

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอกเซอร์ยีของเตาเผาถ่านชีวภาพสำหรับ  
ระบบการอบแห้งไฮบริด



ทินกฤต นฤนนต์

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอกเซอร์ยีของเตาเผาถ่านชีวภาพสำหรับ  
ระบบการอบแห้งไฮบริด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอกเซอร์ยีของเตาเผาถ่านชีวภาพสำหรับ  
ระบบการอบแห้งไฮบริด

ทินกฤต นฤธนันต์

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร ปัญญาใหญ่)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวย)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพาพร คำแดง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร .....

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุนทร สืบคำ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาถ่านชีวภาพสำหรับระบบการอบแห้งไฮบริด
<b>ชื่อผู้เขียน</b>	นายทินกฤต นฤธนันต์
<b>ชื่อปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร
<b>อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นำพร ปัญญาใหญ่

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการประเมินประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์ยีของระบบการนำความร้อนเหลือใช้จากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพสำหรับระบบอบแห้งแบบไฮบริด การปล่อยมลภาวะจากกระบวนการผลิต และความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม โดยระบบจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ระบบการผลิตถ่านชีวภาพ ระบบการแลกเปลี่ยนความร้อน และระบบอบแห้งด้วยโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในส่วนของประสิทธิภาพด้านพลังงานและเอ็กเซอร์ยีของกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพและระบบอบแห้งไฮบริด วัสดุชีวมวลที่ถูกนำมาผลิตถ่านชีวภาพในการทดลองนี้คือ เปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพด และวัสดุที่ถูกนำมาใช้ในระบบการอบแห้ง คือ ฟริกแดงจินดา โดยในกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพประกอบด้วย เตาเผาถ่านชีวภาพ 5 เตา ท่อนำแก๊ส และเตาเผาซัง ในระบบอบแห้งด้วยโดมพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ประกอบด้วย โดมพลังงานแสงอาทิตย์ ขนาด  $3.5 \times 4 \times 2.9$  m แท็งก์กักเก็บสารทำงาน และอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในกระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนสารทำงานที่นำมาใช้คือ น้ำผสมเอทีลิน ไกลคอล (70:30) อัตราการไหลของสารทำงานที่ 2 และ 5 LPM และความเร็วอากาศ 1 m/s พบว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานของระบบการนำความร้อนเหลือใช้จากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพด้วยซังข้าวโพด เปลือกกล้วย และแกลบ สำหรับระบบอบแห้งแบบไฮบริดสูงกว่าประสิทธิภาพด้านพลังงานของโดมพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมอยู่ที่ 58.09% 54.28% 41.29% และ 3.59% ตามลำดับ ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 LPM และในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 LPM คือ 51.38% 47.43% 34.00% และ 3.44% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการอบแห้งจากการนำความร้อนเหลือใช้จากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากซังข้าวโพด เปลือกกล้วย และแกลบ กับประสิทธิภาพการอบแห้งจากโดมพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมคือ 9.17% 11.78% 9.21% และ 11.71% ตามลำดับ ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 LPM และในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 LPM คือ 6.81% 7.67% 7.46% และ 10.13% ตามลำดับ ประสิทธิภาพด้านเอ็กเซอร์ยีของระบบในการทดลองการผลิตไบโอชาร์จากซังข้าวโพด เปลือกกล้วย และแกลบ ในการทดลองอัตราการไหล

5 LPM คือ 47.19% 43.61% และ 28.26% ตามลำดับและในการทดลองอัตราการไหล 2 LPM คือ 43.17% 42.64% 28.51% ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า มีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 1ปี3เดือน7วัน 2ปี0เดือน7วัน และ 1ปี5เดือน27วัน ในการทดลองผลิตไบโอดีเซลด้วยเปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพด ตามลำดับ

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพพลังงานและเอ็กเซอร์ยี, ไบโอดีเซล, เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม, ชีวมวล



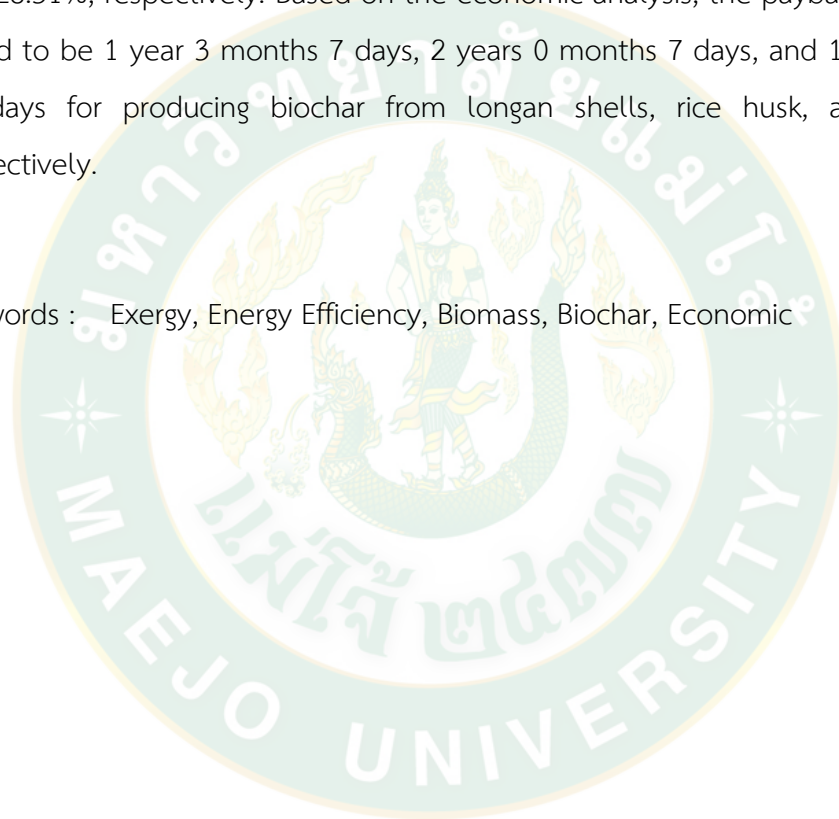
<b>Title</b>	ASSESSMENT OF ENERGY AND EXERGY EFFICIENCIES OF A BIOCHAR KILN FOR A HYBRID DRYING SYSTEM
<b>Author</b>	Mr. Thinnakrit Naruethanan
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Agricultural Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Assistant Professor Dr. Numpon Panyoyai

### ABSTRACT

This research study investigates the evaluation of energy efficiency and exergy of the heat recovery system from the biochar production process for a hybrid drying system. The study also explores the emissions released from the production process and the economic viability of the engineering. The system is divided into three main parts, namely the biochar production system, the heat exchange system, and the hybrid drying system with a parabolic solar dryer. This study focuses on the energy efficiency and exergy of biochar production and hybrid drying system. The experimental materials used to produce biochar are longans shells, rice husks, and corn cob. The materials used in the drying system are jinda red chilies. The biochar production process consists of five charcoal kilns, gas pipelines, and re-burning kilns. The hybrid drying system with the parabolic solar dryer consists of a solar energy dome measuring 3.5 x 4 x 2.9 m, a working fluid tank, and a heat exchanger. The working fluid used in the heat exchange process is a 70:30 mixture of ethylene glycol with flow rates of 2 and 5 LPM and an air velocity of 1 m/s. The energy efficiency of the heat recovery system from the biochar production process for corn cob, longan shells, and rice husk for the hybrid drying system is higher than that of the traditional parabolic solar dryer by 58.09%, 54.28%, 41.29%, and 3.59%, respectively, In the experiment of working fluid flow rate at 5 LPM. In the experiment of a flow rate of the working fluid at 2 LPM, the drying efficiency from utilizing waste heat from the biochar production process of corn cobs, longan shells, and rice husk were 51.38%, 47.43%, 34.00%, and 3.44%, respectively. The drying efficiency from the traditional

solar dryer was 9.17%, 11.78%, 9.21%, and 11.71%, respectively. In the experiment of a flow rate of the working fluid at 5 LPM and at 2 LPM, the drying efficiency from utilizing waste heat from the biochar production process of corn cobs, longan shells, and rice husk were 6.81%, 7.67%, 7.46%, and 10.13%, respectively. The exergy efficiency of the system in producing biochar from corn cob, longan shells, and rice husk in the experiment of flow rate at 5 LPM were 47.19%, 43.61%, and 28.26%, respectively, while in the experiment of flow rate at 2 LPM were 43.17%, 42.64%, and 28.51%, respectively. Based on the economic analysis, the payback periods were found to be 1 year 3 months 7 days, 2 years 0 months 7 days, and 1 year 5 months 27 days for producing biochar from longan shells, rice husk, and corn cobs, respectively.

Keywords : Exergy, Energy Efficiency, Biomass, Biochar, Economic





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นำพร ปัญญาใหญ่ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การสนับสนุนค่าเล่าเรียน ค่าครองชีพ ค่าใช้จ่ายในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำปรึกษา ข้อชี้แนะ และความช่วยเหลือในหลายสิ่งหลายอย่างจนกระทั่งลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นำพร ปัญญาใหญ่ เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนศิษฐ์ วงศ์ศิริอำนวยการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทิพาพร คำแดง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นิตติ คำเมืองสถิต ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะตลอดจนข้อคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ อาจารย์ พิสุทธิ กลิ่นขจร ได้กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ในระหว่างการทำวิจัย และให้การช่วยเหลือตลอดการศึกษา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุนทร สืบคำ ประธานกรรมการหลักสูตร ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ ข้อชี้แนะ และเอกสารในการดำเนินการต่าง ๆ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยที่ได้กรุณาอนุญาตการศึกษาในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาตรี สาขา วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และนักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ปีการศึกษา 2563 ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ ร่วมทุกข์ร่วมสุข และให้ความช่วยเหลือเกื้อกูลตลอดมา

และที่ขาดเสียไม่ได้ ขอขอบพระคุณเป็นพิเศษสำหรับความห่วงใย และกำลังใจจากครอบครัว ซึ่งเป็นที่รักยิ่งที่คอยห่วงใย สนับสนุนการศึกษาเพื่อรอความสำเร็จของผู้วิจัยและเป็นแรงใจสำคัญจนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ทินกฤต นฤธนันต์



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร.....	5
2.1 ไบโอดีเซล.....	5
2.2 ไพโรไลซิส.....	5
2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer).....	8
2.4 เอ็กเซอร์ยี (Exergy).....	10
2.5 การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล.....	11
2.6 พลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง.....	11
2.7 การนำความร้อนเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery).....	12
2.8 พลังงานจากเชื้อเพลิงป้อน.....	15
2.9 การสูญเสียความร้อนทางปล่อง.....	15

2.10	การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา .....	16
2.11	การอบแห้ง (Drying).....	16
2.12	ความชื้น.....	17
2.13	ปริมาณความชื้น.....	18
2.14	ปริมาณความชื้นที่ต้องระเหยออก .....	18
2.15	การหาประสิทธิภาพการอบแห้ง.....	19
2.16	การทดสอบหาปริมาณมลพิษ .....	20
2.17	การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม .....	21
2.18	เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....		27
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย .....	27
3.2	ขอบเขตของงานวิจัย .....	28
3.3	โครงสร้างและการทำงานของระบบ.....	28
3.4	วัสดุและอุปกรณ์.....	29
3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา.....	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล.....		32
4.1	ชนิดของชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง .....	32
4.2	อัตราการไหลสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบการอบแห้งไฮบริด .....	32
4.3	ปริมาณการกลายเป็นไอโอซาร์ .....	33
4.4	ปริมาณพริกแห้งจากการทดลองอบแห้งในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการผลิตไบโอซาร์เปรียบเทียบกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม .....	34
4.5	ปริมาณมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอซาร์.....	36
4.6	ปริมาณความชื้นพริกแดงจินดาและอุณหภูมิกายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ .....	40
4.7	พลังงานความร้อนของระบบ .....	51

4.8 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ซีของระบบ.....	56
4.9 ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม .....	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	65
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	66
ภาคผนวก.....	67
ก.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์.....	68
ก.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ซีของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์.....	72
ก.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้ง.....	76
ก.4 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม .....	76
ก.5 การแปลงหน่วยฝุ่นละอองจาก ppm เป็น $\text{mg}/\text{m}^3$ .....	77
ข. ตารางแสดงผลการทดลอง .....	77
ค. การเข้าร่วมประชุมวิชาการและผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ .....	82
บรรณานุกรม.....	92
ประวัติผู้วิจัย.....	98

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงานตลอดการทำวิจัย.....	3
ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา .....	31
ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการกลายเป็นไบโอชาร์.....	34
ตารางที่ 4 รายการวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม .....	63
ตารางที่ 5 แสดงพลังงานความร้อนขาเข้าของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที .....	78
ตารางที่ 6 แสดงพลังงานความร้อนขาเข้าของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที .....	78
ตารางที่ 7 แสดงพลังงานความร้อนขาออกของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที .....	78
ตารางที่ 8 แสดงพลังงานความร้อนขาออกของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที .....	79
ตารางที่ 9 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อ นาที.....	79
ตารางที่ 10 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาซ้ำของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที .....	79
ตารางที่ 11 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอัตราการไหลสาร ทำงาน 2 ลิตรต่อนาที.....	80
ตารางที่ 12 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสาร ทำงาน 2 ลิตรต่อนาที.....	80
ตารางที่ 13 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตร ต่อนาที.....	80

ตารางที่ 14 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาซ้ำของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที ..... 81

ตารางที่ 15 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที..... 81

ตารางที่ 16 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของโคมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที..... 81

ตารางที่ 17 แสดงค่าฝุ่นละอองที่ได้จากการทดลองในเตาเผาไปไอซาร์และเตาเผาซ้ำในหน่วย ppm ..... 82

ตารางที่ 18 แสดงค่าฝุ่นละอองที่ได้จากการทดลองในเตาเผาไปไอซาร์และเตาเผาซ้ำในหน่วย mg/m<sup>3</sup> ..... 82



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 การนำความร้อนผ่านแผ่นผนัง .....	9
ภาพที่ 2 การนำความร้อนมาใช้โดยตรง .....	12
ภาพที่ 3 การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้โดยอ้อม.....	12
ภาพที่ 4 แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (Plate Heat Exchanger).....	13
ภาพที่ 5 Shell and Tube Heat Exchanger.....	13
ภาพที่ 6 Stack recuperator.....	14
ภาพที่ 7 Economize.....	15
ภาพที่ 8 ไบโม่กรูดอบแห้ง.....	17
ภาพที่ 9 Testo 380.....	20
ภาพที่ 10 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	27
ภาพที่ 11 ภาพจำลองโครงสร้างและการทำงานของระบบ .....	28
ภาพที่ 12 โดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา (Parabolic Drying Dome).....	30
ภาพที่ 13 ปริมาณการกลายเป็นไอโอซาร์ .....	33
ภาพที่ 14 ปริมาณพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไอโอซาร์ ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที .....	35
ภาพที่ 15 ปริมาณพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไอโอซาร์ ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที .....	36
ภาพที่ 16 ปริมาณฝุ่นละอองในระบบการผลิตไอโอซาร์ .....	37
ภาพที่ 17 ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบการผลิตไอโอซาร์จากการทดลองชีวมวลเปลือก ลำไย.....	38
ภาพที่ 18 ปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ในระบบการผลิตไอโอซาร์จากการทดลองชีวมวลเปลือก ลำไย.....	39



ภาพที่ 19 ปริมาณแก๊สออกซิเจนในระบบการผลิตไบโอชาร์จากการทดลองชีวมวลเปลือกลำไย.....	40
ภาพที่ 20 แสดงปริมาณความชื้นลดลงของพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที.....	41
ภาพที่ 21 แสดงปริมาณความชื้นลดลงของพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที.....	42
ภาพที่ 22 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลเปลือกลำไยของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที.....	43
ภาพที่ 23 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลกลีบของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที.....	45
ภาพที่ 24 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลซังข้าวโพดของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที.....	46
ภาพที่ 25 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลเปลือกลำไยของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที.....	48
ภาพที่ 26 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลกลีบของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที.....	49
ภาพที่ 27 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลซังข้าวโพดของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที.....	50
ภาพที่ 28 แสดงพลังงานขาเข้าและขาออกของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์.....	52
ภาพที่ 29 แสดงประสิทธิภาพความร้อนของระบบ.....	53
ภาพที่ 30 แสดงประสิทธิภาพการอบแห้งในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์.....	54
ภาพที่ 31 การสมดุลพลังงานความร้อนสำหรับการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี.....	57
ภาพที่ 32 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์.....	58
ภาพที่ 33 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาซ้ำ.....	59



ภาพที่ 34 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน  
2 ลิตรต่อนาที..... 60

ภาพที่ 35 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์..... 61

ภาพที่ 36 แสดงประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของระบบการผลิตไปโอซาร์ร่วมกับโดมอบแห่งพลังงาน  
แสงอาทิตย์..... 62

ภาพที่ 37 ระยะเวลาคืนทุนในการทดลองระบบการผลิตไปโอซาร์ร่วมกับโดมอบแห่งพลังงาน  
แสงอาทิตย์..... 64



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ชีวมวล (Biomass) หมายถึงสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติเป็นแหล่งเก็บพลังงานตามธรรมชาติและสามารถเปลี่ยนมาเป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ สารอินทรีย์เหล่านี้จะพบได้ในพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ซึ่งภายในประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีการทำการเกษตรอย่างแพร่หลายผลผลิตที่ได้ก็มีหลากหลายชนิด เช่น ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง ยางพารา เป็นต้น โดยส่วนใหญ่ในอดีตจะถูกทิ้งให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์หรือเผาทำลาย ซึ่งเป็นต้นเหตุให้เกิดมลพิษทางอากาศ จึงมีการพิจารณานำชีวมวลมาใช้ในการเป็นเชื้อเพลิงทางเลือกใหม่ ซึ่งการใช้เชื้อเพลิงชีวมวลมาผลิตให้พลังงานสามารถนำมาใช้ในด้านการผลิตพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตกระแสไฟฟ้าทดแทนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยพลังงานฟอสซิล (น้ำมัน แก๊ส ฯลฯ) ซึ่งมีในปริมาณที่จำกัดและหมดลงได้ นอกจากนั้นการใช้พลังงานจากชีวมวลยังช่วยให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตและสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร นอกจากนี้การนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกใหม่ด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมยังช่วยลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมและลดการเกิดภาวะเรือนกระจกอีกด้วย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

การเพิ่มขึ้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทนและแก๊สไนตรัสออกไซด์ เป็นต้นเหตุของการเกิดปัญหาโลกร้อนและภาวะเรือนกระจก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าความสามารถในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global Warming Potential, GWP) เท่ากับ 1 ในขณะที่แก๊สมีเทนและแก๊สไนตรัสออกไซด์มีค่า GWP เท่ากับ 24 และ 310 ตามลำดับ เมื่อเทียบปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นั้นมีมากกว่าแก๊สอื่น ๆ อย่างมหาศาล (Houghton, 1986) ซึ่งประเทศไทยเป็นประเทศแห่งการเกษตร มีพืชเศรษฐกิจหลักที่สำคัญ คือ ข้าว ข้าวโพด อ้อย และมันสำปะหลัง (สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร(องค์การมหาชน)) ในกระบวนการเพาะปลูกนั้นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งคือ การเตรียมดินเพื่อการเพาะปลูก เพราะฉะนั้นแล้วต้องมีการกำจัดวัชพืชและเศษพืชที่หลงเหลือจากการทำการเกษตรครั้งที่ผ่านมา โดยวิธีการที่เกษตรกรเลือกใช้เพื่อให้ ง่าย สะดวก รวดเร็ว และประหยัดต้นทุน คือ การเผา ดังนั้นการเผาเศษพืชและวัชพืชของเกษตรกรในวงกว้างนั้นสร้างมลพิษให้แก่สภาพแวดล้อม มีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างมหาศาล ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญของต้นเหตุในการเกิดภาวะโลกร้อน ภาวะเรือนกระจก และมลพิษ PM2.5 ที่เป็นปัญหาอย่างยิ่งในประเทศไทยและในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นแหล่งที่กักเก็บคาร์บอนอยู่เป็นจำนวนมาก(Somporn et al., 2020) ดังนั้นจากที่ได้กล่าวมาเบื้องต้น การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตด้วยเทคโนโลยีถ่านชีวภาพ

จึงเป็นการแก้ปัญหาอย่างหนึ่ง (อรสา สุkowski, 2554) ซึ่งการผลิตถ่านชีวภาพมีปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อผลผลิต เช่น อุณหภูมิในการผลิต ซึ่งถ้ามีอุณหภูมิสูงในการผลิตนั้นจะส่งผลให้มีผลผลิตถ่านชีวภาพต่ำลง ปริมาณสารระเหยภายในถ่านชีวภาพลดลง แต่ปริมาณคาร์บอนจะสูงขึ้น (Borghain et al., 2020; Manyà et al., 2018; Yuan et al., 2016) และชนิดของชีวมวลก็ยังเป็นปัจจัยหลักอีกชนิด โดยชีวมวลแต่ละชนิดเมื่อนำมาผลิตถ่านชีวภาพแล้วนั้นจะส่งผลให้คุณสมบัติของถ่านชีวภาพแตกต่างกันไปในแต่ละชีวมวล (Manyà et al., 2018; Panyoyai et al., 2019) ประโยชน์ของถ่านชีวภาพนั้นได้มีการศึกษามาแล้วสามารถปรับปรุงดิน (Sittioad et al., 2022) และเพิ่มผลผลิตของการปลูกพืชได้สูงกว่าการปลูกโดยใช้ดินทั่วไปแบบดั้งเดิมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Yang and Lu, 2021)

การแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรเป็นวิธีการแก้ไขปัญหาของผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณเกินความต้องการของตลาด ส่งผลให้ราคาของผลผลิตลดลง การแปรรูปผลิตภัณฑ์สามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์และยังสามารถเพิ่มมูลค่าได้อีกด้วย การแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรด้วยเทคโนโลยีการอบแห้งเป็นการลดความชื้นภายในผลผลิตเพื่อยับยั้งการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ กระบวนการอบแห้งจะมีการถ่ายเทความร้อนและมวลโดยที่จะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันซึ่งกระบวนการนี้จะมีปัจจัยที่แตกต่างกันออกไป เช่นอุณหภูมิ ความเร็วลม อัตราการไหลอากาศ ความชื้นเริ่มต้นของผลผลิต เป็นต้น (สมชาติ โสภณธนะฤทธิ์, 2540) ทั่วไปเกษตรกรมักจะใช้วิธีการอบแห้งแบบดั้งเดิมด้วยวิธีการตากแห้งธรรมชาติ วิธีการตากแห้งธรรมชาติเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก และต้นทุนต่ำ แต่ปัญหาของวิธีการตากแห้งธรรมชาตินั้นสามารถควบคุมได้ยาก เนื่องจากมีปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม มลภาวะ คิววัน ฝุ่นละออง สัตว์ต่าง ๆ ที่เข้ามารบกวน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการอบแห้งผลผลิตด้วยการอบแห้งภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ซึ่งการอบแห้งภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแก้ปัญหาของวิธีการตากแห้งธรรมชาติได้

การอบแห้งโดยใช้โดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลาจะต้องพึ่งการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ซึ่งการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จะมีลักษณะคล้ายกับรูปทรงพาราโบลา โดยมีความเข้มข้นสูงสุดในช่วงเวลากลางวันและจะเริ่มลดลงในช่วงเวลาบ่าย (Akpınar and Koçyiğit, 2010; Amer et al., 2018; Amjad et al., 2020; Daghigh and Shafieian, 2016; Ortiz-Rodríguez et al., 2020) อุณหภูมิภายในโดมอบแห้ง ความชื้นสัมพัทธ์ภายในโดมอบแห้ง และช่วงเวลาของการแผ่รังสีดวงอาทิตย์จะส่งผลต่อเวลาในการอบแห้งและปริมาณความชื้นของวัสดุ (Fudholi et al., 2014) จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อการแผ่รังสีดวงอาทิตย์หมดไปหรือในช่วงเวลากลางคืนนั้นจะส่งผลต่อความสามารถในการอบแห้ง จึงมีการพัฒนาการอบแห้งแบบบูรณาการขึ้นมาโดยจะสามารถรักษาอุณหภูมิในเวลากลางคืนได้โดยใช้แหล่งพลังงานอื่นร่วมกับความร้อนภายในห้องอบแห้ง การอบแห้งภายใต้อากาศร้อนสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งได้ 30-40 °C (Amer et al., 2018)



ขั้นตอนการดำเนินงาน	2564						2565		
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
4) วิเคราะห์ผลการทดลอง		■	■	■					
5) สรุปผลการทดลอง			■	■	■				
6) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์						■	■	■	
7) สอบวิทยานิพนธ์								■	■

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ทราบประสิทธิภาพของระบบเตาเผาถ่านชีวภาพร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์
- 1.4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงปริมาณ คุณภาพของไอรระเหย และแก๊สไอเสีย
- 1.4.3 สามารถนำความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาถ่านชีวภาพไปเพิ่มความร้อนให้ระบบการอบแห้ง
- 1.4.4 ผลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของการนำแก๊สเชื้อเพลิงมาใช้ประโยชน์ทางความร้อน





## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

#### 2.1 ไบโอชาร์

“...ถ่านชีวภาพ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ไบโอชาร์ คือ วัสดุที่อุดมด้วยคาร์บอน ผลิตจากการให้ความร้อนมวลชีวภาพ (Biomass) โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือใช้น้อยมาก เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการด้วยความร้อน (Pyrolysis) ซึ่งมีสองวิธีหลัก ๆ ในการผลิตไบโอชาร์ คือ การแยกสลายอย่างรวดเร็วและอย่างช้า (Srisophon et al., 2020) การผลิตไบโอชาร์ด้วยวิธีแยกสลายอย่างช้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส จะได้ผลผลิตไบโอชาร์มากกว่า 50 % ใช้เวลาเป็นชั่วโมง ซึ่งต่างจากวิธีการแยกสลายอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลาเป็นวินาที ผลผลิตที่ได้จะเป็นน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) 60% แก๊สสังเคราะห์ (Syngas) 20% ได้แก่ H<sub>2</sub> CO และ CO<sub>2</sub> และถ่านชีวภาพ (Biochar) 20%...” (อรสา สุขสว่าง, 2011)

ไบโอชาร์มีปริมาณคาร์บอนสูง เป็นแหล่งสะสมคาร์บอนและเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ให้กับดิน เมื่อนำไปใช้ปรับปรุงในการดินสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้พืชได้เกิดการสังเคราะห์แสงดีขึ้น ส่งผลให้ผลผลิตมีคุณภาพดี (Oginni et al., 2017; Petchaihan et al., 2020; กัญญา พรไชยวงศ์และสิทธิบุรณ ศิริพรอัครชัย)

ไบโอชาร์ มีความพรุนสูง สามารถกักเก็บน้ำ สารอาหาร โลหะหนัก (Rinkam et al., 2022) และเป็นแหล่งอาศัยของจุลินทรีย์ที่สำคัญในดิน เช่น เชื้อไซโตแบคเตอร์ (Azotobactor) เป็นจุลินทรีย์ที่ผลิตอาหาร หรือเชื้อราไมคอร์ไรซา (Vehicular Arbuscular Mycorrhiza) สามารถย่อยฟอสฟอรัส ทำให้ประจุไฟฟ้าของดินตรงเป็นกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) ธาตุโปแตสเซียม (K) และธาตุอื่นๆ เป็นต้น (ปรารธนา แก้วเพชร, 2550)

ไบโอชาร์ ให้ค่าความร้อนสูง สามารถนำไปใช้ในรูปแบบเชื้อเพลิงด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มเชื้อเพลิงแข็ง อีกทั้งมีคุณลักษณะช่วยในการลดปริมาณแก๊สในกลุ่มที่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก เช่น แก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>) และไนตรัสออกไซด์ (N<sub>2</sub>O) เป็นต้น โดยส่วนใหญ่สาเหตุเกิดจากกระบวนการทางด้านการเกษตร (จิระพงษ์ คูหากาญจน์, 2552)

#### 2.2 ไพโรไลซิส

“การไพโรไลซิสเป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนที่เปลี่ยนรูปของชีวมวล พลาสติก รวมถึงวัสดุชนิดอื่น ๆ เป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนสูง ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมัน (Bio-oil) และแก๊สไม่กลั่นตัว (Non-condensable Gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง 500-800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่อง

ปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งกระบวนการไพโรไลซิส (กุลันันท์ วิจารณ์กรและอมรชัย อารณวิธานพ, 2015) แบ่งออก 3 ประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast Pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบเกิดขึ้นโดยเร็ว (Flash Pyrolysis)

#### 1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis)

กระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นของเหลว 30-50 เปอร์เซ็นต์ และถ่าน 25-35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการไพโรไลซิสแบบช้าสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย ได้แก่

1) การไพโรไลซิสแบบคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ความร้อนเป็นระยะเวลาสั้น โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลผลิตที่เป็นถ่านสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลผลิตอื่นในสถานะก๊าซจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ

2) การไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม เป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่าแบบคาร์บอนไนเซชัน คือ 15-30 นาที ได้ผลผลิตครบทั้ง 3 สถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลผลิตในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้น น้ำมันส่วนใหญ่ จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีขี้หรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมัน ได้แก่ อะซิโตน คีโตน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น

#### 2 กลไกการเกิดการไพโรไลซิส

ได้ศึกษาพฤติกรรมขององค์ประกอบแต่ละชนิดในกระบวนการไพโรไลซิสพบว่า องค์ประกอบที่มีอยู่ภายใน ได้แก่ พอลิเมอร์ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน อีกทั้งศึกษาจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา พบว่าประกอบด้วย 2 ช่วง (กันยา พรไชยวงศ์และสิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย) ดังนี้

1) ช่วงพรีไพโรไลซิส (Pre-pyrolysis) อุณหภูมิการเผาไหม้อยู่ในช่วง 120-200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้จะมีการจัดองค์ประกอบ เกิดการทำลายพันธะของวัตถุดิบบางส่วนและเริ่มมีอนุมูลอิสระ (Free Radical) เกิดขึ้น รวมทั้งมีการเกิดหมู่คาร์บอนิล (Carbonyl Group) และมีกลุ่มไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydro Peroxide) ขึ้นเมื่อชีวมวลได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (น้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส) เป็นเวลานาน ทำให้โครงสร้างภายในของชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลง ผลผลิตที่ได้ต่างจากการไพโรไลซิส วัตถุดิบชนิดเดียวกันแต่ไม่มีช่วงพรีไพโรไลซิส



2) ช่วงการสลายส่วนที่เป็นของแข็ง เป็นขั้นตอนหลักของกระบวนการเกิดไพโรไลซิส จะมีอัตราการเกิดที่เร็วมากและจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิส โดยที่ อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 300-600 องศาเซลเซียส ในการเปลี่ยนแปลงทางเคมีนั้น โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่หรือเป็นสายโซ่ยาวจะเกิดการแตกตัวของพันธะ เช่น C-C, C-S และ C-O เป็นต้น พร้อมกับการเกิดการผลิตรระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) สารผลิตภัณฑ์จะ ดึงไนโตรเจนจากสารอื่นและกลั่นตัว เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ได้ ถ่านโค้ก ในขณะที่ถ่านโค้กมักจะไม่เกิดปฏิกิริยา และจะเปลี่ยนเป็นถ่านชีวภาพ อีกทั้งเมื่อ เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น น้ำมันดินจะผ่านกระบวนการแตกตัว (Cracking) และถูกทำให้เป็นก๊าซ (Gasified) ซึ่งทำให้เกิดผลิตภัณฑ์มีเทน (Methane) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และ คาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon Monoxide)

### 3 กลไกการผลิตและการนำไปใช้ประโยชน์

การไพโรไลซิสของชีวมวลจากเศษวัสดุเกษตรที่เหลือใช้หลังการเก็บเกี่ยวหรือการแปรรูป เมื่อ ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสจะได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ ถ่าน น้ำมันดิน และแก๊สไม่กลั่นตัว ซึ่งสามารถ นำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย (กุลนันท์ วิจารณ์ครและอมรชัย อภรณ์วิชานพ, 2015) ดังนี้

1) ถ่าน ถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้สำหรับผลิตความร้อน ไอน้ำ และ ไฟฟ้า หรือใช้ผลิตไบโอชาร์ โดยค่าความร้อนของถ่านมีค่า 15-30 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ถ่านที่ ได้เกิดจากเผาไหม้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ด้วยการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ นอกจากนี้ ไบโอชาร์ยังมีคุณสมบัติที่ดีเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติของดิน ดังนั้น จึงมีการ พัฒนาไปไบโอชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อใช้ปรับปรุงดินสำหรับการเกษตร

2) น้ำมัน จากกระบวนการไพโรไลซิสมีคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ มีความหนาแน่น 1.2 กิโลกรัมต่อลิตร มีความหนืดสูง มีความเป็นกรดทำให้มีคุณสมบัติกัดกร่อน อุณหภูมิจุดติดสูง มีค่าความร้อน 15-18 เมกะจูลต่อกิโลกรัม มีคุณสมบัติไม่รวมเป็นเนื้อ เดียวกันกับน้ำมันปิโตรเลียม นอกจากนี้หากเติมน้ำลงไปใต้น้ำจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ละลายน้ำ (Aqueous Phase) และส่วนที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายในสารอินทรีย์ (Organic Phase) น้ำมันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย วิธีการที่ง่ายที่สุด คือ ใช้ เป็นเชื้อเพลิงในหม้อต้มไอน้ำ (Boiler) หรือกังหันแก๊ส (Gas Turbine) สำหรับเผาไหม้ เพื่อ ผลิตความร้อนและไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ ซึ่งการใช้ น้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยตรง ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ จะทำให้เกิด ปัญหาหลายประการ เช่น ปัญหาการกัดกร่อน เนื่องจากคุณสมบัติด้านความเป็นกรด การจุด ติดยาก เนื่องจากปริมาณน้ำที่มีมากเกินไป อีกทั้งยังมีปริมาณเถ้าสูง ทำให้เกิดการอุดตันใน เครื่องยนต์ เป็นต้น อีกทั้งสามารถนำไปผลิตสารเคมีต่าง ๆ โดยผ่านกระบวนการแยก เช่น

เกลือแคลเซียม เพื่อใช้ดักจับซัลเฟอร์ออกไซด์ (SOx) ปุ๋ยจากการทำปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนิลกับแอมโมเนีย ผลิตแอลดีไฮด์ เรซินและพลาสติก รวมถึงเมทานอล กรดอะซิติก และอะซิโตน เป็นต้น

3) แก๊สไม่กลั่นตัว ส่วนใหญ่ประกอบด้วย CH<sub>4</sub> CO<sub>2</sub> CO และ H<sub>2</sub> โดยทั่วไปจะนำกลับมาเผาไหม้ เพื่อให้ความร้อนภายในกระบวนการหรือส่งไปยังกระบวนการอื่น เพื่อผลิตความร้อนและไฟฟ้า” (Waranya Somparn, 2020)

### 2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

หลักการถ่ายเทความร้อน (Principle of heat transfer) คือ การที่ความร้อนเคลื่อนที่จากจุด หนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง มีกลไกการถ่ายเทความร้อน 3 แบบด้วยกัน คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี การเคลื่อนที่ของความร้อนทั้ง 3 แบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ พฤติกรรมตามธรรมชาติของความร้อนเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิความร้อนย่อมมีการเคลื่อนที่จากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงสู่แหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำเสมอ

2.3.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (Conduction Heat Transfer) คือ การนำความร้อน หมายถึงการส่งผ่านพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่ด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าดังภาพที่ 1 โดยส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ในตัวกลางที่เป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ โดยการถ่ายเทความร้อนสำหรับการนำความร้อนสามารถหาได้จากสมการที่ 1 (มนตรี พิรุณเกษตร, 2548)

$$q_k = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

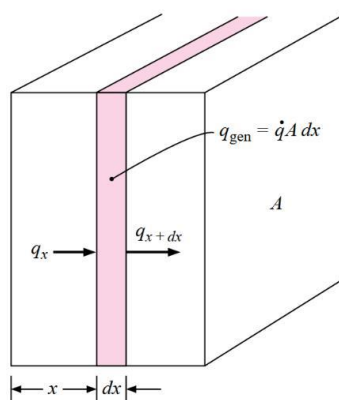
โดยที่  $q_k$  ค่าการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (W)

$k$  = ค่าสภาพการนำความร้อนของตัวกลาง ( $\frac{W}{m \cdot K}$ )

$A$  = พื้นที่ในการรับความร้อน ( $m^2$ )

$\Delta T$  = ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิ (K)

$\Delta x$  = ค่าความหนาของวัตถุที่เป็นตัวกลาง (m)



ภาพที่ 1 การนำความร้อนผ่านแผ่นผนัง

ที่มา : Holman, J. (2009)

2.3.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection Heat Transfer) คือ วิธีการที่ความร้อนเคลื่อนที่ระหว่างผิวของของแข็งและของไหล ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนออกจากผิวของของแข็ง กลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพาได้นั้นเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงานและการเคลื่อนที่ของการไหล การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนแบ่งออกได้ 2 ลักษณะ คือ

2.3.2.1 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection)

2.3.2.2 การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection)

ทั้ง 2 แบบมีสมการในการหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) ดังสมการที่ 2

$$Q_c = h_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (2)$$

เมื่อ  $Q_c$  คือ การพาความร้อน (W)

$h_c$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ )

$A$  คือ พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล ( $m^2$ )

$T_s$  คือ อุณหภูมิของวัตถุ (K)

$T_{f,\infty}$  คือ อุณหภูมิของของไหลอิสระ (K)

2.3.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer) คือ การที่พลังงานถูกปล่อยออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิที่แน่นอน โดยวัตถุนั้นอาจเป็นของแข็งของเหลว หรือแก๊สก็ได้ การแผ่รังสีมีการถ่ายเทโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรืออีกในหนึ่งเรียกว่า โฟตอน(Photons) เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงไม่อาศัยตัวกลางในการส่งถ่ายความร้อน เช่น การแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลก

โดยทั่วไปวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงจะยิ่งแผ่รังสีความร้อนได้มาก และจะเกิดการถ่ายเทได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ หลักการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีอธิบายได้ด้วย Stefan-Boltzmann Law ดังนี้

$$Q_r = \sigma AT^4 \quad (3)$$

เมื่อ  $Q_r$  คือ อัตราความร้อนจากการแผ่รังสี ( $W$ )

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann ซึ่งเท่ากับ  $5.6703 \times 10^{-8} \left( \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$

$A$  คือ พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน ( $m^2$ )

$T$  คือ อุณหภูมิของตัวแผ่รังสีความร้อน ( $K$ )

#### 2.4 เอ็กเซอร์ยี (Exergy)

เอกซ์เซอร์ยี (exergy) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า availability หรือ available work ได้รับการกำหนดให้เป็น ศักยภาพในการทำงาน (work potential) ซึ่งถือเป็นข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง สำหรับการประเมินประโยชน์ที่จะได้รับจากการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ขึ้นมาใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่กำหนด จะคุ้มค่าต่อการลงทุนหรือไม่ นิยามของเอกซ์เซอร์ยีคือ งานใช้ประโยชน์สูงสุด (maximum useful work) ที่ระบบผลิตได้ในระหว่างกระบวนการ โดยระบบต้องดำเนินกระบวนการแบบผันกลับได้ (irreversibility = 0) จนกระทั่งสภาวะของระบบเหมือน (หรืออยู่ในสมดุล) กับสภาวะของสิ่งแวดล้อม ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวเรียกว่า สภาวะตาย (dead state) (Cengel et al., 2011; Ptasinski, 2016) โดยสามารถวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีได้ด้วยสมการดังนี้

$$Exergy_s = m \cdot LHV \quad (4)$$

เมื่อ  $m$  = อัตราเชื้อเพลิง (kg/hr)

LHV = ค่าความร้อนจำเพาะของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

$$Exergy = \left( 1 - \frac{T_a}{T_i} \right) \cdot Q \quad (5)$$

เมื่อ  $T_a$  = อุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}C$ )

$T_i$  = อุณหภูมิของสารทำงาน ( $^{\circ}C$ )

$Q$  = ค่าความร้อนของเอ็กเซอร์ (kJ)

$$Exergy = mC_p \left[ (T_i - T_a) - T_a \cdot \ln \left( \frac{T_i}{T_a} \right) \right] \quad (6)$$

เมื่อ  $m$  = อัตราการไหล (kg/hr)

$C_p$  = ค่าความจำเพาะของสารทำงาน (kJ/kg  $^{\circ}C$ )

$T_a$  = อุณหภูมิของอากาศสิ่งแวดล้อม ( $^{\circ}C$ )

$T_i$  = อุณหภูมิของสารทำงาน ( $^{\circ}\text{C}$ )

## 2.5 การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวล

ปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตพลังงานความร้อนและไฟฟ้า (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2554) โดยใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งระบบจะมีตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงระดับโรงไฟฟ้า โดยการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงานด้วยกระบวนการทางเคมี-ความร้อนสามารถจำแนกระบบหลัก ๆ 4 ประเภท ดังนี้

- 1) การเผาไหม้โดยตรง (Direct Fired)
- 2) การเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงสองชนิดขึ้นไป (Co-Firing)
- 3) การผลิตก๊าซเชื้อเพลิง (Gasification)
- 4) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลส่วนใหญ่เลือกใช้ระบบการเผาไหม้โดยตรงโดยนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงให้หม้อไอน้ำ (Boiler) ซึ่งไอน้ำที่ผลิตได้นี้จะถูกนำไปปั่นกังหันที่ต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำให้ได้กระแสไฟฟ้าออกมาและยังสามารถออกแบบให้นำไอน้ำที่ผ่านกังหันเพื่อผลิตไฟฟ้า (Condensing Turbine) มาใช้ประโยชน์ในรูปแบบความร้อน ซึ่งการผลิตไอน้ำและไฟฟ้าร่วมกันนี้เรียกว่า ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วม (Cogeneration) ซึ่งเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการใช้เชื้อเพลิงสูง โรงไฟฟ้าถ่านหินหลายแห่งสามารถนำระบบการเผาไหม้โดยใช้เชื้อเพลิงชีวมวลเผาพร้อมกับถ่านหิน (Co-Firing) เพื่อเป็นการลดการปล่อยมลภาวะโดยเฉพาะก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์

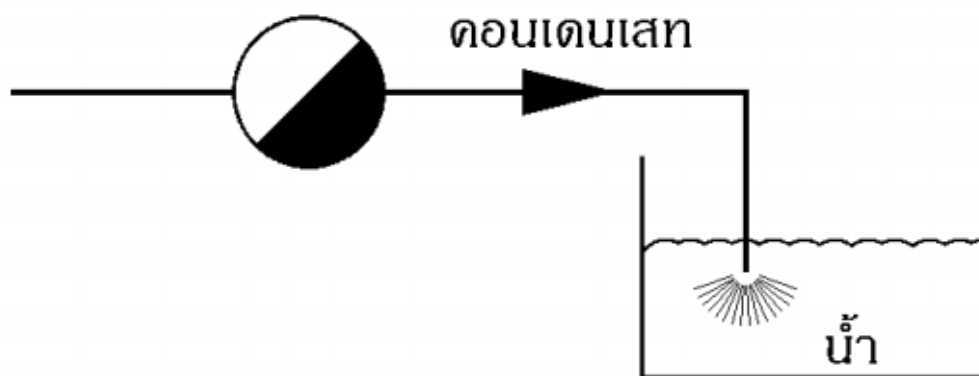
การเผาไหม้โดยตรงเป็นวิธีที่ใช้กันมากที่สุดในการนำเชื้อเพลิงมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการเผาให้ความร้อนเพื่อเอาก๊าซร้อนไปใช้ในกระบวนการผลิตเช่นการอบแห้งหรือการนำความร้อนที่ได้ไปผลิตไอน้ำร้อนที่มีความดันสูงเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้าเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้โดยตรงภายในเตาเผา ความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกนำไปใช้ผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูงไอน้ำที่ผลิตได้นี้จะถูกนำไปใช้ขับกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าหรือนำความร้อนไปใช้ในกระบวนการอื่น ๆ

## 2.6 พลังงานจากความร้อนเหลือทิ้ง

พลังงานความร้อนที่ปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศหลังจากผ่านการใช้ประโยชน์แล้วซึ่งอาจอยู่ในรูปอากาศ ก๊าซ น้ำ หรือของเหลวอื่นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศ ความร้อนเหลือทิ้งสามารถนำไปใช้ได้หลายรูปแบบ ดังนี้

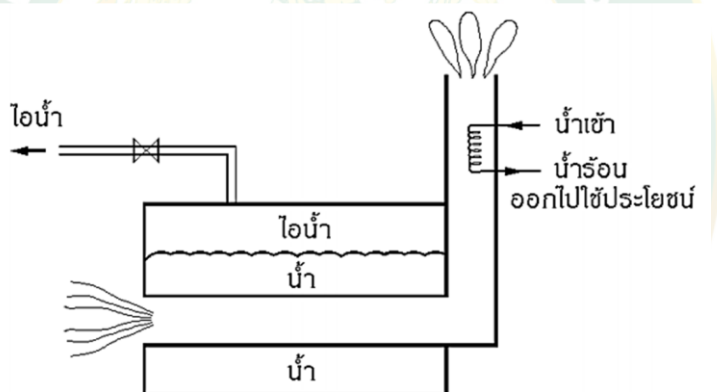
- 1) นำไปใช้โดยตรง (direct heating) “โดยการสัมผัสกับวัสดุอุปกรณ์โดยตรงหรือผสมคลุกเคล้ากับอากาศ ก๊าซ หรือของเหลวที่ต้องการให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความสะอาด”





ภาพที่ 2 การนำความร้อนมาใช้โดยตรง

- 2) การนำไปใช้โดยอ้อม (indirect heating) “โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนบนพื้นผิว แลกเปลี่ยนความร้อน เช่น ก๊าซกับก๊าซ ของเหลวกับก๊าซ หรือของเหลวกับของเหลว ดังนั้น ปริมาณความร้อนที่นำกลับมาใช้ประโยชน์ ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยน ความร้อน”



ภาพที่ 3 การนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้โดยอ้อม

## 2.7 การนำความร้อนเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery)

ในกระบวนการผลิตเกือบทุกอุตสาหกรรมจะมีความร้อนทิ้ง (กระทรวงพลังงาน, 2553) หลายรูปแบบทั้งความร้อน และความเย็น ทั้งเป็นลมร้อน น้ำร้อน หรือแล้วแต่กระบวนการผลิต ซึ่งของเสียเหล่านี้สามารถนำกลับมาใช้เป็นแหล่งพลังงานอีกได้ หรือที่เรียกว่า Heat Recovery ทั้งยังสามารถช่วยประหยัดต้นทุนด้านพลังงานได้อีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะแนะนำให้อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทต่างๆ ดังนี้

### 2.7.1 Plate heat exchanger

คุณลักษณะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น คือ “การเอาแผ่นการถ่ายเทความร้อนหลายๆแผ่นมาวางเรียงกันในระยะห่างคงที่ แล้วให้ของเหลวแต่ละชนิดและมีอุณหภูมิต่างกันไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นในลักษณะที่สลับกันช่อง เว้นช่อง โดยตัวเครื่องมักทำด้วยแผ่นเหล็กสแตนเลส

(Stainless Steel) บางๆ หรือแผ่นไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งทนต่อสนิมได้ดี นำมาทำให้เกิด ส่วนนูน และส่วนเว้าประกอบกันหลายๆแผ่น ของไหลแต่ละชนิดจะไหลสลับกันไปตามช่องว่างที่เกิด จากการประกอบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงป้องกันการรั่ว และให้มีช่องว่าง สำหรับการไหล ผิวของแผ่นถ่ายเทความร้อน ถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้ของ ไหลรั่ว และรักษาระยะห่างระหว่างแผ่นตามที่ต้องการ”



ภาพที่ 4 แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน (Plate Heat Exchanger)

ที่มา: <http://alangmarinesolution.com/images/products/plate-heat-exchangers.jpg>

#### 2.7.2 Shell and Tube Heat Exchanger

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ของไหลอย่างหนึ่งจะอยู่ในเชลล์ และอีกอย่างหนึ่งจะอยู่ในท่อ “ใช้ได้ทั้งการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว-ของเหลว และก๊าซ-ก๊าซสำหรับการไหลนั้นจะ อยู่ในลักษณะไหลสวนทาง หรือไหลขนานก็ได้ หรือทั้งสองอย่างในเครื่องเดียวกันก็ได้ นอกจากนี้อาจ ออกแบบให้ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกับท่อก็ได้”



ภาพที่ 5 Shell and Tube Heat Exchanger

ที่มา : [http://img.nauticexpo.com/images\\_ne/photo-g/shell-tube-heat-exchanger-ships-31461-8107152.jpg](http://img.nauticexpo.com/images_ne/photo-g/shell-tube-heat-exchanger-ships-31461-8107152.jpg)



### 2.7.3 Stack recuperator

เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง ก๊าซและก๊าซ “จึงมักนิยมใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซเสียจากการเผาไหม้กับอากาศเย็น เหมาะสำหรับติดตั้งกับเตาเผาขนาดใหญ่อุณหภูมิสูง เช่น อุตสาหกรรมเซรามิค อุตสาหกรรมโลหะ และอุตสาหกรรมแก้ว หลักการทำงาน ก๊าซไอเสียและอากาศเย็นที่ต้องการอุ่นความร้อน จะไหลไปตามแนวท่อในแต่ละส่วนในช่วงแรกของการถ่ายเทความร้อนขณะที่ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิสูง จะเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสี ช่วงถัดมาจะเป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาซึ่งก๊าซไอเสียจะถูกส่งผ่านท่อเล็กๆหลายท่อที่ขนานกันเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน”



ภาพที่ 6 Stack recuperator

ที่มา: [https://www.schmidtsche-schack.com/fileadmin/Graphics/03\\_Text\\_Pic/double-shell-type-recuperator.jpg](https://www.schmidtsche-schack.com/fileadmin/Graphics/03_Text_Pic/double-shell-type-recuperator.jpg)

### 2.7.4 Economize

หลักการทำงาน “ภายในอุปกรณ์จะประกอบด้วยกลุ่มท่อจำนวนมาก ซึ่งท่อดังกล่าวจะมีครีบลและวางอยู่ในช่องทางออกของก๊าซไอเสีย โดยที่ของเหลวจะไหลผ่านในท่อ เพื่อรับความร้อนจากก๊าซไอเสียโดยรอบ ทำให้อุณหภูมิของของเหลวสูงขึ้น และอุณหภูมิของก๊าซไอเสียลดต่ำลง ข้อควรระวังคือไม่สามารถใช้กับก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิต่ำเกินไปเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อแรงลมไหลผ่าน (Draft Force) รวมทั้งเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันปนอยู่ จะก่อให้เกิดการกัดกร่อนเมื่อก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิต่ำลงหลังการถ่ายเทความร้อน”



ภาพที่ 7 Economize

ที่มา : <https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/screenshots/pics/medium.jpg>

## 2.8 พลังงานจากเชื้อเพลิงป้อน

พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเตาเผาข้าวและเตาไปโอชาร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้และค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยอ้างอิงสูตรคำนวณพลังงานจากเชื้อเพลิงป้อนได้จากคู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน) เกี่ยวข้องกับเตาอุตสาหกรรม (กระทรวงพลังงาน, 2553)

$$Q = m \cdot LHV \quad (7)$$

เมื่อ  $Q$  = ปริมาณความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ (MJ/hr)

$m$  = อัตราการใช้เชื้อเพลิง (L/h or kg/hr)

$LHV$  = ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/kg or MJ/hr)

## 2.9 การสูญเสียความร้อนทางปล่อง

พลังงานความร้อนที่ได้จากการสูญเสียความร้อนทางปล่องเตาเผาข้าวสามารถวิเคราะห์จากข้อมูลชนิดและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ และอุณหภูมิจากปล่องคว้นโดยอ้างอิงสูตรคำนวณพลังงานจากการสูญเสียความร้อนทางปล่องได้จากคู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน) เกี่ยวข้องกับเตาอุตสาหกรรม (กระทรวงพลังงาน, 2553)

$$Q = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (8)$$

เมื่อ  $Q$  = ปริมาณความร้อนทิ้งในก๊าซไอเสีย (kW)

$V$  = ปริมาณการไหลของก๊าซไอเสีย ( $m^3/s$ )

$\rho$  = ความหนาแน่นของก๊าซไอเสีย  $1.19 (kg/m^3)$

$C_p$  = ค่าความจุความร้อนก๊าซไอเสีย ( $kJ/kg \text{ } ^\circ C$ )

$\Delta T$  = ผลต่างอุณหภูมิ ( $^\circ C$ )

## 2.10 การสูญเสียความร้อนผ่านผนังเตา

การสูญเสียความร้อนบริเวณผนังเตาเกิดจากการพาความร้อนโดยอากาศแวดล้อมและการแผ่รังสีความร้อนเนื่องจากผนังเตาที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม การคำนวณการสูญเสียความร้อนทางผนังเตาสามารถทำได้โดยการเขียนสมการสมดุลพลังงานที่บริเวณผนังเตา ซึ่งอ้างอิงสูตรคำนวณพลังงานจากการสูญเสียความร้อนทางผนังเตาได้จากคู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน) เกี่ยวข้องกับเตาอุตสาหกรรม (กระทรวงพลังงาน, 2553)

$$Q = hA(T_s - T_a) + \epsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \quad (9)$$

เมื่อ  $A$  = พื้นที่ผิวของผนังเตา ( $m^2$ )

$T_s$  = อุณหภูมิผิวของผนังเตา (K)

$T_a$  = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (K)

$\epsilon$  = สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

$\sigma$  = ค่าคงที่ Stefan Boltzman =  $5.67 \times 10^{-8}$  ( $W/m^2 \cdot K^4$ )

$h$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา

$$= 1.42 \left[ \frac{T_s - T_a}{H} \right]^{0.25} \quad (W/m^2 \cdot K)$$

$H$  = ความสูงของเตา พื้นที่ ที่ไม่ได้หุ้มฉนวน (m)

## 2.11 การอบแห้ง (Drying)

การอบแห้งเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการแปรรูปผลผลิตเกษตร เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาผลผลิตให้ยาวนานขึ้น นอกจากนี้จะช่วยรองรับปัญหาผลผลิตเกษตรล้นตลาดได้แล้ว ยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลผลิตอีกด้วย เทคโนโลยีการอบแห้งเป็นกระบวนการให้ความร้อนภายใต้สภาวะควบคุมกับผลผลิตเกษตรที่มีความชื้นสูงเพื่อลดปริมาณน้ำหรือคายความชื้นด้วยวิธีระเหยความชื้นออกจากผลผลิต คุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งจะขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารในระหว่างกระบวนการอบแห้ง การวิจัยและพัฒนาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้งจึงเป็นกุญแจสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ยังคงกลิ่น รส และคุณค่าทางโภชนาการไว้ใกล้เคียงกับผลผลิตสดอย่างไรก็ตาม การออกแบบระบบการอบแห้งให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่ต้องการ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง ทั้งในด้านวิธีการอบแห้ง แหล่งพลังงานที่ใช้ และผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง (สุนทร สีป้า, 2559)



ภาพที่ 8 ใบมะกรูดอบแห้ง

ที่มา : <https://www.nstda.or.th/investorsday/2020/projects/detail/10/>

## 2.12 ความชื้น

โดยทั่วไปความชื้นในผลผลิตทางการเกษตรคือสารที่สามารถระเหยได้เมื่อได้รับความร้อน ประกอบไปด้วยน้ำ (water) น้ำมันหอมระเหย (Volatile oils) ยางเหนียว (Greases) แอลกอฮอล์ (Alcohols) ตัวทำละลายอินทรีย์ (Organic solvents) และสารให้กลิ่น (Flavors) ในจำนวนนี้น้ำถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดซึ่งอาจจะมีปริมาณมากถึงร้อยละ 50 - 80 น้ำหนักของวัสดุ ขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของเซลล์ ความชื้นบางส่วนสามารถระเหยสู่ชั้นบรรยากาศได้ เจอกันวัสดุที่แห้งมากก็สามารถดูดซับความชื้นจากชั้นบรรยากาศได้เช่นกัน บางครั้งจึงเรียกผลผลิตทางการเกษตรว่า “วัสดุที่แลกเปลี่ยนความชื้นได้ดี (Hygroscopic material)” เนื่องจากวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นจากสภาวะแวดล้อมตลอดเวลา โดยการที่การแลกเปลี่ยนความชื้นจะเกิดขึ้นระหว่างตัววัสดุเองกับสิ่งแวดล้อมจนกว่าจะเข้าสู่จุดสมดุลซึ่งเป็นสภาพที่ไม่มีการเพิ่มหรือสูญเสียความชื้นอีกต่อไป อย่างไรก็ตาม การดูดซับความชื้นใช้พลังงานน้อยกว่าการคายความชื้น ดังนั้นในกระบวนการอบแห้งจึงใช้พลังงานมาก โดยทั่วไปความชื้นหรือปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุสามารถที่จะแยกออกได้หลายลักษณะด้วยกัน คือ (สุนทร สืบคำ. 2559)

- 2.12.1 ความชื้นที่เกาะที่ผิวของเมล็ด (Free Water) เป็นความชื้นเกินจุดอิ่มตัวของวัสดุที่จะดูดซับไว้ได้ภายใน (ส่วนมากจะไม่เกินกว่า 24% w.b) ซึ่งสามารถระเหยออกไปได้ง่าย ความร้อนที่ปริมาณความชื้นนี้ดูดซับไว้ จะเท่ากับความร้อนที่ใช้ในการระเหยความชื้นชนิดนี้ออกจากผิววัสดุเป็นความชื้นที่ต้องกำจัดออกจากวัสดุ
- 2.12.2 ความชื้นที่อยู่ภายในวัสดุซึ่งเกิดจากแรงยึดเหนี่ยวของผิวโมเลกุลวัสดุกับน้ำ (Surface force) เป็นความชื้นในระดับที่วัสดุสามารถดูดซับไว้ภายใน ซึ่งระเหยออกไปได้ยากกว่าความชื้นที่เกาะที่ผิวของวัสดุ อัตราการระเหยน้ำขึ้นอยู่กับระดับความชื้นภายในวัสดุ

ลักษณะหรือชนิดวัสดุและสภาพอากาศแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณการหมุนเวียนของอากาศ

2.12.3 ความชื้นเป็นสารประกอบของวัสดุแบบ chemically bound ซึ่งไม่อาจจะทำให้ระเหยออกไปได้ โดยทั่วไปในการพิจารณาหรือวัดค่าความชื้นของวัสดุจะไม่รวมความชื้นนี้ เพราะความชื้นดังกล่าวถูกพิจารณาเป็นสารเนื้อเดียวกับวัสดุนั้น ๆ

2.12.4 ความชื้นที่ผ่านผนังเซลล์ (Cell wall) เข้าไปยัง Cytoplasm ของเซลล์ ความชื้นในระดับนี้เชื่อว่าเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระบวนการที่ไม่ย้อนกลับ (Hysteresis process) ในวัสดุระหว่างการแลกเปลี่ยนความชื้นกับสิ่งแวดล้อม

## 2.13 ปริมาณความชื้น

ความชื้นในวัสดุ (Moisture content, MC) จะบอกถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุเมื่อเทียบกับมวลวัสดุขึ้นหรือแห้งจึงนิยมแสดงได้ 2 แบบ คือ

2.13.1 ความชื้นมาตรฐานเปียก (Wet basis moisture content) เป็นความชื้นมาตรฐานที่นิยมโดยทั่ว ๆ ไปในการศึกษาและเชิงพาณิชย์ เช่น เครื่องวัดความชื้นเมล็ดพืชหรือผลผลิตเกษตรชนิดต่าง ๆ ดังนั้น หากความชื้นไม่ได้ระบุว่าเป็นมาตรฐานเปียกหรือแห้ง หมายความว่า เป็นความชื้นมาตรฐานเปียกซึ่งคำนวณได้จาก

$$m = \frac{W_m}{W_m + W_d} \times 100 \quad (10)$$

เมื่อ  $m$  คือ ปริมาณความชื้นฐานเปียก (%w.b.)

$W_m$  คือ มวลของน้ำ (kg)

$W_d$  คือ มวลของวัสดุแห้ง (kg)

2.13.2 ปริมาณความชื้นมาตรฐานแห้ง (Dry basis moisture content) มาตรฐานที่นิยมใช้ในการคำนวณเพื่อเปรียบเทียบ เช่น การเปรียบเทียบน้ำหนัก หากผลผลิตมีความชื้นสูงก็จะมีน้ำหนักมาก ดังนั้น หากต้องการเปรียบเทียบน้ำหนักของผลผลิต 2 สิ่งขึ้นไปต้องทำการปรับมาตรฐานขึ้นให้เท่ากัน หรือเปรียบเทียบความชื้นฐานแห้งซึ่งคำนวณได้จาก

$$M = \frac{W_m}{W_d} \times 100 \quad (11)$$

เมื่อ  $M$  คือ ปริมาณความชื้นฐานแห้ง (%d.b.)

## 2.14 ปริมาณความชื้นที่ต้องระเหยออก

ในกระบวนการอบแห้งมักมีคำถามอยู่ตลอดเวลาว่าควรลดความชื้นลงเหลือเท่าไรคำตอบก็คือผลิตภัณฑ์ควรมีความชื้นสุดท้ายที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาไว้ได้อย่างปลอดภัยและเป็นระยะเวลายาวนาน มีวิธีการหลายวิธีที่สามารถวัดค่าความชื้นสุดท้ายของผลผลิตที่กำลังอบแห้งเช่น



- 2.14.1 วัดความชื้นของผลผลิตตัวอย่างที่สูงจากประชากรของผลผลิตทั้งหมด
- 2.14.2 ปรับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้ง เพราะความชื้นของผลผลิตกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ออกจากห้องอบแห้งมีความสัมพันธ์กัน
- 2.14.3 วิเคราะห์ลักษณะจำเพาะของผลิตภัณฑ์เทียบกับผลิตภัณฑ์มาตรฐานที่ให้ระดับความชื้นในระดับที่น่าพอใจ การพิจารณาอาจดูจากลักษณะการเคี้ยวสัมผัส ความนุ่ม สี ความร่วน
- 2.14.4 ดูจากเวลาในการอบซึ่งต้องอาศัยข้อมูลพื้นฐานในการตรวจสอบ
- 2.14.5 ดูจากน้ำหนักสุดท้ายของผลผลิตที่กำลังอบอยู่ แต่วิธีการนี้ยังไม่เหมาะสำหรับอุปกรณ์จริง แต่จะเหมาะสำหรับชุดอบในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีระบบการจับเก็บข้อมูลการอบแห้งแบบต่อเนื่อง (Real-time or online digital data acquisition system) โดยจำนวนน้ำที่ระเหยออกจากผลผลิตสด สามารถคำนวณได้จากสมการพื้นฐานในการวัดปริมาตรความชื้นของวัสดุ ซึ่งหากใช้น้ำหนักผลผลิตสดเป็นฐาน สมการที่ใช้ในการคำนวณได้แก่

$$M_w = \frac{(m_i - m_f)M_i}{(100 - m_i)} \quad (12)$$

เมื่อ  $M_w$  คือ จำนวนความชื้นที่ต้องระเหยออกจากผลผลิตสด (kg)

$m_i$  คือ ความชื้นเริ่มต้นของวัสดุ (%)

$m_f$  คือ ความชื้นสุดท้ายของวัสดุที่ต้องการ (%)

$M_i$  คือ ปริมาณของผลผลิตสดที่ต้องการอบแห้ง (kg)

กรณีใช้น้ำหนักผลิตภัณฑ์แห้งที่ต้องการเป็นฐาน สมการที่ใช้คำนวณได้แก่

$$M_w = \frac{(m_i - m_f)M_f}{(100 - m_i)} \quad (13)$$

เมื่อ  $M_f$  คือ ปริมาณของผลิตภัณฑ์แห้งที่ต้องการ (kg)

## 2.15 การหาประสิทธิภาพการอบแห้ง

การหาประสิทธิภาพการอบแห้งเพื่อวิเคราะห์ความสามารถของการอบแห้ง โดยสามารถวิเคราะห์พลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับคำนวณได้จากสมการดังนี้ (Mugi and Chandramohan, 2021)

$$Q = I \cdot A \quad (14)$$

เมื่อ  $I$  = ความพลังงานแสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

$A$  = พื้นที่รับแสงอาทิตย์ ( $m^2$ )

และพลังงานที่ใช้ระเหยความชื้นออกจากวัสดุเกษตรสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$Q = \frac{m_w L}{t} \quad (15)$$

เมื่อ  $m_w$  = น้ำหนักความชื้นที่ระเหยออก (kg)

$L$  = ค่าความร้อนแฝงของน้ำ (kJ/kg)



$t$  = ระยะเวลาในการอบแห้ง (hr)

ประสิทธิภาพการอบแห้งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{m_w L}{I \cdot A} \quad (16)$$

เมื่อ  $m_w$  = น้ำหนักความชื้นที่ระเหยออก (kg)

$L$  = ค่าความร้อนแฝงของน้ำ (kJ/kg)

$I$  = ความพลังงานแสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

$A$  = พื้นที่รับแสงอาทิตย์ ( $m^2$ )

## 2.16 การทดสอบหาปริมาณมลพิษ

ทดสอบหาปริมาณมลพิษด้วยเครื่องมือวัดฝุ่นที่สามารถทำการวัดบริเวณที่มีการปลดปล่อยมลพิษหรือก๊าซไอเสียตามจุดปล่อยต่างๆ รวมถึงที่ปล่อยระบายในทุกขนาดด้วยเครื่อง testo 380 สามารถทำการวัดปริมาณฝุ่นที่มีขนาดตั้งแต่ 10 ไมครอนลงมาจนถึง 2.5 ไมครอน ผ่านหลักการของ Impactor-Oscillating crystal-Principle ซึ่งใช้หลักการดูดฝุ่นผ่านหัวคัตขนาด (nozzle) ที่ใช้หลักการตกกระทบด้วยแรงเฉื่อย (Inertial Impaction) เพื่อให้ได้ฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามที่กำหนด โดยมีอุปกรณ์ประกอบหลัก 3 อุปกรณ์ด้วย ได้แก่

- 1) Testo 330-2 LL
- 2) Probe
- 3) Measuring box

นอกจากนี้ตัวอุปกรณ์ testo 330-2 LL ยังเป็นอุปกรณ์ที่เรียกว่า Flue Gas Analyzer ซึ่งเป็นเครื่องวัดประสิทธิภาพการเผาไหม้ ที่มีการติดตั้ง sensor สำหรับวัดปริมาณของก๊าซไอเสียต่างๆ ไว้ภายในตัวเครื่อง ทำให้สามารถใช้วัดปริมาณของก๊าซไอเสียต่างๆ ได้ อันประกอบไปด้วย ก๊าซ  $O_2$   $CO$  และ  $NO$  รวมถึงสามารถคำนวณค่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของตัวอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้



ภาพที่ 9 Testo 380

ที่มา: <https://www.google.co.th/url?sa=i&url=https%2Fwww.kleinschmidtgmbh.com>

## 2.17 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

### 2.17.1 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

ระยะเวลาคืนทุนได้แก่ ระยะเวลาที่ผลตอบแทนสุทธิจากการดำเนินงานมีค่าเท่ากับค่าลงทุนของโครงการ หลักเกณฑ์นี้พิจารณาจำนวนปีที่จะได้รับผลตอบแทนคุ้มกับเงินลงทุน และใช้กันมากในวงธุรกิจ โดยเฉพาะในการกรณีที่การลงทุนมีความเสี่ยงสูง เช่น กรณีผลิตใหม่หรือใช้วิธีการใหม่ ๆ ที่ไม่มีการคุ้มครองจากสิทธิบัตร (Patent) สิ่งประดิษฐ์คิดได้ใหม่จะถูกขโมยความคิดหรือการลอกเลียนแบบจากคู่แข่งได้ภายในระยะเวลาอันสั้น หลังจากทีผลผลิตใหม่นั้นออกสู่ตลาด หรือในกรณีที่ภาวะการณ์ทางการเมืองมีความไม่แน่นอน ฉะนั้นเพื่อความไม่ประมาท นักลงทุนจึงต้องพิจารณาเลือกโครงการที่ให้ผลตอบแทนคืนเร็วในระยะเวลาสั้น ๆ เช่น ระหว่าง 3 ถึง 5 ปี (ประสิทธิ์ ตงยั้งศิริ, 1999) โดยสมการในการคำนวณระยะเวลาคืนทุนคือ (Mugi and Chandramohan, 2021)

$$\omega = \frac{100 + i_{in}}{100 + i_f} \quad (17)$$

เมื่อ  $i_{in}$  = อัตราดอกเบี้ย (%)

$i_f$  = อัตราเงินเฟ้อ (%)

$$C_{op} = C_{fuel} + C_{material} + C_{chilli} + C_{lab} \quad (18)$$

เมื่อ  $C_{op}$  = ต้นทุนการทำงาน (บาท)

$C_{fuel}$  = ต้นทุนเชื้อเพลิง (บาท)

$C_{material}$  = ต้นทุนวัสดุ/ชีวมวล (บาท)

$C_{chilli}$  = ต้นทุนพริกแดง (บาท)

$C_{lab}$  = ต้นทุนแรงงาน (บาท)

$$C_{annual} = \left[ C_T + \sum_{i=1}^N (C_{main,i} + C_{op,i}) \omega^i \right] \left[ \frac{\omega - 1}{\omega(\omega^N - 1)} \right] \quad (19)$$

เมื่อ  $C_{annual}$  = ต้นทุนต่อปี (บาท)

$C_T$  = ต้นทุนรวม (บาท)

$C_{main,i}$  = ต้นทุนการซ่อมบำรุง (บาท)

$C_{op,i}$  = ต้นทุนการทำงาน (บาท)

$N$  = อายุการใช้งาน (ปี)

$$Z = \frac{C_{annual}}{M_{dry}} \quad (20)$$

เมื่อ  $M_{dry}$  = น้ำหนักวัสดุแห้ง (kg)

$$PBP = \frac{C_T}{\left( (M_{dry}P_d + M_bP_b) \times 12 \right) - \left( (M_fP_f + M_{biomass}P_{biomass}) \times 12 \right) - (M_fP_{dh} + M_{wf}P_{wf}) - C_{annual}}$$

เมื่อ  $M_b$  = น้ำหนักไบโอซาร์ (kg)  
 $M_f$  = น้ำหนักเชื้อเพลิง (kg)  
 $M_{biomass}$  = น้ำหนักชีวมวล (kg)  
 $M_{wf}$  = น้ำหนักสารทำงาน (kg)  
 $P_d$  = ราคาวัสดุ (บาท)  
 $P_b$  = ราคาไบโอซาร์ (บาท)  
 $P_f$  = ราคาเชื้อเพลิง (บาท)  
 $P_{biomass}$  = ราคาชีวมวล (บาท)  
 $P_{dh}$  = ค่าแรงงาน (บาท)  
 $P_{wf}$  = ราคาสารทำงาน (บาท)

### 2.17.2 จุดคุ้มทุน (Breakeven Point)

จุดคุ้มทุน (Breakeven Point) เป็นส่วนหนึ่งของแนวคิดการวิเคราะห์ต้นทุน ปริมาณ กำไร ที่จะต้องดำเนินการเป็นลำดับแรก เนื่องจากการวิเคราะห์ความคุ้มทุนเป็นสิ่งที่มีความเกี่ยวข้องเมื่อองค์กรต่าง ๆ พยายามที่จะทำการประเมินค่าว่าระดับกิจกรรมใด ๆ จะมีผลต่อการเกิดผลกำไรหรือขาดทุนหรือไม่อย่างไร ข้อดีของการทราบถึงจุดคุ้มทุน คือ ทำให้ทราบถึงระดับของการดำเนินงานที่มีความเป็นอิสระจากผลกระทบของปัจจัยบางประการที่จะเข้ามามีอิทธิพลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในพฤติกรรมของผู้บริโภค การเปิดการค้าเสรี เป็น (วิวัฒน์ อภิสวัสดิ์ภิญโญ, 2549)

จุดคุ้มทุน หมายถึง จุดที่รายได้รวม (Total Revenue) เท่ากับต้นทุนรวม (Total Cost) พอดี นั่นคือ กิจกรรมสามารถหารายได้หลังหักค่าใช้จ่ายผันแปรแล้วเท่ากับต้นทุนคงที่ หรืออีกนัยหนึ่งคือกิจกรรมไม่ได้รับผลกำไร และไม่ได้รับผลขาดทุน จากการใช้ทรัพย์สินหรือยอดกำไรเท่ากับศูนย์ โดยสมการในการคำนวณจุดคุ้มทุนคือ (พจน์ พจนพานิชย์กุล)

$$P(x) = FC + V(x) \quad (21)$$

เมื่อ  $P$  = คือราคาขายต่อหน่วย  
 $x$  = คือจำนวนหน่วยที่ผลิตและจำหน่าย  
 $FC$  = คือต้นทุนคงที่รวม  
 $V$  = คือต้นทุนแปรผันต่อหน่วย

## 2.18 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(ภคมน และปฏิพัทธ์, 2019) ได้ทำการศึกษาการพัฒนาระบบการอบแห้งข้าวแต๋น โดยใช้แหล่งความร้อนจากแสงอาทิตย์และชีวมวล ในการทดสอบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวแต๋น ใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite design มีตัวแปรต้นคือ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิโดม ผลการทดลองพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ที่ให้พัลลภหยุดการทำงานคือ 35 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิสำหรับเริ่มจุดเตาคือ 45 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการอบแห้ง 1320 นาที ความชื้นผลิตภัณฑ์คือ 10 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ในการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่า ต้นทุนคงที่ 670,000 บาท และต้นทุนแปรผัน 167 บาท ต่อรอบการผลิตครั้งละ 2,000 กิโลกรัม ซึ่งเครื่องแห้งและสภาวะที่เหมาะสมในการทดสอบนั้นสามารถนำไปใช้ออบแห้งเพื่อผลิตข้าวแต๋นได้อย่างมีคุณภาพ และสามารถลดต้นทุนการผลิตได้

(Manyà et al., 2018) ได้ทำการศึกษาผลของพารามิเตอร์ (อุณหภูมิสูงสุด ความดันและสภาวะไฟโรไลซิส) ในระหว่างการไฟโรไลซิสอย่างช้า ๆ ของชีวมวล 3 ชนิด (ข้าวโพด ถั่วงุ่นและกากมะกอก) โดยผลการวิเคราะห์เชิงสถิติชี้ให้เห็นว่าผลของอุณหภูมิจึงผลกระทบต่อเสถียรภาพของไบโอชาร์สูงสุดและวัตถุดิบชีวมวลเป็นอันดับถัดมา แก๊สที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีความดันเพิ่มสูงขึ้น การไฟโรไลซิสโดยใช้แก๊ส  $CO_2$  (แทน  $N_2$ ) ไม่ได้ส่งผลต่อเสถียรภาพของไบโอชาร์และสภาวะการไฟโรไลซิสอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามเมื่อใช้  $CO_2$  เป็นแก๊สในสภาวะการไฟโรไลซิสสามารถเพิ่ม CO ได้อย่างมีนัยสำคัญ จึงพอสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบชีวมวลในการผลิตไบโอชาร์ก็มีผลกับคุณสมบัติของไบโอชาร์ และการใช้แก๊ส  $CO_2$  สามารถเพิ่มผลผลิตแก๊สได้อย่างมีนัยสำคัญ

(Fudholi et al., 2014) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบสร้างและทดสอบระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการอบแห้งสาหร่ายทะเล ทำการลดความชื้นสาหร่ายทะเลสีแดงที่ความชื้น 90% w.b. เป็น 10% w.b. ในเวลา 15 ชั่วโมง ในการวิเคราะห์สมการการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นจะใช้สมการของเพจซึ่งมีความเหมาะสมที่สุด แบบจำลองของเพจทำให้ค่า  $R^2$  สูงสุด ค่า MBE ต่ำสุด และค่า RMSE ที่มีการแผ่รังสีแสงอาทิตย์เฉลี่ยประมาณ  $500 \text{ W/m}^2$  และอัตราการไหลของอากาศอยู่ที่  $0.05 \text{ กิโลกรัม/วินาที}$  ประสิทธิภาพการอบแห้งของระบบจะอยู่ระหว่างที่ 1-93% โดยเฉลี่ย 30% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าประมาณ 30%

(Amer et al., 2018) ได้ศึกษาการอบแห้งดอกคาโมไมล์ด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงฤดูร้อนปี 2013 ในประเทศเยอรมัน ระบบประกอบด้วยอุปกรณ์เก็บพลังงาน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าเสริมที่อยู่ภายในถังเก็บน้ำ ความจุของห้องอบแห้งหลักสามารถบรรจุดอกคาโมไมล์สดได้ 32-35 กิโลกรัมและ 10-12 กิโลกรัมสำหรับห้องอบแห้งแยกอื่น ๆ ในการ



อบแห้งใช้เวลาประมาณ 30-33 ชั่วโมง เพื่อลดความชื้นของดอกคาโมไมล์ลงจาก 75%w.b. เป็น 6%w.b. เมื่อเทียบกับการตากแดดที่ใช้เวลาถึง 60 ชั่วโมง เพื่อความชื้นลงเหลือ 10% โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 9 แบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพบว่าแบบจำลอง Midili เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดสำหรับระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สรุปได้ว่าการใช้เวลาในการอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมสามารถลดระยะเวลาในการอบแห้งลงได้เมื่อเทียบกับการอบแห้งแบบดั้งเดิมได้อย่างดี

(Yuan et al., 2016) ได้ทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของไบโอชาร์ที่ผลิตจากแกลบและเศษไม้ โดยใช้แก๊สซิฟิเคชันที่มีการติดไฟจากด้านบน โดยใช้อัตราการไหลของอากาศ 4 ช่วง (8 12 16 หรือ 20 ลิตรต่อนาที) และเงื่อนไขในการใช้ฉนวนอยู่สองแบบ (ไม่หุ้มฉนวนและหุ้มฉนวนไฟเบอร์กลาส 88.9 มิลลิเมตร ที่ผนังของแก๊สซิฟิเคชัน) พบว่าอัตราการไหลของอากาศและฉนวนของแก๊สซิฟิเคชันมีผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีของไบโอชาร์ โดยปริมาณคาร์บอนของไบโอชาร์จากแกลบและค่า HHV จะลดลงเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศเพิ่มสูงขึ้น เมื่อแก๊สซิฟิเคชันหุ้มฉนวน ในทางตรงกันข้ามปริมาณคาร์บอนของไบโอชาร์จากเศษไม้เพิ่มขึ้นและค่า HHV คงที่ในสถานะเดียวกัน ซึ่งพื้นที่ผิว BET ของไบโอชาร์จากชีวมวลทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลของอากาศและการหุ้มฉนวน สรุปได้ว่าเมื่อมีอัตราการไหลของอากาศมีผลต่อคุณสมบัติของไบโอชาร์

(Söğüt et al., 2010) ได้ทำการศึกษาการนำความร้อนกลับคืนจากเตาเผาแบบโรตารีในโรงงานปูนซีเมนต์ ประเทศตุรกี โดยทำการวิเคราะห์เอกเซอร์ย์กับข้อมูลการทำงานของโรงงาน พบว่ามีความร้อนเหลือทิ้ง 217.31 GJ คิดเป็น 51% ของความร้อนทั้งหมดของกระบวนการ หลังจากนั้นได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบใหม่ พบว่าสามารถนำความร้อนเหลือทิ้งมาใช้กับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้ 5% ซึ่งระบบนี้คาดว่าจะลดการใช้ถ่านหินและแก๊สธรรมชาติในประเทศได้ 51.55% และ 62.62% ตามลำดับ การปล่อย CO<sub>2</sub> อาจลดลงได้ 5901.94 kg/h และ 1816.90 kg/h เมื่อใช้ความร้อนเหลือทิ้งแทนแก๊สธรรมชาติ

(Ndukwu et al., 2020) ได้ทำการศึกษาการใช้พลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวลผลิตพลังงานอย่างยั่งยืนและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม การควบคุมลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบของสองพลังงานโดยใช้วิธีไพโรไลซิสเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเหลวและแก๊สที่ปลอดภัย ในขณะที่ถ่านชีวภาพที่ถือว่าเป็นผลพลอยได้ พบว่ามีประโยชน์ในการปรับปรุงดิน เทคโนโลยีไพโรไลซิสพลังงานแสงอาทิตย์และชีวมวลรวมแหล่งพลังงานความหนาแน่นต่ำสองแหล่งนี้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงความหนาแน่นพลังงานสูง ประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับแหล่งพลังงานหรือพลวัตของปฏิกิริยาเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับระบบระบายความร้อนจากแสงอาทิตย์และโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์ด้วย

(Mugi and Chandramohan, 2021) ได้ทำการวิเคราะห์พลังงาน เอกซ์เซอีย และเศรษฐศาสตร์ของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอ้อม (ITSD) ดำเนินการอบแห้งภายใต้การพา



ความร้อนแบบธรรมชาติและแบบบังคับ ประสิทธิภาพการสะสมและการทำให้แห้งของเครื่องอบแห้งแบบบังคับ คือ 63.3% และ 10.4% และ 53.84% และ 8.90% ในการพาความร้อนแบบธรรมชาติ อัตราการสกัดความชื้นจำเพาะ (SMER) ของพริกเขียวในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์แบบอ้อม พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.6526 และ 0.5603 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง ภายใต้เงื่อนไขการพาความร้อนแบบบังคับและธรรมชาติ ตามลำดับ ผลของเอกซ์เซอียของตัวเก็บอากาศพลังงานแสงอาทิตย์คือ 3.61-677.84 J/kg และ 6.50-1447.96 J/kg ภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับและธรรมชาติ ตามลำดับ การสูญเสียเอกซ์เซอียของตู้อบแห้งอยู่ในช่วง 0.2-327.76 J/kg และ 0.84-664.63 J/kg ในเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอ้อมภายใต้การพาความร้อนแบบบังคับและธรรมชาติ ตามลำดับ ประสิทธิภาพเอกซ์เซอียของตัวรวบรวมและตู้อบแห้งอยู่ในช่วง 1.91%, 56.12% และ 2.26%, 51.85% สำหรับการพาความร้อนแบบบังคับและการพาความร้อนตามธรรมชาติ ตามลำดับ มีการประเมินตัวบ่งชี้ความยั่งยืนของเอกซ์เซอีย ประสิทธิภาพที่ออกแรงของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอ้อม ได้รับการปรับปรุงด้วยการพาความร้อนแบบบังคับ เมื่อเทียบกับเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบอ้อมการพาความร้อนตามธรรมชาติ การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์และพบว่าระยะเวลาคืนทุนลดลงในการพาความร้อนแบบบังคับเนื่องจากเวลาในการทำให้แห้งลดลง ได้ทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

(Panyoyai et al., 2020) ได้ทำการศึกษากิจการจำลองและการทดลองการนำความร้อนเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ โดยการใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนจากการใช้ชุดท่อภายในเตาเผาข้าววัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการใช้สารทำงานเป็นน้ำ เพื่อใช้ในการทดลองนำความร้อนเหลือทิ้งจากเตาเผาข้าวแลกเปลี่ยนความร้อนกับระบบอบแห้ง อัตราการไหลของสารทำงานแปรผัน 10 – 20 ลิตรต่อนาที ในขณะที่อุณหภูมิของผิวชุดท่อแปรผันจาก  $200 \pm 20$  °C ถึง  $400 \pm 20$  °C ผลการทดลองนำมาตรวจสอบรวมกับการจำลองสถานะ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำลดลงจาก 20 ลิตรต่อนาที ถึง 10 ลิตรต่อนาที ส่งผลให้อุณหภูมิน้ำขาออกสูงขึ้นจาก 52.4 °C ถึง 76.3 °C ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการจำลองสถานะ

(Wongsiriamnuay et al., 2019) ได้ทำการศึกษากระบวนการและวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของถ่านไบโอชาร์จากแกลบ ชังข้าวโพด และเปลือกกล้วยในกระบวนการไพโรไลซิส โดยการศึกษาที่ใช้เตาเผาถ่านไบโอชาร์ขนาด 50 ลิตรสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส กำหนดเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเตาเผาถ่านชีวภาพคือ 3 4 และ 5 กก. ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าผลผลิตเปลือกกล้วยและชังข้าวโพดสูงสุดต่อเชื้อเพลิง 5 กิโลกรัม คือ 49.14% 42.03% และ 38.63% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพพบว่าค่าความร้อนของถ่านไบโอชาร์มีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 4,236 6,235 และ 5,445 Cal/g สำหรับเชื้อเพลิงอัดแท่ง 5 กก. องค์ประกอบของผลผลิต

เปลือกกล้วยเท่ากับ 101.37 101.60 และ 101.48 ppm ตามลำดับ การวิเคราะห์อัตราส่วน C/N ใน  
การผลิตถ่านชีวภาพจากเปลือกกล้วยเท่ากับ 12:1

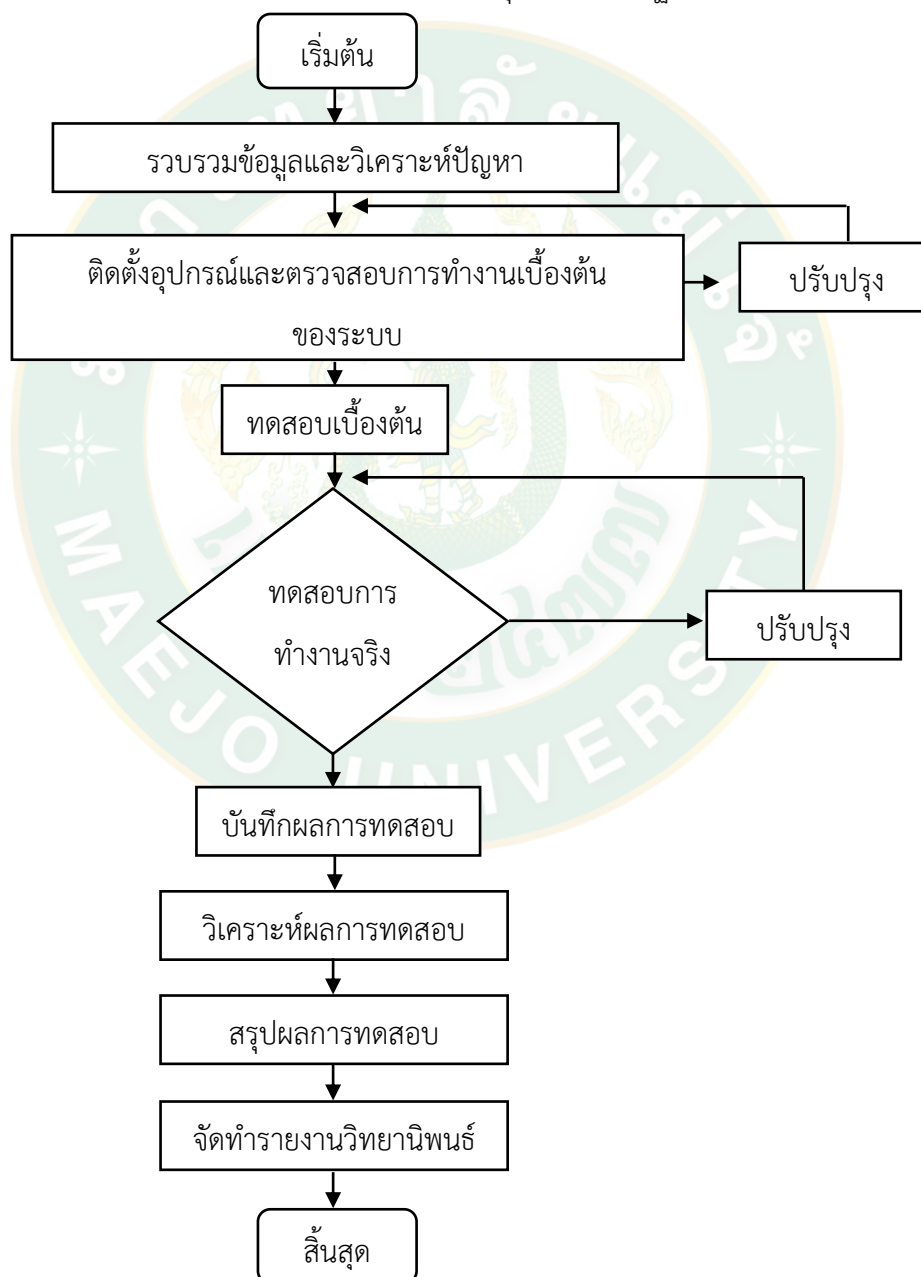


### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เพื่อศึกษา การเลือกใช้อัตราการไหลของน้ำและการนำความร้อนจากกระบวนการผลิตไบโอชาร์จากการแลกเปลี่ยนความร้อนของเตาเผาซ้ำเพื่อประยุกต์ใช้ในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ โดยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบทั้งหมด นำไปคำนวณหาประสิทธิภาพทางความร้อนและเอ็กเซอร์ยีของระบบ รวมถึงการคำนวณหาความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์



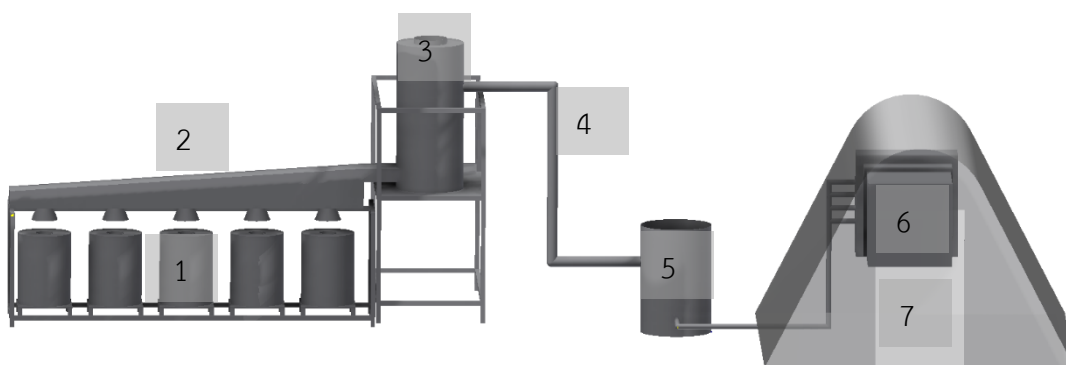
ภาพที่ 10 แผนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.1.1.ควบคุมปริมาณชีวมวลและปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบ
- 1.1.2.ความต่อเนื่อง สภาวะและเวลา 3 ชั่วโมงในการทดสอบ
- 1.1.3.มาตรฐานเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ
- 1.1.4.มาตรฐานโปรแกรมและการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
- 1.1.5.สถานที่ทดสอบ ตึกเรียนรวมคณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

### 3.3 โครงสร้างและการทำงานของระบบ

- 3.3.1 เต้าเผาถ่านชีวภาพแบบเผาซ้ำใช้ในการไพโรไลซิสและโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพทางความร้อนและเอกเซอร์ยีของระบบเต้าเผาถ่านชีวภาพและโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้



ภาพที่ 11 ภาพจำลองโครงสร้างและการทำงานของระบบ

- หมายเลข 1 เต้าเผาถ่านชีวภาพ  
 หมายเลข 2 ปล่องรวบรวมควัน  
 หมายเลข 3 เต้าเผาอากาศซ้ำ  
 หมายเลข 4 ท่อลำเลียงน้ำร้อนของระบบ  
 หมายเลข 5 ถังเก็บน้ำ  
 หมายเลข 6 ชุดแลกเปลี่ยนความร้อน  
 หมายเลข 7 โดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

#### ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมเชื้อเพลิง (ไม้ลำไย) ใ้ส่ถึง 50 ลิตร จำนวน 5 ถัง ๆ ละ 12 กิโลกรัม (สำหรับเต้าไบโอชาร์) และเชื้อเพลิง (ไม้ลำไย) จำนวน 7 กิโลกรัม จำนวน 12 กองสำหรับเต้าเผาซ้ำ (ทั้งหมดนี้ไม่รวมน้ำหนักถัง)
2. เตรียมชีวมวล (แกลบ) ใ้ส่ถึง 50 ลิตรจำนวน 20 ถัง แบ่งใ้ส่เต้าเผาไบโอชาร์ 1 เต้าต่อ 4 ถัง 50 ลิตร

3. ปรับอัตราการไหลน้ำกำหนดที่ 5 LPM ทำการวัดโดยการวัดจริง
4. ปรับความเร็วพัดลมด้วย Inverter ที่ 20 Hz
5. เตรียมน้ำผสมเอทิลีน ไกลคอล (70:30) ที่ถังเก็บน้ำ
6. นำพริกแดงไปวางไว้ในโดมอบแห้งจัดเรียงให้ทั่ว ๆ
7. เก็บค่าแสงอาทิตย์ภายในและภายนอกโดมทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยทำการวัดทั้งหมด 5จุด/ครั้ง
8. เก็บค่าความชื้นพริกทุก ๆ 1 ชั่วโมง โดยทำการสุ่มพริกจากทุกตะแกรง
9. เก็บค่าความชื้น อุณหภูมิ ภายในโดมและอากาศโดยรอบทุก ๆ 1 ชั่วโมง
10. เมื่ออุณหภูมิภายในโดมต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียสให้เริ่มทำการจุดเตาไปโอชาร์และเตาเผาซ้ำ
11. เก็บค่าข้อมูลทุกจุดด้วย Wisco AI210 จำนวน 4 เครื่อง
12. เติมเชื้อเพลิงที่เตาเผาซ้ำทุก ๆ 15 นาที จำนวน 7 กิโลกรัม ทั้งหมด 12 ครั้ง
13. เติมเชื้อเพลิงที่เตาไปโอชาร์ เลี้ยงไฟไม่ให้อุณหภูมิปล่องเตาไปโอชาร์ต่ำกว่า 400 องศา
14. เก็บค่าฝุ่นเตาไปโอชาร์ทั้งหมด 5 เตาและเตาเผาซ้ำทุก ๆ ครั้งชั่วโมง

### 3.4 วัสดุและอุปกรณ์

#### 3.4.1 วัสดุ

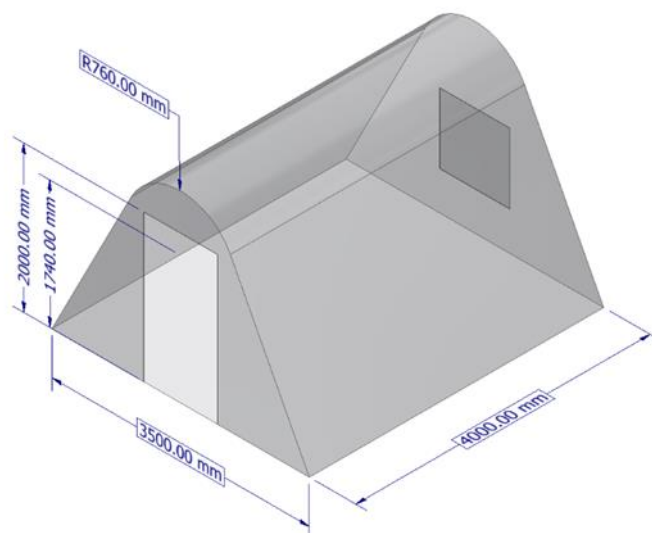
- 3.4.1.1 วัสดุชีวมวลเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ชังข้าวโพด แกลบและเปลือกกล้วย ซึ่งชีวมวลจะต้องมีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 30
- 3.4.1.2 วัสดุเกษตรสำหรับการอบแห้ง ได้แก่ พริกแดงจินดา

#### 3.4.2 อุปกรณ์

- 3.4.2.1 เทอร์โมคัปเปิล (K Type Thermocouple) ช่วงการวัด (-)250.0 – 1300.0 °C ความละเอียด 0.1 °C ความแม่นยำ (%FS) ที่ 25 °C  $\pm$  0.2 % (2.6 °C)
- 3.4.2.2 เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ ยี่ห้อ Wisco analog input module AI 210 ขนาด 8 ช่องสัญญาณ เริ่มการวัดค่าได้ตั้งแต่ 1-18 ชั่วโมง แสดงผลข้อมูลเป็นไฟล์ Microsoft Excel ความละเอียดทศนิยม 1 ตำแหน่ง
- 3.4.2.3 ตู้บลมร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น 30-1060 ควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 10-300 องศาเซลเซียส ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส ตั้งเวลาได้ตั้งแต่ 1นาที่ ถึง 99 วัน
- 3.4.2.4 กระป๋องอูมิเนียมใส่ตัวอย่าง (Moisture Can)
- 3.4.2.5 ปั้มน้ำ ยี่ห้อ Wilo Model DA-43 ทนน้ำร้อน 110 องศาเซลเซียส
- 3.4.2.6 อินเวอร์เตอร์ ยี่ห้อ JADEN รุ่น DLM1 ทำงานได้ในช่วง 0.0-50.0 Hz



- 3.4.2.7 พัดลมอุตสาหกรรม (Industrial Fans) ยี่ห้อ Eurovent Serie AF-36-N3G
- 3.4.2.8 มิเตอร์วัด อัตราการไหล ยี่ห้อ Blue point (read float at top Sp. Gr. 1.0 calibrated with water)
- 3.4.2.9 โดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา ขนาดดังภาพ



ภาพที่ 12 โดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพาราโบลา (Parabolic Drying Dome)

- 3.4.2.10 เครื่องวัดปริมาณฝุ่นและแก๊ส ยี่ห้อ Testo รุ่น 380 สามารถวัดปริมาณของก๊าซไอเสียต่างๆเช่น  $O_2$ ,  $CO_2$ , CO และ NO วัดปริมาณฝุ่นที่มีขนาดได้ตั้งแต่ 2.5-10 ไมครอน ย่านการวัด 0-300 มิลลิกรัมต่อตารางเมตร ทนอุณหภูมิไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส
- 3.4.2.11 เครื่องวัดความเร็วลม ยี่ห้อ DIGICON (Anemometer Model DA-43) ย่านการวัด 0.4-30.0 เมตรต่อวินาที ความละเอียด 0.1 เมตรต่อวินาที ความแม่นยำ  $\pm 2\%$  1 หลัก
- 3.4.3 สารทำงาน
  - 3.4.3.1 น้ำ
  - 3.4.3.2 สารเอทิลีน ไกลคอล (Ethylene Glycol)

### 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

#### ตารางที่ 2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ตัวแปรอิสระ	ตัวแปรตาม	ตัวแปรควบคุม
วัสดุผลิตถ่านชีวภาพ	ประสิทธิภาพทางความร้อนของระบบ	พริกแดงจินดา
- ซังข้าวโพด		
- แกลบ		
- เปลือกลำไย		
อัตราการไหลสารทำงาน	ประสิทธิภาพการนำความร้อนไปใช้ของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์	สารทำงาน น้ำผสมเอทิลีน ไกลคอล (Ethylene Glycol) 70:30
- 2 LPM		
- 5 LPM		
	ประสิทธิภาพการอบแห้ง ปริมาณมลพิษ	ความเร็วลม 20 Hz ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเตาเผาซ้ำ 7 กิโลกรัมต่อครั้ง
	ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ปริมาณถ่านชีวภาพ	พื้นที่สัมผัสความร้อน จำนวนชุดต่อความร้อน วัสดุทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ขนาดโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ชนิดเชื้อเพลิง (ไม้ลำไย) ขนาดท่อน้ำร้อน ปริมาณสารทำงาน 100 L เวลาในการผลิตถ่านชีวภาพ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

#### 4.1 ชนิดของชีวมวลที่เหมาะสมสำหรับการทดลอง

จากการทดลองเบื้องต้นของชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้านความร้อนที่ส่งผลต่อระบบ ในการทดลองจะทดสอบหาปริมาณความชื้นชีวมวลก่อนนำไปทดลองผลิตไบโอชาร์ จะต้องถูกควบคุมให้มีความชื้นต่ำกว่า 15% w.b. เนื่องจากปริมาณความชื้นที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อประสิทธิภาพความร้อนของระบบและปริมาณมลพิษในการทดลอง โดยในการทดสอบหาปริมาณความชื้นชีวมวลจะถูกควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐาน AOAC, (Association of Official Analytical Chemists, 1970) ควบคุมปริมาตรของชีวมวลที่ 200 ลิตรต่อเตาเผาไบโอชาร์ โดยใช้เตาเผาไบโอชาร์เป็นจำนวนทั้งหมด 5 เตา และปริมาณเชื้อเพลิงที่ให้ ความร้อนแก่เตาเผาไบโอชาร์ 12 กิโลกรัม เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าซังข้าวโพดเป็นชีวมวลที่เหมาะสมแก่การทดลองที่สุด เนื่องจากซังข้าวโพดเมื่อได้รับความร้อนและแปลงสภาพเป็นไบโอชาร์ ส่งผลให้มีค่าพลังงานสูงที่สุดที่ 2,330.41 MJ ต่อการทดลอง 1 ครั้ง เปลือกกล้วยเป็นชีวมวลที่เหมาะสมรองลงมาจากเตาเผาจากการทดลอง เนื่องจากได้รับความร้อนและแปลงสภาพเป็นไบโอชาร์มีค่าพลังงานที่ 2147.12 MJ ต่อการทดลอง 1 ครั้ง และอันดับสุดท้ายที่เหมาะสมสำหรับการทดลองคือ แกลบ เนื่องจากไบโอชาร์จากแกลบมีค่าพลังงานที่ 1254.11 MJ ต่อการทดลอง 1 ครั้ง ซึ่งมีค่าต่ำที่สุด ค่าความร้อนจำเพาะของไบโอชาร์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพความร้อนของระบบ โดยที่ประสิทธิภาพความร้อนของระบบจากชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ซังข้าวโพด เปลือกกล้วย และแกลบ ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาทีคือ 58.09% 54.28% และ 41.29% ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ซังข้าวโพด เป็นชีวมวลที่เหมาะสมแก่การทดลองที่สุดเมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านพลังงานของระบบ “ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ(Panyoyai, 2021) ได้ทำการทดลองโดยใช้ชีวมวล คือ ซังข้าวโพด ในการทดลองผลิตไบโอชาร์ ได้พลังงานขาออกสูงสุดที่ 2444.99 MJ”

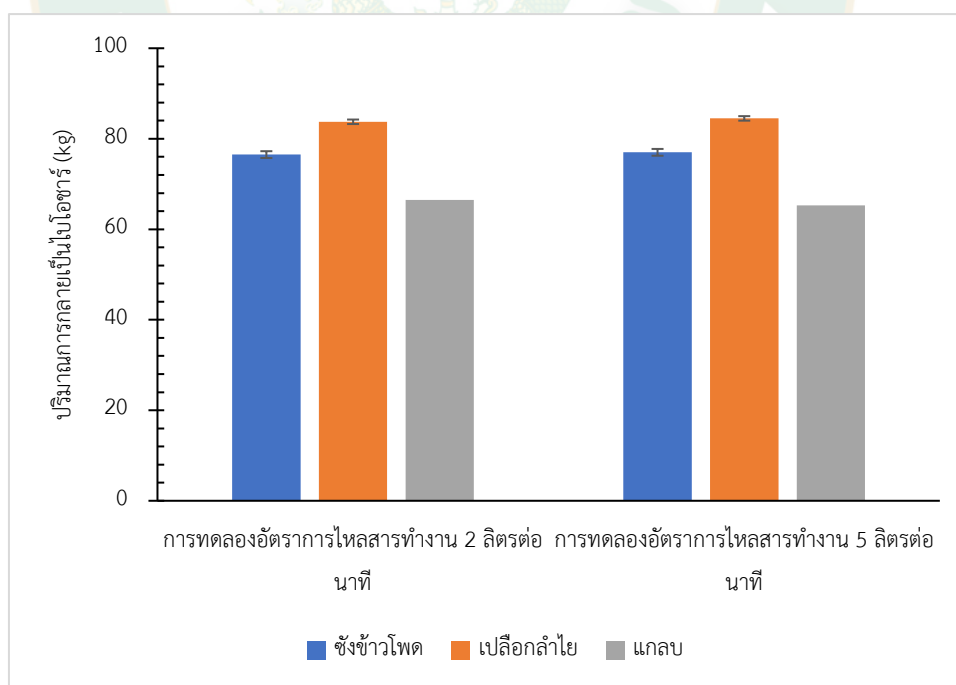
#### 4.2 อัตราการไหลสารทำงานที่เหมาะสมสำหรับระบบการอบแห้งไฮบริด

จากการทดลองเบื้องต้นที่อัตราการไหลของสารทำงาน 2 ระดับ ได้แก่ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพความร้อน พบว่า การแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานและอุณหภูมิภายในของเตาเผาเข้าไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาเผาเข้าไปให้มีค่ามากกว่า 300 องศาเซลเซียสขึ้นไป ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนความร้อนของสารทำงานทำได้ดี โดยผลจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิของสารทำงานขาออกทำได้สูงสุดที่ 105.7 องศาเซลเซียส ในการทดลองอัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการทดลองอัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ที่ทำอุณหภูมิสูงได้ที่ 104.2 องศาเซลเซียส เนื่องจากความสามารถของสารทำงานในการ

ทดลองนี้ ซึ่งประกอบด้วย เอทิลีนไกลคอล 70% และน้ำ 30% มีจุดเดือดสูงสุดที่ 118 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการให้ความร้อนแก่เตาเผาซ้ำ ที่กำหนดไว้ 3 ชั่วโมงต่อการทดลอง เมื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพด้านความร้อน พบว่า การทดลองที่อัตราการไหล 5 ลิตรต่อนาที ให้พลังงานความร้อนในการแลกเปลี่ยนความร้อนที่เตาเผาซ้ำได้สูงกว่าการทดลองที่อัตราการไหล 2 ลิตรต่อนาที ที่ 24.04 kW ต่อการทดลอง 1 ครั้ง และ 8.88 kW ต่อการทดลอง 1 ครั้ง ตามลำดับ “ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ(Panyoyai, 2021) ที่ได้ทำการทดลองอัตราการไหลของน้ำที่ 5 และ 10 ลิตรต่อนาที พบว่า อัตราการไหลของน้ำที่ 5 ลิตรต่อนาที ทำให้อุณหภูมิของน้ำขาออกสูงสุดที่ 86.2 องศาเซลเซียส”

#### 4.3 ปริมาณการกลายเป็นไอโอซาร์

การทดลองหาประสิทธิภาพความร้อนในกระบวนการผลิตไอโอซาร์ โดยการใช้เตาเผาไอโอซาร์ ขนาด 200 ลิตร จำนวน 5 เตา โดยทำการวัดอุณหภูมิเตาเผาไอโอซาร์ 2 จุด คือ อุณหภูมิบริเวณเปลวไฟและอุณหภูมิภายในเตาเผาไอโอซาร์ รวมถึงปริมาณไอโอซาร์ เพื่อนำไปคำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในการทดลอง โดยอุณหภูมิเตาเผาไอโอซาร์ที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตไอโอซาร์ที่มีคุณภาพอยู่ในช่วง 500-600 องศาเซลเซียส และไม่เกิน 800 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Intagun et al., 2018) มากไปกว่านี้ อุณหภูมิในการผลิตไอโอซาร์ยังส่งผลต่อปริมาณการกลายเป็นไอโอซาร์อีกด้วย



ภาพที่ 13 ปริมาณการกลายเป็นไอโอซาร์

จากภาพที่ 13 ในการทดลองเตาเผาไบโอชาร์ขนาด 200 ลิตร จำนวน 5 เตา จากชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพด ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ระดับคือ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที พบว่าปริมาณการกลายเป็นไบโอชาร์ คือ 84.50 กิโลกรัม 65.25 กิโลกรัม และ 77.00 กิโลกรัม และ 83.75 กิโลกรัม 66.5 กิโลกรัม และ 76.5 กิโลกรัม ตามลำดับ พบว่าปริมาณไบโอชาร์มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Zhu et al., 2019) จากกราฟสามารถกล่าวได้ว่าชนิดของชีวมวลที่นำมาผลิตไบโอชาร์มีผลต่อการกลายเป็นไบโอชาร์ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานทั้ง 2 ระดับ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีและกายภาพของชีวมวลแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Wongsiriamnuay et al., 2019) รวมถึงปริมาณของชีวมวลที่ใช้ในการทดลองที่มีความแตกต่างกันส่งผลให้ปริมาณการกลายเป็นไบโอชาร์จึงมีความแตกต่าง เนื่องจากรูปร่างของชีวมวลแต่ละชนิดไม่เหมือนกันส่งผลให้การบรรจุลงเตาเผาไบโอชาร์มีข้อจำกัด

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการกลายเป็นไบโอชาร์

การเปรียบเทียบการกลายเป็นไบโอชาร์		
ชนิดชีวมวล	อัตราการไหลสารทำงาน 2	อัตราการไหลสารทำงาน 5
	ลิตรต่อนาที	ลิตรต่อนาที
เปลือกกล้วย	83.75±0.75	84.50±0.50
ซังข้าวโพด	76.5±1.00	77.00±1.00
แกลบ	66.5±0.5	65.25±2.75

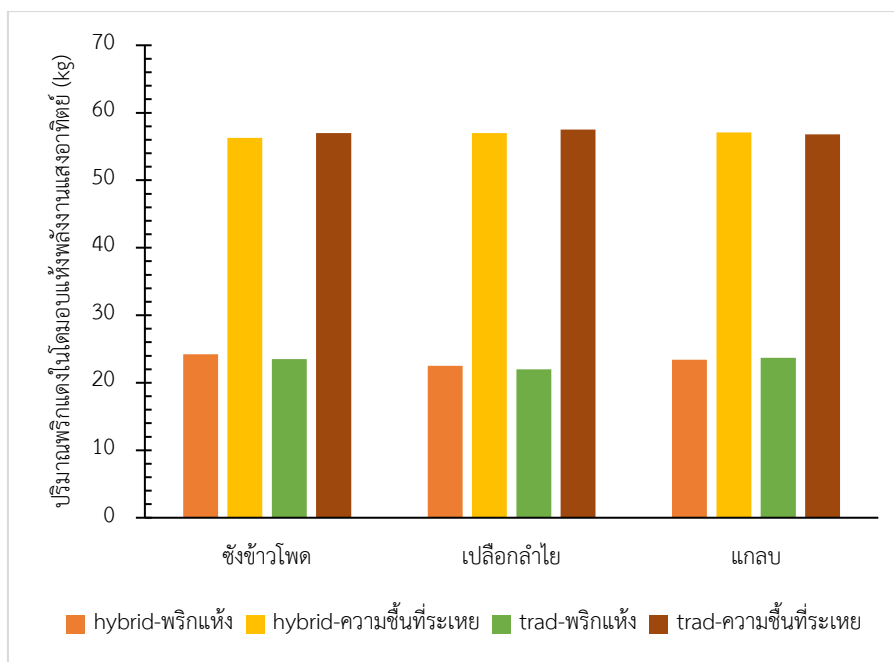
จากตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการกลายเป็นไบโอชาร์ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 2 ระดับคือ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที พบว่าปริมาณการกลายเป็นไบโอชาร์ไม่มีความสอดคล้องกับอัตราการไหลสารทำงานที่เปลี่ยนไป เนื่องจากอัตราการไหลสารทำงานไม่ได้มีผลกระทบกับการกลายเป็นไบโอชาร์

#### 4.4 ปริมาณฟริกแห้งจากการทดลองอบแห้งในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการผลิตไบโอชาร์

##### ไบโอชาร์เปรียบเทียบกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม

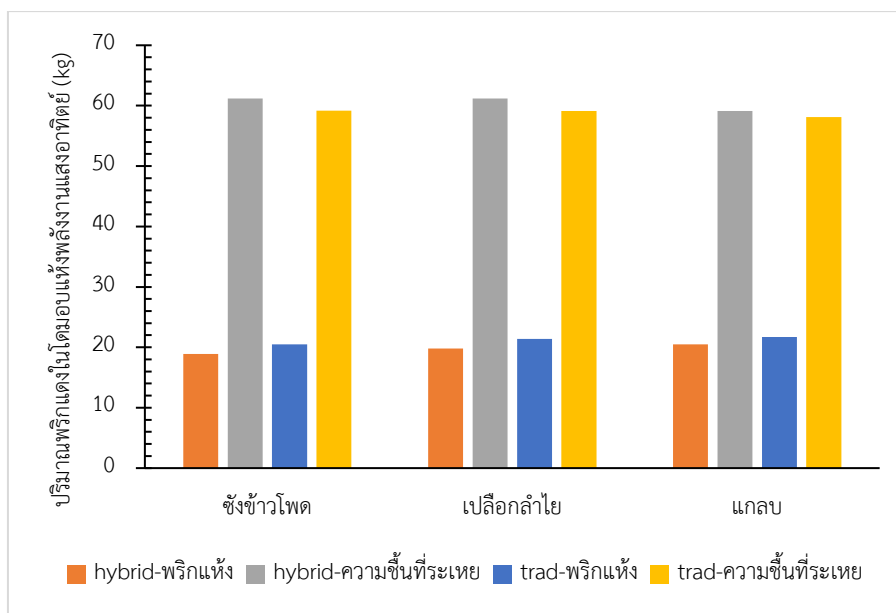
จากการทดลองกระบวนการผลิตไบโอชาร์เพื่อนำความร้อนเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ในการอบแห้ง โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ การใช้ความร้อนเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอชาร์มาเพิ่มความร้อนให้แก่กระบวนการอบแห้ง และการอบแห้งในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม โดยทำการทดลองผลิตไบโอชาร์โดยใช้ชีวมวลทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพด และอัตราการไหลสารทำงาน 2 ระดับคือ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที ในการทดลองนี้จะควบคุมน้ำหนักเริ่มต้นของฟริกแดงจินดาที่ 80 กิโลกรัม และหยุดกระบวนการอบแห้งต่อเมื่อความชื้นภายในฟริกแดงจินดา มีค่าต่ำกว่า 10% w.b.





ภาพที่ 14 ปริมาณพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

จากภาพที่ 14 แสดงปริมาณพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที พบว่าน้ำหนักพริกแดงแห้งและปริมาณความชื้นที่ระเหย ของเปลือกลำไย คือ 22.5 กิโลกรัม และ 57 กิโลกรัม ตามลำดับ แกลบ คือ 23.4 กิโลกรัม และ 57.1 กิโลกรัม ตามลำดับ และชั่งข้าวโพด คือ 24.2 กิโลกรัม และ 56.3 กิโลกรัม ตามลำดับ โดมอบแห้งแบบดั้งเดิมพบว่ามีปริมาณพริกแดงแห้งและปริมาณความชื้นที่ระเหย ในการทดลองเทียบกับการผลิตไบโอชาร์จากเปลือกลำไยคือ 22 กิโลกรัม 57.5 กิโลกรัม แกลบคือ 23.7 กิโลกรัม 56.8 กิโลกรัม และชั่งข้าวโพดคือ 23.5 กิโลกรัม 57 กิโลกรัม ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าปริมาณพริกแดงแห้งที่ได้รับหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งของทั้ง 2 การทดลองนั้นไม่มีความแตกต่างกัน แต่จะเห็นได้ว่าปริมาณความชื้นที่ระเหยออกมามีปริมาณสูง เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นวัสดุทางการเกษตรสดมีปริมาณความชื้นสูง จึงระเหยของเหลวออกมาเป็นจำนวนมากด้วยการถ่ายเทความร้อนจากพลังงานความร้อนภายในโดมอบแห้งกับพริกแดง และถ่ายเทมวลจากภายในพริกแดงสู่ผิวและระเหยออกไป



ภาพที่ 15 ปริมาณพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที่

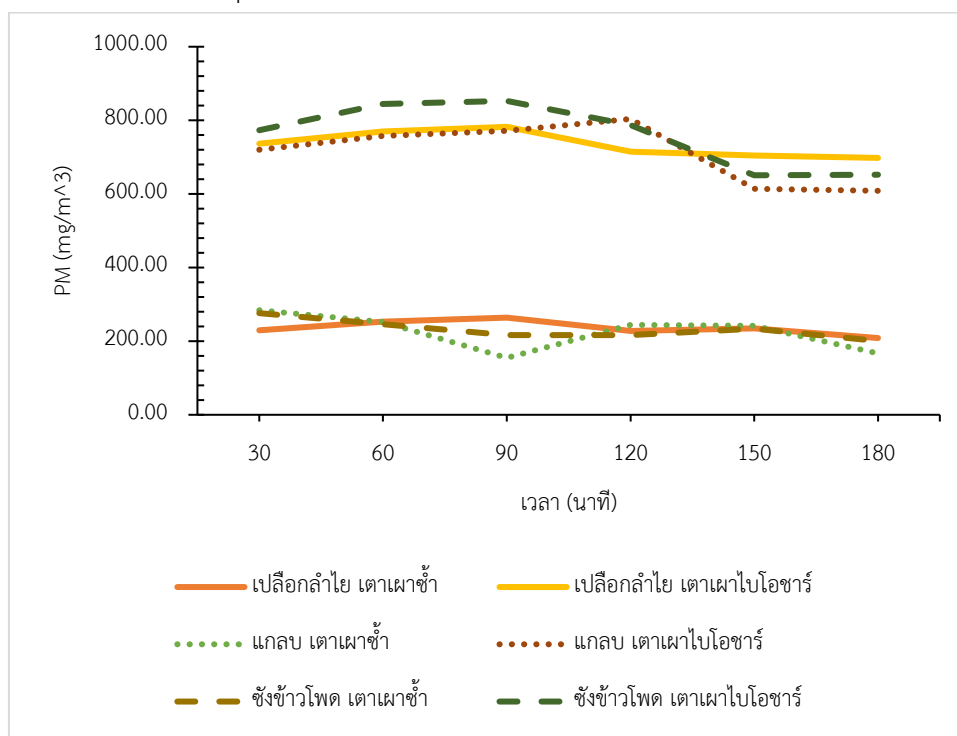
จากภาพที่ 15 แสดงปริมาณพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที่ พบว่าน้ำหนักพริกแดงแห้งและปริมาณความชื้นที่ระเหย ของเปลือกลำไย คือ 19.8 กิโลกรัม และ 61.2 กิโลกรัม ตามลำดับ กล้วย คือ 20.5 กิโลกรัม และ 59.1 กิโลกรัม ตามลำดับ และชั่งข้าวโพด คือ 18.9 กิโลกรัม และ 61.2 กิโลกรัม ตามลำดับ โดมอบแห้งแบบตั้งพบว่ามีปริมาณพริกแดงแห้งและปริมาณความชื้นที่ระเหยในการทดลองเทียบกับการผลิตไบโอชาร์จากเปลือกลำไยคือ 20.50 กิโลกรัม 59.20 กิโลกรัม กล้วย คือ 21.40 กิโลกรัม และชั่งข้าวโพดคือ 18.90 กิโลกรัม 21.70 กิโลกรัม 58.10 กิโลกรัม ตามลำดับ

#### 4.5 ปริมาณมลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอชาร์

ในการทดลองการผลิตไบโอชาร์เพื่อนำความร้อนเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอชาร์ไปใช้ในกระบวนการอบแห้งนั้น จะต้องคำนึงถึงปริมาณฝุ่นและแก๊สจากกระบวนการผลิตไบโอชาร์ ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีการวัดค่าและเก็บผลการทดลองของปริมาณฝุ่นและแก๊ส โดยในขั้นตอนการวัดค่าจะกระทำโดยการใช้เครื่องมือวัด ฝุ่นและแก๊ส ยี่ห้อ TESTO รุ่น 380 ในการทดลองจะกำหนดการวัดค่าทุก ๆ 30 นาที จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เป็นเวลาทั้งหมด 3 ชั่วโมง แต่เนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือวัดที่มีความสามารถทนความร้อนได้สูงสุด 500 องศาเซลเซียสและไม่ควรถูกความร้อนจากเปลวไฟโดยตรง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายต่อเครื่องมือวัด ในการทดลองนี้ต้องคำนึงถึงระยะเวลาในการเติมเชื้อเพลิงและระยะเวลาในการวัดที่เหมาะสม เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับ

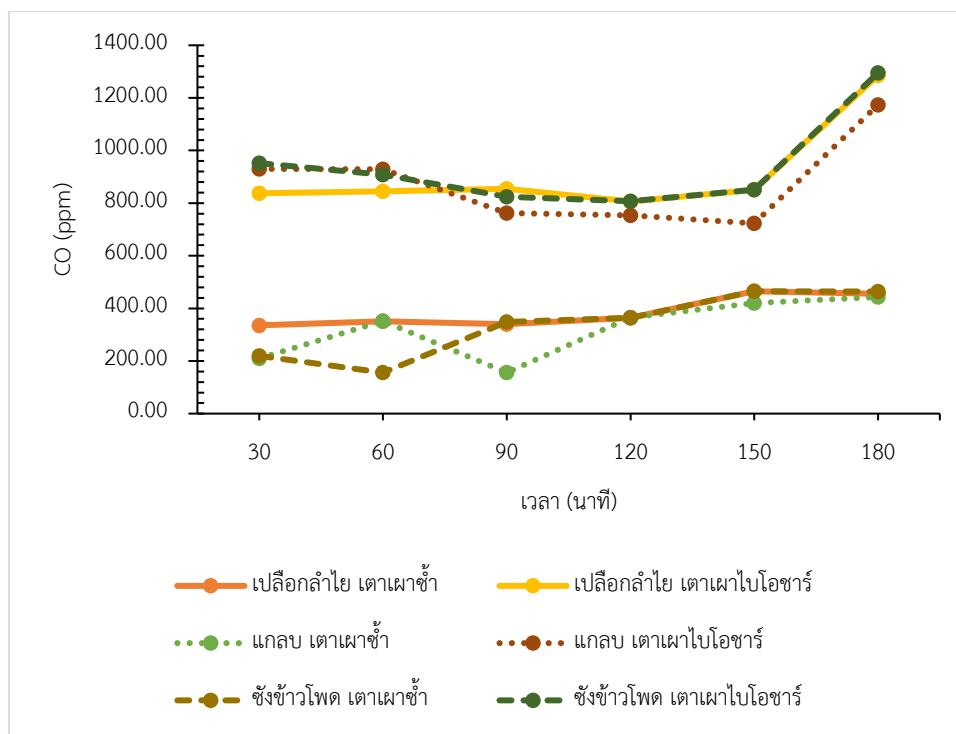
เครื่อง ดังนั้นการวัดค่าฝุ่นและแก๊สที่ระยะเวลา 30 นาที ถือเป็นเวลาที่เหมาะสม โดยการทดลองนี้จะแบ่งการวัดค่าฝุ่นและแก๊สจากการทดลองชีวมวล 3 ชนิดที่เตาเผาไบโอชาร์เทียบกับเตาเผาชำ

#### 4.5.1 การทดลองวัดค่าฝุ่นและแก๊ส



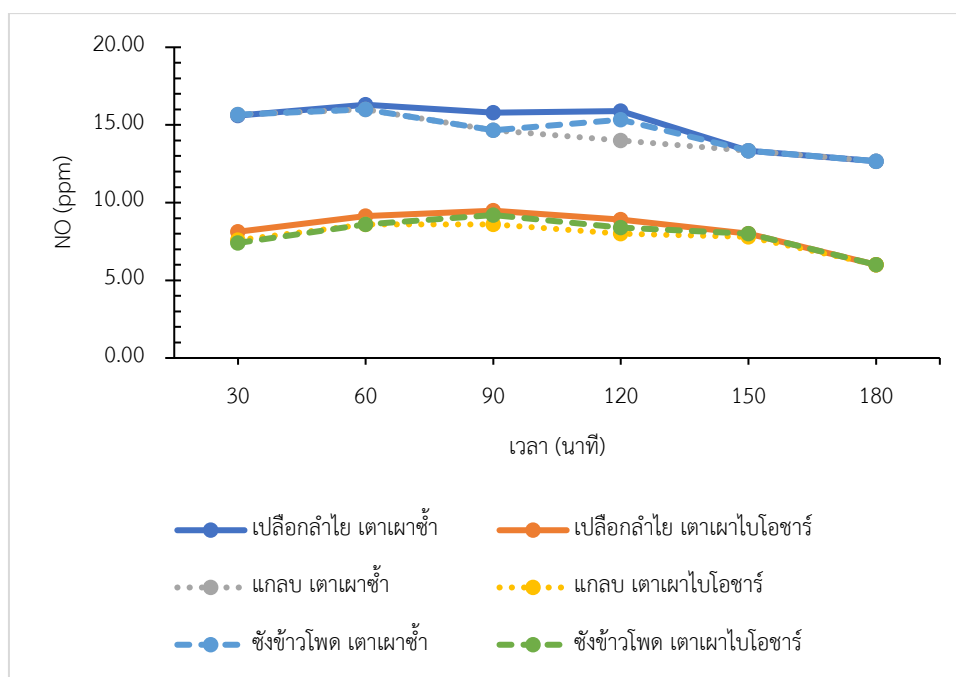
ภาพที่ 16 ปริมาณฝุ่นละอองในระบบการผลิตไบโอชาร์

จากภาพที่ 16 แสดงถึงปริมาณฝุ่นละอองที่เกิดจากเตาเผาไบโอชาร์และเตาเผาชำ ในการทดลองชีวมวลเปลือกลำไย แกลบ และชังข้าวโพด โดยอนุมานว่าค่าฝุ่นละอองที่วัดค่าได้ส่วนใหญ่ประกอบด้วย CO เพื่อให้วิเคราะห์ค่าเปรียบเทียบตามมาตรฐานที่กำหนด พบว่าค่าฝุ่นละอองเฉลี่ยที่วัดค่าได้จากเตาเผาชำมีปริมาณลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับค่าฝุ่นละอองเฉลี่ยที่วัดได้จากเตาเผาไบโอชาร์ในทุก ๆ ช่วงเวลาของการทดลอง เนื่องจากฝุ่นละอองได้ถูกเผาซ้ำอีกครั้ง โดยอนุภาคของฝุ่นละอองจะแตกตัวและถูกความร้อนเผาทำลาย เพื่อเป็นการลดมลพิษที่จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตไบโอชาร์ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Panyoyai, 2021) ซึ่งเป็นไปตามค่ามาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่กำหนดไว้ไม่เกิน  $320 \text{ mg/m}^3$  (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560)



ภาพที่ 17 ปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในระบบการผลิตใบโศหารจากการทดลองชีวมวลเปลือกลำไย

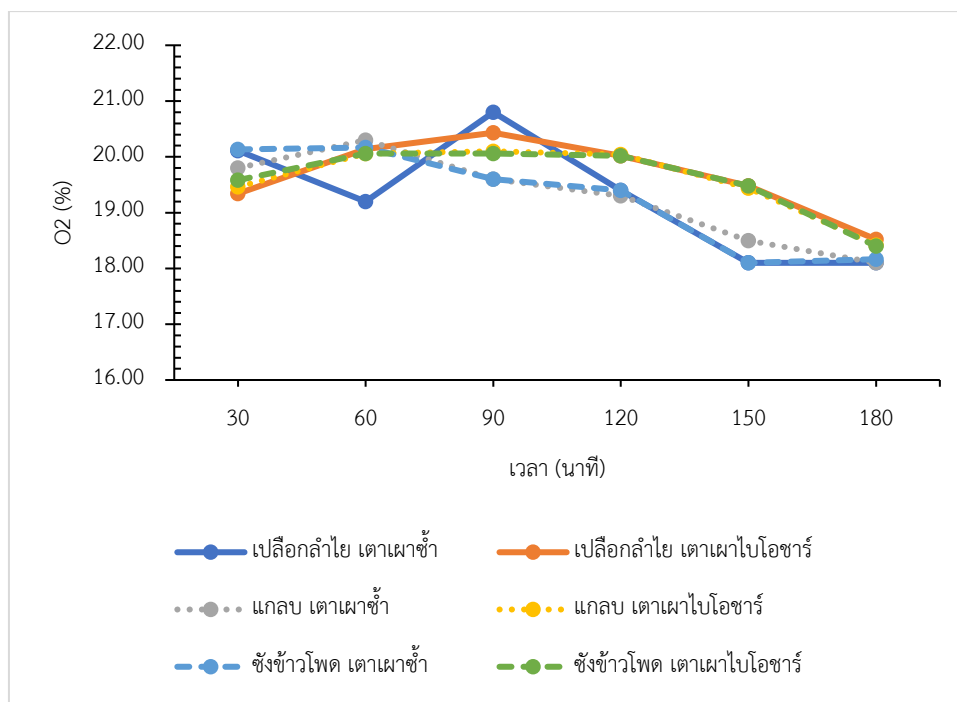
จากภาพที่ 17 แสดงถึงปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่เกิดจากระบวนการผลิตใบโศหารในการทดลองชีวมวลเปลือกลำไย แกลบ และชั่งข้าวโพด พบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ในเต้าเหาะข้าสามารถลดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับที่เต้าเหาะใบโศหาร เนื่องจากคาร์บอนมอนอกไซด์ถูกเผาซ้ำอีกครั้งเพื่อเป็นการลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ที่จะปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจากระบบการผลิตใบโศหาร ซึ่งเป็นไปตามค่ามาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่กำหนดไว้ไม่เกิน 690 ppm (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Panyoyai, 2021)



ภาพที่ 18 ปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ในระบบการผลิตไบโอชาร์จากการทดลองชีวมวลเปลือกกล้วย

จากภาพที่ 18 แสดงถึงปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ที่เกิดจากระบวนการผลิตไบโอชาร์ ในการทดลองชีวมวลเปลือกกล้วย แกลบ และชั่งข้าวโพด พบว่าในเต้าเหาะซ่าและเต้าเหาะใบโอชาร์สามารถปล่อยปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ออกมาได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อมที่กำหนดไว้ 200 ppm (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2560) และพบว่าปริมาณแก๊สไนโตรเจนมอนอกไซด์ในเต้าเหาะซ่ามีปริมาณที่สูงกว่าที่เต้าเหาะใบโอชาร์ เนื่องจากปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อนของเต้าเหาะซ่ามีปริมาณที่ค่อนข้างสูงกว่าเต้าเหาะใบโอชาร์



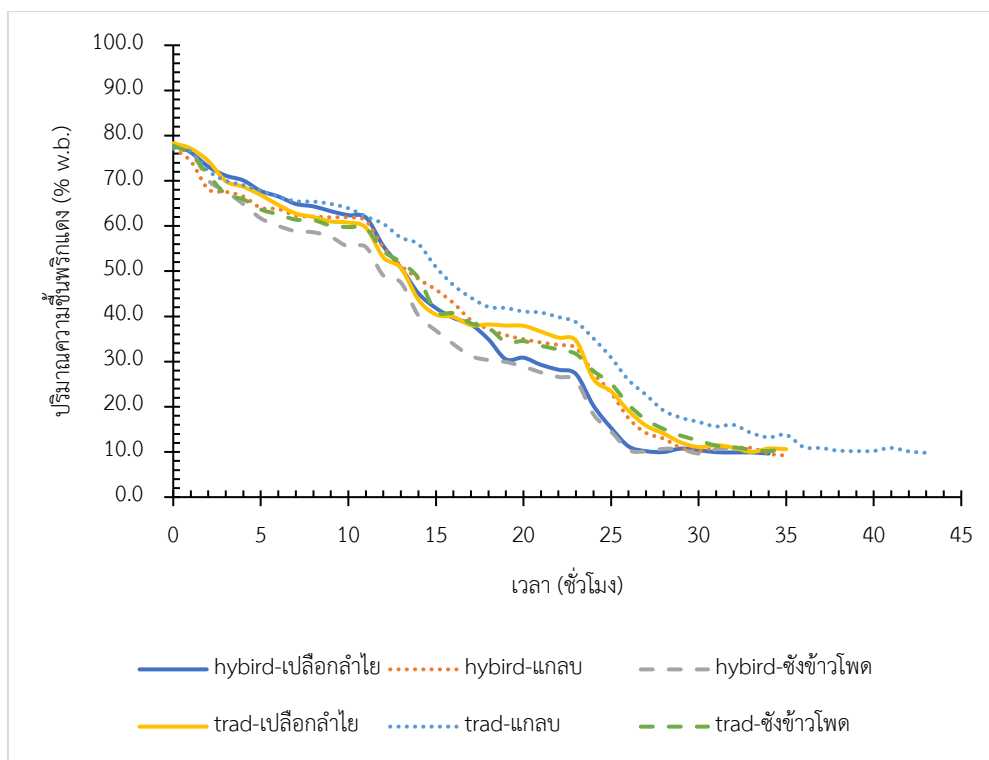


ภาพที่ 19 ปริมาณแก๊สออกซิเจนในระบบการผลิตไบโอชาร์จากการทดลองชีวมวลเปลือกกล้วย

จากภาพที่ 19 แสดงถึงปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เกิดจากกระบวนการผลิตไบโอชาร์ ในการทดลองชีวมวลเปลือกกล้วย แกลบ และชั่งข้าวโพด ในเต้าเหาะใบโอชาร์และเต้าเหาะซ่า พบว่าปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เกิดขึ้นในเต้าเหาะซ่าและเต้าเหาะใบโอชาร์มีปริมาณออกซิเจนที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน ในทุกช่วงเวลาตลอดการทดลอง เนื่องจากในชีวมวลมีออกซิเจนประกอบอยู่ภายในโครงสร้าง ซึ่งจะถูกปล่อยออกมาเมื่อชีวมวลเกิดการเผาไหม้ นอกจากนี้การเผาไหม้ชีวมวลยังส่งผลต่อกระบวนการฟอสฟอรัส (photosynthesis) ของพืชทำให้มีการปลดปล่อยแก๊สออกซิเจนอีกด้วย

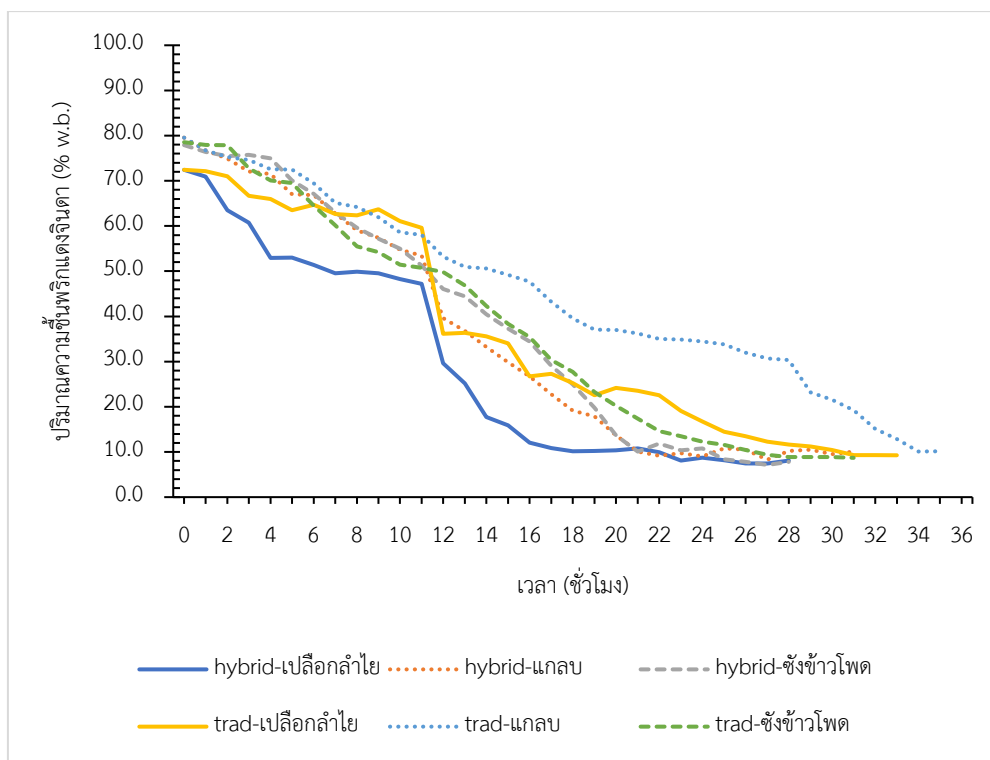
#### 4.6 ปริมาณความชื้นพริกแดงจินดาและอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

จากการทดลองหาประสิทธิภาพทางความร้อนร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ได้เลือกใช้วัสดุในการอบแห้ง คือ พริกแดงจินดา ในการทดลองจะกำหนดน้ำหนักพริกแดงจินดาเริ่มต้นที่ 80 กิโลกรัม และจะหยุดกระบวนการอบแห้งต่อเมื่อความชื้นของพริกแดงจินดามีค่าต่ำกว่า 10% w.b. ในขั้นตอนการวัดค่าความชื้นจะทำการสุ่มหยิบพริกแดงจินดาเป็นจำนวน 10 จุด ปริมาณ 10 กรัมและการวิเคราะห์จะถูกกำหนดให้ทำตามมาตรฐาน AOAC, (Association of Official Analytical Chemists, 1970) มีการวัดค่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และบันทึกข้อมูลทุก ๆ ชั่วโมงด้วยเครื่องมือวัดค่าอุณหภูมิแบบดิจิตอล



ภาพที่ 20 แสดงปริมาณความชื้นลดลงของพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการใช้ผลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที่

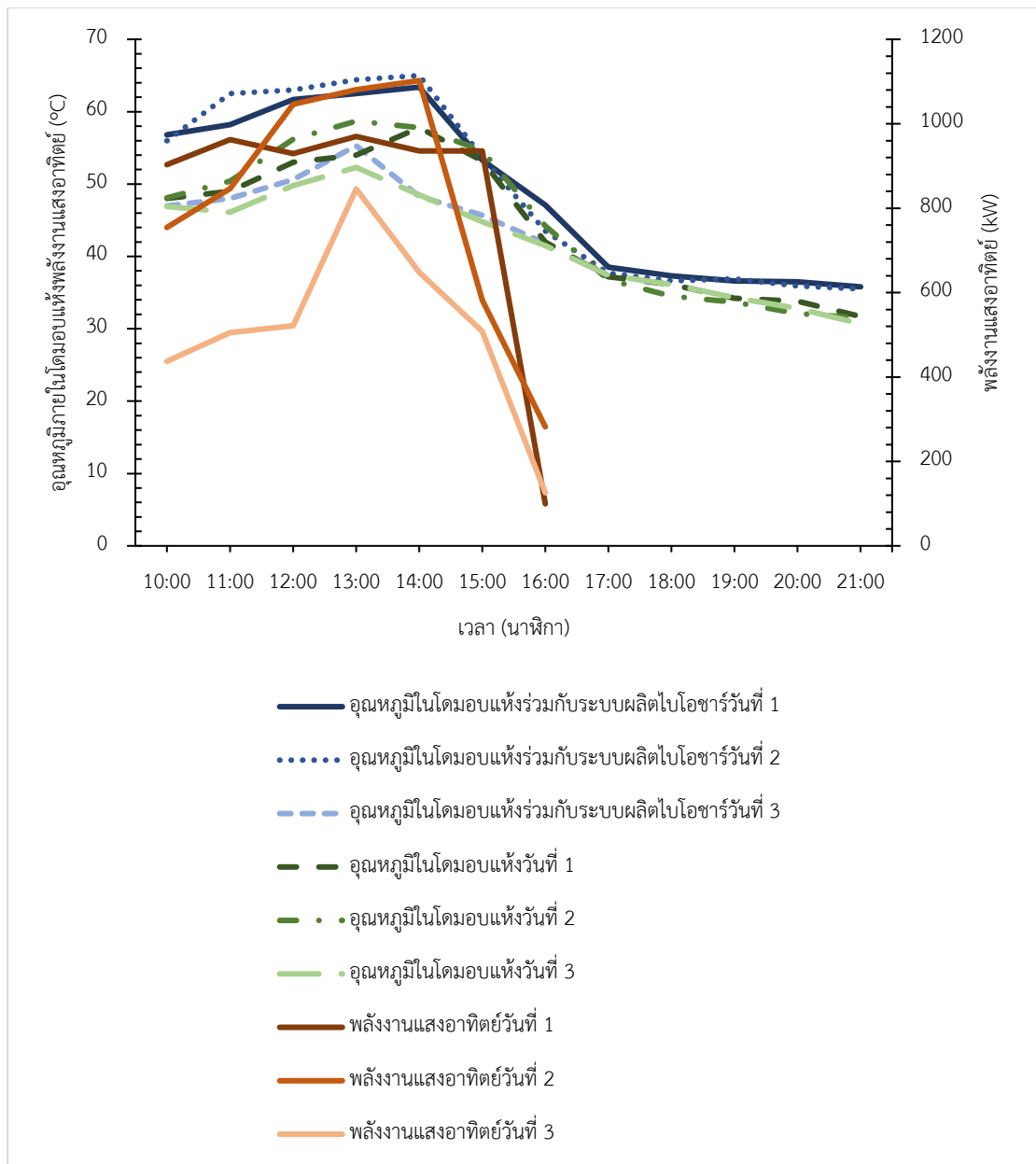
จากภาพที่ 20 การทดลองอบแห้งพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพด ในการทดลองอัตราการใช้ผลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที่ เทียบกับการอบแห้งพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม พบว่า ปริมาณความชื้นพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์สามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าโดยใช้เวลาในการอบแห้งในการทดลองผลิตไบโอชาร์จากเปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพดคือ 27 29 และ 26 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมสามารถลดความชื้นได้ที่ 10% w.b. โดยใช้เวลาคือ 31 43 และ 31 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยความชื้นพริกแดงจินดาจะลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นในทั้ง 2 การทดลองและมีปริมาณความชื้นลดลงต่ำกว่า 10% w.b. (Mugi and Chandramohan, 2021) ปริมาณความชื้นในช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเป็นการระเหยความชื้นที่บริเวณผิวนอกของวัสดุ และเมื่อถึงจุดหนึ่งปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากปริมาณความชื้นในพริกแดงระเหยออกมาจนเกือบหมดเหลือเพียงมวลของพริกแดง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Numpon Panyoyai, 2012; Panyoyai et al., 2016; ฉัตร ผลนาค et al., 2010)



ภาพที่ 21 แสดงปริมาณความชื้นลดลงของพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการใช้ผลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที่

จากภาพที่ 21 การทดลองอบแห้งพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพด ในการทดลองอัตราการใช้ผลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที่ เทียบกับการอบแห้งพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิม พบว่า ปริมาณความชื้นพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์สามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าโดยใช้เวลาในการอบแห้งในการทดลองผลิตไบโอชาร์จากเปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพดคือ 17 22 และ 20 ชั่วโมง ตามลำดับ ระยะเวลาในการอบแห้งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ภคมน ปินตานา and ปฏิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ, 2019) ซึ่งในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมสามารถลดความชื้นได้ที่ 10% w.b. โดยใช้เวลาคือ 30 34 และ 26 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยความชื้นพริกแดงจินดาจะลดลงเรื่อย ๆ ตามเวลาที่เพิ่มขึ้นและมีปริมาณความชื้นลดลงต่ำกว่า 10% w.b. (Mugi and Chandramohan, 2021) ปริมาณความชื้นในช่วงแรกจะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการระเหยความชื้นที่บริเวณผิวนอกของวัสดุ และเมื่อถึงจุดหนึ่งปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างช้า ๆ เนื่องจากปริมาณความชื้นในพริกแดงระเหยออกมาจนเกือบหมดเหลือเพียงมวลของพริกแดง ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Numpon Panyoyai, 2012; Panyoyai et al., 2016; ฉัตร ผลนาค et al., 2010)

จากข้อมูลการทดลองในการทดลองอบแห้งพริกแดงจินดาในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมใช้เวลาที่ยาวนานกว่าการอบแห้งร่วมกับการผลิตไบโอชาร์ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานทั้ง 2 ระดับ เนื่องจากในช่วงเวลาที่แสงแดดหมดไปโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมไม่สามารถอบแห้งได้ แต่โดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับการผลิตไบโอชาร์ยังได้รับความร้อนจากกระบวนการผลิตไบโอชาร์หลังจากแสงแดดหมดไปอีกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ได้

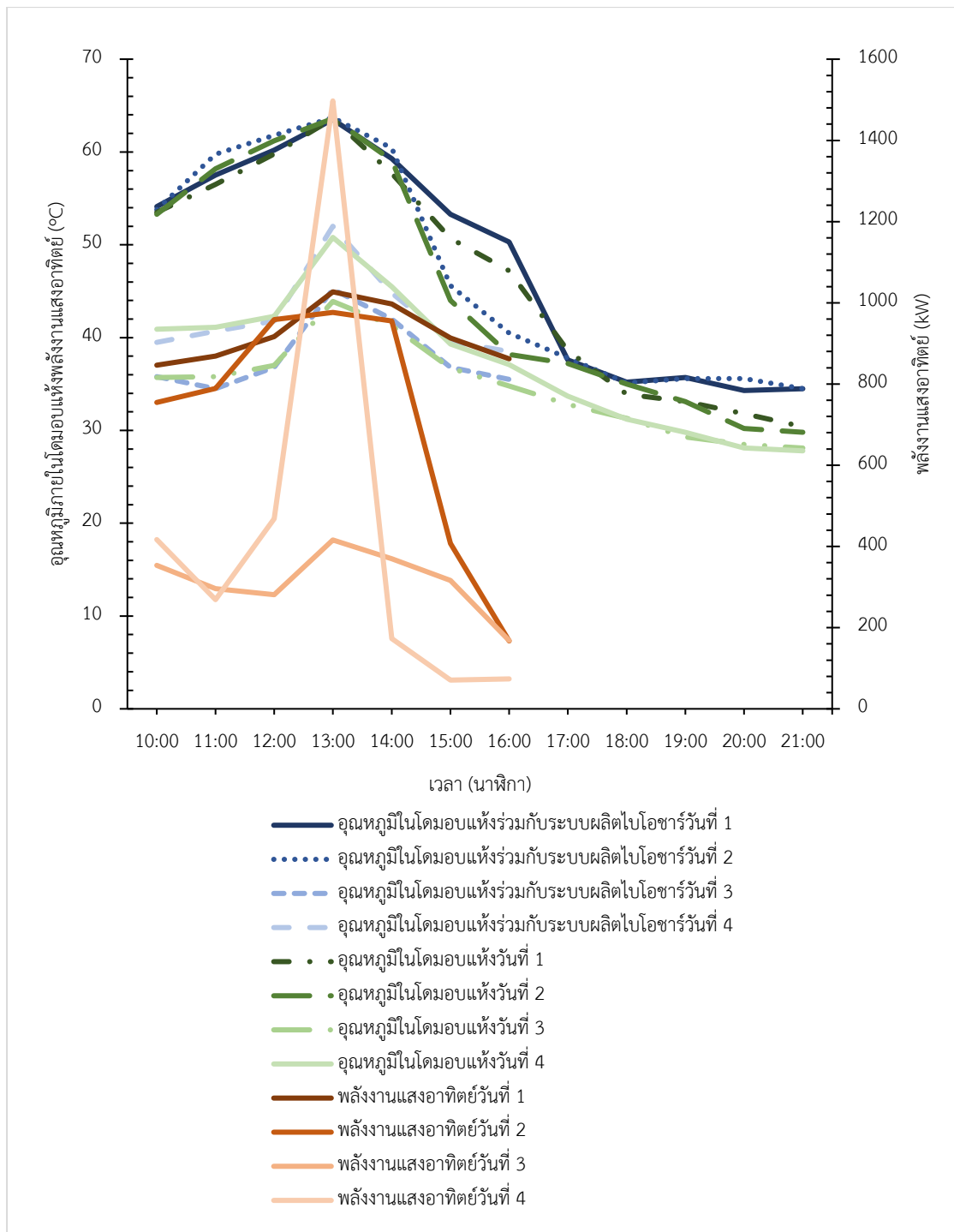


ภาพที่ 22 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลเปลือกลำไยของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

จากภาพที่ 22 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลจากเปลือกลำไย ในการทดลองอัตรากรไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะสอดคล้องกับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวได้ว่าเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์มีความเข้มข้นสูงอุณหภูมิภายในโดมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 13:00 – 14:00 น. และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรคือ 60-70 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดลองนี้สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดที่ได้ 65.00 องศาเซลเซียส และเมื่อเริ่มการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยเปลือกลำไยสูงกว่าโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมถึง 4.10 องศาเซลเซียส ที่เวลา 21:00 น. พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Songchai Pankaew, 2021) (Pankaew et al., 2020) ที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิกากาศได้ 4-6 องศาเซลเซียส



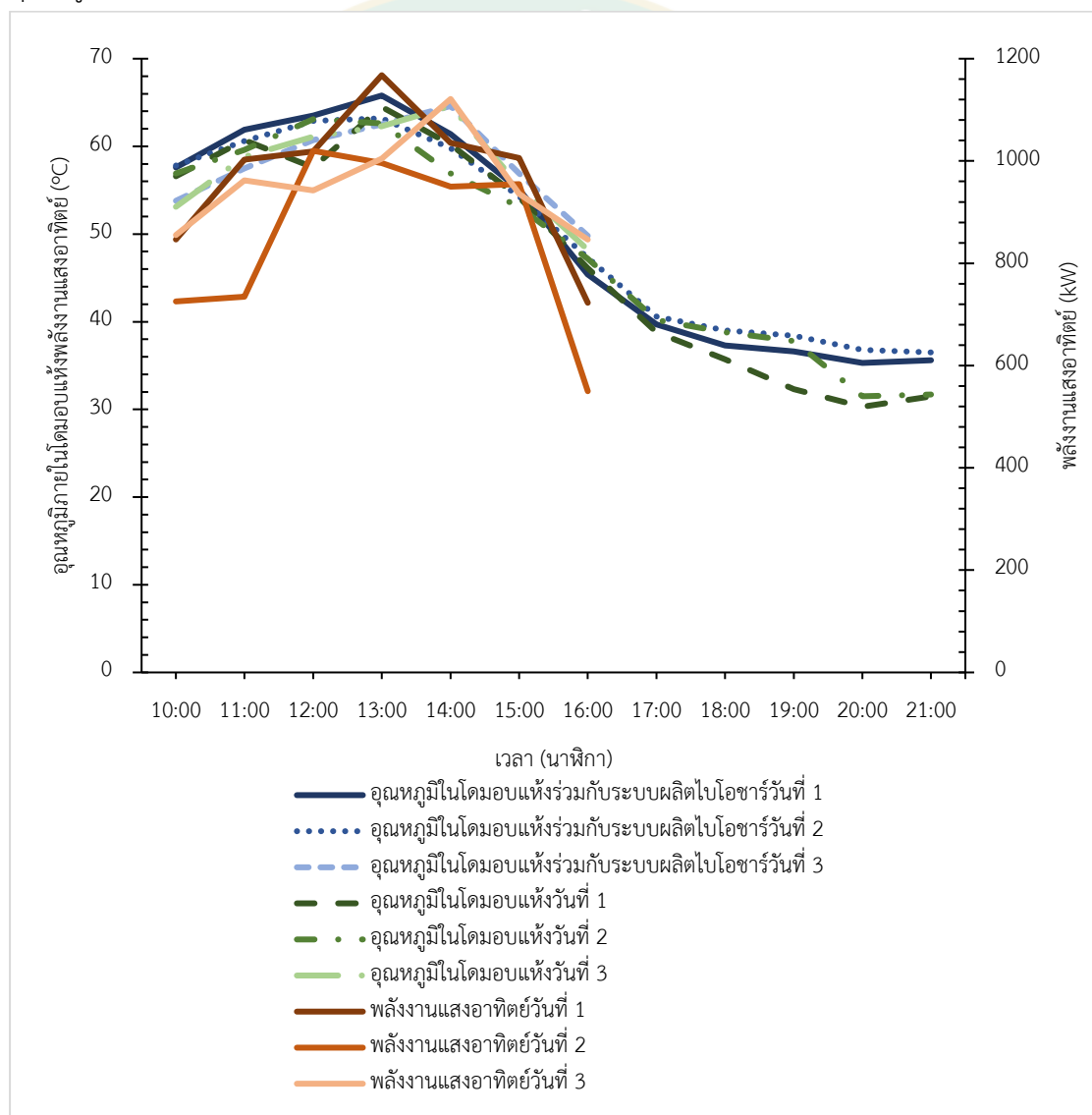




ภาพที่ 23 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลกลบของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

จากภาพที่ 23 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลจากกลบ ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะสอดคล้องกับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวได้ว่าเมื่อพลังงาน

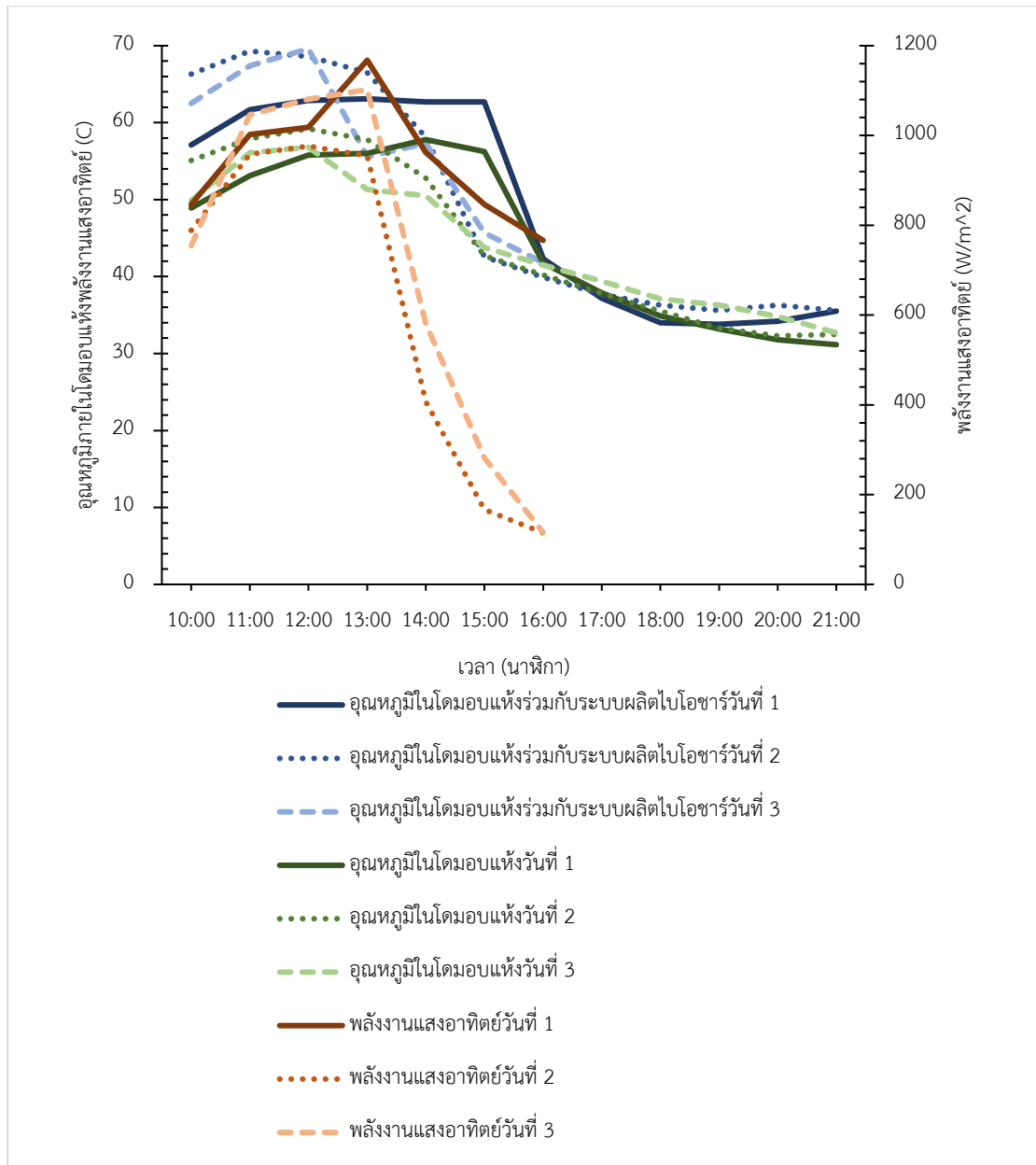
แสงอาทิตย์มีความเข้มข้นสูงอุณหภูมิภายในโดมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 12:00 – 13:00 น. และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรคือ 60-70 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดลองนี้สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดที่ได้ 63.70 องศาเซลเซียส และเมื่อเริ่มการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยแกลบสูงกว่าโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมถึง 5.4 องศาเซลเซียส ที่เวลา 20:00 น. พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Songchai Pankaew, 2021)(Pankaew et al., 2020) ที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ 4-6 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 24 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลซึ่งข้าวโพดของการทดลองอัตราการใช้สารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที่

จากภาพที่ 24 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลจากซังข้าวโพด ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะสอดคล้องกับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวได้ว่าเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์มีความเข้มข้นสูงอุณหภูมิภายในโดมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 12:00 – 13:00 น. และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรคือ 60-70 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดลองนี้สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดที่ได้ 65.80 องศาเซลเซียส และเมื่อเริ่มการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยแกลบสูงกว่าโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมถึง 5.30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 21:00 น. พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Songchai Pankaew, 2021) (Pankaew et al., 2020) ที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ 4-6 องศาเซลเซียส

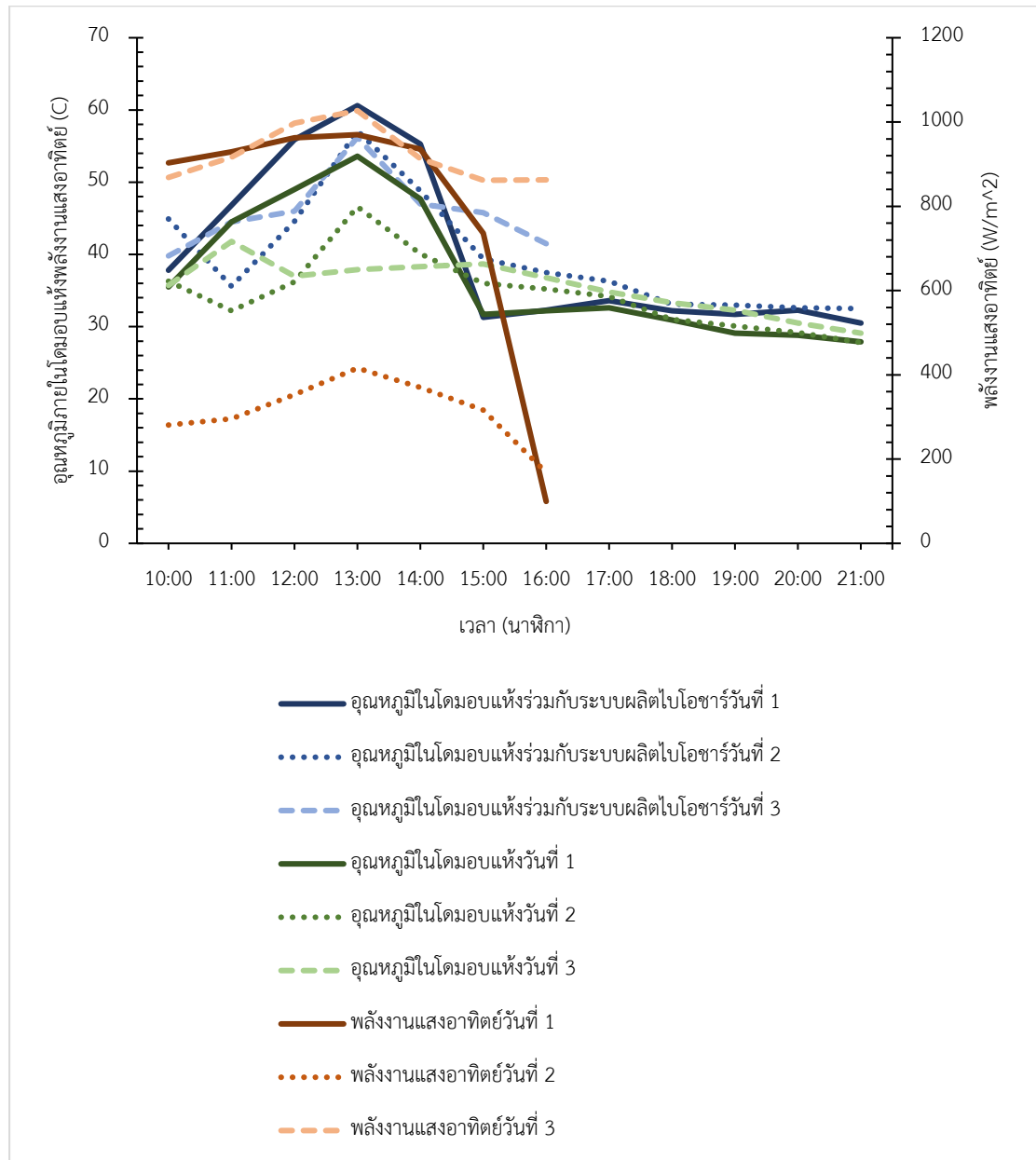




ภาพที่ 25 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลเปลือกลำไยของการทดลองอัตรากรไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที

จากภาพที่ 25 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลจากเปลือกลำไย ในการทดลองอัตรากรไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะสอดคล้องกับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวได้ว่าเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์มีความเข้มข้นสูงอุณหภูมิภายในโดมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 12:00 – 13:00 น. และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรคือ 60-70 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดลองนี้สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดที่ได้ 69.60 องศาเซลเซียส และเมื่อเริ่มการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์

พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยเปลือกกล้วยสูงกว่าโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมถึง 4.35 องศาเซลเซียส ที่เวลา 21:00 น. พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Pankaew et al., 2020; Songchai Pankaew, 2021) ที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ 4-6 องศาเซลเซียส

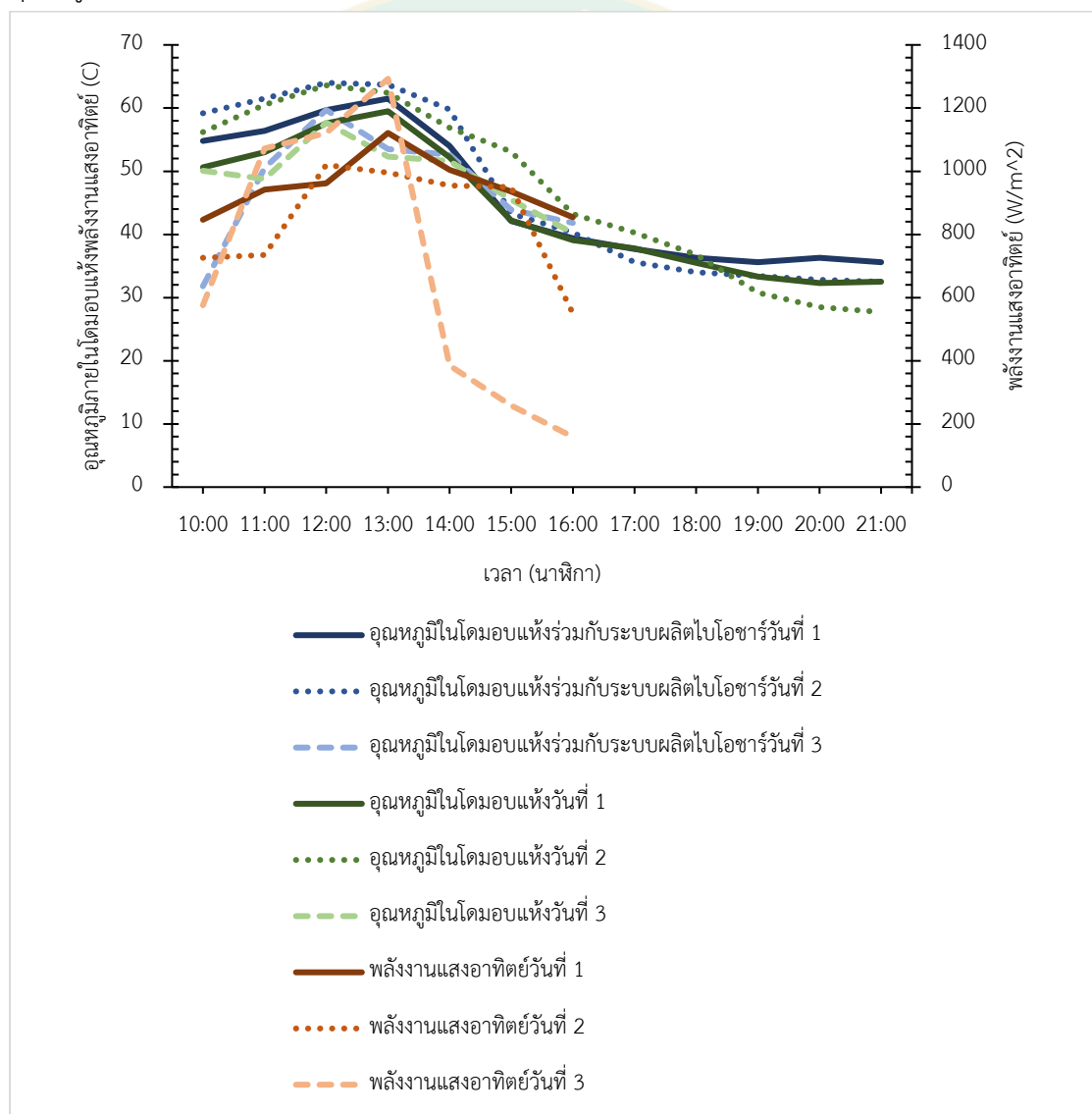


ภาพที่ 26 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลกลบของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที

จากภาพที่ 26 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลจากกลบ ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะสอดคล้องกับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวได้ว่าเมื่อพลังงาน



แสงอาทิตย์มีความเข้มข้นสูงอุณหภูมิภายในโดมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 12:00 – 13:00 น. และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรคือ 60-70 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดลองนี้สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดที่ได้ 60.60 องศาเซลเซียส และเมื่อเริ่มการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยแกลบสูงกว่าโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมถึง 4.7 องศาเซลเซียส ที่เวลา 21:00 น. พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Songchai Pankaew, 2021) (Pankaew et al., 2020) ที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ 4-6 องศาเซลเซียส

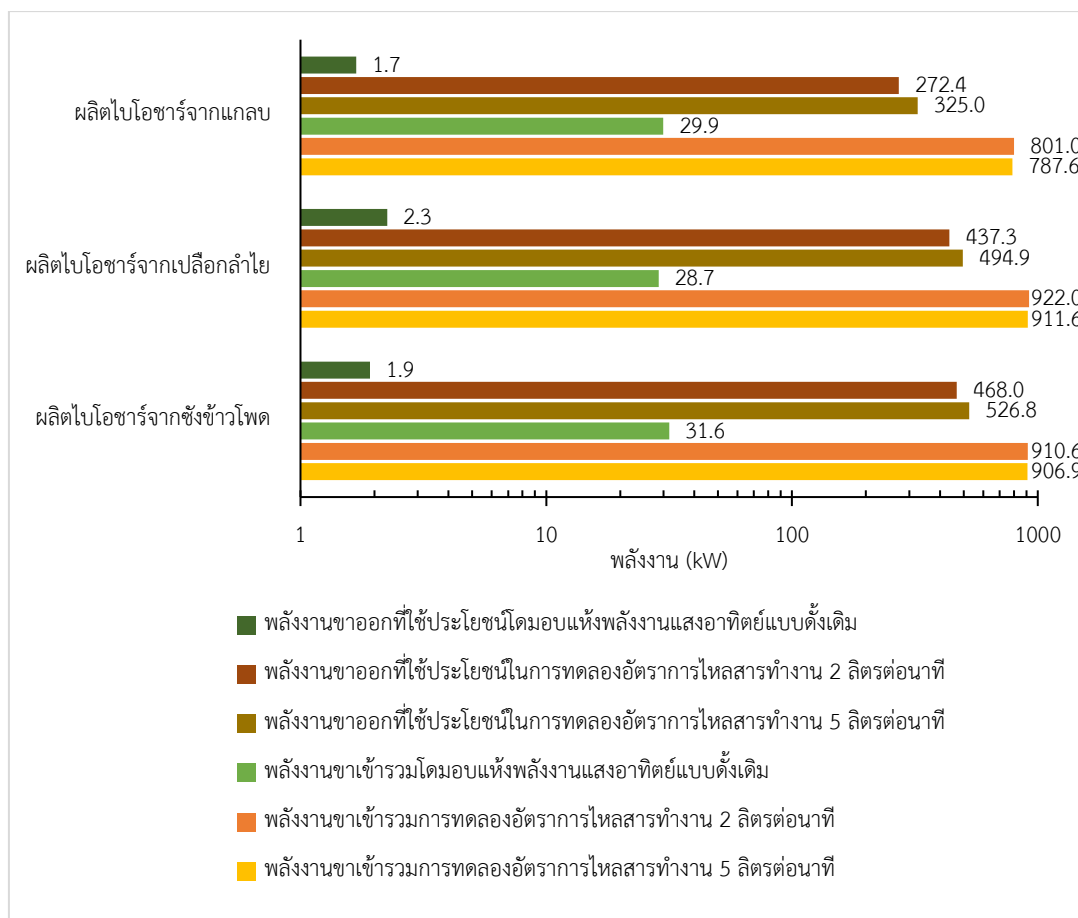


ภาพที่ 27 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลขังข้าวโพดของการทดลองอัตราการใช้สารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที่

จากภาพที่ 27 แสดงอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวลจากซังข้าวโพด ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะสอดคล้องกับค่าพลังงานแสงอาทิตย์ กล่าวได้ว่าเมื่อพลังงานแสงอาทิตย์มีความเข้มข้นสูงอุณหภูมิภายในโดมก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 12:00 – 13:00 น. และค่อย ๆ ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การอบแห้งวัสดุทางการเกษตรคือ 60-70 องศาเซลเซียส ซึ่งในการทดลองนี้สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดที่ได้ 63.60 องศาเซลเซียส และเมื่อเริ่มการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์พบว่าอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยกลบสูงกว่าโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมถึง 4.80 องศาเซลเซียส ที่เวลา 21:00 น. พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Songchai Pankaew, 2021) (Pankaew et al., 2020) ที่สามารถเพิ่มอุณหภูมิอากาศได้ 4-6 องศาเซลเซียส

#### 4.7 พลังงานความร้อนของระบบ

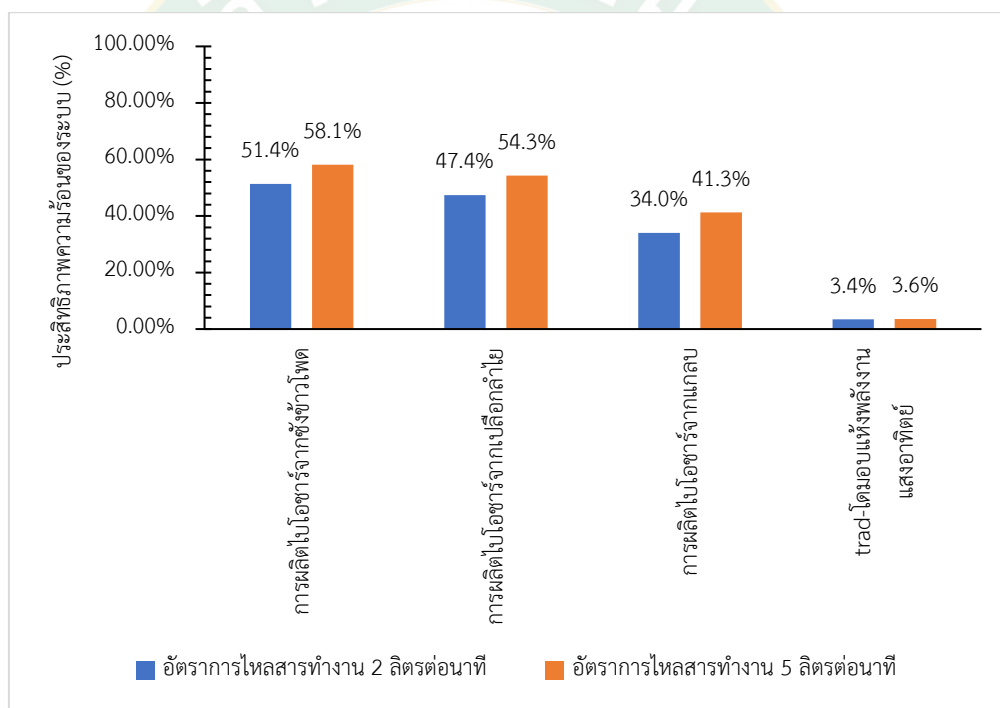
พลังงานความร้อนของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ พลังงานขาเข้า ซึ่งได้จากเชื้อเพลิง ชีวมวล และพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานขาออก ได้จาก พลังงานไปไอชาร์และพลังงานอบแห้งพริกแดงจินดา และพลังงานที่สูญเสียหรือพลังงานที่ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น พลังงานความปล่องควันทาเผาซ้ำ พลังงานความร้อนจากผนังเตา และพลังงานความร้อนพื้นโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น โดยในหัวข้อนี้จะนำเสนอพลังงานความร้อนของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ทำการวัดค่าจากการทดลองในทุกกระบวนการ



ภาพที่ 28 แสดงพลังงานขาเข้าและขาออกของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 28 แสดงพลังงานขาเข้าและขาออกของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พบว่า พลังงานขาเข้ารวมของการทดลองผลิตไบโอชาร์จากแกลบในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานทั้ง 2 ระดับมีปริมาณความร้อนต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับการผลิตไบโอชาร์จากเปลือกลำไยและซังข้าวโพด เนื่องจากพลังงานจำเพาะของชีวมวลแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันไปตามโครงสร้างทางเคมีและกายภาพ รวมถึงปริมาณของชีวมวลที่ใช้ในการทดลองแต่ละแบบมีข้อจำกัดในการบรรจุลงในเตาเผาไบโอชาร์ เช่น ขนาดและรูปร่างของชีวมวล เป็นต้น ทำให้ไม่สามารถใส่ชีวมวลที่มีปริมาณเท่ากันได้และจะส่งผลต่อความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์อีกด้วย เมื่อนำพลังงานขาเข้าในการทดลองการผลิตไบโอชาร์เปรียบเทียบกับพลังงานขาเข้าของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมนั้นพบว่า พลังงานขาเข้าของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์จะมีค่าต่ำมาก เนื่องจากได้รับพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์เพียงอย่างเดียวแต่ในการทดลองการผลิตไบโอชาร์จะได้รับพลังงานขาเข้าจากชีวมวลและเชื้อเพลิงเพิ่มเติมมาส่งผลให้มีปริมาณพลังงานขาเข้าที่สูงกว่ามาก เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองของพลังงานขาออกในการทดลองการผลิตไบโอชาร์จะเห็นได้ว่าการผลิตไบโอชาร์ทุก ๆ

ชีวมวลในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาทีจะมีปริมาณความร้อนที่ต่ำกว่าการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที เนื่องจากการทดลองอัตราการไหลสารทำงานทั้ง 2 ระดับสามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ใกล้เคียงกันในระยะเวลาการผลิตไบโอชาร์ที่ 3 ชั่วโมง ดังนั้นจึงส่งผลให้การทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาทีสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนจากเตาเผาช้าได้ดีกว่า และเมื่อเทียบพลังงานขาออกของแต่ละการผลิตไบโอชาร์แต่ละชีวมวลจะเห็นได้ว่าพลังงานขาออกของการทดลองการผลิตไบโอชาร์จากแกลบจะมีปริมาณความร้อนที่ต่ำที่สุด เนื่องจากค่าความร้อนต่ำสุดของไบโอชาร์จากแกลบมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น ๆ รวมถึงปริมาณการกลายเป็นไบโอชาร์ของแกลบก็ต่ำกว่าชีวมวลชนิดอื่น ๆ อีกด้วย และพลังงานขาออกของการทดลองโคมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมได้รับจากพลังงานที่ระเหยความชื้นของพริกแดงจินดาอย่างเดียวยิ่งเท่านั้น ส่งผลให้มีปริมาณความร้อนที่ต่ำ

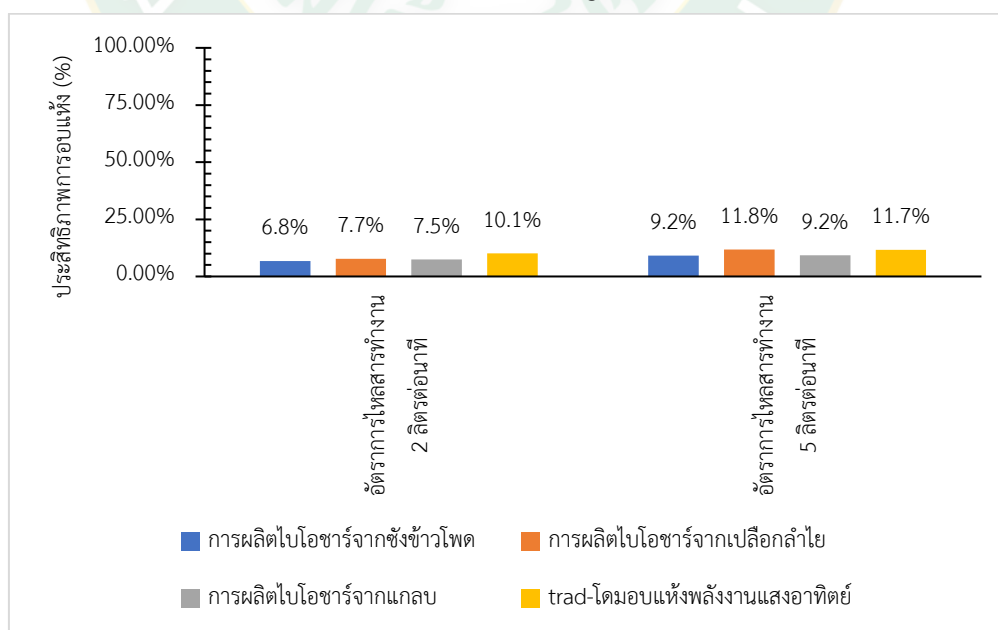


ภาพที่ 29 แสดงประสิทธิภาพความร้อนของระบบ

จากภาพที่ 29 แสดงประสิทธิภาพความร้อนของระบบพบว่า ประสิทธิภาพทางความร้อนจากการทดลองผลิตไบโอชาร์จากชีวมวลจาก ซังข้าวโพด เปลือกกล้วย และแกลบ ตามลำดับ ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 2 ลิตรต่อนาที คือ 47.43% 34% และ 51.38% ตามลำดับ และประสิทธิภาพความร้อนของโคมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ดั้งเดิม คือ 3.44% ประสิทธิภาพทางความร้อนจากการทดลองผลิตไบโอชาร์จากชีวมวลจาก ซังข้าวโพด เปลือกกล้วย และแกลบ ตามลำดับ ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 5 ลิตรต่อนาที มีค่าประสิทธิภาพความร้อนของ

ระบบอยู่ที่ 54.28% 41.29% และ 58.09% ตามลำดับ และประสิทธิภาพความร้อนของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ดั้งเดิม คือ 3.59%

จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพความร้อนของระบบในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 5 ลิตรต่อนาที ส่งผลให้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที ในทุก ๆ การทดลอง เนื่องจากสารทำงานที่ใช้ในการทดลองสามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ใกล้เคียงกันในอัตราการไหลสารทำงานทั้ง 2 ระดับ ส่งผลให้ที่อัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที สามารถทำการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่า และเมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของระบบระหว่างชีวมวลแต่ละชนิดจะพบว่า ประสิทธิภาพความร้อนของระบบในการทดลองผลิตไบโอชาร์จากแกลบนั้นมีค่าต่ำสุด เนื่องจากพลังงานของการกลายเป็นไบโอชาร์จากแกลบมีปริมาณที่ต่ำรวมถึงปริมาณการกลายเป็นไบโอชาร์จากแกลบมีค่าต่ำสุดที่สุด เพราะข้อจำกัดทางกายภาพและเคมีของชีวมวลแต่ละชนิดที่มีความแตกต่างกัน โดยชีวมวลที่ส่งผลให้มีประสิทธิภาพความร้อนของระบบดีที่สุดคือ ชังข้าวโพด และเมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของระบบระหว่างการผลิตไบโอชาร์กับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพความร้อนของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์มีค่าที่ต่ำมาก เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการระเหยความชื้นพริกแดงมีปริมาณค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานที่ได้รับจากพลังงานแสงอาทิตย์ และปริมาณความร้อนที่ระเหยความชื้นพริกแดงมีปริมาณน้อยมากในทุก ๆ การทดลอง เพราะปริมาณพริกแดงจินดาที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของโดมอบแห้งและพลังงานที่ได้รับจากกระบวนการต่าง ๆ โดยการทดลองมีผลเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ (Mugi and Chandramohan, 2021)



ภาพที่ 30 แสดงประสิทธิภาพการอบแห้งในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์

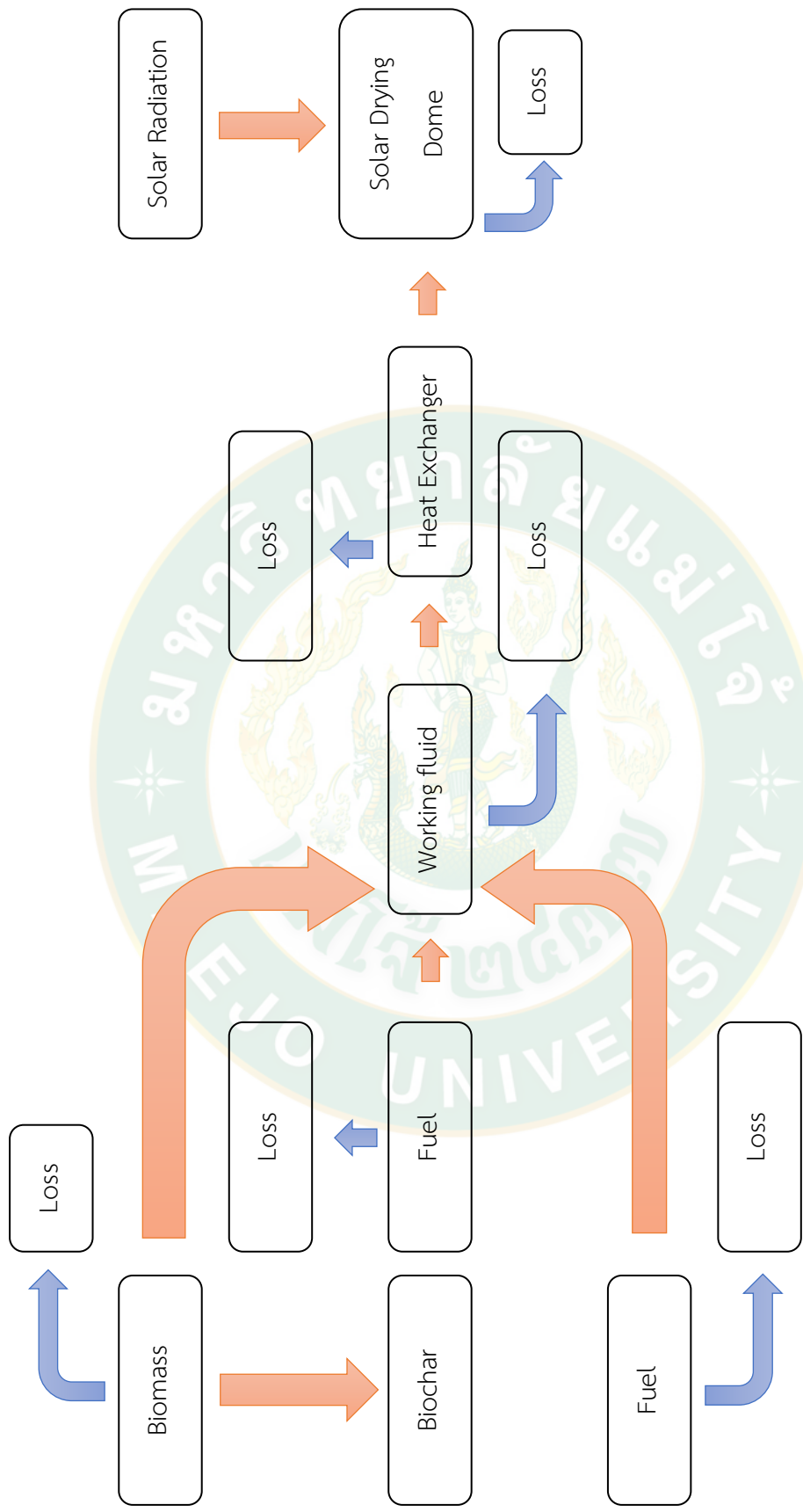
จากภาพที่ 30 แสดงประสิทธิภาพการอบแห้งในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่า ประสิทธิภาพการอบแห้งในการทดลองผลิตไบโอชาร์จากชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกลำไย แกลบ และซังข้าวโพด ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานทั้ง 2 ระดับ มีประสิทธิภาพการอบแห้งที่ไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ One way ANOVA (P-value = 0.70) เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้รับจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีปริมาณเท่ากันเกิดจากข้อจำกัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้งในการทดลองการผลิตไบโอชาร์เทียบกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมแล้วพบว่าประสิทธิภาพการอบแห้งไม่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ One way ANOVA (P-value = 0.47) เนื่องจากปริมาณพริกแดงจินดาที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ยังได้รับพลังงานจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งในการทดลองนี้จะได้รับพลังงานจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นเวลา 2 วัน มีค่าพลังงานความร้อนจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติมเข้ามาอีก 8.5 – 9.2 kW รวมถึงระยะเวลาในการอบแห้งในการทดลองผลิตไบโอชาร์ของ เปลือกลำไย แกลบ และซังข้าวโพด คือ 17 22 และ 20 ชั่วโมง ในการทดลองอัตราการไหลที่ 5 ลิตรต่อนาที และ 27 29 และ 26 ชั่วโมง ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 2 ลิตรต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพการอบแห้งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานวิจัยของ (Mugi and Chandramohan, 2021)



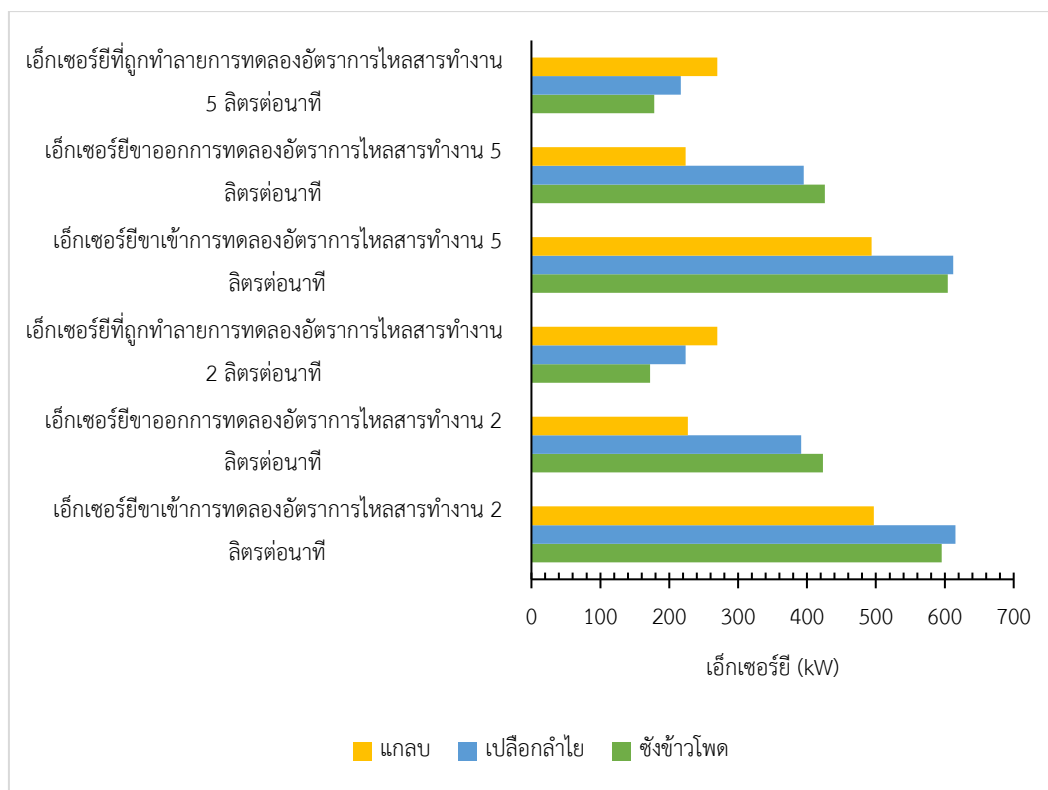
#### 4.8 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ชี่ของระบบ

จากการทดลองและเก็บข้อมูลของการทดลองโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ จึงนำมาวิเคราะห์เอ็กเซอร์ชี่เพื่อศึกษาความสามารถสูงสุดในการใช้พลังงานของระบบ เพื่อให้รู้จุดที่ควรปรับปรุงแก้ไขด้านพลังงานของระบบให้มีความเหมาะสมสูงสุด โดยในการทดลองนี้จะแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การทดลองผลิตไบโอชาร์ที่อัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที และการทดลองที่อัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที



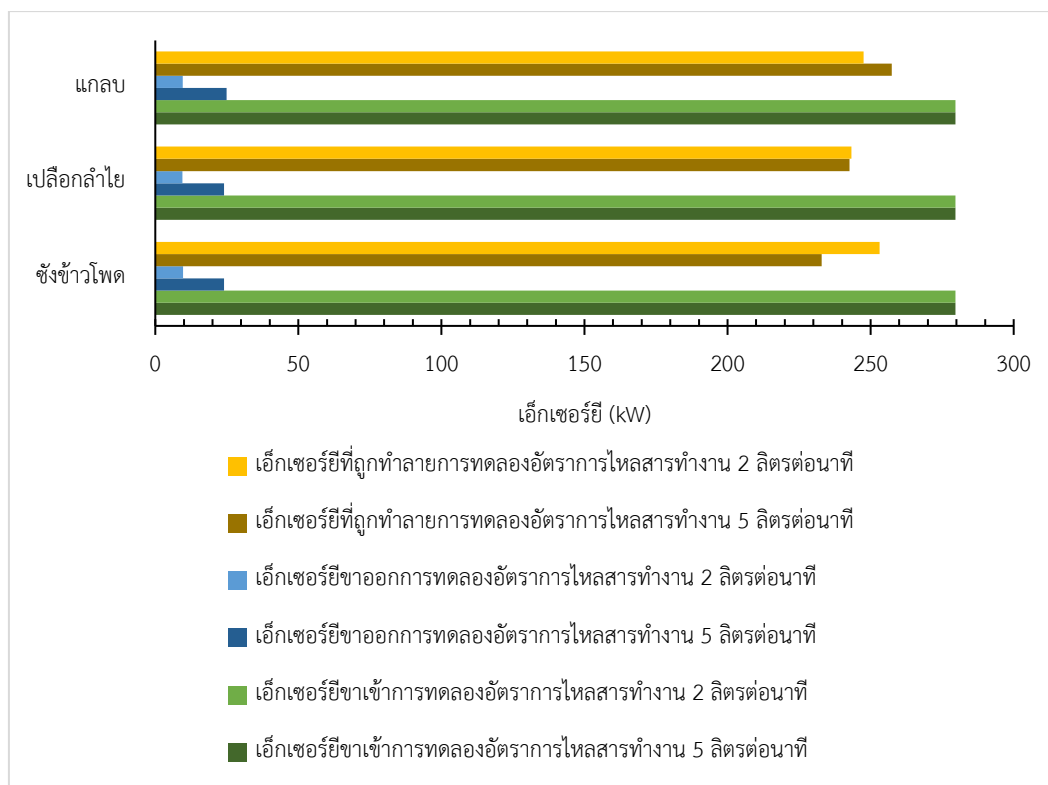


ภาพที่ 31 การผสมผสานพลังงานความร้อนสำหรับการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยี



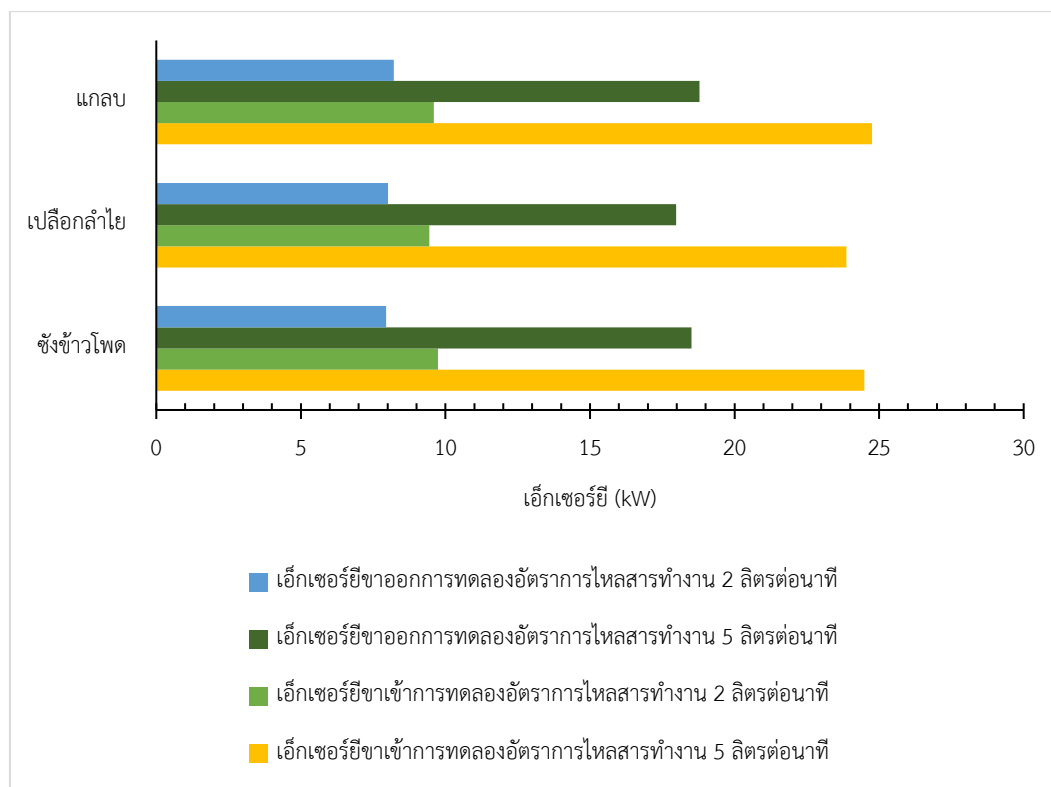
ภาพที่ 32 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์

จากภาพที่ 32 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์ ประกอบไปด้วยเอ็กเซอร์ยีขาเข้า คือ เอ็กเซอร์ยีชีวมวลและเอ็กเซอร์ยีเชื้อเพลิง เอ็กเซอร์ยีขาออก คือ เอ็กเซอร์ยีไบโอชาร์ และเอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลาย โดยการทดลองการผลิตไบโอชาร์ด้วยเปลือกลำไย แก๊ส และซังข้าว ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ระดับคือ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที พบว่าค่าเอ็กเซอร์ยีของชีวมวลแก๊สมีปริมาณต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเอ็กเซอร์ยีชีวมวลชนิดอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าความร้อนต่ำที่สุด และเมื่อวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีขาออกจะพบว่าเอ็กเซอร์ยีจากการทดลองผลิตไบโอชาร์จากแก๊สมีปริมาณต่ำที่สุดเช่นกัน เนื่องจากปริมาณการกลายเป็นไบโอชาร์ของแก๊สมีปริมาณที่ต่ำและค่าความร้อนของแก๊สก็ต่ำกว่าไบโอชาร์จากชีวมวลชนิดอื่น ๆ เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีและกายภาพของชีวมวลแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน เช่น องค์กรประกอบธาตุต่าง ๆ ลิกนิน เซลลูโลส เป็นต้น แต่เมื่อทำการวิเคราะห์การทดลองอัตราการไหลสารทำงานทั้ง 2 ระดับ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในการวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์



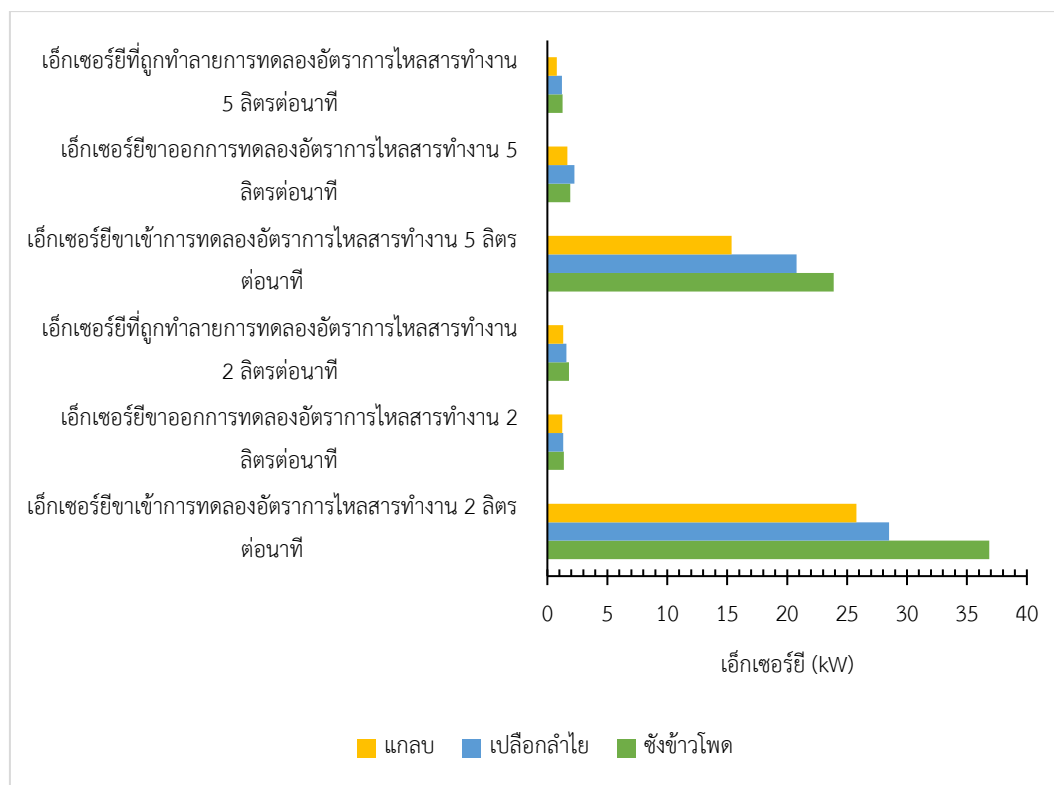
ภาพที่ 33 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาข้าว

จากภาพที่ 33 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาข้าว ประกอบไปด้วยเอ็กเซอร์ยีขาเข้า คือ เอ็กเซอร์ยีเชื้อเพลิง เอ็กเซอร์ยีขาออก คือ เอ็กเซอร์ยีสารทำงาน และเอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลาย คือ เอ็กเซอร์ยีปล่องควันและเอ็กเซอร์ยีผิวเตาเผาข้าว โดยการทดลองการผลิตไบโอชาร์ด้วยเปลือกลำไย แกลบ และชั่งข้าว ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ระดับคือ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที่ พบว่าเอ็กเซอร์ยีขาออกของการทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที่ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ One way ANOVA (P-value = .000001) เนื่องจากสารทำงานในการทดลองทั้ง 2 ระดับสามารถทำความร้อนได้สูงสุดที่อุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังนั้นอัตราการไหลสารทำงานที่ 5 ลิตรต่อนาที่ที่สามารถทำการแลกเปลี่ยนความร้อนได้สูงกว่าที่ 2 ลิตรต่อนาที่ เพราะมีปริมาณมวลต่อเวลาของสารทำงานเข้าไปแลกเปลี่ยนได้ดีกว่าในระยะเวลากการทดลองผลิตไบโอชาร์ที่จำกัดที่ 3 ชั่วโมงต่อครั้ง ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าอัตราการไหลสารทำงานที่ 5 ลิตรต่อนาที่ มีความสามารถในการนำความร้อนมาใช้งานจริงได้เหมาะสมกับการทดลองที่สุด



ภาพที่ 34 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

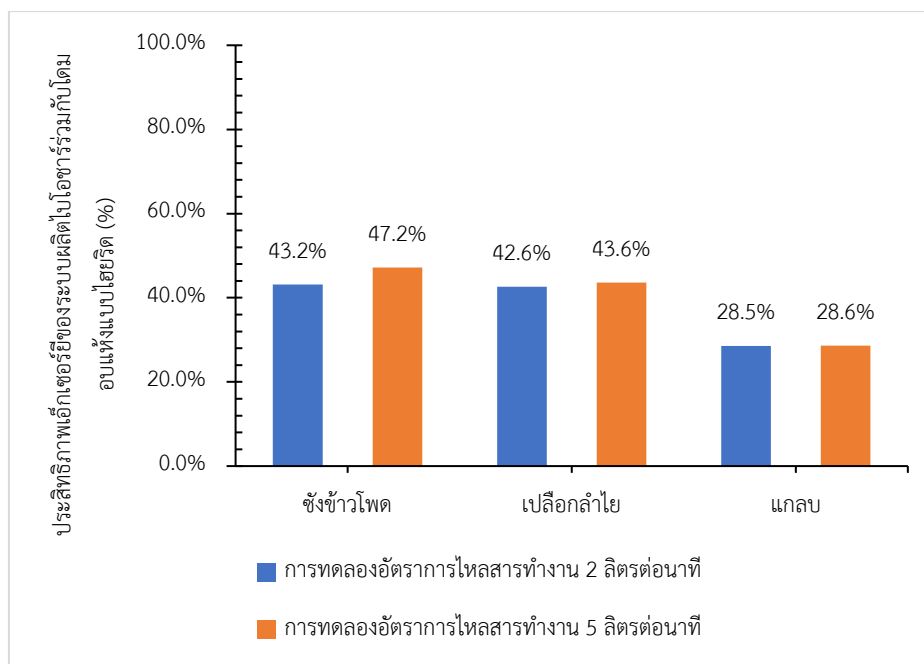
จากภาพที่ 34 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ประกอบไปด้วยเอ็กเซอร์ยีขาเข้า คือ เอ็กเซอร์ยีสารทำงานขาเข้าและเอ็กเซอร์ยีอากาศขาเข้า เอ็กเซอร์ยีขาออก คือ เอ็กเซอร์ยีสารทำงานขาออกและเอ็กเซอร์ยีอากาศขาออก โดยการทดลองการผลิตไบโอชาร์ด้วยเปลือกกล้วย แกลบ และชังข้าวโพด ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ระดับคือ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที พบว่าเอ็กเซอร์ยีขาออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ One way ANOVA (P-value = 0.000002) เนื่องจากอัตราการไหลสารทำงานที่ 5 ลิตรต่อนาทีมีความสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีกว่าในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 2 ลิตรต่อนาที และยังกล่าวได้ว่าที่อัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาทีมีความสามารถในการใช้ความร้อนได้ดีกว่าและเหมาะสมแก่การทดลองที่สุด



ภาพที่ 35 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 35 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบไปด้วยเอ็กเซอร์ยีขาเข้า คือ เอ็กเซอร์ยีพลังงานแสงอาทิตย์และเอ็กเซอร์ยีอากาศ เอ็กเซอร์ยีขาออก คือ เอ็กเซอร์ยีผลิตภัณฑ์ และเอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลาย คือ เอ็กเซอร์ยีผนังและเอ็กเซอร์ยีพื้น โดยการทดลองการผลิตไบโอชาร์ด้วยเปลือกกล้วย แกลบ และชั่งข้าว ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ระดับคือ 2 และ 5 ลิตรต่อนาที พบว่าค่าเอ็กเซอร์ยีขาเข้าของการทดลองผลิตไบโอชาร์แต่ละชีวมวลมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากพลังงานที่ได้รับเป็นหลักในการทดลองอบแห้งคือ พลังงานจากแสงอาทิตย์ ซึ่งในแต่ละวันพลังงานแสงอาทิตย์มีพลังงานที่ไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและอากาศในระหว่างการทดลอง และพลังงานที่ได้รับจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีปริมาณที่เท่ากัน เพราะข้อจำกัดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีเท่าที่ควร เมื่อวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีขาออกจะพบว่าที่การทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาทีที่มีความสามารถในการนำพลังงานมาใช้ได้ดีกว่าที่การทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที เนื่องจากสามารถลดความชื้นพริกแดงจินดาลงได้สูงกว่า





ภาพที่ 36 แสดงประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

จากการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ด้วยชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกกล้วย แกลบ และซังข้าวโพด ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที พบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของระบบมีค่าเท่ากับ 42.64% 28.51% และ 43.17% ตามลำดับ และในการทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 5 ลิตรต่อนาทีมีค่าเท่ากับ 43.61% 28.62% และ 47.19% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 36 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของระบบในการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวล เปลือกกล้วยและซังข้าวโพด มีค่าประสิทธิภาพที่ไม่ได้แตกต่างกัน แต่การผลิตไบโอชาร์ด้วยแกลบมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด เนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากชีวมวลมีปริมาณที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และปริมาณไบโอชาร์ที่ได้รับจากกระบวนการผลิตไบโอชาร์แต่ละชีวมวลก็มีความแตกต่างกัน รวมถึงค่าความร้อนของชีวมวลและไบโอชาร์มีปริมาณที่ไม่เท่ากันเพราะโครงสร้างทางเคมีและกายของชีวมวลและไบโอชาร์ และเมื่อเทียบการทดลองอัตราการไหลสารทำงานทั้ง 2 ระดับ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากพลังงานที่ได้รับจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก็มีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ความสามารถในการนำพลังงานไปใช้ของระบบจึงไม่มีขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของสารทำงาน

#### 4.9 ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ในการทดลองการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จะต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าในการลงทุนหรือเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์เป็นการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการทดลอง เช่น ต้นทุน รายรับ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าชี้วัดเชิงเศรษฐศาสตร์

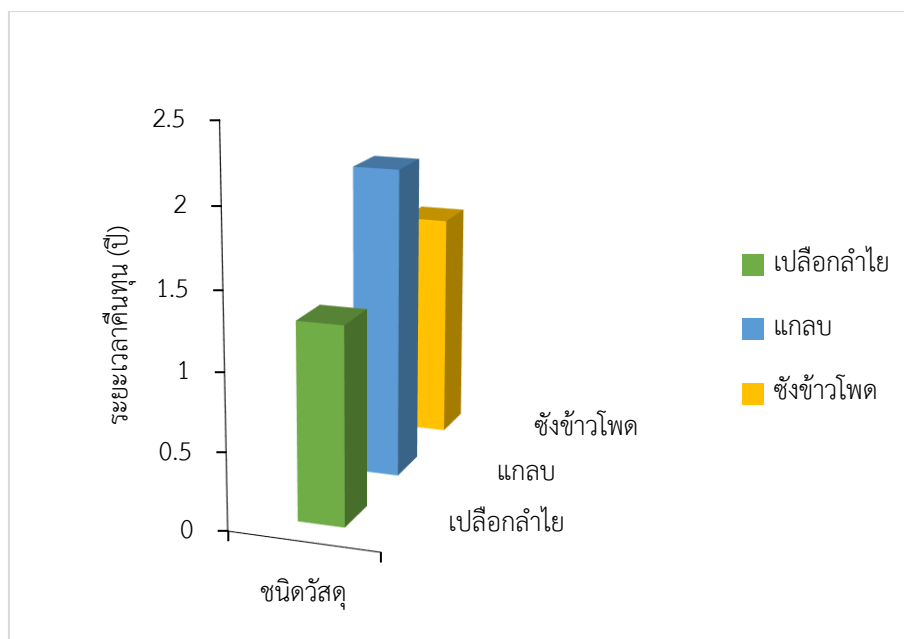
วิศวกรรม เช่น จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน เป็นต้น โดยในการวิเคราะห์การทดลองนี้จะวิเคราะห์เพียงระยะเวลาคืนทุนเท่านั้น

ในการวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ต้องคำนึงถึงต้นทุนคงที่ ต้นทุนแปรผัน และรายรับ ในการทดลองมีรายละเอียดตัวแปรที่คำนึงถึงดังนี้

1. ต้นทุนคงที่ ได้แก่ เตาเผาไปโอซาร์ เตาเผาซ้ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โคมอบแห้ง พลังงานแสงอาทิตย์ ชุดอุปกรณ์เครื่องมือวัด และค่าบำรุงรักษา เป็นต้น
2. ต้นทุนแปรผัน ได้แก่ เชื้อเพลิง ชีวมวล พริกแดง ค่าแรง เป็นต้น
3. รายรับ ได้แก่ รายได้จากการขายไปโอซาร์และพริกแดงแห้ง

รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการทดลองนี้ทั้งหมดจะแสดงในตารางที่  
ตารางที่ 4 รายการวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

รายการวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์			
รายการ	จำนวน	หน่วย	ราคา (บาท)
ชุดผลิตไปโอซาร์	1	ชุด	750,000
ค่าบำรุงรักษา	1	ครั้งต่อปี	75,000
ค่าใช้จ่ายในการอบแห้งต่อปี			
- เปลือกกล้วย	20	วันต่อเดือน	690,540
- แกลบ			682,170
- ชั่งข้าวโพด			687,930
อายุการใช้งาน	5	ปี	-
อัตราดอกเบี้ย	3.25	%	-
อัตราการเงินเพื่อ	4	%	-
ต้นทุนต่อปี			
- เปลือกกล้วย	1	ปี	416,284
- แกลบ			412,479
- ชั่งข้าวโพด			415,098
รายรับ			
- ไปโอซาร์	1	กิโลกรัม	50
- พริกแดงจินดาแห้ง	1	กิโลกรัม	200



ภาพที่ 37 ระยะเวลาต้นทุนในการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์

จากตารางที่ 14 สามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยสมการ พบว่าระยะเวลาต้นทุนของการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์ด้วยชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ เปลือกลำไย แกลบ และชังข้าวโพด ร่วมกับโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์ คือ 1 ปี 3 เดือน 7 วัน 2 ปี 7 วัน และ 1 ปี 5 เดือน 27 วัน ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 37 เนื่องจากราคาต้นทุนของชีวมวลแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันรวมถึงปริมาณไบโอชาร์ที่ได้การกระบวนการผลิตไบโอชาร์มีปริมาณที่ไม่เท่ากัน รวมถึงปริมาณพริกแห้งที่ได้ก็มีความแตกต่างกันส่งผลให้ระยะเวลาต้นทุนของแต่ละชีวมวลมีความแตกต่างกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษาระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ จากการศึกษาพบว่าระบบการผลิตไบโอชาร์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนได้อย่างมีนัยสำคัญ และยังสามารถเพิ่มอุณหภูมิภายในโดมอบแห้งได้จริง โดยสามารถนำการศึกษานี้ไปประยุกต์หรือปรับใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะงานในเชิงอุตสาหกรรมได้

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพด้านความร้อนและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยี ประกอบด้วย ชนิดชีวมวล อัตราการไหล และสภาพอากาศในการทดลอง เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1.1 ชนิดของชีวมวลที่เหมาะสมแก่การทดลอง จากการทดลองพบว่าชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอชาร์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพความร้อนและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีที่ดีที่สุดคือ ชังข้าวโพด

5.1.2 อัตราการไหลของสารทำงานในการทดลอง อัตราการไหลของสารทำงานเป็นสิ่งที่นำความร้อนเหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอชาร์ไปสู่กระบวนการอบแห้ง จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของสารทำงานที่ 5 ลิตรต่อนาที ส่งผลให้มีประสิทธิภาพความร้อนและประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีที่สูงกว่าอัตราการไหลสารทำงานที่ 2 ลิตรต่อนาที ที่อัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที สามารถแลกเปลี่ยนความร้อนได้สูงที่สุดคือ 24.04 kW ในระยะเวลาการผลิตไบโอชาร์ที่ 3 ชั่วโมง

5.1.3 ปริมาณการกลายเป็นไบโอชาร์ สามารถสรุปได้ว่าเพื่อให้ได้ปริมาณและคุณภาพของไบโอชาร์ที่เหมาะสม โดยในการทดลองการผลิตไบโอชาร์ด้วย เปลือกลำไย แกลบ และชังข้าวโพด พบว่ามีปริมาณการกลายเป็นไบโอชาร์เฉลี่ย คือ 63.20%, 60.02%, 61.03%

5.1.4 ปริมาณพริกแดงจินดาแห้ง ในการทดลองการอบแห้งพริกแดงจินดา ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ พบว่าปริมาณพริกแดงจินดาแห้งเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองการผลิตไบโอชาร์ด้วย เปลือกลำไย แกลบ และชังข้าวโพด คือ 21.15 กิโลกรัม 21.95 กิโลกรัม และ 21.55 กิโลกรัม ตามลำดับ

5.1.5 ปริมาณมลพิษ จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเตาเผาชำสามารถลดปริมาณมลพิษลงได้และเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม

5.1.6 ประสิทธิภาพการอบแห้ง พบว่าประสิทธิภาพการอบแห้งของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์เทียบกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบดั้งเดิมไม่ได้แตกต่างกัน โดยมีค่าประสิทธิภาพการอบแห้งสูงสุดคือ 11.71% ในโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

แบบดั้งเดิม และ 11.78% ในโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับระบบการผลิตไบโอชาร์ การทดลองอัตราการไหลสารทำงานที่ 5 ลิตรต่อนาที จากการผลิตไบโอชาร์ด้วยเปลือกกล้วย

5.1.7 ประสิทธิภาพความร้อนของระบบ จากการทดลองสามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ ประสิทธิภาพความร้อนของระบบได้ พบว่าประสิทธิภาพความร้อนที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองคือ ที่อัตราการไหลของสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที จากการผลิตไบโอชาร์ชีวมวลซังข้าวโพดซึ่งมีค่า ประสิทธิภาพความร้อนที่ 58.09%

5.1.8 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีของระบบ จากการทดลองสามารถนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์ ค่าเอ็กเซอร์ยีของระบบ พบว่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห่ง พลังงานแสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดคือ ในการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที ชีวมวลในการ ผลิตไบโอชาร์ด้วยซังข้าวโพดโดยมีค่าประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีอยู่ที่ 47.19%

5.1.9 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม จากการทดลองและวิเคราะห์ ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์ พบว่าระยะเวลาคืนทุนที่ดีที่สุดคือ 1 ปี 3 เดือน 7 วัน ในการทดลองการผลิตไบโอชาร์ด้วยเปลือก กล้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์ ยังมีข้อจำกัด หลาย ๆ ด้าน เช่น พื้นที่ในการทดลองที่เหมาะสมจะส่งผลต่อการรับพลังงานแสงอาทิตย์ และสภาพ อากาศระหว่างการทดลองที่ไม่สามารถควบคุมได้ควรทำการทดลองในฤดูกาลที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผล การทดลองที่ดีที่สุด รวมถึงต้นทุนในการหาวัสดุต่าง ๆ ทั้งในและนอกฤดูกาลที่มีราคาค่อนข้างผันผวน และควรเพิ่มปริมาณพริกแดงจินดาในการทดลองให้สอดคล้องกับขนาดและพลังงานที่ได้รับ



ภาคผนวก



ก.1 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพความร้อนของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

ก.1.1 พลังงานความร้อนขาเข้าจากชีวมวล

$$Q = m \times LHV$$

$$= \left( \frac{135.5 \text{ kg}}{3 \text{ hr}} \times 16684.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \div 3600 \text{ s}$$

$$= 209.33 \text{ kW}$$

$$Q = m \times LHV$$

$$= \left( \frac{131.5 \text{ kg}}{3 \text{ hr}} \times 16684.4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \div 3600 \text{ s}$$

$$= 203.15 \text{ kW}$$

ก.1.2 พลังงานความร้อนขาเข้าจากเชื้อเพลิงเตาไบโอชาร์

$$Q = m \times LHV$$

$$= \left( 20 \text{ kg} \times 17978 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \div 3600 \text{ s}$$

$$= 99.88 \text{ kW} \times 2 \text{ times} = 199.76 \text{ kW}$$

ก.1.3 พลังงานความร้อนขาเข้าจากเชื้อเพลิงเตาเผาซ้ำ

$$Q = m \times LHV$$

$$= \left( 28 \text{ kg} \times 17978 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \div 3600 \text{ s}$$

$$= 139.83 \text{ kW} \times 2 \text{ times} = 279.66 \text{ kW}$$

ก.1.4 พลังงานความร้อนขาเข้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

$$Q = I \times A$$

$$= 944.27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 14 \text{ m}^2$$

$$= 13.22 \text{ kW}$$

$$Q = I \times A$$

$$= 624 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times 14 \text{ m}^2$$

$$= 8.74 \text{ kW}$$

ก.1.5 พลังงานความร้อนขาออกจากปล่องควัน

$$Q = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$= 0.12 \frac{m^3}{s} \times 1.19 \frac{kg}{m^3} \times 1.17 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \times 712.8^\circ C$$

$$= 119.09 kW$$

$$= 0.12 \frac{m^3}{s} \times 1.19 \frac{kg}{m^3} \times 1.17 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \times 722^\circ C$$

$$= 120.63 kW$$

ก.1.6 พลังงานความร้อนขาออกจากผิวเตาไปไอซาร์

$$Q = hA(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4)$$

$$= \left( (5.54 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 2.26 m^2 \times (412.4^\circ C - 29.1^\circ C)) \right.$$

$$\left. + (0.96 \times 5.67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \times 10^{-8} \times 2.26 m^2 \times (412.4^4 - 29.1^4)) \right) \div 1000$$

$$= 8.35 kW$$

$$= \left( (5.54 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 2.26 m^2 \times (347.7^\circ C - 32.5^\circ C)) \right.$$

$$\left. + (0.96 \times 5.67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \times 10^{-8} \times 2.26 m^2 \times (347.7^4 - 32.5^4)) \right) \div 1000$$

$$= 5.55 kW$$

ก.1.7 พลังงานความร้อนขาออกจากผิวเตาเผาซ้ำ

$$Q = hA(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4)$$

$$= \left( (4.97 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 4.87 m^2 \times (278.1^\circ C - 29.1^\circ C)) \right.$$

$$\left. + (0.96 \times 5.67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \times 10^{-8} \times 4.87 m^2 \times (278.1^4 - 29.1^4)) \right) \div 1000$$

$$= 7.61 kW$$

$$= \left( (4.97 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 4.87 m^2 \times (266.3^\circ C - 32.5^\circ C)) \right.$$

$$\left. + (0.96 \times 5.67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \times 10^{-8} \times 4.87 m^2 \times (266.3^4 - 32.5^4)) \right) \div 1000$$

$$= 6.90 kW$$

ก.1.8 พลังงานความร้อนขาออกจากผิวปล่องนำความร้อน

$$Q = hA(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4)$$

$$= \left( (4.92 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 4.34 m^2 \times (269.1^\circ C - 29.1^\circ C)) \right.$$

$$\left. + (0.96 \times 5.67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \times 10^{-8} \times 4.34 m^2 \times (269.1^4 - 29.1^4)) \right) \div 1000$$

$$\begin{aligned}
&= 6.37kW \\
&= \left( (4.92 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 4.34m^2 \times (300.8^\circ C - 32.5^\circ C)) \right. \\
&\quad \left. + (0.96 \times 5.67 \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \times 10^{-8} \times 4.34m^2 \times (300.8^4 - 32.5^4)) \right) \div 1000 \\
&= 7.83kW
\end{aligned}$$

ก.1.9 พลังงานความร้อนขาออกจากถังเก็บน้ำ

$$\begin{aligned}
Q &= mC_p \Delta T \\
&= 0.084 \frac{kg}{s} \times 3.985 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \times (102.1^\circ C - 37.62^\circ C) \\
&= 21.58kW \\
&= 0.084 \frac{kg}{s} \times 3.985 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \times (102.5^\circ C - 36.49^\circ C) \\
&= 22.1kW
\end{aligned}$$

ก.1.10 พลังงานความร้อนขาออกจากสารทำงาน

$$\begin{aligned}
Q &= mC_p \Delta T \\
&= 0.084 \frac{kg}{s} \times 3.985 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \times (103.1^\circ C - 36^\circ C) \\
&= 22.46kW \\
&= 0.084 \frac{kg}{s} \times 3.985 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \times (102.8^\circ C - 35^\circ C) \\
&= 22.70kW
\end{aligned}$$

ก.1.11 พลังงานความร้อนขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

$$LMTD = \frac{(T_{h_{in}} - T_{c_{out}}) - (T_{h_{out}} - T_{c_{in}})}{\ln \left( \frac{T_{h_{in}} - T_{c_{out}}}{T_{h_{out}} - T_{c_{in}}} \right)}$$

$$Q = \dot{m}C_p \Delta T = UAF (LMTD)$$

$$Q = (0.37 \times 0.19) \frac{kW}{^\circ C} \times 0.99 \times \left( \frac{(103.1^\circ C - 37.62^\circ C) - (88.54^\circ C - 30.6^\circ C)}{\ln \left( \frac{(103.1^\circ C - 37.62^\circ C)}{(88.54^\circ C - 30.6^\circ C)} \right)} \right)$$

$$Q = 4.29kW$$

$$Q = (0.37 \times 0.19) \frac{kW}{^{\circ}C} \times 0.99 \times \left( \frac{(102.8^{\circ}C - 36.49^{\circ}C) - (86.45^{\circ}C - 30.7^{\circ}C)}{\ln \left( \frac{(102.8^{\circ}C - 36.49^{\circ}C)}{(86.45^{\circ}C - 30.7^{\circ}C)} \right)} \right)$$

$$Q = 4.24 kW$$

ก.1.12 พลังงานความร้อนขาออกจากไบโอชาร์

$$Q = m \cdot LHV$$

$$Q = \frac{85 kg \times 25258.96 \frac{kJ}{kg}}{3 hr \times 3600 s}$$

$$Q = 198.80 kW$$

$$Q = \frac{84 kg \times 25258.96 \frac{kJ}{kg}}{3 hr \times 3600 s}$$

$$Q = 196.46 kW$$

ก.1.13 พลังงานความร้อนขาออกจากผนังโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

$$Q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$Q = (0.2 \times 44.24 \times (37.5 - 36) \div 0.006) \div 1000$$

$$Q = 2.21 kW$$

$$Q = (0.2 \times 44.24 \times (35.15 - 33.2) \div 0.006) \div 1000$$

$$Q = 2.88 kW$$

ก.1.14 พลังงานความร้อนขาออกจากพื้นโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

$$Q = kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$Q = (0.038 \times 44.24 \times (37.62 - 30.6) \div 0.023) \div 1000$$

$$Q = 0.51 kW$$

$$Q = (0.038 \times 44.24 \times (36.49 - 30.7) \div 0.023) \div 1000$$

$$Q = 0.42 kW$$

ก.1.15 พลังงานขาออกจากผลิตภัณฑ์พริกแดงจินดาแห้ง

$$Q = \frac{m_w \cdot L}{t \times 3600}$$

$$Q = \frac{61.2 kg \times 2257 \frac{kJ}{kg}}{17 hr \times 3600 s}$$

$$Q = 2.26kW$$

ก.1.16 ประสิทธิภาพความร้อนของระบบ

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

$$\eta = \frac{494.88kW}{911.65kW}$$

$$\eta = 54.28\%$$

ก.2 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเอ็กเซอร์ยีของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโตมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์

ก.2.1 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีเตาไบโอชาร์

เอ็กเซอร์ยีชีวมวล

$$Exergy = m \cdot LHV$$

$$Exergy = \frac{\frac{135.5kg}{3hr} \times 16684.4 \frac{kJ}{kg}}{3600s}$$

$$Exergy = 209.33kW$$

$$Exergy = \frac{\frac{131.5kg}{3hr} \times 16684.4 \frac{kJ}{kg}}{3600s}$$

$$Exergy = 203.15kW$$

เอ็กเซอร์ยีเชื้อเพลิง

$$Exergy = m \cdot LHV$$

$$Exergy = \frac{20 \frac{kg}{hr} \times 17978 \frac{kJ}{kg}}{3600s}$$

$$Exergy = 99.88kW \times 2 \text{ times} = 199.76 \text{ kW}$$

เอ็กเซอร์ยีไบโอชาร์

$$Exergy = m \cdot LHV$$

$$Exergy = \frac{\frac{85 \text{ kg}}{3 \text{ hr}} \times 25259 \frac{kJ}{kg}}{3600s}$$

$$Exergy = 198.8kW$$

$$Exergy = \frac{\frac{84 \text{ kg}}{3 \text{ hr}} \times 25259 \frac{kJ}{kg}}{3600s}$$

$$Exergy = 196.46kW$$

เอ็กเซอร์ยีที่ถูกทำลาย

$$Exergy = Exergy,biomass+Exergy,fuel-Exergy,biochar$$

$$Exergy = 110.41 kW$$

$$Exergy = 106.57 kW$$

ก.2.2 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีเตาเผาซ้ำ

เอ็กเซอร์ยีเชื้อเพลิง

$$Exergy = m \cdot LHV$$

$$Exergy = \frac{28 \frac{kg}{hr} \times 17978 \frac{kJ}{kg}}{3600s}$$

$$Exergy = 139.83kW \times 2 \text{ times} = 279.66 kW$$

เอ็กเซอร์ยีปล่องควัน

$$Exergy = \left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right) \cdot Q$$

$$Exergy = \left(1 - \frac{30^\circ C}{712.8^\circ C}\right) \times 119.09kW$$

$$Exergy = 114.08kW$$

$$Exergy = \left(1 - \frac{30^\circ C}{722^\circ C}\right) \times 120.63kW$$

$$Exergy = 115.62kW$$

เอ็กเซอร์ยีสารทำงาน

$$Exergy = mC_p \left( (T_i - T_a) - T_a \cdot \ln\left(\frac{T_i}{T_a}\right) \right)$$

$$Exergy = 0.084 \times 3.985 \times \left( (103.1 - 30) - 30 \cdot \ln\left(\frac{103.1}{30}\right) \right)$$

$$Exergy = 12.07kW$$

$$Exergy = 0.084 \times 3.985 \times \left( (102.8 - 30) - 30 \cdot \ln\left(\frac{102.8}{30}\right) \right)$$

$$Exergy = 12.00kW$$

เอ็กเซอร์ยีผิวเตาเผาซ้ำ

$$Exergy = \left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right) \cdot Q$$



$$\text{Exergy} = \left(1 - \frac{30^\circ\text{C}}{278.1^\circ\text{C}}\right) \times 7.61\text{kW}$$

$$\text{Exergy} = 6.79\text{kW}$$

$$\text{Exergy} = \left(1 - \frac{30^\circ\text{C}}{266.3^\circ\text{C}}\right) \times 6.90\text{kW}$$

$$\text{Exergy} = 6.12\text{kW}$$

ก.2.3 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอ็กเซอร์ยีสารทำงานขาเข้า

$$\text{Exergy} = mC_p \left( (T_i - T_a) - T_a \cdot \ln\left(\frac{T_i}{T_a}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 0.084 \times 3.95 \times \left( (103.1 - 30) - 30 \cdot \ln\left(\frac{103.1}{30}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 11.97\text{kW}$$

$$\text{Exergy} = 0.084 \times 3.95 \times \left( (102.8 - 30) - 30 \cdot \ln\left(\frac{102.8}{30}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 11.90\text{kW}$$

เอ็กเซอร์ยีสารทำงานขาออก

$$\text{Exergy} = mC_p \left( (T_i - T_a) - T_a \cdot \ln\left(\frac{T_i}{T_a}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 0.084 \times 3.95 \times \left( (88.54 - 30) - 30 \cdot \ln\left(\frac{88.54}{30}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 8.65\text{kW}$$

$$\text{Exergy} = 0.084 \times 3.95 \times \left( (86.45 - 30) - 30 \cdot \ln\left(\frac{86.45}{30}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 8.20\text{kW}$$

เอ็กเซอร์ยีอากาศขาเข้า

$$\text{Exergy} = mC_p \left( (T_i - T_a) - T_a \cdot \ln\left(\frac{T_i}{T_a}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 0.781 \times 1.005 \times \left( (30.6 - 30) - 30 \cdot \ln\left(\frac{30.6}{30}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 0.0046\text{kW}$$

$$\text{Exergy} = 0.781 \times 1.005 \times \left( (30.7 - 30) - 30 \cdot \ln\left(\frac{30.7}{30}\right) \right)$$

$$\text{Exergy} = 0.0063\text{kW}$$

เอ็กเซอร์ยีอากาศขาออก

$$Exergy = mC_p \left( (T_i - T_a) - T_a \cdot \ln \left( \frac{T_i}{T_a} \right) \right)$$

$$Exergy = 0.781 \times 3.985 \times \left( (37.6 - 30) - 30 \cdot \ln \left( \frac{37.6}{30} \right) \right)$$

$$Exergy = 0.65kW$$

$$Exergy = 0.781 \times 3.985 \times \left( (36.49 - 30) - 30 \cdot \ln \left( \frac{36.49}{30} \right) \right)$$

$$Exergy = 0.48kW$$

ก.2.1 การวิเคราะห์เอ็กเซอร์ยีโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

เอ็กเซอร์ยีพลังงานแสงอาทิตย์

$$Exergy = \left( 1 - \frac{T_a}{T_i} \right) \cdot Q$$

$$Exergy = \left( 1 - \frac{30^\circ C}{5727^\circ C} \right) \times 11.90kW$$

$$Exergy = 11.84kW$$

$$Exergy = \left( 1 - \frac{30^\circ C}{5727^\circ C} \right) \times 7.86kW$$

$$Exergy = 7.82kW$$

เอ็กเซอร์ยีอากาศเอ็กเซอร์ยีผลิตภัณฑ์

$$Exergy = \left( 1 - \frac{T_a}{T_i} \right) \cdot Q$$

$$Exergy = \left( 1 - \frac{30^\circ C}{5727^\circ C} \right) \times 2.26kW$$

$$Exergy = 2.25kW$$

เอ็กเซอร์ยีผนัง

$$Exergy = \left( 1 - \frac{T_a}{T_i} \right) \cdot Q$$

$$Exergy = \left( 1 - \frac{30^\circ C}{37.5^\circ C} \right) \times 2.21kW$$

$$Exergy = 0.44kW$$

$$Exergy = \left( 1 - \frac{30^\circ C}{37.5^\circ C} \right) \times 2.88kW$$

$$Exergy = 0.58kW$$

เอ็กเซอร์ยีพื้น

$$Exergy = \left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right) \cdot Q$$

$$Exergy = \left(1 - \frac{30^\circ C}{37.6^\circ C}\right) \times 0.51 kW$$

$$Exergy = 0.11 kW$$

$$Exergy = \left(1 - \frac{30^\circ C}{37.6^\circ C}\right) \times 0.42 kW$$

$$Exergy = 0.09 kW$$

### ก.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการอบแห้ง

ก.3.1 ประสิทธิภาพการอบแห้ง

$$\eta_{dry} = \frac{m_w \cdot L}{(I \cdot A) + Q_{HE}}$$

$$\eta_{dry} = \frac{61.2 kg \times 2257 \frac{kJ}{kg}}{\frac{721.71 \frac{W}{m^2} \times 14 m^2}{1000} + 8.53 kW}$$

$$\eta_{dry} = 12.11\%$$

### ก.4 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

$$\omega = \frac{100 + i_{in}}{100 + i_f}$$

$$\omega = \frac{100 + 3.25\%}{100 + 4.00\%}$$

$$\omega = 99.99\%$$

$$C_{op} = C_{fuel} + C_{material} + C_{chilli} + C_{lab}$$

$$C_{op} = (2880 \times 3 \times 12) + (2670 \times 1.5 \times 12) + (20000 \times 12) + (1575 \times 12 \times 12) + (300 \times 20 \times 12)$$

$$C_{op} = 690,540 Bath$$

$$C_{annual} = \left[ C_T + \sum_{i=1}^N (C_{main,i} + C_{op,i}) \omega^i \right] \left[ \frac{\omega - 1}{\omega(\omega^N - 1)} \right]$$

$$C_{annual} = (750000 + 3827413) \times \left( \frac{0.9999 - 1}{0.9999 \times (0.9999^{10} - 1)} \right)$$

$$C_{annual} = 416,284 Bath$$

$$Z = \frac{C_{annual}}{M_{dry}}$$

$$Z = \frac{416,284 \text{ Bath}}{22680 \text{ kg}}$$

$$PBP = \frac{C_T}{\left( (M_{dry} P_d + M_b P_b) \times 12 \right) - \left( (M_f P_f + M_{biomass} P_{biomass}) \times 12 \right) - (M_f P_{dh} + M_{wf} P_{wf}) - C_{annual}}$$

$$PBP = \frac{750000}{589975.53}$$

$$PBP = 1 \text{ year } 3 \text{ months } 7 \text{ days}$$

#### ก.5 การแปลงหน่วยฝุ่นละอองจาก ppm เป็น $\text{mg}/\text{m}^3$

concentration ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) = 0.0409 x concentration (ppm) x molecular weight

ที่เตาเผาชำ ฦ เวลา 30 นาที โดยพิจารณาว่าฝุ่นละอองโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วย CO

$$276 (\text{mg}/\text{m}^3) = 0.0409 \times 241 (\text{ppm}) \times 28.01 (\text{g}/\text{mol})$$

#### ข. ตารางแสดงผลการทดลอง

ค่าพลังงานขาเข้าและขาออกทั้งหมดจะแสดงดังตารางที่ 5 6 7 และ 8 โดยจะแทนสัญลักษณ์ค่าพลังงานต่าง ๆ รายละเอียดดังนี้

1. พลังงานไบโอชาร์, Q1
2. พลังงานผลผลิต, Q2
3. พลังงานสารทำงาน, Q3
4. พลังงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, Q4
5. พลังงานแท้งก์น้ำร้อน, Q5
6. พลังงานปล่องเตาเผาชำ, Q6
7. พลังงานผิวเตาเผาชำ, Q7
8. พลังงานผิวเตาไบโอชาร์, Q8
9. พลังงานผนังโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, Q9
10. พลังงานพื้นโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์, Q10
11. พลังงานปล่องนำความร้อน, Q11
12. พลังงานชีวมวล, Q12
13. พลังงานเชื้อเพลิงเตาเผาชำ, Q13
14. พลังงานเชื้อเพลิงเตาไบโอชาร์, Q14
15. พลังงานแสงอาทิตย์, Q15

ตารางที่ 5 แสดงพลังงานความร้อนขาเข้าของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีวมวล	พลังงานความร้อนขาเข้า (kW)			
	Q12	Q13	Q14	Q15
เปลือกลำไย	415.57	279.66	199.76	27.04
แกลบ	297.13	279.66	199.76	24.47
ซังข้าวโพด	395.75	279.66	199.76	35.44

ตารางที่ 6 แสดงพลังงานความร้อนขาเข้าของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีวมวล	พลังงานความร้อนขาเข้า (kW)			
	Q12	Q13	Q14	Q15
เปลือกลำไย	412.48	279.66	199.76	19.76
แกลบ	293.80	279.66	199.76	14.37
ซังข้าวโพด	404.56	279.66	199.76	22.88

ตารางที่ 7 แสดงพลังงานความร้อนขาออกของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีวมวล	พลังงานความร้อนขาออก										
	พลังงานที่ใช้ประโยชน์ (kW)					พลังงานสูญเสีย (kW)					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11
เปลือกลำไย	391.7	15.3	17.7	8.5	18.0	240.8	14.1	12.8	15.3	0.8	16.4
แกลบ	227.1	12.5	17.6	8.8	17.6	243.8	15.4	11.4	12.5	1.4	18.1
ซังข้าวโพด	423.3	9.7	17.5	8.6	17.3	245.6	19.7	9.5	9.7	1.1	9.6

ตารางที่ 8 แสดงพลังงานความร้อนขาออกของระบบการผลิตไบโอชาร์ร่วมกับโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีวมวล	พลังงานความร้อนขาออก										
	พลังงานที่ใช้ประโยชน์ (kW)						พลังงานสูญเสีย (kW)				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11
เปลือกลำไย	395.3	2.3	45.2	8.5	43.7	239.7	14.5	13.9	5.1	0.9	14.2
แกลบ	223.7	1.7	46.4	8.8	44.3	254.0	15.0	10.6	3.1	0.9	15.8
ซังข้าวโพด	426.0	1.9	45.4	9.2	44.2	234.2	19.7	13.2	5.3	1.0	9.8

ตารางที่ 9 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีวมวล	ค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์			
	เอ็กเซอร์ยีชีวมวล (kW)	เอ็กเซอร์ยีเชื้อเพลิง (kW)	เอ็กเซอร์ยีไบโอชาร์ (kW)	เอ็กเซอร์ยีที่ถูกลำลาย (kW)
	เปลือกลำไย	415.56	199.75	391.74
แกลบ	297.12	199.75	227.12	269.76
ซังข้าวโพด	395.74	199.75	423.25	172.24

ตารางที่ 10 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาซ้ำของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีวมวล	ค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาซ้ำ			
	เอ็กเซอร์ยีเชื้อเพลิง (kW)	เอ็กเซอร์ยีปล่องควัน (kW)	เอ็กเซอร์ยีสารทำงาน (kW)	เอ็กเซอร์ยีผิวเตาเผาซ้ำ (kW)
	เปลือกลำไย	279.66	230.73	9.44
แกลบ	279.66	233.73	9.64	13.77
ซังข้าวโพด	279.66	235.56	9.66	17.57



ตารางที่ 11 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีว มวล	ค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน			
	เอ็กเซอร์ยีสาร ทำงานขาเข้า (kW)	เอ็กเซอร์ยีสารทำงาน ขาออก (kW)	เอ็กเซอร์ยีอากาศ ขาเข้า (kW)	เอ็กเซอร์ยีอากาศ ขาออก (kW)
เปลือก ลำไย	9.36	7.06	0.09	0.95
กลีบ ซัง	9.51	7.27	0.09	0.94
ข้าวโพด	9.58	6.82	0.16	1.13

ตารางที่ 12 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 2 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีว มวล	ค่าเอ็กเซอร์ยีของโดมอบแห่งพลังงานแสงอาทิตย์				
	เอ็กเซอร์ยีพลังงาน แสงอาทิตย์ (kW)	เอ็กเซอร์ยี อากาศ (kW)	เอ็กเซอร์ยี ผลิตภัณฑ์ (kW)	เอ็กเซอร์ยี ผนัง (kW)	เอ็กเซอร์ยี พื้น (kW)
เปลือก ลำไย	26.90	1.61	1.32	1.27	0.31
กลีบ ซัง	24.34	1.43	1.23	1.04	0.28
ข้าวโพด	35.25	1.61	1.37	1.50	0.30

ตารางที่ 13 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีว มวล	ค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาไบโอชาร์			
	เอ็กเซอร์ยีชีวมวล (kW)	เอ็กเซอร์ยีเชื้อเพลิง (kW)	เอ็กเซอร์ยีไบโอชาร์ (kW)	เอ็กเซอร์ยีที่ถูก ทำลาย (kW)
เปลือก ลำไย	412.48	199.76	395.26	216.98
กลีบ	293.80	199.76	223.70	269.85
ซังข้าวโพด	404.56	199.76	426.02	178.29

ตารางที่ 14 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาซ้ำของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีว มวล	ค่าเอ็กเซอร์ยีของเตาเผาซ้ำ			
	เอ็กเซอร์ยีเชื้อเพลิง (kW)	เอ็กเซอร์ยีปล่อง ควัน (kW)	เอ็กเซอร์ยีสาร ทำงาน (kW)	เอ็กเซอร์ยีผิวเตาเผา ซ้ำ (kW)
เปลือก ลำไย	279.66	229.70	24.07	12.91
กลบ ซัง	279.66	244.00	24.96	13.35
ข้าวโพด	279.66	224.22	24.07	8.72

ตารางที่ 15 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีว มวล	ค่าเอ็กเซอร์ยีของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน			
	เอ็กเซอร์ยีสาร ทำงานขาเข้า (kW)	เอ็กเซอร์ยีสารทำงาน ขาออก (kW)	เอ็กเซอร์ยีอากาศ ขาเข้า (kW)	เอ็กเซอร์ยีอากาศ ขาออก (kW)
เปลือก ลำไย	23.86	16.85	0.01	1.13
กลบ ซัง	24.74	17.71	0.01	1.07
ข้าวโพด	24.48	17.31	0.02	1.20

ตารางที่ 16 แสดงค่าเอ็กเซอร์ยีของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ของการทดลองอัตราการไหลสารทำงาน 5 ลิตรต่อนาที

ชนิดชีว มวล	ค่าเอ็กเซอร์ยีของโดมอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์				
	เอ็กเซอร์ยีพลังงาน แสงอาทิตย์ (kW)	เอ็กเซอร์ยี อากาศ (kW)	เอ็กเซอร์ยี ผลิตภัณฑ์ (kW)	เอ็กเซอร์ยี ผนัง (kW)	เอ็กเซอร์ยี พื้น (kW)
เปลือก ลำไย	19.66	1.13	2.25	1.02	0.19
กลบ ซัง	14.30	1.07	1.67	0.61	0.18
ข้าวโพด	22.76	1.13	1.91	1.06	0.20

ตารางที่ 17 แสดงค่าฝุ่นละอองที่ได้จากการทดลองในเตาเผาไบโอชาร์และเตาเผาข้าวในหน่วย ppm

เวลา	ซังข้าวโพด (ppm)		เปลือกกล้วย (ppm)		แกลบ (ppm)	
	เตาเผาข้าว	เตาเผาไบโอชาร์	เตาเผาข้าว	เตาเผาไบโอชาร์	เตาเผาข้าว	เตาเผาไบโอชาร์
30	241	675	201	643	248	628
60	215	737	221	672	220	661
90	189	744	230	683	135	673
120	189	687	199	624	213	702
150	204	568	205	615	211	536
180	175	569	182	609	146	531

ตารางที่ 18 แสดงค่าฝุ่นละอองที่ได้จากการทดลองในเตาเผาไบโอชาร์และเตาเผาข้าวในหน่วย mg/m<sup>3</sup>

เวลา	ซังข้าวโพด (mg/m <sup>3</sup> )		เปลือกกล้วย (mg/m <sup>3</sup> )		แกลบ (mg/m <sup>3</sup> )	
	เตาเผาข้าว	เตาเผาไบโอชาร์	เตาเผาข้าว	เตาเผาไบโอชาร์	เตาเผาข้าว	เตาเผาไบโอชาร์
30	276	773	230	737	284	720
60	246	844	253	770	252	757
90	217	853	264	782	155	771
120	217	787	228	715	244	804
150	234	651	235	705	242	614
180	200	652	209	698	167	609

### ค. การเข้าร่วมประชุมวิชาการและผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมงานวิชาการ ระดับนานาชาติ “The 3rd International Conference on Energy and Power (ICEP2021)” หรือ ICEP2021 จัดงานประชุมวิชาการผ่านโปรแกรม Zoom Meeting เนื่องจากสถานการณ์ COVID-19 ณ วันที่ 18-20 พฤศจิกายน ธันวาคม 2564 เรื่องที่นำเสนอในงานประชุมวิชาการ “Energy Efficiency and Economic Analysis of a Biochar Production System”

## Energy efficiency and economic analysis of a biochar production system

Cite as: AIP Conference Proceedings **2681**, 020047 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0115185>  
Published Online: 17 November 2022

Thinnakrit Naruethanan, Samerkhwan Tantikul, Thanasit Wongsiriamnuay, et al.



View Online



Export Citation

### ARTICLES YOU MAY BE INTERESTED IN

[Carbonization of oil palm empty fruit bunches in a fixed- bed pyrolysis reactor for community use](#)

AIP Conference Proceedings **2681**, 020035 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0128772>

[Design, construction and test of a moving bed carbonizer for agricultural residue utilization](#)

AIP Conference Proceedings **2681**, 020043 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0115396>

[Heavy metal adsorption by biochar made from longan seeds and peels](#)

AIP Conference Proceedings **2681**, 020052 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0115198>



## Energy Efficiency and Economic Analysis of a Biochar Production System

Thinnakrit Naruethanan<sup>1</sup>, Samerkhwan Tantikul<sup>1</sup>, Thanasit Wongsiriamnuay<sup>1, a)</sup>,  
Tipapon Khamdaeng<sup>1</sup>, Nakorn Tippayawong<sup>2</sup> and Numpon Panyoyai<sup>1, b)</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University, San Sai, Chiang Mai, 50290, Thailand

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

<sup>a)</sup> Corresponding author: t.wongsiriamnuay@gmail.com

<sup>b)</sup> n.panyoyai@gmail.com

**Abstract.** This research presents an analysis of the energy efficiency and economics of a biochar production system. Three biomass types were studied: corncobs, rice husks, and longan husks. They were available in large amounts in the northern region of Thailand. The biochar production process can help solve such problems. The product from the process is carbon-rich biochar. The system consisted of two essential parts. The central part constituted five kilns with a 200-liter capacity each and a re-burning kiln heat exchanger with 80 cm of width and 173 cm of height. A 3.8 cm diameter spiral pipe inside the heat exchanger transported a working fluid from a 100-liter storage tank into the system for heat exchange. The byproduct was a hot working fluid that could be used for a drying system. The main product obtained from the system was biochar. It could be suitable for soil improvement in order to increase agricultural productivity. Tests were performed with a volume of biomass 200 liters, moisture content  $\leq 15\%$  w.b., fuel weight 144 kg (60 kg for biochar kilns and 84 kg for the re-burning kiln), fuel feeding every 15 min, and working fluid flow rate of 5 liters/min, respectively. In batch production, high-quality biochar was obtained from corncobs, rice husks, and longan husks at  $76.0 \pm 2.0$ ,  $65.5 \pm 2.8$ , and  $85.5 \pm 1.8$  kg, respectively. It was found that the energy efficiency of the biochar production system from corncobs, rice husks, and longan husks were  $49.75 \pm 0.93\%$ ,  $31.52 \pm 0.78\%$ , and  $46.97 \pm 1.04\%$ , respectively. Economic analysis found that the minimum payback period was obtained for longan husks, followed by corncobs, and rice husks, respectively.

### INTRODUCTION

Biomass is an organic substance that is natural energy storage and can be used to produce energy. These organic compounds are commonly found in wood chips, waste, agricultural waste biomass, etc. In general, agricultural waste biomass is abundant. It is a byproduct of post-harvest management. Agricultural waste biomass has been developed as an alternative energy source instead of fossil energy sources such as oil, gas, etc. [1]. Production of biochar by pyrolysis is the thermal conversion of biomass in confined or deficient air conditions [2]. In biomass pyrolysis, solids, liquids, and gases are produced [3]. Biochar is the final product of biomass waste pyrolysis [4]. The biochar production process has a significant effect on the properties of biochar [5], such as reaction temperature or type of biomass waste [6]. Biochar is a rich source of carbon [7] and contains various minerals [8]. Biochar also has porous properties that result in high water holding capacity [9, 10] and absorb heavy metals. It is, therefore, suitable for soil improvement [11].

Biochar production technology could reduce environmental impact [12, 13] that causes the greenhouse effect or environmental pollution. In the biochar production process, pyrolysis and flue gas are released into the environment, and much energy is wasted [14]. The gas that affects the environment, such as carbon dioxide, methane, nitrous oxide, etc., creates a greenhouse effect that affects global warming. Therefore, the use of waste heat is a solution in the biochar production process as a source of high temperature [15]. Effective heat recovery can be realized by a heat exchanger [16]. A heat exchanger is an apparatus used to transfer heat from one fluid to another [17]. The fluids do

3rd International Conference on Energy and Power, ICEP2021

AIP Conf. Proc. 2681, 020047-1–020047-8; <https://doi.org/10.1063/5.0115185>  
Published by AIP Publishing. 978-0-7354-4257-3/830.00

020047-1

not need to be mixed. Therefore, heat exchangers extract waste heat from the biochar production process in many fields, such as drying. In this work, energy analysis of a biochar production system with waste heat recovery was undertaken.

## EXPERIMENTAL

### Biomass Materials

Corncoobs, rice husks, and longan husks were used in this work. Initial biomass moisture content was determined by measuring the initial and final weight of biomass sampled placed in a hot air oven at 100 °C for 24 h. The average initial moisture contents of corncoobs, rice husks, and longan husks were  $10.03 \pm 2.15$  %w.b.,  $12.67 \pm 1.57$  %w.b. and  $10.93 \pm 1.01$  %w.b. respectively. The average initial moisture content of fuel was  $9.13 \pm 0.43$  %w.b.

### Experimental Procedure and Measurement Uncertainty

Figure 1 shows the biochar production system. It was divided into two parts, five 200-liter biochar kilns and a re-burning kiln. The work process was to produce biochar from the five kilns. The flue gas containing smoke from the process was forced into the re-burning kiln and the smoke collector. Furthermore, the waste heat from the flue gas was recovered and transferred to the working fluid through a coil heat exchanger inside the re-burning kiln. At the same time, re-burning air was fed in at the front of the kiln. A pump drove the working fluid flow.

During the biochar production trials, it was sunny and no rain. Data collected were biomass weight, fuel weight, temperature, working fluid flow rate, and re-burning kiln chimney gas velocity. For one experimental case, it took three h. A total of 12 temperature measurements were performed using type K thermocouples. A working fluid flow meter was set to stabilize the flow rate at five liters/min. Measurements were repeated to ensure reasonable certainty. The working fluid in the heat exchanger was a mixture of water and ethylene glycol at a ratio of 70:30 [18]. Air velocity measurements were performed using a DIGICON anemometer model DA-43. A scale performed determination of biomass and fuel mass with  $\pm 0.01$  g accuracy. Temperatures were recorded every 5 min using a Wisco AI210 data logger connected to a computer during the experiment. Table 1 shows measurement uncertainties from related parameters.



FIGURE 1. Structure of biochar production system

TABLE 1. Measurement uncertainty of the parameters.

Parameters	Unit	Uncertainty
Air velocity	m/s	$\pm 0.02$
Working fluid flow rate	L.P.M.	$\pm 0.02$
Fuel moisture content	%w.b.	$\pm 0.15$
Corn cob moisture content	%w.b.	$\pm 2.15$
Rice husks moisture content	%w.b.	$\pm 1.57$
Longan husks moisture content	%w.b.	$\pm 1.01$



### Energy Analysis

Energy balance, input, and output energy can be expressed as follows [19];

$$\sum E_{in} = \sum E_{out} \quad (1)$$

$$\sum E_{in} = Q_{biomass} + Q_{fuel} \quad (2)$$

$$\sum E_{out} = Q_{biochar} + Q_{wf} + \sum E_{loss} \quad (3)$$

Determination of fuel, biomass, and biochar energy can be obtained from [20];

$$Q_m = M \times VC \quad (4)$$

where  $M$  is the weight of materials (kg/h), and  $VC$  is the calorific of materials (kJ/kg). Heat exchange of the working fluid can be obtained from the following [21];

$$Q_{wf} = \dot{m}c_{p,wf}(T_{wf,o} - T_{wf,i}) \quad (5)$$

where  $\dot{m}$  is mass flow rate (kg/s). Energy loss occurred from surface heat loss, chimney heat loss, and destroyed energy. They can be expressed as [22, 25];

$$\sum E_{loss} = Q_s + Q_c + Q_d \quad (6)$$

$$Q_d = \sum E_{loss} - Q_s - Q_c \quad (7)$$

$$Q_s = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (8)$$

$$Q_s = hA(T_s - T_a) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) \quad (9)$$

where  $h$  is the coefficient of convective heat transfer ( $W/m^2-K$ ),  $\varepsilon$  is coefficient of heat radiation,  $\sigma$  is Stefan Boltzman constant =  $5.67 \times 10^{-8}$  ( $W/m^2-K^4$ ).  $Q_c$  is a chimney heat loss, calculated from Eq. (10) [22].

$$Q_c = \dot{m}c_{p,g}(T_o - T_i) \quad (10)$$

Thermal efficiency is defined as

$$\eta = \frac{\sum E_{out}}{\sum E_{in}} \quad (11)$$

### Economic Analysis

Biochar production cost ( $C_t$ ) includes the cost of biochar kilns and re-burning kilns ( $C_{st}$ ), the cost of raw materials ( $C_{rm}$ ) and the labor costs ( $C_{li}$ ) [21].

$$C_t = C_{st} + C_{rm} + C_{li} \quad (12)$$

The annual cost of the biochar production system can be obtained from [23];

$$C_a = [C_t + \sum_{y=1}^L (C_{m,y} + C_{op,y})\alpha^y] \left[ \frac{\alpha-1}{\alpha(\alpha^L-1)} \right] \quad (13)$$

where,  $C_{m,y}$  and  $C_{op,y}$  are maintenance costs representing 10% of  $C_t$  and operating costs in the year  $y$ , respectively.  $L$  is the life of the system and  $\alpha$  is defined as:

$$\alpha = \frac{100+i_d}{100+i_f} \quad (14)$$

where  $i_d$  and  $i_f$  are the interest rate and the inflation rate, respectively. The annual cost per biochar unit can be calculated as

$$A/B = \frac{C_a}{M_{biochar}} \quad (15)$$

where,  $M_{biochar}$  is the amount of biochar obtained from the biochar production system. The payback period can be calculated as

$$PBP = \frac{C_t}{M_{biochar}P_{biochar} + \sum M_{rm}P_{rm} + M_{biochar}(A/B)} \quad (16)$$

where,  $P_{biochar}$  is the price of biochar (Baht/kg).  $M_{rm}$  is the amount of raw material (kg). and  $P_{rm}$  is the price of raw materials (Baht/kg).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Biochar Products

The experiments were conducted for the whole month of June 2021. Longan wood with a total weight of 144 kg was used as fuel. The moisture content of the biomass used for biochar production was shown in Table 2. All were less than 15% w.b. A biomass volume of about 200 liters per kiln was loaded.

Average biochar yields obtained from the experiment are shown in Table 3. The temperature was controlled to be above 300 °C at all times [24]. It was found that the biochar yields from corncobs, rice husks, and longan husks were high. The energy content of each biochar is shown in Table 4.

TABLE 2. Moisture contents of the biomass used

Biomass type	Moisture Content (%)
Corn cob	10.03 ± 2.15
Rice husk	12.67 ± 1.57
Longan husk	10.93 ± 1.01
Longan wood (as fuel)	9.13 ± 0.43

TABLE 3. Biochar yields.

Biomass type	Biomass weight (kg)	Biochar weight (kg)	Biochar yield (%)
Corn cob	125.67±0.85	76.00±1.63	60.47±1.05
Rice husk	110.33±1.03	65.50±2.27	59.35±1.51
Longan husk	133.17±1.70	85.50±1.47	64.22±1.37

TABLE 4. Energy contents of biomass and biochar

Biomass type	The energy of biomass (kJ/kg)	The energy of biochar (kJ/kg)
Corn cob	17304.04	29877.00
Rice husk	14390.03	18442.85
Longan husk	16684.40	25258.96

### Energy Balance and Efficiency

Figures 2 to 7 show energy analysis results on biochar production from corncobs, rice husks, and longan husks. It was found that the biomass type had a statistically significant effect (p-value < 0.05) on the energy output of each biochar. Because the chemical structure of each biomass type was different [25], when converted to biochar, their heating values were different. The highest recovered heat was found in the system operated for rice husk, followed by corn cobs and longan husks, with average values of 10.07, 9.25, and 9.17 kW, respectively. When the above data were analyzed statistically, there was no significant difference due to the limitations of the heat exchanger inside the re-burning kiln. The energy balance analysis indicated that change in biomass type had a statistically significant effect on the system efficiency. The efficiency of the system is shown in Figure 8.

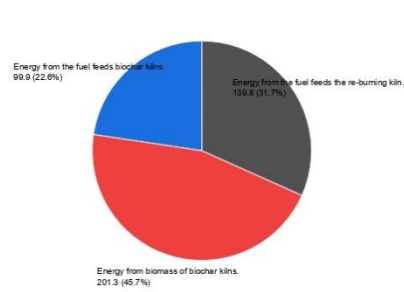


Figure 2. Average energy inlet from corn cob

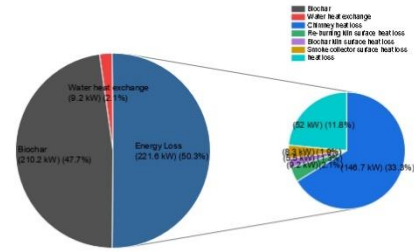


Figure 3. Average energy outlet from corn cob

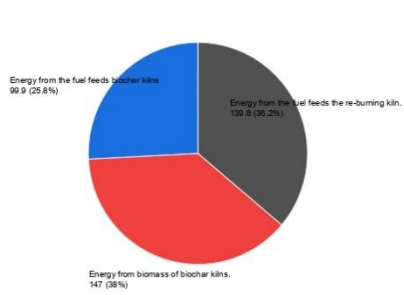


Figure 4. Average energy inlet from rice husks

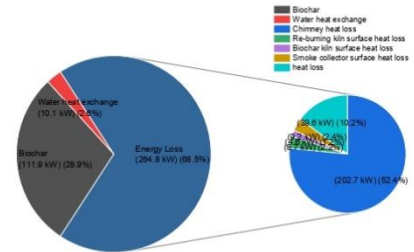


Figure 5. Average energy outlet from rice husks

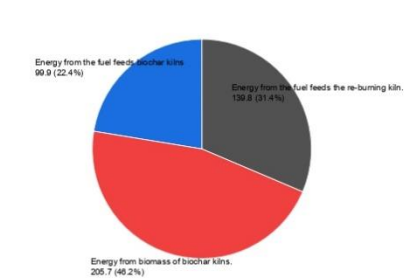


Figure 6. Average energy inlet from longan husks

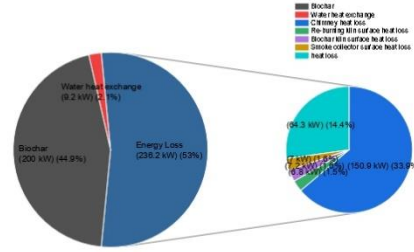


Figure 7. Average energy outlet from longan husks

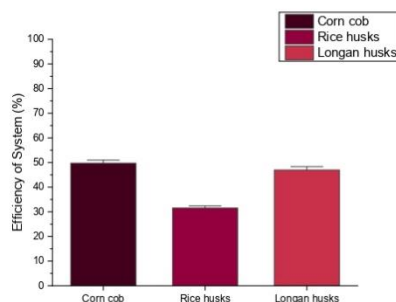


Figure 8. Efficiency of system

### Economic Analysis Results

Economic analysis results of the biochar production system are shown in Table 5. It was found that the total costs of the experiment for corncobs, rice husks, and longan husks were about 857,000 Baht/year, 881,000 Baht/year, and 935,000 Baht/year, respectively. The costs of biochar production were 158,568 Baht/year, 160,128 Baht/year, and 165,528 Baht/year, and biochar sales revenue were 936,000 Baht/year 780,000 Baht/year, and 1,020,000 Baht/year for corncobs, rice husks, and longan husks, respectively. It can be seen that when conducting continuous production for 20 days a month (working costs 300 baht per day), the capital investment could be returned within 8.23, 9.35, and 8.04 months for corncobs rice husks and longan husks, respectively. Furthermore, the payback period is shown in Figure 9.

Table 5. Costs and economic parameters

Total cost	
- Corn cobs	856,680
- Longan husks	935,280
- Rice husks	881,280
The annual cost of biochar production	Baht/year
- Corn cobs	158,568
- Longan husks	165,528
- Rice husks	160,128
Interest rate (%)	5
Inflation rate (%)	1.2
The expected life of the system	5
Price of fresh biomass	Baht/kg
- Corn cobs	3
- Longan husks	5
- Rice husks	4
Price of biochar for all kinds (Baht/kg)	50
Working period (day/month)	20

### CONCLUSION

In this work, energy and economic analysis of the biochar production system was conducted for three different biomass types: corncobs, rice husks, and longan husks. The biomass type that resulted in the highest system efficiency of 49.75±0.93% was corn cobs. When analyzing the economic cost-effectiveness of the biochar production systems, it was found that longan husks had the fastest payback period of about eight months with variable costs of 275,280 baht a year. The revenue that came from selling biochar was 1,020,000 baht per year.

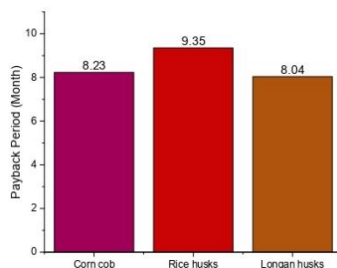


Figure 9. Payback period.

### ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by Thailand Research Fund (contract no. RDG6250016), Graduate School's scholarship, and Faculty of Engineering and Agro-Industry, Maejo University.

### REFERENCES

1. Cai, X., et al., *Conversion of chitin biomass into 5-hydroxymethylfurfural: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. **150**: p. 111452.
2. Hu, Q., et al., *Biochar industry to circular economy*. *Science of The Total Environment*, 2021. **757**: p. 143820.
3. Schneider, D., et al., *Characterization of biochar from hydrothermal carbonization of bamboo*. *International journal of energy and environment*, 2011. **2**(4): p. 647-652.
4. Yang, W., et al., *Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip irrigation with mulching*. *Science of The Total Environment*, 2020. **729**: p. 138752.
5. Panyoyai, N., et al., *Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types*. *Engineering Access*, 2019. **5**(2): p. 59-64.
6. Srisophon, M., et al. *Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. IOP Publishing.
7. Lee, Y., et al., *Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C*. *Bioresource Technology*, 2013. **148**: p. 196-201.
8. Sompam, W., et al. *Effect of process conditions on properties of biochar from agricultural residues*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. IOP Publishing.
9. Dissanayake, P.D., et al., *Sustainable gasification biochar as a high efficiency adsorbent for CO<sub>2</sub> capture: A facile method to designer biochar fabrication*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020. **124**: p. 109785.
10. Jeyasubramanian, K., et al., *A complete review on biochar: Production, property, multifaceted applications, interaction mechanism and computational approach*. *Fuel*, 2021. **292**: p. 120243.
11. Petchaihan, L., et al. *Test of a modified small-scale biochar kiln*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. IOP Publishing.
12. Dunnigan, L., et al., *Emission characteristics of a pyrolysis-combustion system for the co-production of biochar and bioenergy from agricultural wastes*. *Waste Management*, 2018. **77**: p. 59-66.
13. Yang, Q., et al., *Country-level potential of carbon sequestration and environmental benefits by utilizing crop residues for biochar implementation*. *Applied Energy*, 2021. **282**: p. 116275.
14. Jiang, Y., et al., *Performance investigation of a counterflow packing tower for flue gas waste heat recovery*. *Applied Thermal Engineering*, 2021. **196**: p. 117315.
15. Kuznetsov, G.V., et al., *Features of the processes of heat and mass transfer when drying a large thickness layer of wood biomass*. *Renewable Energy*, 2021. **169**: p. 498-511.

16. Tang, S., et al., *Effect of the double vacancy on heat transfer performance of solid particle bed in particle waste heat recovery*. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021. **125**: p. 105313.
17. Pankaew, S., et al. *Simulation and experimental analysis of shell and tube heat exchanger for the drying system*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. IOP Publishing.
18. Manikandan, S.P. and R. Baskar, *Heat transfer studies in compact heat exchanger using ZnO and TiO<sub>2</sub> nanofluids in ethylene glycol/water*. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 2018. **24**(4): p. 309-318.
19. Mittal, A. and D. Rakshit, *Energy audit and waste heat recovery from kiln hot shell surface of a cement plant*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020. **19**.
20. Sangsuk, S., C. Buathong, and S. Suebsiri, *High-energy conversion efficiency of drum kiln with heat distribution pipe for charcoal and biochar production*. *Energy for Sustainable Development*, 2020. **59**: p. 1-7.
21. Mugi, V.R. and V. Chandramohan, *Energy, exergy and economic analysis of an indirect type solar dryer using green chilli: A comparative assessment of forced and natural convection*. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021. **24**: p. 100950.
22. Pandey, M., B.N. Padhi, and I. Mishra, *Performance analysis of a waste heat recovery solar chimney for nocturnal use*. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2021. **24**(1): p. 1-10.
23. El khadraoui, A., et al., *Drying of red pepper slices in a solar greenhouse dryer and under open sun: Experimental and mathematical investigations*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019. **52**: p. 262-270.
24. Panyoyai, P., et al. *Comparison between simulations and experiment for heat transfer characteristics in the re-burning kiln heat exchanger*. in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. IOP Publishing.
25. Zhu, X., Y. Li, and X. Wang, *Machine learning prediction of biochar yield and carbon contents in biochar based on biomass characteristics and pyrolysis conditions*. *Bioresource Technology*, 2019. **288**: p. 121527.



## บรรณานุกรม

- Akpınar, E. K. & Koçyiğit, F. 2010. Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates. **Applied energy**, 87(11), 3438-3450.
- Amer, B. M., Gottschalk, K. & Hossain, M. 2018. Integrated hybrid solar drying system and its drying kinetics of chamomile. **Renewable Energy**, 121(539-547).
- Amjad, W., Gilani, G. A., Munir, A., Asghar, F., Ali, A. & Waseem, M. 2020. Energetic and exergetic thermal analysis of an inline-airflow solar hybrid dryer. **Applied Thermal Engineering**, 166(114632).
- Borgohain, A., Konwar, K., Buragohain, D., Varghese, S., Dutta, A. K., Paul, R. K., Khare, P. & Karak, T. 2020. Temperature effect on biochar produced from tea (*Camellia sinensis* L.) pruning litters: A comprehensive treatise on physico-chemical and statistical approaches. **Bioresource Technology**, 318(124023).
- Cengel, Y. A., Boles, M. A., อัครทิวา, ร. ต. ส. & วงษ์ขาริ, ผ. ต. ข. 2011. เทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamics: an engineering approach, 7th edition). McGraw-Hill International Enterprise Inc.
- Daghigh, R. & Shafieian, A. 2016. Energy-exergy analysis of a multipurpose evacuated tube heat pipe solar water heating-drying system. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 78(266-277).
- Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M. Y. & Ruslan, M. H. 2014. Energy and exergy analyses of solar drying system of red seaweed. **Energy and Buildings**, 68(121-129).
- Houghton, J. T. 1986. IPCC (intergovernmental panel on climate change). **The science of climate change**.
- Intagun, W., Khamdaeng, T., Prom-Ngarm, P. & Panyoyai, N. 2018. Effect of core puncture diameter on bio-char kiln efficiency. **International Journal of Biotechnology and Bioengineering**, 12(11), 435-439.
- Manyà, J. J., Azuara, M. & Manso, J. A. 2018. Biochar production through slow pyrolysis of different biomass materials: Seeking the best operating conditions.

**Biomass and Bioenergy**, 117(115-123).

- Mugi, V. R. & Chandramohan, V. 2021. Energy, exergy and economic analysis of an indirect type solar dryer using green chilli: A comparative assessment of forced and natural convection. **Thermal Science and Engineering Progress**, 24(100950).
- Ndukwu, M. C., Horsfall, I. T., Ubouh, E. A., Orji, F. N., Ekop, I. E. & Ezejiolor, N. R. 2020. Review of solar-biomass pyrolysis systems: Focus on the configuration of thermal-solar systems and reactor orientation. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**.
- Numpon Panyoyai, T. W., Samerkhwan Tantikul, Sanwasan Yodkhum,. 2012. The Use of biomass Gas for Rice Drying. **Agricultural Science Journal**, 43(3), 79-82.
- Oginni, O., Singh, K. & Zondlo, J. W. 2017. Pyrolysis of dedicated bioenergy crops grown on reclaimed mine land in West Virginia. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, 123(319-329).
- Ortiz-Rodríguez, N., García-Valladares, O., Pilatowsky-Figueroa, I. & Menchaca-Valdez, A. 2020. Solar-LP gas hybrid plant for dehydration of food. **Applied Thermal Engineering**, 177(115496).
- Pankaew, S., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T., Khamdaeng, T., Tippayawong, N. & Panyoyai, N. 2020. **Simulation and experimental analysis of shell and tube heat exchanger for the drying system**. IOP Publishing.
- Panyoyai, N., Pathike, P., Wongsiriamnuay, T., Khamdeang, T. & Tanongkankit, Y. 2016. Drying characteristics of paddy dried by thermosyphon heat pipe heat exchanger. **Journal of Science and Technology**, 35(6), 658-664.
- Panyoyai, N., Petchaihan, L., Wongsiriamnuay, T., Hiransatitporn, B. & Khamdaeng, T. 2019. Simulation of temperature distribution in biochar kiln with different feedstock types. **Engineering Access**, 5(2), 59-64.
- Panyoyai, P. 2021. **EFFICIENCY OF HEAT STORAGE SYSTEM FROM BIOCHAR PRODUCTION PROCESS**. Master of Engineering. Maejo University.
- Panyoyai, P., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T., Khamdaeng, T., Tippayawong, N. & Panyoyai, N. 2020. Comparison between simulations and experiment for heat

- transfer characteristics in the re-burning kiln heat exchanger. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 463(1), 012136.
- Petchaihan, L., Panyoyai, N., Khamdaeng, T. & Wongsiriamnuay, T. 2020. **Test of a modified small-scale biochar kiln**. IOP Publishing.
- Ptasinski, K. J. 2016. **Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries**. Simultaneously in Canada: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Rinkam, T., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T., Panyoyai, N., Tippayawong, N. & Khamdaeng, T. 2022. **Heavy metal adsorption by biochar made from longan seeds and peels**. AIP Publishing LLC.
- Sittioad, C., Tantikul, S., Wongsiriamnuay, T., Khamdaeng, T., Tippayawong, N. & Panyoyai, N. 2022. **Temperature distribution and properties of biochar from a two-heating-stage kiln**. AIP Publishing LLC.
- Söğüt, Z., Oktay, Z. & Karakoç, H. 2010. Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln. **Applied Thermal Engineering**, 30(8-9), 817-825.
- Somporn, W., Panyoyai, N., Khamdaeng, T., Tippayawong, N., Tantikul, S. & Wongsiriamnuay, T. 2020. **Effect of process conditions on properties of biochar from agricultural residues**. IOP Publishing.
- Songchai Pankaew. 2021. **Application of Heat from Biochar Production Process for Drying System**. Master Degree. Maejo University.
- Srisophon, M., Khamdaeng, T., Panyoyai, N. & Wongsiriamnuay, T. 2020. **Characterization of thermal distribution in 50-Liter biochar kiln at different heating times**. IOP Publishing.
- Waranya Somporn. 2020. **Biochar Production with Pyrolysis Process from Agricultural Residue**. Master degree. Maejo University.
- Wongsiriamnuay, T., Khamdaeng, T., Panyoyai, P., Sutassanamarlee, N., Klinkajorn, P. & Panyoyai, N. 2019. Thermal Properties and Agricultural Products of Biochar Production.
- Yang, C. D. & Lu, S. G. 2021. Effects of five different biochars on aggregation, water retention and mechanical properties of paddy soil: A field experiment of three-season crops. **Soil and Tillage Research**, 205(

Yuan, W., Boyette, M. D., Wang, D. & Kumar, A. 2016. Characterization of biochar from rice hulls and wood chips produced in a top-lit updraft biomass gasifier.

**Transactions of the ASABE**, 59(3), 749-756.

Zhu, X., Li, Y. & Wang, X. 2019. Machine learning prediction of biochar yield and carbon contents in biochar based on biomass characteristics and pyrolysis conditions. **Bioresource Technology**, 288(121527).

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2554). คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน. Retrieved. from.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2554. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน.

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ส. ช. 2560. คู่มือมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม.

กระทรวงพลังงาน, ก. 2553. คู่มือผู้รับผิดชอบด้านพลังงาน (โรงงาน).

กันยา พรไชยวงศ์และสิทธิบุรณ์ ศิริพรอัครชัย. การวิเคราะห์พารามิเตอร์การผลิตถ่านชีวภาพจากชังข้าวโพดด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า.

กุลนันท์ วีรณรงค์กรและอมรชัย อภรณ์วิชานพ. 2015. ไพโรไลซิส (Pyrolysis). Available

จรรย์พงษ์ คูหากาญจน์. 2552. การผลิตถ่านและน้ำมันส้มควันไม้ (Charcoal & Wood Vinegar). บริษัทออฟเซ็ท ครีเอชั่นจำกัด กรุงเทพฯ.

ฉัตร ผลนาค, สุวิทย์ เพชรห้วยลึก, ภรพนา บัวเพชร, ปิติ พานิชายุนน & นฤทธิ กล่อมพงษ์. 2010. ระบบอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์สำหรับการอบแห้งกระจุต. **ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports**, 12(3), 99-108.

ประสิทธิ์ ตงยั้งศิริ. 1999. การวางแผนและการวิเคราะห์โครงการ : **Project Planning and Analysis**. ซีเอ็ดยูเคชั่น, บมจ.

ปรารธนา แก้วเพชร. 2550. การเตรียมสารดูดซับจากการแยกสลายกากใบชาด้วยความร้อน. ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พจน์ พจนพานิชย์กุล. ต้นทุน และจุดคุ้มทุน. In. มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์.

ภคมน ปินตานา & ปฏิพัทธ์ ถนอมพงษ์ชาติ. 2019. ประสิทธิภาพ ของ ระบบ การ อบ แห้ง ข้าว แต่ น โดย ใช้ แหล่ง พลังงาน ความ ร้อน แบบ ผสมผสาน. **Academic Journal: Uttaradit Rajabhat University**, 14(1), 27-38.

มนตรี พิรุณเกษตร. 2548. การถ่ายเทความร้อน. กรุงเทพฯ: บริษัท วิทย์พัฒน์ จำกัด, กรุงเทพฯ.

วิวัฒน์ อภิลิทธิภิญโญ. 2549. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม (Engineering economics). กรุงเทพฯ : โอเดียนซอฟต์แวร์เทคโนโลยี, 2549.

สมชาติ โสภณธนฤทธิ. 2540. การอบแห้งเมล็ดพืชและอาหารบางประเภท. 7. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.

สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร(องค์การมหาชน). พืชเศรษฐกิจ สินค้าสร้างรายได้ในครัวเรือนและประเทศ. Available [https://www.arda.or.th/knowledge\\_detail.php?id=40](https://www.arda.or.th/knowledge_detail.php?id=40)

อรสา สุกสว่าง. 2011. ยุทธศาสตร์ทำหนึ่งได้สาม: ไบโอดีทเพื่อเพิ่มความสมบูรณ์ให้ดิน ลดโลกร้อนและลดความยากจน. ม.ป.ท.. นิตยสารการงานวิจัย บนเส้นทางงานวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ปี 2554 งานเกษตรแฟร์ ประจำปี 2554.







## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ทินกฤต นฤนันต์	
เกิดเมื่อ	2 มกราคม 2541	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2563 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่ โจ้ พ.ศ. 2559 มัธยมศึกษา โรงเรียนนวมินทราชูทิศ มัชฌิม	
ประวัติการทำงาน	2565	Mechanical engineer Forbest Co., LTD.
	2564	Data Analytics Maejo University
	2563	Tutor Le Vent/Smart Brain (San Sai)
	Email	t.naruethanan@gmail.com

