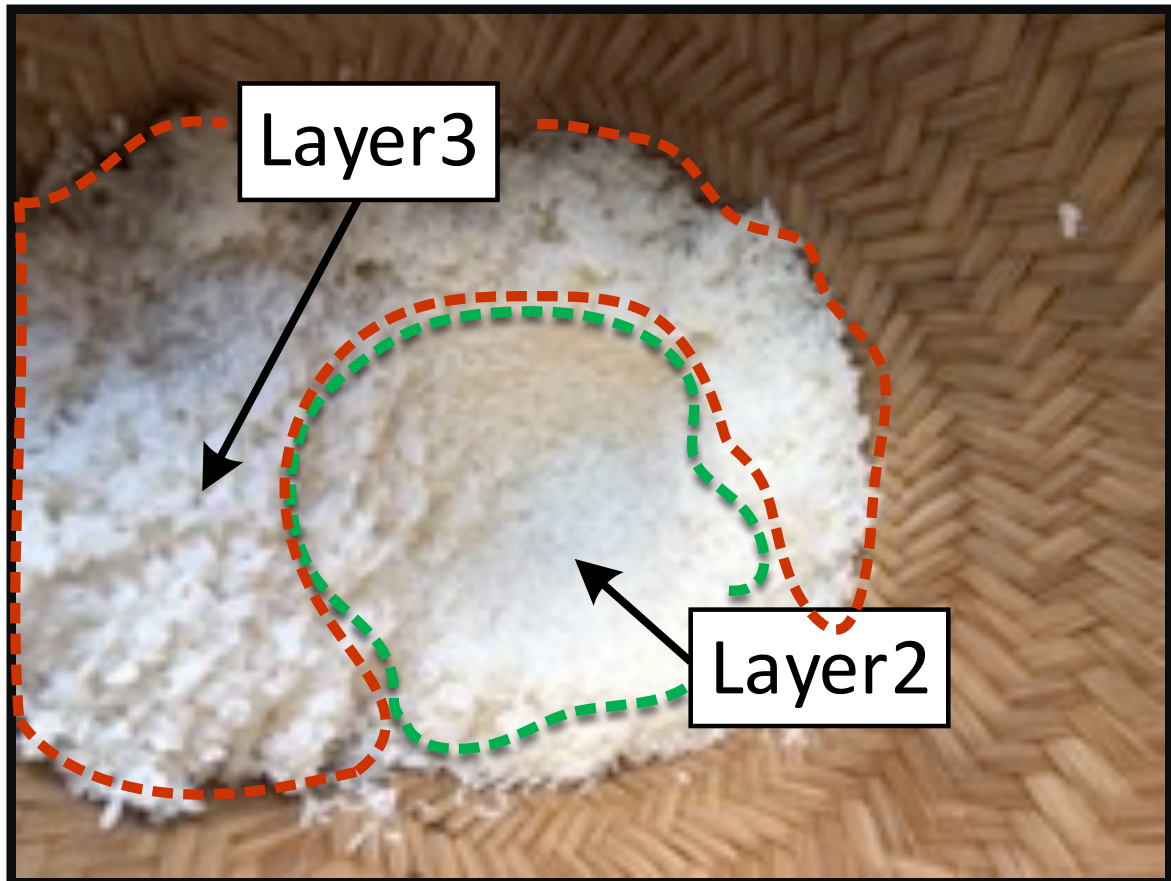
### การวิเคราะห์ข้อมูล

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกได้ตามขั้นตอนดังนี้

- 1). ในการพิจารณาความสุขของข้าวเหนียวตามระดับของชั้นหวดที่ชั้นที่1 ชั้นที่2 และชั้นที่3 ดังแสดงในรูปที่ 9 โดยพิจารณาความสุขของข้าวเหนียวตามตัวแปรต้นที่ทดสอบดังแสดงในตารางที่ 1
- 2). ด้วยกรณีทดสอบทั้งที่มีการติดท่อและไม่มีการติดท่อเทอร์โมไซฟอน (TPCT) ที่มีการทดสอบตามตัวแปรต้น ในการวิเคราะห์ความสุขของข้าวเหนียว การวิเคราะห์แรกเริ่มแบบการใช้ประสาทสัมผัส เช่น กลิ่นความหอมของข้าวที่สุก รสชาติจากการชิมที่สุก การเตะสัมผัสด้วยมือ สีของเมล็ดข้าวที่สุกจะสีใสจากการมองเห็น ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ความสุขแต่ละชั้นข้าวในหวดตั้งแต่ชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ ทั้งในกรณีที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งท่อเทอร์โมไซฟอน (TPCT) เพื่อนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความสุขของข้าวเหนียวในขั้นตอนนี้ไปวิเคราะห์ด้วยรูปแบบและเครื่องมือที่ละเอียดต่อไปในขั้นตอนถัดไป
- 3). สำหรับกรณีที่ทดสอบแล้วข้าวเหนียวไม่สุก ไม่เหมาะที่จะการนำมารับประทาน เช่น ข้าวมีการแฉะ หรือข้าวมีความแข็งดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 9 ลำดับชั้นข้าวที่ใช้พิจารณาความสุขของข้าวเหนียว



รูปที่ 10 ลักษณะของข้าวและบริเวณชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ที่พิจารณาเปรียบเทียบหลังการทดสอบ

4) จากการวิเคราะห์ข้อมูลและขั้นตอนการทดสอบ พิจารณาเฉพาะข้าวที่สุกในทุก ๆ ชั้นข้าวดังแสดงในรูปที่ 9 การสุกของข้าวเหนียวที่สุกจากการทดสอบทั้งกรณีที่มีและไม่มีการติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอน (TPCT)

ที่มีกรณีทดสอบร่วมกับอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50, 1.00 และ 1.50 kg/hr. ระยะเวลาในการนึ่งข้าวเหนียว 20.00, 15.00 และ 15.00 minutes

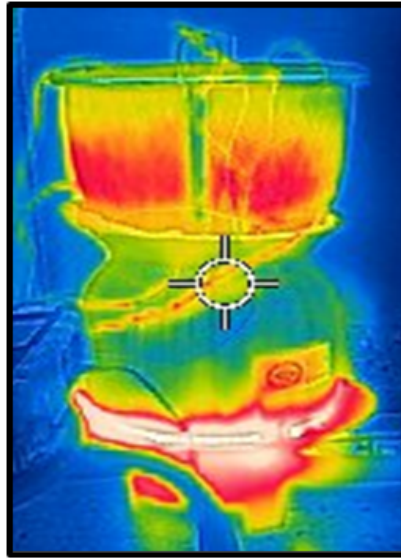
5) วิเคราะห์หาผลที่ได้จากการทดสอบในข้อที่ 4 โดยวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดเคที่ติดอยู่กับเทอร์โมไซฟอนทั้ง 20 จุด ควบคู่กับภาพของคลื่นความร้อนที่ได้จากอุปกรณ์ Thermal Scan ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 11

6) วิเคราะห์หาประสิทธิภาพชุดเทอร์โมไซฟอนที่ติดตั้งเข้าไปในหวดนึ่งข้าว คำนวณจากสมการที่ (5) และ (6)

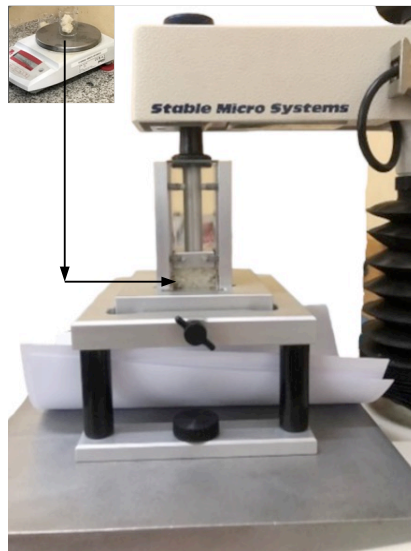
7) วิเคราะห์หาค่าการลดลงของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงต่อนาที การสิ้นเปลืองพลังงานตอนข้าวสุก รวมถึงค่าใช้จ่ายการนึ่งข้าวที่ลดลงต่อปี คำนวณจากสมการที่ (7) และ (8)

8) นำข้าวที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลข้อที่ 4 ไปเข้าเครื่องทดสอบ Texture analyzer ที่ใช้ทดสอบเนื้อสัมผัสของข้าว ที่มีความจุ 50.00 kg. f (500N) ช่วงความเร็ว 0.01-40.00 mm/second ความละเอียดระยะทาง 0.001 mm รูรับแสงกว้างสุด 370/590 mm. อัตราข้อมูลสูงสุด 2000 pps





รูปที่ 11 คลื่นความร้อนในระหว่างกระบวนการนึ่งข้าวเหนียว



รูปที่ 12 เครื่องทดสอบ Texture analyzer

9) สำหรับการวิเคราะห์หาความคลาดเคลื่อน พิจารณาการวัดปริมาณ  $x$  เป็นจำนวน  $n_s$  โดยในครั้งที่  $s$  วัดค่าได้  $\bar{x}$  ค่าเฉลี่ยของปริมาณนี้หาได้จากสมการที่ (15) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดหาได้จากสมการที่ (16)

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n_s} \quad (15)$$

$$SD = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n_s - 1}} \quad (16)$$

โดยพิจารณาและแบ่งการคำนวณเป็น 2 ประเภทดังนี้ ประเภท A แทนค่า  $u_{i,typeA}$  โดยความไม่แน่นอนเนื่องจากข้อมูลได้มาแบบสุ่มจากแหล่งประเมินทางสถิติดังแสดงในสมการที่ (17)

$$u_{i,typeA} = \sqrt{\frac{SD}{n_s}} \quad (17)$$

สำหรับประเภท A นั้นพิจารณาเป็นแบบความไม่แน่นอนเนื่องจากข้อมูลได้มาแบบสุ่มจากแหล่งประเมินทางสถิติ และประเภท B คือความไม่แน่นอนเนื่องจากข้อผิดพลาดของระบบสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (18)

$$u_{i,typeB} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

ซึ่งกำหนดว่า a เป็นช่วงกึ่งระหว่างขีดจำกัดบนและล่าง ผลรวมของประเภท A และ B หาได้จากสมการ (19)

$$u_c = \sqrt{(u_{i,typeA})^2 + (u_{i,typeB})^2 + \dots etc} \quad (19)$$

และจะมีการขยายความไม่แน่นอนดังแสดงในสมการที่ (20)

$$U = k u_c \quad (20)$$

ในงานวิจัยนี้ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมในการแจกแจงแบบปกติคือ  $K = 2$  ซึ่งมีระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ประมาณ 0.95 หรือ 95% [11] ผลการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนที่ได้จากการวิจัยนี้แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

Type A	Type B	Type B	Type B
Uncertainty means Reading (°C)	Thermocouple type K (°C) - 200.00-1372.00	Data logger (°C) - 200.00-1100.00	Texture analyzer 0.01-0.40
Standard uncertainty (ui) 0.002	Standard uncertainty (ui) 0.86	Standard uncertainty (ui) 0.57	Standard uncertainty (ui) 0.11
Sensitivity coefficient (ci) 1	Sensitivity coefficient (ci) 0.99	Sensitivity coefficient (ci) 0.99	Sensitivity coefficient (ci) 0.01
Uncertainty (ui ci) 0.002	Uncertainty (ui ci) 0.86	Uncertainty (ui ci) 0.57	Uncertainty (ui ci) 0.01
Combined uncertainty component 0.51			
Expanded uncertainty (u) 1.03			



### ระยะเวลาคืนทุน

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลระยะเวลาคืนทุนสำหรับการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอนกับหวดหนึ่งข้าวเหนียวสามารถหาได้จากสมการที่ (21)

$$\text{Simple Payback period (SPP)} = \frac{\text{First Coast}}{\text{Coast Saving}} \quad (21)$$

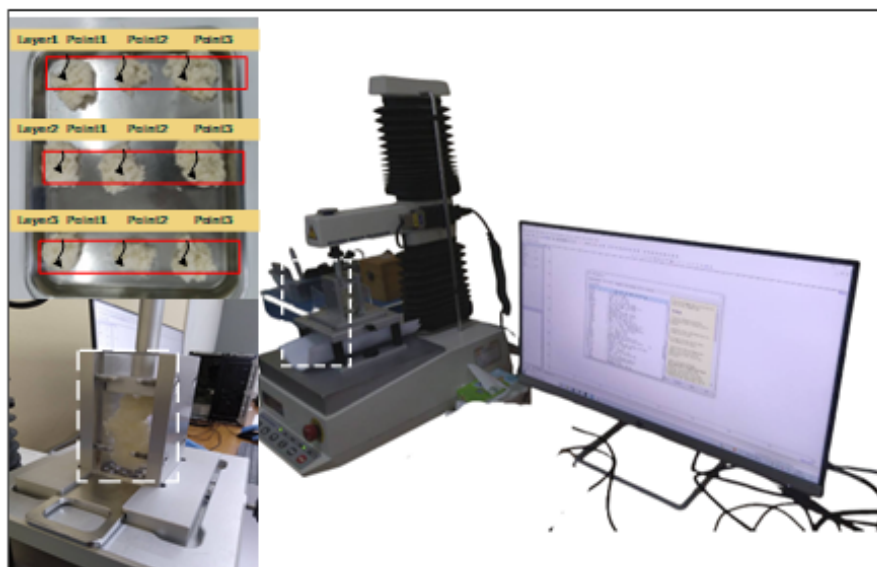
กำหนดให้ Simple Payback period (SPP) คือ ระยะเวลาคืนทุน (year), First Cost คือ เงินลงทุนซึ่งพิจารณาผลรวมของต้นทุนวัสดุก่อสร้าง (baht), Cost Saving คือ ค่าใช้จ่ายที่สามารถประหยัดได้จริงในแต่ละปี (baht/year) [12] สำหรับโดยงานวิจัยนี้ใช้เงินลงทุน 1347.58 baht แบ่งออกเป็นค่าวัสดุที่ใช้ทำท่อเทอร์โมไซฟอน 1050.00 baht ค่าหวดและหม้อหนึ่ง 200.00 baht และอุปกรณ์อื่น ๆ อีก 97.58 baht

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในส่วนนี้ สำหรับงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเสนอผลลัพธ์และการอภิปราย โดยแบ่งออกได้ทั้งแบบประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) และแบบไม่ประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน โดยพิจารณาที่การทดสอบแล้วได้ข้าวเหนียวที่สุกในทุก ๆ กรณีทดสอบ เมื่อพิจารณาแล้วนั้นจะได้ข้อมูลที่น่ามาพิจารณาดังนี้

- 1). อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50 kg/hr. ที่เวลาการนึ่ง 20.00 minuets
- 2). อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.00 kg/hr. ที่เวลาการนึ่ง 15.00 minuets
- 3). อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hrs. ที่เวลาการนึ่ง 15.00 minuets

โดยพิจารณาเป็นตำแหน่งชั้นของหวดที่ข้าวสุกเป็นชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ โดยในแต่ละชั้นจะทำการตรวจสอบความสุกของข้าวสามจุดด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ Texture analyzer ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยในส่วนของผลลัพธ์และการอภิปรายนั้นเลือกพิจารณาที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hrs. ที่เวลาการนึ่ง 15.00 minutes เนื่องจากมีค่าการลดลงของเวลาและเงินค่าใช้จ่ายที่ลดลงมากที่สุดกว่าในทุกๆ กรณีทดสอบประกอบด้วยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจากสองกรณีข้างต้นที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50 และ 1.00 kg/hr ที่เวลาการนึ่ง 20.00 และ 15.00 minutes ตามลำดับ มีลักษณะของข้อมูลและทิศทางของแนวโน้มที่เป็นไปในลักษณะเดียวกัน

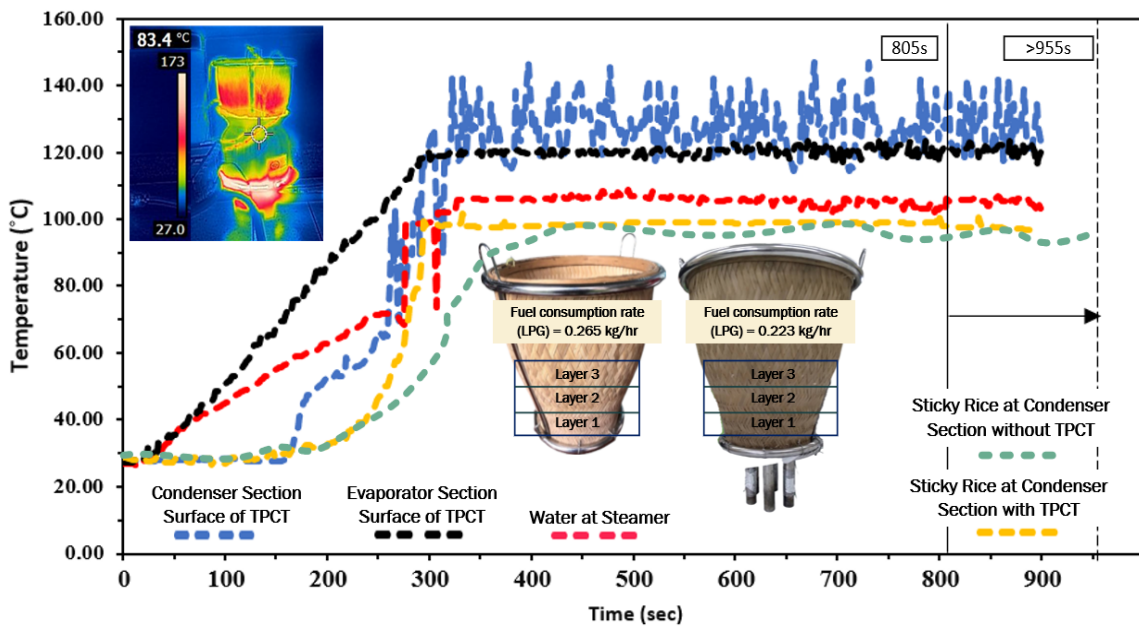


รูปที่ 13 ตำแหน่งและรูปแบบการวัดค่าความสุกของข้าวเหนียว

**พิจารณาที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.5 kg/hrs. ที่เวลาการนึ่ง 15.00 minutes**

ร่วมกับกรณีทดสอบทั้งในส่วนของการประยุกต์ใช้งานและไม่ประยุกต์ใช้งานกับเทอร์โมไซฟอน (TPCT)

จากการพิจารณาข้าวเหนียวที่นึ่งทั้งสามชั้นในหอดที่มีการประยุกต์ใช้งานกับเทอร์โมไซฟอน TPCT พบว่าทุกจุดบนชั้นที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังแสดงรูปที่ 9 เพื่อให้เห็นรูปแบบการแบ่งชั้น ข้าวเหนียวที่นึ่งนั้นมีความสุกในทุกตำแหน่งของทั้งสามชั้น โดยใช้เวลาในการนึ่งที่เวลา 13.41 min หรือ 805.00 sec อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้คือ 0.22 kg/hr ในส่วนของหอดที่ไม่มีการประยุกต์ใช้ TPCT ที่ตำแหน่งบนชั้นที่ 1 และ 2 ตามลำดับ พบว่าข้าวเหนียวที่นึ่งนั้นมีความสุกในทุกจุดที่นำไปตรวจสอบด้วยตัวการวิเคราะห์แบบ Texture analyzer แต่ที่ชั้นที่ 3 พบว่าข้าวไม่สุก โดยใช้เวลาในการนึ่งที่มากกว่าเวลา 16.58 min หรือ 955.00 sec การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้คือ 0.265 kg/hr ดังแสดงในรูปที่ 14

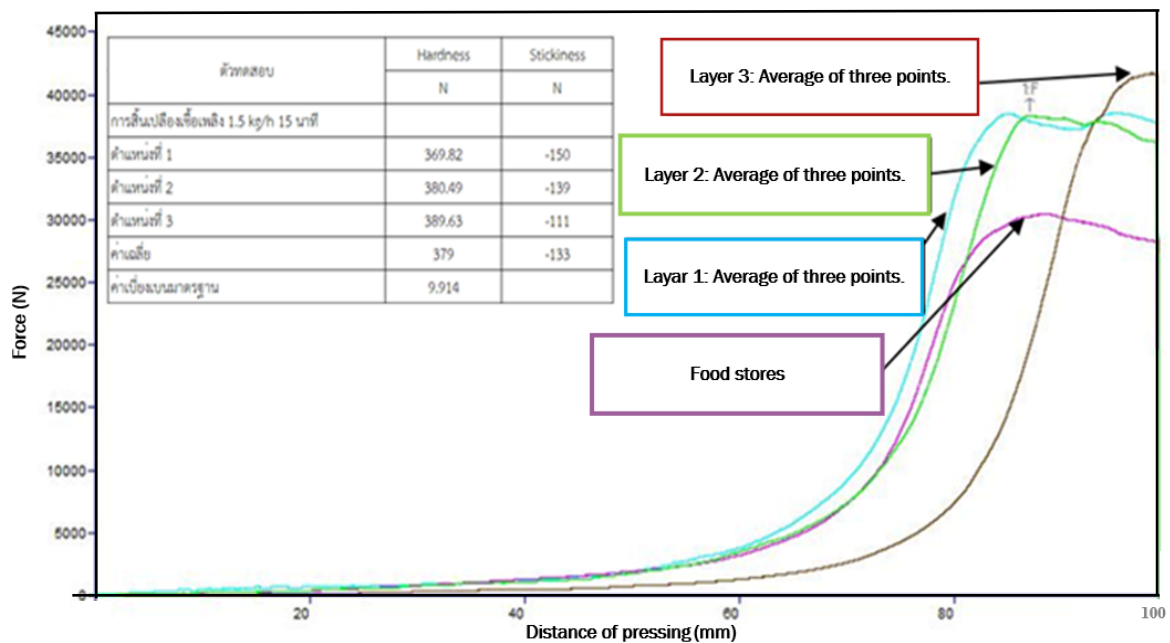


รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ของเวลาและอุณหภูมิ ที่การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr เวลานึ่ง 15.00 minutes

จากรูปที่ 14 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการนึ่งแบบมีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) กับไม่มีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (Without-TPCT) ที่ใช้อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr ใช้เวลา 15.00 min พบว่าการนึ่งข้าวแบบประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) มีการใช้เวลาน้อยกว่าการนึ่งแบบไม่มีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอนที่เร็วกว่าถึง 2.50 min คิดเป็นร้อยละ 15.71 ทำให้สามารถลดพลังงานเชื้อเพลิงได้ 41.60 g ลดค่าใช้จ่ายจากการนึ่งปกติได้ครั้งละ 0.71 baht ถ้านึ่งวันละ 2 ครั้ง ลดค่าใช้จ่ายต่อปี 518.30 baht เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) สืบเนื่องจากติดตั้งชุดเทอร์โมไซฟอนนั้น เมื่อพิจารณาที่เวลาทดสอบ 160.00 sec โดยที่ส่วนทำระเหยของเทอร์โมไซฟอน จะสามารถนำความร้อนจากน้ำหรือไอน้ำในส่วนของหม้อนึ่งขึ้นไประบายความร้อนหรือถ่ายเทความร้อนให้กับข้าวเหนียวที่นึ่งอยู่ในหอด โดยการถ่ายเทความร้อนผ่านส่วนควบแน่นของเทอร์โมไซฟอน ด้วยการสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิผิวท่อส่วนควบแน่นของ TPCT ส่งผลให้การกระจายความร้อนสู่ข้าวในช่วงเวลาเดียวกัน ๆ ก็ค่อยเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาอุณหภูมิข้าวเหนียวมีการเพิ่มสูงขึ้นเช่นเดียวกันที่ช่วงเวลา 160.00 sec

ดังที่กล่าวข้างต้น โดยที่เวลาเดียวกันกับพบว่าอุณหภูมิของน้ำร้อนที่อยู่ในหม้อนึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 55.00 °C ซึ่งเทอร์โมไซฟอนนั้นมีส่วนสำคัญในการที่จะช่วยนำและพาความร้อนจากน้ำร้อนในหม้อนึ่งที่ไม่สูงพอที่จะทำให้น้ำเดือดได้นั้น โดยไม่รอเวลาที่อุณหภูมิของน้ำจะสูงมากเกินไป เพื่อขึ้นไประบายความร้อนให้กับข้าวเหนียวที่จะนึ่งในหอดได้ หรืออธิบาย

เพิ่มเติมควบคุมโดยเทอร์โมไซโฟนสามารถนำและพาความร้อนจากของเหลวที่แสดงในรูปที่ 2 จากจุดที่ 1 และ 2 รวมถึงการกระจายความร้อนสม่ำเสมอเข้าสู่ได้ดีในช่วงของจุดที่ 2 ไปหาจุดที่ 3 [4, 5] นอกจากนี้ยังแสดงการจำลองการเคี้ยวของข้าวเหนียวที่ได้จากการทดสอบกับการประยุกต์ใช้งานกับ TPCT ด้วยเครื่อง Texture analyzer เทียบกับข้าวเหนียวที่ได้จากร้านค้าทั่วไป โดยพิจารณาที่การเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr เวลาในการนึ่ง 15.00 min ดังแสดงในรูปที่ 15 พบว่า ในส่วนเนื้อสัมผัสแบบมีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซโฟนจำลองการเคี้ยวใช้แรงเคี้ยวเฉลี่ยจากทั้ง 3 ชั้นเท่ากับ 379.00 N มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 9.91% ในส่วนข้าวที่ซื้อจากร้านขายข้าวเหนียวใช้แรงเคี้ยวที่ 329.00 N เมื่อพิจารณาาร่วมกับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในกรณีทดสอบดังกล่าวนี้พบว่า การประยุกต์ใช้งานชุดเทอร์โมไซโฟนกับหวดนึ่งข้าวเหนียวมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2.60 years



รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ของแรงเคี้ยวและระยะทางการกดจากการจำลองการเคี้ยว

ในส่วนของการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50 kg/hr ที่เวลาการนึ่ง 20.00 min พบว่าการนึ่งข้าวเหนียวแบบการประยุกต์เทอร์โมไซโฟนกับหวดนึ่งข้าวเหนียวมีการใช้เวลาน้อยกว่าการนึ่งแบบไม่มีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซโฟน สามารถลดพลังงานเชื้อเพลิงได้ 30.00 g คิดเป็นร้อยละ 13.50 ลดค่าใช้จ่ายจากการหุงปกติได้ครั้งละ 0.69 baht ถ้าวันละ 2 ครั้ง ลดค่าใช้จ่ายต่อปี 503.70 baht ในส่วนเนื้อสัมผัสข้าวเหนียวจากการทดสอบกับการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซโฟนจำลองการเคี้ยวใช้แรงเคี้ยวเฉลี่ยจากทั้ง 3 ชั้นเท่ากับ 382.40 N มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 9.27% ที่ส่วนของการใช้การสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.00 kg/hr ใช้เวลา 15.00 min พบว่าการนึ่งข้าวแบบมีการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซโฟนมีการใช้เวลาน้อยสามารถลดพลังงานเชื้อเพลิงลงได้ 26.44 g คิดเป็นร้อยละ 11.68 สามารถลดค่าใช้จ่ายจากการหุงปกติได้ครั้งละ 0.61 baht ถ้าวันละ 2 ครั้งลดค่าใช้จ่ายต่อปี 445.30 baht ในส่วนเนื้อสัมผัสข้าวเหนียวจากการทดสอบกับการประยุกต์ใช้เทอร์โมไซโฟนจำลองการเคี้ยวใช้แรงเคี้ยวเฉลี่ยจากทั้ง 3 ชั้นเท่ากับ 357.00 N มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 9.01 เพราะฉะนั้นจะเห็นว่า ข้อมูลที่ได้จากสองกรณีทดสอบข้างต้นดังที่กล่าว มีลักษณะของข้อมูลจากการทดสอบมีแนวโน้มและทิศทางเหมือนกับการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr ที่เวลาการนึ่ง 15.00 min

## สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและออกแบบถึงการประยุกต์งานเทอร์โมไซฟอนกับหัวหนึ่งข้าวเหนียวจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ และ ผลลัพธ์ตลอดจนการอภิปราย ทางผู้วิจัยสรุปออกมาได้ดังนี้ จากการพิจารณาที่กรณีที่ใช้เทอร์โมไซฟอน (TPCT) และแบบไม่ประยุกต์ใช้เทอร์โมไซฟอน โดยพิจารณาที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 0.50, 1.00 และ 1.50 kg/hr ที่เวลาการนิ่ง 20.00, 15.00 และ 15.00 min ตามลำดับ โดยทั้งสามข้อมูลดังกล่าวนั้นมีลักษณะของข้อมูลจากการทดสอบมีแนวโน้มและทิศทางเหมือนกันเมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอน (TPCT) เพราะฉะนั้นเพื่อให้เห็นลักษณะของ ข้อมูลการสรุปที่ชัดเจนจึงเลือกพิจารณาที่อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr ที่เวลาการนิ่ง 15.00 min ร่วมกับกรณี ทดสอบทั้งในส่วนของการประยุกต์ใช้งานและไม่ประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอน (TPCT) พบว่า การประยุกต์ใช้งาน TPCT จะ ใช้เวลาในการนิ่งข้าวเหนียวเร็วกว่าถึง 2.50 min คิดเป็นร้อยละ 15.71 ทำให้สามารถลดพลังงานเชื้อเพลิงได้ 41.60 g และลด ค่าใช้จ่ายจากการนิ่งปกติได้ครั้งละ 0.71 baht ถ้าวันละ 2 ครั้งลดค่าใช้จ่ายต่อปี 518.30 baht เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการ ประยุกต์ใช้ TPCT นอกจากนี้ยังแสดงการจำลองการเคี้ยวข้าวเหนียวเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบกับเครื่องทดสอบ Texture analyzer เท่ากับ 379.00 N มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 9.91 เมื่อพิจารณา ร่วมกับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในกรณี ทดสอบดังกล่าวนี้มีจุดคืนทุนเท่ากับ 2.60 years

นอกจากนี้ยังยืนยันด้วยการทำงานของเทอร์โมไซฟอนที่ทำงานได้เมื่อติดตั้งเข้าไปหัวหนึ่งข้าวเหนียว ด้วยผลและ ลักษณะตลอดการทดสอบของกระจายอุณหภูมิที่แสดงตลอดทั้งการทดสอบพร้อม ๆ กับภาพแสดงของคลื่นความร้อนในขณะที่ ทำการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง 1.50 kg/hr ที่เวลาการนิ่ง 15.00 min โดยที่เวลาประมาณ 160.00 sec จะพบว่า อุณหภูมิของน้ำร้อนที่อยู่ในหม้อหนึ่งก็มีอุณหภูมิประมาณ 55.00 °C ซึ่งเทอร์โมไซฟอน (TPCT) นั้นมีส่วนสำคัญในการที่จะช่วย นำและพาความร้อนจากน้ำร้อนที่อุณหภูมิดังกล่าวนี้ที่สูงพอที่จะทำให้ให้น้ำเดือดได้ โดยพบว่าอุณหภูมิของข้าวเหนียวที่เวลา 160.00 sec จนถึง 280.00 sec โดยประมาณสำหรับกรณีประยุกต์ใช้งานกับ TPCT มีการเริ่มยกตัวที่สูงขึ้นของอุณหภูมิข้าว ในหัวที่หนึ่งที่สูงกว่ากรณีที่ไม่มีการประยุกต์ใช้งานประมาณ 35.00-40.00 °C พร้อม ๆ กับการแสดงการกระจายคลื่นความร้อน นี่จึงเป็นอีกเหตุผลที่ทำให้การประยุกต์ใช้งานเทอร์โมไซฟอนกับหัวหนึ่งข้าวเหนียวช่วยลดทั้งเวลา ทั้งค่าใช้จ่ายเชื้อเพลิงลง ได้ โดยถือว่าการศึกษาและออกแบบในครั้งนี้สามารถประยุกต์ใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล และหน่วยวิจัยวิศวกรรมพลังงานความร้อนและการกลั่น (ในกระบวนการ และอุปกรณ์ที่ออกแบบ) คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร ตลอดจนผู้บริหารและคณาจารย์ทุก ๆ ท่านที่ให้อุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัยรวมถึงอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย ครั้งนี้นั้นสำเร็จตามเป้าหมาย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Sichamnan, S., Chompookham, T. and Parametthanuwat, T. (2020). A case study on internal flow patterns of the two-phase closed thermosyphon (TPCT). Case Stud. Therm.Eng. 18, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100586>
- [2] Liu, Y., Yan, Z., Jiang, Z., Li, N., Yang, B. and Wu, Y. (2023). Experimental Study on the Small Two-Phase Thermosyphon Loop with Minichannel Evaporator. ASME. J. Thermal Sci. Eng. Appl. 16(2), <https://doi.org/10.1115/1.4063913>
- [3] Xiao, B. (2023). "Thermal Analysis of Thermosyphon for Waste Heat Recovery From Auto Exhaust

- Using Limited Fluid Charge”. Proceedings of the ASME 2023 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Heat Transfer and Thermal Engineering. 10, ASME. <https://doi.org/10.1115/IMECE2023-109452>.
- [4] Yunus A, Cengel. (2002). Heat Transfer: A Practical Approach. 2th Edition.
- [5] Richard, S.E, Claus, B. and VW Gordon, J. (2003). Fundamentals of Thermodynamics. 6th Edition.
- [6] Reay, D., Kew, P. (2006). Heat Pipe, Theory, Design and Application. 5ed., Butterworth-Heinemann.
- [7] Sichamnan, S., Rodbumrung, A. (2021). Effects of parameters on heat transfer characteristics of a rectangular cross section heat pipe with mesh wick. Applied Science and Engineering Progress. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2021.11.010>.
- [8] Pipatpaiboon, N., Rittidech, S. and Meena, P. (2012). Experimental study of a thermosyphon heat exchanger (TPHE) in a bio-diesel factory in Thailand. Arabian J. Sci. Eng. 37, 2047–2060. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0310-6>.
- [9] อนุชา เมฆอรุณ. (2556). การพัฒนาสายพันธุ้ข้าวร่วมกับการฉายรังสีแกมมาเพื่อผลิตข้าวลูกผสมระบบสามสายพันธุ้. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิตสาขาวิชาพืชไร่. : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [10] ชัยธัช จันทร์สมุด อัครพล ภูมิ พืชธี แสงกล้า และวัลลิกา ชมภูคำ (2560). คุณสมบัติของดินที่ปลูกข้าวเหนียวพันธุ้ กข 6 ระหว่างพื้นที่อำเภอเขาวงและอำเภอนามนจังหวัดกาฬสินธุ์. วารสารวิชาการเฉลิมกาญจนา. 4(2), กรกฎาคม-ธันวาคม 2560.
- [11] Parametthanuwat, T., Pipatpaiboon, N., Bhuwaketkumjohn, N. and Sichamnan S. (2022). Heat transfer characteristics of closed-end thermosyphon (CE-TPCT). Engineering Science and Technology, Int. J. 27, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.05.024>.
- [12] Sichamnan, S., Chompookham, T. and Rittidech, S. (2016). Efficiency enhancement of solar panels using copper mesh wick heat pipe. Journal of Engineering and Innovation. 9, 17–28.

การปรับปรุงสมบัติถ่านชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับกากไยชาโนแบคทีเรีย  
ภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส

Properties Improvement of Biochar from Spent Coffee Ground  
with *Leptolyngbya* sp. Residues Under Pyrolysis Process

เหนือพล ดวงเบี้ย<sup>1</sup>, วาสนา คำโสภาส<sup>2\*</sup>, ธรรณิศร์ ดีทยาท<sup>3</sup>, อรรถกร อาสนคำ<sup>3</sup> และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์<sup>3</sup>  
Nuapon Duongbia<sup>1</sup>, Wassana Kamopas<sup>2\*</sup>, Thoranis Deethayat<sup>3</sup>, Attakorn Asanakham<sup>3</sup> and  
Tanongkiat Kiatsiriroat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> สำนักงานบริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

<sup>2</sup> หน่วยวิจัยระบบทางอุณหภาพ สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

<sup>1</sup>Office of Research Administration, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand 50200

<sup>2</sup>Thermal System Research Unit, Multidisciplinary Research Institute, Chiang Mai University,  
Chiang Mai, Thailand 50200

<sup>3</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University,  
Chiang Mai, Thailand 50200

\*Corresponding author: Tel.: 061-6851850 E-mail address: [ic41062@hotmail.com](mailto:ic41062@hotmail.com)

Received: 28 May 2024, Revised: 13 June 2024, Accepted: 12 December 2024, Published online: 30 December 2024

## Abstract

In this research, biochar was experimentally produced through a co-pyrolysis process between spent coffee grounds (SCG) and *Leptolyngbya* sp. residue (LTR) at ratios of 1:0, 1:1, and 0:1. The reactor was heated to 500°C with a holding time of 1 hour. The results showed that the percent yield of biochar from spent coffee grounds (BSCG), *Leptolyngbya* sp. residue (BLTR), and the blended spent coffee grounds with *Leptolyngbya* sp. residue at a ratio of 1:1 (BSCG:BLTR) were 35.28%, 52.66%, and 41.13% by weight, respectively. The higher heating values of all biochars were in a range of 15.10 - 27.16 MJ/kg. The biochar with the 1:1 mixing ratio increased the nitrogen content of BSCG from 4.23% to 4.62% by weight. As the proportion of LTR in SCG increased, the specific surface area and pore volume also increased, which was consistent with the morphological characteristics of the biochar. The values of pH and electrical conductivity (EC) of the biochar were within the standard ranges for soil amendment usage. Additionally, the co-pyrolysis of SCG and LTR could be used for agricultural purposes.

**Keywords:** Biochar, Spent coffee ground, *Leptolyngbya* sp. Residues, Pyrolysis



## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม ระหว่างกากกาแฟเหลือทิ้ง (SCG) และกากไยชาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya* sp. (LTR) ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 0:1 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส รักษาอุณหภูมิให้คงที่ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดลอง พบว่า ร้อยละโดยมวลของถ่านกากกาแฟ (BSCG), ถ่านกากไยชาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya* sp. (BLTR) และถ่านกากกาแฟต่อกากไยชาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya* sp. อัตราส่วน 1:1 (BSCG:BLTR) มีค่าเท่ากับ 35.28, 52.66 และ 41.13 ตามลำดับ ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าอยู่ในช่วง 15.10 - 27.16 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ถ่านชีวภาพ BSCG:BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะทำให้สัดส่วนของไนโตรเจนของถ่าน BSCG สูงขึ้น จากร้อยละ 4.23 เป็น 4.62 โดยมวล การนำ LTR มาไพโรไลซิสร่วมกับ SCG จะทำให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้ มีพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงขึ้นเมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพจาก SCG ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ ค่าความเป็นกรดต่างและค่าการนำไฟฟ้าของถ่านชีวภาพ อยู่ในค่ามาตรฐานสำหรับใช้ในการปรับปรุงดิน ดังนั้น การไพโรไลซิสร่วมระหว่าง SCG กับ LTR จึงถือเป็นการปรับปรุงพื้นผิว และเพิ่มสมบัติบางประการเพื่อใช้ในเชิงเกษตรกรรมได้

**คำสำคัญ:** ถ่านชีวภาพ, กากกาแฟ, กากไยชาโนแบคทีเรีย, ไพโรไลซิส

## บทนำ

การนำวัสดุเหลือทิ้งหรือชีวมวลเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์นับเป็นแนวทางหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันมีนักวิชาการ นักวิจัย หรือผู้ที่สนใจ ทำการศึกษา พัฒนา และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ กลับมาใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่าง ๆ ถ่านชีวภาพ ถือเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบหนึ่งที่ได้จากการนำเอาชีวมวลหรือชีวมวลเหลือทิ้งไปผ่านกระบวนการย่อยสลายเชิงความร้อน ในช่วงอุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส [1] โดยปราศจากอากาศ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิส ทำให้ผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้ จะให้คุณลักษณะ สมบัติ และองค์ประกอบพื้นฐานที่แตกต่างจากถ่านไม้ที่ผ่านการเผาไหม้โดยทั่วไป [2]

กาแฟเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรชนิดหนึ่ง ที่ได้รับความนิยมนำมาปรุงเป็นเครื่องดื่ม ซึ่งการดื่มกาแฟในปริมาณที่พอเหมาะ จะทำให้เกิดประโยชน์ทางการแพทย์ เช่น ป้องกันโรคพาร์กินสัน โรคหัวใจในถุงน้ำดี โรคเบาหวานชนิดที่ 2 โรคเกาต์ โรคอัลไซเมอร์ โรคหืด โรคมะเร็งกระเพาะอาหาร โรคมะเร็งปอด และโรคมะเร็งเต้านม เป็นต้น [3] มีรายงานจากศูนย์วิจัยเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร, สถาบันอาหาร ระบุว่า ปี 2564 ตลาดกาแฟ (Coffee) ปี 2564 ในประเทศไทย มีมูลค่าสูงถึงประมาณ 32,134.9 ล้านบาท โดยมีอัตราการขยายตัวร้อยละ 5.3 เมื่อเทียบกับปี 2563 [4] จากความนิยมบริโภคกาแฟดังกล่าว ส่งผลให้มีการผลิตกาแฟเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้กากกาแฟเหลือทิ้งจากการะบวนการปรุงเครื่องดื่มมีปริมาณสูงขึ้นตามไปด้วย มีรายงานการวิจัยของ Tongcumpou, C., et al., 2019 [5] ได้ระบุว่า ถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ในช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความร้อน อยู่ในช่วง 25.77-26.77 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นระดับความร้อนที่ค่อนข้างสูง และมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพลังงาน

ไยชาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya* sp. AARL KC 45 (LT) เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีลักษณะเป็นเส้นสายที่แยกได้จากน้ำพุร้อนของประเทศไทย เป็นสิ่งมีชีวิตที่เจริญเร็ว เก็บเกี่ยวเซลล์ได้ง่าย สามารถเจริญได้ในอาหารที่มีความเป็นด่างสูง ประมาณ 8.2 จึงช่วยลดการปนเปื้อนจากสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ได้ นอกจากนี้ยังมีรงควัตถุที่เป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง เรียกว่า ไฟโคบิลิโปรตีน ซึ่งประกอบไปด้วย phycocyanin (PC) สารสีน้ำเงิน และ phycoerythrin (PE) สารสีแดง [5] สารสีดังกล่าวถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง นอกจากนี้ สารสกัดที่ได้จากไยชาโนแบคทีเรีย จะมีสารที่มีคุณสมบัติเป็นสารออกฤทธิ์ชีวภาพ (bioactive compounds) ที่สำคัญ คือมีสมบัติเป็นสารแอนติออกซิแดนท์ หรือสารต้านอนุมูลอิสระ สารออกฤทธิ์ต้านเนื้องอก สารออกฤทธิ์ต้านการแข็งตัวของเลือด สารออกฤทธิ์ลดไขมันในเลือด และสารออกฤทธิ์ต้านไวรัส ดังนั้น สารสกัดจากไยชาโนแบคทีเรีย จึงถูกนำไปใช้ในทางการแพทย์อีกด้วย อย่างไรก็ตาม หลังจากนำไยชาโนแบคทีเรียไปผ่านกระบวนการสกัดสารสำคัญแล้ว กากไยชาโนแบคทีเรีย ถือเป็นของเสียเหลือทิ้งที่มีความน่าสนใจที่จะนำมาผ่านกระบวนการ

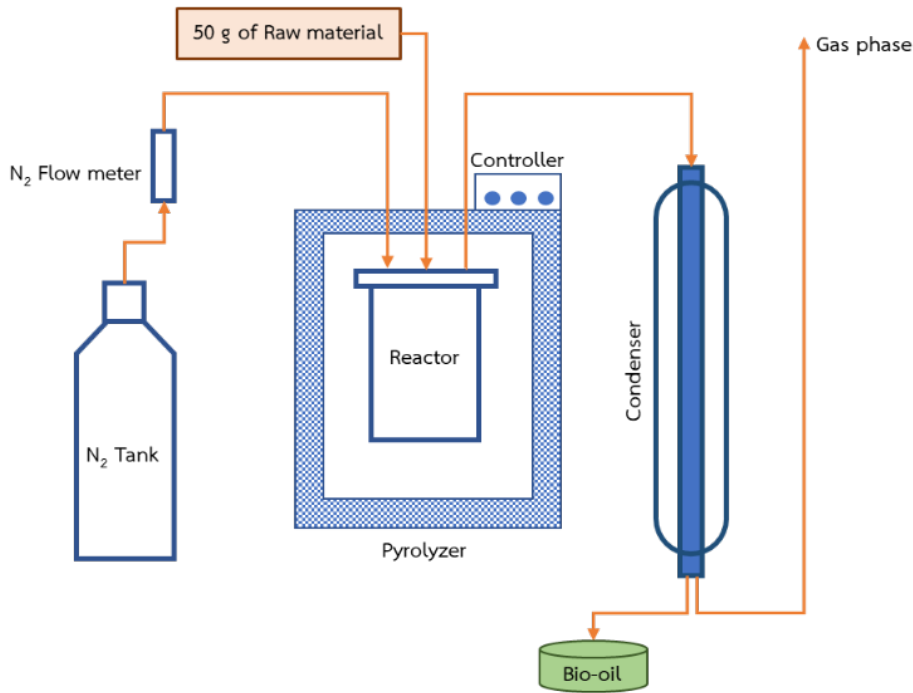
แปรรูป เพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงเกษตรกรรมและสิ่งแวดล้อม โดยมีข้อมูลการวิจัยของ Saiyud, N., et al. 2022 [7] รายงานว่า การนำสาหร่ายไปใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไพโรไลซิสร่วม จะสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพได้

บทความวิจัยนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำของเสียเหลือทิ้ง ทั้งในรูปของกากกาแพเหลือทิ้ง (SCG) ซึ่งเก็บรวบรวมจากร้านกาแพทั่วไปในจังหวัดเชียงใหม่ และกากไซยาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya sp.* (LTR) ที่ผ่านกระบวนการสกัดสารมูลค่าสูงออกไปแล้ว มาผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม (Co-Pyrolysis) เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติเชิงเคมี, เชิงคุณภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพที่ได้ ซึ่งการไพโรไลซิสร่วมนี้ ถือเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพได้

## วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม ระหว่าง SCG ซึ่งเก็บรวบรวมจากร้านกาแพทั่วไปในจังหวัดเชียงใหม่ และ LTR ที่ผ่านกระบวนการสกัดสารมูลค่าสูงออกไปแล้ว (ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการวิจัยสาหร่ายและไซยาโนแบคทีเรีย คณะวิทยาศาสตร์ และหน่วยวิจัยความหลากหลายของสาหร่ายและแพลงก์ตอน สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่) ซึ่งใช้วิธีการและสัดส่วนการผสมกากชีวมวลสองชนิดก่อนการไพโรไลซิสอ้างอิงจากงานวิจัย [7] โดยในงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนผสมระหว่าง SCG ต่อ LTR เท่ากับ 1:0, 1:1, 0:1 โดยน้ำหนัก เตรียมวัตถุดิบโดยการนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำวัตถุดิบแห้งปริมาณ 50 กรัม เข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor) ทรงกระบอก (ตามภาพที่ 1) ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวไล่อากาศ ให้อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 100 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 5-10 องศาเซลเซียสต่อนาที ทำการผลิตถ่านชีวภาพในช่วงอุณหภูมิที่เกิดไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส รักษาอุณหภูมิให้คงที่อยู่ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์สมบัติและคุณลักษณะต่างๆ ดังนี้

1. การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อนของวัตถุดิบ เป็นกระบวนการวิเคราะห์เพื่อศึกษากลไกการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค (Thermo gravimetric Analysis, TGA) และอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา (derivative, DTG) ด้วยเครื่อง Thermo plus EVO2 (Rigaku, Japan)
2. การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) เพื่อศึกษาหาค่าความชื้น สารระเหย เถ้าและคาร์บอนคงตัว และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อศึกษาหาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ของวัตถุดิบ และถ่านชีวภาพที่ได้
3. การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของถ่านชีวภาพ โดยนำถ่านชีวภาพมาผสมกับน้ำบริสุทธิ์ RO (Reverse osmosis) ที่อัตราส่วนผสม 1:1 (mg/ml) จากนั้นทำการวัดค่า ด้วยเครื่องวัด pH (pH meter F-71, LAQUA, Horiba)
4. การวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) ของถ่านชีวภาพ โดยนำถ่านชีวภาพมาผสมกับน้ำบริสุทธิ์ RO (Reverse osmosis) ที่อัตราส่วนผสม 1:1 (mg/ml) จากนั้นทำการวัดค่าด้วยเครื่องวัดการนำไฟฟ้า (914 pH/Conductometer, Metrohm, swissmade)
5. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Electron microscope) เพื่อทำให้ทราบลักษณะของรูพรุนในถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM-5910LV, France)
6. การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) และปริมาณความเป็นรูพรุนของถ่านชีวภาพ (Total pore volume) เพื่อทำให้ทราบค่าการดูดซับของถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสร่วม โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุน (Moded Autosorb 1 MP, Quantachrome, USA)



ภาพที่ 1 แผนภาพชุดไพโรไลซิสระดับห้องปฏิบัติการ

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### 1. ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบ

#### 1.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของวัตถุดิบ

จากผลวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของวัตถุดิบ ตามตารางที่ 1 จะเห็นว่า ความชื้นและสารระเหยของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด มีค่าค่อนข้างสูง เมื่อนำวัตถุดิบไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีโอกาสอยู่ในสถานะของเหลวและก๊าซสูงตามไปด้วย สำหรับถ่านชีวภาพ จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสารประกอบอินทรีย์ในวัตถุดิบ ซึ่งแสดงในรูปของปริมาณแล้ว [7] ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณถ่านของ SCG และ LTR ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 9.63 และ 16.29 โดยมวล ตามลำดับแล้ว LTR จะให้ปริมาณถ่านชีวภาพสูงกว่า SCG

#### 1.2 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของกากกาแฟและกากไชยาโนแบคทีเรีย

จากการวิเคราะห์การสลายตัว หรือการสูญเสียน้ำหนักเชิงความร้อนของวัตถุดิบ คือ SCG และ LTR ด้วยเทคนิค Thermo Gravimetric Analysis, TGA และอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา (Derivative Thermo Gravimetry, DTG) โดยมีการควบคุมอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที สามารถแสดงผลวิเคราะห์ ได้ดังภาพที่ 2

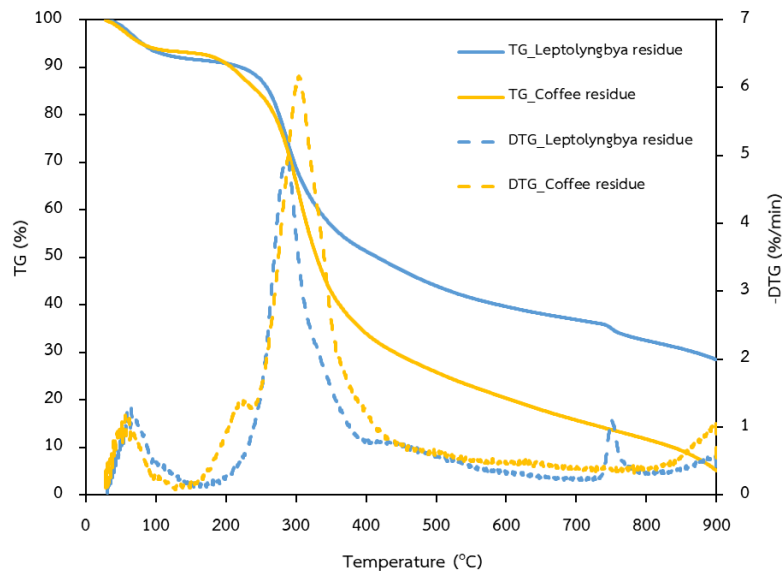
ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) และแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของ SCG และ LTR

ค่าการวิเคราะห์	Biomass	
	SCG	LTR
Proximate analysis <sup>a</sup> (ร้อยละโดยมวล)		
Moisture	6.72	7.54
Volatile matter	64.05	58.85

ค่าการวิเคราะห์	Biomass	
	SCG	LTR
Fixed carbon <sup>b</sup>	19.60	17.32
Ash	9.63	16.29

หมายเหตุ: <sup>a</sup> as received

<sup>b</sup> Calculated by difference



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการสลายตัวจากกระบวนการไพโรไลซิสของ SCG และ LTR ที่อุณหภูมิ 25 - 900 องศาเซลเซียส

จากภาพที่ 2 จะเห็นว่า SCG จะเริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และจะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็ว ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 240 - 430 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นช่วงอุณหภูมิของการสลายตัวด้วยความร้อนของ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [8-10] โดย SCG จะเกิดการสูญเสียน้ำหนักชีวมวลมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส สำหรับ LTR จะเริ่มมีการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 240 องศาเซลเซียส และจะเกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ 240 - 400 องศาเซลเซียส และจะเกิดการสูญเสียน้ำหนักของชีวมวลมากที่สุด ที่อุณหภูมิประมาณ 280 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาการสลายตัวของวัตถุดิบ 2 ชนิด จะเห็นว่า SCG จะมีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสสูงกว่า LTR จึงสลายตัวได้สูงกว่า โดยอัตราการสูญเสียมวลต่อเวลาสูงสุดของ SCG และ LTR มีค่าเท่ากับร้อยละ 6.14 และ 4.9 โดยมวลต่ออนาที ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์การสลายตัวหรือการสูญเสียน้ำหนักทางความร้อน ทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการสลายตัวของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด คือ จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 240-430 องศาเซลเซียส ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้กำหนดและควบคุมอุณหภูมิการผลิตถ่านชีวภาพที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อให้วัตถุดิบที่ใช้ เกิดการสลายตัวและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีได้อย่างสมบูรณ์

## 2. ผลการวิเคราะห์สมบัติและคุณลักษณะของถ่านชีวภาพ

### 2.1 ผลการผลิตถ่านชีวภาพ

การผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม ระหว่าง SCG ร่วมกับ LTR ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 0:1 จะสามารถหำร้อยละโดยมวลของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้ จากสมการ (1) [7-9]

$$\%Yield = \frac{M_b}{M_o} \times 100 \quad (1)$$

โดย  $M_b$  คือ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้รับ,  $M_o$  คือ น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้ และ %Yield คือ ร้อยละโดยมวลของผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่ได้ ซึ่งหลังจากนำวัตถุดิบตั้งต้น ปริมาณ 50 กรัม เข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสแล้ว จะทำให้ได้ BSCG, BLTR และ BSCG:BLTR อัตราส่วน 1:1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 35.28, 52.66 และ 41.13 โดยมวล ตามลำดับ

**ตารางที่ 2** ผลวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อนของ BSCG:BLTR ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 0:1

Ultimate analysis <sup>a</sup>	Raw material		Biochar			Coffee ground biochar [11]
	SCG	LTR	BSCG	BLTR	BSCG : BLTR 1:1	
คาร์บอน (ร้อยละโดยมวล)	50.43	34.06	81.98	36.78	49.83	74.25
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยมวล)	6.83	5.07	5.13	2.33	2.61	4.38
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยมวล)	2.25	4.95	4.23	5.02	4.62	4.00
ออกซิเจน <sup>b</sup> (ร้อยละโดยมวล)	40.50	55.85	8.67	55.80	42.94	17.10
ซัลเฟอร์ (ร้อยละโดยมวล)	0.00	0.07	0.00	0.08	0.00	<0.1
ค่าความร้อน (MJ/kg)	20.59	15.73	27.16	15.10	18.35	30.80

หมายเหตุ: <sup>a</sup> Dry ash free basis

<sup>b</sup> Calculated by difference

จากการวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสารของถ่านชีวภาพทั้ง 3 ตัวอย่าง ตามตารางที่ 2 จะเห็นว่า สัดส่วนคาร์บอนของ BSCG, BLTR จะมีค่าสูงขึ้นมากกว่าค่าที่วิเคราะห์ได้จากวัตถุดิบ จากร้อยละ 50.43 เป็น 81.98 (ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tangmankongworakoon, 2019 [11]) และ 34.06 เป็น 36.78 โดยมวล ตามลำดับ และสัดส่วนคาร์บอนของ BSCG:BLTR อัตราส่วน 1:1 มีค่าร้อยละ 49.83 โดยมวล จากผลการทดลอง จะเห็นว่า การผลิตถ่านชีวภาพ BSCG:BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะทำให้สัดส่วนของไนโตรเจนของ BSCG สูงขึ้น จากร้อยละ 4.23 เป็น 4.62 โดยมวล และเมื่อพิจารณาค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ พบว่า ค่าความร้อนของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด และถ่านชีวภาพทั้ง 3 ชนิด จะมีค่าอยู่ในช่วง 15.10 - 27.16 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความร้อนของชีวมวลทั่วไป [12]

### 2.2 ผลของคุณสมบัติของถ่านชีวภาพที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

สำหรับผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) และผลวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ BSCG, BLTR และ BSCG: BLTR แสดงตามตารางที่ 3 และภาพที่ 3 ตามลำดับ

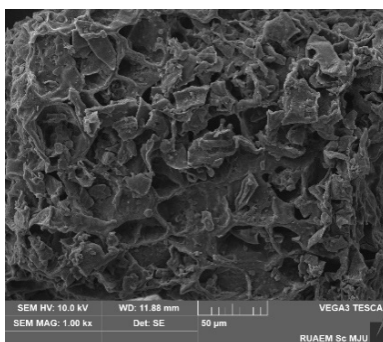
ตารางที่ 3 สมบัติทางพื้นผิวของ BSCG, BLTR และ BSCG : BLTR ที่อัตราส่วน 1:1

ค่าการวิเคราะห์	Biochar			Coffee ground biochar [9]	Standard Reference [11]
	BSCG	BLTR	BSCG:BLTR (1:1)		
พื้นที่ผิวจำเพาะ, S (m <sup>2</sup> /g),	21.59	48.87	40.04	29.34	-
ปริมาตรรูพรุน, Vp, (ml/g)	0.0384	0.1675	0.1263	0.0448	-
ความชื้น (ร้อยละโดยมวล)	0.55	1.35	2.14	0.96	≤35
pH	6.4	6.2	6.3	10.41	5.5-8.5
EC (dS/m)	1.01	1.90	1.62	1.26	≤4

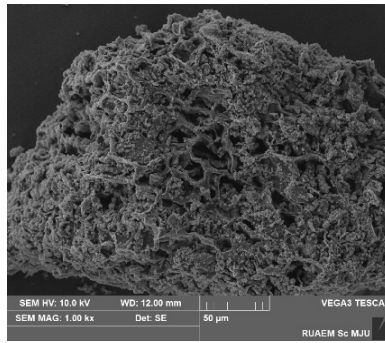
จากตารางที่ 3 พบว่า BSCG, BLTR และ BSCG : BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) 21.59, 48.87 และ 40.04 m<sup>2</sup>/g ตามลำดับ และมีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.0384, 0.1675 และ 0.1263 cm<sup>3</sup>/g ตามลำดับ จะเห็นว่า BLTR จะให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุนสูงสุด และสูงกว่า BSCG ที่ผลิตขึ้นภายใต้งานวิจัยนี้ และยิ่งสูงกว่าถ่านกากกาแฟ จากงานวิจัยของณรงค์พร ผึ้งวิวัฒน์, 2565 [9] และ BSCG : BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรรูพรุน สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ BSCG ซึ่งถือเป็นการปรับปรุงคุณภาพ BSCG ได้ทางหนึ่ง

สำหรับค่าความชื้น, ค่าความเป็นกรดต่าง และค่าการนำไฟฟ้า ของถ่านชีวภาพที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ มีค่าอยู่ในช่วง ค่ามาตรฐานสำหรับการนำถ่านชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงดิน [11]

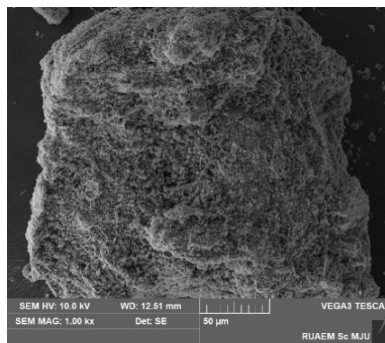
ด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพ ที่แสดงตามภาพที่ 3 จะเห็นว่า BSCG มีลักษณะเป็นก้อนมีผิวขรุขระ พื้นผิวมีแผ่นเกล็ดเรียงตัวสลับซับซ้อนกันเกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ แต่สำหรับ BLTR จะมีลักษณะเป็นผิวขรุขระที่สุด โดยเมื่อพิจารณาจากภาพซึ่งใช้กำลังขยาย 1,000 เท่า จะเห็นเป็นลักษณะขุยเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งเป็นเพราะ LTR เป็นกากที่ ผ่านการสกัดสารสำคัญด้วยกระบวนการย่อยด้วยตัวทำละลายและผ่านความร้อน ทำให้เซลล์แตก เมื่อนำมาทำเป็นถ่านชีวภาพ ถ่านที่ได้มีลักษณะถูกย่อยเป็นขุยเล็ก ๆ มีพื้นที่ผิวสูง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ BET ที่ได้ค่าสูงที่สุด (ตามตาราง ที่ 3) และเมื่อพิจารณา BSCG : BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 จะเห็นว่า ขุยผงเล็ก ๆ ของ BLTR จำนวนมาก จะเกาะอยู่บนพื้นผิว ของ BSCG ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน ให้แก่ BSCG ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ BET ตามตารางที่ 3 เช่นกัน ดังนั้น การไฟโพลีเมอร์ระหว่าง SCG กับ LTR จึงถือเป็นการปรับปรุงพื้นผิว และเพิ่มสมบัติบางประการ เพื่อใช้ในเชิงเกษตรกรรม และสิ่งแวดล้อมได้ทางหนึ่ง



(ก) BSCG



(ข) BSCG: BLTR (1:1)



(ค) BLTR

ภาพที่ 3 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ BSCG, BLTR และ BSCG:BLTR ที่อัตราส่วน 1:1 ที่กำลังขยาย 1,000

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองผลิตถ่านชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสร่วม ระหว่าง SCG ซึ่งเก็บรวบรวมจากร้านกาแพ่ทั่วไปในจังหวัดเชียงใหม่ และ LTR ที่ผ่านกระบวนการสกัดสารมูลค่าสูงออกไปแล้ว หรืออย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งจากผลวิเคราะห์เชิงเคมี, เชิงคุณภาพ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชีวภาพที่ได้ ทำให้ทราบว่า การไพโรไลซิสร่วม สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพถ่านชีวภาพได้ นอกจากนี้ ยังมีความน่าสนใจและมีความเป็นไปได้ที่จะนำตัวอย่างถ่านชีวภาพที่ได้ไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากถ่านชีวภาพค่าความร้อนมากพอสำหรับใช้ประโยชน์เชิงพลังงาน หรือมีค่า pH และ EC อยู่ในช่วงค่ามาตรฐานที่จะใช้ประโยชน์ในเชิงเกษตรกรรมอีกด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ ขอขอบคุณทุน Fundamental Fund 2022, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้สนับสนุนการทำวิจัย และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยสาหร่ายและไซยาโนแบคทีเรีย คณะวิทยาศาสตร์ และหน่วยวิจัยความหลากหลายของสาหร่ายและแพลงก์ตอน สถาบันวิจัยพหุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนวัตถุดิบจากไซยาโนแบคทีเรีย *Leptolyngbya* sp. สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้



## เอกสารอ้างอิง

- [1] Kelkar, S., Saffron, C.M., Chai, L., Bovee, J., Stuecken, T.R., Garedeew, M., Li, Z. and Robert M. Kriegel, R.M. (2015). Pyrolysis of spent coffee grounds using a screw-conveyor reactor. **Fuel Processing Technology**. 137, 170-178.
- [2] ณัชพล สายหยุด ธรณิศวรรค์ ดิทยาพร และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์. (2563) “การวิเคราะห์สมบัติถ่านชีวภาพจากสาหร่ายชุมชน/กากกาแฟภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส”, ใน การประชุมวิชาการ เรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อน และกระบวนการ ครั้งที่ 19, วันที่ 12-13 มีนาคม 2563 ณ เจ้าหลาว คาบาน่า รีสอร์ท จังหวัดจันทบุรี, 378-383
- [3] สำนักงานเกษตรและสหกรณ์จังหวัดตาก กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ข้อมูลสินค้าจังหวัดตาก ปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 “กาแฟ” สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2566, จาก <https://www.opsmoac.go.th>.
- [4] ศูนย์วิจัยระยะเพื่ออุตสาหกรรมอาหาร. ตลาดกาแฟในประเทศไทย ปี 2564 สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2566, จาก <https://fic.nfi.or.th/market-intelligence-detail.php?smid=364>
- [5] Chantra Tongcumpou, C., Parnuwat Usapein, P., Nattapong Tuntiwattapanun, N. (2019). Complete utilization of wet spent coffee grounds waste as a novel feedstock for antioxidant, biodiesel, and bio-char production. **Industrial Crops & Products**. 138, 111484.
- [6] Pumas, C., Peerapornpisal, Y., Vacharapiyasophon, P., Leelapornpisid, P., Walailuck Boonchum, W., Ishii, M. and Khanongnuch, C. (2012). Purification and characterization of a thermostable phycoerythrin from hot spring cyanobacterium *Leptolyngbya* sp. KC45. **International Journal of Agriculture & Biology**. 14, 121–125.
- [7] Saiyud, N., Deethayat, T., Asanakham, A., Kamopas, W., Kiatsirirot, T. (2014). Biochar production from co-pyrolysis of coffee ground and native microalgae consortium. **Biomass Conversion and Biorefinery**. 14, 6855-6863.
- [8] ณัชพล สายหยุด. (2565). การผลิตถ่านชีวภาพภายใต้กระบวนการไพโรไลซิสจากสาหร่ายชุมชนร่วมกับผงกาแฟใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [9] ณรงค์พร ผังวิวัฒน์. (2565). การผลิตถ่านชีวภาพจากกากกาแฟในปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งที่มีลูกบอลโลหะช่วยกระจายความร้อน. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [10] Lanjewar, R., Thakur, L.S., Parmar, H., Varma, A.K. and Hinge, K.V. (2019). A review on physicochemical characterization and pyrolysis kinetics of biomass. **International Journal of Management, Technology and Engineering**. IX(III), 4595 4617.
- [11] Tangmankongworakoon, N. (2019). An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**. 8(1), S37–S44.
- [12] กองศึกษาและพัฒนาไฟฟ้าฐาน กระทรวงพลังงาน. พลังงานชีวมวล สืบค้นเมื่อ 9 ตุลาคม 2566, จาก <https://energy-prod.jigsawgroups.work/th/attitude-documentation/>.

การจำลองเชิงตัวเลขรูปแบบและตำแหน่งการไหลของอากาศที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์  
กังหันก๊าซขนาดเล็ก

Numerical Simulation of the Air Flow Pattern and Position Entering  
the Combustor of a Micro Gas Turbine Engine

นิวัฒน์ สุขสาม<sup>1</sup> ทรงธรรม เหล่าสุวรรณ<sup>2\*</sup> เกษมศิลป์ อ่อนทอง<sup>3</sup> และกิตติภาส วสินารมย์<sup>4</sup>  
Niwat Suksam<sup>1</sup> Songtam Laosuwan<sup>2\*</sup> Kasemsil Onthong<sup>3</sup> and Kittipass Wasinarom<sup>4</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครปฐม 73170

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

<sup>3</sup> ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
กรุงเทพมหานคร 10800

<sup>4</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
<sup>1</sup>Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,  
Nakhon Pathom 73170

<sup>2</sup>Mechanical and Mechatronic Engineering, Faculty of Engineering, Pathumwan Institute of Technology, Bangkok 10330

<sup>3</sup>Teacher Training in Mechanical Engineering, Faculty of Technical Education,  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800

<sup>4</sup>Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520

<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 08-72258156. E-mail address: songtam@pit.ac.th

Received: 25 July 2024, Revised: 14 November 2024, Accepted: 17 November 2024, Published online: 30 December 2024

## Abstract

The aim of this study is to investigate the impact of different air inlet patterns and locations on combustion within a micro gas turbine combustor. Utilizing the commercial computational fluid dynamics software, Ansys Fluent 2024 R1, three distinct scenarios: 1) a straight flow inlet positioned at the front of the combustor, 2) a tangential inlet situated at the front (inducing swirling flow), and 3) a tangential inlet positioned in the middle of the combustor were examined. Propane was supplied at 50 kW with an equivalent ratio of 0.3 for all scenarios. The findings indicated similar amount of air distribution pass through the swirl vanes for the first and second cases which were 15% and 16% respectively, whereas the third case showed significantly less air distribution passing through the swirl vanes of 9%. Furthermore, the first scenario exhibited the most consistent temperature and gas species distribution within the combustor.

**Keywords:** Flow pattern, Combustor, Micro gas turbine engine, Computational fluid dynamics

## บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของรูปแบบและตำแหน่งทางเข้าของอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ด้วยวิธีการจำลองทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยโปรแกรม Ansys Fluent 2024 R1 รูปแบบและตำแหน่งทางเข้าของอากาศที่ทำการศึกษามีสามรูปแบบดังนี้ ไหลตรงเข้าสู่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้, ไหลในแนวสัมผัสเข้าที่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้ และไหลในแนวสัมผัสเข้าที่ตรงกลางของห้องเผาไหม้ ที่สภาวะอัตราทางความร้อนของเชื้อเพลิงโพรเพนที่ป้อนเข้า 50 kW และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.3 จากผลการจำลองพบว่ารูปแบบการไหลตรงเข้าสู่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้ และไหลในแนวสัมผัสเข้าที่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้ มีอากาศที่ไหลเข้าสู่ไบบิตเพื่อให้เกิดการไหลหมุนควงใกล้เคียงกันที่ 15% และ 16% ตามลำดับ แต่สำหรับการไหลในแนวสัมผัสเข้าที่ตรงกลางของห้องเผาไหม้มีค่าเพียง 9% สำหรับการกระจายตัวของอุณหภูมิและองค์ประกอบของก๊าซภายในห้องเผาไหม้ การไหลตรงเข้าสู่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้นั้นสม่ำเสมอมากที่สุด เนื่องจากการไหลของอากาศที่เข้าสู่บริเวณต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้นั้นมีความสม่ำเสมอ

**คำสำคัญ:** รูปแบบการไหล, ห้องเผาไหม้, เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

## บทนำ

ในปัจจุบันพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณลดลงทำให้ราคาเชื้อเพลิงฟอสซิลเพิ่มสูงขึ้น และการใส่ใจต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมนุษย์ได้รับผลกระทบอย่างชัดเจนจากการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมอันมีส่วนมาจากมลภาวะจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ระบบพลังงานแบบกระจาย (distributed energy systems, DES) สามารถช่วยให้การใช้พลังงานมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้ [1] เครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กที่มีกำลังอยู่ในช่วง 3-300 kW ได้มีการใช้งานแพร่หลายในระบบพลังงานแบบกระจาย และระบบร่วมผลิตกำลังและความร้อน (combined heat and power, CHP) [2] เนื่องจากเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กมีขนาดกะทัดรัด น้ำหนักเบา ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาต่ำ และปลดปล่อยมลพิษต่ำ ทำให้ได้รับความสนใจสำหรับใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบผลิตกำลังไฟฟ้าแบบกระจาย ในปัจจุบันเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลาย ตั้งแต่เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง เช่น ก๊าซธรรมชาติและก๊าซปิโตรเลียมเหลว ไปจนถึงเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ เช่น ก๊าซชีวภาพและก๊าซชีวมวล [3]

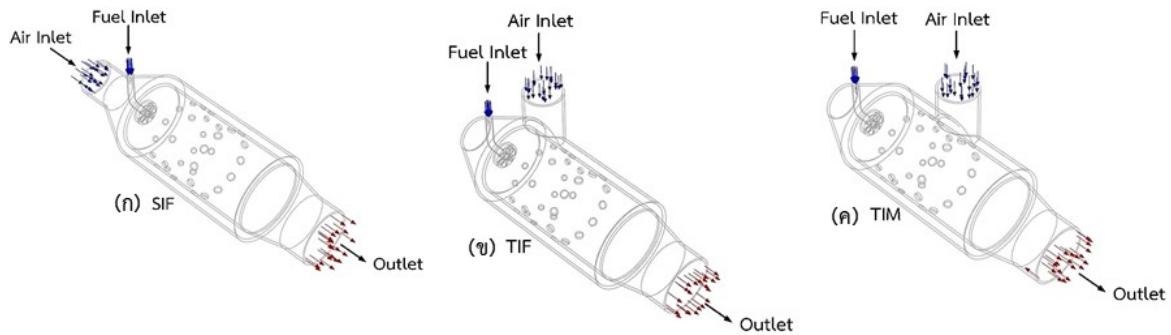
สำหรับการนำตัวอัดบรรจุอากาศเทอร์โบของรถยนต์ มาเป็นคอมเพรสเซอร์และกังหันของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กนั้นมีความน่าสนใจเนื่องจากสามารถหาได้ง่ายและต้นทุนต่ำ [4] ที่ผ่านมามีงานวิจัยของ บุญท่ม ชนะพันธ์ และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ [5] ได้ศึกษาถึงลักษณะห้องเผาไหม้ชั้นใน (liner), คอมเพรสเซอร์ และกังหัน สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก จากผลการศึกษาพบว่าห้องเผาไหม้ชั้นในที่มีพื้นที่รู้ในช่วงการเผาไหม้บริเวณปฐมภูมิ (primary-zone), บริเวณทุติยภูมิ (secondary zone) และบริเวณเจือจาง (dilution zone) เท่ากับ 11%, 31.6% และ 57.4% ตามลำดับ นั้นมีความเหมาะสม สำหรับคอมเพรสเซอร์ควรเลือกใช้ที่มีค่า A/R สูง ส่วนกังหันควรเลือกใช้ที่มีค่า A/R ต่ำ จากการจำลองพบว่าคอมเพรสเซอร์รุ่น GT3582R และกังหันรุ่น GT4508R ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ 9.39% กิตติภาส วศิ-นารมณ และ จารูวัตร เจริญสุข [6] ได้ศึกษาโดยการจำลองเชิงตัวเลขของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กขนาด 200 kW ใช้เชื้อเพลิงก๊าซโพรเพนที่มีอัตราการไหล 0.0147 kg/s อากาศที่ไหลเข้าห้องเผาไหม้มีอัตราการไหล 1.33 kg/s และอุณหภูมิ 737 K และความดันที่ทางออกจากห้องเผาไหม้อยู่ที่ 4 atm จากผลการจำลองที่ใช้ปฏิกิริยาการเผาไหม้หนึ่งชั้น

พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางออกจากห้องเผาไหม้เท่ากับ 1201 K ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้ออกแบบไว้ สำหรับกรณีที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีสองขั้นนั้น พบว่าเชื้อเพลิงสามารถเผาไหม้หมดภายในบริเวณปฐมภูมิ แต่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออก 230 ppm และมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ 90% Van der Merwe และคณะ [7] ได้ศึกษาการนำตัวอัดบรรจุอากาศเทอร์โบมาเป็นเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก โดยการจำลองเชิงตัวเลขของเครื่องยนต์ที่มีสองกังหันที่ต่อขนานกัน คือกังหันตัวแรกใช้ในการขับเคลื่อนคอมเพรสเซอร์ และกังหันตัวที่สองใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กังหันตัวที่สองนี้มีทั้งแบบอุณหภูมิต่ำและแบบอุณหภูมิสูง พวกเขามีการศึกษาทั้งแบบติดตั้งและไม่ติดตั้งรี-คูเพอเรเตอร์ และศึกษาทั้งแบบพิจารณาและไม่พิจารณาการสูญเสียความดัน จากผลการจำลองของพวกเขาพบว่าเมื่อติดตั้งรี-คูเพอเรเตอร์และพิจารณาการสูญเสียความดันนั้น กรณีกังหันตัวที่สองที่มีอุณหภูมิต่ำให้ผลประสิทธิภาพที่ดีกว่ากังหันตัวที่สองที่มีอุณหภูมิสูง Silva และ Lacava [8] ได้นำเสนอแนวคิดในการออกแบบห้องเผาไหม้แบบไหลย้อนกลับของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ที่พัฒนาจากตัวอัดบรรจุอากาศเทอร์โบของรถยนต์ พวกเขาเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิกส์ของระบบ โดยมีพื้นฐานจากแผนภาพสมรรถนะของคอมเพรสเซอร์และสมรรถนะของห้องเผาไหม้ที่ต้องการ ซึ่งนำไปใช้ในขั้นตอนการออกแบบ และพวกเขาได้แสดงค่าขนาดของห้องเผาไหม้ที่คำนวณได้ He และ Kim [9] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขเพื่อออกแบบรูหัวฉีดเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก พวกเขาได้มีการออกแบบรูหัวฉีดให้มีรูปร่างที่แตกต่างกันสี่แบบ โดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์สามค่า ได้แก่ การแทรกซึม การแพร่ และปริมาณเชื้อเพลิงที่ฉีดออกไป จากการวิเคราะห์ผลของรูหัวฉีดทั้งสี่แบบ พบว่ารูของหัวฉีดที่มีลักษณะโค้งมนที่ทางเข้านั้นมีลักษณะการฉีดที่ดีที่สุด สำหรับการผสมกันที่ดีของก๊าซในห้องเผาไหม้ และโดยเฉพาะอัตราการไหลเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ฉีดออกไปเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้กำลังของเครื่องยนต์เพิ่มขึ้นมากกว่า 5%

ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็กขึ้นอยู่กับการจัดสรรปริมาณอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้และลักษณะการไหล การศึกษาการไหลและการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้จึงมีความสำคัญ เพื่อช่วยในการออกแบบห้องเผาไหม้สำหรับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของรูปแบบและตำแหน่งทางเข้าของอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ที่ส่งผลต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่นำเสนอหัวข้อนี้โดยเฉพาะ

## วิธีการวิจัย

การจำลองเชิงตัวเลขเพื่อศึกษาผลของรูปแบบและตำแหน่งทางเข้าของอากาศที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ต่อการเผาไหม้ของเครื่องยนต์นั้น แบบจำลองห้องเผาไหม้แสดงในภาพที่ 1 มีลักษณะเป็นทรงกระบอก รูปแบบและตำแหน่งทางเข้าของอากาศที่ทำการศึกษา มีสามรูปแบบดังนี้ อากาศไหลตรงเข้าสู่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้ (straight flow inlet positioned at the front, SIF), อากาศไหลเข้าในแนวสัมผัสที่ตรงกลางของห้องเผาไหม้ (tangential flow inlet positioned at the front, TIF) และอากาศไหลเข้าในแนวสัมผัสที่ตรงกลางของห้องเผาไหม้ (tangential flow inlet positioned at the middle, TIM) มีหัวฉีดเชื้อเพลิงก๊าซโพรเพนที่อยู่ตรงกลางด้านหน้าของห้องเผาไหม้ซึ่งมีรูหัวฉีดหก รูอากาศที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นนอก จะกระจายแบ่งการไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นในออกเป็นสี่ส่วน คืออากาศไหลเข้าผ่านใบพัด (swirler) เพื่อทำให้เกิดการไหลหมุนควง ที่มีหัวฉีดเชื้อเพลิงอยู่ตรงกลาง อากาศไหลเข้าบริเวณปฐมภูมิผ่านรูอากาศจำนวน 12 รู ที่อยู่รอบห้องเผาไหม้ชั้นในใกล้กับด้านหน้าของห้องเผาไหม้ ถัดมาอากาศไหลเข้าบริเวณทุติยภูมิผ่านรูอากาศจำนวนแปดรู และอากาศไหลเข้าบริเวณเจ็จางผ่านรูอากาศสำหรับเจ็จางอุณหภูมิให้ลดต่ำลงจำนวน 12 รู ที่อยู่ใกล้กับด้านหลังของห้องเผาไหม้



ภาพที่ 1 แบบจำลองทั้งสามกรณี ก) SIF อากาศไหลตรงเข้าสู่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้, ข) TIF อากาศไหลเข้าในแนวสัมผัสที่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้ และ ค) TIM อากาศไหลเข้าในแนวสัมผัสที่ตรงกลางของห้องเผาไหม้

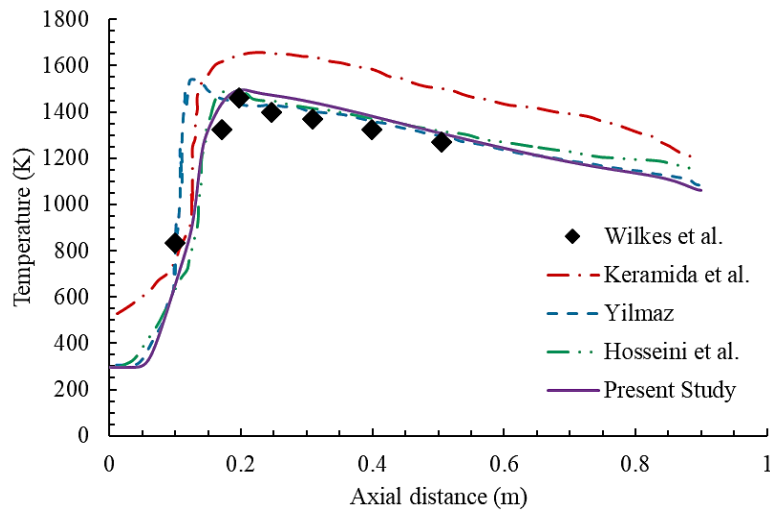
ห้องเผาไหม้นี้ทำงานที่สภาวะอัตราทางความร้อนของเชื้อเพลิงโพรเพนที่ป้อนเข้า 50 kW และอัตราส่วนสมมูลเท่ากับ 0.3 อากาศไหลเข้ามาที่อัตราส่วนความดัน 1.5 ต่อ 1 โดยในการจำลองเป็นแบบคงตัว กำหนดภาวะความดัน (operating pressure) อยู่ที่ 151987.5 Pa (1.5 atm) การจำลองเชิงตัวเลขในงานนี้ใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ Ansys Fluent 2024 R1 ขอบเขตของการคำนวณหัวเผาและห้องเผาไหม้เป็นแบบสามมิติที่แสดงในภาพที่ 1 การจำลองการไหลเป็นแบบ Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) โดยใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน realizable k-epsilon model การแผ่รังสีความร้อนใช้แบบจำลอง P1 สำหรับค่าการนำความร้อนของก๊าซใช้แบบจำลอง weighted sum of gray gas model (WSGGM) การเผาไหม้ใช้แบบจำลอง eddy dissipation ที่มีปฏิกิริยาเคมีของการเผาไหม้เชื้อเพลิงก๊าซโพรเพนแบบสองขั้น (2-step global reaction) ดังแสดงในสมการที่ 1 และ 2 สำหรับขอบเขตของการจำลองในทุกกรณีศึกษาแสดงในตารางที่ 1



ตารางที่ 2 เงื่อนไขที่ขอบเขตของการจำลอง

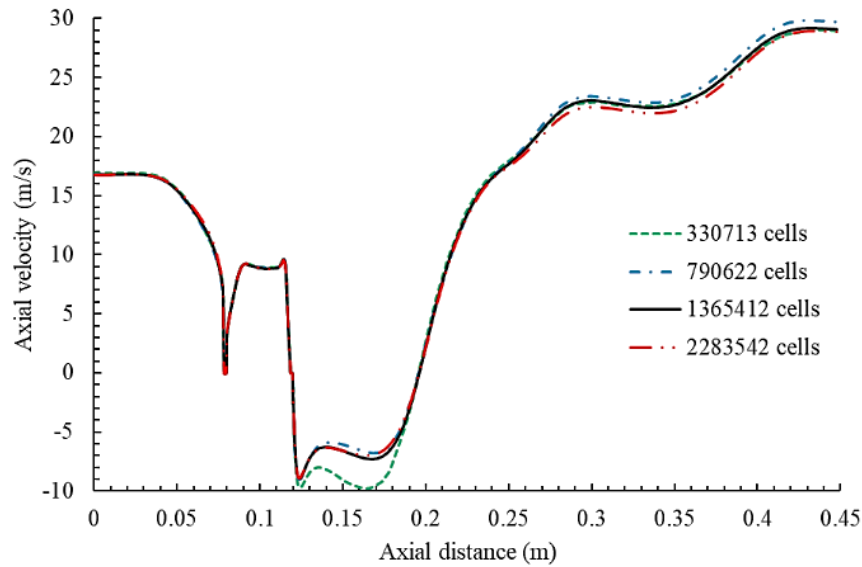
ขอบเขต	เงื่อนไข
ทางเข้าของอากาศ	อัตราการไหลเชิงมวล 0.05652 kg/s อุณหภูมิ 318 K สัดส่วนเชิงโมลของออกซิเจน 0.21 สัดส่วนเชิงโมลของไนโตรเจน 0.79
ทางเข้าของเชื้อเพลิง	อัตราการไหลเชิงมวล 0.001085 kg/s อุณหภูมิ 298.15 K สัดส่วนเชิงโมลของโพรเพน 1
ผนังห้องเผาไหม้	อุณหภูมิ 373 K สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน 0.7
ทางออกของไอเสีย	ความดันเกจ 0 Pa

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลอง จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองของห้องเผาไหม้ที่มีกริลไหลหมุนควงจากงานของ Wilkes และคณะ [10] และผลการจำลองของ Keramida และคณะ [11], Yilmaz [12] และ Hosseini และคณะ [13] ผลการเปรียบเทียบแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งผลของอุณหภูมินั้น ให้ผลที่สอดคล้องและใกล้เคียงกับผลการทดลองและผลการจำลองจากงานวิจัยดังกล่าว



ภาพที่ 2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบจำนวนเมช (mesh) ที่เหมาะสม สำหรับการจำลองเชิงตัวเลขในครั้งนี้ได้ใช้เมชแบบหลายเหลี่ยม (polyhedral meshes) โดยทำการทดสอบกับห้องเผาไหม้กรณี SIF โดยสร้างเมชขึ้นสี่ขนาดคือ 330713 cells, 790622 cells, 1365412 cells และ 2283542 cells จากผลการจำลองความเร็วในแนวแกนตามแนวเส้นศูนย์กลางของห้องเผาไหม้ที่ได้จากเมชแต่ละขนาดดังแสดงในภาพที่ 3 พบว่าผลของขนาดเมช 330713 cells กับเมชขนาด 790622 cells นั้น ความเร็วในแนวแกนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง 0.12-0.19 m แต่เมื่อเพิ่มขนาดเมชจาก 1365412 cells เป็น 2283542 cells พบว่าความเร็วในแนวแกนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นในการจำลองเชิงตัวเลขในงานนี้ กรณี SIF จึงเลือกใช้เมชขนาด 1365412 cells เพื่อให้ผลการจำลองที่ถูกต้องและประหยัดทรัพยากรคอมพิวเตอร์และเวลาในการคำนวณ สำหรับการสร้างเมชในกรณี TIF และ TIM ก็ใช้แบบเดียวกับกรณี SIF แต่เนื่องจากรูปแบบและตำแหน่งทางเข้าของห้องเผาไหม้ที่แตกต่างกันทำให้กรณี TIF และ TIM มีขนาดของเมชเท่ากับ 1382733 cells และ 1378163 cells ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างจากกรณี SIF เล็กน้อย

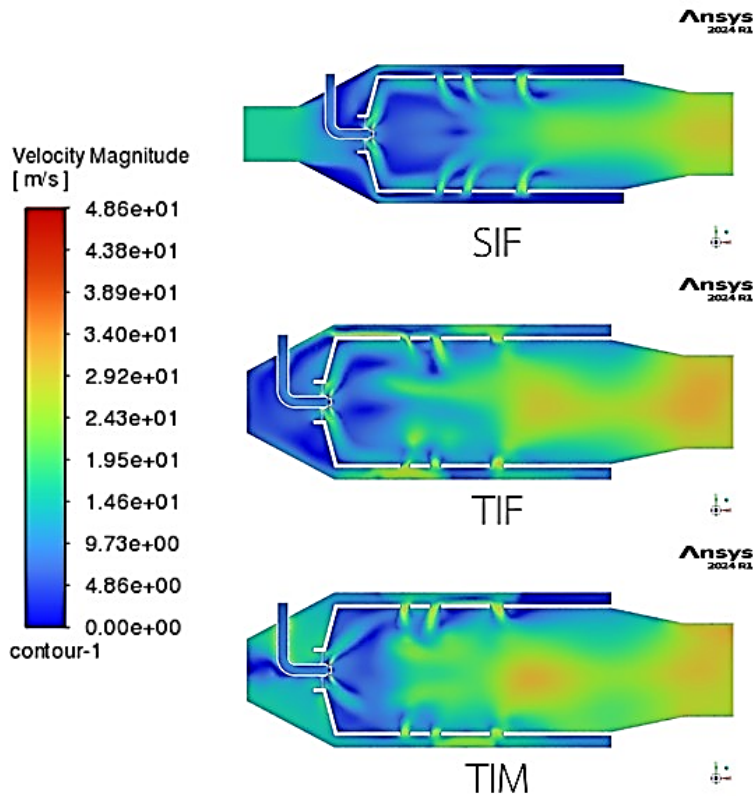


ภาพที่ 3 ขนาดของเมชต่อความเร็วในแนวแกน

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากภาพที่ 4 พบว่าขนาดของความเร็วภายในห้องเผาไหม้ชั้นในของกรณี SIF มีลักษณะสมมาตรรอบแกนกลางของห้องเผาไหม้ ลักษณะความเร็วหลังออกจากใบพัดในกรณี SIF และ TIF นั้นคล้ายกัน แต่กรณี TIM มุมของความเร็วที่ไหลเข้าเหวี่ยงกระจายออกน้อยกว่า หรือมีการไหลหมุนควงต่ำกว่า สอดคล้องกับการกระจายอัตราการไหลที่แสดงในตารางที่ 2 ที่พบว่ากรณี SIF และ TIF มีอัตราการไหลกระจายไปแต่ละบริเวณของห้องเผาไหม้ชั้นในใกล้เคียงกัน แต่กรณี TIM ตรงตำแหน่งหลังการไหลผ่านใบพัดพบว่าการกระจายมวลอากาศคิดเป็น 9% ของอากาศทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ซึ่งน้อยกว่ากรณี SIF และ TIF ที่มีค่า 15% และ 16% ตามลำดับ สำหรับกรณี TIF มากกว่ากรณี SIF อยู่เล็กน้อย เนื่องจากกรณี TIF อากาศไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นนอกแบบหมุนควงโดยมีทิศทางการหมุนควงสอดคล้องกับใบพัด แต่อากาศไหลเข้าห้องเผาไหม้ชั้นในไม่สม่ำเสมอ ต่างจากกรณี SIF ที่อากาศไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นนอกโดยไม่มีการหมุนควงแต่มีการกระจายการไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นในที่สม่ำเสมอ ทำให้กรณี SIF มีความเร็วของการไหลย้อนกลับที่บริเวณปฐมภูมิสูงถึง 9.24 m/s ซึ่งสูงกว่ากรณี TIF ส่วนกรณี TIM มีการไหลย้อนกลับต่ำที่สุด สำหรับมวลอากาศที่ไหลผ่านรูปฐมภูมิของห้องเผาไหม้ทั้งหมดนั้นกรณี SIF และ TIF อยู่ที่ 20% และ 19% ตามลำดับ สำหรับกรณี TIM มีค่ามากที่สุดที่ 23% ซึ่งจากการคำนวณพบว่ามวลรวมของอากาศที่ผ่านใบพัด ในส่วนหน้าของห้องเผาไหม้ชั้นในรวมกับมวลอากาศที่ไหลผ่านรูอากาศปฐมภูมิมิค่าสูงกว่ามวลอากาศที่ต้องการเพื่อให้เกิดการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่สมบูรณ์ (stoichiometric air) สำหรับมวลอากาศที่เข้ารูอากาศทุติยภูมิ กรณี SIF อยู่ที่ 19% และกรณี TIF กับ TIM มีค่าเท่ากันอยู่ที่ 18% สำหรับอากาศที่ไหลเข้าที่รูอากาศเจือจาง (dilution hole) ที่ส่วนท้ายสุดของห้องเผาไหม้ พบว่ากรณี TIM มีสัดส่วนมวลอากาศไหลผ่านมากที่สุดอยู่ที่ 50% เนื่องจากช่องทางเข้าอากาศอยู่ใกล้กับรูอากาศเจือจางมากกว่ากรณี SIF และ TIF ซึ่งพบว่ามีสัดส่วนมวลอากาศไหลผ่านอยู่ที่ 46% และ 47% ตามลำดับ และเห็นได้ว่าความเร็วอากาศที่ไหลผ่านรูอากาศเจือจางในกรณี TIM มีความเร็วสูงกว่ากรณี SIF และ TIF สำหรับค่าความดันตกคร่อมระหว่างทางเข้าอากาศกับทางออกพบว่ากรณี SIF, TIF และ TIM มีค่าอยู่ที่ 480 Pa, 1148 Pa และ 1094 Pa ตามลำดับ เหตุผลที่กรณี SIF มีความดันตกคร่อมต่ำที่สุดเนื่องจากเป็นการไหลตรงจึงมีการสูญเสียพลังงานในการไหลต่ำ สำหรับกรณี TIF และ TIM มีความดันตกคร่อมใกล้เคียงกันแต่สูงกว่ากรณี SIF มากกว่าสองเท่า เนื่องจากเป็นการไหลเข้าแบบหมุนควงรอบห้องเผาไหม้ชั้นใน ทำให้มีการสูญเสียพลังงานมากกว่า





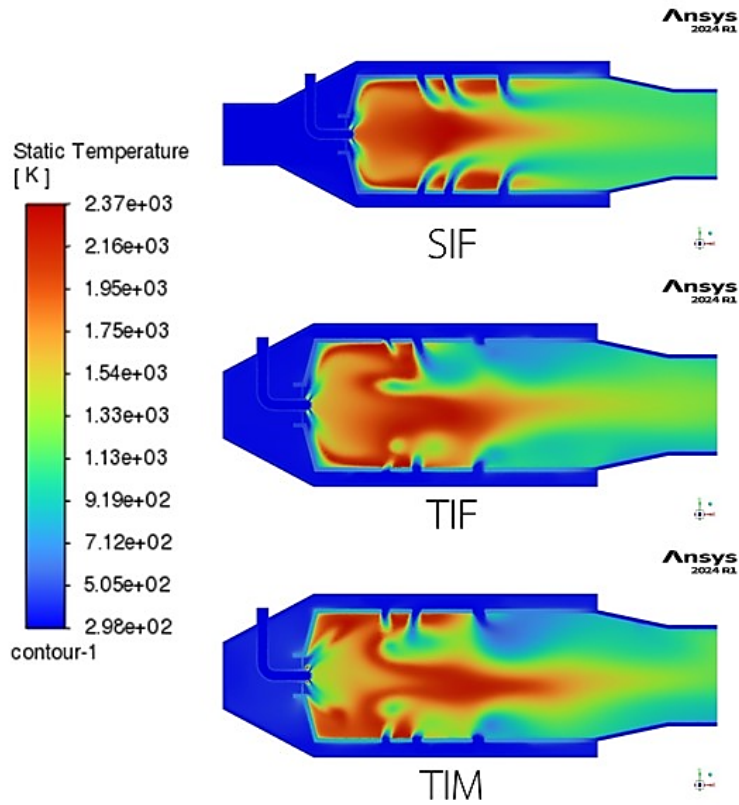
ภาพที่ 4 ขนาดของความเร็วภายในห้องเผาไหม้แต่ละแบบ

ตารางที่ 2 อัตราการไหลเชิงมวลและเปอร์เซ็นต์ของอากาศที่ไหลผ่านแต่ละช่องทางเข้าสู่ห้องเผาไหม้ชั้นใน

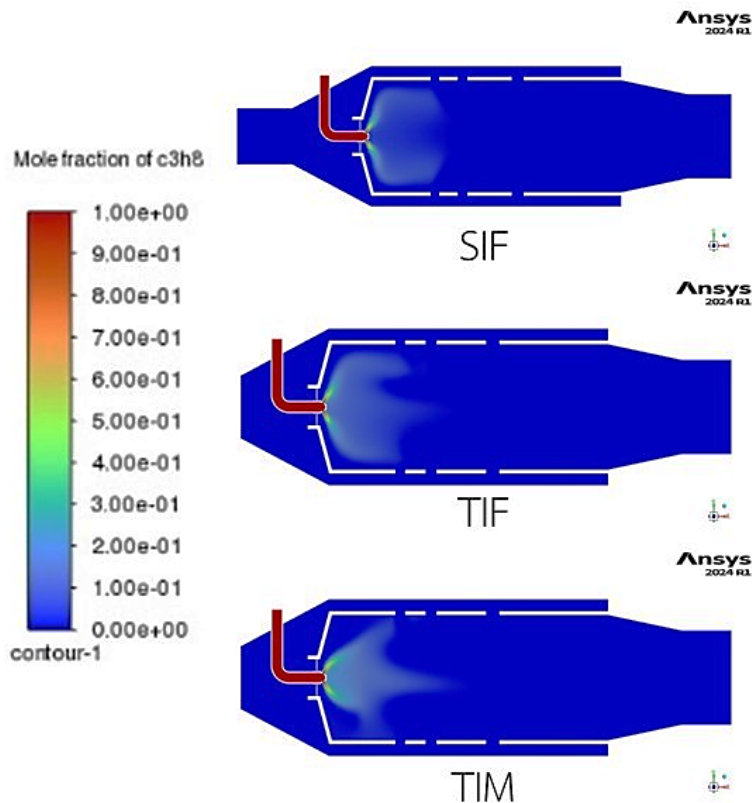
ช่องทางเข้า	ไหลตรงเข้าสู่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้ (SIF)	ไหลในแนวสัมผัสที่ด้านหน้าของห้องเผาไหม้ (TIF)	ไหลในแนวสัมผัสที่ตรงกลางของห้องเผาไหม้ (TIM)
Swirl air	0.00845 kg/s (15%)	0.00888 kg/s (16%)	0.00508 kg/s (9%)
Primary air	0.01126 kg/s (20%)	0.01088 kg/s (19%)	0.01294 kg/s (23%)
Secondary air	0.01054 kg/s (19%)	0.01014 kg/s (18%)	0.01010 kg/s (18%)
Dilution air	0.02627 kg/s (46%)	0.02662 kg/s (47%)	0.02840 kg/s (50%)

จากภาพที่ 5 เห็นได้ว่ากรณี SIF อุณหภูมิของก๊าซในบริเวณปฐมภูมิมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี TIF และ TIM เนื่องจากการไหลหมุนวนและการไหลย้อนกลับเข้าสู่หัวเผาได้มากกว่ากรณีอื่น อุณหภูมิของก๊าซที่แกนกลางของบริเวณปฐมภูมิในกรณี SIF มีอุณหภูมิสูงถึง 2325 K ซึ่งสูงกว่ากรณี TIF และ TIM สำหรับกรณี TIM มีอุณหภูมิต่ำที่บริเวณปฐมภูมิเนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านใบพัดมีสัดส่วนน้อยจึงทำให้การไหลย้อนกลับมาที่หัวเผาค่า การเผาไหม้ที่ปลดปล่อยความร้อนออกมาจึงเกิดขึ้นห่างออกไปจากหัวเผา อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ทางออกจากห้องเผาไหม้ในกรณี TIM จึงสูงกว่ากรณีอื่นโดยเห็นได้ว่าอุณหภูมิสูงบริเวณแกนกลางของห้องเผาไหม้ สำหรับในกรณี SIF อุณหภูมิลดต่ำลงเมื่อการไหลผ่านบริเวณรูทางเข้าของอากาศเจือจางไปเล็กน้อย ถึงแม้ว่ากรณี SIF จะมีอากาศที่ไหลเข้ามาที่รูอากาศบริเวณเจือจางน้อยกว่ากรณี TIF และ TIM สำหรับกรณี TIF อุณหภูมิของก๊าซลดต่ำลงเมื่อไหลผ่านบริเวณรูทางเข้าอากาศเจือจางไปเป็นระยะที่มากกว่ากรณี SIF ส่วนกรณี TIM อุณหภูมิของก๊าซลดลงเมื่อการไหลต้องไ้ระยะทางเกือบถึงทางออกจากห้องเผาไหม้ ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณอากาศที่ไหลเข้าบริเวณเจือจางมากกว่ากรณีอื่น แต่การเผาไหม้ในกรณี TIM นี้ยังเกิดขึ้นที่ปลายของบริเวณปฐมภูมิ

ภูมิภาคจากสาเหตุดังกล่าวทำให้อุณหภูมิสูงสุดของก๊าซที่ทางออกของกรณี SIF, TIF และ TIM มีค่าเท่ากับ 1176 K, 1291 K และ 1361 K ตามลำดับ



ภาพที่ 5 การกระจายอุณหภูมิภายในห้องเผาไหม้แต่ละแบบ

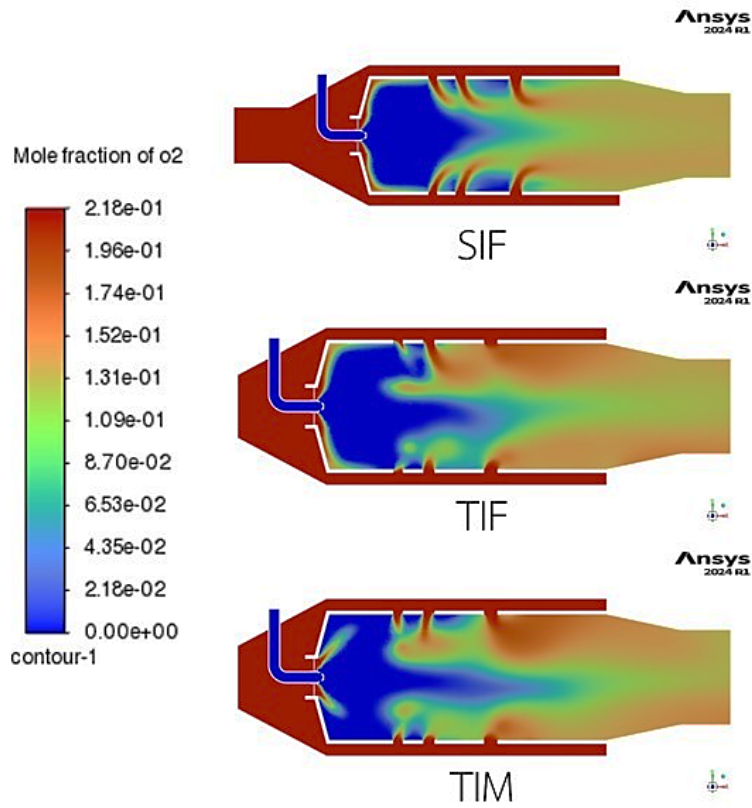


## ภาพที่ 6 ความเข้มข้นของเชื้อเพลิงก๊าซโพรเพนภายในห้องเผาไหม้แต่ละแบบ

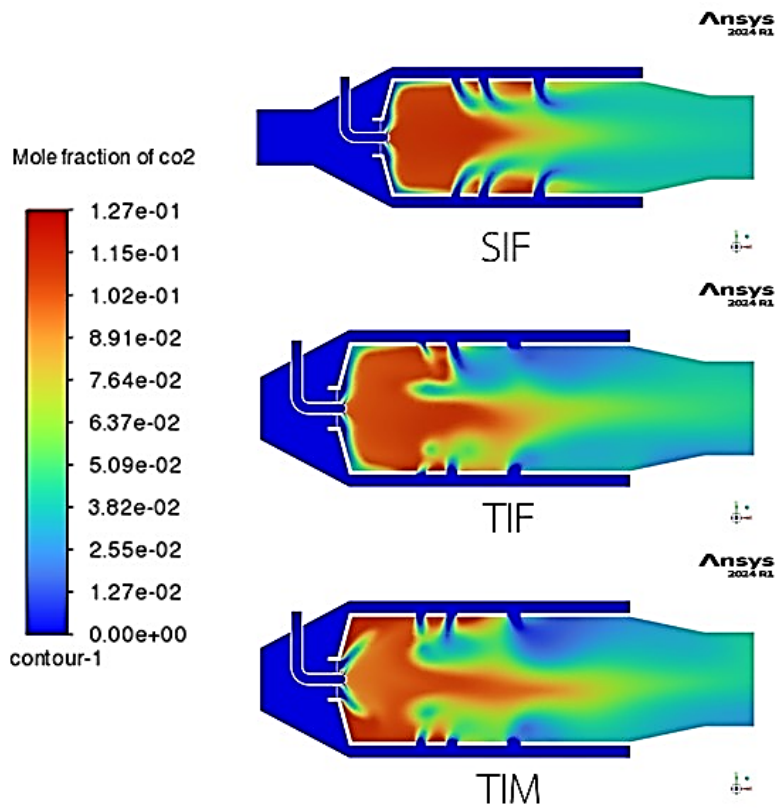
จากภาพที่ 6 แสดงการกระจายตัวความเข้มข้นของเชื้อเพลิงก๊าซโพรเพนที่ฉีดออกจากหัวฉีด ในกรณี SIF นั้นเชื้อเพลิงได้ฉีดออกไปกระจายเป็นวงกว้างและถูกใช้ไปในการเผาไหม้ที่บริเวณปลูมภูมิ สำหรับกรณี TIF นั้นเชื้อเพลิงได้ฉีดออกไปกระจายเป็นวงกว้างแต่กระจายเข้าไปไกลกว่ากรณี SIF สำหรับกรณี TIM นั้นการกระจายตัวของก๊าซเป็นวงแคบกว่าแต่กระจายเข้าไปในแนวแกนของห้องเผาไหม้ชั้นในไกลกว่ากรณี SIF และ TIF ซึ่งแสดงถึงเชื้อเพลิงโพรเพนนั้นถูกใช้ไปในการเผาไหม้จนมีความเข้มข้นต่ำที่ระยะห่างจากหัวเผามากกว่ากรณี SIF และ TIF พบว่าสัดส่วนเชิงโมลของโพรเพนที่แกนกลางของห้องเผาไหม้เมื่อเข้าสู่บริเวณเจือจาง ในกรณี SIF มีค่าเพียง  $5.52e-05$  ซึ่งต่ำกว่ากรณี TIF และ TIM ที่มีค่า  $5.27e-04$  และ  $2.11e-03$  ตามลำดับ

จากภาพที่ 7 แสดงการกระจายตัวความเข้มข้นของออกซิเจน พบว่าออกซิเจนในกรณี SIF มีการกระจายตัวสมมาตรรอบแกนของห้องเผาไหม้ชั้นใน บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำของออกซิเจนเนื่องจากถูกใช้ไปในการเผาไหม้จะอยู่ในบริเวณปลูมภูมิ ที่แกนกลางบริเวณปลูมภูมิซึ่งตรงกับตำแหน่งรูทางเข้าของอากาศปลูมภูมินั้น กรณี SIF มีค่าสัดส่วนเชิงโมล ของออกซิเจนเท่ากับ  $5.73e-05$  ซึ่งต่ำกว่ากรณี TIF และ TIM ที่มีค่า  $8.74e-04$  และ  $3.19e-04$  ตามลำดับ สำหรับกรณี TIF บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำของออกซิเจนเนื่องจากถูกใช้ไปในการเผาไหม้จะเข้าไปอยู่ถึงบริเวณทุติยภูมิ ส่วนกรณี TIM บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำของออกซิเจนเนื่องจากถูกใช้ไปในการเผาไหม้จะเข้าไปอยู่ถึงบริเวณเจือจาง ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยาการเผาไหม้ของกรณี TIM เกิดขึ้นห่างจากหัวเผามากกว่ากรณี SIF และ TIF สอดคล้องกับผลที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้

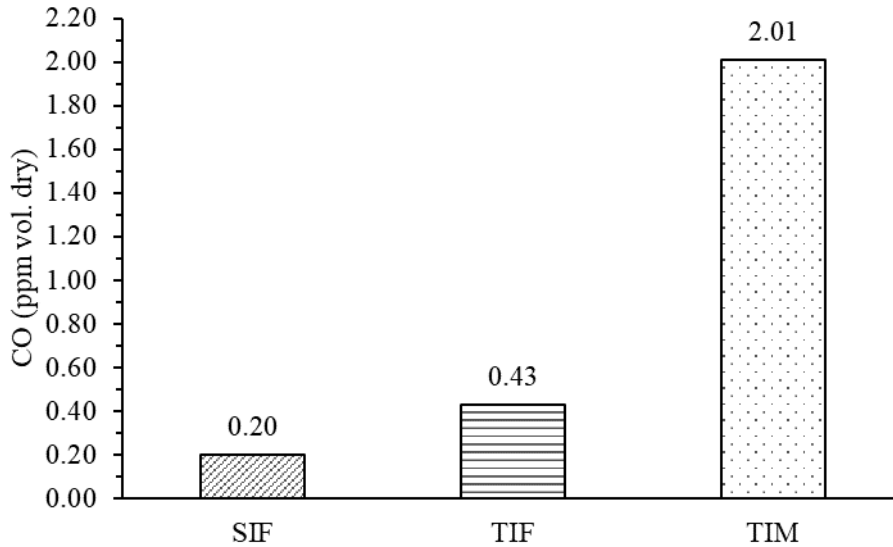
จากภาพที่ 8 แสดงการกระจายตัวความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ จะเห็นได้ว่าในกรณี SIF มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงในบริเวณปลูมภูมิและกระจายตัวสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับกรณี TIF และ TIM กรณี SIF ที่แกนกลางของบริเวณปลูมภูมิมียุทธศาสตร์สัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 0.1123 ซึ่งสูงกว่ากรณี TIF และ TIM ที่มีค่า 0.1085 และ 0.1048 ตามลำดับ สำหรับกรณี TIF มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่บริเวณปลูมภูมิลดต่ำกว่ากรณี SIF แต่มีความเข้มข้นต่ำกว่า สำหรับกรณี TIM มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่บริเวณปลูมภูมิ แต่มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ตรงบริเวณแกนกลางห้องเผาไหม้ยาวไปถึงบริเวณเจือจาง ซึ่งสอดคล้องกับผลของก๊าซโพร-เพนและออกซิเจนที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้



ภาพที่ 7 ความเข้มข้นของออกซิเจนภายในห้องเผาไหม้แต่ละแบบ



ภาพที่ 8 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภายในห้องเผาไหม้แต่ละแบบ



ภาพที่ 9 ความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของห้องเผาไหม้แต่ละแบบ

จากภาพที่ 9 แสดงความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกของห้องเผาไหม้ ซึ่งคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นสารมลพิษที่เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ พบว่าในกรณี SIF มีความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกอยู่ที่ 0.20 ppm vol. dry ซึ่งมีค่าต่ำกว่ากรณี TIF และ TIM ที่มีค่าอยู่ที่ 0.43 ppm vol. dry และ 2.01 ppm vol. dry ตามลำดับ โดยค่าความเข้มข้นของคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ทางออกนี้ แสดงถึงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของห้องเผาไหม้แต่ละแบบ คือถ้ามีการเผาไหม้ที่ดีจะมีการปลดปล่อยคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ต่ำ ดังนั้นห้องเผาไหม้กรณี SIF จึงมีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่ากรณี TIF และ TIM

### สรุปผลการวิจัย

จากผลการจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กรณี SIF มีอัตราการไหลของอากาศผ่านตัวทำให้เกิดการไหลหมุนวนคิดเป็น 15% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณี TIF ที่มีค่าเท่ากับ 16% แต่กรณี SIF เกิดการไหลหมุนวนและมีความเร็วของการไหลย้อนกลับสูงถึง 9.24 m/s ซึ่งสูงกว่ากรณี TIF และ TIM และกรณี SIF มีการกระจายการไหลที่มีความสมมาตรรอบแกนกลางของห้องเผาไหม้
2. กรณี SIF ที่แกนกลางของบริเวณหตุยภูมิก๊าซมีอุณหภูมิสูงถึง 2325 K ซึ่งสูงกว่ากรณี TIF และ TIM การกระจายตัวของอุณหภูมิในกรณี SIF สม่ำเสมอกว่าเมื่อเทียบกับกรณี TIF และ TIM เนื่องจากกรณี SIF มีการไหลหมุนวนและการไหลย้อนกลับเข้าสู่หัวเผามากกว่ากรณีอื่น
3. การกระจายตัวความเข้มข้นของเชื้อเพลิงก๊าซโพรเพน ในกรณี SIF นั้นเชื้อเพลิงได้ฉีดออกไปกระจายเป็นวงกว้างและเผาไหม้ได้ดีกว่ากรณี TIF และ TIM โดยสัดส่วนเชิงโมลของก๊าซโพรเพนที่แกนกลางของห้องเผาไหม้เมื่อเข้าสู่บริเวณเจ็จ ในกรณี SIF มีค่าเพียง  $5.52 \times 10^{-5}$  ซึ่งต่ำกว่ากรณี TIF และ TIM ที่มีค่า  $5.27 \times 10^{-4}$  และ  $2.11 \times 10^{-3}$  ตามลำดับ
4. การกระจายตัวความเข้มข้นของออกซิเจน พบว่าออกซิเจนในกรณี SIF มีการกระจายตัวสมมาตรรอบแกนของห้องเผาไหม้ชั้นใน ที่แกนกลางบริเวณปฐมภูมิซึ่งตรงกับตำแหน่งรูทางเข้าของอากาศปฐมภูมินั้น กรณี SIF มีค่าสัดส่วนเชิงโมลของออกซิเจนเท่ากับ  $5.73 \times 10^{-5}$  ซึ่งต่ำกว่ากรณี TIF และ TIM ที่มีค่า  $8.74 \times 10^{-4}$  และ  $3.19 \times 10^{-4}$  ตามลำดับเนื่องจากกรณี SIF ออกซิเจนที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาการเผาไหม้นั้นสูงกว่าในบริเวณนี้

5. กรณี SIF ที่แกนกลางของบริเวณปฐมภูมิมีค่าสัดส่วนเชิงโมลของคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึง 0.1123 ซึ่งสูงกว่ากรณี TIF และ TIM ที่มีค่า 0.1085 และ 0.1048 ตามลำดับ เนื่องจากกรณี SIF เกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงกับอากาศแล้ว ก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าในบริเวณนี้

6. กรณี SIF มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ที่ทางออกต่ำเพียง 0.20 ppm vol. dry ซึ่งต่ำกว่ากรณี TIF และ TIM ที่มีค่า 0.43 ppm vol. dry และ 2.01 ppm vol. dry ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงห้องเผาไหม้กรณี SIF มีประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูงกว่ากรณี TIF และ TIM

ดังนั้นห้องเผาไหม้ในกรณี SIF จึงเหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี TIF และ TIM สำหรับนำไปใช้กับเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก ที่พัฒนาจากตัวอัดบรรจุก๊าซเทอร์โบ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Jain, S., Roy, S., Aggarwal, A., Gupta, D., Kumar, V. and Kumar, N. (2015). "Study on the parameters influencing efficiency of micro-gas turbines: A review", **ASME Power Conference, POWER2015-49417, V001T09A006**. 28 June-2 July 2015, San Diego, California, USA.
- [2] Soares, C. (2007). **Microturbines: Applications for distributed energy systems**. Butterworth-Heinemann.
- [3] Banihabib, R., Lingstädt, T., Wersland, M., Kutne, P. and Assadi, M. (2024). Development and testing of a 100 kW fuel-flexible micro gas turbine running on 100% hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**. 49 Part B, 92-111.
- [4] Visser, W.P.J., Shakariyants, S.A. and Oostveen, M. (2011). Development of a 3 kW microturbine for CHP applications. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**. 133 (4), 042301.
- [5] บุญท่อม ชนะพันธ์ และทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2551). การวิเคราะห์สมรรถนะของเทอร์โบชาร์จเจอร์ที่นำมาใช้เป็นกังหันก๊าซขนาดเล็ก. **วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. 15 (3), 54-65.
- [6] กิตติภาส วศินารมณ และจาร์วัตร เจริญสุข (2553). "การจำลองเชิงตัวเลขของห้องเผาไหม้ในเครื่องยนต์กังหันก๊าซขนาดเล็ก (200 กิโลวัตต์)", **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24**, 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี
- [7] Van der Merwe, A.H., Le Roux, W.G. and Humphries, E.D. (2023). Parallel turbochargers for small-scale power generation. **Applied Thermal Engineering**. 235, 121410.
- [8] Silva, R.E.P. and Lacava, P.T. (2013). Preliminary design of a combustion chamber for microturbine based in automotive turbocharger. **22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)**. 3-7 November 2013, Ribeirao Preto, SP, Brazil.
- [9] He, Y. and Kim, C.-H. (2022). Effect of nozzle port shape of fuel injector of micro gas turbine engine combustor on mixture gas formation for combustion. **Fluids**. 7 (6), 184.
- [10] Wilkes, N.S., Guilbert, P.W., Shepherd, C.M. and Simcox, S. (1989). The application of Harwell-Flow 3D to combustion models. **Atomic Energy Authority Report**. Harwell, UK, Paper No. AERE-R13508.

- [11] Keramida, E.P., Liakos, H.H., Founti, M.A., Boudouvis, A.G. and Markatos, N.C. (2000). Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 43 (10), 1801-1809.
- [12] Yilmaz, İ. (2013). Effect of swirl number on combustion characteristics in a natural gas diffusion flame. **Journal of Energy Resources Technology**. 135 (4), 042204.
- [13] Hosseini, A.A., Ghodrat, M., Moghiman, M. and Pourhoseini, S.H. (2020). Numerical study of inlet air swirl intensity effect of a methane-air diffusion flame on its combustion characteristics. **Case Studies in Thermal Engineering**. 18, 100610.



# การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม

## ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

### Adsorption of Free Fatty Acids in Palm Oil Using Potassium Hydroxide-Modified Corn Cob Biochar

ศศิประภา แก้วแดง<sup>1</sup> สุรัชชัย ณัฐ จันทร์ศรี<sup>1</sup> พันธุ์ลพ สีนุธยา<sup>2</sup> รจพรรณ นิธิภูศิลป์<sup>3</sup>

วียงค์ กังวานศุภมมงคล<sup>4</sup> กนิษฐา บุญภาวนาณิชกุล<sup>4</sup> และหทัยทิพย์ สีนุธยา<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> สาขาวิชานวัตกรรมเกษตรอินทรีย์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50180

<sup>3</sup> วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50300

<sup>4</sup> ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ 114 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธินตำบลคลองหนึ่ง  
อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

<sup>1</sup>Corresponding author: E-mail address: hathaithip\_nin@cmru.ac.th

Received: 16 May 2024, Revised: 1 August 2024, Accepted: 20 December 2024, Published online: 30 December 2024

#### Abstract

Corn cob residue from agricultural harvests is often disposed of by open burning, which contributes to air pollution due to particulate matter. This research aims to produce biochar from corn cobs through pyrolysis at a temperature of 500 °C for 35 minutes and chemically modify it with potassium hydroxide (CCB-KOH) to be used as a material for adsorbing free fatty acids (FFA). The study found that using 4 molar concentrated potassium hydroxide (CCB-KOH) complies with the standard iodine adsorption values and provides a higher surface area and pore size than unmodified biochar. Additionally, when tested for the adsorption of free fatty acids in palm oil, it aligned more with the Freundlich adsorption isotherm ( $R^2 = 0.914$ ) rather than the Langmuir isotherm ( $R^2 = 0.879$ ), indicating multilayer adsorption capabilities. Kinetic studies showed consistency with the pseudo-second-order reaction model, which implies chemical adsorption.

**Keywords:** Biochar, Corn Cob, Pyrolysis, Kinetics

## บทคัดย่อ

ซังข้าวโพดที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตรมักถูกกำจัดด้วยการเผาในที่โล่ง ทำให้เกิดปัญหาฝุ่นละอองก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 35 นาที และดัดแปรด้วยสารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระ (FFA) ผลการศึกษาพบว่า การใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) เข้มข้น 4 โมลาร์ มีค่าการดูดซับไอโอดีนเป็นไปตามมาตรฐานการดูดซับ และมีพื้นผิว ขนาดรูพรุนมากกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ทำการดัดแปร นอกจากนี้เมื่อนำมาทดสอบการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม พบว่าสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช ( $R^2 = 0.914$ ) มากกว่าแบบแลงเมียร์ ( $R^2 = 0.879$ ) แสดงถึงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น และผลการศึกษาการดูดซับแบบจลนพลศาสตร์พบว่าสอดคล้องกับแบบจำลองสมการปฏิริยาอันดับสองเทียมซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี

**คำสำคัญ:** ถ่านชีวภาพ ซังข้าวโพด ไพโรไลซิส ไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์

## บทนำ

ข้าวโพดที่ถือได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจหลังการเก็บเกี่ยวข้าวโพดมีวัสดุเหลือทิ้งที่เหลือประมาณ 190,000 ตัน/ปี ประกอบไปด้วย ลำต้นข้าวโพด (ร้อยละ 43.52) เปลือกข้าวโพด (ร้อยละ 38.48) และซังข้าวโพด (ร้อยละ 18) [1] เมื่อสิ้นสุดฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิต เกษตรกรส่วนมากกำจัดวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ด้วยวิธีการเผาในที่โล่งแจ้งซึ่งก่อให้เกิดหมอกควัน และฝุ่นละออง ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของเกษตรกร อีกทั้งยังเป็นสาเหตุของการเกิดปัญหาไฟไหม้ป่าที่ยากต่อการควบคุม [2] จึงมีการส่งเสริมการนำวัสดุเหลือทิ้งทางภายหลังการเก็บเกี่ยวมาใช้ประโยชน์ เช่น นำมาอัดรีดขึ้นรูปเป็นเชื้อเพลิงแท่ง ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดสามารถนำไปใช้เป็นสารปรับปรุงดิน และเนื่องจากถ่านชีวภาพมีความเป็นรูพรุนจึงช่วยกักเก็บน้ำและแร่ธาตุได้ดี และเป็นไปตามมาตรฐานถ่านชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ทางการเกษตร [3] จากคุณสมบัติความมีรูพรุนของถ่านซังข้าวโพด ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีของวัสดุดูดซับจากธรรมชาติ จึงมีงานวิจัยต่างๆที่สนใจนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปผลิตเป็นวัสดุดูดซับ โดยเฉพาะในปัจจุบันมีการส่งเสริมการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชใช้แล้ว แต่จำเป็นต้องมีขั้นตอนการลดกรดไขมันอิสระก่อนนำมาผลิตไบโอดีเซลจึงต้องใช้เครื่องมือจำเพาะ ราคาสูง ซึ่งถ่านชีวภาพเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความสนใจนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวขรุขระ มีรูพรุนจำนวนมาก สามารถผลิตจากชีวมวลหรือสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้จากธรรมชาติ [4] จากการศึกษา พบว่าซังข้าวโพดมีสมบัติที่ดีในการใช้เป็นวัสดุดูดซับ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของวัสดุดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการกระตุ้นหรือดัดแปร ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุ โดยการดัดแปรทางเคมีมักเลือกใช้สารเคมีที่ทำได้ง่าย มีต้นทุนต่ำ และมีความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งพบว่าสามารถช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและปรับปรุงขนาดรูพรุนของวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้วัสดุมีสมบัติการดูดซับที่ดียิ่งขึ้น [5] การนำซังข้าวโพดมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เกิดความคุ้มค่าอย่างยั่งยืน

## วิธีการวิจัย

นำซังข้าวโพดไปตากแดดเพื่อลดความชื้น 2-3 วัน ทำการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ด้วยเตาขนาด 50 ลิตร เป็นเวลา 35 นาที ในสภาวะไร้ออกซิเจน จากนั้นทำการล้างถ่านชีวภาพซังข้าวโพดด้วยน้ำกลั่นจนกว่าน้ำที่ออกแช่ถ่านชีวภาพ

ซึ่งข้าวโพดจะมีค่า pH เท่ากับ 7 ทำการอบถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดที่ล้างทำความสะอาดแล้วในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการบดด้วยโกร่งบดสาร ร้อนด้วยตะแกรงขนาด 60 เมช (0.25 มิลลิเมตร) ทำการตัดแปรถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพด โดยการฝังตัวแบบแห้ง (dry impregnation) โดยการนำถ่านมาแช่กับ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่ระดับความเข้มข้น 0.1, 0.5, 1, 2, 4 และ 6 M และนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเผาด้วยเตา muffler furnace ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง รอให้เย็นลงตามอุณหภูมิห้อง และล้างถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยสารเคมีด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ไหลผ่านถ่านจะมีค่า pH เท่ากับ 7 อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส และถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยสารโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะใช้สัญลักษณ์ CCB และ CCB-KOH ตามลำดับ

#### 1.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะของซึ่งข้าวโพด

1) การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุภายในซึ่งข้าวโพด แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (C, H, O, N และ S) ตามมาตรฐาน ASTM D 3176 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CHNS ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุภายในซึ่งข้าวโพด

2) การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ด้วยการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่า ความชื้น (moisture) ปริมาณสารระเหย (volatile matter) เถ้า (ash) และคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) ตามมาตรฐาน ASTM D 3172-3174

3) การดูดซับเลขไอโอดีนเป็นค่าที่บอกถึงประสิทธิภาพ และความสามารถในการดูดซับสารของถ่านที่มีโมเลกุลต่ำ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D46-7-94 ด้วยเทคนิคการไทเทรชันด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟตจนสารละลาย เปลี่ยนเป็นไม่มีสี

4) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้วยเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) รุ่น CLARA ศึกษาโครงสร้างและวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง

5) ลักษณะพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน ด้วยเทคนิค brunauer emmett-teller (BET) ด้วยเครื่อง Specific surface area analyzer, Belsorp, mini II ซึ่งใช้การวัดปริมาตรแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับไว้ที่ตัวอย่างสำหรับ วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว และความรู้นของตัวอย่าง

#### 1.2 การดูดซับกรดไขมันอิสระ

นำถ่านชีวภาพที่เตรียมได้ในข้างต้นมาทำการดูดซับกรดไขมันอิสระประเภทกรดปาล์มเมติก ในน้ำมันปาล์มที่มีกรด ไขมันอิสระร้อยละ 5 ทดสอบในน้ำมันปาล์มปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตั้ง ในอ่าง oil bath ที่ อัตราการกวนผสม 600 rpm นาที ใช้ปริมาณถ่านดูดซับ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม เวลาในการดูดซับ 30 - 360 นาที รอให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง ทำการแยกผงถ่านออกด้วยการกรองสุญญากาศ ตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระโดยวิธีการ ไทเทรชัน ด้วยวิธีมาตรฐาน AOCS Ca 5a -40 [6] โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และใช้ ฟีนอล์ฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ สามารถคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระได้จากสมการดังนี้

$$FFA (\%) = \frac{25.6 \times V \times N}{W_{oil}} \quad (1)$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรสารละลายของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรชัน (mL) , N คือ ความเข้มข้นของ โซเดียมไฮดรอกไซด์,  $W_{oil}$  คือ น้ำหนักของน้ำมันที่ใช้ (กรัม)

คำนวณความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับจากสมการ (2) และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการ (3) ดังนี้

$$q = \frac{C_0 - C_e}{W} \times V \quad (2)$$

$$Removal = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ  $q$  คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g),  $C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไขมันอิสระในน้ำมัน (mg/L),  $C_e$  คือ ความเข้มข้นที่จุดสมดุลของกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับ (mg/L),  $V$  คือ ปริมาตรของน้ำมัน (mL)  $W$  คือ น้ำหนักของถ่านดูดซับ (mg)

1.3 ศึกษาผลของเวลาในการสัมผัสและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

โดยใช้ปริมาณถ่านในการดูดซับกรดไขมันอิสระ 4 กรัม ทดสอบในน้ำมันปาล์มปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตั้งในอ่าง oil bath ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 30 - 360 นาที อัตราการกวนผสม 600 rpm ทำการแยกผงถ่านออกด้วยการกรอง ตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระโดยวิธีการไทเทรชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากสมการ (1) และคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระหลังการดูดซับจากสมการ (2) และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการ (3) ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับใช้โมเดลจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) เพื่ออธิบายกลไกของการดูดซับ จากสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ ดังนี้

สมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (4)$$

สมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order)

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

เมื่อ  $q_t$  คือ ความสามารถในการดูดซับกรดไขมันอิสระที่เวลาใด ๆ (mg/g),  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที),  $k_1$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (ต่อนาที),  $k_2$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

#### 1.4 ศึกษาปริมาณถ่านชีวภาพ และไอโซเทอมของการดูดซับ

ในการศึกษาผลของเวลาในการสัมผัสจะใช้ปริมาณถ่านในการดูดซับ 1, 2, 3, 4 และ 5 กรัม ทดสอบในน้ำมันปาล์ม ปริมาณ 30 กรัม (ปริมาตร 32.70 มิลลิลิตร) ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร ตั้งในอ่าง oil bath ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการดูดซับ 240 นาที อัตราการกวนผสม 600 rpm ทำการแยกผงถ่านออกด้วยการกรอง ตรวจสอบค่ากรดไขมันอิสระ โดยวิธีการไทเทรชันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากสมการ (1) และคำนวณค่าความสามารถในการดูดซับกรดไขมัน อิสระหลังการดูดซับจากสมการ (2) และคำนวณประสิทธิภาพการดูดซับจากสมการ (3) ในการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ นั้น ใช้โมเดลของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช จากสมการที่ (6) และ (7) ดังนี้

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \quad (6)$$

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (7)$$

เมื่อ  $q_m$  คือ ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (mg/g),  $K_L$  คือ ค่าคงที่ของแลงเมียร์ (mg/g),  $K_F$  คือ ค่าคงที่ของ ฟรุนดลิชที่อธิบายความสัมพันธ์ค่าความสามารถในการดูดซับ (mg/g),  $n$  คือ ค่าคงที่ของฟรุนดลิชที่ใช้อธิบายความเข้มข้นของ การดูดซับ

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### 1.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของซังข้าวโพด

##### 1) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (proximate analysis) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย เถ้า และ คาร์บอนคงตัว ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เพื่อศึกษาโครงสร้างทางกายภาพ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 1 พบว่าซังข้าวโพดมีความชื้น และสารระเหยสูงกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพด เนื่องจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่อยู่ภายในซังข้าวโพด แต่เมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการไพโรไลซิสสารระเหยภายในซังข้าวโพดจะมีค่าลดลง ส่วนปริมาณเถ้า และคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะไปสลายสารประกอบภายในชีวมวลซังข้าวโพด เมื่อได้รับความร้อนจากการเผาไหม้ ทาร์หรือน้ำมันดินที่เกาะติดอยู่กับรูพรุนหรือพื้นผิวของซังข้าวโพดจะเกิดการสลายตัว [7] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Praphatsorn, Rattanaphaiboon [8] และ Drané, M. [9] ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส จะทำให้ถ่านซังข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงถึงร้อยละ 78.86 ปริมาณเถ้าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 5.77 และมีค่าความชื้น และ ปริมาณสารระเหยร้อยละ 4.61 และ 10.76 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

วัสดุ	ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ (%)				อ้างอิง
	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
CC	11.45	83.23	2.4	2.92	[8]

วัสดุ	ค่าการวิเคราะห์แบบประมาณ (%)				อ้างอิง
	ความชื้น	สารระเหย	เถ้า	คาร์บอนคงตัว	
CCB	1.78	33.05	6.13	59.04	[8]
CCB	4.17	75.96	1.36	18.51	[9]
CCB	2.14	14.28	4.39	79.18	[9]
CC	11.89	73.37	1.17	11.57	การศึกษาครั้งนี้
CCB	4.61	10.76	5.77	78.86	การศึกษาครั้งนี้
CCB -KOH 4 M	8.1	11.38	9.49	71.03	การศึกษาครั้งนี้

### 2) ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (C, H, O, N และ S) ภายในของแข็งข้าวโพด และถ่านชีวภาพแข็งข้าวโพด ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ซังข้าวโพดมีธาตุคาร์บอนร้อยละ 48.45 เมื่อผ่านการเผาไหม้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสถ่านแข็งข้าวโพดจะมีธาตุคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 81.16 ในขณะที่เดียวกันจะมีปริมาณของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนลดลงเหลือร้อยละ 0.28 และ 16.95 ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Praphatsorn, Rattanaphaiboon [7] และ Adekanye และคณะ [10] ที่พบว่าปริมาณไฮโดรเจนและออกซิเจนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในการไพโรไลซิสสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นไปสลายพันธะออกซิเจนทำให้ไฮโดรเจนและออกซิเจนมีปริมาณลดลง หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาคายน้ำ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ของซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพแข็งข้าวโพด

วัสดุ	ค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (%)					อ้างอิง
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ซัลเฟอร์	ออกซิเจน	
CC	44.76	5.89	0.52	0.04	43.99	[8]
CCB	71.49	3.06	0.85	0.03	10.26	[8]
CC	48	6.04	0.77	0.14	43	[9]
CCB	84.60	2.80	0.88	0.11	4.98	[9]
CC	48.45	5.86	0.25	0.08	45.36	การศึกษาครั้งนี้
CCB	81.16	0.28	1.46	0.14	16.95	การศึกษาครั้งนี้
CCB -KOH 4 M	81.57	0.09	1.29	0.15	16.90	การศึกษาครั้งนี้

### 3) ผลการดูดซับไอโอดีน

การดูดซับไอโอดีนเป็นการหาพื้นที่ผิวของถ่านจากจำนวนมิลลิกรัมของสารละลายไอโอดีนที่ถูกดูดซับ จากตารางที่ 3 ผลการทดลองการดูดซับไอโอดีนพบว่า ซังข้าวโพด (CC) มีสีของไอโอดีนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากจากซังข้าวโพดไม่มีความพรุนจึงไม่สามารถดูดซับสีของไอโอดีนได้ ถ่านซังข้าวโพดชีวภาพ (CCB-500) มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่ 389.09 มิลลิกรัมต่อกรัม เกิดจากถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะมีความพรุนเกิดขึ้นจึงสามารถดูดซับสีของไอโอดีนได้ระดับหนึ่ง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gotore, O. และคณะ [11] ที่มีการศึกษาการดูดซับไอโอดีนจากการใช้ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างกัน เนื่องจากที่อุณหภูมิการไพโรไลซิสที่สูงขึ้นนั้นจะทำให้พื้นที่ผิว และรูพรุนของตัวดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งสารประกอบที่อยู่ภายในซังข้าวโพดจะเกิดการสลายตัว และเหลือเป็นคาร์บอนคงตัว

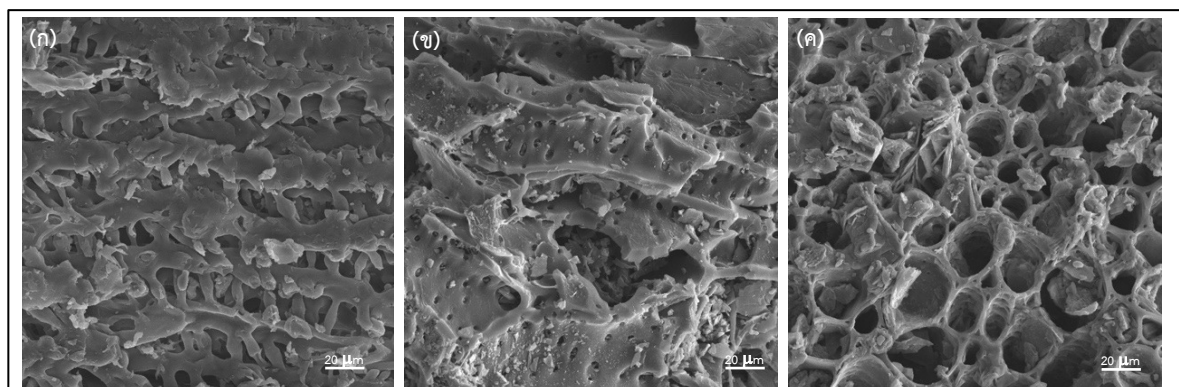
เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แบบประมาณก่อนหน้า จากผลการศึกษาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยสารเคมีโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ผ่านการดัดแปรที่ความเข้มข้น 4 โมลาร์ มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 663.11 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เป็นไปตามมาตรฐานสำหรับผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมให้เป็นไปตาม มอก.900-2547 [12] ที่กำหนดให้ถ่านกัมมันต์หรือถ่านดูดซับต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม จึงเลือกเงื่อนไขของการศึกษาดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์ และศึกษาในขั้นต่อไป

### ตารางที่ 3 ผลการดูดซับไอโอดีนของซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพด ถ่านซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยสารเคมี

วัสดุ	ไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
CC	สีของไอโอดีนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง
CCB	389.09
CCB -KOH 0.1 M	530.12
CCB -KOH 0.5 M	561.95
CCB -KOH 1 M	589.86
CCB -KOH 2 M	593.26
CCB -KOH 4 M	663.11
CCB -KOH 6 M	674.09

#### 4) ผลการศึกษาโครงสร้างลักษณะทางภายนอก

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านซังข้าวโพด ด้วยเทคนิค scanning electron microscopy (SEM) เป็นการวิเคราะห์ทางกายภาพที่แสดงโครงสร้างพื้นผิวของซังข้าวโพด รวมถึงรูพรุน ความหนาหรือความเรียบของพื้นผิว แสดงดังภาพที่ 1 ภาพถ่ายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยใช้กำลังขยาย 2000 เท่า ซังข้าวโพด (CCB) มีพื้นผิวเรียบมีรูพรุนเล็กๆ ที่เป็นลักษณะรูพรุนธรรมชาติ ส่วน (ข) ถ่านซังข้าวโพด (CCB) พื้นผิวมีความขรุขระ ไม่เรียบ มีรอยแตก มีรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งเกิดจากการระเหยของสารประกอบที่ระเหยง่ายและการสลายตัวของวัสดุจากการไพโรไลซิส [13] สำหรับถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ พื้นผิวมีความพรุนมากขึ้น รูพรุนมีขนาดใหญ่และมีการกระจายที่ดูสม่ำเสมอกว่าวัสดุอื่น ซึ่งเป็นข้อสมบัติที่ดีของตัวดูดซับ



ภาพที่ 1 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของซังข้าวโพด (ก) ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (ข) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยสารเคมี (ค) กำลังขยาย 2000 X

## 5) ผลการศึกษาวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

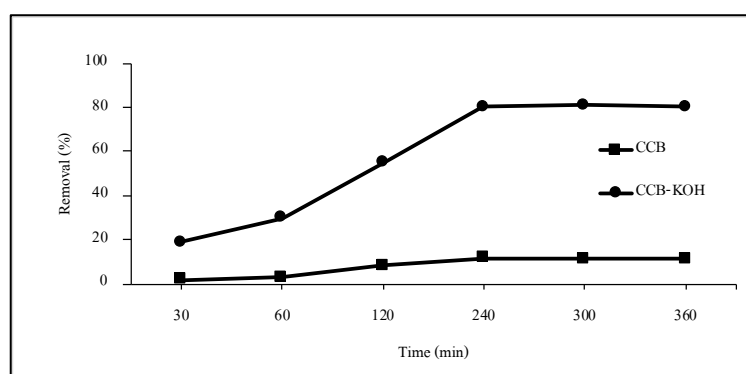
การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรของรูพรุน เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพด้วยเทคนิค brunauer emmett-teller (BET) ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดมีพื้นที่ผิว 15.78 m<sup>2</sup>/g และขนาดรูพรุนเฉลี่ยอยู่ที่ 5.09 nm. ซึ่งมีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนที่ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีพื้นที่ผิว 61.35 m<sup>2</sup>/g ปริมาตรรูพรุน 0.04 cm<sup>3</sup>/g และขนาดรูพรุนเฉลี่ยน้อยลงที่ 2.67 nm แสดงให้เห็นถึงการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ในการดัดแปรทำให้พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้น โดยอาจเกิดจากสารเคมีทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงหรือการขยายรูพรุน ทั้งนี้พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่าสูงกว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดไม่ได้ดัดแปร [11,13] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีน นัมเบอร์ก่อนหน้าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของซังข้าวโพด ถ่านชีวภาพซังข้าวโพด

วัสดุ	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm <sup>3</sup> /g)	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (nm)
CCB	15.78	0.02	5.09
CCB-KOH 4 M	61.35	0.04	2.67

## 1.2 ผลการศึกษาเวลาในการสัมผัสและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ผลของเวลาในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม พบว่าปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มมีค่าลดลงเมื่อเวลาที่ใช้ในการดูดซับเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 2 โดยมีการดูดซับกรดไขมันอิสระเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาของการดูดซับ 30 – 240 นาที เนื่องจากมีพื้นที่ผิวของตัวดูดซับจำนวนมาก และเข้าสู่สมดุลการดูดซับ การดูดซับที่ลดลงนั้นเกิดจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับลดลง ทำให้สามารถดูดซับกรดไขมันอิสระได้น้อย [9,11]



ภาพที่ 2 ผลของเวลาในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด และถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

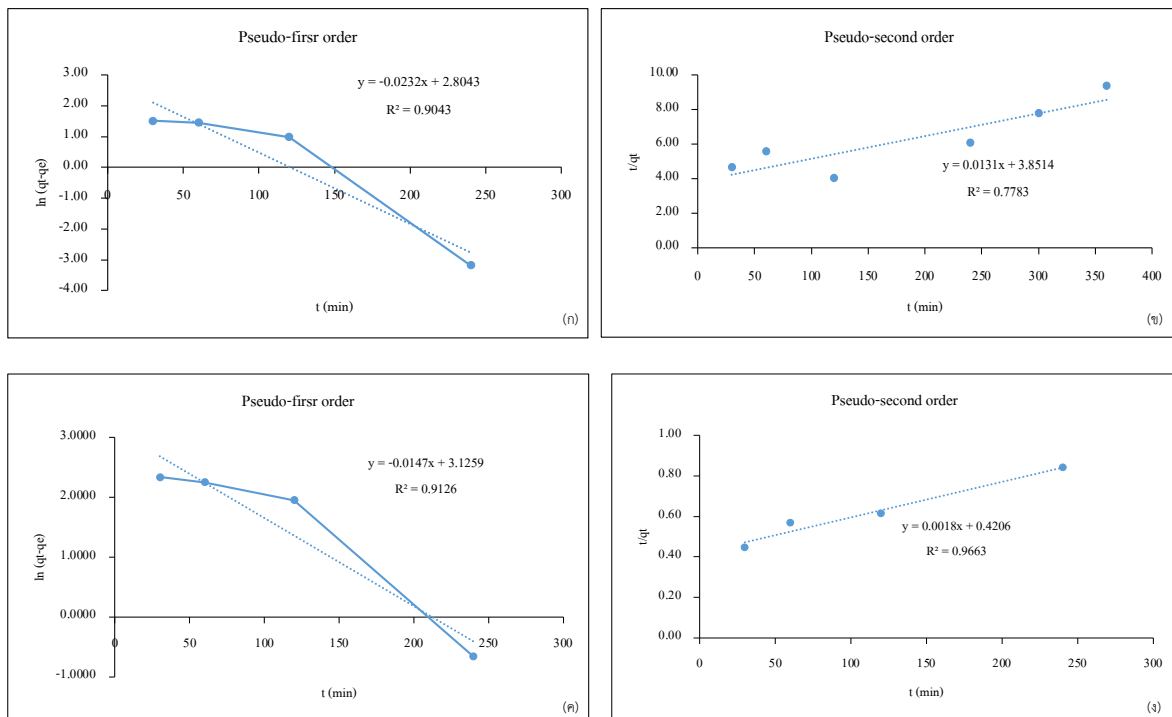
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ดัดแปรมีการดูดซับกรดไขมันอิสระสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order)



เนื่องจากมีค่า  $R^2$  เข้าใกล้ 1 มากกว่าจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดไฟฟ้าระหว่างผิวตัวดูด ส่วนถ่านชีวภาพที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีการดูดซับสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order) นอกจากนี้ยังมีค่าความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล ( $q_e$ ) ของการทดลองใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณมากกว่าแบบจำลองสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม แสดงดังตารางที่ 5 และแสดงดังภาพที่ 3

ตารางที่ 5 ค่าคงที่ของแบบจำลองสมการจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียม และจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม

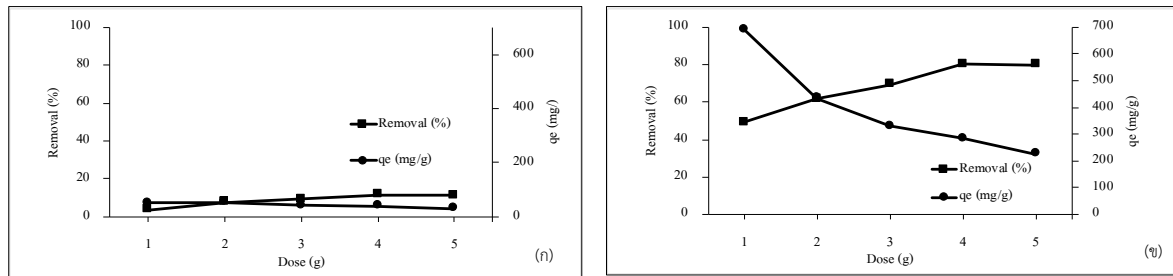
วัสดุ	$q_{e, \text{exp}}$ (mg/g)	จลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order)			จลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม (Pseudo-second order)		
		$q_{e, \text{cal}}$	$K_1$	$R^2$	$q_{e, \text{cal}}$	$K_2$	$R^2$
		(mg/g)	( $\text{min}^{-1}$ )		(mg/g)	(g/mg-min)	
CCB	39.4	2.804	-0.053	0.9043	76.336	5827.166	0.7783
CCB-KOH	285.02	3.126	-0.034	0.9126	555.55	7.7E-06	0.9663



ภาพที่ 3 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) ตามแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (ก), ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) ตามแบบจำลองอันดับสองเทียม (ข), ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) ตามแบบจำลองอันดับหนึ่งเทียม (ค) และ ด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพดดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) ตามแบบจำลองอันดับสองเทียม (ง)

### 1.3 ผลการศึกษาปริมาณถ่านชีวภาพ และไอโซเทอมของการดูดซับ

ผลของปริมาณถ่านในการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม พบว่าปริมาณถ่านในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 4 และในทางกลับกันทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับของถ่านมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านดูดซับ และเมื่อเพิ่มปริมาณถ่านในการดูดซับเป็น 5 กรัม กลับทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงเล็กน้อย เนื่องมาจากปริมาณถ่านดูดซับที่มากเกินไปทำให้เกิดการจำกัดในการกระจายตัวของถ่านในระบบดูดซับ [14] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกปริมาณถ่านในการดูดซับ 4 กรัม ซึ่งถือได้ว่าเป็นปริมาณที่ทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับ และประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าสูงสุดที่สุด

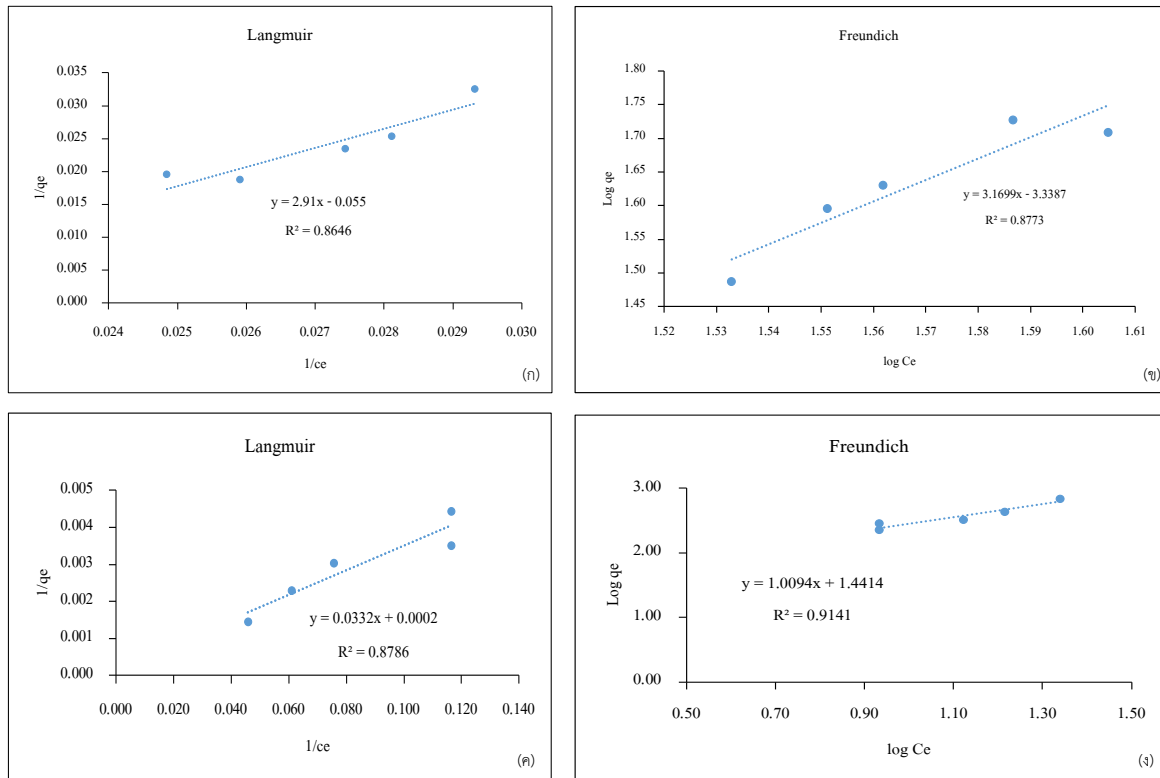


ภาพที่ 4 ผลของปริมาณผงถ่านที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์ม และความสามารถในการดูดซับของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) (ก) และถ่านชีวภาพซังข้าวโพดตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH 4M) (ข)

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มด้วยถ่านชีวภาพซังข้าวโพด พบว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ไม่ได้ตัดแปร และถ่านชีวภาพที่ตัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่า  $R^2$  ในไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (Freundlich) เท่ากับ 0.877 และ 0.914 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าค่า  $R^2$  ของไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir) ซึ่งถือได้ว่าถ่านทั้ง 2 แบบ มีการดูดซับแบบหลายชั้นที่เกิดการซ้อนทับกันของถ่านที่มีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน [15] แสดงดังตารางที่ 6 และภาพที่ 5

ตารางที่ 6 ค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช

วัสดุ	Langmuir			Freundlich		
	$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (mg/g)	$R^2$	$K_F$ (mg/g)	n	$R^2$
CCB	18.182	0.019	0.865	3.339	0.315	0.877
CCB-KOH	5000	0.006	0.879	1.4414	0.991	0.914



ภาพที่ 5 ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) แบบ Langmuir (ก), ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของถ่านชีวภาพซังข้าวโพด (CCB) แบบ Freundlich (ข), ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) แบบ Langmuir (ค), ไอโซเทอร์มการดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มของถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (CCB-KOH) แบบ Freundlich (ง)

### สรุปผลการวิจัย

ถ่านชีวภาพซังข้าวโพดจากการเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิส และทำการดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อเพิ่มความเป็นรูพรุนให้แก่วัสดูดูดซับ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และ BET และมีประสิทธิภาพการดูดซับสามารถนำมาเป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจากการใช้ปริมาณผงถ่านดูดซับ 4 กรัม ระยะเวลาในการดูดซับ 240 นาที นอกจากนี้ยังมีผลการดูดซับสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์อันดับสองเทียม ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีมากกว่าทางกายภาพ และสอดคล้องกับการดูดซับไอโซเทอร์มแบบฟรอนด์ลิชซึ่งสามารถเกิดการดูดซับได้หลายชั้น แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพซังข้าวโพดที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้เป็นวัสดุดูดซับกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มได้ และเป็นแนวทางหนึ่งสำหรับใช้เป็นวัสดุดูดซับสารอื่นๆ ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยการนำมาใช้ประโยชน์และสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจได้อย่างมีศักยภาพ อีกทั้งยังเป็นแนวทางที่ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติตามสัญญาสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาโครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย เลขที่ SCA-CO-2561-

7134TH ในโอกาสนี้ขอขอบคุณศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ผ่านมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ปีงบประมาณ 2566 ภายใต้โครงการวิจัยการพัฒนาระบบดูดซับกรดไขมันอิสระด้วยถ่านชีวภาพซึ่งข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยโอโซนสำหรับน้ำมันพืชใช้แล้ว สัญญาเลขที่ สกสว. 30/66 และการสนับสนุนจากวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ช่วยสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์สำหรับทำวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] จุฬา สีนโพบูลย์. (2564). การจัดการวัสดุเหลือทิ้งเป็นศูนย์และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก จากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงอัดแท่งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต) มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่.
- [2] ณิชา บุรณสิงห์. (2562). ชังข้าวโพด : เชื้อเพลิงอัดแท่งเพื่อสิ่งแวดล้อม. เอกสารวิชาการ อีเล็กทรอนิกส์. สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร.
- [3] Cole, Emily J., Omid R. Zandvakili, Baoshan Xing, Masoud Hashemi, Stephen Herbert, & Hamid H. Mashayekhi. (2019). Dataset on the Effect of Hardwood Biochar on Soil Gravimetric Moisture Content and Nitrate Dynamics at Different Soil Depths with FTIR Analysis of Fresh and Aged Biochar. *Data in Brief* 25:104073.
- [4] Simon, S., Saran, S., Stuart, H., David, M., and Ondrej, M. (2009). Biochar, reducing and removing CO<sub>2</sub> while improving soils: A significant and sustainable response to climate change.
- [5] พัชราภรณ์ สุริยะ และ สุชัยญา ทองเครือ. (2562). การผลิตถ่านกัมมันต์จากชังข้าวโพดเพื่อบำบัดสี้อมแอซิดแดง. เรื่องเต็มการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16: เกษตรกำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน. การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 16: เกษตรศาสตร์กำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน. (หน้า 1940-1949). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน กองบริหารวิชาการและนิสิต.
- [6] Firestone, D. 2004. Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society, AOCS Press. IL: Campaign
- [7] Ronsse, F., Hecke, S.V., Dickinson, D., and Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Global Change Biology Bioenergy*. 5, 104-115.
- [8] Rattanaphai boon, P., Homdoug, N., & Tippayawong, N. (2022). Production and characterization of corncob biochar for agricultural use. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2681, No. 1, 020034). AIP Publishing. <https://doi.org/10.1063/5.01117160>
- [9] Drané, M.; Zbair, M.; Hajjar-Garreau, S.; Josien, L.; Michelin, L.; Bennici, S.; Limousy, L. Unveiling the Potential of Corn Cob Biochar: Analysis of Microstructure and Composition with Emphasis on Interaction with NO<sub>2</sub>. *Materials* 2024, 17, 159. <https://doi.org/10.3390/ma17010159>

- [10] T., A., Adekanye., Oluwasogo, A., Dada., Kolapo, Jegede., Makun, Aderinto. (2022). Pyrolysis of maize cob at different temperatures for biochar production: Proximate, ultimate and spectroscopic characterization. *Research in Agricultural Engineering*, doi: 10.17221/106/2020-rae
- [11] Gotore, O., Itayama, T., Dang, B.-T., Nguyen, T.-D., Ramaraj, R., Osamu, N., Shuji, T., & Maseda, H. (2022). Adsorption analysis of ciprofloxacin and delafloxacin onto the corn cob derived-biochar under different pyrolysis conditions. *Biomass Conversion and Biorefinery*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03156-y>
- [12] Thai Industrial Standards Institute. (2004). Thai Industrial Standard for Activated Carbon (TIS 900-2547). Ministry of Industry.
- [13] Purevsuren, B., Avid, B., Tesche, B. and Davaajav, Y. (2003). A biochar from casein and its properties. *Journal of Materials Science*. 38, 2347–2351.
- [14] Ismaila, Ammaru, Nur Nazlina Saimon, Mazura Jusoh, & Zaki Yamani Zakaria. (2017). Adsorption of Free Fatty Acid in Biodiesel from Palm Fatty Acid Distillate Using Koh-Activated Starch. *Chemical Engineering Transactions* 56:619–24.
- [15] Mbah, J. B., Kada, B., Daniele, E. M., Larissa, T. T., Antoine, E., & Richard, K. (2020). Adsorption mechanisms of pigments and free fatty acids in the discoloration of shea butter and palm oil by an acid-activated Cameroonian smectite. *Scientific African*, 9, e00498. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00498>

# การประยุกต์ใช้น้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติกสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็ก

## Application of Plastic Waste Pyrolysis Oil for Small Agricultural Diesel Engine

นิกราน หอมดวง<sup>1,\*</sup> กิตติกร สาสุจิตต์<sup>1</sup> ประภัสสร รัตนไพบูลย์<sup>1</sup> ชูรัตน์ ธารารักษ์<sup>1</sup> และ สุรพล ริยะนา<sup>1</sup>  
Nigran Homdoug<sup>1,\*</sup> Kittikorn Sasujit<sup>1</sup> Praphatsorn Rattanaphai boon<sup>1</sup> Churat Tararux<sup>1</sup>  
and Surapon Riyana<sup>1</sup>

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

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

<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 084-1773632. E-mail address: [nigranghd@gmail.com](mailto:nigranghd@gmail.com)

Received: 30 May 2024, Revised: 28 July 2024, Accepted: 18 December 2024, Published online: 30 December 2024

### Abstract

Plastic waste is a major environmental problem, transforming plastic waste into fuel for use in agricultural engines is interesting and sustainable environmental management approach. This research aims to study and apply pyrolysis oil from plastic waste to agricultural diesel engine as a guideline for plastic waste management in the future. Plastic waste pyrolysis oil was obtained from a fast pyrolysis process. The experiment was mixed with Diesel B7 at a ratio of 10%, 25%, and 50% and tested compare with 100% Diesel B7. The test engine was used a 598 CC, single cylinder and connected to a 5 kW dynamometer. The engine speed was adjusted in a range of 1,000-2,000 rpm and using a constant 60% of load. The results were found that, the agricultural diesel engine was worked well with using B7 diesel mixed with plastic waste pyrolysis oil at a ratio of 10%. The engine was provided performance in engine torque, brake power, thermal efficiency, fuel and energy consumption lower than using 100% Diesel B7. Exhaust emission, Using B7 diesel fuel mixed with plastic waste pyrolysis oil was produced higher carbon monoxide and hydrocarbon than using B7 diesel alone and exhaust emission was obtained within standards. When pyrolysis waste plastic oil can be used as fuel for diesel engines. Therefore, the government should promote and expand technology for transforming plastic waste into fuel to reduce plastic waste problems and reduce diesel imports in Thailand.

**Keywords:** Plastic waste, Pyrolysis oil, B7 diesel, Agricultural diesel engine

## บทคัดย่อ

ขยะพลาสติกเป็นปัญหาสำคัญในด้านสิ่งแวดล้อม การเปลี่ยนรูปขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงสำหรับใช้งานกับเครื่องยนต์การเกษตรจึงมีความน่าสนใจและเป็นการจัดการด้านสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกกับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรเพื่อเป็นแนวทางในการจัดการขยะพลาสติกในอนาคต น้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติกได้มาจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว การใช้งานได้นำไปผสมกับน้ำมันดีเซล บี 7 ในสัดส่วน 10% 25% และ 50% และทดสอบเทียบกับน้ำมันดีเซล บี 7 แบบ 100% เครื่องยนต์ทดสอบเป็นเครื่องสูบลูกสูบเดี่ยวขนาด 598 CC ต่อร่วมกับชุดไดนาโมมิเตอร์ขนาด 5 kW ดำเนินการปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์ในช่วง 1,000-2,000 rpm ใช้ภาระโหลด 60% คงที่ ผลการศึกษาพบว่าเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรสามารถเดินเครื่องยนต์ได้ดีเมื่อน้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่สัดส่วน 10% เครื่องยนต์ให้สมรรถนะด้านแรงบิด กำลังเบรค ประสิทธิภาพความร้อนเครื่องยนต์ อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและพลังงาน ต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 แบบ 100% มลพิษไอเสีย การใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติกให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรคาร์บอนสูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 อย่างเดียว และมลพิษที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนดไว้ อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยน้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติกสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลได้ ดังนั้นควรมีการส่งเสริมขยายผลเทคโนโลยีการเปลี่ยนรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเพื่อลดปัญหาขยะพลาสติกและการนำเข้าน้ำมันดีเซลของประเทศไทย

**คำสำคัญ:** ขยะพลาสติก น้ำมันไพโรไลซิส น้ำมันดีเซล บี7 เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร

## บทนำ

พลาสติกเป็นบรรพบุรุษที่อำนวยความสะดวกในการใช้ชีวิตของผู้คน การผลิตพลาสติกจะมีการใส่สารไมโครพลาสติก (Micro plastic) ซึ่งสารเหล่านี้จะย่อยสลายได้ยาก สูดทำยากกลายเป็นขยะตกค้างในสิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพต่อผู้คน พลาสติกเป็นวัสดุที่คงทนต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ดังนั้นการสลายตัวโดยธรรมชาติจะเกิดขึ้นได้ช้ามาก ยกตัวอย่าง เช่น ในกรณีของโพลีเอทิลีนต้องใช้เวลาในการย่อยสลายมากกว่า 100-200 ปี เป็นต้น [1] ประเทศไทยปัจจุบันมีประมาณขยะพลาสติกเฉลี่ย 12% ของปริมาณขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมด คิดเป็นน้ำหนักเฉลี่ย 2 ล้านตัน/ปี [2] อย่างไรก็ตามก็มีความพยายามนำกลับมาใช้ใหม่เฉลี่ย 0.5 ล้านตัน/ปี คิดเป็น 25% ส่วนที่เหลือ 1.5 ล้านตัน หรือ 75% ไม่มีการนำกลับไปใช้ประโยชน์ใหม่ ขยะพลาสติกส่วนใหญ่เป็นขยะพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว เช่น ถ้วยร้อน ถ้วยเย็น ถ้วยหิ้ว แก้วพลาสติก หลอดพลาสติก เป็นต้น ขยะพลาสติกทั้งหมดจะถูกนำไปทิ้งในหลุมฝังกลบเนื่องจากเป็นวิธีการที่มีต้นทุนต่ำสุดเมื่อเทียบกับวิธีอื่น แนวคิดในการจัดการปัญหาขยะพลาสติกโดยการนำไปผลิตพลังงาน (Waste to energy) เป็นแนวคิดที่เป็นไปได้และน่าจะเกิดความยั่งยืนสูงสุดในการกำจัดขยะพลาสติก [3] กล่าวคือแนวคิดนี้เป็นกระบวนการย้อนกลับที่ทำให้ขยะพลาสติกย่อยสลายด้วยความร้อนจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) พลาสติกจะเปลี่ยนรูปเป็นสารไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของน้ำมันเชื้อเพลิง จากนั้นนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพและสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในการเผาไหม้ของเครื่องยนต์สันดาปภายในได้ [4] การใช้งานในอนาคต กรณีชุมชนต้องดำเนินการบริหารจัดการขยะในชุมชนด้วยตนเอง ชุมชนสามารถสร้างเครื่องปฏิกรณ์ในการเปลี่ยนรูปขยะพลาสติกเป็นน้ำมันเองได้ ตลอดจนมีองค์ความรู้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันไพโรไลซิสให้สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์ดีเซลทางการเกษตรได้ วิธีการแบบนี้จะเป็นแนวทางในการบริหารจัดการหรือกำจัดขยะพลาสติกในชุมชนอนาคตได้ การใช้น้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติกสามารถนำมาใช้ได้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน [5-6] ทั้งในส่วนของเครื่องยนต์จุดระเบิดด้วยความร้อนและจุดระเบิดด้วยประกายไฟ [5-6-7] ในภาพรวมคุณสมบัติของน้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติกที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วจะมีค่าพลังงานความร้อนที่ต่ำ

กว่าน้ำมันดีเซล [8] แต่ในขณะที่มีการนำมาปรับปรุงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงด้วยเทคนิคทางตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) แล้วจะมีคุณสมบัติทางพลังงานความร้อนและทางกายภาพใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล [9] การนำไปใช้ส่วนใหญ่จะมีการนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลที่อัตราส่วน 10-50% น้ำมันสามารถใช้งานได้ดีอยู่ในช่วงการผสม 10-20% [10] อย่างไรก็ตาม เมื่อนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ดีเซลก็พบว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ดี มีสมรรถนะในส่วนกำลังเบรก แรงบิด และประสิทธิภาพความร้อนต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซลเล็กน้อย [11] ในส่วนของอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงก็พบว่าการใช้ไขมันโพลีเอสเตอร์จะพลาศดีกับน้ำมันดีเซลมีอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงกว่าซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 1-15% [12] จากผลการตรวจสอบเอกสารก็จะพบว่าการใช้น้ำมันโพลีเอสเตอร์พลาศดีกับน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีความน่าสนใจ เป็นเชื้อเพลิงที่มีศักยภาพและมีความเป็นไปได้สูงเมื่อนำมาใช้ร่วมกับเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาและทดลองนำเอาน้ำมันโพลีเอสเตอร์จากขยะพลาสติกไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็ก ในรูปแบบการนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลปี 7 ในสัดส่วนต่าง ๆ จากนั้นดำเนินการวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องยนต์และมลพิษไอเสียที่ได้จากการทดลอง เพื่อเป็นข้อมูลสำคัญในการยืนยันสำหรับการนำเอาน้ำมันโพลีเอสเตอร์พลาสติกไปใช้งานในสัดส่วนที่เหมาะสมกับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็กของชุมชน ซึ่งถ้าในอนาคตชุมชนมีการนำน้ำมันชนิดนี้ไปใช้งาน จะทำให้ลดการนำเข้าน้ำมันสำเร็จรูปจากต่างประเทศได้และที่สำคัญจะช่วยลดและแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของประเทศไทยในอนาคตได้

## วิธีการวิจัย

### น้ำมันโพลีเอสเตอร์ น้ำมันดีเซล และการเตรียม

น้ำมันโพลีเอสเตอร์ที่ใช้ทดลองเป็นน้ำมันที่ได้มาจากการคัดแยกขยะพลาสติกกลุ่มโพลีเอทิลีน (Polyethylene) และนำเอาขยะพลาสติกนั้นไปย่อยสลายด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่มีอุณหภูมิในช่วง 350-400 °C ได้น้ำมันพลาสติกโพลีเอสเตอร์สีน้ำตาลที่มีความหนืดสูงออกมา จากนั้นนำเอาน้ำมันโพลีเอสเตอร์ที่ได้เข้าสู่กระบวนการกลั่นอย่างง่ายเพื่อให้ได้น้ำมันโพลีเอสเตอร์ที่มีความหนืดและความใสที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ผสมกับน้ำมันดีเซล น้ำมันโพลีเอสเตอร์จากขยะพลาสติกและน้ำมันดีเซล แสดงดังตารางที่ 1 การนำไปใช้ทดสอบกับเครื่องยนต์ได้นำน้ำมันโพลีเอสเตอร์ไปผสมกับน้ำมันดีเซลในสัดส่วน 10% 25% และ 50% ต่อมานำเอาน้ำมันที่ผสมแล้วไปวิเคราะห์หาค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมแคลอริมิเตอร์โดยให้ค่าความร้อนอยู่ในช่วง 43.21 MJ/kg 44.25 MJ/kg และ 44.88 MJ/kg ตามลำดับ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติน้ำมันดีเซลและน้ำมันโพลีเอสเตอร์พลาสติก

Fuel properties	Method	Limit	Diesel (B7)	PPO
Density at 15.6 °C (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D4052	-	835	823
Flash Point (°C)	ASTM D93	>52	66	54
Kinematic Viscosity at 40 °C (cSt)	ASTM D445	1.8-4.1	3.44	3.11
Pour point (°C)	ASTM D97	<10	-8.7	-
Specific gravity at 15.6 °C	ASTM D4052	0.81-0.87	0.835	0.824
Cetane number	ASTM D613	>50	56.57	46.7
Gross calorific value (MJ/kg)	ASTM D240	-	45.56	45.24



## เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตร และไดนาโมมิเตอร์

ชุดทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกร่วมกับน้ำมันดีเซลได้ใช้เครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรแบบสูบเดี่ยว ขนาดความจุ 598 ซีซี 11 hp และระบายความร้อนด้วยน้ำ เครื่องยนต์ดีเซลได้ต่อร่วมกับชุดไดนาโมมิเตอร์ขนาด 5 kW และใช้ฮีตเตอร์ความร้อนขนาด 5 kW เป็นภาระโหลดของเครื่องยนต์ ภาระโหลดสามารถปรับได้ตั้งแต่ 10-100% หรือ 0.5-5 kW รายละเอียดข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องยนต์ดีเซลและชุดไดนาโมมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อมูลจำเพาะของเครื่องยนต์ดีเซลที่ใช้ทดลอง

Specifications of engine	Detail
Engine type	Diesel, single cylinder, 4-stroke, horizontal
Model	ET 110
Bore x Stroke (mm)	92 x 90
Displacement (cm <sup>3</sup> )	598
Compression ratio	21:1
Standard injection pressure (Bar)	200
Alternator model	Daici 5 kW, 220V
Load of engine	5 KW Tubular heater

## วิธีการทดลอง และการวิเคราะห์สมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซล

การทดลองได้ดำเนินการทดสอบศึกษาหาผลกระทบของสัดส่วนน้ำมันดีเซลต่อน้ำมันไพโรไลซิส (Diesel: PPO) ทั้งหมด 3 สัดส่วน คือ (10% หรือ 90:10) (25% หรือ 75:25) และ (50% หรือ 50:50) น้ำมันที่ได้ทั้ง 3 สัดส่วน นำมาใช้ทดสอบเทียบกับการใช้น้ำมันดีเซล 100 นอกจากนี้ การทดลองยังได้มีการศึกษาผลของการปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่มีต่ออัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption:  $m$ ) อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption:  $SEC$ ) แรงบิดเครื่องยนต์ (Torque:  $T$ ) กำลังเบรกเครื่องยนต์ (Brake power:  $P_b$ ) ประสิทธิภาพทางความร้อนเบรก (Brake thermal efficiency:  $h_{th}$ ) และมลพิษที่เกิดขึ้นกับเครื่องยนต์ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 1,000-2,000 rpm อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง แรงบิดเครื่องยนต์ กำลังเบรกเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพทางความร้อน และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงาน ของการใช้น้ำมันดีเซลร่วมกับน้ำมันไพโรไลซิสและน้ำมันดีเซลมีสมการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้ [4-13]

$$FC = \frac{m(1,000)}{rt} \quad (1)$$

เมื่อ  $FC$  คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (L/h)  $m$  คือ อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg)  $r$  คือ ความหนาแน่นน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/m<sup>3</sup>) และ  $t$  คือ เวลาในการเดินเครื่องยนต์ (h)

$$T = Wgr \quad (2)$$

เมื่อ  $T$  คือ แรงบิดเครื่องยนต์ (N·m)  $W$  คือ น้ำหนักที่เกิดจากการบิดตัวของไดนาโมมิเตอร์ผ่านโหลดเซลล์ (kg)  $g$  คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $m/s^2$ ) และ  $r$  คือ รัศมีของน้ำหนักที่เกิดจากการบิดตัวของไดนาโมมิเตอร์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.23 m

$$Pb = \frac{2pTN}{60} \quad (3)$$

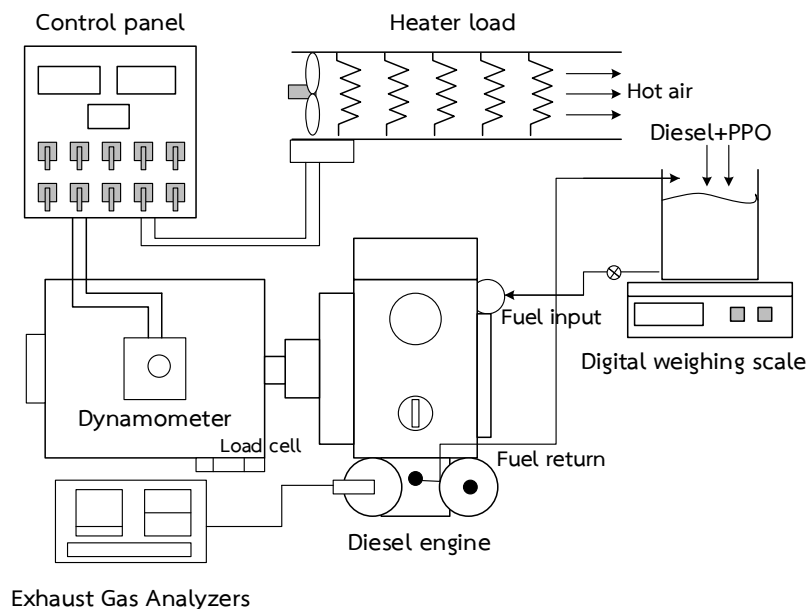
เมื่อ  $Pb$  คือ กำลังเบรคเครื่องยนต์ (W) และ  $N$  คือ ความเร็วรอบเครื่องยนต์ (rpm)

$$h_{th} = \frac{Pb}{m_c LHV} \quad (4)$$

เมื่อ  $m_c$  คือ อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง (kg/s) และ  $LHV$  คือ ค่าความร้อนของน้ำมันเชื้อเพลิง (MJ/kg)

$$SEC = \frac{m_c LHV (3.6 \times 10^6)}{Pb} \quad (5)$$

เมื่อ  $SEC$  คือ อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kWh)

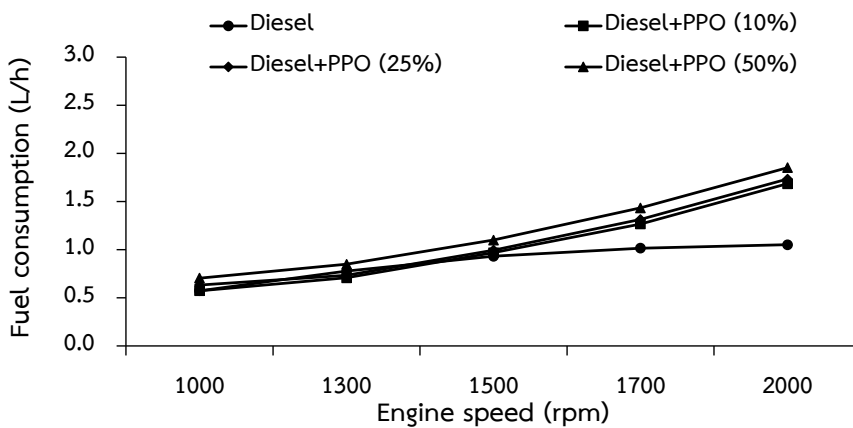


ภาพที่ 1 ไดอะแกรมการทดสอบสมรรถนะเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันน้ำมันดีเซล บี7 ผสมกับน้ำมันไฟโรไลซิสขยะพลาสติก

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

### อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง

อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นค่าที่แสดงความเชื่อมโยงถึงความคุ้มค่าหรือต้นทุนการนำน้ำมันเชื้อเพลิงไปใช้ในอนาคต ภาพที่ 2 แสดงผลการปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรจาก 1,000-2,000 rpm เทียบกับอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด พบว่าการปรับเพิ่มความเร็วรอบเครื่องยนต์ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด เพิ่มสูงขึ้น โดยการใช้น้ำมันดีเซลที่ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสที่สัดส่วน 10-50% ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงสูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซลที่ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสที่สัดส่วน 10-50% ให้ให้อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงสูงกว่าการใช้น้ำมันดีเซลที่ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิส จึงเป็นสาเหตุให้มีอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันสูงกว่า [14] อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบในส่วนของ การใช้ น้ำมันดีเซลที่ 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสที่สัดส่วน 10-50% พบว่าอัตราส่วนผสมน้ำมันดีเซลต่อน้ำมันไพโรไลซิส 50% ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงสูงสุดทุกความเร็วรอบเครื่องยนต์ การใช้ น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสที่สัดส่วน 10% ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำสุดและมีค่าอยู่ในช่วง 0.57-1.68 L/h ในขณะที่การใช้ น้ำมันดีเซลที่ 7 แบบ 100% ทำให้อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 0.57-1.05 L/h ภายใต้ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000-2,000 rpm

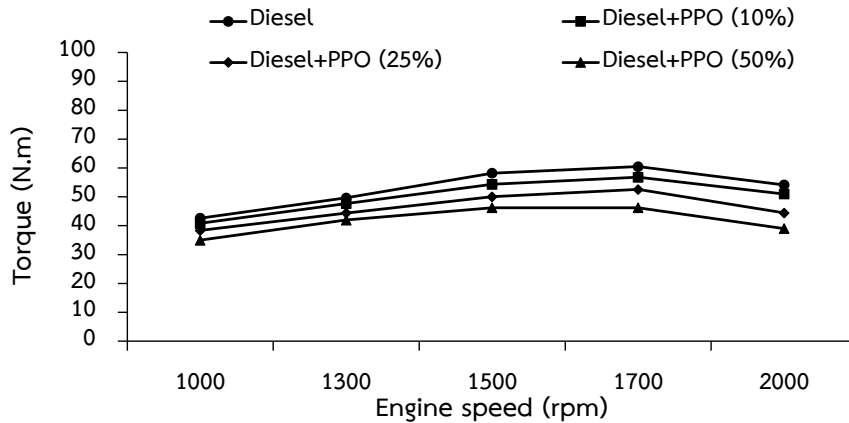


ภาพที่ 2 ผลการปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์กับอัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง

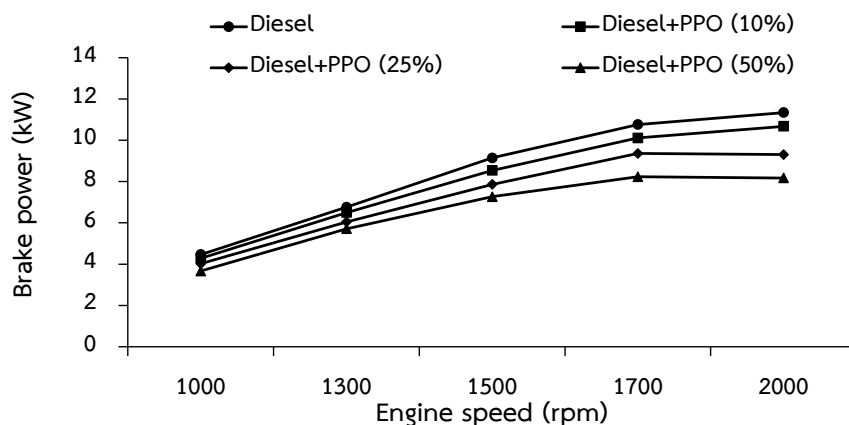
### แรงบิดและกำลังเบรกเครื่องยนต์

ภาพที่ 3 แสดงผลการปรับความเร็วรอบเครื่องยนต์ที่มีผลกระทบต่อแรงบิดเครื่องยนต์เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด โดยพบว่าการเพิ่มความเร็วรอบเครื่องยนต์จาก 1,000-1,700 rpm แรงบิดเครื่องยนต์มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยการใช้ น้ำมันดีเซล ปี่ 7 แบบ 100% ให้แรงบิดเครื่องยนต์สูงสุด ถัดมาเป็นน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่สัดส่วน 10% 25% และ 50% ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเร็วรอบเครื่องยนต์เป็น 2,000 rpm แรงบิดเครื่องยนต์ของการใช้น้ำมันทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มลดต่ำลงเนื่องจากเกิดการสูญเสียการไหลของอากาศภายในช่องไอดี ลิ้นไอดี และการสูญเสียเนื่องจากความฝืดของชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ซึ่งปัจจัยทั้ง 2 ประการจะทำให้แรงบิดเครื่องยนต์และประสิทธิภาพเชิงปริมาตรลดลง [15] แรงบิดเครื่องยนต์สูงสุดของการใช้น้ำมันดีเซล ปี่ 7 แบบ 100% เท่ากับ 60.47 N.m ในขณะที่การใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิส 10% ให้แรงบิดสูงสุด 56.81 N.m ในด้านกำลังเบรกเครื่องยนต์พบว่าการเพิ่มความเร็วรอบจะทำให้กำลังเบรกเครื่องยนต์เพิ่มสูงขึ้น การใช้น้ำมันดีเซล ปี่ 7 แบบ 100% และการใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิส 10% ยังคงให้กำลังเบรกสูงสุดคิดเป็น 11.34 kW และ 10.68 kW ตามลำดับ ในขณะที่การใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสส่งผลให้กำลังเบรกเครื่องยนต์ลดลง ตัวค่าซีเทนของน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสที่ต่ำกว่าน้ำมันดีเซล ปี่ 7 แบบ 100% เป็นตัวแปรสำคัญที่

ทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ลดต่ำลง [16] อย่างไรก็ตามด้วยกำลังเบรคเครื่องยนต์ที่ลดลงเพียง 5.3% ดังนั้นการนำเอาน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกไปใช้งานจึงมีความเป็นไปได้สูงซึ่งถ้ามีการนำไปใช้จริงจะสามารถช่วยบรรเทาหรือลดปริมาณการกำจัดขยะพลาสติกให้กับชุมชนได้อีกทางหนึ่ง



ภาพที่ 3 แรงบิดเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติก

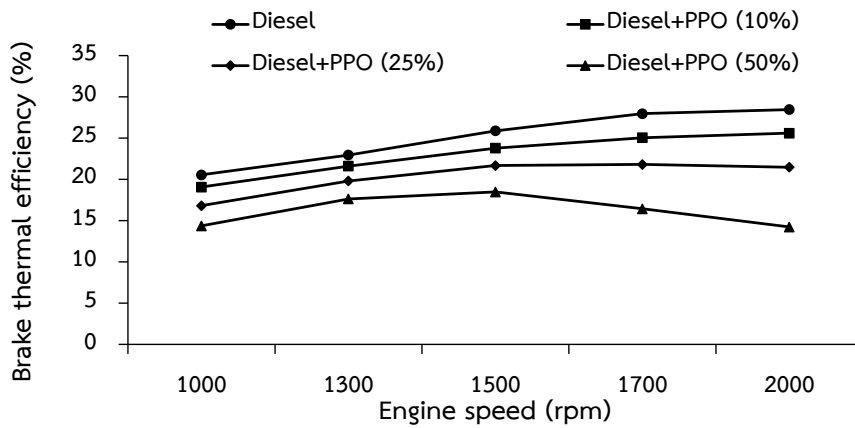


ภาพที่ 4 กำลังเบรคเครื่องยนต์ที่ได้จากการปรับความเร็วรอบของเครื่องยนต์

### ประสิทธิภาพความร้อนเครื่องยนต์

ประสิทธิภาพความร้อนเครื่องยนต์เป็นตัวเลขแสดงถึงอัตราส่วนกำลังที่เครื่องยนต์ผลิตได้เทียบกับพลังงานของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ป้อนให้กับเครื่องยนต์ โดยทั่วไปเครื่องยนต์ดีเซลจะให้ประสิทธิภาพความร้อนอยู่ในช่วง 30-35% [17] ผลการทดลองพบว่าการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 แบบ 100% ให้ประสิทธิภาพความร้อนอยู่ในช่วง 20.54 – 28.45% ช่วงความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000-2,000 rpm ในขณะที่การใช้การใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 10% 25% และ 50% ให้ประสิทธิภาพทางความร้อนอยู่ในช่วง 19.06-25.59 % 16.81-21.47 % และ 14.37-18.48 % ตามลำดับ จากข้อสังเกตกำลังเบรคและประสิทธิภาพความร้อนเครื่องยนต์ของการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 25% และ 50% ความเร็วรอบเครื่องยนต์ในช่วง 1,700-2,000 rpm กำลังเบรคและประสิทธิภาพความร้อนเครื่องยนต์มีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสที่สัดส่วน 50% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการใช้น้ำมันที่สัดส่วนนี้ไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในอนาคตได้ อย่างไรก็ตามถ้ามี

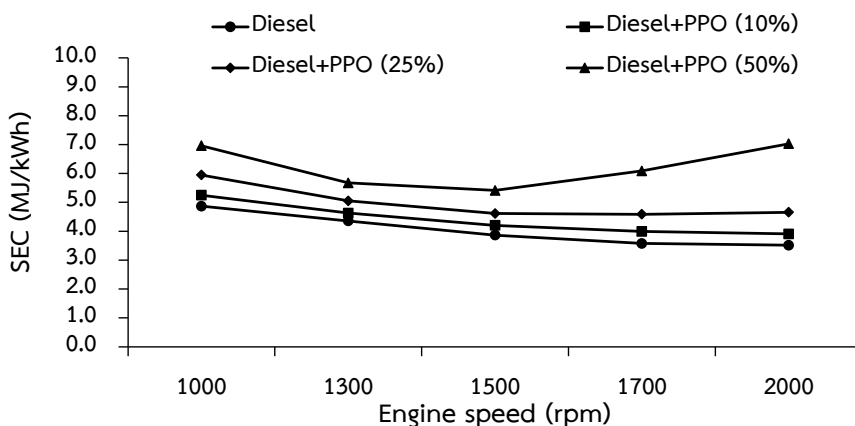
การนำเอาน้ำมันนี้ไปเพิ่มคุณภาพด้วยการเติมสารเพิ่มคุณภาพพิเศษบางอย่างลงไปก็จะทำให้เครื่องยนต์สามารถเดินเครื่องยนต์ในรอบที่สูงขึ้นได้เช่นกัน [18]



ภาพที่ 5 ประสิทธิภาพความร้อนเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติก

#### อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเป็นตัวเลขที่บ่งบอกถึงสมรรถนะการใช้พลังงานของเครื่องยนต์เทียบกับกำลังที่ผลิตได้ โดยทั่วไปในกรณีของการใช้น้ำมันดีเซลที่สภาวะความเร็วรอบเครื่องยนต์ต่ำจะให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานสูง ในขณะที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์สูงอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจะลดต่ำลง อย่างไรก็ตามผลการทดลองงานวิจัยนี้พบว่าการใช้น้ำมันดีเซล ปี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก 25-50% ช่วงปลายความเร็วรอบเครื่องยนต์จะให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะที่สูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของอัตราความสิ้นเปลืองพลังงานมีสาเหตุมาจาก น้ำมันดีเซล ปี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกมีค่าความร้อนต่ำ เครื่องยนต์จะชดเชยด้วยการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่สูงขึ้นหรือกล่าวได้ว่าเมื่อเครื่องยนต์เติมน้ำมันดีเซล ปี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกแรงบิดและกำลังของเครื่องยนต์จะลดลง [19-20] จากภาพการใช้น้ำมันดีเซลปี 7 แบบ 100% ให้อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุด ถัดมาเป็นน้ำมันดีเซล ปี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 10% 25% และ 50% ตามลำดับ อัตราความสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องยนต์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลและน้ำมันดีเซล ปี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก 10% มีค่า 50-30 MJ/kWh และ 50-30 MJ/kWh ตามลำดับ



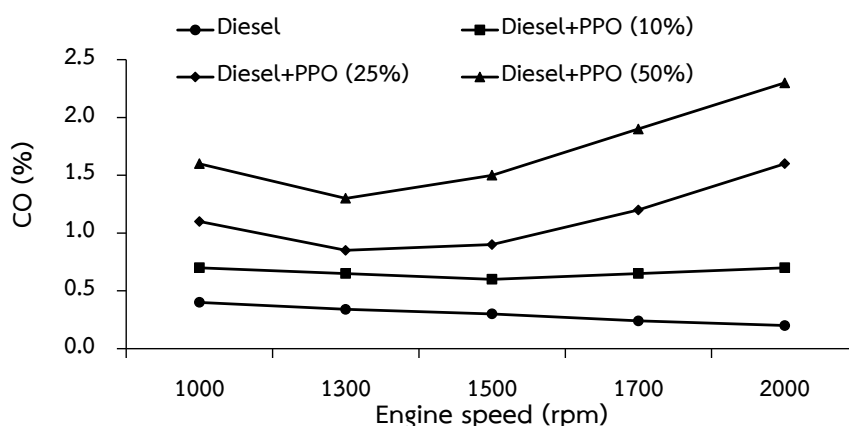
ภาพที่ 6 การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

## การวิเคราะห์ไอเสียเครื่องยนต์

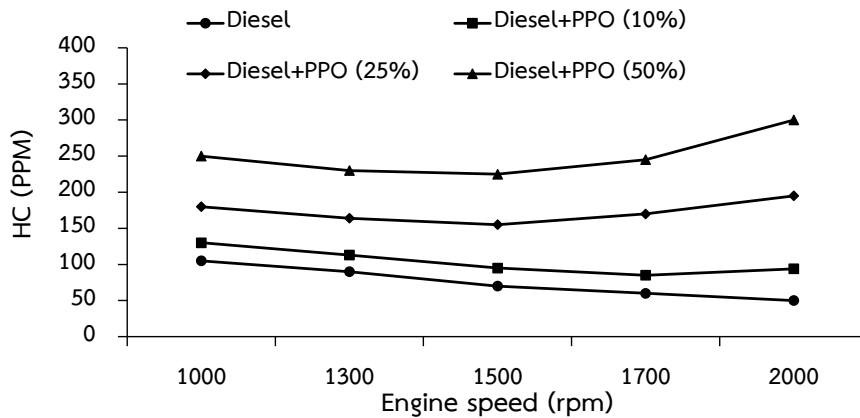
การประเมินมลพิษไอเสียเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรจากการใช้น้ำมันทั้ง 4 ชนิด พบว่าการปรับเพิ่มความเร็รรอบส่งผลต่อการเพิ่มและลดปริมาณมลพิษของเครื่องยนต์ กล่าวคือในส่วนของการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 100% และการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก 10% ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 25-50% มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้อธิบายได้ว่า เมื่อใช้ความเร็วรอบสูงจะทำให้อัตราความสิ้นเปลืองเพิ่มขึ้น ในสภาวะนั้นปริมาณออกซิเจนเข้าสู่เครื่องยนต์ไม่เพียงพอทำให้อัตราส่วนผสมอากาศต่อเชื้อเพลิงจะหนาและส่งผลให้การเผาไหม้ในกระบอกสูบไม่สมบูรณ์และเกิดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงในที่สุด [6] การใช้น้ำมันดีเซล บี 7 100% และน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 10% ให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่ในช่วง 0.2-0.4 ppm และ 0.65-0.70 ppm ตามลำดับ ในขณะที่การใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 25-50% ให้ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูง และอยู่ในช่วง 0.85-1.60 ppm และ 1.30-2.30 ppm ตามลำดับ

ในด้านการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอน พบว่าการปรับเพิ่มความเร็รรอบเครื่องยนต์ส่งผลต่อการเพิ่มและลดปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอน โดยมีทิศทางและแนวโน้มที่สอดคล้องกับการเกิดคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่สภาวะความเร็รรอบเครื่องยนต์สูงการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 25-50% จะทำให้การเผาไหม้ในกระบอกสูบไม่สมบูรณ์ และเกิดปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงตกค้างหรือเผาไหม้ได้ไม่หมด มวลของเชื้อเพลิงที่ไม่เผาไหม้จะถูกปล่อยออกมาในจังหวะคายของเครื่องยนต์ [21] การใช้น้ำมันดีเซล บี 7 แบบ 100% และการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 10% ให้ปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนอยู่ในช่วง 50-105 ppm และ 85-130 ppm ตามลำดับส่วนการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่ 25-50% ให้ปริมาณแก๊สไฮโดรคาร์บอนเพิ่มสูงขึ้นและอยู่ในช่วง 155-195 ppm และ 225-300 ppm ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเมื่อนำปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรคาร์บอนเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ได้ไม่เกิน 4.5% และ 1000 ppm ตามลำดับ พบว่าการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้ง 4 ชนิด ยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังนั้นในส่วนของการมลพิษไอเสียจึงสรุปได้ว่า การนำเอาการใช้น้ำมันดีเซล บี 7 ผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่สัดส่วน 10% 25% และ 50% ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และแก๊สไฮโดรคาร์บอนเกิดขึ้นต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้



ภาพที่ 7 ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เมื่อใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก



ภาพที่ 8 ปริมาณไฮโดรคาร์บอนเมื่อใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสขยะพลาสติก

### สรุปผลการวิจัย

การนำเอาน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกชนิดกลั่นอย่างง่ายไปใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลการเกษตรขนาดเล็กสามารถนำไปใช้ได้ในรูปแบบของการนำไปผสมกับน้ำมันดีเซลปี 7 และมีสัดส่วนผสมที่เหมาะสมสูงสุดคือ 10% คือใช้น้ำมันดีเซล 90% และน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติก 10% ในด้านของอัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง แรงบิดและกำลังเบรกเครื่องยนต์ ประสิทธิภาพความร้อน อัตราความสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะ และมลพิษไอเสียมีสมรรถนะต่ำกว่าการใช้น้ำมันดีเซล อีกด้านในส่วนของการใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่สัดส่วน 25% เบื้องต้นยังไม่มีที่เหมาะสมเพียงพอสำหรับการนำไปใช้เนื่องจากสมรรถนะของเครื่องยนต์ที่ได้ยังค่อนข้างต่ำ การใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสที่สัดส่วน 10% ให้อัตราความสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าอยู่ในช่วง 0.57-1.68 L/h ประสิทธิภาพทางความร้อนอยู่ในช่วง 19.06-25.59% จากผลการทดลองในปัจจุบันและที่จะเกิดขึ้นในอนาคต การนำเอาขยะพลาสติกมาเปลี่ยนรูปเป็นน้ำมันไพโรไลซิสและนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมกับน้ำมันดีเซลมีโอกาสนำปริมาณขยะพลาสติกลดลงได้และเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการกำจัดขยะพลาสติกได้อย่างยั่งยืน

### ข้อเสนอแนะ

การใช้น้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกที่สัดส่วน 25% ส่งผลให้สมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลค่อนข้างต่ำเพื่อให้ได้สัดส่วนที่เพิ่มขึ้นสูงมากกว่า 10% สามารถดำเนินการได้ 2 แนวทาง คือ การทดสอบเพิ่มเติมในสเกลความถี่ที่ต่ำลงอีกครั้ง เช่น ที่สัดส่วน 5% 10% 15% 20% และ 25% และการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันให้เพิ่มสูงขึ้น เช่น การเติมสารเพิ่มคุณภาพสำหรับการเพิ่มค่าความร้อนเชื้อเพลิง เป็นต้น นอกจากนี้ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงน้ำมันดีเซลผสมกับน้ำมันไพโรไลซิสพลาสติกในระยะยาวที่ใช้งานแบบต่อเนื่องเพื่อวิเคราะห์อัตราการสึกหรอของเครื่องยนต์โดยมีการทดสอบเปรียบเทียบกับใช้น้ำมันดีเซลปี 7 ปัจจุบัน

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อม และปัญหาภัยพิบัติหมอกควัน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนพื้นที่และเครื่องมือวิจัยในการทดสอบ ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนให้ทุนการศึกษาวิจัย 2 ปี ต่อเนื่อง ประจำปี

งบประมาณ 2564-2565 และขอขอบคุณ คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.) ที่สนับสนุนงาน  
มูลฐาน ประจำปีงบประมาณ 2567 ที่สนับสนุนงบประมาณและเครื่องมือวิจัยในการทดลอง

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Larionov, A., and Saba Jasim, R.A. (2021). Recycling building materials is the ideal way to protect the environment. **E3S Web of Conferences**. 258, 09046,  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125809046>
- [2] Kamsook, S., Phongphiphat, A., Towprayoon, S., and Vinitnantharat, S. (2023). Investigation of plastic waste management in Thailand using material flow analysis. **Waste Management & Research**. 41 (4), 924–935.
- [3] Pandey, P., Dhiman, M., Kansal, A., and Subudhi, S. (2023). Plastic waste management for sustainable environment: techniques and approaches. **Waste Disposal & Sustainable Energy**. 5(1), 205–222.
- [4] Wongkhorsub, C., and Chindaprasert, N. (2013). A comparison of the use of pyrolysis oils in diesel engine. **Energy and Power Engineering**. 5 (1), 350-355.
- [5] Phasinam, K., and Kassanuk, T. (2565). Performance testing on a small diesel engine using diesel mixed with waste plastic diesel, **Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation**. 1 (2), 1-13.
- [6] Faisal, F., Rasul, M.G., Jahirul, M.I., and Chowdhury, A.A. (2023). Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics, **Science of the Total Environment**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163756.
- [7] Panyoyai, N., Kamdaeng, T., and Wongsiriamnuay, T. (2017). production of pyrolysis oil from plastic waste and its application in a small gasoline engine, **Journal of Innovative Technology Research**, 1 (1), 85-97.
- [8] Pumpuang, A., Klinkaew, N., Wathakit, K., Sukhomc, A., and Sukjit, K. (2024). the influence of plastic pyrolysis oil on fuel lubricity and diesel engine performance. **Royal society of chemistry**, 14, 10070-10087.
- [9] Chotiratanasak, J., Vitidsant, T., and Khemkhao, M. (2023). feasibility study of plastic waste pyrolysis from municipal solid waste landfill with spent fcc catalyst, **Environment and Natural Resources Journal**, 21 (3), 256-265.
- [10] Sangnate, O., and Reubroycharoen, P. (2020). Maximum blended ratio of pyrolysis oil for thai commercial diesel standard. **Journal of Renewable Energy for Community**. 3 (5), 39-45
- [11] Wongchai, W., (2014). effects of pyrolysis oil-diesel blends on the performances and emissions of a small diesel engine, **The Journal of Industrial Technology**, 10 (2), 72-73.



- [12] Wongkhorsub, C., Chaowasin, W., and Theinnoi, K. (2022). experimental evaluation of performance and combustion characteristics of blended plastic pyrolysis oil in enhanced diesel engine, **Energies**, 15(23), doi.org/10.3390/en15239115.
- [13] Homdoun, N., Tippayawong, N., and Dussadee, N. (2015). Performance and emissions of a modified small engine operated on producer gas. **Energy Conversion and Management**. 94 (1), 286–292.
- [14] Homdoun, N., Sasujit, K., Dussadee, N., and Ramaraj, R. (2020). Experimental investigation of a small agricultural diesel engine performance using community biodiesel from wild trees. **Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication**. 2 (1), 9-16.
- [15] Homdoun, N., Sasujit, K., and Dussadee, N. (2012) Performance of diesel generator with biodiesel from on highland community. **Proceedings of the 25<sup>th</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand**. 19-21 October 2012, Aonang Villa Resort, Krabi, Thailand.
- [16] Arbab, M.I., Masjuki H.H., Varman, M., Kalam, M.A., Imtenan, S., and Sajjad, H. (2014). Experimental investigation of optimum blend ratio of jatropha, palm and coconut based biodiesel to improve fuel properties, engine performance and emission characteristics. **International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering**. 68 (1), 55-59.
- [17] Heywood J.B. (1989), **Internal combustion engine fundamentals**, McGraw-Hill, Singapore.
- [18] Deepankumar, S., Senthil Kumar, K.L., Gokul, L.S., and Saravanan, B. (2020) The result of nano-additives in diesel engine using diesel-e waste plastics pyrolysis oil fuel blends: A review. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering** 764, 012042, doi:10.1088/1757-899X/764/1/012042.
- [19] Sugoza, I., Oner, C., and Altun, S. (2010). The performance and emissions characteristics of a diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel. **International Journal Engineering Research & Development**. 2 (1), 50-53.
- [20] Bora, D.K., Das, L.M., and Gajendra Babu, M.K. (2008). Performance of a mixed biodiesel fueled diesel engine. **Journal of Scientific & Industrial Research**. 67 (1), 73-76
- [21] Kalargaris, I., Tian, G., and Gu, S. (2017). Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. **Fuel Processing Technology**. 157:108-115. DOI: [10.1016/j.fuproc.2016.11.016](https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.11.016).

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ระบบทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเพื่อการแปรรูป  
น้ำพริกหนุ่มในระดับวิสาหกิจชุมชน

Economic analysis of Freeze Drying System for Northern Thai Green Chili Dip Processing  
in Community Enterprise

จักรพรรณ คงชนะ<sup>1</sup> ชูรัตน์ ธารารักษ์<sup>1</sup> กิตติกร สาสุจิตต์<sup>1</sup> และนิกราน หอมดวง<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

School of Renewable Energy, Maejo University, 63 Village No.4, Nong Han Subdistrict, San Sai District,  
Chiang Mai Province 50290

<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 084-1773632. E-mail address: nigranghd@gmail.com

Received: 2 August 2024, Revised: 15 October 2024, Accepted: 19 December 2024, Published online: 30 December 2024

### Abstract

This research aimed to investigate the Economic analysis of a freeze-drying system for Thai green chili dip processing at the community enterprise level. Using the freeze-drying system for Green Chili Dip processing and calculating return on investment, (ROI) and internal rate of return, (IRR). The result was that the investment cost of the Freeze-drying system for the Community Enterprise is 1,000,000 baht. It can produce Northern Thai green chili dip processing amount of 18,900 package per year, 45 baht per packaging. Circulation cost of 850,000 baht per year, in terms of break-even point, is 1,484.99 package and shows in terms of payback period is 1.7 years, and Return on Investment, (ROI) and Internal Rate of Return, (IRR) are 14% and 46.70% respectively.

**Keywords:** Freeze Drying System, Thai Green Chili Dip, Community Enterprise

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ระบบอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งสำหรับการแปรรูปน้ำพริกหนุ่มในระดับวิสาหกิจชุมชน ทำการอบแห้งน้ำพริกหนุ่มด้วยระบบอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง และประเมินผลตอบแทนจากการลงทุน ROI และอัตราผลตอบแทน IRR ผลการศึกษาพบว่า ระบบอบแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเบื้องต้น 1,000,000 บาท สามารถผลิตน้ำพริกหนุ่มแช่เยือกแข็งได้จำนวน 18,900 แพ็ค ต่อปี ราคาจำหน่ายแพ็คละ 45 บาท คิดเป็นยอดขายเท่ากับ 850,000 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุน 1,484.99 แพ็ค ซึ่งมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1.7 ปี ผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) เท่ากับ 14% และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 46.70%

**คำสำคัญ:** ระบบทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง, น้ำพริกหนุ่ม, วิสาหกิจชุมชน



## บทนำ

ปัจจุบันการแปรรูปอาหารเป็นกระบวนการที่มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระดับวิสาหกิจชุมชน ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจท้องถิ่น น้ำพริกหนุ่มซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อเสียงจากภาคเหนือของประเทศไทย ตามภาพที่ 1 ซึ่งได้รับความนิยมทั้งในประเทศและต่างประเทศ การแปรรูปน้ำพริกหนุ่มเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการเก็บรักษาและขยายตลาดจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและควรได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การทำแห้งแบบแช่แข็ง (Freeze-Drying) หรือที่เรียกกันว่า ไลโอไฟล์เซชัน (Lyophilization) เป็นกระบวนการกำจัดความชื้นที่ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น อาหาร ยา และเทคโนโลยีชีวภาพ กระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการแช่แข็งผลิตภัณฑ์ ลดแรงดันรอบๆ และกำจัดน้ำแข็งโดยการระเหิด (การเปลี่ยนจากของแข็งเป็นก๊าซโดยไม่ผ่านสถานะของเหลว) ระบบทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการเก็บรักษาคุณค่าทางโภชนาการและรสชาติของน้ำพริกหนุ่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ การนำเทคโนโลยีนี้มาใช้ในระดับวิสาหกิจชุมชนยังคงเป็นเรื่องใหม่ และจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน [1]



ภาพที่ 1 ลักษณะกายภาพน้ำพริกหนุ่ม

วัฒนธรรมอาหารของประชาชนทางภาคเหนือนิยมน้ำพริกถือเป็นอาหารประจำภาค ทั้งนี้ น้ำพริกหนุ่มยอดนิยมนิยมของคนเชียงใหม่ มีอยู่ 4 ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ น้ำพริกหนุ่มด่าง น้ำพริกหนุ่มศรีพรรณ น้ำพริกหนุ่มเจี๊หวงษ์ และน้ำพริกหนุ่มแหนมบุญศรี มีความ แสดงตามภาพที่ 2 ทั้งนี้แต่ละผู้ผลิตมีความแตกต่างรสชาติ และส่วนประกอบ ตามแต่ความต้องการผู้บริโภค

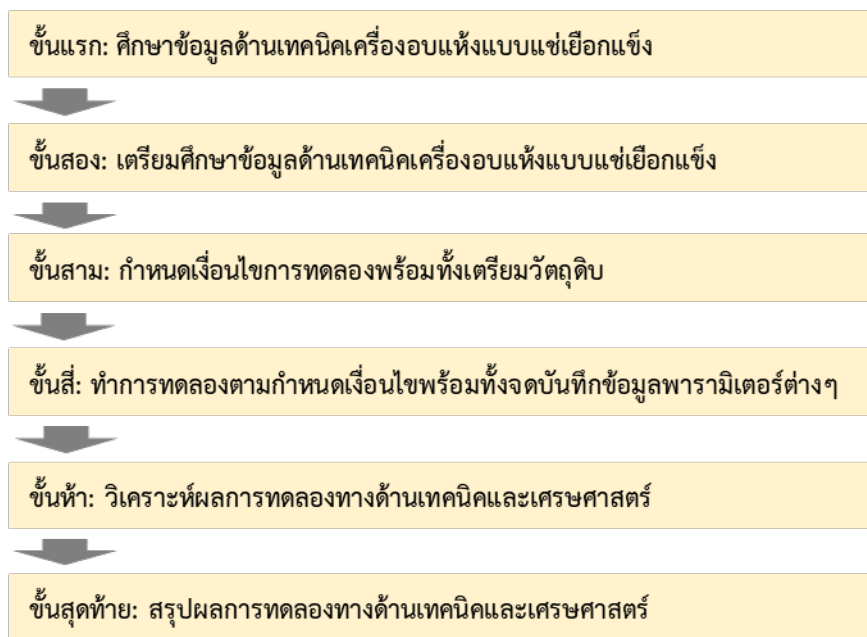


ภาพที่ 2 น้ำพริกหนุ่มยอดนิยมนิยมของคนเชียงใหม่

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ของระบบทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งสำหรับการแปรรูปน้ำพริกหนุ่มในระดับวิสาหกิจชุมชน โดยการลงทุนเริ่มแรกจะใช้เครื่อง Freeze Dryer รุ่น Harvest Right Small Freeze Dryer

### วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ **ขั้นแรก** ศึกษาข้อมูลด้านเทคนิคเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง **ขั้นที่สอง** เตรียมศึกษาข้อมูลด้านเทคนิคเครื่องอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ทั้งนี้เครื่องดังกล่าวติดตั้ง ณ ศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรม ภาค 1 จังหวัดเชียงใหม่) **ขั้นที่สาม** กำหนดเงื่อนไขการทดลองพร้อมทั้งเตรียมวัตถุดิบ **ขั้นที่สี่** ทำการทดลองตามกำหนดเงื่อนไขพร้อมทั้งจดบันทึกข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ **ขั้นที่ห้า** วิเคราะห์ผลการทดลองทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ และ**ขั้นสุดท้าย** สรุปผลการทดลองทางด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ ตามภาพที่ 3

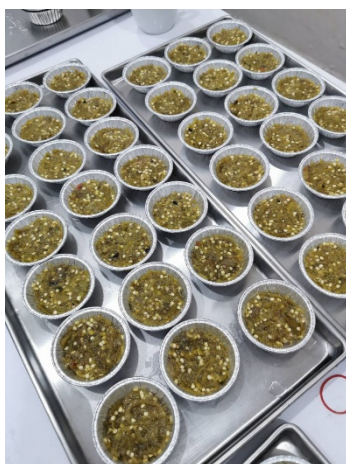


ภาพที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### ขั้นตอนและวิธีการอบน้ำพริกหนุ่ม

ทำการจัดเตรียมน้ำพริกหนุ่มสด 1,000 g ตักแบ่งใส่ถ้วยขนาด 66 x 21 mm ซึ่งน้ำหนักของถ้วยและปรับค่าเป็นศูนย์ด้วยเครื่องชั่งดิจิตอล แบ่งน้ำพริกหนุ่มใส่แต่ละถ้วยในปริมาณ 20 g ทั้งหมดจำนวน 50 ถ้วย ใช้ระยะเวลาอบ 24 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ใช้อบ -40 องศาเซลเซียส ลักษณะการจัดวาง ดังแสดงตามภาพที่ 4 การคำนวณน้ำหนักน้ำพริกหนุ่มต่อ รอบ (Batch) สำหรับทำพรีชทราย จำนวน 5 ชั้น (ถาด) ละ 21 ถ้วยๆ ละ 20 กรัม (ใช้เวลา 24 ชั่วโมง) ดังนั้น ตัวอย่างการเตรียมอบแห้งน้ำพริกหนุ่มสามารถคำนวณได้ดังรายการต่อไปนี้

- 21 ถ้วย x 5 ชั้น x 20 grams เท่ากับ 2,100 grams คิดเป็น 2.10 kg/Batch/day
- 1 เดือน ทำการ Freeze Dry เท่ากับ 15 Batch คิดเป็น 31.50 kg/Batch/month
- 1 ปี ทำการ Freeze Dry เท่ากับ 180 Batch คิดเป็น 378 kg/Batch/year



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการเตรียมอบแห้งน้ำพริกหนุ่ม

การอบแห้งน้ำพริกหนุ่มแต่ละครั้งบรรจุเข้าไปในเครื่องอบแห้งแบบ Freeze dry จัดวางเป็นชั้นๆ แสดงตามภาพที่ 5 เครื่องอบแบบ Freeze dry ที่ใช้แบรนด์ Harvest Right, LLC. Model No: HRFDL, High: 2.8 MPa, Low: 0.44 MPa กำลังไฟฟ้า 4,400 W ความต่างศักย์ไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz และกระแสไฟฟ้า 20 A



(ก) การจัดวางภาชนะในเครื่องอบแห้งแบบ Freeze dry



(ข) เครื่องอบแห้งแบบ Freeze dry

ภาพที่ 5 การบรรจุจัดวางภาชนะในเครื่องอบแห้งแบบ Freeze dry

#### การวิเคราะห์ค่าความชื้นในวัสดุ

ความชื้นเป็นตัวบอกรปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ [2] คือ

1. การเปรียบเทียบมวลของวัสดุขึ้น เรียกว่า ความชื้นมาตรฐานเปียก นิยมใช้ในทางการค้าหรือการซื้อขายผลผลิตทางการเกษตร
2. การเปรียบเทียบมวลของวัสดุแห้ง เรียกว่า ความชื้นมาตรฐานแห้ง นิยมใช้ในเอกสารวิชาการ เนื่องจากมวลแห้งจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการทำแห้ง และง่ายต่อการอ้างอิงโดยความชื้นทั้ง 2 มาตรฐานสามารถหาได้จากสมการ (1) และ (2) ดังต่อไปนี้



### มาตรฐานเปียก

$$M_w = [(w-d) / w] \times 100\% \quad (1)$$

### มาตรฐานแห้ง

$$M_d = [(w-d) / d] \times 100\% \quad (2)$$

เมื่อ  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%db)  $M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db)  $w$  คือ น้ำหนักของวัสดุ (kg) และ  $d$  คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

### อัตราการระเหยของน้ำจากการทำแห้ง

สามารถคำนวณหาอัตราการอบแห้งซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาของการอบแห้ง ดังนั้นมวลของน้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ได้ตามสมการที่ (3)

$$D_R = \frac{M_t - M_o}{t} \quad (3)$$

เมื่อ  $D_R$  คือ อัตราการอบแห้ง (kg<sub>w</sub>/kg<sub>dry</sub>h)  $M_t$  คือ น้ำหนักของวัสดุ ณ เวลาใดๆ (%db)  $M_o$  คือ น้ำหนักเริ่มต้นของวัสดุ (%db) และ  $t$  คือ ระยะเวลาของการอบแห้ง (h) [2]

### การวิเคราะห์ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ

ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Consumption) คือ การวิเคราะห์ค่าพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการระเหยน้ำออกจากวัสดุ สามารถคำนวณได้ตามความสัมพันธ์สมการที่ (5) และ (6) [3]

$$SEC = \frac{Q_E}{m_w} \quad (5)$$

$$Q_E = 3.6E_p \quad (6)$$

เมื่อ  $SEC$  คือ ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg)  $Q_E$  คือ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมทั้งหมด (MJ) และ  $E_p$  คือ หน่วยไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมด (kWh)

### การประเมินประสิทธิภาพการทำแห้ง

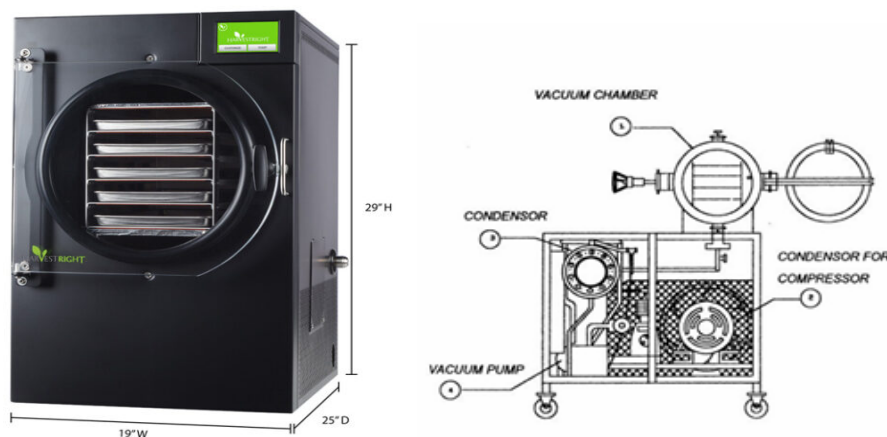
ประสิทธิภาพการทำแห้งเป็นการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำเทียบกับพลังงานที่ใช้ทั้งหมดในกระบวนการทำแห้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (7) [3]

$$\eta_{total} = \frac{m_w \times h_{fg}}{Q_E} \times 100 \quad (7)$$

เมื่อ  $\eta_{total}$  คือ ประสิทธิภาพการทำแห้ง (%)  $h_{fg}$  คือ ค่าความร้อนแฝงการระเหยของน้ำ (MJ/kg)

## การประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์

การลงทุนในเครื่องจักร-อุปกรณ์ (Capital Investment) เมื่อคิดคำนวณค่าอุปกรณ์:(Equipment Costs) ที่ใช้เพื่อการทดสอบอุปกรณ์การทำแห้งแบบแช่แข็ง ของบริษัท HARVEST Right ราคาเครื่อง (3,395 ดอลลาร์ คิดอัตราแลกเปลี่ยนที่ 34.04 บาทต่อดอลลาร์) คิดเป็นเงินบาท เท่ากับ 115,433.34 บาท (อัตราแลกเปลี่ยน 34.001 บาท ต่อ 1 ดอลลาร์ สรอ. อ้างอิงข้อมูลอัตราแลกเปลี่ยนสกุลเงิน <https://www.bot.or.th/th/statistics/exchange-rate.html>) [4] คุณลักษณะของเครื่อง (Specification of Freeze Dryer – Model Medium) ตามภาพที่ 5



ภาพที่ 5 เครื่อง Harvest right small freeze dryer

## ต้นทุนการดำเนินงาน (Operating Costs)

การสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่อง Freeze-drying กระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็งเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูง ซึ่งต้องการพลังงานจำนวนมากสำหรับการแช่แข็ง การรักษาสภาพสุญญากาศและการระเหิดการคำนวณค่าไฟของเครื่อง Freeze Dry

$$\text{ค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่าย (Baht)} = \text{จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ (Unit)} \times \text{อัตราค่าไฟฟ้า (Unit/baht)}$$

$$\text{จำนวนหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ (Unit)} = \text{กำลังไฟฟ้า (kW)} \times \text{จำนวนชั่วโมงใช้งาน (hr)}$$

## ตารางที่ 1 รายละเอียดของการคำนวณค่าไฟเครื่อง Harvest right small Freeze Dryer

Parameters	Freeze Dry	Units
น้ำหนักน้ำพริกหนุ่ม	378	kg/year
ค่าพลังงานไฟฟ้า	14.9	kW/hr
ระยะเวลา Freeze Dry ต่อครั้ง (หรือ 1 Batch)	24	hr
ค่าไฟ 1 ชม. (14.9 หน่วยต่อชั่วโมง) คิดค่าไฟที่หน่วยละ 3.9361 บาท	58.65	Baht
ค่าไฟ 1 Batch	1,407.60	Baht
จำนวนรอบที่สามารถทำงานได้แบบต่อเนื่องใน 1 เดือน	15	Batch
ต้นทุนค่าไฟต่อเดือน	21,114	Baht
ต้นทุนค่าไฟต่อปี	253,368	Baht

### การวิเคราะห์ต้นทุนผลิตภัณฑ์

วิเคราะห์ต้นทุนผลิตภัณฑ์ โดยแยกประเภทต้นทุน เช่น ต้นทุนคงที่ (Fixed cost) ต้นทุนผันแปร (Variable cost) ต้นทุนรวม Total Cost

#### ตารางที่ 2 ประมาณการขาย

รายการ	ราคาต่อหน่วย
น้ำพริกหนุ่ม Freeze Dry	378 kg/year
ยอดขาย/ปี (ขนาด 20 grams)	จำนวน 18,900 pack
ราคาขาย 45 baht/pack	850,000 baht/year

#### ตารางที่ 3 ต้นทุนการผลิต

รายการ	ราคารวม
น้ำพริกหนุ่ม Freeze Dry	378 kg/year
งบประมาณวัตถุดิบ	378,000 baht/year
งบประมาณแรงงาน	280,800 baht/year
งบประมาณบรรจุภัณฑ์	81,099 baht/year

#### ตารางที่ 4 ราคาต้นทุนวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	ปริมาณที่ใช้	ราคาทุน
น้ำพริกหนุ่ม (สด) (ราคา 200 Baht/kg)	1,890 kg/year	378,000 baht/year

ค่าจ้างแรงงาน (Labor costs) แม้ว่าการดำเนินงานบางส่วนจะสามารถทำโดยอัตโนมัติได้ แต่ยังคงต้องใช้แรงงานที่มีทักษะเพื่อดูแลและบำรุงรักษาอุปกรณ์ ซึ่งทำให้ต้นทุนแรงงานสูงขึ้น ดังตารางที่ 5 และ 6

#### ตารางที่ 5 ต้นทุนแรงงาน

ประเภท	ระยะเวลาที่ใช้	ต้นทุนต่อเดือน	ต้นทุนต่อปี
ต้นทุนแรงงานผลิตและบำรุงรักษา	1 คน/500 บาท/วัน	13,000	156,000
ต้นทุนแรงงานบรรจุ	1 คน/400 บาท/วัน	10,400	124,800
รวมค่าต้นทุนแรงงาน		280,800 บาทต่อปี	

#### ตารางที่ 6 ค่าใช้จ่ายบรรจุภัณฑ์

ประเภท	ราคาต่อหน่วย	ต้นทุนต่อเดือน	ต้นทุนต่อปี
ซองซีลสุญญากาศ	150 บาท/100 ซอง	1,170	14,040
ถ้วยฟลอยด์	3.35 บาท/ชิ้น	5,276.25	63,315
ซองกันชื้น	0.40 บาท/ซอง	312	3,744
ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ดรวม		81,099 บาทต่อปี	



### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการประเมินด้านเทคนิคการอบน้ำพริกหนุ่ม (ก) น้ำพริกหนุ่ม (ก่อนอบ) แบบ Freeze dry ผลการชั่งน้ำหนักแต่ ละถาดมีน้ำหนัก 20 g เมื่อผ่านกระบวนการอบแบบ Freeze dry เป็นเวลา 24 h แสดงตามภาพที่ 6 พบว่า (ข) น้ำพริกหนุ่ม (หลังอบ) แบบ Freeze dry น้ำหนักลดลงจากเดิม 20 g เหลือเพียง 4 g เมื่อคำนวณหา  $M_w$  คือ ความชื้นมาตรฐานเปียก (%db)  $M_d$  คือ ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%db) และปริมาณน้ำที่ระเหยออก  $m_w$  ตามความสัมพันธ์สมการ (1) (2) และ (3) พบว่า น้ำพริกหนุ่ม 1000 g เมื่อผ่านกระบวนการ Freeze dry น้ำหนักสุดท้ายอยู่ที่ 200 g ความชื้นมาตรฐานเปียก 80% ความชื้นมาตรฐานแห้ง 400% และประมาณน้ำที่ระเหยออก 0.083 kg/h



(ก) น้ำพริกหนุ่ม (ก่อนอบ) แบบ Freeze dry



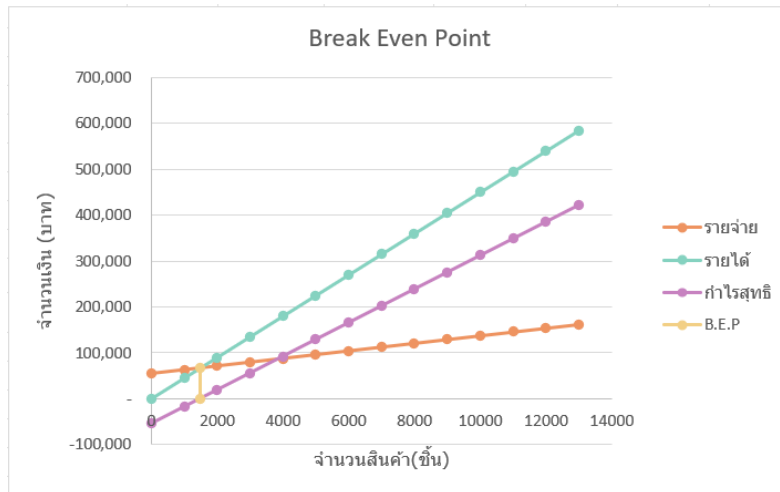
(ข) น้ำพริกหนุ่ม (หลังอบ) แบบ Freeze dry

ภาพที่ 6 เปรียบเทียบผลการอบแห้งน้ำพริกหนุ่ม

กำลังไฟฟ้าเครื่องอบแห้งแบบ Freeze dry ขนาด 4.4 kW เมื่อทำการอบแห้ง 24 h คิดเป็นพลังงานไฟฟ้า 105.6 kWh/batch เมื่อคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการแต่ละครั้ง พบว่า 528 baht/batch (หมายเหตุ ค่าไฟฟ้า 5 baht/kWh) ผลของการวิจัยจะนำไปสู่การเพิ่มมูลค่าของน้ำพริกหนุ่มให้มีราคาสูงในเชิงตลาด สำหรับธุรกิจขนาดเล็ก นำไปสู่ การส่งออกน้ำพริกหนุ่ม ตลอดทั้งสามารถเก็บรักษาคุณภาพของน้ำพริกหนุ่มได้ระยะเวลานานขึ้น

ผลความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ (Economic viability) การวิเคราะห์จุดคุ้มทุน (Break-Even Analysis) จุดคุ้มทุน ของผลิตภัณฑ์ น้ำพริกหนุ่ม Freeze Dry ต้นทุนคงที่ เท่ากับ 54,514 บาท ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย เท่ากับ 8.29 บาทต่อหน่วย ราคาขาย 45 บาท/แพ็ค (20 กรัม)

ประเมินจุดคุ้มทุนสูตรคำนวณจุดคุ้มทุน ณ ปัจจุบัน เท่ากับต้นทุนคงที่/(ราคาขาย - ต้นทุนผันแปรต่อหน่วย)  $54,514 / (45 - 8.29)$  เท่ากับ 1,484.99 ชิ้น คิดเป็นเงิน 66,824.57 ผลการวิเคราะห์จุดคุ้มทุน แสดงตามภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของน้ำพริกหนุ่มแบบพรีซดราย

ผลตอบแทนจากการลงทุน (Return on Investment, ROI) ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น การกำหนดราคาผลิตภัณฑ์ ความต้องการของตลาด และประสิทธิภาพในการดำเนินงาน สำหรับผลิตภัณฑ์เฉพาะหรือสินค้าที่มีอัตรากำไรสูง ROI อาจน่าสนใจ แม้ว่าจะมีการลงทุนเริ่มต้นที่สูงก็ตามมูลค่าปัจจุบันสุทธิจากการลงทุน - NPV (Net Present Value)

ผลตอบแทนจากการลงทุน Return on Investment (ROI) ความสำคัญของ ROI การวัดความสำเร็จในธุรกิจในเรื่องของการดำเนินธุรกิจ ROI เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพที่สำคัญ (KPI) ที่ช่วยวัดกำไรจากการลงทุน เมื่อธุรกิจต้องการตรวจสอบความคุ้มค่าของการลงทุน ไม่ว่าจะเป็นการซื้ออุปกรณ์ใหม่ การเริ่มแคมเปญการตลาดหรือการลงทุนในการวิจัยและพัฒนา การคำนวณ ROI ช่วยให้เข้าใจว่าแนวทางการลงทุนไหนที่นำไปสู่กำไรและแนวทางไหนที่ขาดทุน

สมการการคำนวณ ROI = (รายได้ - ต้นทุนของสินค้าที่ขายไป) / ต้นทุนของสินค้าที่ขายไป x 100  
แสดงวิธีการคำนวณ การลงทุนซื้อเครื่อง Freeze dry สำหรับอบแห้งน้ำพริกหนุ่มเพื่อจำหน่าย

**ประมาณการขาย**

รายการ	รวม
น้ำพริกหนุ่ม พรีซดราย	378 กิโลกรัม/ปี
รายได้จากการขาย	850,000 บาท/ปี

**ต้นทุนการผลิต**

รายการ	รวม
ต้นทุนเครื่อง Freeze Dryer	115,433.34 บาท
ต้นทุนวัตถุดิบ	378,000 บาท/ปี
ต้นทุนแรงงาน	280,800 บาทต่อปี
ต้นทุนบรรจุภัณฑ์	81,099 บาทต่อปี
<b>รวม</b>	<b>739,899 บาทต่อปี</b>

คำนวณค่า ROI สามารถประเมินได้ตามความสัมพันธ์ คือ (รายได้ - ต้นทุนของสินค้าที่ขายไป)/ต้นทุนของสินค้าที่ขายไป x 100 เมื่อแทนความตัวแปร พบว่า (850,000 - 739,899)/739,899 x 100 = 0.14 ดังนั้น ROI มีค่าเท่ากับ 14 %

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) คือ ผลต่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการกับเงินลงทุนเริ่มต้น ณ อัตราผลตอบแทนที่ต้องการ [1, 5]

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ NPV

Period	Values
0	-1,000,000
1	-450,000
2	800,000
3	1,000,000
4	1,500,000
5	2,000,000
rate	12.00%
NPV	2,035,880.46

ตารางที่ 8 อัตราผลตอบแทนภายใน IRR

IRR (Internal Rate of Return)	
อัตราผลตอบแทนภายใน	
Period	Values
0	-1,000,000
1	-450,000
2	800,000
3	1,000,000
4	1,500,000
5	2,000,000
guess rate	10.00%
IRR	46.70%
NPV	0

$$\sum_{i=0}^n \frac{Values_i}{(1+IRR)^i} = 0 \quad (7)$$

$$0 = -1,000,000 + \frac{-450,000}{(1+IRR)} + \frac{800,000}{(1+IRR)^2} + \frac{1,000,000}{(1+IRR)^3} + \frac{1,500,000}{(1+IRR)^4} + \frac{2,000,000}{(1+IRR)^5}$$

$$IRR = 46.70\%$$

### สรุปผลการวิจัย

ผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ของการอบแห้งน้ำพริกหนุ่มด้วยกระบวนการทำแห้งแบบแช่แข็งสำหรับการแปรรูปน้ำพริกหนุ่มในระดับวิสาหกิจชุมชน โดยการลงทุนเริ่มแรกจะใช้เครื่อง Freeze Dryer รุ่น Harvest Right Small Freeze

Dryer สำหรับวิสาหกิจชุมชน ในราคา 115,433.34 บาท ซึ่งสามารถผลิตน้ำพริกหนุ่ม Freeze Dry ได้จำนวน 18,900 แพ็ค ต่อปี จำหน่ายแพ็คละ 45 บาท คิดเป็นยอดขายเท่ากับ 850,000 บาทต่อปี โดยมีจุดคุ้มทุนอยู่ที่ 1,484.99 แพ็ค ซึ่งคิดเป็น รายได้ที่จุดคุ้มทุนเท่ากับ 66,824.57 บาท

ผลตอบแทนจากการลงทุน (ROI) เท่ากับ 14% และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) เท่ากับ 46.70% ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 1.7 ปี ซึ่งจากการวิเคราะห์มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) พบว่า กระแสเงินสดเป็นบวกตั้งแต่ปีที่ 2 ของการดำเนินงาน ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความเป็นไปได้และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของการนำระบบทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมาใช้ในการแปรรูปน้ำพริกหนุ่มในระดับวิสาหกิจชุมชน

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการทำวิจัย วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และขอขอบคุณศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมจังหวัดเชียงใหม่ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการวิจัยในครั้งนี้ ท้ายสุดขอขอบคุณสถาบันวิจัยและบริการวิชาการด้านโลจิสติกส์และซัพพลายเชน วิทยาลัยโลจิสติกส์และซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทาที่สนับสนุนบุคลากรและวิชาการ

### บรรณานุกรม

- [1] สุกกิจ ชัยเมืองเลน, ประภัสสร รัตนไพบูลย์, กิตติกร สาสุจิตต์, ชูรัตน์ ธารารักษ์, สุระพล ริยะนา เสริมสุข บัวเจริญ และ นิกราน หอมดวง (2567). การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์การอบแห้งพิขวงค์ซึ่งโดยใช้เครื่องอบแห้งถาดหมุนอินฟราเรด, วารสารวิชาการพลังงานทดแทนสู่ชุมชน. ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 หน้า 45-56.
- [2] จิราภรณ์ แก้วเตียว. (2562). การประเมินสมรรถนะเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับรังสีอินฟราเรด สำหรับผลิตภัณฑ์ปลา. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- [3] ณัฐชนน ตาเสาร์ และชาญณรงค์ สายแก้ว. (2557). การใช้พลังงานในกระบวนการอบแห้งลำสีพันก้าน. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- [4] อ้างอิงข้อมูลอัตราแลกเปลี่ยนสกุลเงิน <https://www.bot.or.th/th/statistics/exchange-rate.html>
- [5] มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. เครื่องมือในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการ. สืบค้นเมื่อ 1 กันยายน 2566,จาก <https://www.stou.ac.th/stouonline/lom/data/sec/Lom14/04.html>

การพัฒนาสถานการณ์จำลองสำหรับภาคพลังงานและสิ่งแวดล้อมของเมืองอัคริยะเทศบาลนคร  
เชียงใหม่ด้วยกระบวนการมีส่วนร่วมทางสังคม

**The scenario development for the Energy and Environment Sector of Chiang Mai Municipality  
Smart City is based on social engagement**

ตฤณวัสส์ สุวรรณปรีค ธนัญชัย สาทะกลาง ชยานนท์ สวัสดิ์ดิณณาท ญัฐิยา ตันตรานนท์ และวรจิตรต์ เศรษฐพรค์<sup>1</sup>  
Trinnawat Suwanprik, Thananchai Sataklang, Chayanon Sawatdeenarunat,  
Nuttiya Tantranont, and Worajit Setthapun<sup>\*</sup>

วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300  
Asian Development College for Community Economy and Technology,  
Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai 50300

\* Corresponding author: Tel.: 0898398049 E-mail address: [Worajit@g.cmru.ac.th](mailto:Worajit@g.cmru.ac.th)

Received: 15 May 2024, Revised: 2 December 2024, Accepted: 25 December 2024, Published online: 30 December 2024

### Abstract

Chiang Mai, Thailand's second-largest city, faces challenges from rapid urban growth, traffic congestion, and pollution, threatening its livability and sustainability. This study aims to develop a sustainable smart city scenario for Chiang Mai Municipality through participatory engagement and strategic planning. By examining urban development trends and formulating energy and environmental scenarios, the research seeks to create a framework that integrates ecological sustainability, technological innovation, and resident well-being. The methodology involves two key components: reviewing smart city development case studies and conducting stakeholder meetings and group interviews to facilitate social engagement processes. A SWOT analysis and scenario development are employed to evaluate actionable strategies. The study emphasizes infrastructure development, online networks, cultural preservation, economic growth, renewable energy adoption, intelligent power distribution, clean transportation, green spaces, and modernization.

The research outlines four scenarios for Chiang Mai's energy and environmental sectors: Scenario 1, "Smart City Plus," promotes low-carbon activities; Scenario 2, also "Smart City Plus," focuses on green actions; Scenario 3, "Smart City Innovation," advances technological leadership; and Scenario 4, "Global Smart City," emphasizes comprehensive technology standardization. These scenarios aim to address critical issues such as air pollution, water quality degradation, and inefficient energy use. The proposed smart city framework integrates digital technology and innovation to alleviate energy and environmental challenges. Strategies include maximizing energy efficiency, encouraging economic growth through sustainable energy adoption, and implementing environmental technologies for water quality improvement. Smart governance enhances public service delivery, infrastructure adaptability, and environmental management, while a smart economy fosters growth, improves transit systems, and elevates residents' quality of life. This research provides actionable insights for sustainable urban development in Chiang Mai.

**Keywords:** Smart City, Scenario, Chiang Mai Municipality, Social engagement

## บทคัดย่อ

เชียงใหม่เมืองที่ใหญ่เป็นอันดับสองของประเทศไทยและกำลังมีความต้องการพัฒนาไปสู่เมืองอัจฉริยะและประสบปัญหาการขยายตัว การจราจร และมลพิษส่งผลต่อความน่าอยู่และความยั่งยืน การวิจัยนี้มีความต้องการพัฒนาโครงการริเริ่มเมืองอัจฉริยะที่ยั่งยืนของพื้นที่เทศบาลนครเชียงใหม่โดยการมีส่วนร่วมทางสังคม ผ่านการศึกษาการเติบโตของเมืองและการพัฒนาสถานการณ์จำลองสำหรับภาคพลังงานและสิ่งแวดล้อมของเมืองอัจฉริยะเทศบาลนครเชียงใหม่ โดยวิธีการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วน ประกอบด้วยการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ และการใช้กระบวนการทางสังคมผ่านการประชุมและการสัมภาษณ์กลุ่ม จากนั้นทำมาวิเคราะห์ SWOT และสร้างสถานการณ์จำลอง พบว่าเชียงใหม่ให้ความสำคัญกับโครงสร้างพื้นฐาน เครือข่ายดิจิทัล การอนุรักษ์วัฒนธรรม การเติบโตทางเศรษฐกิจ และการมีส่วนร่วมของผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย พลังงานที่ยั่งยืน เครือข่ายการกระจายพลังงานอัจฉริยะ การขนส่งและการก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และพื้นที่สีเขียวในเมือง เชียงใหม่ต้องการเป็นเมืองที่ทันสมัย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และก้าวหน้าทางเทคโนโลยี โดยให้ความสำคัญกับผู้อยู่อาศัยและสิ่งแวดล้อม การวิเคราะห์สถานการณ์ภาคพลังงานและสิ่งแวดล้อมสำหรับการพัฒนาเมืองอัจฉริยะของเทศบาลนครเชียงใหม่ ประกอบด้วยสถานการณ์ที่ยั่งยืน นวัตกรรม และเทคโนโลยีขั้นสูงสี่สถานการณ์ สถานการณ์ที่ 1 "เมืองอัจฉริยะบวก" ส่งเสริมแนวทางปฏิบัติที่มีคาร์บอนต่ำ ฉากที่ 2 "เมืองอัจฉริยะอันทรกเกียรติ" เน้นย้ำถึงความเป็นผู้นำด้านเทคโนโลยี ฉากที่ 3 "นวัตกรรมเมืองอัจฉริยะ" นวัตกรรม และฉากที่ 4 "เมืองอัจฉริยะสากล" ความครอบคลุมและเทคโนโลยีที่ได้มาตรฐาน ความตระหนักรู้ด้านสิ่งแวดล้อม นวัตกรรมทางเทคโนโลยี และการเติบโตที่ครอบคลุม เป็นส่วนหนึ่งของกรอบการทำงานเมืองอัจฉริยะของเชียงใหม่ ส่วนประกอบของเมืองอัจฉริยะในเชียงใหม่ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลและนวัตกรรมเพื่อแก้ไขปัญหาพลังงานและสิ่งแวดล้อม การพัฒนาเมืองที่ยั่งยืนรวมถึงการปรับปรุงคุณภาพน้ำในพื้นที่เสื่อมโทรม การใช้พลังงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด ส่งเสริมการเติบโตทางเศรษฐกิจ ปรับปรุงธรรมาภิบาล และเพิ่มความคล่องตัวด้วยเทคโนโลยีด้านสิ่งแวดล้อมและการตรวจวัดคุณภาพน้ำ, การเลือกใช้พลังงานสะอาดเพื่อลดมลพิษทางอากาศ, เศรษฐกิจอัจฉริยะช่วยเพิ่มการเติบโตทางเศรษฐกิจ, ระบบธรรมาภิบาลอัจฉริยะปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานการบริการสาธารณะ และปรับปรุงการขนส่งและความพึงพอใจของผู้อยู่อาศัย งานวิจัยนี้ให้แนวทางที่สามารถนำไปใช้ได้จริงเพื่อการพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืนในจังหวัดเชียงใหม่

**คำสำคัญ:** เมืองอัจฉริยะ สถานการณ์จำลอง เทศบาลนครเชียงใหม่ การมีส่วนร่วมทางสังคม

## Introduction

Thailand's digital economy-focused Smart City policy uses big data analytics to improve transportation, utilities, healthcare, and other public services. Thailand's second-largest city, Chiang Mai, wants to become a smart city due to rapid economic and tourist growth. Sprawl, traffic, and pollution have plagued urban livability and sustainability due to this growth. The city wants to use technology and innovation to overcome these issues and stay a top tourist destination. City leaders worldwide use "Smart City" to describe the use of ICT to improve efficiency and quality of life. Some smart cities prioritize economic competitiveness, while others prioritize livability [1-3]. However, a smart city uses data and analysis for urban management, integrates ICT into services, and encourages community participation. Thailand's second-largest city is Chiang Mai. It actively seeks smart city status. Commerce and tourism have made the city a regional hub for transportation, education, wellness, and hospitality for two decades. Rapid urban development has caused sprawl, poor land use planning, strained public services, traffic congestion, and pollution, affecting livability and environmental sustainability. Chiang Mai is using technology and innovation to improve livability, sustainability, energy efficiency, and public services to stay a top tourist destination. The 98 communities of Chiang Mai represent various residential areas. The 40.216 square kilometers includes residential, commercial, and infrastructure zones. With 130,000 people, this area is densely populated. Community involvement is there crucial for the success of smart city initiatives, necessitating partnerships between governments, academia, businesses, and local communities. This research aims to develop bottom-up strategies for smart city development, engaging stakeholders at all levels. The

scenario approach utilized data from public consultations, interviews, and community engagement to ensure the sustainability and effectiveness of smart city strategies [4-6]. Ultimately, the research aims to contribute to a broader sustainable smart city agenda beyond Chiang Mai, supporting capacity building and technical assistance for smart city initiatives. By fostering innovation and collaboration, the outcome of this research will sustain efforts to implement smart city strategies and improve urban quality of life.

## Research Methodology

### Chiang Mai Municipality context review

The Chiang Mai context data is collected by categorizing information from various sources such as the existing database, which includes Thailand's national strategy (2018-2037), the Chiang Mai provincial smart city plan, articles, publications, annual reports, and journals from the Digital Economy Promotion Agency, National Innovation Agency, and affiliated organizations. Additionally, legislation and regulations related to the support of Chiang Mai Municipality Smart City are also considered. In addition, internet or online media were taken into account, along with a comprehensive analysis of the literature review pertaining to the notion of smart cities [7].

### Document analysis for Chiang Mai Municipality Smart City

Energy and Environment Sector document analysis for Chiang Mai Municipality's Smart City development emphasizes social engagement and community involvement in sustainable initiatives. It evaluates stakeholder engagement, community participation, capacity building, social inclusion, and monitoring frameworks. This study examines how the municipality empowers stakeholders and the community in decision-making and project implementation. The effectiveness of current approaches and areas for improvement for genuine community involvement in sustainable urban development are revealed by assessing these elements.

### Utilizing social engagement methodologies

Chiang Mai Municipality Smart City's Energy and Environment Sector collected primary data through interviews, focus groups, and surveys. Government agencies, community leaders, volunteers, visitors, nonprofits, and allies were contacted via phone, email, and in person. Focus Group Discussions (FGDs) and Group Interviews (GIs) were used to gain feedback from communities, authorities, companies, volunteers, academics, and policymakers. Representative Chiang Mai citizens were randomly or stratified sampled, open-ended talks on environmental issues and smart city initiatives were held, and qualitative data was analyzed for themes. In semi-structured interviews, GIs selected experts and stakeholders to discuss policy frameworks, issues, and future orientations. These interviews revealed themes and insights using thematic analysis. These methods provide complete stakeholder knowledge and participation for sustainable urban development in Chiang Mai.

### Scenario analysis

The Scenario Analysis methodology, incorporating SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) analysis, systematically evaluates potential scenarios and their implications for Chiang Mai Municipality Smart City's Energy and Environment Sector. It begins with identifying key factors such as regulatory

frameworks, technological advancements, and community programs. SWOT analysis, informed by stakeholder input from interviews and discussions, assesses internal strengths and weaknesses, as well as external opportunities and threats. Based on these findings, multiple scenarios are developed to explore various outcomes for the sector. Stakeholders participate in workshops to evaluate scenarios and select a preferred one aligned with city objectives. Action plans are then formulated to implement strategies outlined in the chosen scenario, ensuring effective execution and progress monitoring. This approach integrates SWOT analysis and scenario planning to anticipate and address future trends, enabling stakeholders to capitalize on opportunities and mitigate threats for sustainable urban development in Chiang Mai Municipality Smart City [8-10].

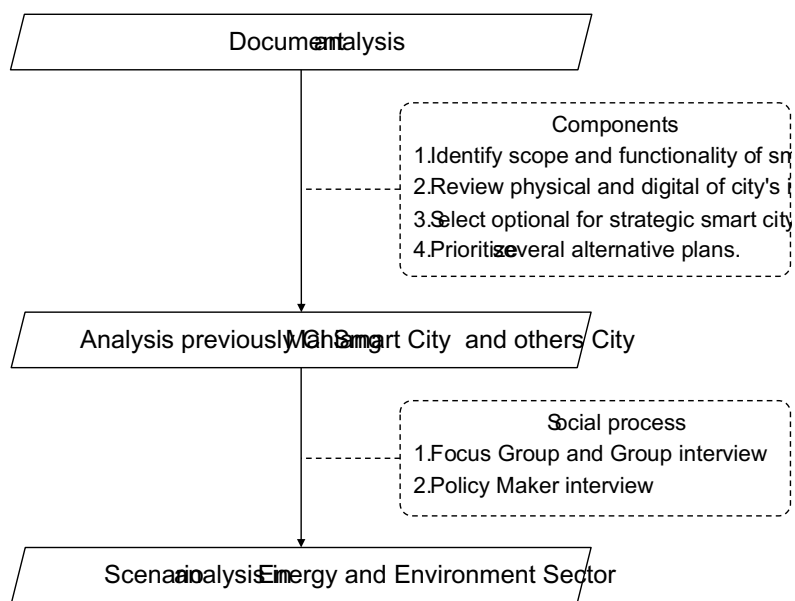


Figure 1 Research methodology framework

## Result and Discussion

### Documentary study of smart city frameworks and best practices for energy and environment

In smart city frameworks across Singapore, Bandung, Taiwan, and Kuala Lumpur, common themes emerge in energy and environmental initiatives. Each city emphasizes governmental commitment and policies, such as Singapore's Green Plan 2030, Bandung's thematic parks, Taiwan's Climate Change Response Act, and Kuala Lumpur's Green Blueprint. Technological innovation is pivotal, with Singapore investing in Grid 2.0 research, Bandung fostering startups like Smash.id for waste management, Taiwan creating the Smart Green Energy Science City, and Kuala Lumpur implementing intelligent technologies like cloud computing and IoT. Urban planning and sustainable infrastructure are also key, seen in Singapore's parkland initiatives, Bandung's restoration projects, Taiwan's green supply chain focus, and Kuala Lumpur's Sunway City development. These efforts collectively drive progress towards smart energy and environmental objectives, prioritizing sustainability and innovation for long-term urban resilience.

Ultimately, every city showcases a unique combination of governmental policies, technological advancements, and urban planning approaches that are focused on promoting smart energy and environmental initiatives. Although different methods may be used, the main objective remains the same: to develop intelligent



and environmentally-friendly cities that improve the well-being of residents and support global sustainability goals.

### Social engagement information for Chiang Mai Municipality Smart City

Table 1 are the summary of the smart city perspectives from 6 stakeholder group which are Chiang Mai citizens, Government, Business, Community, Academia and Policy maker. The data are extracted from the organized focused group and/or interviews. The perspectives of smart city are categorized into 7 topics which are 1) The meaning of Chiang Mai smart city; 2) The Direction of Chiang Mai Smart City Developments; 3) The benefits from the development of Chiang Mai Smart City; 4) Key players for the development of smart cities; 5) The indicators of sustainable smart city development; 6) Needs and supporting for sustainable smart city development; and 7) Chiang Mai's Unique style and smart city development.

Overall, the perspectives indicated that Chiang Mai should leverage technology and innovation to enhance services, administration, and economic growth, fostering creativity and progress among residents. Key elements include renewable energy, efficient transportation, and advanced technologies to improve urban life and promote sustainable development. Achieving this requires robust regulatory frameworks and significant investments in digital infrastructure and economic development. A city that prioritizes overall well-being, safety, community engagement, and happiness. Chiang Mai's journey towards smart city status underscores its commitment to sustainability, innovation, and public participation to enhance residents' quality of life. Advancing into a smart city offers various benefits, including modernized administration, expanded services, improved security, and increased citizen empowerment. Stakeholder collaboration is crucial, with the municipality playing a central role in leading initiatives across multiple sectors for smart city development include resident well-being, environmental sustainability, investment attractiveness, and tourism potential. Maximizing smart city potential involves utilizing local resources, allocating funds to sustainable initiatives, and ensuring timely growth in Chiang Mai requires cultivating innovation, raising awareness, and fostering community participation. in leveraging local assets, implementing sustainable practices, and collaborating with stakeholders to create a comprehensive urban environment aligned with national and global policy objectives..

**Table 1** Comparison of Smart City Perspectives from focus group and stakeholder engagement from Citizens, Government, Business, Community, Academics and Policy maker.

Topic	Stakeholder Group					
	Chiang Mai citizens	Government	Business	Community	Academic	Policy Makers Interview
The meaning of Chiang Mai smart city	Modern, technologically advanced city that prioritizes convenience, safety, accessibility, and fairness for its residents and visitors alike.	The urban center's strategic emphasis on harnessing technology and innovation not only bolsters the efficacy of its services and administration but also catalyzes economic expansion, generates avenues for employment, and cultivates a milieu conducive to innovation and advancement among its populace.	Clean energy, efficient transportation, and cutting-edge technologies are needed to improve urban livability and well-being and promote sustainable urban growth. Coherent policy frameworks and significant investments in digital infrastructure and economic advancement are essential to achieving these goals.	Clean energy, efficient transportation, and advanced technology are needed to improve residents' quality of life and promote sustainable urban development in a comfortable, happy city. Clear policy frameworks and large investments in digital infrastructure and economic development are needed to achieve these goals.	A smart city transcends mere technological deployment; it prioritizes the enhancement of holistic quality of life, the advancement of safety measures, and the cultivation of community engagement and well-being.	Thai smart cities improve public service efficiency and quality of life with digital technology. This modernization uses technology and social capital to improve convenience, safety, and infrastructure. Development addresses social issues and improves life through technology. health of citizens.
The Direction of Chiang Mai Smart City Developments	Forward-thinking city that values sustainability, innovation, and citizen engagement in its efforts to create a better quality of life for its residents.	Chiang Mai's goal is to showcase how innovative technologies and strategies can be effectively implemented to improve the quality of life for its residents, enhance sustainability, and position the city as a leader in the global smart city movement.	Modern, sustainable, and livable cities require efficient transportation, infrastructure development, environmental management, data-driven decision-making, and technology accessibility. These initiatives improve residents' quality of life and the city's global competitiveness.	The vision for developing Chiang Mai into a smart city focuses on leveraging technology and sustainable practices to enhance urban mobility, accessibility, environmental sustainability, and quality of life for residents and visitors.	The vision for Chiang Mai is to create a vibrant, modern, and sustainable city that offers a high quality of life and encourages repeat visits from all who come.	Tourism and housing development increase diversity, economic growth, and cultural preservation. Sustainable development is emphasized to promote tourism and income for entrepreneurs and communities. By integrating neighboring communities and improving infrastructure, traffic, and essential services, everyone benefits from regional prosperity and quality of life.

Topic	Stakeholder Group					
	Chiang Mai citizens	Government	Business	Community	Academic	Policy Makers Interview
The benefits from the development of Chiang Mai Smart City.	Commitment to leveraging technology to modernize governance, enhance service delivery, improve security, and promote citizen engagement and empowerment in the city.		Smart cities require government support for commercial activities, innovation, project quality, data utilize, and digital platforms. They can make high-living-standard cities more efficient, sustainable, and livable for residents and visitors.	The transformation into a smart city is envisioned to bring about numerous benefits, including improved quality of life, better health and environment, economic growth, enhanced security, and increased attractiveness to both residents and tourists.	The aim is to create a smart city in Chiang Mai that is competitive, safe, convenient, inclusive, and environmentally sustainable, with a strong emphasis on leveraging technology to improve the overall quality of life for its residents.	Becoming a smart city offers multifaceted benefits spanning economic, social, environmental, and administrative realms. By harnessing digital technology, innovation, and streamlined communication, this transition elevates living standards for both residents and visitors.
Key players for the development of smart cities	Significance of cooperation among local government, the commercial sector, and educational institutions in promoting the advancement of smart cities.	For integrated and sustainable smart city development, government, educational, and private sector entities must collaborate. These stakeholders may pool their abilities and resources to solve challenging urban problems and stimulate innovation-driven growth.	Innovation and technology companies, supported by government and business, drive smart city development. Their innovative solutions, along with government support, create sustainable and habitable cities.	The government, private sector, education sector, and specialized agencies like DEPA must collaborate when developing smart cities. Smart city initiatives can create sustainable, inclusive, and innovative cities by leveraging stakeholder expertise and resources.	This statement emphasizes the importance of compliance with regulations and laws by various agencies involved in the development of a specific area, particularly Chiang Mai Municipality and Province, private organizations, and city administrators.	The Chiang Mai Municipality plays a central role in the development of smart cities within its jurisdiction, leveraging its legal powers and duties to spearhead initiatives across various sectors.
The indicators of sustainable smart city development	Smart city development improves quality of life, environmental sustainability, revenue, investment appeal, and tourism potential. These advantages boost urban well-being, prosperity, and appeal.	Multisector stakeholders, international smart city indicators, and academic engagement boost Chiang Mai's innovation ecosystem and speed its smart city transformation.	Corporate innovation, competitiveness, validation, big data use, and comprehensive applications should be encouraged by the government to establish smart cities. These steps can accelerate smarter, more efficient, livable city goals.	This statement outlines key indicators for measuring sustainable smart city development, with a focus on people's happiness, household income, carbon emissions, technology adoption, and investment levels.	Improved quality of life, economic progress, and agency collaboration are indicators of Chiang Mai's smart city development. These indicators measure smart city progress and success, benefiting Chiang Mai inhabitants and stakeholders.	The smart city will provide high public standards and quality delivery services. However, main indicator is the happiness of populations in the city.

Topic	Stakeholder Group					
	Chiang Mai citizens	Government	Business	Community	Academic	Policy Makers Interview
Needs and supporting for sustainable smart city development	Leverage local human resources, allocating resources towards sustainable initiatives, and ensuring timely development to effectively harness the potential of smart city initiatives, particularly in Chiang Mai.	Every organization can participate in developing and promoting the innovation ecosystem. To achieve the development of Chiang Mai to be a smart city In the role of facilitator in creating innovation for local networks With the goal of creating SME/Startup entrepreneurs or communities to be strong through the use of innovation.	Successful urban development in Chiang Mai requires collaboration among stakeholders, including the private sector, civil society, and government agencies. Raising awareness, leveraging technology, and fostering community participation are essential for creating a smart city that meets the needs of its residents and adapts to changing circumstances.	The declaration emphasizes human resources, funds allocation, and timely growth in Chiang Mai smart city development. Chiang Mai can manage smart city growth while creating a more profitable and livable urban environment by utilizing local strengths, engaging in sustainable practices, and adapting to technological advances.	Foundational elements necessary for the development of Chiang Mai, emphasizing the importance of efficient communication systems, digital infrastructure, transportation management, and environmental sustainability.	Chiang Mai Municipality serves as the driving force behind smart city development, leveraging its legal powers and collaborating with diverse stakeholders to create a comprehensive and inclusive urban environment that aligns with national and global policy objectives.
Chiang Mai 's Unique style and smart city development	To create inclusive, vibrant, and sustainable cities, the statement emphasizes diversity, local heritage, technology for cultural preservation, and public participation in urban development.	The importance of establishing a distinct identity for the public transportation system within the area, especially in the context of integrating existing mass transit systems with future transportation infrastructure.	Transforming Chiang Mai's Walking Street into an online format presents an opportunity to modernize the market and adapt to changing consumer preferences while preserving its cultural heritage and economic significance.	Vision for Chiang Mai that prioritizes urban development, economic growth, sustainability, and safety. By focusing on infrastructure improvements, investment, job creation, transportation enhancements, and safety measures.	The declaration promotes cultural acceptance and technology to build smart municipalities in Chiang Mai. Combining tradition and innovation may create a dynamic, integrated city that respects its heritage and embraces the digital age.	Emphasizing Chiang Mai's cultural identity and integrating tradition with technology. The goal is to improve digital services, income, and tourism value while including local citizens in the development process. Understanding potential challenges helps manage cultural preservation and modernization.

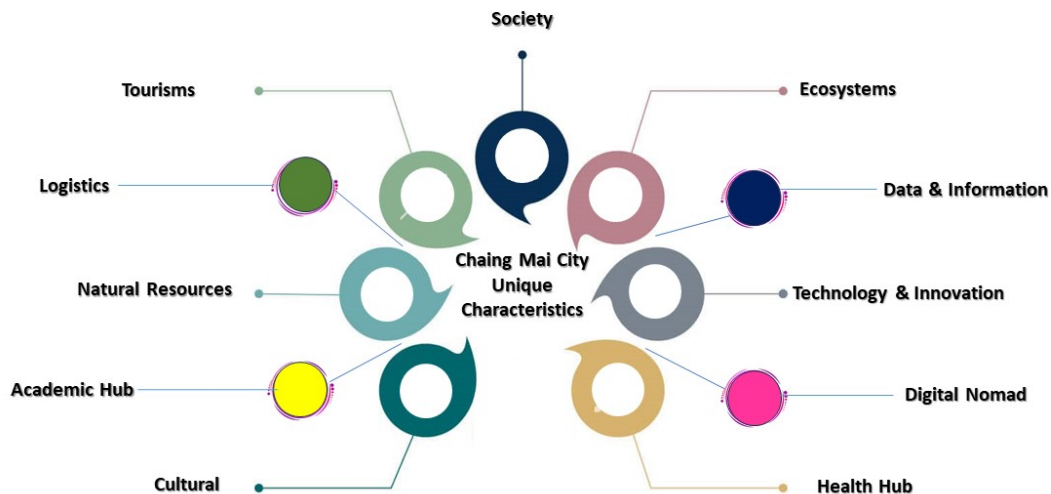


Figure 2 The DNA of Chiang Mai Municipality Smart City

From the perspectives of the stakeholder engagement, the DNA or unique characteristic of Chiang Mai was developed as the aspiration toward the future Smart City of Chiang Mai in Figure 2. In order to achieve the unique character of Chiang Mai with the Smart City Concept. The Smart city scenario planning was performed. Smart city scenario planning involves the exploration and assessment of potential futures for a city, considering various assumptions, drivers, and trends. This method assists planners and policymakers in identifying the opportunities, challenges, and trade-offs associated with different smart city solutions and services. It aids in designing and implementing solutions that are both desirable and sustainable. In this research, the focus is on the energy and environment sector including energy, water, waste, land, and human capital. Implementing the energy and environment scenario can enhance the city's efficiency, resilience, and environmental quality, while concurrently reducing costs and emissions.

### Scenario of Chiang Mai Municipality Smart City in Energy and Environment Sector

When analysing the SWOT data for the Energy and Environment Sector of Chiang Mai Municipality's Smart City development, it was discovered that scenario planning for a smart city involves examining and evaluating possible future outcomes for a city (Table 2). This process considers different assumptions, factors, and trends. This approach aids in the identification of the opportunities, problems, and trade-offs linked to various smart city solutions and services, benefiting planners and policymakers. The summary of the SWOT analysis are

**Strengths:** Chiang Mai demonstrates strong multisector innovation to address energy and environmental challenges, supported by national and international recognition. Government commitment to innovation, regulatory reform, and investment drives these initiatives, with collaboration across government, education, and business sectors. The city emphasizes digital innovation infrastructure and integrated public transportation networks as critical enablers of sustainable development.

**Weaknesses:** While the initiatives outline broad objectives and strategies, they lack detailed implementation and monitoring plans. Financial and human resource requirements for introducing innovative technologies and infrastructure improvements pose challenges. Policy execution and enforcement mechanisms are not robust, and public involvement lacks clear mechanisms for engagement in planning and execution.

**Opportunities:** Advancements in renewable energy and smart grid systems offer innovative solutions to energy and environmental issues. Chiang Mai's regional and global significance positions it for collaborations with similar smart cities, enabling knowledge sharing and resource pooling. Investments in energy and

environmental initiatives can drive economic growth, create jobs in renewable energy, and attract investments in sustainable infrastructure projects.

**Threats:** Chiang Mai faces increasing vulnerabilities from climate change, such as extreme weather events and water scarcity, which threaten sustainability efforts. Rapid urbanization and population growth strain resources and infrastructure, complicating the implementation and maintenance of initiatives. Political instability or shifts in government priorities could disrupt continuity, hindering long-term sustainability goals.

Table 2 SWOT for Chiang Mai Municipality Smart City Development in the Energy and Environment Sector

Strengths	Weaknesses	Opportunities	Threats
<p>The emphasizes multisector innovation to solve energy and environmental issues.</p> <p>National and international recognition for Chiang Mai's initiatives shows strong local and global support.</p> <p>Energy and environmental projects are supported by government commitment to innovation, regulatory reform, and investment.</p> <p>Sustainable solutions adoption requires government, educational, and business sector collaboration.</p> <p>Digital innovation infrastructure and integrated public transportation networks are stressed to enable sustainable development.</p>	<p>The scenario outlines overarching objectives and strategies for energy and environmental initiatives but lacks detailed specifics on implementation and monitoring.</p> <p>Introducing innovative technologies and improving infrastructure may require significant financial and human resources, posing challenges for Chiang Mai.</p> <p>The effectiveness of policy execution and enforcement mechanisms may vary, potentially impacting the success of energy and environmental efforts.</p> <p>While public involvement is recognized, the scenario does not provide clear mechanisms for engaging residents in the formulation and execution of initiatives.</p>	<p>The rapid advancement of technology, including renewable energy solutions and smart grid systems, presents opportunities for Chiang Mai to address energy and environmental challenges innovatively.</p> <p>Chiang Mai's regional and global significance not only highlights its potential but also facilitates collaborations with similar smart cities and relevant organizations, enabling knowledge sharing and resource pooling.</p> <p>Investment in energy and environmental initiatives has the potential to stimulate economic growth, including job creation in renewable energy sectors and attracting investments in sustainable infrastructure projects.</p>	<p>Chiang Mai faces escalating vulnerabilities due to climate change, including increased occurrences of extreme weather events and water scarcity, which jeopardize sustainability efforts.</p> <p>Rapid urbanization and population growth intensify strains on existing resources and infrastructure, posing significant challenges to implementing and maintaining energy and environmental initiatives.</p> <p>Political instability or changes in government priorities may disrupt the continuity of energy and environmental programs, hindering the achievement of long-term sustainability goals.</p>

From the SWOT analysis and the categorization of stakeholder perspectives and Chiang Mai's unique characteristics, the scenario can be categorized into three types: Smart City Plus, Smart City Prestige, and Smart City Innovation. The details are as follows:

**Scenario 1 Smart City Plus:** Chiang Mai, northern Thailand, is promoting sustainability and low-carbon development through the Sustainable Urban Tourism Project. With partners like the Hue City Centre for International Cooperation, the project promotes sustainable tourism and reduces carbon emissions through traffic-calmed zones and e-mobility. This effort is part of "Achieving Low Carbon Growth in Cities through Sustainable Urban Systems Management in Thailand," a UNDP-Greenhouse Gas Management Organization partnership. To improve Chiang Mai's climate resilience and promote low-carbon practices, the Integrated Urban Climate Action for Low-Carbon & Resilient Cities Project develops climate services and comprehensive land use planning. These projects show Chiang Mai's dedication to sustainable urban development and environmental awareness.

**Scenario 2 Smart City Prestige:** Chiang Mai is actively transforming into a smart city by investing in cutting-edge technologies for transportation, energy, and waste management. Digital innovation hubs promote the development of new businesses and encourage cooperation, while intelligent mobility solutions tackle issues related to transportation. Information technology is essential for effective city management and the provision of digital services, with a particular emphasis on establishing connectivity through public Wi-Fi networks. Electronic

government services optimize administrative procedures. Sustainability is given priority through the implementation of green initiatives, which include environmental monitoring.

**Scenario 3 Smart City Innovation:** Chiang Mai is making significant progress in becoming a Smart and Innovation City. It is implementing various initiatives such as establishing digital innovation hubs for startups, implementing Smart City projects to improve urban services, and providing support for a thriving startup ecosystem through events and incubation programs. The objective of education and research collaborations is to enhance the development of STEM fields, while efforts are being made to modernize E-Government services for improved efficiency. In addition to fostering collaboration with international partners to access global expertise and resources, Chiang Mai also prioritizes cultural innovation. This strategic approach positions Chiang Mai as a vibrant hub within the innovation ecosystem.

The key differences between the three scenarios lie in their primary focus, scope, partnerships, and level of technological and innovative integration. Smart City Plus centers on sustainability and climate resilience, with a narrower scope that prioritizes urban tourism and environmental projects, relying on international partnerships such as those with the UNDP for implementation. In contrast, Smart City Prestige adopts a more balanced approach, combining advanced technology with sustainability to improve urban services like transportation, energy, and waste management. This scenario emphasizes IT-driven solutions, including e-government services and public Wi-Fi, while fostering public-private collaborations to achieve its goals. Smart City Innovation stands out for its comprehensive strategy that integrates technological advancement, startup ecosystem development, STEM education, cultural transformation, and international collaboration. It positions Chiang Mai as a global innovation hub with a strong focus on leveraging digital technologies, fostering creativity, and building partnerships that span multiple sectors. The progression across the scenarios illustrates a shift from an emphasis on environmental sustainability (Scenario 1) to a broader focus on integrating technology and sustainability (Scenario 2), culminating in a forward-looking approach that champions innovation and global competitiveness (Scenario 3).

Since the three scenarios encompass different aspects of Chiang Mai's uniqueness and direction, it is essential to ensure inclusivity and incorporate stakeholder participation, reflecting the perspectives of Chiang Mai's people. As a result, the research has developed an integrated scenario titled "Chiang Mai Universal Smart City."

### Scenario for Chiang Mai as Universal Smart City

The term "Universal" within the realm of smart cities can be construed in several ways. It may denote inclusivity and accessibility, ensuring that the advantages of smart city endeavors are widely distributed and beneficial to all residents. Alternatively, it could signify the integration of universal design principles, creating environments and services accessible to individuals of all ages and abilities. In a broader context, "Universal" might imply the utilization of standardized technologies and practices that can be widely adopted and replicated across diverse urban landscapes, contributing to a more universally applicable approach to smart urban development. The fusion of "Universal" with "City" in the context of smart cities suggests the integration of inclusive and accessible smart technologies that can be universally embraced by urban centers. This could encompass initiatives prioritizing equitable access to digital services, sustainable practices, and innovation, rendering them relevant and advantageous on a global scale. Ultimately, the concept of a "Universal Smart City" proposes a comprehensive and inclusive approach to urban development that considers the varied needs and characteristics of cities worldwide while leveraging standardized, widely applicable technologies and practices.

The objective of the Chiang Mai municipality is to position the city as a leading model of sustainable urban development. This will be accomplished by prioritizing infrastructure enhancement, digital network improvement, cultural heritage preservation, economic expansion, and active stakeholder engagement. The city acknowledges the significance of integrating energy and environmental considerations into its smart city initiatives, pursuing development with a focus on achieving enduring sustainability and enhancing the welfare of its populace. These development objectives are delineated into five distinct categories: firstly, emphasizing the integration of renewable energy sources such as solar, wind, and hydro power into urban infrastructure; secondly, implementing a smart grid system to enhance energy distribution effectiveness and optimize usage patterns; thirdly, promoting the adoption of eco-friendly transportation options to alleviate traffic congestion and diminish air pollution; fourthly, encouraging the adoption of environmentally sustainable construction techniques to mitigate the ecological impacts of urban expansion; and lastly, implementing measures to preserve and expand urban green spaces to promote biodiversity and improve overall quality of life. Collaboration among diverse stakeholders, including government agencies, businesses, academia, and civil society organizations, is imperative to achieve these objectives. Through fostering alliances and collaboration, Chiang Mai can leverage collective knowledge and resources to effectively address energy and environmental challenges. Additionally, initiatives such as the Community Energy Transition and Sustainable Living Program empower residents to actively participate in sustainability endeavors, nurturing social cohesion and environmental stewardship within the community. By adopting these measures and incorporating them into its smart city development strategy, Chiang Mai can realize its vision of becoming a contemporary, eco-friendly, and technologically advanced city, prioritizing the well-being of its citizens and preserving its natural surroundings.

### Chiang Mai Municipality Smart City development initiative

The Smart City Initiatives in the energy and environment area was developed from the scenarios. The implementation of smart city components in Chiang Mai involves a range of activities that attempt to tackle energy and environmental issues by utilizing digital and innovative technologies. Chiang Mai's commitment to tackling energy and environmental challenges is evident via these initiatives, which involve innovative solutions and active community participation. These endeavors encompass:

1. Smart Environment initiative aims to address environmental concerns, specifically in degraded areas such as Mae Kha Canal, by leveraging community-driven efforts. Implementation encompasses the development of wastewater collection infrastructure and the incorporation of aesthetic improvements to increase the quality of water. This process is facilitated by the use of sensors to test water quality and the real-time reporting of data.

2. Smart Energy Solutions are designed to optimize energy use in households and daily routines, with the goal of mitigating air pollution and addressing climate change. The endeavor entails incorporating energy management technologies into both traditional Lanna-style homes and modern constructions in order to achieve a tangible decrease in habitable temperature of 10%.

3. The focus is on utilizing digital technology to increase profits, particularly in the agriculture and tourism industries that have been affected by the COVID-19 pandemic. Initiatives such as the Fresh Market app enable the safe acquisition of fresh goods, with the goal of stabilizing businesses and promoting economic growth after the pandemic.

4. The Intelligent Governance System aims to leverage digital technology to improve public service infrastructure, namely by implementing a comprehensive animal data and stray registration system.



Thairabies.net facilitates pet owners in adhering to regulations and preventing the transmission of rabies by offering services such as microchipping and sterilization.

5. Intelligent Mobility is a field that aims to use technology to oversee and improve public transportation. This includes monitoring the transportation network, managing parking systems, and enhancing transportation standards to increase resident satisfaction and accessibility.

## Conclusion

In this work, the analysis of Chiang Mai plan and context integrated with the perspectives of Chiang Mai stakeholders were taken into account in the development of Chiang Mai Smart City scenarios. Chiang Mai aims to lead sustainable urbanization by enhancing infrastructure, digital networks, cultural preservation, economic growth, and stakeholder engagement. Key objectives include adopting sustainable energy, intelligent power distribution, eco-friendly transportation, and expanding green spaces. Programs like the Community Energy Transition empower residents to promote sustainability and social harmony.

The city's smart city initiatives, categorized into four scenarios, focus on diverse priorities:

Scenario 1 (Smart City Plus): Low-carbon practices and climate resilience.

Scenario 2 (Smart City Prestige): Technology-driven solutions for transportation, energy, and waste management.

Scenario 3 (Smart City Innovation): Fostering startups, education collaborations, and economic growth through innovation.

Scenario 4 (Universal Smart City): Inclusivity, accessibility, and standardized technologies to address diverse urban needs.

Chiang Mai integrates smart technologies to address energy and environmental challenges, improve governance, and boost economic resilience. Efforts include improving water quality, mitigating air pollution, enhancing public transportation, and promoting renewable energy. Recommendations emphasize smart grids, renewable energy incentives, real-time emissions monitoring, EV infrastructure, and community education. By combining environmental consciousness, technological innovation, and inclusive strategies, Chiang Mai aspires to become a sustainable, eco-friendly, and technologically advanced city.

In addition, to advance the Chiang Mai Smart City project in energy and environment, practical and innovative solutions should be implemented. Key recommendations include developing smart grids, installing smart meters, and promoting renewable energy adoption through incentives. Real-time monitoring of greenhouse gas emissions and investment in energy storage systems can enhance sustainability. Smart building technologies, such as energy-efficient materials and automated systems, should be prioritized alongside public transport electrification and EV infrastructure. Community education on energy conservation and data-driven decision-making using IoT devices will support informed urban planning. Finally, supportive policies and regulations, like green building standards and clean energy incentives, are essential for long-term success.

## Acknowledgements

We are grateful to the Asian Development College for Community Economy and Technology at Chiang Mai Rajabhat University for their assistance in this research. This study succeeded thanks to their help. The Chiang Mai Municipality and locals who generously shared their knowledge and insights are greatly appreciated.

Their assistance has greatly improved our research's relevance and applicability. deeply grateful for all parties' collaboration and support, which have advanced smart city development knowledge. Thank you.

### Reference

- [1] Thailand Digital Economy Promotion Agency (DEPA), "Thailand Digital Technology Foresight 2035," [Online]. Available: <https://depa.or.th/storage/app/media/file/depa-Technology-Foresight-Final-Report-EN-250320.pdf>
- [2] P. Patcharapeepong, "Thailand unveils plan for 105 smart cities by 2027," Nation Thailand, Feb 14, 2020. [Online]. Available: <https://www.nationthailand.com/thailand/policies/40033137>
- [3] Diode Network, "Digital Economy Policy: The Case Example of Thailand," [Online]. Available: <https://diode.network/wp-content/uploads/2018/05/thai-digital-economy-policy-diode-paper1.pdf>
- [4] M. Fredericks, "The Role of Community Engagement in Urban Innovation Towards the Co-Creation of Smart Sustainable Cities," *Journal of the Knowledge Economy*, vol. 14, no. 2, pp. 732-750, 2020. doi: 10.1007/s13132-019-00333-9
- [5] I. Y. Prastya, H. Warsono, and A. R. Herawati, "Exploring the Community Involvement in Smart City through a Co-creation Approach in Indonesia," *Journal of Madani Society*, vol. 4, no. 1, pp. 1-12, 2020. doi: 10.22437/jms.v4i1.8204
- [6] EUDL, "Community Participation-Based Smart City Development," [Online]. Available: <https://eudl.eu/journal/sc> (Accessed on May 8, 2024)
- [7] Chiang Mai City Hall. (2019). Smart City Development Strategy of Chiang Mai Municipality (2018 - 2027). Chiang Mai, Thailand.
- [8] Datta, K. (2020). Application of SWOT-TOWS Matrix and Analytical Hierarchy Process (AHP) in the Formulation of Geoconservation and Geotourism Development Strategies for Mama Bhagne Pahar: an Important Geomorphosite in West Bengal, India. *Geoheritage*, 12(2). <https://doi.org/10.1007/s12371-020-00467-2>
- [9] Shala, E. (2015). A new path in foresight validation? Discussing the socio-epistemic underpinning of foresight quality criteria. *European Journal of Futures Research*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s40309-015-0079-4>
- [10] Society for International Development. (2013). Foresight as Social Hygiene: Interview with Alioune Sall and Geci Keruri-Sebina. *Development*, 56(4), 449–451. <https://doi.org/10.1057/dev.2014.50>

การประเมินศักยภาพและความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์  
ของโรงไฟฟ้าพลังงานเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก: กรณีศึกษาเทศบาลตำบลลานกระบือ

Potential Assessment and Economic Feasibility

of Power Plant with Plastic Refuse-Derived Fuel: A Case Study of Lankrabue Municipality

ปพน ไชยถาวร<sup>1</sup> อรรถกร อาสนคำ\*<sup>2</sup> ธรมิศร์ ดีทยาท<sup>2</sup> และ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์<sup>2</sup>

Paphon Chaithaworn<sup>1</sup> Attakorn Asanakham<sup>2\*</sup> Thoranis Deethayat<sup>2</sup> and Tanongkiat kiatsiriroat<sup>2</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิศวกรรมพลังงาน คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

<sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

<sup>1</sup>Energy Engineering Program, Faculty of Engineering,

Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

<sup>1</sup>Corresponding author: Tel.: 053-94144. E-mail address: attakorn.asana@cmu.ac.th

Received: 7 June 2024, Revised: 19 July 2024, Accepted: 12 December 2024, Published online: 30 December 2024

### Abstract

This research analyzes the potential of a power plant utilizing plastic waste as fuel. The waste management is carried out by the Lan Krabue Subdistrict Municipality in Ban Fak Thung, Moo 2, Lan Krabue District, Kamphaeng Phet Province, covering an area of 21,872.00 m<sup>2</sup>. The study simulates the design of a power generation system, which includes a diesel engine with a capacity of 110.00 kW and a generator rated at 100.00 kW/125.00 kVAR, operating 8.00 hours daily. Pyrolysis oil produced from plastic waste using a batch-type pyrolysis machine serves as the fuel for electricity generation. The analysis evaluates the potential energy output of the power plant and other by-products such as fertilizer and carbon powder from the processes of plant. The quantities of electricity and by-products directly impact the revenue of plant. Additionally, the study evaluates available municipal solid waste to produce pyrolysis oil for electricity generation. The simulation results, based on a project duration of 20 years, indicated that the plant can generate 5,568.00 MWh of electricity. This required 154.13 t/month of solid waste to produce the necessary pyrolysis oil, which was 48.62 % of the total 300 t/month of waste received at the landfill, sufficient for the project duration. The feasibility of investment was evaluated by considering production costs, the payback period, and the internal rate of return (IRR). With a project duration of 20 years and an annual discount rate of 6.00%, the cost of electricity production was 9.94 THB/kWh if revenue comes solely from selling electricity. This cost is higher than the feed-in tariff

(FIT) rate for Very Small Power Producers (VSPP) generating electricity from municipal waste, which is 5.08 THB/kWh, making the project unfeasible. However, when additional revenue from by-products was considered, the production cost dropped to 0.83 THB/kWh. The payback period was reduced to 7.80 years, with an IRR of 11.22 %, making the investment more viable than relying solely on electricity sales. Furthermore, exploring renewable energy technologies to reduce the energy costs of machinery in processes could enhance project revenues through carbon credit sales and reduce electricity expenses.

**Keywords:** Plastic waste to energy, Refuse-derived fuel, Power plant, Investment viability, Lankrabue municipal district.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ศักยภาพโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกของบ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ ตั้งอยู่ที่ บ้านฝากทุ่ง หมู่ 2 อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร มีพื้นที่กำจัดขยะเท่ากับ 21,872.00 m<sup>2</sup> โดยทำการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า ประกอบด้วย ต้นกำลังที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล พิกัดกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล 110.00 kW และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 100.00 kW/125.00 kVAR ผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ใช้น้ำมันโพลีโกลิสจากขยะพลาสติกที่ผลิตได้จากเครื่องโพลีโกลิสแบบกะ (Batch type) เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการวิเคราะห์ศักยภาพโรงไฟฟ้าประกอบด้วย การประเมินปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ รวมถึงผลผลิตอื่นๆ ที่ได้จากกระบวนการต่างๆ ของโรงไฟฟ้า ได้แก่ ปุ๋ย และผงคาร์บอน ซึ่งปริมาณไฟฟ้าและผลผลิตดังกล่าวจะส่งผลถึงรายรับของระบบผลิตไฟฟ้าถึงผลิตได้มาก นอกจากนั้นแล้วยังมีการประเมินถึงปริมาณขยะมูลฝอยที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันโพลีโกลิสที่มีต่อความสามารถในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า ในระยะเวลาดำเนินโครงการเท่ากับ 20 years พบว่า สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 5,568.00 MWh โดยใช้ขยะมูลฝอยเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันโพลีโกลิสซึ่งเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเดือนละ 154.13 t เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะเดือนละ 300.00 t โดยใช้ขยะมูลฝอยในการผลิตไฟฟ้าต่อเดือนเพียง 48.62 % ของปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะต่อเดือน ซึ่งเพียงพอตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ ในส่วนของการพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุน จะพิจารณาถึงต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return) โดยกำหนดให้ระยะเวลาดำเนินโครงการเท่ากับ 20 years อัตราคิดลดต่อปีที่ 6.00 % สำหรับการประเมินความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพบว่า หากรายได้มาจากการขายพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ต้นทุนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 9.94 THB/kWh ซึ่งสูงกว่าอัตราซื้อไฟฟ้าจากโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชนในรูปแบบ Fit สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.08 THB/kWh ไม่คุ้มค่าในการลงทุน แต่เมื่อรวมรายได้จากการขายผลผลิตอื่นๆ ต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าเหลือเพียง 0.83 THB/kWh ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.80 years และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 11.22 % ซึ่งคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่ากรณีที่รายได้มาจากการขายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว นอกจากนั้นแล้ว หากมีการศึกษาเพิ่มเติมในการใช้เทคโนโลยีพลังงานทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่ายในส่วนของการผลิตพลังงานไฟฟ้าในแต่ละเครื่องจักร จะสามารถเพิ่มรายรับของโครงการจากการขายคาร์บอนเครดิตและลดรายจ่ายค่าพลังงานไฟฟ้าได้

**คำสำคัญ:** ขยะพลาสติกเป็นพลังงาน, เชื้อเพลิงจากขยะ, โรงไฟฟ้า, ความเป็นไปได้ในการลงทุน, เทศบาลตำบลลานกระบือ

## บทนำ

บ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ ตั้งอยู่ที่ บ้านฝากทุ่ง หมู่ 2 อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร มีพื้นที่กำจัดขยะทั้งหมด 21,872.00 m<sup>2</sup> ปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าสถานที่กำจัดขยะทั้งหมดวันละ 10.00 t [1] โดยเป็นขยะจากชุมชน ขยะจากองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่นๆ และขยะจากสถานประกอบการกิจการของเอกชน ปัจจุบันใช้วิธีบำบัดขยะด้วยระบบเชิงกล-ชีวภาพ (Mechanical and Biological Treatment) โดยทำการคัดแยกขยะออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) ขยะที่มีมูลค่า เช่น แก้ว หรือโลหะ เป็นต้น ขยะส่วนนี้สามารถนำไปขายสร้างเป็นรายได้ให้แก่เทศบาลฯ และ 2) ขยะที่นำไปบำบัด เช่น พลาสติก เศษอาหาร เป็นต้น โดยผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบใช้อากาศด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive aeration) ซึ่งใช้เวลาในการย่อยสลาย 6-7 เดือน ขยะที่ย่อยสลายได้จำพวกเศษอาหารจะแปรสภาพเป็นปุ๋ยหมักสามารถนำไปขายหรือใช้ประโยชน์ในงานเกษตรกรรม ส่วนขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้จำพวกพลาสติกจะดำเนินการส่งขายให้กับเอกชนเพื่อนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-Derived Fuel)

อย่างไรก็ตามการกำจัดขยะด้วยวิธีดังกล่าวใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนาน และจากสถานการณ์ขยะมูลฝอยชุมชน ปี 2565 มีขยะมูลฝอยเกิดขึ้น 25.70 Mt เพิ่มขึ้นจากปี 2564 เท่ากับ 3.00 % [2] ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อปัญหาพื้นที่กำจัดขยะไม่เพียงพอในอนาคตได้ เพื่อเป็นการลดใช้พื้นที่ของบ่อกำจัดขยะ และสร้างมูลค่าจากขยะพลาสติก จึงมีแนวคิดการบริการจัดการขยะโดยทำการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า โดยใช้ขยะพลาสติกจากบ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือเป็นเชื้อเพลิง ขยะมูลฝอยจะถูกคัดแยกและนำขยะส่วนที่ใช้เป็นวัตถุดิบเข้ากระบวนการปรับสภาพขยะเพื่อลดความชื้นโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying ของ พิสิษฐ์ มณีโชติ [3] ผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบใช้อากาศด้วยวิธีเชิงกล (Active aeration) พบว่า ใช้เวลาในการย่อยสลาย เพียง 20-30 วัน เมื่อเทียบกับการย่อยสลายแบบใช้อากาศด้วยวิธีธรรมชาติ (Passive aeration) จะเห็นได้ว่ากระบวนการดังกล่าวจะช่วยลดปัญหาขยะเต็มบ่อไวกว่ากำหนดหรือพื้นที่กำจัดขยะไม่เพียงพอได้ หลังจากนั้นขยะพลาสติกที่ได้จะถูกนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลัง แนวคิดการใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกมาทดแทนน้ำมันดีเซลมีพอสมควร คงเดช พะสีนาม และธันวาคมส กาศสนุก [4] ได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล เมื่อใช้น้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์กับน้ำมันดีเซลจากขยะพลาสติกที่สัดส่วนต่างๆ โดยปริมาตร (0:100 25:75 50:50 75:25 100:0) ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์เล็กน้อย โดยทำให้กำลังลดลงประมาณ 7.00 % แรงบิดลดลงประมาณ 3.00 % และอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงจำเพาะมากกว่าประมาณ 1.00 % Kalargaris, I. et al [5] ได้ทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซล 4 สูบแบบฉีดตรง เมื่อใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากพลาสติกกับเชื้อเพลิงดีเซลที่สัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 100 ภาระการทำงานของเครื่องยนต์ ตั้งแต่ร้อยละ 25 ถึง 100 พบว่าเครื่องยนต์สามารถทำงานได้ดี เมื่อภาระการทำงานของเครื่องยนต์อยู่ที่ระดับสูง โดยมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ดังนั้นจะเห็นได้ว่าน้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากขยะพลาสติกมีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าได้ โดยไม่ต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ หากการดำเนินโครงการดังกล่าวได้รับการสนับสนุน ตามประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง ประกาศรับซื้อไฟฟ้าโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชน พ.ศ. 2565 [6] ไฟฟ้าที่ผลิตได้สามารถขายให้การไฟฟ้าในอัตราซื้อไฟฟ้าจากโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชนในรูปแบบ Fit สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) สำหรับปี 2565 ในราคา 5.08 THB/kWh อีกทั้งการดำเนินโครงการดังกล่าวยังได้ผลผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์ที่ได้จากการปรับสภาพขยะด้วยตู้ Bio-drying ซึ่งสามารถนำไปขายให้กับเกษตรกร และผงคาร์บอน (Carbon Black) ที่ได้จากการไพโรไลซิส ยังสามารถนำไปขายให้กับอุตสาหกรรมการผลิตยางรถยนต์โดย

ใช้เป็นสารตัวเติมทดแทนเขม่าดำทางการค้าเพื่อลดต้นทุนการผลิต กนกวรรณ พลະศักดิ์ และคณะ [7] ได้ศึกษาการใช้ผงคาร์บอนจากกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolyzed carbon black, PCB) เป็นสารตัวเติมในยางธรรมชาติเปรียบเทียบกับเขม่าดำทางการค้าเกรด N774 (Commercial carbon black, CCB) ปริมาณสารตัวเติมที่ใช้ตั้งแต่ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่วน ต่อ 100 ส่วนของเนื้อยาง โดยทำการผสมยางและสารเคมีด้วยเครื่องผสมแบบปิดและเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง พบว่าการเติม PCB ที่ 40 ส่วนต่อ 100 ส่วนของเนื้อยาง ทั้งในยางบ่มเร่งและไม่บ่มเร่งให้ค่าความทนต่อแรงดึงสูงกว่ายางบ่มเร่งที่เติม CCB ทำให้เห็นว่ายางที่เติม PCB ในปริมาณที่มากขึ้นมีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนการผลิต พบว่า PCB มีต้นทุนการผลิตต่อ 1.00 kg ต่ำกว่า CCB เท่ากับ 26.65 THB นอกจากนี้แล้วการดำเนินโครงการโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกดังกล่าวจำเป็นต้องใช้เงินในการก่อสร้างอาคารและติดตั้งเครื่องจักรในการผลิตไฟฟ้า รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินโครงการเช่น ค่าจ้างแรงงาน และค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร เป็นต้น หากไม่ได้ประเมินถึงรายรับและรายจ่ายของโครงการ ย่อมมีโอกาสเสี่ยงที่จะขาดทุนจากการลงทุน เพื่อลดความเสี่ยงดังกล่าวควรที่จะประเมินถึงความคุ้มค่าในการลงทุนโครงการโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกด้วย สุริยล อุดชาชน [8] ได้ศึกษาถึงความคุ้มค่าในการลงทุนโครงการโรงไฟฟ้าขยะในพื้นที่จังหวัดพิจิตร โดยประเมินจากศักยภาพของการจัดหาเชื้อเพลิง จากการเปรียบเทียบระหว่างการรวบรวมเชื้อเพลิงขยะจากจังหวัดโดยรอบโรงไฟฟ้า กับการซื้อเชื้อเพลิงจากบริษัทผู้ผลิตเชื้อเพลิง และประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์โดยประเมินจากราคาต้นทุนจากการจัดหาเชื้อเพลิงทั้ง 2 กรณี มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value) อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return) และระยะเวลาคืนทุน (Discounted payback period)

จากการสำรวจผลการศึกษาแนวทางการจัดการขยะที่ผ่านมาข้างต้น จึงทำให้บทความนี้มีแนวคิดที่จะศึกษาศักยภาพในการดำเนินโครงการโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก โดยทำการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าในพื้นที่บ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ เพื่อประเมินถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ และผลผลิตอื่นๆ ที่ได้จากกระบวนการต่างๆของโรงไฟฟ้า ได้แก่ ปุ๋ย และผงคาร์บอน ซึ่งการประเมินดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อรายรับของโครงการโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก นอกจากนี้แล้วยังประเมินถึงปริมาณขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานไฟฟ้าว่าเพียงพอสำหรับใช้ผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือไม่ รวมไปถึงต้นทุนในการผลิตไฟฟ้า รายรับ และรายจ่าย ตลอดทั้งระยะเวลาดำเนินโครงการ เพื่อพิจารณาถึงความคุ้มค่าในการลงทุน โดยพิจารณาจากต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน (Payback period, PB) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return, IRR) โดยต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าจะพิจารณาเปรียบเทียบจากกรณีที่ได้จากการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้ามาจากการขายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว กับกรณีที่ได้มาจากการขายไฟฟ้าและการขายผลผลิตอื่นๆ (ปุ๋ยหมัก ผงคาร์บอน และขยะประเภทแก้วและโลหะ) ที่ได้จากการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้า

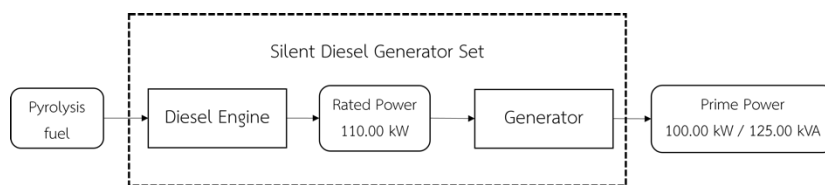
## วิธีการวิจัย

พื้นที่ศึกษาของโครงการตั้งอยู่ในพื้นที่บ่อกำจัดขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ ตั้งอยู่ที่ บ้านฝากทุ่ง หมู่ 2 อำเภอลานกระบือ จังหวัดกำแพงเพชร มีพื้นที่กำจัดขยะทั้งหมด 21,872.00 m<sup>2</sup> ปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าสถานที่กำจัดขยะวันละ 10.00 t [1] ดังแสดง ในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษาของโครงการโรงไฟฟ้าขยะในพื้นที่เทศบาลตำบลลานกระบือ [1]

โดยกำหนดให้ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังการผลิตไฟฟ้า 100.00 kW [11] ผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ประกอบด้วย ต้นกำลังที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล พิกัดกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล ( $P_b$ ) 110.00 kW และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 100.00 kW / 125.00 kVAR โดยใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง ดังแสดงใน ภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนผังแสดงระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยเครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลัง ซึ่งใช้น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกเป็นเชื้อเพลิง

น้ำมันไพโรไลซิสผลิตจากเครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) ขนาดกำลังไฟฟ้า 225.00 kW จะมีค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเหลว ( $HV_{fuel}$ ) เท่ากับ  $44.30 \times 10^3$  kJ/kg และความหนาแน่น ( $\rho_{fuel}$ ) เท่ากับ 0.89 kg/L [11] โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อน ( $\eta_{bth}$ ) จะใช้ข้อมูลจาก Kalargaris, I. et al [5] เท่ากับ 33.00 % หากต้องการผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ( $T_{hour\ per\ day} = 8.00$  hours/day) สามารถคำนวณปริมาณเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 วัน ( $V_{fuel\ per\ day}$ ) ได้ดังนี้ [11]

$$\eta_{bth} = \frac{P_b}{Mass\ of\ fuel/s \times HV_{fuel}} \quad (1)$$

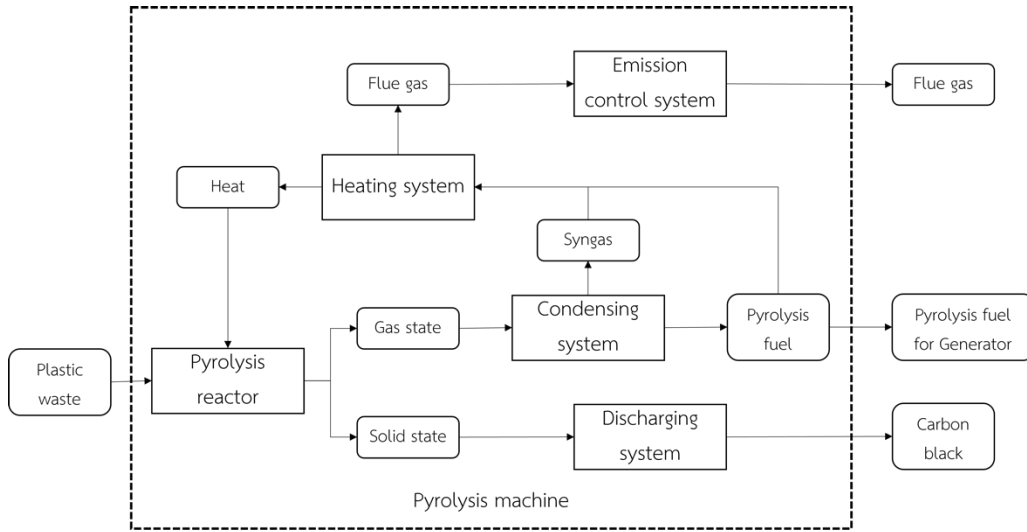
และ

$$V_{fuel\ per\ day} = \frac{3600.00 \cdot P_b}{\eta_{bth} \cdot HV_{fuel} \cdot \rho_{fuel}} \cdot T_{hour\ per\ day} \quad (2)$$

- |       |                      |   |
|-------|----------------------|---|
| เมื่อ | $\eta_{bth}$         | = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน                                       |
|       | $Mass\ of\ fuel$     | = มวลของเชื้อเพลิง (kg)   |
|       | $V_{fuel\ per\ day}$ | = ปริมาตรเชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 วัน (L/day) |
|       | $P_b$                | = พิกัดกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล (kW)                            |
|       | $HV_{fuel}$          | = ค่าความร้อนของน้ำมันไพโรไลซิส (kJ/kg)                         |
|       | $\rho_{fuel}$        | = ความหนาแน่นน้ำมันไพโรไลซิส (kg/L)                             |
|       | $T_{hour\ per\ day}$ | = เวลาที่ผลิตไฟฟ้าต่อวัน (hour/day)                             |

ระบบผลิตเชื้อเพลิง ใช้เครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) ขนาดกำลังไฟฟ้า 225.00 kW สามารถผลิตน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis fuel) ผงคาร์บอน (Carbon black) และก๊าซที่ติดไฟ (Syn gas) โดยใช้ขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการ

ปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตัว Bio-drying ( $m_{plastic,bio}$ ) เป็นวัตถุดิบ โดยกระบวนการผลิต 1 รอบ ใช้ระยะเวลาประมาณ 15 ชั่วโมง ดังแสดงใน ภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แผนผังแสดงระบบผลิตเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type)

จากภาพที่ 3 ปฏิกรณ์ของเครื่องไพโรไลซิสใช้น้ำมันไพโรไลซิสประมาณ 267.00 l และแก๊สที่ติดไฟที่ได้จากการผลิตทั้งหมดเป็นเชื้อเพลิง หากอัตราส่วนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิส (Pyrolysis fuel) กับปริมาณขยะพลาสติก (Plastic waste) เท่ากับ 35.00 % ( $PF/PW$ ) และเครื่องไพโรไลซิสดังกล่าวสามารถบรรจุขยะพลาสติกได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิตเท่ากับ 4,000.00 kg ( $m_{pyrolysis\ per\ batch} = 4,000.00\ kg$ ) จะสามารถคำนวณปริมาตรน้ำมันไพโรไลซิส ( $V_{fuel}$ ) ที่ผลิตได้ ดังนี้

$$V_{fuel\ per\ batch} = \frac{m_{pyrolysis\ per\ batch} \cdot (PF/PW)}{\rho_{fuel}} - V_{Reactor\ fuel} \quad (3)$$

- เมื่อ  $V_{fuel\ per\ batch}$  = ปริมาตรน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (l)  
 $m_{pyrolysis\ per\ batch}$  = มวลของขยะพลาสติกที่เครื่องไพโรไลซิสสามารถบรรจุขยะได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (kg)  
 $PF/PW$  = อัตราส่วนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสกับปริมาณขยะพลาสติก  
 $\rho_{fuel}$  = ความหนาแน่นน้ำมันไพโรไลซิส (kg/l)  
 $V_{Reactor\ fuel}$  = ปริมาตรน้ำมันไพโรไลซิสที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงของเตาปฏิกรณ์ (l)

เมื่อทราบค่าของ  $V_{fuel\ per\ batch}$  จากสมการ (3),  $V_{fuel\ per\ day}$  จากสมการ (2) และหากสัดส่วนการผลิตผงคาร์บอน (Carbon black) กับปริมาณขยะพลาสติก เท่ากับ 35.00 % ( $CB/PW$ ) สามารถนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณผงคาร์บอน ( $m_{carbon\ per\ batch}$ ) และจำนวนวันที่ใช้ผลิตไฟฟ้า ( $D_{fuel\ per\ batch}$ ) สำหรับ 1 รอบการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสได้จากสมการ ดังนี้

$$m_{carbon\ per\ batch} = \frac{(CB/PW) \cdot V_{fuel\ per\ batch} \cdot \rho_{fuel}}{(PF/PW)} \quad (4)$$

และ  $D_{fuel\ per\ batch} = \frac{V_{fuel\ per\ batch}}{V_{fuel\ per\ day}} \quad (5)$

- เมื่อ  $m_{carbon\ per\ batch}$  = ปริมาณผงคาร์บอนที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (kg)  
 $CB/PW$  = อัตราส่วนการผลิตผงคาร์บอนกับปริมาณขยะพลาสติก



$V_{fuel\ per\ batch}$	= ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (l)
$PF/PW$	= อัตราส่วนการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสกับปริมาณขยะพลาสติก
$D_{fuel\ per\ batch}$	= จำนวนวันที่สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (day)
$V_{fuel\ per\ day}$	= ปริมาณน้ำมันไพโรไลซิสที่สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าใน 1 วัน (l/day)

จาก  $m_{carbon\ per\ batch}$  ในสมการที่ (4),  $D_{fuel\ per\ batch}$  ในสมการที่ (5) และ  $m_{pyrolysis\ per\ batch} = 4,000.00$  kg สามารถนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณผงคาร์บอนที่ผลิตได้สำหรับ 1 เดือน ( $m_{carbon\ per\ month}$ ) และปริมาณขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบ Bio-drying ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน ( $m_{plastic, bio, month}$ ) ได้จากสมการ ดังนี้ หากจำนวนวันในการผลิตไฟฟ้า 1 เดือน เท่ากับ 29.00 days ( $D_{electric\ per\ month} = 29.00$  days) ซึ่งวันที่หายไปจะใช้สำหรับการบำรุงรักษาเครื่องผลิตไฟฟ้า

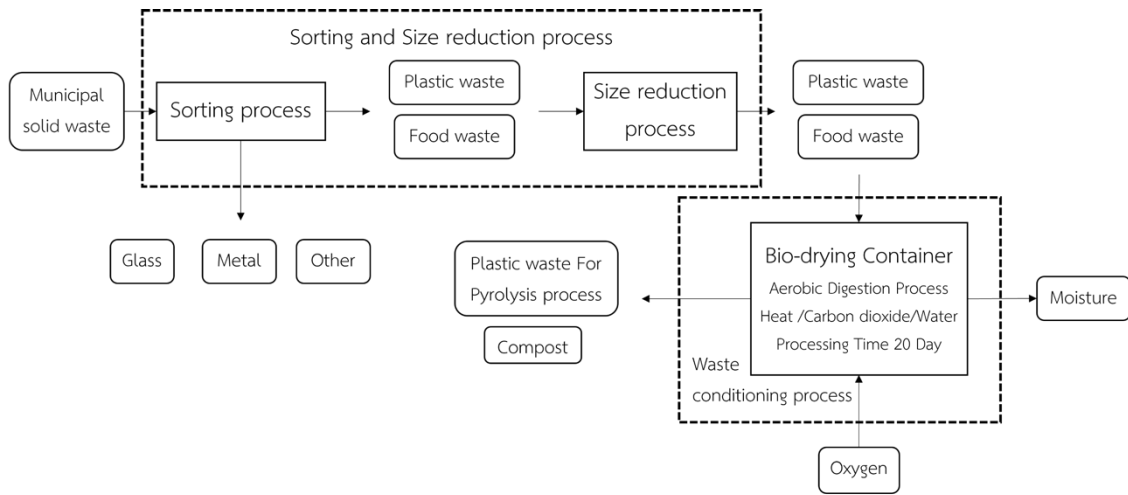
$$m_{plastic, bio, month} = \frac{m_{pyrolysis\ per\ batch} \cdot D_{electric\ per\ month}}{D_{fuel\ per\ batch}} \quad (6)$$

และ

$$m_{carbon\ per\ month} = \frac{m_{carbon\ per\ batch} \cdot D_{electric\ per\ month}}{D_{fuel\ per\ batch}} \quad (7)$$

เมื่อ	$m_{plastic, bio, month}$	= ปริมาณขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบ Bio-drying ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน (kg)
	$m_{pyrolysis\ per\ batch}$	= มวลของขยะพลาสติกที่เครื่องไพโรไลซิสสามารถบรรจุขยะได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (kg)
	$D_{electric\ per\ month}$	= จำนวนวันในการผลิตไฟฟ้า 1 เดือน (day)
	$D_{fuel\ per\ batch}$	= จำนวนวันที่สามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าสำหรับน้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (day)
	$m_{carbon\ per\ month}$	= ปริมาณผงคาร์บอนที่ผลิตได้สำหรับ 1 เดือน (kg)
	$m_{carbon\ per\ batch}$	= ปริมาณผงคาร์บอนที่ผลิตได้สูงสุดต่อ 1 รอบการผลิต (kg)

กระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบ Bio-drying ของ พิสิษฐ์ มณีโชติ [3] เป็นกระบวนการลดความชื้นของขยะมูลฝอย โดยนำขยะที่ผ่านกระบวนการคัดแยกและลดขนาดแล้วหมักด้วยตู้คอนเทนเนอร์แบบเปิดฝาด้านบน การหมักจะอาศัยกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์โดยทำการบ่อนอากาศด้วยเครื่องเป่าลมเข้าไปให้เพียงพอ ซึ่งวิธีดังกล่าวจะไม่ให้ออกซิเจนมากเกินไปให้เกิดแก๊สมีเทน ซึ่งสามารถช่วยลดกลิ่นรบกวนลงได้ แหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ได้แก่ ขยะอินทรีย์ หรือขยะที่มีธาตุคาร์บอนและไนโตรเจน เป็นองค์ประกอบ รวมไปถึงองค์ประกอบอื่นๆ ในขยะมูลฝอย เมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายจะผลิต คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นนั้นทำให้อุณหภูมิในระบบสูงขึ้น เป็นการไล่ความชื้นส่วนเกินออกจากขยะได้ ดังแสดงใน ภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนผังแสดงระบบปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying ของขยะประเภทพลาสติกและอาหารหลังจากผ่านระบบคัดแยกและลดขนาดแล้ว

จากภาพที่ 4 ขยะมูลฝอย (Municipal solid waste) ประกอบไปด้วย ขยะประเภทอาหาร (Food), พลาสติก (Plastic), แก้ว (Glass), โลหะ (Metal) และขยะอื่นๆ (Others) เมื่อทราบ  $m_{plastic, bio, month}$  ได้จากสมการที่ (6) สามารถคำนวณหาปริมาณขยะพลาสติกก่อนผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะเพื่อลดความชื้นโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying ที่ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน ( $m_{w, plastic, month}$ ) โดยใช้ข้อมูลน้ำหนักของขยะมูลฝอยหลังจากนำไปหมักด้วยตู้ Bio-drying เป็นระยะเวลา 20 วัน ของพิสิษฐ์ มณีโชติ [3] พบว่าน้ำหนักลดลงประมาณ 56.00 % ปริมาณน้ำหนักที่หายไปจะเป็นน้ำ (Moisture content = 56.00 %) ในระยะเวลา 30 วันได้จากสมการ

$$\text{Moisture content} = [1 - (\frac{m_{plastic, bio, month}}{m_{w, plastic, month}})] \cdot 100 \quad (8)$$

- เมื่อ
- Moisture content = ปริมาณความชื้นที่ออกจากขยะ (%)
  - $m_{plastic, bio, month}$  = ปริมาณขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน (kg)
  - $m_{w, plastic, month}$  = ปริมาณขยะพลาสติกก่อนผ่านกระบวนการปรับสภาพขยะเพื่อลดความชื้นโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying ที่ใช้เป็นวัตถุดิบผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน (kg)

เมื่อได้  $m_{w, plastic, month}$  จากสมการที่ (8) แล้ว สามารถนำไปคำนวณปริมาณขยะประเภทต่างๆ และปริมาณขยะมูลฝอยสำหรับที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้าสำหรับ 1 เดือน ( $m_{msw, month}$ ) โดยการเทียบอัตราส่วนของขยะประเภทต่างๆ กับขยะมูลฝอยของบ่อขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ ซึ่งใช้ข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ [12] อัตราส่วนของขยะประเภทอาหาร (Food), พลาสติก (Plastic), แก้ว (Glass), โลหะ (Metal) และขยะอื่นๆ (Others) กับขยะมูลฝอย (Municipal solid waste) มีค่าเท่ากับ 44.61, 35.39, 4.30, 7.86, และ 7.84 % ตามลำดับ ได้จากสมการดังนี้

$$m_{msw, month} = m_{w, plastic, month} + m_{w, food, month} + m_{w, glass, month} + m_{w, metal, month} + m_{w, other, month} \quad (9)$$

และ

$$m_{msw, month} = m_{w, plastic, month} + \frac{(FW/MSW) \cdot m_{w, plastic, month}}{(PW/MSW)} + \frac{(GW/MSW) \cdot m_{w, plastic, month}}{(PW/MSW)} + \frac{(MW/MSW) \cdot m_{w, plastic, month}}{(PW/MSW)} + \frac{(OW/MSW) \cdot m_{w, plastic, month}}{(PW/MSW)} \quad (10)$$

เมื่อ	$m_{msw,month}$	= ปริมาณขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้าใน 1 เดือน (kg)
	$m_{w,plastic,month}$	= ปริมาณขยะประเภทพลาสติกใน 1 เดือน (kg)
	$m_{w,food,month}$	= ปริมาณขยะประเภทอาหารใน 1 เดือน (kg)
	$m_{w,glass,month}$	= ปริมาณขยะประเภทแก้วใน 1 เดือน (kg)
	$m_{w,metal,month}$	= ปริมาณขยะประเภทโลหะใน 1 เดือน (kg)
	$m_{w,other,month}$	= ปริมาณขยะประเภทอื่นๆใน 1 เดือน (kg)
	$FW/MSW$	= อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทอาหารกับปริมาณขยะมูลฝอย
	$GW/MSW$	= อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทแก้วกับปริมาณขยะมูลฝอย
	$MW/MSW$	= อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทโลหะกับปริมาณขยะมูลฝอย
	$OW/MSW$	= อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทอื่นๆกับปริมาณขยะมูลฝอย
	$PW/MSW$	= อัตราส่วนปริมาณขยะประเภทพลาสติกกับปริมาณขยะมูลฝอย

ขยะประเภทอาหารเมื่อนำไปหมักด้วยตู้ Bio-drying จะเปลี่ยนสภาพเป็นปุ๋ยหมัก (Compost) โดยน้ำหนักจะลดลงประมาณ 56.00 % ซึ่งน้ำหนักที่หายไปจะเป็นน้ำ (Moisture content = 56.00 %) เมื่อได้ปริมาณขยะประเภทอาหารสำหรับ 1 เดือน ( $m_{w,food,month}$ ) จากสมการที่ (9) และสมการที่ (10)  $m_{w,plastic,month}$  ที่ได้จากสมการ (8) สามารถนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาณปุ๋ยหมักที่ผลิตได้สำหรับ 1 เดือน ( $m_{compost,month}$ ) และปริมาณขยะที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying สำหรับ 1 เดือน ( $m_{w,container,month}$ ) ได้จากสมการ ดังนี้

$$m_{compost\ per\ month} = (1 - Moisture\ content) \cdot m_{w,food,month} \quad (11)$$

และ 
$$m_{w,container,month} = m_{w,plastic,month} + m_{w,food,month} \quad (12)$$

เมื่อ	$m_{compost\ per\ month}$	= ปริมาณปุ๋ยหมักที่ผลิตได้สำหรับ 1 เดือน (kg)
	$Moisture\ content$	= ร้อยละความชื้นที่ออกจากขยะ (%)
	$m_{w,food,month}$	= ปริมาณขยะประเภทอาหารสำหรับ 1 เดือน (kg)
	$m_{w,container,month}$	= ปริมาณขยะประเภทพลาสติกและอาหารที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying สำหรับ 1 เดือน (kg)
	$m_{w,plastic,month}$	= ปริมาณขยะประเภทพลาสติกสำหรับ 1 เดือน (kg)

$m_{w,container,month}$  ที่ได้จากสมการที่ (12) จะนำไปวิเคราะห์เพื่อเลือกขนาดของตู้คอนเทนเนอร์ ที่เหมาะสม โดยกำหนดให้ตู้คอนเทนเนอร์ 1 ตู้ สามารถบรรจุขยะประเภทพลาสติกและอาหารที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying เพื่อผลิตไฟฟ้าสำหรับ 5 วัน ดังนั้นต้องใช้ตู้คอนเทนเนอร์จำนวน 6.00 ตู้ ( $n_{container} = 6.00\ Unit$ ) เพื่อบรรจุขยะประเภทพลาสติกและอาหารที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying สำหรับ 1 เดือน ( $m_{w,container,month}$ ) ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณขยะที่ตู้คอนเทนเนอร์สามารถบรรจุได้ต่อ 1 ตู้ ( $m_{container}$ ) จากสมการ

$$m_{container} = \frac{m_{w,container,month}}{n_{container}} \quad (13)$$

เมื่อ	$m_{container}$	= ปริมาณขยะที่ตู้คอนเทนเนอร์สามารถบรรจุได้ (kg/Unit)
-------	-----------------	--

$$m_{w,container,month} = \text{ปริมาณขยะประเภทพลาสติกและอาหารที่ต้องนำไปปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบ} \\ \text{ตู้ Bio-drying สำหรับ 1 เดือน (kg)}$$

$$n_{container} = \text{จำนวนตู้คอนเทนเนอร์ (Unit)}$$

ค่าต่างๆ ที่หาได้จากสมการข้างต้น จะนำไปจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าเพื่อประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้า โดยประเมินปริมาณขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิซว่ามีเพียงพอสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือไม่ และพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุนโดยการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งพิจารณาจากจำนวนเงินลงทุนในปีแรกและเงินลงทุนเปลี่ยนเครื่องจักรใหม่ในปีที่ 10 ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายและรายได้ที่ได้จากการดำเนินโครงการตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ หากกำหนดให้ระยะเวลาในการดำเนินโครงการเท่ากับ 20.00 years และอัตราคิดลดที่ 6.00 % แล้วนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณต้นทุนการผลิตต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) โดยใช้หลักการดังนี้

ต้นทุนการผลิตพลังงานไฟฟ้า คือ ค่าใช้จ่ายในการลงทุนผลิตพลังงานไฟฟ้า 1 หน่วย หรือ 1 kWh โดยเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไฟฟ้ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ยิ่งต้นทุนการผลิตไฟฟ้า ต่ำกว่าอัตรารับซื้อมากเพียงใดยิ่งมีความน่าลงทุน โดยจะคิดแยกเป็น 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 พิจารณาจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้ากับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ โดยพิจารณาจากจำนวนเงินลงทุนของโครงการรวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ กับจำนวนหน่วยของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{ต้นทุนการผลิตไฟฟ้ากรณีที่ 1} = \frac{\text{จำนวนเงินลงทุน} + \text{ค่าดำเนินการ ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ}}{\text{จำนวนหน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตลอดทั้งโครงการ}} \quad (14)$$

ส่วนกรณีที่ 2 พิจารณาจากจำนวนเงินลงทุนของโครงการรวมค่าใช้จ่ายในการดำเนินการตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการหักกับรายได้อื่นๆ นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้า กับจำนวนหน่วยพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ผลิตได้ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{ต้นทุนการผลิตไฟฟ้ากรณีที่ 2} = \frac{\text{จำนวนเงินลงทุน} + \text{รวมค่าดำเนินการ} - \text{รายได้อื่นๆ ตลอดระยะเวลาดำเนินโครงการ}}{\text{จำนวนหน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตลอดทั้งโครงการ}} \quad (15)$$

ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) คือ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิในแต่ละปีมีค่าเท่ากับเงินลงทุนในปีแรก และเงินลงทุนเปลี่ยนเครื่องจักรใหม่ในปีที่ 10 ที่ใช้ในการดำเนินโครงการ หรือหมายถึงการดำเนินโครงการไม่มีกำไรหรือขาดทุน โดยระยะเวลาคืนทุนน้อยเพียงใดยิ่งมีความน่าลงทุน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ [8]

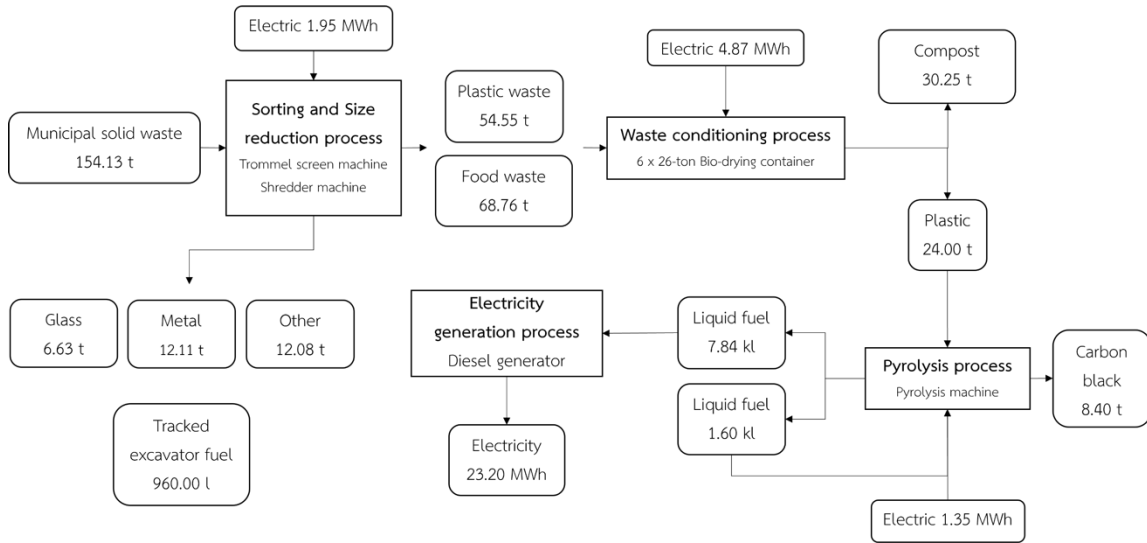
$$\text{ระยะเวลาคืนทุน (PB)} = \frac{\text{ค่าเงินลงทุนเบื้องต้นที่ใช้ในการดำเนินโครงการ}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิในแต่ละปี}} \quad (16)$$

อัตราผลตอบแทนภายใน (Internal rate of return : IRR) คือ การกำหนดอัตราคิดลด (Discount Rate) ที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ (Net present value : NPV) เท่ากับศูนย์ หรือหมายถึง IRR เป็นค่าแสดงถึงอัตราผลตอบแทนของโครงการ เพื่อใช้พิจารณาว่าโครงการจะคืนทุนในอัตราเท่าใด โดย IRR ควรมีค่ามากกว่าศูนย์และยิ่งมีค่ามากเพียงใดยิ่งมีความคุ้มค่าในลงทุน ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ [8]

$$\text{มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)} = 0 = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1 + IRR)^t} \quad (17)$$

## ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

จากข้อมูลพื้นที่ศึกษาของโครงการตั้งอยู่ในพื้นที่บ่อกำจัดขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ และเงื่อนไขในการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก ผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ระยะเวลาดำเนินโครงการเท่ากับ 20.00 years ผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลพิกัดกำลัง ( $P_b$ ) 110.00 kW เป็นต้นกำลัง ให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 125.00 kVAR/100.00 kW ใช้น้ำมันไพโรไลซิสที่ผลิตได้จากเครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำมันไพโรไลซิสเป็นขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการคัดแยกและลดขนาด แล้วนำไปลดความชื้นโดยกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying ซึ่งอาศัยกระบวนการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ แสดงตามใน ภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แผนผังแสดงการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงขยะในระยะเวลา 1 เดือน

จากภาพที่ 5 ขยะมูลฝอยจะถูกนำไปเข้ากระบวนการคัดแยก (Sorting process) คัดแยกขยะด้วยแรงงานคน และเครื่องคัดแยกขยะแบบตะแกรงหมุน (Trommel screen machine) โดยทำการคัดแยกขยะออกเป็น 5 ประเภทดังนี้ 1) ขยะประเภทพลาสติก (Plastic waste) 2) ขยะประเภทอาหาร (Food waste) 3) ขยะประเภทแก้ว (Glass waste) 4) ขยะประเภทโลหะ (Metal waste) และ 5) ขยะประเภทอื่นๆ (Other waste) ขยะประเภทพลาสติกและอาหารจะนำไปเข้ากระบวนการลดขนาด (Size reduction process) โดยใช้เครื่องบด (Shredder machine) หลังจากนั้นนำไปเข้ากระบวนการปรับสภาพขยะ (Waste conditioning process) โดยใช้ตู้ Bio-drying ปรับสภาพขยะด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนของเชื้อจุลินทรีย์เป็นระยะเวลา 20 วัน ขยะประเภทอาหารจะเปลี่ยนสภาพเป็นปุ๋ยหมักและขยะประเภทพลาสติกจะถูกปรับสภาพให้มีความชื้นลดลง ขยะประเภทพลาสติกจะนำไปเข้ากระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) โดยใช้เครื่องไพโรไลซิส (Pyrolysis machine) เพื่อผลิตน้ำมันไพโรไลซิสและผงคาร์บอน น้ำมันไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานไฟฟ้าและเป็นเชื้อเพลิงสำหรับปฏิกิริยาของเครื่องไพโรไลซิส โดยระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าวจะใช้รถขุดตักขยะ (Tracked excavator) เพื่อช่วยในการป้อนขยะในแต่ละกระบวนการ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก พบว่า ใช้ขยะมูลฝอยเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้า พลังงานไฟฟ้าสำหรับเครื่องจักรในแต่ละกระบวนการ และน้ำมันสำหรับรถขุดตักขยะในการผลิตไฟฟ้าเท่ากับ 154.13 t 8,171.00 kWh และ 960.00 l ตามลำดับ สำหรับการผลิตไฟฟ้าในระยะเวลา 1 เดือนสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ 2.32 MWh ปุ๋ยหมัก 30.25 t และผงคาร์บอน 8.40 t โดยปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะเดือนละ 300.00 t เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณขยะมูลฝอยที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้าสำหรับระยะเวลา 1 เดือนพบว่า ใช้ขยะมูลฝอยในการผลิตไฟฟ้าต่อเดือนเพียง 48.62 % ของปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะต่อเดือน

ซึ่งเพียงพอต่อระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าว ปริมาณขยะที่เหลือสามารถสร้างเสถียรภาพของโครงการโดยใช้เป็นวัตถุดิบสำรองในการผลิตไฟฟ้า หรือเพิ่มมูลค่าให้กับโครงการได้โดยขายเป็นเชื้อเพลิงขยะประเภท RDF2 หรือเพิ่มกำลังการผลิตไฟฟ้า

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก สามารถนำไปประเมินต้นทุนการก่อสร้าง รายได้ และค่าดำเนินการต่างๆ ของโครงการ โดยเงื่อนไข อัตราารับซื้อไฟฟ้าจากโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชนในรูปแบบ Fit สำหรับผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (VSPP) สำหรับปี 2565 ระยะเวลาสนับสนุน 20.00 years เท่ากับ 5.08 TBH ราคาขายปุ๋ยหมักเท่ากับ 2,500.00 TBH/t และผงคาร์บอนเท่ากับ 30,000.00 TBH/t ส่วนอัตราารับซื้อขยะประเภทแก้วเท่ากับ 800.00 TBH/t และโลหะเท่ากับ 3,000.00 TBH/t [13] อัตราค่าจ้างขั้นต่ำของจังหวัดกำแพงเพชรเท่ากับ 332.00 TBH/day [14] ค่ากระแสไฟฟ้าของโครงการ ประเภทกิจการขนาดกลาง แรงดัน 22.00 - 33.00 kV ค่าความต้องการพลังไฟฟ้า 196.26 TBH/kW ค่าพลังงานไฟฟ้า 3.17 TBH/kWh ค่าบริการ 312.24 TBH/month [15] ซึ่งสามารถคำนวณได้จากระบบประมาณการค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [16] และค่าน้ำมันของรถขุดตักขยะซึ่งใช้น้ำมันดีเซล B7 เป็นเชื้อเพลิง ราคา 31.94 TBH/l [17] สามารถแสดงผลได้ตามตารางที่ 1

**ตารางที่ 3 ผลการประเมินต้นทุนและรายรับ-รายจ่ายของการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงขยะ**

รายการ	จำนวน	ราคา ต่อหน่วย	ระยะเวลา	จำนวนเงิน (TBH)
<b>ต้นทุน</b>			20 years	25,501,680.16
- เครื่องคัดแยกขยะ	1.00 Unit	3,300,000.00 TBH/Unit		3,300,000.00
- เครื่องสับขยะ	6.00 Unit	394,900.00 TBH/Unit		2,369,400.00
- สายพานลำเลียง	6.00 Unit	110,000.00 TBH/Unit		660,000.00
- ตู้ Bio-drying	6.00 Unit	273,900.00 TBH/Unit		1,643,400.00
- ตะแกรงร่อนขยะ	2.00 Unit	157,190.00 TBH/Unit		314,380.00
- เครื่องโพรไลซิส	1.00 Unit	1,897,500.00 TBH/Unit		1,897,500.00
- เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต้นกำลังเครื่องยนต์ดีเซล	1.00 Unit	770,000.00 TBH/Unit		770,000.00
- รถขุดตักขยะ	1.00 Unit	1,210,000.00 TBH/Unit		1,210,000.00
- ค่าโครงสร้าง	1.00 Unit	6,001,600.00 TBH/Unit		6,001,600.00
- ค่าเชื้อเพลิงเดือนแรกของโครงการ	8.00 kl	31.94 TBH/l		281,072.00
- ค่าเปลี่ยนเครื่องจักรปีที่ 10	1.00 Unit	7,054,328.16 TBH/Unit		7,054,328.16
<b>รายรับ (รายปี)</b>			1 year	5,845,530.00
- ค่ากระแสไฟฟ้า	278.40 MWh	5.08 TBH/kWh		1,414,272.00
- ค่าปุ๋ยหมัก	363.00 t	2,500.00 TBH/t		907,500.00
- ค่าผงคาร์บอน	100.80 t	30,000.00 TBH/t		3,024,000.00
- ค่าขยะประเภทแก้ว	79.56 t	800.00 TBH/t		63,648.00
- ค่าขยะประเภทเหล็ก	145.37 t	3,000.00 TBH/t		436,110.00
<b>มูลค่าซาก</b>				1,038,245.49
- มูลค่าซาก ปลายปีที่ 10	1.00 Unit	250,914.69 TBH/Unit (10% ของต้นทุน)		250,914.69
- มูลค่าซาก ปลายปีที่ 20	1.00 Unit	787,330.80 TBH/Unit (10% ของต้นทุน)		787,330.80
<b>รายจ่าย (รายปี)</b>			1 year	2,698,688.64
- ค่าแรงงาน	5.00 Unit	119,520.00 TBH/Unit		597,600.00
- ค่ากระแสไฟฟ้าของเครื่องจักร	96.27 MWh	คำนวณจากระบบของ กฟภ.		863,139.84
- ค่าน้ำมันของรถขุดตักขยะ	11.52 kl	31.94 THB/l		367,948.80
- ค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร	1.00 Unit	870,000.00 TBH/Unit		870,000.00

จากผลการคำนวณตามตารางที่ 1 สามารถนำมาประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในแง่ของความน่าคุ้มค่าในการลงทุนดำเนินโครงการ โดยพิจารณาจากต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาคืนทุน (PB) และอัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) โดยเงื่อนไข ระยะเวลาดำเนินโครงการ 20.00 years และอัตราคิดลดที่ 6.00 % ซึ่งพบว่า หากรายได้ของการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก คือ มีการขายพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 9.94 THB/kWh สูงกว่าอัตรารับซื้อซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.08 THB/kWh ซึ่งไม่คุ้มค่าในการลงทุน ในอีกกรณี หากมีการรวมรายได้จากการขายปุ๋ยหมัก ผงคาร์บอน ขยะประเภทแก้ว และโลหะแล้ว จะทำให้ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 0.83 THB/kWh ซึ่งต่ำกว่าอัตรารับซื้อเท่ากับ 4.25 THB/kWh ทำให้มีความคุ้มค่าในการลงทุนมากกว่ากรณีแรก ส่วนการพิจารณาระยะเวลาคืนทุนและอัตราผลตอบแทนภายในพบว่า มีค่าระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.80 years และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 11.22 % สูงกว่าอัตราคิดลดเท่ากับ 5.20 % ซึ่งมีความคุ้มค่าในการลงทุน จากการจำลองการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าว สามารถช่วยจัดการแก้ไขปัญหาขยะล้นบ่อได้โดยการนำขยะประเภทอาหารไปผลิตเป็นปุ๋ยหมักและนำขยะประเภทพลาสติกไปผลิตเป็นน้ำมันไพโรไลซิส ซึ่งการแก้ไขปัญหาดังกล่าวหากมีการศึกษาเพิ่มเติมจะสามารถเพิ่มรายได้ให้กับระบบผลิตไฟฟ้า โดยการขายคาร์บอนเครดิตจากโครงการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจตามมาตรฐานของประเทศไทย (Thailand Voluntary Emission Reduction Program, T-VER) ตามระเบียบวิธีการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจสำหรับการผลิตปุ๋ยหรือสารปรับปรุงดินจากขยะอินทรีย์ (T-VER-S-METH-09-02) และการผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะมูลฝอยชุมชน (T-VER-S-METH-09-03) [18] นอกจากนั้นแล้วในส่วนของแก๊สร้อนที่ปลดปล่อยจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลเป็นต้นกำลังและจากปฏิกรณ์ของเครื่องไพโรไลซิส หากมีการศึกษาเพิ่มเติมจะสามารถนำแก๊สร้อนดังกล่าวไปผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแหล่งความร้อนอุณหภูมิต่ำโดยวัฏจักรแรงดันสารอินทรีย์ (Organic Rankine Cycle, ORC) ซึ่งจะสามารถเพิ่มมูลค่าและความคุ้มค่าในการลงทุนให้กับระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะดังกล่าวได้

### สรุปผลการวิจัย

ศักยภาพของการจำลองออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติกที่ผ่านกระบวนการคัดแยกและลดขนาด แล้วนำไปลดความชื้นโดยกระบวนการปรับสภาพขยะโดยใช้ระบบตู้ Bio-drying ซึ่งอาศัยกระบวนการย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ ณ พื้นที่บ่อกำจัดขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ โดยกำหนดให้ชุดเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกำลังการผลิตไฟฟ้า 100.00 kW ผลิตไฟฟ้าวันละ 8.00 hours ประกอบด้วย ต้นกำลังที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซล พิกัดกำลังของเครื่องยนต์ดีเซล ( $P_b$ ) 110.00 kW และ เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขนาด 100.00 kW/125.00 kVAR ใช้ น้ำมันไพโรไลซิสจากขยะพลาสติกที่ผลิตได้จากเครื่องไพโรไลซิสแบบกะ (Batch type) เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้า ระยะเวลาดำเนินโครงการ 20.00 years และอัตราคิดลดที่ 6.00 % สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้า, ปุ๋ยหมัก และผงคาร์บอนได้ 5,568.00 MWh, 7.30 kt และ 2.02 kt ตามลำดับ ปริมาณขยะมูลฝอยสำหรับใช้ในระบบผลิตไฟฟ้าดังกล่าว พบว่าใช้เพียง 154.13 t/month ซึ่งปริมาณขยะมูลฝอยที่รับเข้าบ่อกำจัดขยะดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือเท่ากับ 300.00 t/month มีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่อหน่วยพลังงานไฟฟ้าหากรายได้มาจากการขายไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว และรายได้มาจากการขายไฟฟ้าและการขายผลผลิตอื่นๆ (ปุ๋ยหมัก, ผงคาร์บอน และขยะประเภทแก้วและโลหะ) เท่ากับ 9.94 และ 0.83 THB/kWh ตามลำดับ สำหรับกรณีที่รายได้มาจากการขายไฟฟ้าและการขายผลผลิตอื่นๆ ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.80 years และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับ 11.22 % จากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าบ่อกำจัดขยะดังกล่าวมีศักยภาพเพียงพอที่จะดำเนินโรงไฟฟ้าที่ใช้เชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก และมีความคุ้มค่าในการลงทุนสำหรับกรณีที่รายได้ของโรงไฟฟ้างดังกล่าวมาจากการขายไฟฟ้าและการขายผลผลิตอื่นๆ

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนโดยกองทุนเงินอุดหนุนจากสัญญาโรงกลั่นปิโตรเลียม และขอขอบคุณ คุณเกยูร ช่ออัญชัย พนักงานจังหวัดกำแพงเพชร สำนักงานพลังงานจังหวัดกำแพงเพชร ที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในการทำวิจัย คุณเพชร เพชรอ่อน ผู้อำนวยการกองสาธารณสุขและสิ่งแวดล้อม เทศบาลตำบลลานกระบือ ที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับบ่อกำจัดขยะที่ดำเนินการโดยเทศบาลตำบลลานกระบือ คุณเอกวัฒน์ จูห้อง ผู้จัดการทั่วไป บริษัท มัลติเฟส คอร์ปอเรชั่น จำกัด และคุณชุมพล เมฆอารี วิศวกรโครงการบริษัท เอ ทีม เมเนเทนแนนท์ แอนด์ เซอร์วิส จำกัด ที่ให้คำปรึกษาและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเชื้อเพลิงจากขยะ

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมควบคุมมลพิษ. บ่อขยะทด.ลานกระบือ. สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2566, จาก [https://thaimsw.pcd.go.th/search\\_storage.php?storage\\_id=797&year=2564&fbclid=IwAR1sXlwr7oxtnFJmbhp0ly\\_22NaVNuLGWfabCQvDsbU8bVMuAX6NhTvZNvc](https://thaimsw.pcd.go.th/search_storage.php?storage_id=797&year=2564&fbclid=IwAR1sXlwr7oxtnFJmbhp0ly_22NaVNuLGWfabCQvDsbU8bVMuAX6NhTvZNvc)
- [2] กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ. (2566). รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2565 สืบค้นเมื่อ 3 สิงหาคม 2566, จาก [https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2023/04/pcdnew-2023-05-23\\_07-53-42\\_299799.pdf](https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2023/04/pcdnew-2023-05-23_07-53-42_299799.pdf)
- [3] พิสิษฐ ภูมิโชติ (2565). การนำชีวมวลและของเสียเหลือทิ้งเป็นแหล่งพลังงานสำหรับชุมชนเขียว ภายใต้โครงการการเสริมสร้างชุมชนสีเขียวอย่างยั่งยืนด้วยพลังงานทดแทน โดย ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ (2565) รายงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563
- [4] คงเดช พะสีนาม และธันวาคมส กาศสนุก. (2565). การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กเมื่อใช้น้ำมัน ดีเซลผสมกับน้ำมันดีเซลจากขยะพลาสติก. วารสารวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม มหาวิทยาลัย กาลสินธุ์. 1(2), 1-13.
- [5] Kalargaris, I., Tian, G., & Gu, S. (2017). Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*. 157, 108-115.
- [6] เสมอใจ ศุขสุเมธ. (2564). “ประกาศคณะกรรมการกำกับกิจการพลังงาน เรื่อง ประกาศรับซื้อไฟฟ้าโครงการผลิตไฟฟ้าจากขยะชุมชน พ.ศ. 2565”, ใน การประชุมมติคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ ครั้งที่ 3/2565 (ครั้งที่ 158), 6 พฤษภาคม 2565 ณ ตึกภักดีบดินทร์ ทำเนียบรัฐบาล
- [7] กนกวรรณ พละศักดิ์, สิทธิชัย จันทาสูเนิน, และสรารัฐ ประเสริฐศร (2558). “การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติที่เติมผงเถ้าเขม่าดำจากกระบวนการไพโรไลซิสกับเขม่าดำทางการค้า”, ใน การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, 21 กุมภาพันธ์ 2558 ณ อาคารวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
- [8] สุริยล อุดชาชน (2564). การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์และความเสี่ยงในการลงทุนโครงการโรงไฟฟ้าขยะในพื้นที่จังหวัดพิจิตร. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. พิษณุโลก : มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [9] Weifang Power Machinery Equipment Co., Ltd. เครื่องกำเนิดไฟฟ้า. สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2566,



จาก [https://www.alibaba.com/product-detail/Power-generator-125KVA-silent-generator-set\\_62178931583.html?fbclid=IwAR1q56ZAbP1Mr65hL9\\_LPreP4yTwxmtIVyZNRGCaLhCOJMvCOMQTOL0ZYsw](https://www.alibaba.com/product-detail/Power-generator-125KVA-silent-generator-set_62178931583.html?fbclid=IwAR1q56ZAbP1Mr65hL9_LPreP4yTwxmtIVyZNRGCaLhCOJMvCOMQTOL0ZYsw)

[10] XinXiang Huayin Renewable Energy Equipment Co., Ltd. **เครื่องไฟโรไลซิส**. สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2566,

จาก [https://www.huayinenergy.com/products/d\\_62a1b9c5e61684006d2408e7.html?5xyFrom=google-NT](https://www.huayinenergy.com/products/d_62a1b9c5e61684006d2408e7.html?5xyFrom=google-NT)

[11] GANESAN V. (2012). **IC Engines (4<sup>th</sup> Edition)**. New Delhi. McGraw Hill Education, Inc.

[12] กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ. **การศึกษาองค์ประกอบขยะมูลฝอย ปี 2564**.

สืบค้นเมื่อ 20 กรกฎาคม 2566,

จาก [https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2022/08/pcdnew-2022-08-09\\_08-58-28\\_103322.pdf](https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2022/08/pcdnew-2022-08-09_08-58-28_103322.pdf)

[13] บริษัท วงษ์พาณิชย์ อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด. **อัตรารับซื้อขยะ**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566,

จาก [https://wongpanit.com/print\\_history\\_price/539?fbclid=IwAR10kLQ08-Er7iWwuJE9vf-9hNJKutQs3Cmn0figzgKsH8RUOliemgT5Lew](https://wongpanit.com/print_history_price/539?fbclid=IwAR10kLQ08-Er7iWwuJE9vf-9hNJKutQs3Cmn0figzgKsH8RUOliemgT5Lew)

[14] สำนักงานแรงงานจังหวัดกำแพงเพชร. **อัตราค่าจ้างขั้นต่ำ**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566,

จาก <https://kamphaengphet.mol.go.th/%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%A3%E0%B8%B2%E0%B8%84%E0%B9%88%E0%B8%B2%E0%B8%88%E0%B9%89%E0%B8%B2%E0%B8%87%E0%B8%82%E0%B8%B1%E0%B9%89%E0%B8%99%E0%B8%95%E0%B9%88%E0%B8%B3?fbclid=IwAR0T6qWt8J69uq4vpQxYcQyDqZkmGrAGIOayBvbA7z3kBOmnxiLRz4synr4>

[15] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **อัตราค่าไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566,

จาก <https://www.pea.co.th/Portals/0/Document/Rate2015Update.pdf?fbclid=IwAR1Qqls1CWCO2-8FwBhPeJMgFHYI1G7xMZAyvxIshWs9kG1bVFznYcCZ3ww>

[16] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. **ระบบประมาณการค่าไฟฟ้า**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566,

จาก [https://eservice.pea.co.th/EstimateBill/?fbclid=IwAR1JcqKEnnbXNX9m2N4E3\\_0xr-oe\\_c15AP\\_X3H2eHWHR5MgZfFzLhqRttgl](https://eservice.pea.co.th/EstimateBill/?fbclid=IwAR1JcqKEnnbXNX9m2N4E3_0xr-oe_c15AP_X3H2eHWHR5MgZfFzLhqRttgl)

[17] กระทรวงพลังงาน. **ราคาขายปลีก น้ำมัน**. สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2566,

จาก <https://www.energy.go.th/>

[18] องค์การบริการก๊าซเรือนกระจก. **ระเบียบวิธีการลดก๊าซเรือนกระจกภาคสมัครใจ**. สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2566,

จาก <https://ghgreduction.tgo.or.th/th/tver-method/t-ver-classify-methodology/t-ver-methodology9.html>

ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงาน  
ตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน

A system for Managing Electrical Energy in Combination with Solar Energy to Reduce  
Energy Consumption Based on Time-of-Use Rates

นิวัติ คลังสีดา<sup>1</sup> กรวิชัย เจริญสุข<sup>1</sup> ปากิน มณีโชติ<sup>1</sup> เทพ เกื้อทวีกุล และ วิทยา ยাত্রา<sup>1\*</sup>

Nivadee Klungsida<sup>1</sup>, Konrawait Charoensuk<sup>1</sup>, Pakin Maneechot<sup>1</sup> Thep kueathaweekun<sup>1</sup>  
and Witthaya Yatra<sup>1\*</sup>,

<sup>1</sup>สาขาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร กำแพงเพชร 62000

<sup>1</sup>Energy Technology Faculty of Industrial Technology Kamphaeng Phet Rajabhat University  
Kamphaeng Phet 62000.

\*Corresponding author: Tel.: 0957358174. E-mail address: witthaya300644@gmail.com

Received: 12 June 2024, Revised: 24 June 2024, Accepted: 23 December 2024, Published online: 30 December 2024

### Abstract

This study aims to design and develop an energy management system integrated with solar energy to reduce electricity consumption during TOU (Time of Use) periods. The experiment focused on energy usage during peak hours (9:00 AM - 10:00 PM) and off-peak hours (10:00 PM - 9:00 AM) by utilizing electricity generated from solar panels. The research was conducted at Kamphaeng Phet Rajabhat University, which uses a TOU electricity meter. The electricity rate for peak hours is 5.7 THB per unit, while off-peak hours cost 2.6 THB per unit.

The study tested two light bulbs, a 9-watt and a 100-watt bulb, operating both during 9:00 AM - 12:00 PM and 1:00 PM - 4:00 PM. The lights were switched off between 12:00 PM - 1:00 PM and 4:00 PM - 6:00 PM. After 6:00 PM until 6:00 AM, only the 9-watt bulb was used. The system monitored battery voltage, charging it when the voltage dropped below 11.9 volts and stopping when it reached 12.9 volts. Solar power was used from 9:00 AM to 10:00 PM on weekdays, while grid electricity was utilized from 10:00 PM on Fridays to 9:00 AM on Mondays. Additionally, the system allowed remote control of electricity through an online mobile application.

The results from a three-month performance test showed that the hybrid solar system reduced electricity consumption by 76.53%. Furthermore, integrating the energy management system with solar power achieved an additional reduction in electricity costs of 22.32%. The system demonstrated financial feasibility, with a payback period of 2.14 years, a benefit-cost ratio of 3.54, and a net present value of

63,647.70 THB. The internal rate of return (IRR) was 46.97%, significantly exceeding the 6.6% financing interest rate.

This research highlights the potential of renewable energy applications in daily life to effectively reduce electricity costs and promote sustainability. It serves as a valuable model for integrating renewable energy technologies into energy systems, contributing to environmentally friendly and sustainable energy solutions for the future.

**Keywords:** Energy Management System, Solar Energy, Time of Use (TOU), Hybrid System

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามช่วงเวลา TOU (Time of Use) โดยทำการทดลองในช่วงเวลา peak (09:00-22:00 น.) และ off-peak (22:00-09:00 น.) โดยใช้ไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้วิจัยได้ทำการจำลองการใช้งานโดยทั่วไปของการใช้ไฟฟ้าในช่วงเวลา peak และ off-peak โดยพบว่ามหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชรใช้มิเตอร์ไฟฟ้า TOU ซึ่งมีอัตราค่าบริการในช่วง peak ที่ 5.7 บาทต่อหน่วย และช่วง off-peak ที่ 2.6 บาทต่อหน่วย ในการทดลองใช้งานได้ทำการทดลองกับหลอดไฟขนาด 9 วัตต์ และ 100 วัตต์ เปิดหลอดไฟทั้งสองหลอดในช่วงเวลา 09:00-12:00 น. และ 13:00-16:00 น. ปิดหลอดไฟทั้งสองในเวลา 12:00-13:00 น. และ 16:00-18:00 น. หลังช่วงเวลา 18:00-06:00 น. จะทดสอบเปิดหลอดไฟขนาด 9 วัตต์เพียงหลอดเดียว นอกจากนี้ระบบยังมีการตรวจวัดแรงดันของแบตเตอรี่ และจะทำการชาร์จพลังงานไฟฟ้าเมื่อแรงดันต่ำกว่า 11.9 โวลต์ และหยุดการชาร์จเมื่อแรงดันแบตเตอรี่สูงถึง 12.9 โวลต์ ระบบเปิดใช้งานไฟฟ้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในช่วงเวลา 09:00 น. ถึง 22:00 น. ในวันจันทร์ถึงศุกร์ และเปิดใช้งานไฟฟ้าจาก PEA ในช่วงเวลา 22:00 น. ในวันศุกร์ถึงวันจันทร์เวลา 09:00 น. ระบบยังสามารถควบคุมการเปิด-ปิดไฟฟ้าผ่านทางมือถือได้แบบออนไลน์ จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบไฮบริดเฉลี่ย 3 เดือนสามารถสรุปได้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบไฮบริดช่วยลดการใช้ไฟฟ้าลง 76.53 % และจากผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) พบว่า ถ้ามีระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกันร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) จะทำให้ลดค่าไฟฟ้าลงอีก 22.32 % นำเสนอผลลัพธ์ที่ดีในการลดค่าใช้จ่ายในการใช้ไฟฟ้าอีกทั้งยังสามารถคืนทุน ภายใน 2.20 ปี อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน 3.46 มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ 61,803.23 บาท อัตราส่วนผลตอบแทนภายในโครงการ 46.21 % ซึ่งสูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินลงทุน 6.6% จึงเป็นตัวอย่างที่ดีในการประยุกต์ใช้พลังงานทดแทนในชีวิตประจำวันและการผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศ การวิจัยนี้มีความสำคัญในการพัฒนาระบบพลังงานที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในอนาคต และเป็นแนวทางที่ดีในการใช้เทคโนโลยีทดแทนในการผลิตพลังงานไฟฟ้าในประเทศ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการพัฒนาระบบพลังงานในอนาคตได้อย่างดี

**คำสำคัญ :** ระบบบริหารจัดการพลังงาน, พลังงานแสงอาทิตย์, อัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา, ระบบไฮบริด

## บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้นำเข้าพลังงานไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้านและประเทศในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เช่น ประเทศลาว กัมพูชา และมาเลเซียเพื่อใช้สำหรับครัวเรือนและในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งการนำเข้าไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อรองรับปริมาณการใช้งานไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น การนำเข้าพลังงานไฟฟ้าช่วยเสริมความมั่นคงในการจ่ายไฟฟ้าและลดการผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น โรงไฟฟ้าถ่านหิน นอกจากนี้ยังมีโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำช่วยเสริมระบบในช่วง Peak และไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามความมั่นคงทางพลังงานของประเทศไทยมีความสำคัญเป็นอย่างมาก การใช้พลังงานทดแทนเพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานสำรองจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากโดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ใช้แล้วไม่มีวันหมด ดังนั้นจึงหลายท่านได้ศึกษาและทำการวิจัยการใช้พลังงานทดแทนมาช่วยในการผลิตพลังงานไฟฟ้า [1] โดยได้ศึกษาเรื่องแหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง แผงเซลล์แสงอาทิตย์ กังหันลมและแบตเตอรี่ พบว่างานวิจัยนี้นำเสนอโรงไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ความพร้อมของพลังงานทดแทนและพลังงานที่มีประสิทธิภาพยังไม่ค่อยมีการพัฒนาอย่างเพียงพอในประเทศไทย ทำให้ยังต้องพึ่งพาการนำเข้าไฟฟ้าจากแหล่งอื่นและ ความยากลำบากในการสร้างโครงสร้างพื้นฐาน [2] ได้ศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็กที่มีโหลดทางไฟฟ้า เราจะสามารถเห็นตามบางบ้านเรือนที่มีแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ติดตั้งอยู่เพราะใช้เพื่อเข้ามาลดค่าไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ [3] โดยได้ศึกษาพัฒนาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์แรงดันสูงควบคุมระยะไกล สำหรับลดค่ากระแสไฟฟ้าในครัวเรือน และศึกษาวิเคราะห์ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา [4] โดยได้ศึกษาพัฒนาระบบสถิติผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับชุมชนฐานรากระดับครัวเรือน ความเหมาะสมต่อการเก็บประจุไฟฟ้าให้เพียงพอกับการต้องการ[5] และ ศึกษาการพัฒนาสมรรถนะมอเตอร์สำหรับการใช้ในการจัดการพลังงานไฟฟ้าที่สามารถบริหารจัดการการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ การส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน [6-8] และการนำเข้าไฟฟ้าจากแหล่งที่มีความมั่นคง เพื่อเพิ่มความมั่นคงในการผลิตและจ่ายไฟฟ้าในประเทศไทย ซึ่งมหาวิทยราชภัฏกำแพงเพชรใช้มิเตอร์ไฟฟ้าแบบ TOU มหาวิทยราชภัฏกำแพงเพชร เป็นหน่วยงานที่ใช้ไฟฟ้าสูงอย่างต่อเนื่องโดยดูจากค่าไฟฟ้าที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น การดำเนินการเพื่อลดค่าไฟฟ้ามีการปฏิบัติอย่างต่อเนื่องแต่มีอีกหลายปัจจัยที่ไม่สามารถลดค่าไฟฟ้าได้ตามเป้าหมาย

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าที่ผสมผสานการทำงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ ระบบนี้มีหน้าที่จัดการไฟฟ้าที่ผลิตจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีกระบวนการตรวจวัดแรงดันของแบตเตอรี่เพื่อควบคุมการชาร์จไฟฟ้าอย่างเหมาะสม ทั้งนี้เพื่อรักษาค่า DOD (Depth of Discharge) ของแบตเตอรี่ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานให้นานขึ้น จุดเด่นของระบบนี้คือการช่วยลดค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา Peak ของ TOU (Time of Use) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ค่าไฟฟ้ามีราคาสูง เนื่องจากในช่วงนี้ประเทศไทยมีความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงมาก ช่วงเวลา Off-Peak เป็นช่วงที่ค่าไฟฟ้ามีราคา เนื่องจากความต้องการใช้ไฟฟ้าลดลง

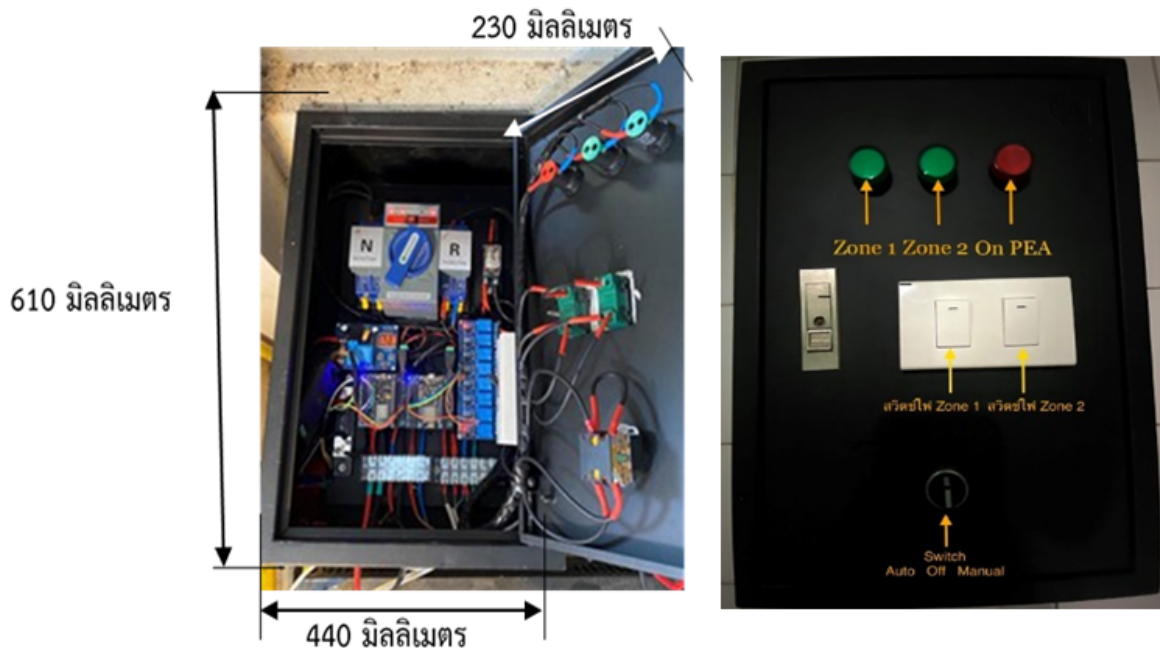
ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้พลังงานจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงเวลา Peak เพื่อช่วยลดค่าไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบหลัก นอกจากนี้จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายแล้ว ระบบนี้ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน และเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาการจัดการพลังงานในอนาคต

## วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)
2. ศึกษาความคุ้มค่าในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสายส่งเพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)

## วิธีการดำเนินการวิจัย

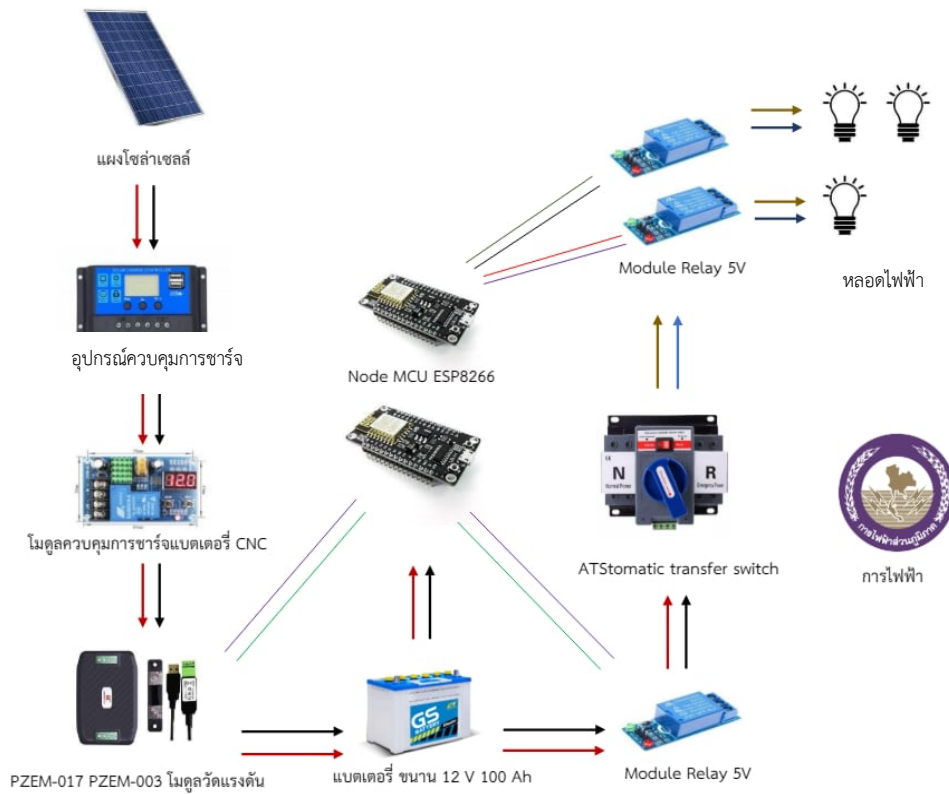
1. ศึกษาเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและสร้างระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) ได้มีการออกแบบ Flow Chart ในการวางรูปแบบและวางโครงสร้างของระบบ
3. ทดสอบหาประสิทธิภาพการใช้งานระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) ในการทดลองใช้งานได้ทำการทดลองกับหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ และ 9 วัตต์ อย่างละ 1 หลอดเพื่อนำไปใช้ในการทดลอง และเปรียบเทียบการลดค่าไฟฟ้าระหว่างการใช้งานแบบปกติกับการใช้งานกับระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) ว่ามีการลดค่าไฟฟ้าได้ ณ สวนพลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร จังหวัดกำแพงเพชร
4. เก็บข้อมูลระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) แร่งต้นไฟฟ้าที่แบตเตอรี่เพื่อตรวจเช็คแรงดันการทำงานของแบตเตอรี่ในระบบ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำจากแบตเตอรี่และกระแสรวมในระบบ
5. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัย วิเคราะห์ผลจากตารางการเปรียบเทียบค่าไฟที่สามารถลดได้เป็นร้อยละ



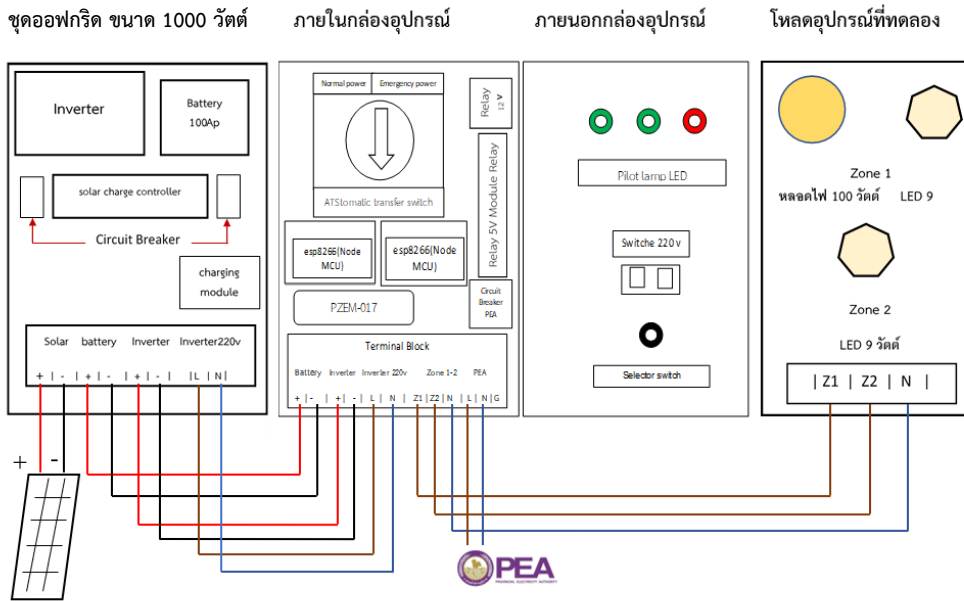
ภาพที่ 1 โครงสร้างตู้ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)



ภาพที่ 2 ระบบควบคุมการชาร์จผ่านโมดูลเพื่อรักษาแบตเตอรี่



ภาพที่ 3 ระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติเพื่อการใช้ไฟฟ้าตามช่วงเวลาที่กำหนดไว้



ภาพที่ 4 โครงสร้างการต่ออุปกรณ์และอุปกรณ์ควบคุมการทำงานระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)

จากภาพอธิบายได้ว่าเป็นหลักการทำงานที่นำเอาไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มาผ่านอุปกรณ์ควบคุมการชาร์จเพื่อไปยังโมดูลควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ไปที่โมดูลการวัดแรงดันเพื่อตรวจวัดแรงดันที่ใช้จากแบตเตอรี่ก่อนส่งไปเก็บยังตัวแบตเตอรี่และส่งผ่านอุปกรณ์รีเลย์ที่ทำหน้าที่เปิด-ปิดการใช้งานของแบตเตอรี่ จากนั้นส่งไปยังเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อใช้งานไฟฟ้าในแรงดัน 220 โวลต์ และผ่านสวิทช์สลับทางการใช้ไฟฟ้าที่มีไฟจากการไฟฟ้ามารอดตอนที่แบตเตอรี่ไม่เพียงพอจะสลับไปใช้งานไฟฟ้าจากการไฟฟ้าทันที

ในการการทดสอบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือการทดสอบและหาประสิทธิภาพระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) โดยมีโครงสร้างของตู้ควบคุม และมีใช้งานร่วมกับชุดออฟฟริตขนาด 1,000 วัตต์ ประกอบไปด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาด 340 วัตต์ 1 แผง ตัวควบคุมการชาร์จ และแบตเตอรี่ 100 แอมป์ ที่มีการควบคุมเวลาเปิดปิดอัตโนมัติแบบขึ้นแสดงดังภาพที่ 1 ระบบควบคุมการชาร์จผ่านโมดูลเพื่อรักษาแบตเตอรี่ ภาพที่ 2 ระบบควบคุมการทำงานอัตโนมัติเพื่อการใช้ไฟฟ้ตามเวลาที่กำหนดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภาพที่ 3 ตามลำดับและเมื่อทุกส่วนประกอบกันแล้วจะเป็นดัง ภาพที่ 4

6. ศึกษาความคุ้มค่าในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)

อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุนโครงการ (Benefit-cost Ratio: B/C Ratio) เป็นอัตราเปรียบเทียบระหว่างราคาปัจจุบันของผลตอบแทนของต้นทุนซึ่งหากมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่ามีผลตอบแทนเกินกว่าเงินที่ลงทุน ดังสมการ

$$PVB = \sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}$$

$$PVC = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

$$\frac{B}{C} \text{ Ratio} = \frac{PVB}{PVC} = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}}$$

กำหนดให้

$B_t$  คือ ผลประโยชน์ของโครงการในปีที่  $t$

$C_t$  คือ ค่าใช้จ่ายของโครงการในปีที่  $t$

$t$  คือ ปีของโครงการมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $n$

$r$  คือ อัตราคิดลด (Discount rate)

PVB คือ มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทน

$n$  คือ อายุของโครงการ (Project Lifetime)

PVC คือ มูลค่าปัจจุบันของต้นทุน

**มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ (Net Present Value: NPV)** เป็นการนำกระแสเงินสดสุทธิที่ได้รับในแต่ละปี มาคำนวณหาค่าสุทธิปัจจุบัน ซึ่งเกิดจากกำไรที่เกิดขึ้นก่อนหักค่าดอกเบี้ยและภาษี ในการคำนวณเปรียบเทียบผลรวมที่ได้เทียบกับเงินลงทุนครั้งแรกว่ามีค่าเป็นบวกหรือมากกว่า

$$NPV = PVB - PVC$$

กำหนดให้ NPV คือ มูลค่าปัจจุบันของผลประโยชน์สุทธิจากโครงการ

**อัตราผลตอบแทนภายในโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)** เป็นการหาผลตอบแทนเป็นร้อยละที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการตั้งแต่เริ่มจนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาโครงการมีค่าเท่ากับมูลค่าปัจจุบันสุทธิของต้นทุนอัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงผลตอบแทนที่จะได้รับการลงทุนว่ามีผลตอบแทนเป็นร้อยละเท่าไร

$$\sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1 - IRR)^t} = 0$$

กำหนดให้ IRR คือ อัตราส่วนผลตอบแทนภายในการดำเนินงาน

**ระยะเวลาคืนทุนโครงการ (Payback Period: BPB)** คือจำนวนปีในการดำเนินการที่ทำให้ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปีมีค่ารวมกันเท่ากับเงินลงทุนเริ่มแรก

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{\text{เงินลงทุนเริ่มแรก}}{\text{ผลประโยชน์สุทธิเฉลี่ยต่อปี}}$$

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิจัยระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)

ในการทดสอบใช้งานได้ทำการทดลองกับหลอดไฟขนาด 100 วัตต์ จำนวน 1 หลอด และขนาด 9 วัตต์ จำนวน 1 หลอด และเปิดใช้งานในช่วงเวลา 09:00 น. หลอดไฟทั้งสองจะติดและต่อไปจนถึง 12:00 น. หลอดไฟทั้งสองจะดับ และทดลองต่อไปในช่วงเวลา 13:00 - 16:00 น. ทั้งสองหลอดจะติดและหลอดไฟ 9 วัตต์จะติดตั้งตั้งแต่ 18:00 - 6.00 น. จากเวลาที่กำหนดทำให้มีการเปิดปิดตามช่วงเวลาได้ตามปกติและส่งผลทำให้มีการใช้งานไฟจากแบตเตอรี่มากกว่าการใช้งานไฟฟ้าจากการไฟฟ้า ผู้วิจัยได้ออกแบบตารางเก็บผลแรงดันของแบตเตอรี่ที่ได้จากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเก็บค่าแรงดันเพื่อดูว่าประสิทธิภาพ เพื่อทดลองการปิดเปิดของไฟฟ้าที่ผู้วิจัยได้กำหนดเวลาการใช้ไฟฟ้าของระบบพลังงานแสงอาทิตย์และเมื่อถึงเวลาที่กำหนดระบบที่ตั้งไว้จะกลับไปใช้ไฟฟ้าตามปกติ



**ตารางที่ 1** ช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) โดยได้กำหนดอัตราค่าไฟฟ้า TOU และช่วงเวลาการใช้พลังงานแสงอาทิตย์

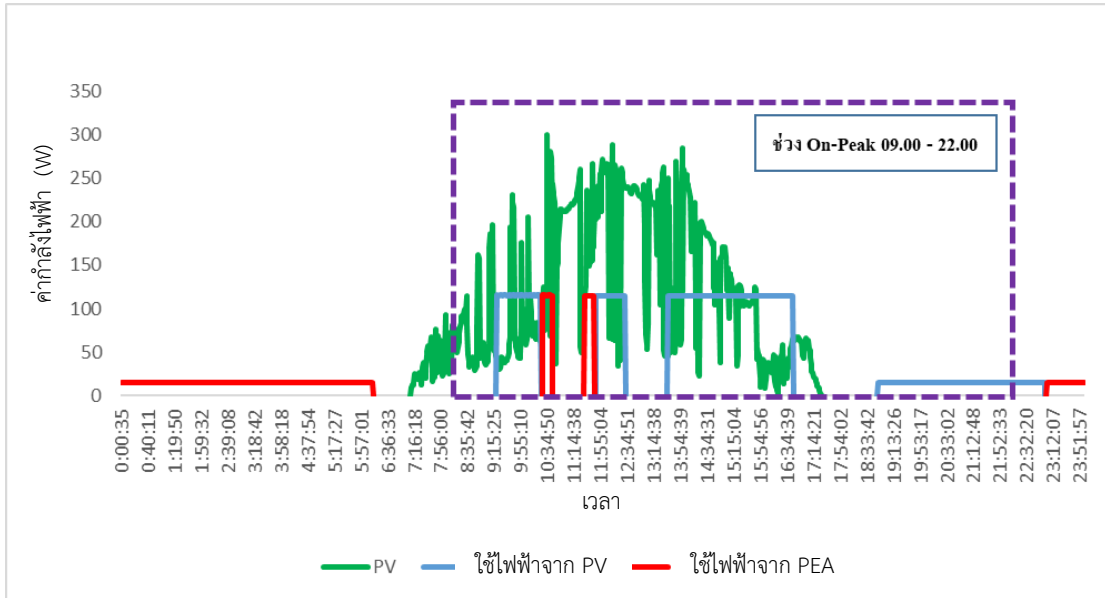
ช่วงเวลา	Peak (09:00 - 22:00 น.) จันทร์-ศุกร์ และวันพืชมงคล	Off Peak (22:00 - 09:00 น.) จันทร์-ศุกร์ และวันพืชมงคล	วันหยุด (00:00 - 24:00 น.) เสาร์ - อาทิตย์ และวันหยุดราชการตามปกติ
ใช้ไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA)		✓	✓
ใช้ไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	✓		

ตารางที่ 1 แสดงช่วงเวลาการใช้ไฟฟ้าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) โดยได้กำหนดอัตราค่าไฟฟ้า TOU ตามรูปแบบของการใช้ไฟฟ้าซึ่งมหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร อยู่ในประเภทที่ 4 โดยกำหนดไว้ 3 ช่วงตามอัตรา TOU คือ ช่วง P (PEAK) ระหว่างเวลา 09:00 น. - 22:00 น. วันจันทร์ถึงวันศุกร์ที่ และวันพืชมงคล ช่วง OP (OFF PEAK) ระหว่างเวลา 22:00 - 09:00 น. วันจันทร์ถึงวันศุกร์ และวันพืชมงคล และช่วงวันหยุด ระหว่างเวลา 00:00 - 24:00 น. ของวันเสาร์ วันอาทิตย์และวันแรงงานแห่งชาติ, วันพืชมงคลที่ตรงกับวันเสาร์ - อาทิตย์ และวันหยุดราชการตามปกติ (ไม่รวมวันหยุดชดเชย) โดยจะทำการศึกษาและเก็บข้อมูลโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับพลังงานไฟฟ้าจาก PEA โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานไฟฟ้า

**ตารางที่ 2** พฤติกรรมการใช้งานหลอดไฟใน 1 วัน

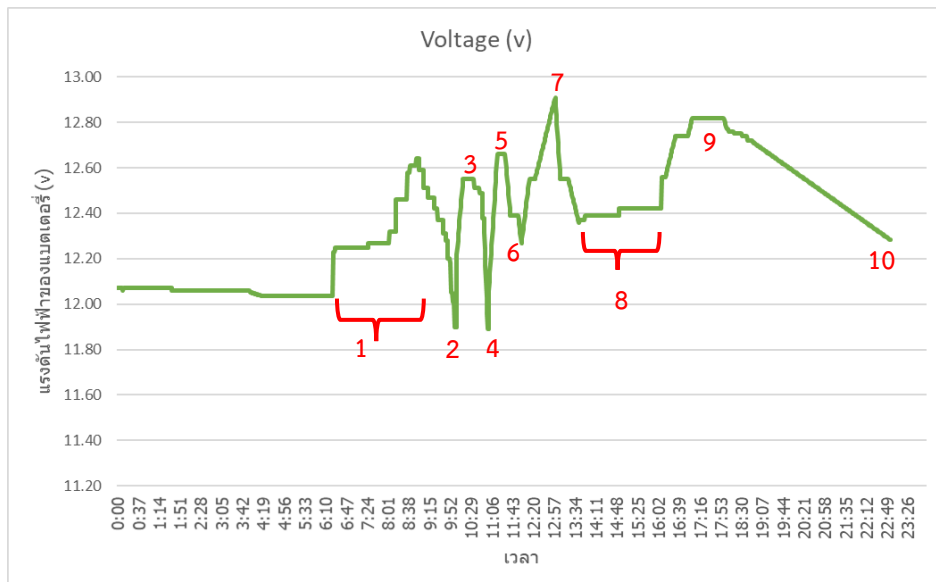
หลอดไฟ	09:00 - 11:59 น.	12:00 - 13:00 น.	13:01 - 17:59 น.	18:00 - 05:59 น.	06:00 - 08:59 น.
100 วัตต์	เปิด	ปิด	เปิด	ปิด	ปิด
9 วัตต์	เปิด	ปิด	เปิด	เปิด	ปิด

จากตารางที่ 2 แสดงการปิด-เปิดใช้งาน ซึ่งหลอดไฟทั้งสองถูกใช้งานในช่วงเวลา 09:00 - 11:59 น. และ 13:00 - 16:59 น. และหลอดไฟปิดใช้งานในช่วงเวลา 12:00 - 13:00 น. และ 13:01 - 17:59 น. หลังช่วงเวลา 18:00 - 06:00 น. จะทดสอบเปิดหลอดไฟขนาด 9 วัตต์เพียงหลอดเดียว และช่วงเวลา 06:01 - 08:59 น. หลอดไฟทั้ง 2 ปิดใช้งาน



ภาพที่ 5 ช่วงเวลาผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์กับการใช้งานหลอดไฟในช่วงเวลา On-Peak เฉลี่ย 30 วัน

จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าช่วงเวลาผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) เริ่มต้นที่เวลาเฉลี่ย 07:00 - 17:30 น. สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 0.68 kWh โดยพยายามใช้เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายโหลดใช้งานในช่วงเวลา On-Peak คือ 09:00 - 22:00 น. แต่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่สามารถจ่ายในช่วงเวลา On-Peak ได้ทั้งหมด ซึ่งพลังงานรวมทั้งวันคือ 0.785 kWh ดังนั้นทำให้มีการใช้ไฟจาก PEA (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค) เข้ามาช่วยจำนวน 0.185 kWh จึงอธิบายได้ว่าระบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ออกแบบไว้ช่วยลดการใช้ไฟฟ้า 76.4 %



ภาพที่ 6 กราฟแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จากระบบผลิตไฟฟ้าเซลล์แสงอาทิตย์เฉลี่ย 30 วัน

จากภาพที่ 6 พิจารณาตามกราฟ แบ่งออกเป็นทั้ง 10 จุด ดังนี้

จุดที่ 1 เวลา 06:26 - 08:56 น. มีการชาร์จแบตเตอรี่จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (มีแสงแดด) จากแรงดันไฟฟ้า 12.04 V เพิ่มขึ้นเป็น 12.64 V และช่วงเวลานี้ยังไม่มีเปิดเครื่องใช้ไฟฟ้า

จุดที่ 2 เวลา 10:03 น. แรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 11.9 V เนื่องจากมีการใช้ไฟฟ้าเริ่มตั้งแต่วันที่ 9:00 น.

จุดที่ 3 เวลา 10:22 น. ชาร์จไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่จากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Charge) แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 12.55 V

จุดที่ 4 เวลา 11:00 น. ใช้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (Discharge) แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จึงเหลือ 11.89 V

จุดที่ 5 เวลา 11:30 น. แบตเตอรี่จะถูกชาร์จไฟฟ้าเข้าจากแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Charge) จนแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 12.66 V

จุดที่ 6 เวลา 12:00 น. ใช้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (Discharge) แรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่จึงเหลือ 12.27 V

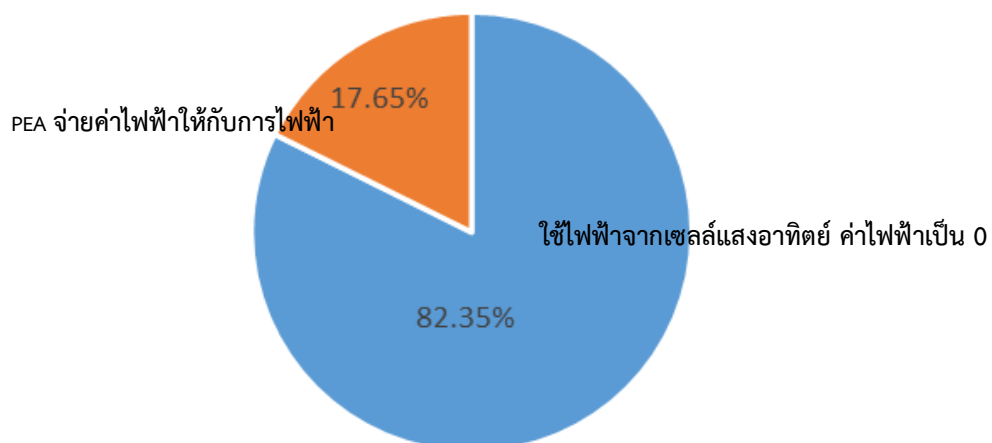
จุดที่ 7 เวลา 13:00 น. แบตเตอรี่จะถูกชาร์จเข้าอีกครั้ง (Charge) แรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ 12.91 V ไม่มีการใช้ไฟฟ้าจากโหลด

จุดที่ 8 เวลา 13:44 น. ใช้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ (Discharge) แบตเตอรี่ลดลงเหลือ 12.37 V ถึงแม้มีการใช้แบตเตอรี่แต่แบตเตอรี่ในช่วงนี้ลดลงไม่มากเนื่องจากมีแสงแดดที่ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้มากพอและเหลือชาร์จกลับเข้าแบตเตอรี่

จุดที่ 9 เวลา 17:25 น. จากนั้นแบตเตอรี่จะถูกชาร์จ (Charge) ขึ้นไป 12.82 V

จุดที่ 10 เวลา 22:55 น. มีการจ่ายไฟฟ้าให้หลอดไฟอีกครั้งจนถึงเวลา แบตเตอรี่ลดลงเหลือ 12.28 V

การใช้ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน นั้นสามารถคำนวณการใช้ไฟฟ้าด้วยอัตราค่าไฟฟ้าตามช่วงเวลา ช่วงเวลา On-Peak (09:00-22:00 น.) คิดค่าไฟหน่วยละ 5.6 บาท และ ในช่วง Off - Peak (22:00 - 09:00 น.) คิดหน่วยละ 2.6 บาท การคำนวณค่าไฟฟ้า 30 วัน (1 เดือน) แสดงผลในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่ายเมื่อใช้ระบบจัดการบริหารตามช่วงเวลา (TOU) เฉลี่ย 30 วัน

จากภาพที่ 7 แสดงตัวเลขค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่ายเมื่อใช้ระบบจัดการบริหารตามช่วงเวลา มีการใช้พลังงานไฟฟ้า รวมเท่ากับ 4.08 บาท ต้องจ่ายค่าไฟฟ้าให้กับการไฟฟ้า (PEA) ในช่วง On – Peak เท่ากับ 0.44 บาท ในช่วง Off – Peak 0.28 บาท รวมคิดเป็น 17.65% และค่าไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ เท่ากับ 3.36 บาท คิดเป็น 82.35% ดังนั้น ระบบที่ออกแบบไว้ จะจ่ายค่าไฟเพียง 0.72 บาท

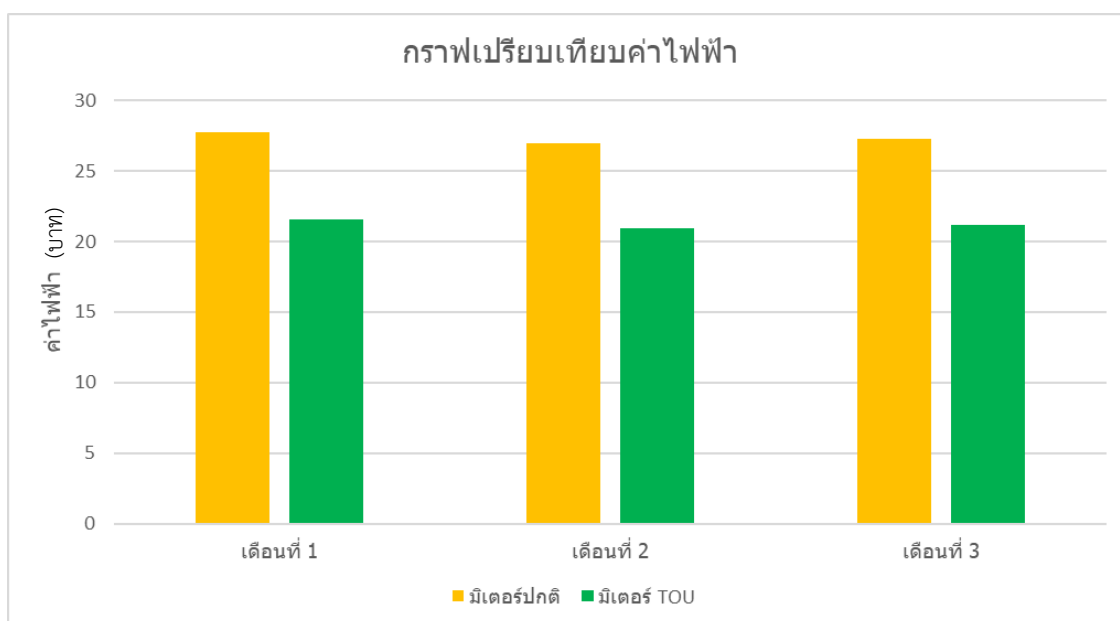
ทำการทดลองการใช้ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งานระยะเวลา 3 เดือน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ผลการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์และการใช้ไฟฟ้าจาก PEA เพื่อลดการใช้พลังงานไฟฟ้า 3 เดือน

เดือน	พลังงานรวม (kWh)	การไฟฟ้า (kWh)	เซลล์แสงอาทิตย์ (kWh)	การไฟฟ้า (%)	เซลล์ แสงอาทิตย์ (%)
เดือน 1	23.66	5.56	18.10	23.5	76.5
เดือน 2	23.54	5.46	18.08	23.2	76.8
เดือน 3	23.37	5.54	17.83	23.7	76.3
<b>รวม</b>	<b>70.57</b>	<b>16.56</b>	<b>54.01</b>	<b>23.47</b>	<b>76.53</b>
<b>ค่าเฉลี่ย</b>	<b>23.52</b>	<b>5.52</b>	<b>18.00</b>	<b>23.47</b>	<b>76.53</b>

จากตารางที่ 3 แสดงการใช้พลังงานรวม การใช้ไฟฟ้าจาก PEA การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงาน 3 เดือน ซึ่งจะเห็นได้ว่า การใช้พลังงานรวมเฉลี่ย เท่ากับ 23.52 kWh โดยใช้พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ เฉลี่ยเท่ากับ 18 kWh คิดเป็น 76.53% และไฟฟ้าที่ต้องใช้จาก PEA เฉลี่ยเท่ากับ 5.52 kWh คิดเป็น 23.47%

**ผลการจัดการระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)**



**ภาพที่ 8** ค่าไฟฟ้าระหว่างการใช้มิเตอร์ปกติและมิเตอร์ TOU 3 เดือน

จากภาพที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าเมื่อใช้ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างมิเตอร์ปกติและมิเตอร์ TOU เมื่อออกแบบการใช้ไฟฟ้าให้มีความสอดคล้องกับช่วงเวลา On - Peak และ Off - Peak จะเห็นว่าการใช้มิเตอร์ TOU สามารถลดค่าไฟฟ้าลงเมื่อเทียบกับการใช้หม้อปกติซึ่งค่าไฟมิเตอร์ปกติคิดที่หน่วยละ 5 บาท มิเตอร์ TOU Peak หน่วยละ 5.6 บาท Off Peak หน่วยละ 2.6 บาท

**ตารางที่ 4** ผลการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าจากการใช้ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างมิเตอร์ธรรมดาและมิเตอร์ TOU 3 เดือน

เดือน	ค่าไฟฟ้า (บาท)		หน่วยการใช้ (kWh)		
	มิเตอร์		On - Peak		Off - Peak
	Normal	TOU	PEA	PV	PEA
1	27.75	21.54	2.37	18.1	3.18
2	27	20.97	2.31	17.4	3.09
3	27.25	21.19	2.34	17.7	3.11
ค่าเฉลี่ย	27.33	21.23	2.34	17.73	3.13
รวม	82.00	63.70	7.02	53.20	9.38

จากตารางที่ 4 สามารถอธิบายได้ว่าหากใช้มิเตอร์ TOU เดือนที่ 1 จะลดค่าไฟลง เท่ากับ 6.21 บาท เดือนที่ 2 เท่ากับ 6.03 บาท และเดือนที่ 3 เท่ากับ 6.06 บาท เมื่อเฉลี่ย 3 เดือนจะอยู่ที่ 21.23 บาท จาก 27.33 บาท ดังนั้นสรุปได้ว่าการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างมิเตอร์ปกติและมิเตอร์ TOU ช่วยลดค่าไฟลง 18.3 บาท หรือ 22.32 %

#### ความคุ้มค่าในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสายส่งเพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU)

ในการหาค่าความคุ้มค่าในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการใช้พลังงานไฟฟ้าจากสายส่งเพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) จะนำผลจากการคำนวณซึ่งได้จากการตั้งเวลากการใช้ไฟฟ้า และ ช่วงเวลาของ On-peak และ Off-peak มาเทียบกับปฏิทินวันหยุด โดยการคำนวณในครั้งนี้ จะเริ่มจากการใช้ไฟฟ้าในรายวัน และค่าจากรายวันมาคำนวณเป็นรายเดือน ซึ่งแต่ละเดือนจะมีจำนวนวันและวันหยุดไม่เท่ากัน หลังจากคำนวณเป็นรายเดือนนำค่ามาคำนวณเป็นรายปี เทียบกับปฏิทินวันหยุดซึ่งจะคำนวณความคุ้มค่า 15 ปี ตามการรับประกันอุปกรณ์ เริ่มจาก ปี 2567 ถึง ปี 2581

ตัวแปรสำคัญในการคำนวณความคุ้มค่าในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) คือต้นทุนการติดตั้งและค่าบำรุงรักษาและค่าตอบแทน ซึ่งการทดลองนี้ มีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 10,600 บาท

### การหาผลตอบแทน

การหาผลตอบแทนโดยการนำค่าการประหยัดค่าไฟฟ้าในช่วง TOU ปกติ มาลบด้วย การเสียค่าไฟฟ้าของระบบนำข้อมูลการใช้พลังงานไฟฟ้าของหลอดไฟฟ้า 2 หลอด ขนาด 100 W และ 9 W มาทำการคำนวณเทียบกับวันทำงาน และวันหยุด ต่อวัน ตารางแสดงช่วง Off-Peak และ On-Peak เทียบความต้องการการใช้ไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางแสดงการคำนวณการใช้ไฟฟ้าและความต้องการการใช้ไฟฟ้า 24 ชั่วโมงตามอัตรา TOU

เวลา	วันทำงาน		วันหยุด	
	ช่วง TOU	กำลังไฟฟ้า (kW)	ช่วง TOU	กำลังไฟฟ้า (kW)
1:00 น.	Off Peak	0.000	Off Peak	0.000
2:00 น.	Off Peak	0.009	Off Peak	0.009
3:00 น.	Off Peak	0.009	Off Peak	0.009
4:00 น.	Off Peak	0.009	Off Peak	0.009
5:00 น.	Off Peak	0.009	Off Peak	0.009
6:00 น.	Off Peak	0.000	Off Peak	0.000
7:00 น.	Off Peak	0.000	Off Peak	0.000
8:00 น.	Off Peak	0.000	Off Peak	0.000
9:00 น.	Peak	0.109	Off Peak	0.109
10:00 น.	Peak	0.109	Off Peak	0.109
11:00 น.	Peak	0.109	Off Peak	0.109
12:00 น.	Peak	0.009	Off Peak	0.009
13:00 น.	Peak	0.109	Off Peak	0.109
14:00 น.	Peak	0.109	Off Peak	0.109
15:00 น.	Peak	0.109	Off Peak	0.109
16:00 น.	Peak	0.109	Off Peak	0.109
17:00 น.	Peak	0.109	Off Peak	0.109
18:00 น.	Peak	0.009	Off Peak	0.009
19:00 น.	Peak	0.009	Off Peak	0.009
20:00 น.	Peak	0.009	Off Peak	0.009
21:00 น.	Peak	0.009	Off Peak	0.009
22:00 น.	Off Peak	0.009	Off Peak	0.009
23:00 น.	Off Peak	0.009	Off Peak	0.009
0:00 น.	Off Peak	0.009	Off Peak	0.009
Demand Peak (ความต้องการไฟฟ้าสูงสุด)				
Peak	วันทำงาน	0.109 kW	Holiday	0.109 kW
Off Peak		0.009 kW	วันหยุด	

เวลา	วันทำงาน		วันหยุด	
	ช่วง TOU	กำลังไฟฟ้า (kW)	ช่วง TOU	กำลังไฟฟ้า (kW)
ผลรวมการใช้พลังงานไฟฟ้า				
Peak	วันทำงาน	0.917 kWh	Holiday	0.98 kWh
Off Peak		0.063 kWh	วันหยุด	

จากตารางที่ 5 แสดงข้อมูลการใช้ไฟฟ้าตลอด 24 ชั่วโมง นำค่าความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (Demand Peak) ช่วง Peak คือ 0.109 kW ช่วง Off Peak คือ 0.009kW และวันหยุด 0.109 kW ผลรวมค่าไฟฟ้าใช้ต่อวัน ช่วง Peak คือ 0.917 kWh ช่วง Off Peak คือ 0.063 kWh และวันหยุด 0.98 kWh นำข้อมูลไปคำนวณเพื่อหาอัตราการใช้ไฟฟ้าต่อปี ซึ่งผู้วิจัยวิเคราะห์จำนวนวันทำงาน และวันหยุดโดยตั้งจากปฏิทิน ปี 2567 ถึง ปี 2581 ข้อมูลแสดงจำนวนวันหยุดของปี 2567 ถึง ปี 2581 โดยการนำจำนวนวันทำงานและวันหยุดมาคำนวณหาค่าไฟฟ้ารวมค่าความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงสุด และผลรวมการใช้พลังงานไฟฟ้าตัวอย่างการคิดค่าไฟฟ้าตามอัตราค่าไฟฟ้า TOU ตัวอย่างบิลค่าไฟฟ้า อัตรา TOU ประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ แรงดันไฟฟ้า 22- 33 kV ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า 132.93 ค่าบริการ 312.24

คำนวณทั้ง 12 เดือน รวมเป็นผลการเสียค่าไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2567 และ คำนวณเช่นเดียวกันนี้จนครบ จนถึงปี 2581 เวลา 15 ปี ข้อมูลการใช้ไฟฟ้ามาคำนวณเทียบกับจำนวนของวันหยุด นำมาคำนวณเป็นค่าไฟฟ้ารายปีและรวมผลตอบแทนดังตารางที่ 6 เพื่อคำนวณผลตอบแทนของการลงทุน

ตารางที่ 6 แสดงค่าผลตอบแทนของการลงทุน

ปีที่	ค่าไฟฟ้าอัตรา TOU (บาท)	ค่าไฟของระบบ (บาท)	ผลการประหยัดไฟ (บาท)	รวมผลตอบแทน (บาท)
0				
1	9,119.50	4,139.49	4,980.00	4,980.00
2	9,518.49	4,143.63	5,374.86	5,374.86
3	9,562.31	4,144.76	5,417.56	5,417.56
4	9,613.47	4,142.49	5,470.98	5,470.98
5	9,630.53	4,141.19	5,489.34	5,489.34
6	9,630.53	4,141.19	5,489.34	5,489.34
7	9,647.58	4,140.25	5,507.34	5,507.34
8	9,596.42	4,142.69	5,453.73	5,453.73
9	9,613.47	4,142.12	5,471.35	5,471.35
10	9,596.42	4,142.88	5,453.54	5,453.54
11	9,647.58	4,140.80	5,506.78	5,506.78
12	9,664.64	4,139.68	5,524.96	5,524.96
13	9,596.42	4,143.06	5,453.36	5,453.36
14	9,664.64	4,139.49	5,525.14	5,525.14
15	9,647.58	4,140.25	5,507.34	5,507.34

นำค่าลงทุน ค่าผลตอบแทน โดยวิเคราะห์ค่าดังต่อไปนี้

1) ระยะเวลาคืนทุนโครงการ (Payback Period: PBP)

$$\text{เมื่อผลประโยชน์สุทธิต่อปี} = \frac{\text{ผลรวมประโยชน์สุทธิ}}{\text{จำนวนปีของโครงการ}} = \frac{74,247.70}{15} = 4,949.85$$

$$\text{ระยะคืนทุน(ปี)} = \frac{10,600.00}{4,949.85} = 2.14 \text{ ปี}$$

ระยะเวลาคืนทุน (ปี) = 2.14 ปี

2) อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C Ratio) โดยพิจารณาจากการดำเนินงานมีค่า เท่ากับหรือมากกว่า 1 เนื่องจากการที่ได้รับผลตอบแทนต่อทุนสูงกว่าเงินลงทุน ก่อให้เกิดผลประโยชน์หรือกำไรเกิดขึ้น จึงมีเหมาะสมในการพิจารณาตัดสินใจเพื่อลงทุนมีค่าเท่ากับ 3.54

3) มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ (NPV) โดยพิจารณาจากการดำเนินงานมีค่า มากกว่า 0 โดยส่วนที่เป็นบวกจะเป็นส่วนของค่าตอบแทนของผู้ลงทุน แสดงว่าการลงทุนดังกล่าวให้ผลคุ้มค่า

$$NPV = 74,247.70 - 10,600.00 = 63,647.70 \text{ บาท}$$

4) อัตราส่วนผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) โดยพิจารณาจากการดำเนินงานมีค่า สูงกว่าต้นทุนของเงินทุนหรืออัตราดอกเบี้ยเงินลงทุน เท่ากับ 46.97%

ตารางที่ 7 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากการจัดการแบตเตอรี่ที่เหมาะสมต่อการจำหน่ายไฟฟ้าปลีก

ระยะเวลาคืนทุน (ปี) (Payback Period: PBP)	2.14 ปี	คืนทุนปีที่ 2
อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C Ratio)	3.54	มีค่ามากกว่า 1
มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ (NPV)	63,647.70 บาท	มีค่ามากกว่า 0
อัตราส่วนผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR)	46.97%	สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินลงทุน 6.6%

### สรุปผลการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน(TOU) เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) และความคุ้มค่าในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อลดการใช้พลังงาน ในช่วงระยะเวลา 3 เดือน จากผลการทดลองพบว่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบไฮบริดช่วยลดการใช้ไฟฟ้าลง 76.53 % และจากผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน (TOU) พบว่า ถ้ามีระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกันร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งาน(TOU) จะทำให้ลดค่าไฟฟ้าลงอีก 22.32 % ระยะเวลาคืนทุน (ปี) (Payback Period: PBP) คืนทุนปีที่ 2.14 อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C Ratio) 3.54 มีค่ามากกว่า 1 มูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทนสุทธิ (NPV) 63,647.70 บาท มีค่ามากกว่า 0



อัตราส่วนผลตอบแทนภายในโครงการ (IRR) 46.97 % สูงกว่าอัตราดอกเบี้ยเงินลงทุน 6.6 % ดังนั้น ระบบการจัดการพลังงานไฟฟ้าร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อลดการใช้พลังงานตามอัตราช่วงเวลาของการใช้งานที่พัฒนาขึ้นเป็นระบบการจัดการพลังงานร่วมกับพลังงานแสงอาทิตย์ที่ไม่เพียงแต่ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการไฟฟ้าเท่านั้น แต่ยังส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเสริมสร้างนวัตกรรมและวิจัยในวงการพลังงานอย่างต่อเนื่องด้วย ทำให้เป็นทางเลือกที่ยอดเยี่ยมสำหรับการจัดการพลังงานในอนาคต

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโปรแกรมวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือสถานที่ส่วนพลังงานในการเก็บข้อมูลงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาอาจารย์ภาคิน มณีโชติ อาจารย์นิวัติ คลังสีดา และเทพ เกื้อทวีกุล ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] ปฏิพัทธ์ ทวนทอง. (2555). แหล่งจ่ายไฟร่วมโดยเซลล์เชื้อเพลิง โซลาร์เซลล์ กังหันลมและแบตเตอรี่. รายงานวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
- [2] วินัย แสนจันทร์. (2560). เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดเล็ก. รายงานวิจัย. วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- [3] กฤษณะ จันทสิทธิ์. (2565). ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์แรงดันสูงควบคุมระยะไกล สำหรับลดค่ากระแสไฟฟ้าในครัวเรือน. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี. จังหวัดจันทบุรี.
- [4] ศรายุทธ์ จิตรพัฒนากุล. (2560). พัฒนาระบบผลิตกระแสไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับชุมชนฐานรากระดับครัวเรือน. รายงานวิจัย. มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี. จังหวัดจันทบุรี.
- [5] ภาคิน มณีโชติ, วัชระ วงศ์ปัญญา, และบุญวัฒน์ วิจารณ์พล. (2563). การพัฒนาสมาร์ตมิเตอร์สำหรับการใช้ในการจัดการพลังงานไฟฟ้า ในศูนย์พลังงาน มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น), 15(1), 51-66.
- [6] สมพล โคศรี. (2554). ระบบควบคุมและจัดการพลังงานสมาร์ตกริดสำหรับระบบผลิตไฟฟ้าแบบแยกเดี่ยวจากพลังงานทดแทน. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, ปทุมธานี.
- [7] ยอดธง เม่นสิน, นิพนธ์ เกตุจ้อย, วิสุทธิ์ แซ่มะอาด, ธวัช สุริวงษ์, พรทิพย์ เม่นสิน, มาลินี แก้วปัญหา, พัชรินทร์ เขียวรัตน์, และประพิศารีย์ ธนารักษ์. (2565). เทคโนโลยีสมาร์ตกริดกับการเปลี่ยนผ่านพลังงานไปสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอน. วารสารนวัตกรรมการเรียนรู้และเทคโนโลยี, 2(2), 10-26.
- [8] วัชระ มั่งวิทิศกุล. (2550). กระบวนการและเทคนิคการลดค่าใช้จ่ายพลังงานสำหรับอาคารและโรงงานอุตสาหกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: บริษัท เรียล ยู พาวเวอร์ จำกัด.

การพัฒนาแผนยุทธศาสตร์สำหรับเทศบาลนครเชียงใหม่เมืองอัจฉริยะเพื่อส่งเสริมการดำเนิน  
โครงการริเริ่มด้านพลังงานอัจฉริยะและสิ่งแวดล้อมฉลาด

**Development of a strategic plan for the Smart City of Chiang Mai Municipality  
to enhance smart energy and environmental initiatives**

ตฤณวัสน์ สุวรรณปรีค ธัญญชัย สาทะกลาง ชยานนท์ สวัสดิ์ดิโนนาท ญัฐิยา ตันตรานนท์ และวรจิตต์ เศรษฐพรพงศ์<sup>3</sup>  
Trinnawat Suwanprik, Thananchai Sataklang, Chayanon Sawatdeenarunat,  
Nuttiya Tantranont, and Worajit Setthapun<sup>\*</sup>

วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50300  
Asian Development College for Community Economy and Technology,  
Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai 50300

\* Corresponding author: Tel.: 0898398049 E-mail address: Worajit@g.cmru.ac.th

Received: 15 May 2024, Revised: 7 November 2024, Accepted: 25 December 2024, Published online: 30 December 2024

### Abstract

The smart city development by Chiang Mai Municipality focuses on promoting inclusivity, accessibility, and standardized technologies to improve the residents' quality of life by raising environmental awareness and adopting low-carbon practices. Within the Energy and Environment Sector, there are four distinct scenarios that prioritize sustainability and innovation. This study evaluates the appropriateness of initiatives that employ a social engagement approach in order to improve smart energy and environmental endeavors. The methodology comprises the preparation of the Strategic and Initiatives of Chiang Mai Universal Smart City, the implementation of the Social Engagement Process or Public Hearing Responsibilities Data, and the analysis of appropriate initiatives through triangulation. The strategic plan emphasizes the initiatives aimed at achieving both environmental sustainability and technological advancement. By collecting questionnaires, we can ensure inclusivity and expand public awareness. The notable initiatives are green spaces to improve ecological diversity and air quality. Primary endeavors encompass the establishment of air monitoring stations and the advocacy for sustainable energy sources such as LED lighting and electric vehicle charging infrastructure. Expert assessments are in line with the objectives set by the government, with a strong focus on environmental progress and subsequent improvements in the energy sector. The progressive approach encompasses both short-term and medium-term stages, systematically tackling environmental and energy challenges. The primary focus is on improving the Smart Environment, followed by advancements in both areas, with the goal of promoting sustainable urban development and improving the overall quality of life in Chiang Mai.

**Keywords:** Smart City, Strategic plan, Chiang Mai Municipality, Energy, Environment

CM

การบริหารจัดการพลังงานชุมชน  
(Community energy management)

## บทคัดย่อ

การพัฒนาเทศบาลนครเชียงใหม่เมืองอัจฉริยะมุ่งเน้นไปที่การส่งเสริมความเท่าเทียม การเข้าถึง และเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงคุณภาพชีวิตของผู้อยู่อาศัยด้วยการสร้างความตระหนักรู้ด้านสิ่งแวดล้อมและการมุ่งสู่การลดการปลดปล่อยคาร์บอนในภาคพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยแบบจำลองสถานการณ์ของเชียงใหม่เมืองอัจฉริยะสามารถแบ่งออกได้สี่สถานการณ์ที่ให้ความสำคัญกับความยั่งยืนและนวัตกรรม งานวิจัยนี้เป็นการประเมินความเหมาะสมของโครงการริเริ่มโดยการใช้แนวทางการมีส่วนร่วมทางสังคม เพื่อพัฒนาแผนยุทธศาสตร์การพัฒนาเทศบาลนครเชียงใหม่เมืองอัจฉริยะด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยเริ่มจากการเตรียมยุทธศาสตร์และโครงการริเริ่มของเมืองอัจฉริยะสากลเชียงใหม่ จากนั้นดำเนินการตามกระบวนการมีส่วนร่วมทางสังคม และทำการวิเคราะห์โครงการริเริ่มที่เหมาะสมผ่านกระบวนการสามเส้า ทั้งนี้พบว่าแผนยุทธศาสตร์จากภาคประชาชนเน้นย้ำโครงการริเริ่มที่มุ่งบรรลุทั้งความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี แต่ยังไม่ละทิ้งและให้ความสำคัญกับการเพิ่มพื้นที่สาธารณะและพื้นที่สีเขียว ซึ่งจะช่วยปรับปรุงความหลากหลายทางนิเวศวิทยาและคุณภาพอากาศ ความพยายามเบื้องต้นครอบคลุมถึงการจัดตั้งสถานีตรวจสอบอากาศและการสนับสนุนแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานสำหรับรถไฟฟ้า ทั้งนี้สอดคล้องกับการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยมุ่งเน้นที่ความก้าวหน้าด้านสิ่งแวดล้อมและการปรับปรุงในภาคพลังงาน แนวทางก้าวข้ามโครงการครอบคลุมทั้งระยะระยะสั้นและระยะกลาง โดยจัดการกับความท้าทายด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานอย่างเป็นระบบ เป้าหมายหลักคือการปรับปรุงสภาพแวดล้อมอัจฉริยะ ตามด้วยความก้าวหน้าในทั้งสองด้าน โดยมีเป้าหมายเพื่อส่งเสริมการพัฒนาเมืองที่ยั่งยืนและปรับปรุงคุณภาพชีวิตโดยรวมในเชียงใหม่

**คำสำคัญ:** เมืองอัจฉริยะ แผนยุทธศาสตร์ เทศบาลนครเชียงใหม่ พลังงาน สิ่งแวดล้อม

## Introduction

The scenario for the development of Chiang Mai Municipality towards a smart city prioritizes inclusivity, accessibility, and standardized technologies to facilitate environments and services benefiting all residents. Emphasizing fair and equal access to digital services, promotion of environmentally friendly practices, and encouragement of innovation, this scenario aims to foster a comprehensive and inclusive approach to urban development globally. Aligned with the city's dedication to sustainability, innovation, and public involvement, its objective is to enhance the quality of life for all residents by promoting environmental awareness and integrating low-carbon practices into growth and resilience strategies. Regarding the scenario in the Energy and Environment Sector, emphasis is placed on sustainability, innovation, and technological advancement. Four distinct scenarios outline Chiang Mai's multifaceted approach to smart city development: "Smart City Plus," prioritizing low-carbon practices and resilience against climate change; "Smart City Prestige," focusing on technology leadership through investment in smart transportation, energy solutions, and waste management; "Smart City Innovation," highlighting engagement in innovation initiatives to drive economic growth and technological advancement; and "Universal Smart City," emphasizing inclusivity, accessibility, and standardized technologies, prioritizing equitable access to digital services and sustainability.

The public hearing process constitutes a methodology of social engagement, providing a formal procedure for individuals from the general public to express their perspectives, concerns, and viewpoints on specific issues, proposals, or undertakings potentially affecting them or the community. Integral to the democratic process, public hearings ensure openness and inclusiveness in decision-making, particularly concerning policies, regulations, or projects with significant public consequences. Such hearings offer a platform for individuals or group representatives to voice their opinions, provide input, and express approval or disapproval regarding a particular matter or proposal. Conducted by governmental entities, regulatory authorities, or organizations responsible for decisions affecting the public, public hearings aim to facilitate transparent communication, gather diverse perspectives, and consider community interests before making

consequential decisions. The data collected during these hearings informs and shapes final determinations or regulations established by the governing entity or overseeing organization [1-3].

This research focuses on employing social processes to evaluate and provide opinions on issues and initiatives in the development of Chiang Mai Municipality as a smart city. The research objective is to assess the suitability of initiatives for the development of Chiang Mai Municipality's Smart City and devise a strategic plan with a social engagement approach to enhance smart energy and environmental initiatives.

## Research Methodology

Researchers use various methods to test theories and analyse data, utilizing both quantitative and qualitative approaches, such as focus groups, interviews, and surveys. Mixed methods combine different research techniques, like pairing observations with interviews or focus groups, depending on the study's goals and the most suitable methods.

The Chiang Mai Municipality has developed strategic initiatives for the Smart City. These initiatives include a preliminary strategy plan that was derived from the Scenario for Chiang Mai Universal Smart City. The plan was introduced to stakeholders through an open dialogue. The goal was to actively involve the community in the decision-making process. This open dialogue provided a chance for the public to participate, allowing for community consultation to gather recommendations and suggestions for the review and completion of the plan [4-5]. In order to obtain thorough feedback, a virtual public hearing was organized, allowing a minimum of 400 participants to participate and complete questionnaires. The research methodology will be segmented into three distinct components, encompassing the procedures for preparing and consolidating the Strategic and Initiatives of Chiang Mai Universal Smart City, with a primary emphasis on energy and the environment. The second part involves conducting the Social Engagement Process or Public Hearing Responsibilities Data, while the third step entails analyzing suitable initiatives through triangulation

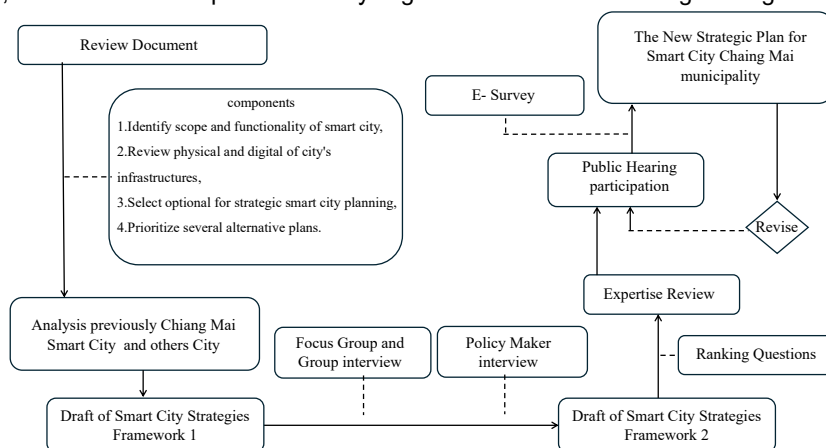


Figure 1 Research Methodology Framework .

### Social engagement process

The Smart City of Chiang Mai Municipality is divided into two parts for the purpose of analyzing and evaluating its suitability for developing a strategic plan. These parts focus on enhancing smart energy and environmental initiatives through a social engagement approach. Step 1: Developing instruments for gathering data from the public sector within the specified region. This research will utilize a questionnaire as the primary

tool for data collection. Step 2 involves collecting responses from both the public sector and experts. The research is outlined as follows:

Development of Public Hearing Questionnaires: The design of the questionnaires was influenced by data pertaining to public perception and awareness of the Chiang Mai Municipality Smart City project. All documents related to data collection, including those for focus groups, group interviews, personal interviews, and questionnaires, were subjected to scrutiny and approval by scholars or experts [6]. The questionnaire consisted of three sections: Part 1: This section provided an overview of the statement's objective and sought to gather pertinent information for the project. Part 2: The survey gathered fundamental demographic data from the participants, including their gender, age, educational background, and occupation. Although respondents were encouraged to manually provide their names, anonymity was also preserved for those who desired it. Part 3 of the study involved collecting stakeholder perspectives and priorities on smart city strategies through the use of Likert scale questions. This section provided an opportunity for participants to share their viewpoints, beliefs, or factual information about their understanding or efforts concerning the smart city.

To collect data from both the general public and the expert group, we will use a comprehensive approach. This will involve using an online questionnaire to reach specific target groups within the Chiang Mai Municipality area. The process will entail the arbitrary selection of participants from the general population, guaranteeing a varied representation of demographics and perspectives. The expert group will adopt a focused strategy by directly inviting individuals who have been recognized as experts in relevant fields. The selection of these experts will be based on their proficiency in fields such as environmental science, technology, and policy-making, guaranteeing that their knowledge will aid in the creation of well-informed strategies and initiatives for the Smart City project. The online system will be created to streamline the gathering of data in a user-friendly way, enabling participants to offer feedback, opinions, and suggestions pertaining to the Smart City project. This approach aims to create a comprehensive dataset for the development of the Smart City of Chiang Mai Municipality. It will include perspectives from both the general public and experts, ensuring a well-rounded and inclusive development process.

## Strategic verification

For Chiang Mai city, descriptive models based on practitioners, scholars, and subject matter experts were used to propose verification strategies. Heuristic models from traditional methods underpin conventional verification strategies. However, these models lack mathematical proof despite their past success. Purposive sampling, specifically Delphi, selected experts with expertise in five fields [7-8]. Selection of expertise requires four conditions. The leadership has local wisdom, advanced technology skills, and urban development experience. The expert has extensive smart city development experience. Mayors are prominent local leaders. The expertise excels in transportation, economy, energy, and innovation.

Data verification and triangulation are essential for ensuring the reliability and accuracy of questionnaire data during public hearings with stakeholders from different sample groups. A thorough evaluation process compares stakeholder responses and uses Cronbach's alpha to measure questionnaire item consistency to assess data reliability. Inter-rater reliability assessments determine stakeholder consensus in each group. To ensure data accuracy, stakeholder groups must cross-validate. Comparisons of data from multiple sources or methods, known as triangulation, validate findings and boost credibility. Comparative analyses identify response variations and similarities, while data cleaning ensures logical consistency and handles outliers. Descriptive statistics and correlation studies reveal questionnaire item averages and differences. This reveals stakeholder perspectives' relationships. Experts validate the questionnaire's

significance and precision in capturing a wide range of perspectives. Subject matter experts help ensure the questionnaire accurately captures stakeholder data. The questionnaire is refined iteratively using data verification feedback. This maintains data collection reliability and accuracy [9-12]. These data verification methods and triangulation techniques during public hearings provide strong, inclusive, and valuable information for making well-informed decisions and engaging stakeholders in Chiang Mai Municipality's Smart City project.

## Result and Discussion

### Strategic and the Initiatives

The goal of the Chiang Mai Universal Smart City is to guarantee and harmonize development using Lanna style and digital technology. The local government collaborates with the community to enhance efforts on the ground and tackle various concerns such as mobility, healthcare, education, environment, and other related areas. Enhance the efficacy of solid waste, sewage, and air pollution management to elevate the quality of services in the smart environment. Improve the quality and quantity of public spaces and green areas. It enhances environmental consciousness and advocates for the development of low-carbon cities. Enhance energy efficiency and promote the use of renewable energy sources. Advocate for the adoption of electric vehicles and the development of a supportive ecosystem [13 -14].

The initiative represents a detailed plan for the Smart City of Chiang Mai Municipality to improve smart energy and environmental projects, as indicated in Table 1. It includes 9 projects related to Smart Environment and 4 projects related to Smart Energy. Every initiative consists of Targets, Expected outcomes, and Key Performance Indicators (KPIs) as shown.

**Table1** Strategic Plan and the Initiatives Program

	<b>Initiatives</b>	<b>Targets</b>	<b>Expected outcomes</b>	<b>KPI</b>
Smart Environment	P1 To improve Maekha Canal landscape	• Meakha canal	• Easy to access public space	• Percentage of satisfaction
	P2 To promote organic waste to composting	• Fallen leaf in communities	• Waste perception changed	• Increase percentage of fallen leaf
	P3 To collaborate for food waste management	• Hotel and restaurants	• Utility of food waste	• Number of community involvement
	P4 To improve and create Public Park nearby the Ping River	• Empty space in community	• New public park	• Amount of food waste
	P5 To installing air monitoring station.	• Municipal area	• Air monitoring stations are converged	• Percentage of green area in the city
	P6 To rearrange GHGs emission management and resilience	• GHGs emission inventory	• Monitor GHGs emission at city as data base level	• Active air monitoring station
	P7 To Promote and create food security through waste management.	• Urban Food system in Chiang Mai	• Food policy	• city's policy brief on low carbon initiative
	P8 To Promote E waste management	• Communities	• E-waste containers are coverage in communities	• City 's policy on food security
	P9 To Promote open space and green areas from digital utility	• Community space	• To manage youth and digital era	• Percentage of e waste container
Smart Energy	- P1 To install LED street lighting.	• Main street	• Replacement from Halogen to use LED	• Number of customers
	- P2 To promote Electric Vehicles	• Car owner	• GHGs emissions reduction	• Percentage of energy consumption
	- P3 To support Charging station	• Main road in city center	• charging stations	• Reduces GHGs
	- P4 To development and promote renewable energy	• Public Park and interlink area	• Renew energy use in public area	• Number of stations
				• Percentage of demonstration site

## Public hearing responsibilities data

Data presentation and verification techniques guarantee the precision, uniformity, and dependability of data. This study employed a total of 501 samples or questionnaires. They play a vital role in this research, specifically in data analysis and database management. There were 215 males and 283 females who responded, making up 43.17 percent and 56.83 percent, respectively. Additionally, 0.60 percent did not specify their gender. The age distribution is as follows: 7.98 percent of the population is under 25 years old, 18.76 percent is between 25 and 35 years old, 27.35 percent is between 36 and 45 years old, 32.34 percent is between 46 and 55 years old, 11.98 percent is between 56 and 65 years old, and 1.60 percent is 60 years old or older. The level of education: The findings revealed that 51.10 percent of the individuals possessed a bachelor's degree, while 35.33 percent held a master's degree, with the remaining individuals falling into other categories. Regarding the habitat, it was discovered that 53.49 percent originate from Chiang Mai, while 46.51 percent do not reside in Chiang Mai province. The respondents can be categorized into five distinct groups: 49.10% are government representatives, 26.95% are tourists, 12.97% are from the business sector, 6.39% are from the general public, and 4.59% are from the educational sector. The data analysis revealed information regarding gender, age, education, and place of residence. The development of the Chiang Mai Smart City strategy does not have a direct impact. The researcher has taken into account and assembled representatives from diverse groups. Strive to become a pioneering factor in discovering additional connections.

The strategic development plan of Chiang Mai Municipality for smart cities in the smart environment will prioritize the expansion of public space and green space in the urban landscape. Enhance ecological variety and enhance the purity of the air. Simultaneously, it offers an opportunity for community involvement. Additionally, it emphasizes the significance of enhancing environmental consciousness among residents and stakeholders through educational initiatives and community events to foster sustainable practices and conservation endeavors. Additionally, it facilitates the enhancement of waste management services. Management of wastewater treatment and air quality. This is regarded as a crucial element of the plan. In the field of management, cutting-edge technology is employed to enhance productivity and minimize environmental contamination. By implementing these initiatives, Chiang Mai seeks to establish a more sustainable and habitable urban environment. It prioritizes the welfare of inhabitants and the preservation of natural resources.

The Smart Environmental Initiative prioritized the installation of air monitoring stations based on their proximity to the general population. This was followed by efforts to collaborate on food waste management and promote food security through waste management. Then there was a focus on prioritizing various initiatives, such as promoting open space and green areas through digital utility, managing E waste, rearranging GHGs emission management and resilience, promoting organic waste composting, improving and creating a public park near the Ping River, and enhancing the landscape of Maekha Canal.

The strategic development for the Smart City of Chiang Mai Municipality in Smart Energy involves a comprehensive approach to improving energy efficiency, promoting renewable energy, and encouraging environmentally friendly transportation. This initiative entails thorough data collection and analysis across various aspects. Firstly, data on energy consumption patterns will be gathered through surveys, metering systems, and utility records to understand trends and peak demand periods. Concurrently, information on existing energy infrastructure will be compiled to identify areas for optimization. Additionally, data on renewable energy potential will be collected through geographical mapping and resource assessments to pinpoint suitable locations for projects like solar installations and wind farms. Economic feasibility studies will also be conducted to assess the viability of renewable energy solutions. In terms of transportation, data on vehicle emissions, traffic congestion, and public transportation usage will be analyzed to gauge environmental impact and inform



strategies for promoting eco-friendly vehicles and improving public transit infrastructure. Commuting patterns and travel behavior data will also be scrutinized to identify opportunities for sustainable transportation initiatives. By leveraging comprehensive data analysis, the strategic development aims to inform evidence-based decision-making and guide the implementation of initiatives that enhance energy efficiency, foster renewable energy adoption, and create a more sustainable transportation system in Chiang Mai.

The key goal of the Smart Energy initiative is to enhance the utilization of sustainable energy sources, commencing with the implementation of LED street lighting in crucial locations. This is enhanced by the implementation of charging infrastructure to facilitate the increasing acceptance of electric vehicles, thereby aiding in the mitigation of carbon emissions and reducing reliance on fossil fuels. In addition, active measures are being taken to promote the utilization of electric vehicles within the city's transportation system, thereby advancing the shift towards sustainable mobility solutions.

### Strategics Plan and Initiatives verification with expertise

Experts evaluating recommendations for the development of the Chiang Mai Smart Municipality found that they concurred with the public sector's view that the main focus should be on environmental development. and subsequently accompanied by the advancement of the energy sector in the area

Within the context of environmental development, it is imperative to enhance the aesthetic quality of the Maekha Canal and establish air monitoring stations to address existing issues. Additionally, efforts should be made to foster collaboration in managing food waste and reorganizing the management of greenhouse gas emissions and resilience. This includes promoting and establishing food security through effective waste management. Other from monitoring pollution levels in the vicinity, it is imperative to enhance and establish a Public Park in close proximity to the Ping River. This includes promoting the conversion of organic waste into compost and advocating for effective management of electronic waste, all with the goal of achieving In order to achieve sustainability, it remains imperative to persist in the promotion of open spaces and green areas through digital means.

Regarding Smart Energy, experts have provided their perspective on the advancement of urban areas through the establishment and endorsement of sustainable energy sources. In addition, they should encourage the implementation of LED street lighting and provide assistance for the establishment of charging stations. In order to advocate for the adoption of Electric Vehicles and encourage the utilization of alternative energy sources, which have the potential to significantly decrease emissions, particularly low emissions.

Experts have evaluated the suitability of developing the Chiang Mai Municipality Smart City in two phases: the short-term phase of 1-2 years will prioritize the enhancement of the Smart Environment by improving the quality of community waste management services, wastewater management, and air quality management. The main objective is to gather information about the current situation and utilize it for future planning and development of the city. The second phase, which is a medium-term time period of 3-4 years, will prioritize the development of both the Smart environment and Smart energy. The implementation of a smart environment involves the expansion of public and green spaces, the promotion of environmental consciousness, the transition towards a low carbon city, and the incorporation of smart technologies. The focus will be on enhancing energy efficiency and promoting the use of environmentally friendly vehicles to support the development of renewable energy.

## Strategic verification with triangulation methodologies

Evaluating the suitability of the initiatives as a strategic approach for the development of Chiang Mai City Municipality Smart City will be evaluated by comparing the level of suitability derived from the data using the triangular comparison method. The evaluation will be based on information gathered through public sector feedback, expert opinions, literary documents and relevant research. This assessment will gather information from initiatives in each respective area. The Smart Environment category includes a total of 9 initiatives, while the Smart Energy category includes a total of 4 initiatives as listed in Table 1. Figure 1 (a) displays the data and comparison characteristics of the smart environment strategic initiatives, while Figure 1 (b) displays the data and comparison characteristics of the smart energy strategic initiatives.

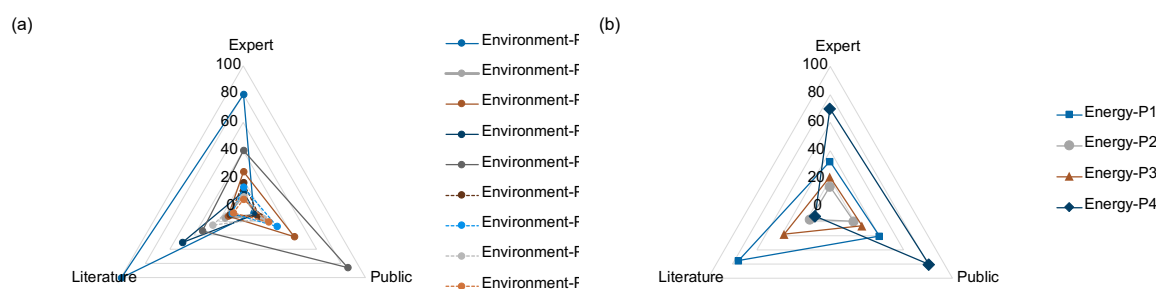


Figure 2 Triangular comparison of (a) the smart environment and (b) the smart energy strategic Initiatives

Analysis of the Smart Environment triangular comparison data revealed a consensus among relevant literature and experts regarding suitable initiatives in the same direction. Prioritizing the development of the primary water sources in the region. Commencing with the enhancement of the Maekha Canal landscape, given its proximity to the local population and its significance as the primary water source. Regarding the general public, it is crucial to establish air monitoring stations as a primary means of tracking air impacts. These two initiatives are the initial projects being developed within the three datasets. Upon evaluating Smart Energy, it was discovered that the expert group held unanimous viewpoints that aligned with those of the public sector. Both groups reached a consensus that the primary emphasis should be placed on the initial development and promotion of renewable energy, as they both have a long-term perspective on this sector. Nevertheless, the literature suggests that our primary focus should be on enhancing energy efficiency or minimizing energy consumption initially. The proposed initiative is to implement LED street lighting as a means to decrease energy consumption. These two initiatives rank as the top two in all three datasets. Hence, the Chiang Mai Municipality Smart City development can be guided by four main projects, consisting of two projects focused on Smart Environment and two projects focused on Smart Energy.

## Strategic Plan for Chiang Mai Municipality Smart City

The Chiang Mai Universal smart city development initiative project offers tangible solutions. The project will involve designing and implementing various activities to create the best model. The project will involve the collaboration between the government sector, private sector, and social support in order to establish a startup and foster cocreation. suggest There are two short-term development periods. The smart city development strategy of Chiang Mai Municipality will prioritize the implementation of Smart Environmental for Management initiatives over a period of 1-2 years. Municipal solid waste refers to the waste generated by households, businesses, and institutions within a specific area. Management of wastewater and air quality Highlighting the

enhancement of the Mae Kha Canal scenery. Through the means of The objective is to enhance the standard of the urban environment. and facilitate access to natural resources for individuals.

and medium-term growth and progress Over the course of 3-4 years, multiple strategies have been suggested to transform Chiang Mai into a city with a high standard of living. The Smart Environment Development Strategy aims to address urban problems by utilizing technology and innovation to achieve an effective and sustainable use of resources. Urban development initiatives aimed at expanding parks and green spaces within cities to enhance opportunities for recreational activities and educational experiences centered around nature. To improve the standard of living for residents and establish a city that achieves a harmonious equilibrium between growth and the environment. Security. The Smart Energy Strategy aims to promote the development and utilization of technology to enhance energy efficiency and optimize energy consumption. Minimizing energy consumption derived from fossil fuels and mitigating the release of greenhouse gases into the atmosphere. This research has received cooperation from all sectors, including the government sector, private sector, public sector, and education sector, in every process, from data collection, analysis, and synthesis, such as questionnaire testing, in-depth interviews, group interviews, and providing information via the E-Survey system, leading to the creation of plans and projects that are beneficial to the development of Chiang Mai as a smart city, focusing on promoting and initiating smart energy and smart environment projects of Chiang Mai Municipality. However, the research still faces some limitations, such as the public's thorough understanding of the smart city development process, including the participation and expression of opinions of the public in Chiang Mai Municipality, in order to be able to develop projects that truly meet the needs of the area and to strengthen cooperation in the development of a sustainable smart city in the future. However, the local government agency must establish a working group to monitor and evaluate, including the continuous allocation of budget for smart energy and environment management in the annual action plan.

## Conclusion

The questionnaires, collected from the public sector, ensured diverse demographic representation. Chiang Mai Municipality's Smart City strategic plan prioritizes expanding public and green spaces to enhance ecological diversity and air quality in the smart environment sector. Residents and stakeholders are urged to actively engage in community activities promoting environmental awareness. The plan includes crucial elements like advanced wastewater management services to alleviate environmental pollution. The Smart Environmental Initiative aims to install air monitoring stations, manage food and electronic waste, and enhance the Maekha Canal landscape. In the Smart Energy sector, a comprehensive approach is taken to improve energy efficiency, promote renewable energy, and support sustainable transportation. Notable initiatives include LED street lighting and electric vehicle charging infrastructure to expedite the transition to sustainable energy and mobility solutions.

Expert evaluations align with the government's focus on environmental development, followed by energy advancements. Key environmental initiatives include enhancing the Maekha Canal, establishing air monitoring stations, and promoting food security. Experts advocate for sustainable energy sources like LED lighting and charging stations to decrease emissions. A progressive approach is proposed for building Chiang Mai Municipality's Smart City, starting with enhancing the Smart Environment in the short term (1-2 years) and progressing to both Smart Environment and Smart Energy domains in the medium term (3-4 years). This

approach aims to address environmental and energy challenges systematically, promoting sustainable urban development.

The analysis of the data from the Smart Environment triangular comparison shows that there is a general agreement among literature and experts when it comes to development initiatives. The main focus is on enhancing primary water sources, beginning with the Maekha Canal, owing to its close proximity and significance. It is essential to establish air monitoring stations in order to effectively monitor the impact of air pollution on the population. These projects are the first ones in each dataset. Unanimous support is received for the advancement of renewable energy through Smart Energy initiatives. Nevertheless, the literature recommends prioritizing energy efficiency as a primary focus. The proposed LED street lighting is in line with the highest priorities.

The Strategic Plan for Universal smart city development by Chiang Mai Municipality entails cross-sector collaboration. The primary focus is on implementing Smart Environmental Management, which includes efforts to enhance waste management and improve air quality. Over a span of 3-4 years, the strategies have the objective of increasing the quality of life by utilizing technology to achieve sustainable urban development. The Smart Environment Development Strategy prioritizes the development of parks and green areas, with the aim of balancing urban expansion and ecological preservation. The Smart Energy Strategy aims to concurrently improve energy efficiency and decrease reliance on fossil fuels, leading to environmental sustainability and enhanced living conditions. However, the local government agency must establish a working group to monitor and evaluate, including the continuous allocation of budget for smart energy and environment management in the annual action plan.

## Acknowledgements

We are grateful to the Asian Development College for Community Economy and Technology at Chiang Mai Rajabhat University for their assistance in this research. This study succeeded thanks to their help. The Chiang Mai Municipality and locals who generously shared their knowledge and insights are greatly appreciated. Their assistance has greatly improved our research's relevance and applicability. deeply grateful for all parties' collaboration and support, which have advanced smart city development knowledge. Thank you.

## Reference

- [1] International Association for Public Participation (IAP2). (2022). Spectrum of Public Participation.
- [2] Z. Ivanova, and N. Danilina, "Public hearing procedure in the management of city development: analysis of the world experience," in Proceedings of the 251st International Conference on Materials, Methods and Technologies, pp. 05028, 2018. <https://doi.org/10.1051/MATECCONF/201825105028>.
- [3] P. Macnaghten, "Towards an anticipatory public engagement methodology: deliberative experiments in the assembly of possible worlds using focus groups," *Qualitative Research*, vol. 21, pp. 3-19, 2020. <https://doi.org/10.1177/1468794120919096>.
- [4] R. Irvin, and J. Stansbury, "Citizen Participation in Decision Making: Is It Worth the effort?," *Public Administration Review*, vol. 64, pp. 55-65, 2004. <https://doi.org/10.1111/J.1540-6210.2004.00346.X>.
- [5] J. Molnar, and S. Purohit, "Citizen Participation in Rural Community Development: Community Group Perspectives," *Nonprofit and Voluntary Sector Quarterly*, vol. 6, pp. 48-58, 1977. <https://doi.org/10.1177/089976407700600107>.

- [6] A. Fernández-Cano, E. Curiel-Marin, M. Torralbo-Rodríguez, and M. Vallejo-Ruiz, "Questioning the Shanghai Ranking methodology as a tool for the evaluation of universities: an integrative review," *Scientometrics*, vol. 116, no. 3, pp. 2069–2083, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2814-7>.
- [7] L. Chen, L. Jiang, A. Shen, and W. Wei, "Development of a quality instrument for assessing the spontaneous reports of ADR/ADE using Delphi method in China," *European Journal of Clinical Pharmacology*, vol. 72, no. 9, pp. 1135–1142, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00228-016-2081-6>.
- [8] J. Steurer, "The Delphi method: An efficient procedure to generate knowledge," in *Skeletal Radiology*, vol. 40, no. 8, pp. 959–961, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00256-011-1145-z>.
- [9] M. D. de Vaus, *Surveys in Social Research* (7th ed.). Routledge, 2021.
- [10] J. W. Creswell, and C. N. V. Plano Clark, *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3rd ed.). Sage Publications, 2018.
- [11] L. J. Cronbach, "Coefficient alpha and the internal structure of tests," *Psychometrika*, vol. 16, no. 3, pp. 297-334, 1951. <https://doi.org/10.1037/h0051130>.
- [12] R. H. Hoyle, \*Handbook of Research Methods in Public Administration\* (3rd ed.). Edward Elgar Publishing, 2017.
- [13] S. AlAwadhi, A. Aldama-Nalda, H. Chourabi, J. Gil-Garcia, S. Leung, S. Mellouli, T. Nam, T. Pardo, H. Scholl, and S. Walker, "Building Understanding of Smart City Initiatives," in *Proceedings of the 15th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*, pp. 40-53, 2012. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33489-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33489-4_4).
- [14] M. Bolívar, L. Muñoz, and C. Muñoz, "Modelling strategic planning practices considering socially vulnerable groups in smart cities," in *Proceedings of the 15th International Conference on Theory and Practice of Electronic Governance*. <https://doi.org/10.1145/3560107.3560313>.

วารสารวิชาการ

# พลังงานทดแทน

## สู่ชุมชน



### J-REC

JOURNAL OF RENEWABLE ENERGY

FOR COMMUNITY



สมาคมพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ต.คลองหก อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12110 อีเมล : [trecs.2012@gmail.com](mailto:trecs.2012@gmail.com) โทร