



การทอรรีไฟต์เศษเหลือจากมังคุดสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในเตาระดับ
ครัวเรือน

TORREFACTION OF MANGOSTEEN WASTE FOR USED AS SOLID FUEL IN
HOUSEHOLD STOVE

พรพนิต ชุมศรี

PORNPANIT CHUMSRI

วรรณัย อุ่นสกล

WANTHANAI OUNSAKOOL

ศิริพร สระทอง

SIRIPORN SATHONG

ปฏิญานินพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทอรีไฟต์เศษเหลือจากมังคุดสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในเตาระดับ
ครัวเรือน

TORREFACTION OF MANGOSTEEN WASTE FOR USED AS SOLID FUEL IN
HOUSEHOLD STOVE



พรพนิต ชุมศรี

PORNPANIT CHUMSRI

วรรณัย อุ่นสกล

WANTHANAI OUNSAKOOL

ศิริพร สระทอง

SIRIPORN SATHONG

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมพลังงาน

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TORREFACTION OF MANGOSTEEN WASTE FOR USED AS SOLID FUEL IN
HOUSEHOLD STOVE



PORNPANIT CHUMSRI
WANTHANAI OUNSAKOOL
SIRIPORN SATHONG

A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
AND ENERGY ENGINEERING
DEPARTMENT OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
PRINCE OF CHUMPHON CAMPUS

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

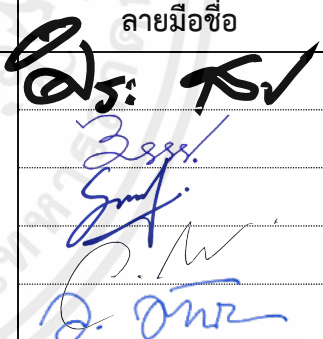
ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การทอรรีไฟด์เศษเหลือจากมังคุดสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในเตาระดับครัวเรือน

PROJECT TITLE TORREFACTION OF MANGOSTEEN WASTE FOR USED AS SOLID FUEL IN HOUSEHOLD STOVE

ชื่อนักศึกษา นางสาวพรนิต ชุมศรี รหัสนักศึกษา 61512057
นายวรธรณัย อุ่นสกล รหัสนักศึกษา 61514013
นางสาวศิริพร สระทอง รหัสนักศึกษา 61514019

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมพลังงาน
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.วรรัชชล วัฒนชะ
ปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์			ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ศิระ	สายศร	กรรมการสอบ	
ดร.อดิเรก	สุริยะวงศ์	กรรมการสอบ	
ดร.ศักรินทร์	ชินกุลพิทักษ์	กรรมการสอบ	
ผศ.วชช	กาลาสี	กรรมการสอบ	
ผศ.วรรัชชล	วัฒนชะ	อาจารย์ที่ปรึกษา	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 9 มิถุนายน 2565 เวลา 13.00 – 18.00 น.

สถานที่สอบ ตึก C ห้อง 112 ห้องประชุมวิทยาศาสตร์

ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ กุศล)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 29 มิถุนายน พ.ศ.2565

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การทอรรีไฟด์เศษเหลือจากมังคุดสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในเตาระดับ ครัวเรือน	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวพรพนิต ชุมศรี	รหัสนักศึกษา 61512057
	นายวรธรณัย อุ่นสกุล	รหัสนักศึกษา 61514013
	นางสาวศิริพร สระทอง	รหัสนักศึกษา 61514019
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมพลังงาน	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.วรรัชชล วัฒนนะ	
ปริญญานิพนธ์		

บทคัดย่อ

มังคุดเป็นผลไม้ที่เกษตรกรปลูกเป็นจำนวนมากและมีการจำหน่ายและส่งออกไปยังต่างประเทศ ซึ่งมังคุดที่มีลักษณะแข็งที่ไม่ผ่านการตรวจสอบจะถูกคัดออก แล้วนำไปเผาทิ้งทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ ต่อมาใน การศึกษาครั้งนี้จึงนำเอาเศษเหลือทิ้งจากมังคุดไปผ่านกระบวนการทอรรีไฟด์ขั้น หรือการทอรรีไฟด์ เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในเตาระดับครัวเรือน โดยทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดเศษเหลือจากมังคุด อุณหภูมิและเวลาในการทอรรีไฟด์ที่มีผลต่อคุณภาพของเศษเหลือจากมังคุด ซึ่งเริ่มต้นจากการใช้ค้อนตีมังคุดให้แตกเพื่อแยกขนาดแล้วไปแช่น้ำเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำมาลดความชื้น จากนั้นนำไปคัดแยกขนาดโดยกำหนดขนาดที่ใช้ในการทดลองคือ ขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมังคุด และขนาดกลางหรือขนาด 1/4 ของลูกมังคุด จากนั้นนำไปผ่านการทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 200 210 220 230 และ 240 องศาเซลเซียสตามลำดับ ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ความดัน 1 บาร์ อัตราการไหลที่ 10 ลิตร/ชั่วโมง และกำหนดเวลาในการทอรรีไฟด์ครั้งละ 30 นาทีและ 45 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวมวลที่ได้จากเศษเหลือจากมังคุด โดยการนำไปหาค่าความชื้น ค่าความร้อนสูง ปริมาณซีเถ้า และประสิทธิภาพการใช้ความร้อนโดยการทดสอบด้วยกระบวนการ Water Boiling Test (WBT) ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้เป็นการทดลองแบบ hot start เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าการทอรรีไฟด์เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมังคุด ที่ช่วงอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 45 นาที มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งเพื่อใช้ในเตาระดับครัวเรือนมากที่สุด โดยค่าความชื้นอยู่ที่ 3.72 เปอร์เซ็นต์ ค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 21.60 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณซีเถ้าอยู่ที่ 3.48 เปอร์เซ็นต์ และค่าประสิทธิภาพการใช้ความร้อนอยู่ที่ 11.35 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : เศษเหลือจากมังคุด ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การทอรรีไฟด์ เชื้อเพลิงแข็ง

Project Title	TORREFACTION OF MANGOSTEEN WASTE FOR USED AS SOLID FUEL IN HOUSEHOLD STOVE		
Student	Miss Pornpanit	Chumsri	Student ID 61512057
	Mr. Wanthanai	Ounsakool	Student ID 61514013
	Miss Siriporn	Sathong	Student ID 61514019
Degree	Bachelor of Engineering		
Program	Mechanical Engineering and Energy Engineering		
Project Advisor	Asst.Prof. Wassachol Wattana		

Abstract

Mangosteen is a fruit grown by many farmers and is sold and exported abroad. Mangosteens with unverified and hard characteristics are excluded and burned, that causing air pollution on humans. In this study, mangosteen waste was taken through the torrefaction process to be used as solid fuel in household stove. Then, the effect of mangosteen residue size, temperature and time of torrefaction process that influence to the quality of mangosteen solid fuel were investigated. First of all, the mangosteen wastes were shattered with a hammer to separate the pieces before being soaked in water for 10 minutes and then dehumidified. The sizes were then classified based on the size utilized in the experiment; big or 1/2 size of mangosteen and medium or 1/4 size of mangosteen were torrefied at temperatures of 200, 210, 220, 230, and 240 degrees Celsius, respectively. Under nitrogen atmosphere at pressure of 1 bar, flow rate of 10 l/h, and times for torrefaction of 30 min and 45 min each, the fundamental properties of mangosteen solid fuel obtained from torrefaction process were analyzed by evaluating the moisture content, high calorific value, ash content and heat efficiency testing with the Water Boiling Test (WBT) process under the hot start experiment condition. The experiment results shows that the residual torrefaction from big size or 1/2 size of mangosteen at 230 °C for 45 minutes was adequate for use as solid fuel in the majority of household stoves. The

moisture content was 3.72 percent, and the calorific value was 21.60 megajoules per kilograms. The ash content was 3.48 percent, while the heat efficiency was 11.35 percent.

Keywords: Mangosteen residue, Fuel combustion efficiency, Torrefaction, Solid fuel



กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรัชชล วัฒนะ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่เลือกโครงการดีๆ ให้และยังให้คำปรึกษาให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการต่อยอดการทำงาน ตลอดจน แก่ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด อีกทั้งยังสอนแนวทางที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงการได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้คณะผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณ นายไชยรัตน์ เพชรศิริและนายนพดล เกตุพิมล ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติ นางสาวอรสา ชูละเอียด ที่แนะนำแนวทางตลอดจนให้คำปรึกษาและ สนับสนุนเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองทำให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร สนับสนุนสถานที่ในการดำเนินงาน

ขอกราบขอบพระคุณนายมงคล สระทอง ที่สนับสนุนและช่วยเหลือในเรื่องวัสดุพิเศษเหลือจาก มังคุดที่ใช้ในการทดลองเพื่อทำโครงการ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ที่ร่วมงานทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือซ้ำเจ้าและสมาชิกในกลุ่ม ที่ทำให้ การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่สนับสนุนทุนทรัพย์ในการศึกษาตลอดมาซ้ำเจ้าขอ ระลึกถึงในพระคุณอันสูงสุดและกราบในพระคุณ ณ ที่นี้

พรพนิต ชุมศรี

วรรณัย อุ้นสกล

ศิริพร สระทอง

มิถุนายน 2565

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูปภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ชีวมวล	4
2.2 เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล	5
2.3 มังคุด (Mangosteen)	7
2.4 เทคโนโลยีการทอรรีแฟคชั่น	13
2.5 ตัวแปรที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทอรรีแฟคชั่น	15
2.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวมวล	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	23
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	23
3.2 องค์ประกอบของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรรีแฟคชั่น	24
3.3 หลักการออกแบบตู้ควบคุม	25
3.4 อุปกรณ์และขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบในการทดสอบ	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	28
3.6 ขั้นตอนวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวมวล	30
บทที่ 4 ผลและการวิจารณ์ผล	35
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอร์รีไฟด์	35
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอร์รีไฟด์	40
4.3 การเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านชีวมวลที่ผ่านการทอร์รีไฟด์แล้ว	47
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลการทดลอง	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	57
ภาคผนวก ก ตรวจสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์	57
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	61
ภาคผนวก ค แบบเตาเผาชั้นใน	75
ประวัติผู้เขียน	78

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนการดำเนินงานของการศึกษาการทอรีไฟต์เศษเหลือจากมังคุดสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในเตาระดับครัวเรือน	3
4.1	ลักษณะทางกายภาพของเศษเหลือจากมังคุด ในช่วงเวลาการทอรีไฟต์ 30 นาที	35
4.2	ลักษณะทางกายภาพของเศษเหลือจากมังคุด ในช่วงเวลาการทอรีไฟต์ 45 นาที	37
4.3	การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงชีวมวลเศษเหลือจากมังคุดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลภายในประเทศไทยที่ผ่านการทอรีไฟต์แล้ว	48
ข.1	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	62
ข.2	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	62
ข.3	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	63
ข.4	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	63
ข.5	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	64
ข.6	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	64
ข.7	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	65
ข.8	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	65
ข.9	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	66
ข.10	ลักษณะการกระจายตัวของอนุหุมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	66

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.11	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	67
ข.12	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	67
ข.13	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	68
ข.14	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	68
ข.15	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่	69
ข.16	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	69
ข.17	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	70
ข.18	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	70
ข.19	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	71
ข.20	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง	71
ข.21	ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังคุดก่อนนำมาผ่านการทอร์รี่ไฟด์	72
ข.22	ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังคุดหลังนำมาผ่านการทอร์รี่ไฟด์เป็นเวลา 30 นาที	72
ข.23	ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังคุดหลังนำมาผ่านการทอร์รี่ไฟด์เป็นเวลา 45 นาที	72
ข.24	ค่าความร้อนสูงของเศษเหลือจากมังคุดหลังนำมาผ่านการทอร์รี่ไฟด์เป็นเวลา 30 นาที	73

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ข.25	ค่าความร้อนสูงของเศษเหลือจากมังคุดหลังนำมาผ่านการทอรีไฟด์เป็น เวลา 45 นาที	73
ข.26	ปริมาณซีเถ้าของเศษเหลือจากมังคุดหลังนำมาผ่านการทอรีไฟด์เป็น เวลา 30 นาที	74
ข.27	ปริมาณซีเถ้าของเศษเหลือจากมังคุดหลังนำมาผ่านการทอรีไฟด์เป็น เวลา 45 นาที	74



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	มังคุด (Mangosteen)	7
2.2	ลักษณะของราก	9
2.3	ลักษณะของลำต้น	9
2.4	ลักษณะของใบ	10
2.5	ลักษณะของดอก	11
2.6	ลักษณะของผล	11
2.7	ลักษณะของเมล็ด	12
2.8	ลำดับชั้นต่าง ๆ ที่เกิดในชั้นกระบวนการทอรรีไฟต์	14
2.9	องค์ประกอบของชีวมวล	15
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงาน	23
3.2	องค์ประกอบของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรรีไฟต์	24
3.3	แผนผังสำหรับควบคุมการทำงานของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรรีไฟต์	25
3.4	ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)	26
3.5	แยกขนาดเศษเหลือจากมังคุด (ก) ขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมังคุด (ข) ขนาดกลางหรือขนาด 1/4 ของลูกมังคุด	26
3.6	เครื่องชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง	27
3.7	จัดเก็บตัวอย่างเศษเหลือจากมังคุด (ก) ขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมังคุด (ข) ขนาดกลางหรือขนาด 1/4 ของลูกมังคุด	27
3.8	เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรรีไฟต์	28
3.9	พิวส์เบรกเกอร์เปิด – ปิดเครื่อง	28
3.10	วาล์วและโรตารีเตอร์	29
3.11	Temperature controller ตัวที่ 1	29
3.12	สวิทช์ระบบ (System)	30
3.13	เครื่อง Bomb calorimeter รุ่น C1, IKA	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.2	ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 30 นาที	40
4.3	ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 45 นาที	41
4.4	ค่าความร้อนสูงของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 30 นาที	42
4.5	ค่าความร้อนสูงของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 45 นาที	43
4.6	ค่าปริมาณขี้เถ้าของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 30 นาที	44
4.7	ค่าปริมาณขี้เถ้าของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 45 นาที	45
4.8	ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 30 นาที	46
4.9	ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 45 นาที	46
ก.1	การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจำนวน 3 จุดภายในเตาปฏิกรณ์	58
ก.2	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เวลา 30 นาที	59
ก.3	ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เวลา 45 นาที	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์

มังคุดเป็นผลไม้ที่เกษตรกรกรมภายในประเทศปลูกเป็นจำนวนมากแล้วยังได้ผลผลิตจากเกษตรกรในปริมาณที่สูง ทำให้ทั้งภาครัฐและเอกชนนำผลผลิตเหล่านี้มาจำหน่าย ส่งออกไปยังประเทศอื่นๆและนำไปแปรรูปเป็นอาหารแห้ง เป็นต้น ซึ่งมังคุด 1 ลูกจะประกอบไปด้วย เนื้อของมังคุด 50 เปอร์เซ็นต์และเปลือกของมังคุด 50 เปอร์เซ็นต์ แล้วในปีพ.ศ.2564 ประเทศไทยทำการส่งออกมังคุดจำนวน 155,000 ตัน ทำเปรียบเทียบได้ว่าเปลือกของมังคุดเหลือทิ้งจำนวน 77,500 ตัน [1,2] จะเห็นได้ว่าเปลือกมังคุดที่เหลือทิ้ง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ เช่น การใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรม เพราะคนส่วนใหญ่จะนิยมใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว หรือก๊าซ LPG เป็นเชื้อเพลิงอเนกประสงค์ที่ใช้ทั่วไปในบ้านเรือน เพื่อประกอบอาหารในชีวิตประจำวัน แต่เนื่องด้วยเศรษฐกิจที่ย่ำแย่ทำให้ก๊าซมีราคาที่สูง [3] ทั้งนี้หากไม่นำเศษเหลือจากมังคุดไปต่อยอดให้เกิดประโยชน์สูงสุดเศษเหลือจากมังคุดเหล่านี้จะถูกปล่อยทิ้งหรือนำไปเผาทิ้งทำให้เป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนและเกิดมลภาวะต่อประชากรในชุมชน ซึ่งการเอาเศษเหลือจากมังคุดมาใช้จะช่วยลดการเกิดปัญหามลพิษในชั้นบรรยากาศ [4,5]

จากปัญหาดังกล่าว Ke Miao Lu และคณะ [6] ได้ศึกษาการทอรรีแฟคชั่น โดยใช้ชีวมวลจากเส้นใยปาล์มน้ำมัน เปรียบเทียบโดยการใช้อากาศกับการใช้ในโตรเจนเป็นตัวพา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้อากาศ ในกระบวนการทอรรีแฟคชั่น ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงลดลง ในขณะที่ปริมาณซีเถ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณสารระเหยลดลง และปริมาณผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ลดลง เมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซไนโตรเจนที่เงื่อนไขดำเนินการเดียวกันการลดลงของผลิตภัณฑ์และปริมาณสารระเหยรวมทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเถ้าแสดงให้เห็นว่าชีวมวลและสารระเหยบางส่วนเกิด Peroxidation ในระหว่างทอรรีแฟคชั่นแล้ว จากการศึกษา Zhang และคณะ [7] ได้รายงานผลการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนในกระบวนการทอรรีแฟคชั่นของชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ Walnut shell, Sapindus mukorossi shell, Xanthoceras sorbifolia shell ที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส ระยะเวลาดำเนินการ 10 20 และ 30 นาที โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นออกซิเจนจาก 0 เป็นร้อยละ 5 15 และ 21 เพื่อดูผลของปริมาณผลิตภัณฑ์ค่าความร้อนสูงและพลังงานที่ได้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พลังงานและผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงแต่ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นนั้นไม่สม่ำเสมอ

เนื่องจากบางเงื่อนไขที่อุณหภูมิสูงและระยะเวลามากขึ้นรวมถึงความเข้มข้นของออกซิเจนเพิ่มขึ้นอาจทำให้เกิด Peroxidation ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณซีลีล่าเพิ่มขึ้น

ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีแนวคิดในการใช้เศษเหลือจากมังคุดที่มีเป็นจำนวนมากในหน้าฤดูผลไม้ซึ่งเป็นสิ่งที่ประชากรในชุมชนละเลย จึงนำมาสร้างมูลค่าเพิ่มเพื่อให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนและการนำมาทำเป็นถ่านชีวมวลจะผ่านการทอร์รีไฟด์ โดยได้นำมาทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ การหาปริมาณความชื้น การหาค่าความร้อนสูง การหาปริมาณซีลีล่า และการหาประสิทธิภาพการใช้ความร้อน เพื่อตรวจสอบคุณภาพของถ่านชีวมวลข้างต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อผลิตถ่านชีวมวลจากเศษเหลือจากมังคุดโดยใช้การทอร์รีไฟด์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดเศษเหลือจากมังคุด อุณหภูมิและเวลาในการทอร์รีไฟด์ที่มีผลต่อคุณภาพของเศษเหลือจากมังคุด

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการใช้ความร้อนประกอบด้วย เศษเหลือจากมังคุด
- 1.3.2 กำหนดช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทอร์รีไฟด์ที่ 200 210 220 230 และ 240 องศาเซลเซียส เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการทอร์รีไฟด์
- 1.3.3 หาประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของชีวมวลโดยการทดสอบด้วยกระบวนการ Water Boiling Test (WBT)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เพิ่มรายได้ให้เกษตรกรในชุมชน
- 1.4.2 สามารถนำความรู้ที่ได้ไปต่อยอดในการพัฒนาถ่านชีวมวล
- 1.4.3 สามารถลดปริมาณของเศษเหลือจากมังคุด

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานของการศึกษาการทอรรีไฟด์เศษเหลือจากมังคุดเพื่อผลิตเป็นถ่านชีวมวล

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน											
	2564					2565						
	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	
1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	←→											
2. วางแผนการทดลอง			←→									
3. จัดส่งอุปกรณ์และเตรียมความพร้อมของเตาปฏิกรณ์			←→									
4. เตรียมวัตถุดิบ					←→							
5. อบไล้ความชื้น							←→					
6. นำวัตถุดิบมาแยกขนาด								←→				
7. ทำการทดลอง								←→				
8. เก็บผลการทดลอง									←→			
9. จัดทำรูปเล่ม										←→		

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความเป็นมาและความสำคัญของเศษเหลือจากมังคุด เพื่อนำไปใช้เป็นถ่านชีวมวลโดยวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงถ่านชีวมวลของเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอร์รีไฟด์แล้ว

2.1 ชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์ เนื่องจากพืชต้องอาศัยแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสงและเจริญเติบโต จากนั้นจึงแปรเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็ง เช่น ทะลาย ปาล์มเปล่า ชังข้าวโพด เศษยางพารา กากอ้อยและเศษไม้อื่น ๆ เป็นต้น หรือแปรสภาพเป็นของเหลว เช่น เอทานอล น้ำยางพารา ไบโอดีเซลและน้ำมันปาล์ม เป็นต้น [5] ซึ่งชีวมวลสามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อทดแทนการหมดไปของเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้วยังเป็นแหล่งพลังงานที่พบจำนวนมากในการเกษตรและอุตสาหกรรมในประเทศไทยอีกด้วย

2.1.1 ประเภทของชีวมวล

ชีวมวลจะแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่โดยชีวมวลจะมี 3 กลุ่ม ได้แก่ ชีวมวลดั้งเดิมจากแหล่งกำเนิด (Virgin) ชีวมวลจากเศษเหลือทิ้ง (Residues) และชีวมวลจากของเสีย (Wastes) ซึ่งทั้ง 3 กลุ่มจะแบ่งตามแหล่งที่มาของชีวมวลได้ 6 ประเภท

1. ชีวมวลที่เกิดจากการเพาะปลูก ปลูกขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลโดยตรง ชีวมวลประเภทนี้ เช่น ปาล์มน้ำมัน, ข้าวโพด, ถั่วเหลือง และ มันสำปะหลัง เป็นต้น
2. ชีวมวลที่เกิดขึ้นหลังการเกิดไฟไหม้ป่า โดยชีวมวลประเภทนี้ส่วนใหญ่เป็นพวกเศษกิ่งไม้ และลำต้น ของต้นไม้ที่หลงเหลือจากไฟไหม้ป่า
3. ชีวมวลที่เกิดขึ้นจากของเสียทางการเกษตรชีวมวลประเภทนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปพืชผลทางการเกษตร เช่น แกลบ, ฟางข้าว, กะลาปาล์ม และกาบใบต้นปาล์ม
4. ชีวมวลที่เกิดขึ้นในป่าและอุตสาหกรรมป่าไม้ ชีวมวลประเภทนี้หาได้ในป่า เช่น กิ่งไม้ที่หักจากต้นไม้ ต้นไม้ที่ตาย หรือแม้กระทั่งของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการแปรรูปไม้ เช่น ขี้เลื่อย
5. ชีวมวลจากมูลสัตว์ชีวมวลประเภทนี้เป็นสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ เช่น มูลวัว มูลแพะ มูลไก่ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้จะมีความชื้นที่สูงมาก
6. ชีวมวลจากขยะชุมชนและที่อยู่อาศัย ชีวมวลประเภทนี้คือขยะที่เราทิ้งกันทุกวัน

2.1.2 การนำชีวมวลไปใช้

การนำชีวมวลไปใช้จะแบ่งออกได้ 2 อย่างได้แก่

1. การนำไปใช้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อน อย่างเช่น การนำเศษไม้ที่เหลือจากการผลิตของโรงงานทำไม้ไปใช้ในหม้อไอน้ำหรือการนำฟืนไปใช้ในเตาอั้งโล่ของชาวบ้านเพื่อให้ได้ไอน้ำไปใช้ในการอบไม้
2. การนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าอย่างเช่น โรงสีขนาดใหญ่ ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้าหรือโรงน้ำตาลใช้กากอ้อยที่ได้จากการคั้นอ้อย เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2.1.3 ประโยชน์ของชีวมวล

ประโยชน์ของชีวมวลจะแบ่งย่อยได้ 4 อย่างได้แก่

1. เป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีกำมะถันที่ต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลและไม่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจก
2. ใช้ประโยชน์จากเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร เนื่องจากเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก
3. ช่วยสร้างงานและก่อให้เกิดรายได้กับเกษตรกรในชุมชน
4. สร้างความมั่นคงต่อระบบผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก มีโรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วประเทศและสามารถลดปัญหาไฟดับได้ [8]

2.2 เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล

ชีวมวลส่วนใหญ่จำเป็นต้องแปลงสภาพก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งจะมีเพียงบางชนิดเท่านั้นที่ไม่จำเป็นต้องแปลงสภาพ สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ได้โดยตรง เช่น ไม้ผืน แต่เมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล ชีวมวลสดจะมีลักษณะที่ด้อยกว่าได้แก่

1. ชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่า
2. ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูง ซึ่งเป็นอุปสรรคในการเก็บรักษาและเป็นอุปสรรคในการเผาไหม้ส่งผลให้เกิดการสูญเสียความร้อน และจะเกิดมลพิษสูง
3. ชีวมวลมีความหนาแน่นต่ำต้องใช้ในปริมาณที่มากและจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ในการจัดเก็บรักษาการขนส่งและการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่
4. รูปแบบทางกายภาพจะไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันและไม่สะดวกต่อการขนย้ายและเก็บรักษา

2.2.1 ความหมายของการแปลงสภาพชีวมวล

การแปลงสภาพชีวมวลคือการลดปริมาณความชื้นที่ส่งผลต่อค่าความร้อนและส่งผลต่อความสะดวกในการเก็บรักษาและปรับปรุงคุณลักษณะความเป็นชีวมวลเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งาน อย่างเช่นแปลงสภาพเป็นของเหลวหรือก๊าซ ในปัจจุบันนิยมใช้เทคโนโลยีในการแปลงสภาพชีวมวลเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

1. กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ (Physical conversion) ได้แก่ การอัดแท่ง การขัดแยกเฉพาะส่วน และการบีบคั้นน้ำมัน

2. กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (Biochemical conversion) ที่ใช้เชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการ ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยยับอากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล

3. กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) Conversion process พลังงานศักย์ในชีวมวลสามารถปลดปล่อยออกมาโดยการเผาไหม้ได้โดยตรงหรือโดยการเปลี่ยนแปลงวัสดุให้เป็นเชื้อเพลิงหรือเป็นสารเคมีตัวอื่นโดยวิธีการทางความร้อนหรือวิธีการทางชีวเคมีสามารถกระทำได้หลายวิธีคือกระบวนการทางเคมีความร้อนหรือเกิดจากกระบวนการทางชีวภาพ

(1) การเผาไหม้ (Combustion) การเผาไหม้สารอินทรีย์ด้วยออกซิเจนที่มากเกินพอ ซึ่งจะเกิดเป็นการเผาไหม้แบบสมบูรณ์โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ การเผาไหม้ของชีวมวลสามารถอธิบายได้ทั่ว ๆ ไปทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังนี้

- การระเหยความชื้นออกไป (Evaporation of moisture) เป็นการดูดความร้อน
- การกลั่นของสารระเหย (Distillation of volatiles) สามารถเป็นได้ทั้งการดูดความร้อนและการคายความร้อน
- การเผาไหม้ของสารระเหย (Burning of volatiles) เป็นการคายความร้อน
- การเผาไหม้ของคาร์บอนคงตัว (Combustion of fixed carbon) เป็นการคายความร้อน

(2) กระบวนการไพโรไลซิส (Carbonization) การทำคาร์บอนเซชัน ใช้เมื่อสารที่มีองค์ประกอบซับซ้อนมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเช่น ไม้หรือเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม วัสดุเหล่านี้จะถูกแยกสลายเป็นถ่านคาร์บอนและสารประกอบเคมีอื่น ๆ ซึ่งอาจมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบก็ได้ ประสิทธิภาพในการทำคาร์บอนเซชันขึ้นกับ 3 ปัจจัย หลักดังนี้

- ปริมาณความชื้นระหว่างการทำคาร์บอนเซชัน
- ชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ทำคาร์บอนเซชัน

- ความรอบคอบในขั้นตอนการทำคาร์บอนเซชันระหว่างการผลิตคาร์บอนเซชันของชีวมวลซึ่งจะจำกัดออกซิเจนหรือจะใช้เพียงปริมาณน้อย เพื่อใช้พอดัดไฟเท่านั้น ชีวมวลที่ทำคาร์บอนเซชันจะแตกสลายได้เป็นผลิตภัณฑ์หลักคือ ชาร์โคล (Charcoal) และของแข็งสีดำที่มีรูพรุนโดยมีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน นอกนั้นคือซีเถ้าจากชีวมวล ประมาณ 0.5 ถึง 6 เปอร์เซ็นต์ โดนปริมาณซีเถ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลไพโรไลซิส หรือการกลั่นสลาย (Destructive distillation) เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน มีการถ่ายเทความร้อนโดยทางอ้อม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็งคือ ชาร์ ของเหลวที่ควบแน่นได้ชาร์และแก๊สปฏิกิริยาไพโรไลซิสต้องการความร้อนทั้งทางตรงจากการออกซิเดชันเพียงบางส่วนหรือจากปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์และทางอ้อม ซึ่งในปัจจุบันการสลายตัวทางความร้อนในภาวะที่มีออกซิเจนน้อยหรือในที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนให้เกิดการไพโรไลซิสโดยตรงจากการเผาไหม้บางส่วนของชาร์และแก๊ส เรียกได้ว่าเป็นกระบวนการไพโรไลซิสเมื่อชีวมวลเกิดการสลายตัวทางความร้อน จะเกิดอนุกรมของปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่ แก๊สที่มีพลังงานปานกลางน้ำมันที่มีองค์ประกอบซับซ้อนและชาร์ [9]

2.3 มังคุด (Mangosteen)

มังคุดถือเป็นพืชผลไม้ที่มีแหล่งกำเนิดอยู่ในแถบภาคใต้และแถบภาคตะวันออกของประเทศไทย ซึ่งมีชื่อเสียงด้วยรูปลักษณ์ สีสันทึบสวยงาม ทั้งนี้มีความเป็นเอกลักษณ์ในรูปร่างของผลที่มีขนาดกลมและยังมีเนื้อสัมผัสที่นุ่ม มีรสชาติที่หวานอมเปรี้ยวชนิดหน้อย จนได้รับฉายาว่า “Queen of fruits” หรือ “ราชินีแห่งผลไม้” มังคุดเป็นผลไม้ที่นิยมรับประทานกันในหน้าฤดูผลไม้ จนประเทศไทยได้รับว่ามี การส่งออกผลไม้ที่มีศักยภาพสูงไปยังต่างประเทศเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 มังคุด (Mangosteen) [9]

2.3.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของมังคุด

ชื่อสามัญ (Common name) : Mangosteen

ชื่อวงศ์ (Family) : Guttiferaceae

ชื่อวิทยาศาสตร์ (Scientific name) : *Garcinia mangostana*

ชื่อสปีชีส์ (Species) : *Mangostana*

ลักษณะทั่วไป มังคุดเป็นไม้ผลยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีลำต้นทรงกลม มียางเป็นเหลือง เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว ลักษณะของใบเป็นรูปทรงไข่หรือรูปวงรี กลิบลี้นจะมีสีเขียวอมเหลือง กลีบดอกจะมีสีแดง ผลจะเป็นลักษณะผลสด เปลือกนอกมีความค่อนข้างแข็ง เมื่อผลแก่เต็มที่จะมีลักษณะสีเป็นสีม่วงแดง เนื้อมีลักษณะเป็นสีขาวนวล อาจจะมีเมล็ดอยู่ในเนื้อจะขึ้นอยู่กับขนาดและอายุของผล จำนวนกลีบของเนื้อมังคุดจะสังเกตจากจำนวนของกลีบดอกที่อยู่ด้านล่างของเปลือกนอก ส่วนเมล็ดจะไม่สามารถรับประทานได้

ลักษณะสภาพอากาศ มังคุดเป็นไม้ผลยืนต้นที่ชอบสภาพอากาศร้อนชื้น อุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 25 ถึง 30 องศาเซลเซียส ส่วนความชื้นสัมพัทธ์สูงประมาณ 75 ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ และดินควรมีค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ประมาณ 5.5 ถึง 6.5 ที่สำคัญควรเลือกพื้นที่ปลูกที่มีน้ำเพียงพอ ตลอดในช่วงฤดูแล้ง ทั้งนี้มังคุดจะออกผลผลิตประมาณปีที่ 7 หลังจากมีการปลูก แต่ผลผลิตต่อต้นในช่วงระยะแรกจะออกผลผลิตต่ำ ช่วงที่ให้ผลผลิตดีจะอยู่ประมาณในปีที่ 13 ขึ้นไป โดยเฉลี่ย 60 กิโลกรัมต่อต้น ซึ่งมังคุดเป็นไม้ผลที่มีระบบรากที่หาอาหารค่อนข้างลึกประมาณ 90 ถึง 120 เซนติเมตรจากผิวดิน ดังนั้นจึงต้องการสภาพแล้งก่อนออกดอกค่อนข้างนาน

ลักษณะของราก มังคุดเป็นไม้ผลยืนต้นที่มีระบบรากเป็นรากแก้ว นับว่ามีการพัฒนาของระบบรากที่จะเจริญแผ่ไปในทางแนวราบในพื้นดินได้น้อยกว่าไม้ผลอื่น ๆ มังคุดมีความสามารถที่จะสร้างรากแขนงให้เจริญออกจากโคนต้นชิดกับพื้นดินได้ในต้นที่ปลูกจนโตและมีพุ่มแล้ว รากแขนงที่เกิดขึ้นสามารถมองเห็นได้ชัดเจนเป็นรากที่ค่อนข้างอวบมีสีขาวอมเหลืองและจะเจริญแผ่ออกจากโคนต้นแล้วค่อยๆ แง่ลึกลงไปในดินเพื่อช่วยยึดลำต้นให้แข็งแรงไม่โค่นล้มได้ง่าย ทั้งนี้ยังช่วยหาอาหารเพื่อให้เกิดความสมดุลกับส่วนทรงพุ่มที่เจริญขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ลักษณะของราก [10]

ลักษณะของลำต้น มังคุดเป็นไม้ผลยืนต้นขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ มีลักษณะของลำต้นเป็นทรงกลม ต้นโตเต็มที่สูงประมาณ 10 ถึง 25 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น 25 ถึง 30 เซนติเมตร เปลือกของลำต้นมีลักษณะเป็นสีดำ มียางเหนียวข้นสีเหลืองอมเขียว แตกกิ่งตั้งแต่ระดับล่างของลำต้น กิ่งก้านแตกเป็นระเบียบใบหนา ลักษณะกิ่งจะทำมุมตั้งฉากกับลำต้น ทรงพุ่มเป็นแบบกรวยคว่ำหรือแบบพีระมิด ลักษณะผิวของลำต้นมีลักษณะขรุขระ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของลำต้น [11]

ลักษณะของใบ ใบมังคุดเป็นใบเดี่ยว (Simple leaf) เกิดแบบตรงข้ามกันเป็นคู่ ๆ หรือแบบ Ternate ก้านใบจะสั้นออกใบดกเขียวตลอดทั้งปี จะไม่ผลัดใบ ผิวใบและขอบใบจะเรียบ ใบหนา ใบจะมีลักษณะยางเป็นสีเขียวแกมเหลือง เนื้อใบเหนียวคล้ายหนังสัตว์ ด้านหน้าใบมีลักษณะสีเขียวเข้มหรือเขียวแกมเหลืองและลักษณะผิวของใบจะมันเงา ส่วนด้านหลังใบจะมีลักษณะสีเป็นสีเขียวแกมเหลือง ลักษณะ

ผิวของใบจะไม่มันเงา ลักษณะรูปร่างของใบจะเป็นวงรีหรือรูปไข่ ความยาวของใบประมาณ 12 ถึง 23 เซนติเมตร และความกว้างของใบประมาณ 4.5 ถึง 12 เซนติเมตร แกนของใบจะเห็นได้ชัดจากด้านหลังของใบจะมีลักษณะกลมมนขึ้นมา ส่วนด้านหน้าของใบจะเห็นเป็นลักษณะสันทาง เส้นใบออกจากเส้นกลางใบแล้วค่อย ๆ ไล่เข้าหาขอบใบ ซึ่งเส้นใบจะมีประมาณ 35 ถึง 50 คู่ ก้านใบจะสั้นและเห็นเป็นชั้น ๆ ความยาวของช่วงก้านใบสั้นยาวประมาณ 1.5 ถึง 2 เซนติเมตร มีตาข้าง (Axillary bud) อยู่ที่โคนก้านใบทุกใบ ในส่วนของตายอด (Terminal bud) จะอยู่ที่โคนก้านใบคู่สุดท้าย ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะของใบ [12]

ลักษณะของดอก ดอกจะออกดอกเป็นคู่หรือเดี่ยว ซึ่งจะพบดอกตัวเมีย (Female flower) เฉพาะในเกาะชาวประเทศอินโดนีเซียเท่านั้น ดอกตัวผู้ (Male flower) จะมีลักษณะสีเหลืองอมแดงหรือสีม่วงแดงเข้ม จะเกิดที่ปลายกิ่งเป็นกลุ่มดอกมีประมาณ 3 ถึง 9 ดอก ก้านดอกค่อนข้างยาว กลีบเลี้ยงมีอยู่ 4 กลีบ มีลักษณะเป็นรูปถ้วยและกลีบดอกจะมีอยู่ 4 กลีบเช่นกัน แต่มีลักษณะอวบและหนา ด้านในกลีบจะมีสีแดงแกมเหลือง ด้านนอกกลีบสีจะค่อนข้างเขียวแกมเหลืองและมีประกายแดง เป็นรูปเกือบครึ่งวงกลม เกสรตัวผู้มีประมาณ 16 ถึง 20 อัน และจะเรียงแนบชิดกับส่วนโคนของรังไข่ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีเกสรตัวผู้และเกสรตัวเมียอยู่ในดอกเดียวกัน จัดเป็นดอกสมบูรณ์เพศแต่เกสรตัวผู้จะเป็นหมัน อับละอองเกสรจะมีขนาดเล็กและเป็นหมัน รังไข่จะไม่มีก้าน แอ่งเกสรตัวเมียแบ่งเป็นแฉกประมาณ 4 ถึง 8 แฉก เท่ากับจำนวนช่องในรังไข่ ลักษณะของกลีบเลี้ยงและกลีบดอกคล้ายคลึงกับดอกตัวผู้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ถึง 6.2 เซนติเมตร ก้านดอกจะมีความหนาและขนาดสั้นเป็นรูปเหลี่ยม มีความยาว 1.8 ถึง 2 เซนติเมตร และหนา 0.7 ถึง 0.9 เซนติเมตร กลีบเลี้ยงจะซ้อนกัน 2 ชั้น ชั้นในจะมี 1 คู่หุ้มปิดไว้และถูกหุ้มด้วยชั้นนอกอีก 1 คู่ ซึ่งมีความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร แต่ชั้นในจะมีขนาดเล็กกว่าชั้นนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะของดอก [13]

ลักษณะของผล ผลของมังคุดจะมีลักษณะเป็นทรงกลม ลักษณะสีเป็นม่วงเข้มหรือม่วงแกมน้ำตาล เปลือกของมังคุดจะหนาประมาณ 0.8 ถึง 1 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางผลประมาณ 3.5 ถึง 7 เซนติเมตรหรือมากกว่านั้น เปลือกมีรสฝาดและจะมียางสีเหลืองแกมเขียว ภายในผลแบ่งเป็น 4 ถึง 8 ช่อง แต่ละช่องมีเมล็ดภายในหุ้มด้วย เนื้อสีขาวในอ่อนนุ่มคล้ายวุ้น สีเส้น Vain สีชมพูติดอยู่เนื้อสีน้ำตาล ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วย Saccharase, Dextrose และ Levulose มีกฎและสารอื่นๆ ประกอบจึงทำให้มีกลิ่นและรสชาติที่น่ารับประทาน การเรียงตัวของกลีบคล้ายกับการเรียงตัวของกลีบส้ม ในแต่ละผลจะมีเมล็ดที่เจริญสมบูรณ์ 1 ถึง 3 เมล็ดเท่านั้นเมล็ดที่เหลือมักจะลีบ ค่าเฉลี่ยของเมล็ดที่สมบูรณ์ของมังคุดประมาณ 1.6 เมล็ด สำหรับผลจะมีน้ำหนักประมาณ 54.5 ถึง 79.5 กรัมหรือมากกว่านั้น หนึ่งผลจะมีเนื้อประมาณ 25 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ มังคุด 1 ต้น จะออกผลอย่างน้อย 100 ผลและมากกว่า 500 ถึง 600 ผล ในประเทศฟิลิปปินส์ มังคุดสุกปีละ 2 ครั้ง ครั้งแรกช่วงเดือนมกราคม ครั้งที่สองช่วงเดือนกรกฎาคม ถึง สิงหาคม ส่วนในตรินิแดดจะให้ผลในราวเดือนกรกฎาคม ถึง ตุลาคมและส่วนในประเทศไทยจะออกผลในช่วงเดือน มิถุนายน ถึง กรกฎาคม ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของผล [14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของเมล็ด เมล็ดจะมีรูปร่างคล้ายเปลือกหอย มี 2 ฝา เปลือกที่หุ้มเมล็ดจะมีสีน้ำตาลบางและใส ผิวของเมล็ดจะขรุขระ อายุของเมล็ดจะสั้นมาก เมล็ดที่อยู่ในผลจะอายุได้ประมาณ 3 ถึง 5 สัปดาห์ แต่ถ้าอยู่นอกผลโดยไม่ได้เก็บไว้ในที่ชื้นจะอายุได้เพียง 2 ถึง 3 วันเท่านั้น แต่ที่จริงแล้วเมล็ดของมังคุดนั้นไม่ใช่เมล็ดที่แท้จริง เป็นเพียงส่วนที่เจริญมาจากเนื้อเยื่อเพศเมีย (Female tissue) เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่มีทั้ง Embryo และ Cotyledous ทั้งนี้เพราะเมล็ดที่ใช้ในการขยายพันธุ์นั้นเป็นส่วนที่เจริญโดยไม่มีการผสมและเป็น Poly embryony ต้นกล้าที่ได้ซึ่งไม่ได้มาจาก Zygote แต่เป็น Nucellar seedling ซึ่งตรงตามพันธุ์ของต้นแม่จะมีความแตกต่างของผลผลิตที่เกิดขึ้นซึ่งจะเกิดจากสภาพแวดล้อมและการดูแลรักษา ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะของเมล็ด [15]

2.3.2 ประโยชน์ของมังคุด

เปลือกมังคุดมีสรรพคุณคือ รักษาโรคท้องเสียเรื้อรัง ท้องเดินยาแก้บิด (ปวดบ่งและอาจมีเลือดด้วย) เป็นยาคุมธาตุ ยารักษาน้ำกัดเท้า ใช้ชะล้างบาดแผล แผลเป็นหนอง ทาแผลพุพอง นำไปสกัดเป็นส่วนผสมของเวชสำอาง ทั้งนี้มังคุดและเปลือกของมังคุดยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกหลายอย่างดังต่อไปนี้ [37]

1. ช่วยรักษาและสมานแผลในช่องปากให้หายเร็วขึ้น
2. ช่วยลดระดับคลอเรสเตอรอลในร่างกาย
3. ลดไขมันที่ไม่ดีในเส้นเลือด
4. ช่วยในการขยายของหลอดเลือดเพื่อลดความเสี่ยงของโรคหลอดเลือดหัวใจ
5. ช่วยเสริมสร้างกระดูกและฟันให้แข็งแรง
6. มีส่วนช่วยป้องกันการเกิดโรคมะเร็งและช่วยลดความเครียดได้
7. ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งอย่างเช่น มะเร็งตับ มะเร็งปอด เป็นต้น

8. มีสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีส่วนช่วยในการชะลอวัยและการเกิดริ้วรอย
9. ช่วยบำรุงผิวพรรณให้เปล่งปลั่ง
10. ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคเกี่ยวกับทางเดินหัวใจ
11. มีส่วนช่วยป้องกันอาการไข้หวัดในระดับต่ำได้
12. ช่วยเพิ่มพลังงานให้แก่ร่างกายและสามารถเพิ่มความกระปรี้กระเปร่า
13. มังคุดสามารถรักษาผิวและเปลือกมังคุดมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อ

แบคทีเรียที่ทำให้เกิดสิวและยังต้านสิวกักเสบได้ดีอีกด้วย

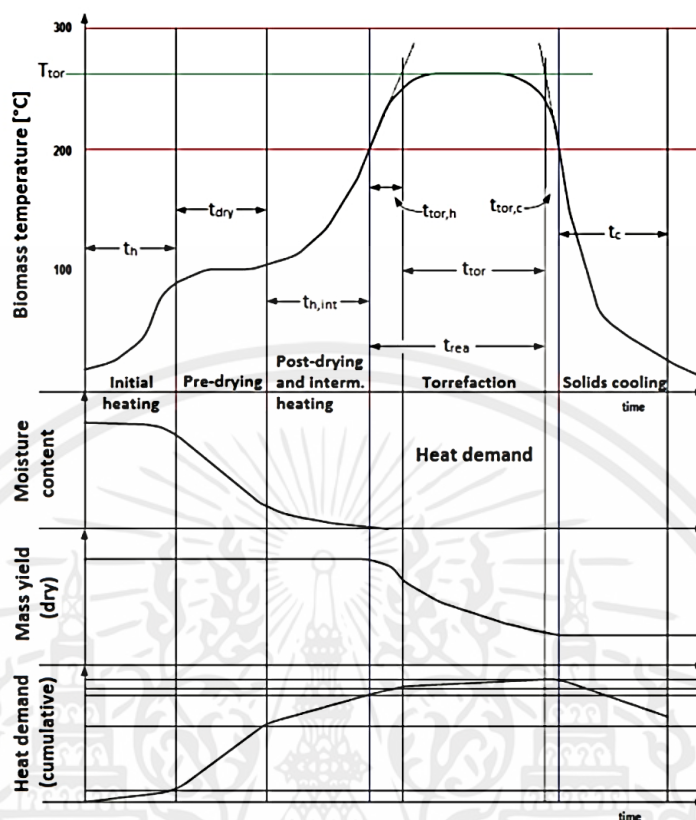
14. ช่วยลดความดันโลหิต
15. ช่วยรักษาไทรอยด์เป็นพิษได้
16. ช่วยเสริมสร้างระบบภูมิคุ้มกันให้แข็งแรง
17. มีฤทธิ์ในการจับอนุมูลอิสระได้มากกว่าผลไม้ชนิดอื่น
18. รับประทานสดเป็นผลไม้หรือทำเป็นน้ำผลไม้ อย่างเช่น น้ำมังคุดและน้ำเปลือกมังคุด
19. นำมาประกอบอาหารทั้งคาวและหวานอย่างเช่น ยำ มังคุดลอยแก้ว เป็นต้น
20. นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อย่างเช่น มังคุดกวน แยมมังคุด เป็นต้น
21. นำมาแปรรูปเป็นสบู่เปลือกมังคุด ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยดับกลิ่นเต่า บรรเทาอาการของโรค

ผิวหนัง รักษาฝ้า

2.4 เทคโนโลยีการทอรีรีแฟคชั่น

การทอรีรีแฟคชั่นเป็นกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพชีวมวลหรือการเปลี่ยนรูปชีวมวล โดยกระบวนการทางเคมีความร้อนจะให้ความร้อนแก่ชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจน ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้เวลาประมาณ 30 ถึง 120 นาที ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของชีวมวลดีขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวลที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการทอรีรีแฟคชั่น ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จะมีสถานะเป็นของแข็ง ส่วนที่เหลือจะมีสถานะเป็นของเหลวและก๊าซ

ในกระบวนการทอรีรีแฟคชั่นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของชีวมวลตามช่วงอุณหภูมิซึ่งที่มี 5 ขั้นตอน ได้แก่ (1) ช่วงให้ความร้อนเริ่มต้น (2) ช่วงระเหยความชื้น (3) ช่วงหลังระเหยความชื้นและเพิ่มอุณหภูมิ (4) ช่วงทอรีรีแฟคชั่น และ (5) ช่วงลดอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลำดับขั้นต่าง ๆ ที่เกิดในขั้นกระบวนการทอรรีแฟคชั่น [16]

ช่วงที่ 1 ช่วงให้ความร้อนเริ่มต้น เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส และเป็นช่วงที่ชีวมวลได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ความชื้นเริ่มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากการระเหยของความชื้นที่บริเวณผิวนอก

ช่วงที่ 2 ช่วงการลดความชื้นหรือการอบแห้งบางส่วน ช่วงนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 100 ถึง 105 องศาเซลเซียส ความชื้นส่วนใหญ่ในชีวมวลถูกระเหยออกไป ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงมากในขณะที่การใช้พลังงานความร้อนเพิ่มสูงขึ้น

ช่วงที่ 3 ช่วงการลดความชื้นหรือการอบแห้งส่วนสุดท้ายและการเพิ่มอุณหภูมิของชีวมวล ช่วงนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 100 ถึง 200 องศาเซลเซียส ความชื้นภายในผนังเซลล์ของชีวมวลถูกระเหยหมดและมีสารระเหยบางส่วนเริ่มระเหยออกจากชีวมวล ในขณะที่การใช้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากช่วงก่อนหน้า ซึ่งจะสังเกตได้ว่าที่ช่วง 1 ถึง 3 นั้น มวลแห้งของชีวมวลค่อนข้างคงที่ตลอดการเพิ่มอุณหภูมิ เนื่องจากในช่วงดังกล่าวเป็นช่วงการระเหยความชื้นและการเพิ่มอุณหภูมิเป็นหลัก

ช่วงที่ 4 ช่วงเทอร์รีแพคชั่น เกิดขึ้นที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส ในช่วงดังกล่าวเกิดการสูญเสียมวลอย่างชัดเจน เนื่องจากการระเหยของสารระเหย และการแตกตัวกลายเป็นไอระเหยของลิกโนเซลลูโลสเนื่องจากความร้อน โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสเนื่องจากความร้อน โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลสซึ่งสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส พลังงานความร้อนสะสมในช่วงนี้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

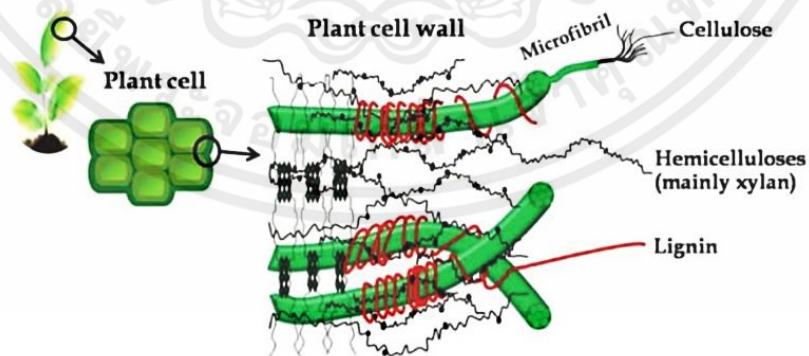
ช่วงที่ 5 ช่วงลดอุณหภูมิของชีวมวลเทอร์รีไฟต์ เป็นช่วงการลดอุณหภูมิของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการเทอร์รีแพคชั่นให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม ในช่วงนี้พลังงานความร้อนสะสมลดลงในขณะที่มวลค่อนข้างคงที่

2.5 ตัวแปรที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเทอร์รีแพคชั่น

ตัวแปรที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเทอร์รีแพคชั่นมีหลายปัจจัย เช่น ชนิดของชีวมวล ขนาดของชีวมวล องค์ประกอบของชีวมวล ออกซิเจนหรืออากาศ อุณหภูมิ เวลา และชนิดของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 องค์ประกอบของชีวมวลและชนิดของชีวมวล (Biomass type and composition)

สมบัติเบื้องต้นของชีวมวลมีผลต่อคุณภาพและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณลิกโนเซลลูโลสที่มีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะสลายตัวในช่วงอุณหภูมิต่างกันในกระบวนการเทอร์รีแพคชั่น ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มากตามไปด้วย เนื่องจากลิกนินสลายตัวในช่วงอุณหภูมิที่กว้างและสูงกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังส่งผลให้ค่าความร้อนสูงกว่าชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินต่ำอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 องค์ประกอบของชีวมวล [17]

สำหรับสมบัติที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธีแบบประมาณซึ่งประกอบด้วยปริมาณความชื้น ปริมาณคาร์บอนคงตัว ปริมาณสารระเหยและปริมาณซีเถ้า องค์ประกอบเหล่านี้บ่งบอกถึงคุณภาพและ ปริมาณของผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน หากใช้ชีวมวลที่มีความชื้นสูงเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้โดยตรง จะต้องใช้ความร้อนส่วนหนึ่งในการระเหยความชื้น เป็นเหตุให้ต้องใช้พลังงานมากขึ้นหรือสูญเสียพลังงาน เพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณสารระเหยถ้ามีมากจะช่วยให้เกิดการเผาไหม้ได้ดี ในส่วนของคาร์บอนคงตัวยังมี ปริมาณมากก็จะส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันการมีปริมาณซีเถ้าต่ำ เป็นสมบัติที่ดีของ เชื้อเพลิง ส่วนการวิเคราะห์แบบละเอียด ปริมาณคาร์บอนมากจะส่งผลให้ค่าความร้อนสูงขึ้น

ชีวมวลแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพองค์ประกอบทางเคมี และสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะแยกออกเป็น ความชื้น คาร์บอนคงตัว สารระเหย ซีเถ้าและกำมะถันรวม เป็นต้น

1. ความชื้น (Moisture) ความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชีวมวลโดยชีวมวล ส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลเป็นพลังงาน โดยการเผาไหม้ ความชื้นไม่ควรเกิน 50 เปอร์เซ็นต์

2. คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของชีวมวล ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ชีวมวลที่มีคาร์บอนคงที่ต่ำหรือน้อยจะสันดาปได้ไม่ดี มีอุณหภูมิจุดติด ไฟต่ำ ความรวดเร็วในการติดไฟช้าเนื่องจากมีความชื้นมาก

3. สารระเหย (Volatile matter) คือองค์ประกอบในของเสียที่สามารถระเหยได้เมื่อ ได้รับความร้อนของเสียที่มีปริมาณสารระเหยได้สูงจะมีแนวโน้มที่มีค่าความร้อนสูงด้วย สารที่ระเหยได้ บางชนิดอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อวัสดุหรืออุปกรณ์ที่นำวัสดุเชื้อเพลิงไปใช้งาน เช่น สารอัลคาไลน์ในทะเลา ยาล์มจะกลายเป็นยางเหนียวเกาะท่อน้ำในห้องเผาไหม้ ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อน้ำลดลง

4. ซีเถ้า (Ash) ส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลือจากการสันดาปภายในเตาเผาซึ่งประกอบด้วยซิลิกาแคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ หรือเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ดังนั้นหากของเสียมีซีเถ้า ปริมาณมากจะเป็นปัญหาในการเผาไหม้และเพิ่มความยุ่งยากในการกำจัดซีเถ้าที่เกิดขึ้น โดยส่วนใหญ่ชีวมวลจะมีปริมาณซีเถ้าประมาณ 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนซีเถ้าประมาณ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้

5. กำมะถันรวม (Total sulfur) เมื่อกำมะถันทำปฏิกิริยาสันดาปกับออกซิเจน จะ กลายเป็นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังนั้นหากของเสียที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมากจึงไม่ เหมาะจะเป็นเชื้อเพลิงเนื่องจากมลสารซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการเผาไหม้ในปริมาณมากด้วย

6. ค่าความร้อน (Calorimetric value or heating value) คือ ปริมาณความร้อนที่เกิด ขึ้นเมื่อของเสียถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์หรือเรียกว่าความร้อนของการเผาไหม้ แบ่งเป็น 2 ประเภท

(1) ค่าความร้อนสูง (High heating value, HHV) เป็นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเสีย รวมถึงปริมาณความร้อนแฝงที่ถูกปลดปล่อยออกมา เมื่อไอน้ำที่เกิดจากการเผาไหม้ไอน้ำที่เป็นองค์ประกอบของของเสียเกิดการควบแน่น

(2) ค่าความร้อนต่ำ (Low heating value, LHV) เป็นค่าความร้อนจากการเผาไหม้ของเสียที่ไม่รวมค่าความร้อนแฝง

ดังนั้นปัจจัยดังกล่าวนี้ล้วนส่งผลต่อ คุณภาพของชีวมวลในการทอร์รีไฟด์ ต้นทุนการในการทอร์รีไฟด์ขั้น พลังงานที่ใช้ รวมถึงประสิทธิภาพการใช้ความร้อนและองค์ประกอบของไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวลในการทอร์รีไฟด์

2.5.2 ขนาดของชีวมวล (Biomass size)

ขนาดของชีวมวลมีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการถ่ายเทความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ ชีวมวลที่มีขนาดใหญ่อาจมีอัตราการถ่ายเทความร้อนลดลงหรือช้ากว่า ซึ่งชีวมวลขนาดเล็ก ส่งผลให้อัตราการระเหยของความชื้นอยู่สารระเหยในชีวมวลยากขึ้น จากสาเหตุข้างต้นอาจทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่มีขนาดใหญ่ทุกชิ้นไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่มีชีวมวลขนาดเล็กที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า การระเหยความชื้นและสารระเหยทำได้ง่ายกว่าชีวมวลขนาดเล็กแต่จะมีการสูญเสียมากกว่าชีวมวลขนาดใหญ่

2.5.3 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีไฟด์ขั้น มีผลต่อผลิตภัณฑ์อุณหภูมิดำเนินการที่ต่างกันทำให้ อัตราในการสลายตัวของเซลลูลูโลส เฮมิเซลลูลูโลส และลิกนินต่างกันด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการที่สูงกว่ามีโอกาสจะได้ผลิตภัณฑ์หลักที่เป็นของแข็งลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและก๊าซเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงกว่ายังทำให้ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มีสมบัติที่ง่ายต่อการอบ มีการดูดความชื้นกลับต่ำกว่าชีวมวลทอร์รีไฟด์ที่ใช้อุณหภูมิในกระบวนการทอร์รีไฟด์ขั้นต่ำกว่าการทอร์รีไฟด์ขั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ปริมาณของออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ในขณะที่ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจนต่อคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงใกล้เคียงถ่านหินมากขึ้น ทั้งนี้อุณหภูมิสูงยังส่งผลต่อการลดลงของปริมาณความชื้นสารระเหย และการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนคงตัว ซึ่งปริมาณความชื้นที่ลดลงจะช่วยลดการเกิดเชื้อราและการสลายตัวทางชีวมวลในขณะจัดเก็บ ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวและสารระเหยมีผลอย่างมาก ส่วนลักษณะการเผาไหม้และพฤติกรรมของเชื้อเพลิงแข็ง เช่น อุณหภูมิที่เผาไหม้ อุณหภูมิในการจุดไฟ อัตราการเผาไหม้และเวลาความคงตัวของเปลวไฟ

2.5.4 ระยะเวลา (Time)

ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการเทอร์รีแพคชั่นมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ ระยะเวลาที่นานขึ้นส่งผลให้การสูญเสียมวลมากขึ้นทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ลดลงปริมาณของก๊าซที่ควบแน่นได้เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเทอร์รีแพคชั่นที่อุณหภูมิสูง

2.5.5 ปริมาณออกซิเจนหรืออากาศ (Oxygen or air content)

ปริมาณออกซิเจนในกระบวนการเทอร์รีแพคชั่นมีผลต่อสมบัติของชีวมวลเทอร์รีไฟต์ โดยทั่วไปในกระบวนการเทอร์รีแพคชั่นจะใช้ก๊าซที่อยู่ในกลุ่มก๊าซเฉื่อย เช่นไนโตรเจนเป็นตัวพาผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะเป็นก๊าซออกจากเตาปฏิกรณ์ หรืออาจจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งคุณภาพและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะแตกต่างกัน

2.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวมวล

การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวมวล Proximate analysis เป็นการหาปริมาณของความร้อน ความชื้น ปริมาณขี้เถ้า และประสิทธิภาพการใช้ความร้อน ทั้งนี้สามารถนำไปใช้ในการจัดกลุ่มของถ่านหิน โดยอาศัยอัตราส่วนของสารที่เผาไหม้กับสารที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ ซึ่งเป็นข้อมูลที่น่าสนใจในการซื้อขายและประเมินคุณภาพของถ่านหิน [20]

2.6.1 ค่าความร้อน

เป็นปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักเชื้อเพลิงเมื่อเชื้อเพลิงนั้นถูกเผาไหม้ โดยทั่วไป ค่าความร้อนมี 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูง และค่าความร้อนต่ำ ซึ่งค่าความร้อนสูงเป็นค่าที่วัดได้โดยรวมความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกลั่นตัวของไอน้ำเข้าด้วยกัน ในการศึกษาจะใช้วิธีหาค่าโดยใช้เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ในการหาค่าความร้อนสูงและในการศึกษาครั้งนี้จะหาเฉพาะค่าความร้อนสูงเท่านั้น

2.6.2 ค่าความชื้น

ความชื้นมีความสำคัญโดยเฉพาะในด้านการซื้อขายเพราะส่วนใหญ่ จะทำการซื้อขายโดยเปรียบเทียบคุณภาพจากถ่านหินที่แห้ง จึงจำเป็นต้องใช้ค่าความชื้นไปคำนวณค่าอื่น ๆ โดยการศึกษานี้ได้ใช้วิธีการหาตามมาตรฐาน ASTM D3173 โดยตัวอย่างจะถูกอบให้ความร้อนคงที่ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ไอน้ำระเหยออกจากตัวอย่าง เมื่อค่าความชื้นของตัวอย่างลดลงจะใช้สูตรคำนวณตามสมการที่ 2.1

$$\% \text{ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100 \quad (2.1)$$

2.6.3 ปริมาณซีเถ้า

ปริมาณซีเถ้าเป็นปริมาณสารอนินทรีย์ที่คงเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ ถ่านหิน แต่ปริมาณซีเถ้าที่ได้จะต่างจากองค์ประกอบสารอนินทรีย์ที่ปรากฏอยู่ในสารตั้งต้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงสารเคมีที่เกิดขึ้นภายในตัวแร่ธาตุ ได้แก่ การสูญเสียไอน้ำเนื่องจากการเกิดผลึกของแร่ธาตุที่มีน้ำอยู่ในองค์ประกอบ การสูญเสียคาร์บอนไดออกไซด์จากคาร์บอนเนต การเกิดออกซิเดชันของไพไรท์ เป็นหลัก ออกไซด์ ปริมาณซีเถ้ามีความสำคัญเนื่องจากมีผลในการลดลงของค่าความร้อนของถ่านหินและยังเกี่ยวข้องกับค่าการเผาไหม้ของถ่านหินอีกด้วย ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณที่ซีเถ้าตามมาตรฐาน ASTM D3174 โดยที่ตัวอย่างจะถูกเผาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาปริมาณซีเถ้าจากน้ำหนักตัวอย่างที่เหลืออยู่หลังจากการเผาเสร็จสิ้นจะใช้สูตรคำนวณดังสมการที่ 2.2

$$\% \text{ ซีเถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงหลังอบ}}{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนอบ}} \times 100 \quad (2.2)$$

2.6.4 ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน

เป็นการตรวจสอบคุณภาพของถ่านชีวมวลข้างต้น เพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของชีวมวลในการนำไปใช้ความร้อน ซึ่งหาได้จากการทดสอบแบบวิธีต้มน้ำเดือด (Water boiling test ; WBT) จะใช้สูตรคำนวณดังสมการที่ 2.3

$$HU(\%) = \frac{M_c h_{fg}}{M_f H_f} \times 100 \quad (2.3)$$

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 2019 Ke Miao Lu et al. [6] ได้ศึกษาการทอรรีแฟคชัน โดยใช้ชีวมวลจากเส้นใยปาล์มน้ำมัน เปรียบเทียบโดยการใช้อากาศกับการใช้ไนโตรเจนเป็นตัวพา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้อากาศ ในกระบวนการทอรรีแฟคชัน ทำให้ปริมาณคาร์บอนคงตัวลดลง ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงลดลง ในขณะที่ปริมาณซีเถ้าเพิ่มขึ้น ปริมาณสารระเหยลดลง และปริมาณผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ลดลง เมื่อเทียบกับการใช้ก๊าซไนโตรเจนที่เงื่อนไขดำเนินการเดียวกันการลดลงของผลิตภัณฑ์และปริมาณสารระเหยรวมทั้งการเพิ่มขึ้นของปริมาณซีเถ้าแสดงให้เห็นว่าชีวมวลและสารระเหยบางส่วนเกิด Peroxidation ในระหว่างทอรรีแฟคชันแล้ว

ในปี ค.ศ. 2016. Natali et al. [21] ได้ทำการนำกากพืชทางการเกษตรของกระบวนการทอรรีแพคชั้นไบโपाल์มน้ำมัน ฝักกระถิน ในเตาท่อแวนอนที่ 5 ช่วงอุณหภูมิและแช่เป็นเวลา 60 นาที และการวิเคราะห์ผลที่ใกล้เคียงจากการทอรรีแพคชั้นของวัสดุชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส ไบโपाल์มน้ำมันและฝักกระถินการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีวัสดุชีวมวล ซึ่งรวมถึงการลดลงของมวลการเพิ่มขึ้นของพลังงานและองค์ประกอบทางเคมีกระบวนการทอรรีแพคชั้นผลของมวลของแข็งลดลง ถึง 43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งน่าจะทำให้ผลผลิตพลังงานลดลงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ช่วง 250 ถึง 300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่จะใช้ในกระบวนการทอรรีแพคชั้นเพื่อผลิตให้ได้ถ่านชีวภาพมีคุณภาพที่ดี

ในปี ค.ศ. 2018. Manvura et al. [22] ได้นำเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแพคชั้นมาเผาพร้อมกับถ่านหินเชื้อเพลิงพลังงานชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนและทำให้สะอาดให้อยู่ในระดับที่เท่ากันและบางครั้งก็สูงกว่าถ่านหินประโยชน์ของงานนี้คือเชื้อเพลิงชีวมวลจะถูกนำมาเผาพร้อมกับถ่านหินซึ่งจะช่วยลดก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อนในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อแหล่งชีวมวลจำนวนสองแหล่งในแอฟริกาใต้ตัวแปรได้แก่อุณหภูมิ ปริมาณออกซิเจน อัตราให้ความร้อน และ ช่วงเวลาเผา พบว่าช่วงอุณหภูมิระหว่าง 275 ถึง 300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะเฉื่อยที่มีอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีและช่วงเวลาเผาระหว่าง 20 ถึง 40 นาทีซึ่งให้ได้ชีวมวลที่ดีที่สุด มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินทำให้สามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลร่วมกับถ่านหินเพื่อผลิตพลังงานได้ในสัดส่วนที่ต่างกัน

ในปี ค.ศ. 2017. Martin et al. [23] ได้นำเงื่อนไขการทดลองตรวจสอบคุณสมบัติสำหรับกระบวนการทอรรีแพคชั้น สำหรับกิ่งของต้นมะกอกโอลีฟการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของเชื้อเพลิงสำหรับกิ่งของต้นมะกอกได้รับการปรับปรุงโดยกระบวนการทอรรีแพคชั้น สำหรับตัวอย่างกิ่งมะกอกที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาทีของชีวมวลที่ยังไม่ผ่านกระบวนการเพิ่มขึ้นอัตราส่วนเรโซคาร์บอนคงที่ต่อสารระเหย (จาก 0.23 ถึง 0.39) และปรับปรุงคุณภาพเชื้อเพลิงการวิเคราะห์ธาตุ พบว่าองค์ประกอบของกิ่งของต้นมะกอกโอลีฟ เปลี่ยนจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส ไปเป็นถ่านหิน (อัตราส่วน O/C และ H/C ของตัวอย่างคือ 1.02 และ 0.17 และของชีวมวลดิบคือ 0.90 และ 0.15

ในปี ค.ศ. 2017. Wang Liang et al. [24] ได้ศึกษาผลกระทบต่อประเภทวัสดุของสนนอร์เวย์คือ กิ่งไม้ ตอไม้และเปลือกไม้ที่ได้นำมาทำการทอรรีไฟต์ในเตาปฏิกรณ์แบบท่อและศึกษาค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการทอรรีไฟต์ เช่น อุณหภูมิกระบวนการทอรรีไฟต์ ช่วงเวลาในการทอรรีไฟต์ ต่อความสามารถในการบด และคุณสมบัติทางเคมีโดยวิเคราะห์ตัวอย่างชีวมวลที่เป็นทอรรีไฟต์แล้ว แล้วนำมาเปรียบเทียบในแต่ละช่วงอุณหภูมิในการทอรรีไฟต์ ช่วงเวลาในการทอรรีไฟต์ มีผลกระทบเล็กน้อยต่อความสามารถในการบดของกิ่งและตอ สำหรับเปลือกดิบพลังงานบดน้อยกว่า เมื่อเทียบกับกิ่งและตอ การทอรรีไฟต์มี

ผลกระทบเล็กน้อยต่อความสามารถในการบัดของเปลือกไม้ ปริมาณเซลลูโลสของกิ่งและต่อไม้มีการลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ในการทอรรีไฟด์ที่ในทางตรงกันข้าม ปริมาณเซลลูโลสของเปลือกไม้จะลดลงอย่างมากที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียสในการทอรรีไฟด์

ในปี ค.ศ. 2018. Li ShU-Xian et al. [25] ได้นำข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟด์ชั้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 220 ถึง 230 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่มีผลผลิตมวลรวม 69.38 ถึง 95.03 เปอร์เซ็นต์ และ 67.20 ถึง 94.99 เปอร์เซ็นต์ และค่าความร้อนสูงขึ้น 16.58 ถึง 24.77 เมกะวัตต์ต่อกิโลกรัม และ 16.68 ถึง 24.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของถ่านหิน ได้รับการประเมินโดยวิธีการทางสเปกโตรสโกปีการกำหนดคุณสมบัติและการเผาไหม้เอมิเซลลูโลสไม่ได้รับการตรวจพบว่ามีในกระบวนการทอรรีไฟด์ชั้น แนวโน้มเพิ่มขึ้นของความเข้มของ C จะเพิ่มขึ้นในขณะที่ความเข้มของ H และ O ลดลงการทดสอบการเผาไหม้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิการเผาไหม้ของถ่านที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นและกระบวนการทอรรีไฟด์ชั้นที่อุณหภูมิสูง ช่วยลดระยะเวลาในการเผาไหม้ทั้งหมด จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มีการใช้กระบวนการทอรรีไฟด์ชั้นบนพื้นฐานของข้อมูลความร้อนที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์

ในปี ค.ศ. 2017. Yan Zhang et al. [26] ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทอรรีไฟด์ชีวมวลร่วมกับการแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหินที่ยังไม่ผ่านกรรมวิธีและชีวมวลที่ผ่านการทอรรีไฟด์แล้วและยังมีความคล้ายกันถึงการรวมกันของการทอรรีไฟด์ ของของเหลวควบแน่นกับถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้กากของเหลวที่ควบแน่นร่วมกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน ถ่านชีวภาพที่ถูกการทอรรีไฟด์มีส่วนร่วมในการประสานร่วมกันได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับระดับการผสมผสานของส่วนผสมชีวมวลดิบที่ลดลงนอกจากนี้เรายังเสนอแนวทางที่เป็นไปได้ในการผสมของของเหลว หลังจากผ่านเครื่องควบแน่นที่ทำให้เกิดการทอรรีไฟด์จากถ่านหินและถ่านชีวภาพ ซึ่งโดยจะใช้เชื้อเพลิงแข็งชนิดโบนารี ผสมที่อัตราส่วน 12-18/100 ที่จะสามารถหาได้ในวิธีนี้การควบแน่นของไอกลายเป็นของเหลวสามารถถูกแปลงเป็นถ่านหิน

ในปี ค.ศ. 2017. Isemin Rafail et al. [27] ได้ทำการทอรรีไฟด์ชั้นโดยได้นำสาหร่ายขนาดเล็ก (สาหร่ายสีน้ำตาล) เป็นตัวอย่างในการศึกษาโดยจะส่งสาหร่ายชนิดนี้เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดเบดนิ่งแบบท่อภายในบรรยากาศไนโตรเจนตั้งแต่ 423 ถึง 573 เคลวิน สาหร่ายสีน้ำตาลจะผ่านกระบวนการทอรรีไฟด์ชั้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าชีวมวลที่อยู่บนบกผลลัพธ์คือที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน คืออุณหภูมิต่ำสุดของอุณหภูมิที่ใช้ พบว่าเหมาะสมสำหรับผลผลิตของพลังงานสำหรับกระบวนการทอรรีไฟด์ชั้น เป็นที่น่าสนใจและให้พลังงานสูงสุดคิดเป็น 94 เปอร์เซ็นต์

ในปี ค.ศ. 2018. Gan Yong Yang et al. [28] ได้นำสาหร่ายขนาดเล็กมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ ชีวมวลสาหร่ายและเศษเหลือมีค่า ความร้อนต่ำ ความชื้นสูงและอัตราส่วนอะตอม H/C และ O/C สูงซึ่งไม่เหมาะที่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งและการใช้งานด้านวิศวกรรมกระบวนการทอรรีแฟคชัน เป็นแนวโน้มทางเทคนิคการปรับปรุงคุณภาพชีวมวล สาหร่ายขนาดเล็กให้มีคุณสมบัติเทียบเท่าถ่านหินแข็งโดยการปรับปรุงคุณภาพนี้จะเพิ่มค่าความร้อนของถ่านชีวภาพ ให้มีค่าความร้อนที่สูง ค่าพลังงานและปริมาณคาร์บอน และในกระบวนการทอรรีแฟคชันจะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของชีวมวลโดยมีคุณสมบัติของชีวมวลให้ใกล้เคียงกับคุณภาพของถ่านหิน

ในปี ค.ศ. 2018. Toscano et al. [29] ได้ทำการตรวจสอบเงื่อนไขเบื้องต้นที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาของเทคโนโลยีใหม่ สำหรับการเผาไหม้พร้อมกันของถ่านหินและชีวมวล เทคโนโลยีนี้รวมผลิตภัณฑ์เป็นเม็ดจากถ่านหินและชีวมวลผสมกันและกระบวนการทอรรีแฟคชันของเม็ดผลิตภัณฑ์ ในสภาวะแวดล้อมออกซิเจนต่ำในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 230 ถึง 270 องศาเซลเซียส ผลการทดลองนั้นแสดงให้เห็นว่า เมื่อผ่านกระบวนการทอรรีแฟคชันลักษณะทางกายภาพแบบเม็ดมีค่าความร้อนที่สูงขึ้น 17 เปอร์เซ็นต์ และขีดจำกัดการดูดความชื้นต่ำกว่า 1.55 เท่า ดังนั้นข้อได้เปรียบที่สำคัญของเม็ด หลังจากกระบวนการทอรรีแฟคชันที่ผลิตจากส่วนผสมของถ่านหินและชีวมวล จะมีส่วนเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ 5 เปอร์เซ็นต์

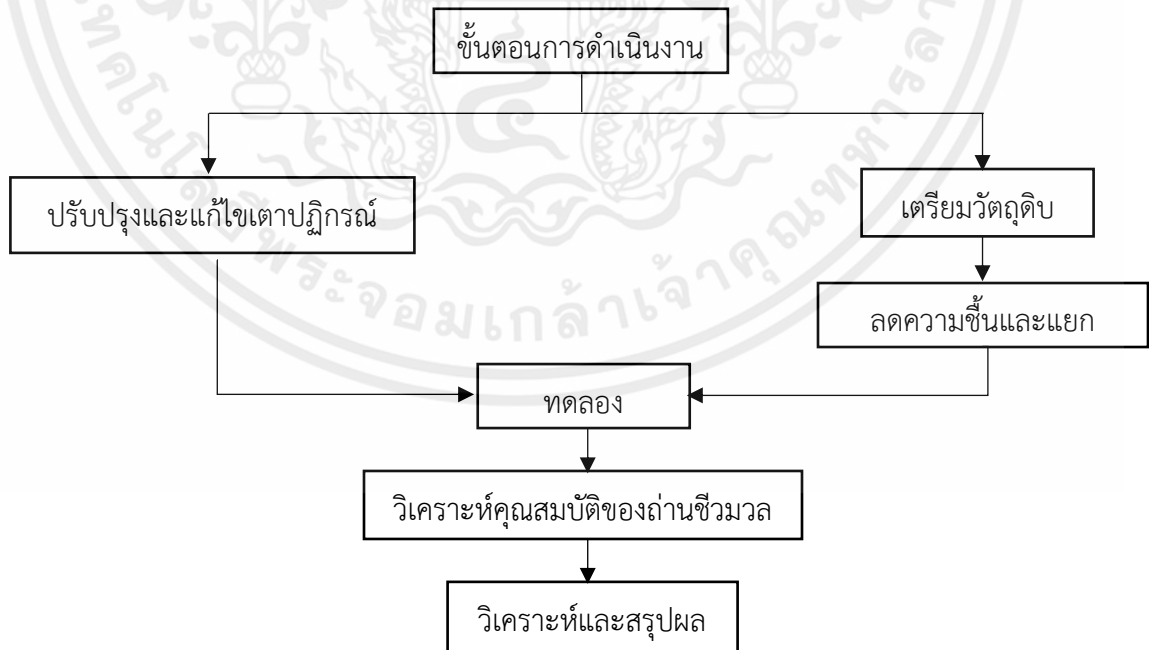
บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการทอรีไฟด์เศษเหลือจากมังคุด เพื่อนำไปใช้เป็นถ่านชีวมวล โดยจะผ่านการทอรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 240 องศาเซลเซียส ในช่วงเวลา 30 กับ 45 นาที ซึ่งจะใช้เศษเหลือจากมังคุดเป็นวัตถุดิบในการทดลองและเพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพของถ่านชีวมวลนี้ จึงได้ทำการวิเคราะห์หาคุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวมวล เพื่อหาค่าความชื้น หาค่าความร้อนสูง หาค่าปริมาณที่เผา และหาประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของชีวมวลโดยการทดสอบด้วยกระบวนการ Water Boiling Test (WBT)

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

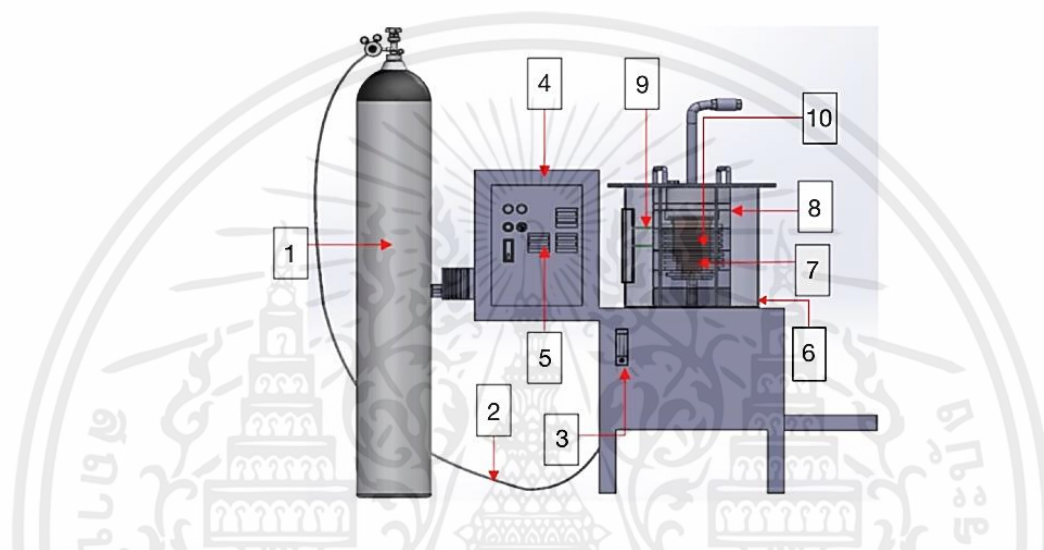
การศึกษานี้ได้ทำการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือในส่วนของการปรับปรุงและแก้ไขเตาปฏิกรณ์ เช่น แก้ไขแผงวงจรตัวควบคุม ติดเซนเซอร์วัดการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งในอีกส่วนเป็นส่วนที่เกี่ยวข้องกับด้านการเตรียมวัตถุดิบในการทดสอบเมื่อเสร็จแล้วจึงเริ่มทำการทดลองวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 องค์ประกอบของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรีไฟต์

การผลิตถ่านชีวมวลโดยการผ่านการทอรีไฟต์จำเป็นต้องใช้เตาที่มีรูปแบบการปริมาณความร้อนรูปแบบเฉพาะ และเตาปฏิกรณ์จะต้องเป็นเตาแบบระบบปิดที่ทำการไล่ก๊าซออกซิเจนแล้วยังสามารถควบคุมอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงตามที่ต้องการได้ เพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตา ทั้งนี้รูปแบบที่ใช้จะแสดงในรูปที่ 3.2



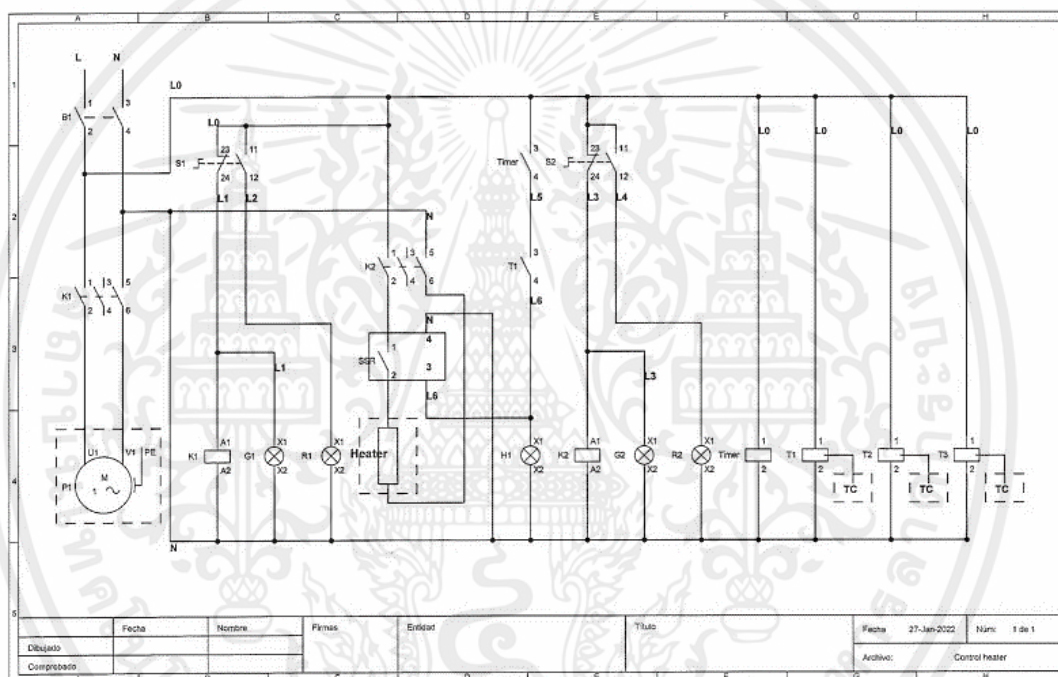
รูปที่ 3.2 องค์ประกอบของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรีไฟต์

อุปกรณ์ของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรีไฟต์

1. ก๊าซไนโตรเจน เพื่อไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากเตา
2. สายแก๊สไนโตรเจน ทำให้ไนโตรเจนไหลผ่านเข้าตัวเตาปฏิกรณ์ทางด้านล่าง
3. โรตاميเตอร์ (Rotameter) เพื่อควบคุมการไหลของก๊าซไนโตรเจน
4. ตู้ควบคุม
5. จอแสดงอุณหภูมิ (Temperature display) เพื่อแสดงค่าอุณหภูมิที่ได้จากเซนเซอร์
6. เตาปฏิกรณ์ (Reactor) เพื่อบรรจุและให้ความร้อนเศษเหลือจากมังคุด
7. เตาชั้ใน เป็นส่วนที่ติดตั้งขดลวดเพื่อให้เกิดความร้อนแก่เศษเหลือจากมังคุด
8. เตาชั้นอก เป็นฉนวนในการป้องกันความร้อนไม่ให้ความร้อนเกิดการสูญเสียสู่บรรยากาศมากเกินไป ซึ่งมีฉนวนกันความร้อนอยู่ 2 ชนิดคือ อิฐมวลเบาและใยแก้ว
9. เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) เพื่อวัดอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์
10. ขดลวดความร้อน เพื่อเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน

3.3 หลักการออกแบบตู้ควบคุม

หลักการออกแบบตู้ควบคุมการทำงานของเตาปฏิกรณ์ที่นำไปใช้ในการทอรีไฟด์จะต้องมีการคำนึงถึงการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ มีการตรวจวัดอุณหภูมิแต่ละจุดภายในเตาปฏิกรณ์ และต้องควบคุมให้ได้ถึงอุณหภูมิตามที่ต้องการ ซึ่งในตู้ควบคุมจะประกอบด้วยอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับควบคุม ได้แก่ ฟิวส์เบรกเกอร์ (Fuse breaker), เบรกเกอร์ (Breaker), Temperature controller box, Terminal box, LED, Switch, Solid state relay, Timer และสามารถเขียนวงจรไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนวงจรสำหรับควบคุมการทำงานของเตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอรีไฟด์

3.4 อุปกรณ์และขั้นตอนการเตรียมวัสดุดิบในการทดสอบ

1. นำเศษเหลือจากมังคุดมาวัดหาค่าความชื้นเริ่มต้น โดยการนำเศษเหลือจากมังคุดมาชั่งน้ำหนักและนำไปแช่น้ำเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นนำมาอบในตู้อบลมร้อน แล้วกำหนดอุณหภูมิเป็น 105 องศาเซลเซียส และกำหนดเวลาในการอบเป็น 12 ชั่วโมง เมื่อครบ 12 ชั่วโมง จึงนำเศษเหลือจากมังคุดออกจากตู้อบลมร้อน แล้วนำชั่งน้ำหนักอีกครั้งตามมาตรฐาน ASTM D3172 ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)

2. แยกขนาดเศษเหลือจากมังคุด เพื่อให้ได้ขนาดของมังคุดโดยแยกเป็น 2 ขนาด ขนาดใหญ่และขนาดกลาง เพื่อนำไปใช้ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แยกขนาดเศษเหลือจากมังคุด (ก) ขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมังคุด
(ข) ขนาดกลางหรือขนาด 1/4 ของลูกมังคุด

3. นำเศษเหลือจากมังคุดที่แยกขนาดแล้วทั้ง 2 ขนาด มาชั่งน้ำหนักเป็นถุงละ 100 กรัม โดยชั่งด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง

4. จัดเก็บเศษเหลือจากมังคุด โดยแยกตามขนาดที่กำหนดและนำซองกันชื้นมาใส่ในถุงเพื่อรักษาความชื้นไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.7 จัดเก็บตัวอย่างเศษเหลือจากมังคุด (ก) ขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมังคุด
(ข) ขนาดกลางหรือขนาด 1/4 ของลูกมังคุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

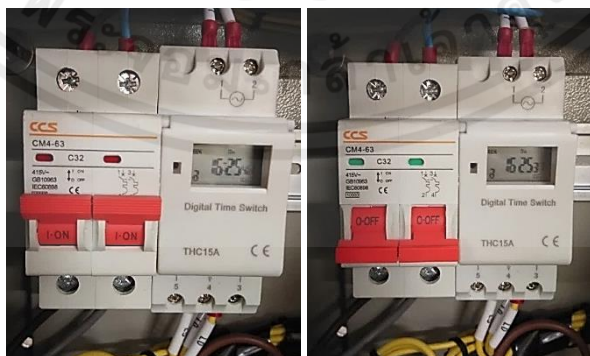
3.5 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองการผลิตถ่านชีวมวลที่ผ่านการทอร์รีไฟต์ของเศษเหลือจากมังคุดจะใช้เตาปฏิกรณ์ในการทอร์รีไฟต์ซึ่งอุปกรณ์หลักแสดงในรูปที่ 3.2 และเตาปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิสำหรับการทอร์รีไฟต์ 200 ถึง 240 องศาเซลเซียส โดยจะเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทีละ 10 องศาเซลเซียสจะดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เตาปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทอร์รีไฟต์

1. เสียบปลั๊กเตาปฏิกรณ์
2. เปิดสวิตช์ฟิวส์เบรกเกอร์ให้สวิตช์ฟิวส์เบรกเกอร์ขึ้น ON ภายในตู้ควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.9

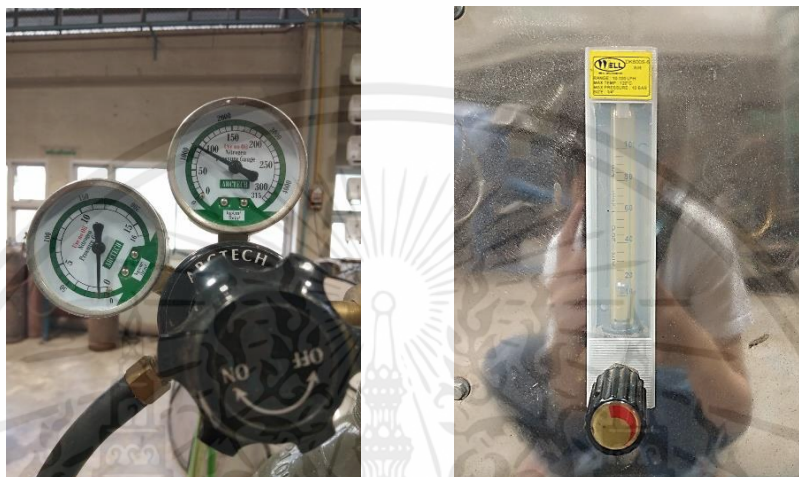


รูปที่ 3.9 ฟิวส์เบรกเกอร์เปิด - ปิดเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปิดฝาเตาปฏิกรณ์นำเศษเหลือจากมังคุดที่แยกขนาดและชั่งน้ำหนักไว้ใส่ลงภายในเตาปฏิกรณ์ แล้วปิดฝาเตาปฏิกรณ์

4. เปิดวาล์วปล่อยก๊าซไนโตรเจน ปรับแรงดันไปที่ 1 บาร์และทำการปรับอัตราการไหล 10 ลิตร/ ชั่วโมง ที่โรตاميเตอร์เปิดปล่อยออกซิเจนเป็นเวลา 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วาล์วและโรตاميเตอร์

5. ตั้งอุณหภูมิตามที่ต้องการใช้ในการทดลองและทำการปรับอุณหภูมิได้ที่ Temperature controller ตัวที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 Temperature controller ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เปิดสวิตช์ระบบ (System) เพื่อให้เครื่องทำงานพร้อมจับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 สวิตช์ระบบ (System)

7. เมื่ออุณหภูมิถึงช่วงที่กำหนดทำการจับเวลาและบันทึกผลอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์โดยจะบันทึกผลทุก ๆ 5 นาที จนถึงเวลาที่กำหนด
8. ปิดสวิตช์ระบบ (System) เพื่อหยุดการทำงานของขดลวดให้ความร้อน (Heater)
9. รอให้อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ลดลงแล้วค่อยเปิดฝาเตาปฏิกรณ์นำเศษเหลือจากมังกุดออกมา ซึ่งจะใช้เวลาให้อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ลดลงประมาณ 7 ถึง 8 ชั่วโมง
10. ทำการเปิดฝาเตาปฏิกรณ์เพื่อนำเศษเหลือจากมังกุดมาวิเคราะห์ผล
11. นำเศษเหลือจากมังกุดที่ผ่านการทอร์รี่ไฟต์ใส่ในโถดูดความชื้น
12. หาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของชีวมวลโดยการทดสอบด้วยกระบวนการ Water Boiling Test (WBT) โดยเตาชีวมวลระดับครัวเรือน

3.6 ขั้นตอนวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวมวล (Proximate analysis)

ในขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของถ่านชีวมวลได้ทำการวิเคราะห์ตาม มาตรฐาน ASTM D3172

3.6.1 การหาปริมาณความชื้น (Moisture)

ทำการวิเคราะห์โดยเศษเหลือจากมังกุดจะถูกเผาให้ความร้อนคงที่ ที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอน้ำระเหยออก

3.6.1.1 เครื่องมือที่ใช้

1. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
2. ภาชนะ
3. เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง
4. โถดูดความชื้น

3.6.1.2 วิธีการทดลอง

1. ใสตัวอย่างประมาณ 5 กรัม จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (น้ำหนักก่อนอบ)
2. นำตัวอย่างไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำออกมาใส่โถดูดความชื้น
3. นำตัวอย่างออกมาจากโถดูดความชื้นและนำไปชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (น้ำหนักหลังอบ)

3.6.1.3 สูตรคำนวณหาค่าความชื้น เพื่อหาค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังกุดหลังจากผ่านการทอรีไฟต์แล้ว

$$\% \text{ความชื้น} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}}{\text{น้ำหนักก่อนอบ}} \times 100$$

3.6.2 การหาค่าความร้อน (High heating value)

การหาค่าความร้อนของเศษเหลือจากมังกุด โดยการเผาเศษเหลือจากมังกุดที่ทราบน้ำหนักแน่นอนในเครื่อง Bomb calorimeter (C1, IKA) ค่าความร้อนที่ได้รับจากเครื่อง Bomb calorimeter คือค่าความร้อนสูง (HHV) โดยเป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยอากาศ (Combustion) ของชีวมวลแต่ละชนิด ซึ่งทั่วไปค่าความร้อนจะแสดงในรูปของปริมาณความร้อนต่อ หนึ่งหน่วยน้ำหนัก หรือหนึ่งหน่วยปริมาตร

3.6.2.1 เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่อง Bomb calorimeter ดังแสดงในรูปที่ 3.13
2. เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง



รูปที่ 3.13 เครื่อง Bomb calorimeter รุ่น C1,IKA

3.6.2.2 วิธีการทดลอง

1. ใส่ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักที่เครื่องชั่งดิจิทัล
2. นำตัวอย่างใส่ในลูกบอมบ จากนั้นผูกด้วยที่เป็นฉนวนนำความร้อนกับลวดให้ความร้อน จากนั้นนำด้ายที่ผูกไว้ไปสัมผัสกับตัวอย่างชีวมวลที่ขังไว้ในลูกบอมบ
3. เปิดทำงานเครื่องบอมบรอเป็นเวลาประมาณ 20 นาที
4. เมื่อเสร็จสิ้นการทำงาน ทำการจดค่าความร้อนที่อ่านได้จากเครื่อง Bomb calorimeter จากนั้นก็นำตัวอย่างออกมาแล้วทำความสะอาดลูกบอมบ

3.6.3 การหาปริมาณขี้เถ้า (Ash content)

ทำการวิเคราะห์โดยเศษเหลือจากมั่งคุดจะถูกเผาให้ความร้อนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส แล้วนำไปคำนวณหาปริมาณขี้เถ้าจากน้ำหนักเศษเหลือจากมั่งคุดที่เหลืออยู่ภายหลังจากการเผาเสร็จสิ้น

3.6.3.1 เครื่องมือที่ใช้

1. ตู้อบลมร้อน (Hot air oven)
2. ถ้วยทนไฟ (Crucible)
3. โถดูดความชื้น (Desiccators)

4. คีมคีบถ้วยทนไฟ (Crucible)
5. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace)
6. เครื่องชั่งดิจิทัล 4 ตำแหน่ง

3.6.3.2 วิธีการทดลอง

1. นำถ้วย Crucible ที่สะอาดไปอบในตู้อบลมร้อน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccators) 30 นาที จึงนำไปชั่งน้ำหนัก
2. ใส่วัตถุอย่างประมาณ 1 กรัม จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักที่เครื่องชั่งดิจิทัล 4 ตำแหน่ง (น้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนอบ)
3. นำไปเผาในเตาเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสแล้วปิดเตาทิ้งให้เตาเย็นตัวลง จากนั้นใส่ในโถดูดความชื้น (Desiccators) 30 นาที จึงนำไปชั่งน้ำหนัก (น้ำหนักเชื้อเพลิงหลังอบ)

3.6.3.3 สูตรคำนวณหาค่าปริมาณขี้เถ้า เพื่อหาค่าปริมาณขี้เถ้าของเศษเหลือจากมังกะคุด หลังจากผ่านการทอรีไฟต์แล้ว

$$\% \text{ ขี้เถ้า} = \frac{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงหลังอบ}}{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงก่อนอบ}} \times 100$$

3.6.4 ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน (Heat utilization efficiency %)

หาได้จากการทดสอบแบบวิธีต้มน้ำเดือด (Water boiling test ; WBT)

3.6.4.1 เครื่องมือที่ใช้

1. ถ่านชีวมวลที่ผ่านการทอรีไฟต์
2. เตาถ่านขนาดเล็ก
3. หม้อต้มน้ำ
4. ปีกเกอร์ (Beaker)
5. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
6. เครื่องชั่งดิจิทัล 2 ตำแหน่ง
7. ที่คีบถ่าน

3.6.4.2 วิธีการทดลอง

1. นำเศษเหลือจากมั่งคุดที่ผ่านการทอรรีไฟด์แล้ว ไปชั่งน้ำหนักที่เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 70 กรัม
2. นำน้ำจำนวน 100 มิลลิลิตร ไปชั่งน้ำหนักที่เครื่องชั่งดิจิตอล 2 ตำแหน่ง และวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนต้ม
3. นำถ่านชีวมวลที่ผ่านการทอรรีไฟด์ที่ชั่งแล้วไปเผาไฟทำการต้มน้ำให้น้ำเดือดและทำการวัดอุณหภูมิของน้ำที่เดือดพร้อมจับเวลา
4. นำน้ำที่ต้มเดือดแล้วไปชั่งเพื่อหามวลของน้ำที่ระเหยไป

3.6.4.3 สูตรคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการใช้ความร้อน เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเศษเหลือจากมั่งคุดหลังจากผ่านการทอรรีไฟด์แล้ว

$$HU(\%) = \frac{M_w C \Delta T + M_c h_{fg}}{M_f H_f} \times 100$$

เมื่อ M_c มวลของน้ำที่ระเหย หาจากมวลของน้ำก่อนต้ม - มวลของน้ำที่เดือด (kg)
 M_f มวลของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการให้ความร้อน (มวลของเชื้อเพลิงก่อนเผา - มวลของเชื้อเพลิงหลังเผา) (kg)

M_w มวลของน้ำเริ่มต้น (Kg)

C ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำเท่ากับ $4.187 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)}$

ΔT อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^\circ\text{C}$)

H_f ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงที่ได้จากการ Bomb calorimeter (kJ/kg)

h_{fg} ความร้อนแฝงของน้ำจากการระเหยเป็นไอเท่ากับ $2,257 \text{ (KJ/Kg)}$

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผล

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงคุณสมบัติเศษเหลือจากมังคุด เพื่อนำไปใช้เป็นถ่านชีวมวล โดยผ่านการทอร์รีไฟต์ และนำถ่านที่ได้หาค่าความชื้น หาค่าความร้อนสูง หาปริมาณซีเถ้า และหาประสิทธิภาพการเผาไหม้ของชีวมวลโดยการทดสอบด้วยกระบวนการ Water Boiling Test (WBT) เพื่อสามารถวิเคราะห์ความเป็นถ่านได้มากขึ้น




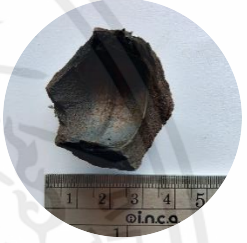




4.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านชีวมวลจากเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอร์รีไฟต์

ลักษณะทางกายภาพเป็นลักษณะที่สามารถมองเห็นได้จากภายนอก เช่น สัดส่วน ขนาด และสี ที่ปรากฏออกมาจากเศษเหลือจากมังคุดเพื่อให้ได้เปรียบเทียบกับลักษณะทางกายภาพระหว่างเศษเหลือจากมังคุดที่ยังไม่ได้ผ่านการทอร์รีไฟต์และเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอร์รีไฟต์แล้ว โดยจะดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเศษเหลือจากมังคุด ในช่วงเวลาการทอร์รีไฟต์ 30 นาที

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ขนาด	
	ใหญ่	กลาง
ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทอร์รีไฟต์		
200		

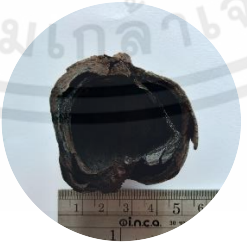
ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเศษเหลือจากมังคุด ในช่วงเวลาการทอดรีไฟต์ 30 นาที (ต่อ)

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ขนาด	
	ใหญ่	กลาง
210		
220		
230		
240		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเศษเหลือจากมังคุดที่ยังไม่ผ่านการทอรรีไฟด์จะมีลักษณะสีที่ปรากฏเป็นสีน้ำตาลประกายแดงและผิวเศษเหลือจากมังคุดจะไม่มีน้ำมันเงา เมื่อนำมาผ่านการทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ลักษณะสีที่ปรากฏจากเศษเหลือจากมังคุดยังคงมีสีน้ำตาลแต่ผิวเศษเหลือจากมังคุดเริ่มมีความมันเงาขึ้นเล็กน้อย เมื่อนำเศษเหลือจากมังคุดมาผ่านการทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 210 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ลักษณะสีที่ปรากฏจากเศษเหลือจากมังคุดมีสีน้ำตาลเข้มเริ่มมีสีดำปรากฏขึ้นเล็กน้อยแล้วผิวเศษเหลือจากมังคุดยังมีลักษณะมันเงามากขึ้นตามลำดับและเมื่อนำมาผ่านการทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ลักษณะสีที่ปรากฏจากเศษเหลือจากมังคุดมีสีเริ่มดำคล้ำขึ้นและเมื่อนำมาผ่านการทอรรีไฟด์ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ลักษณะสีที่ปรากฏจากเศษเหลือจากมังคุดเปลี่ยนเป็นสีดำสนิท และผิวเศษเหลือจากมังคุดยังมีความมันเงา จึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรรีไฟด์มีผลในการทำให้ลักษณะสีเศษเหลือจากมังคุดเข้มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของเศษเหลือจากมังคุด ในช่วงเวลาการทอรรีไฟด์ 45 นาที

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ขนาด	
	ใหญ่	กลาง
ตัวอย่างที่ไม่ผ่านการทอรรีไฟด์		
200		

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของเศษเหลือจากมังคุด ในช่วงเวลาการทอดรีไฟต์ 45 นาที (ต่อ)

อุณหภูมิที่ทำการทดลอง (องศาเซลเซียส)	ขนาด	
	ใหญ่	กลาง
210		
220		
230		
240		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเศษเหลือจากมังคุดที่ยังไม่ผ่านการทอรีไฟต์จะมีลักษณะสีที่ปรากฏเป็นสีน้ำตาลประกายแดงและผิวเศษเหลือจากมังคุดจะไม่มีน้ำมันเงา เมื่อนำมาผ่านการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ลักษณะสีที่ปรากฏจากเศษเหลือจากมังคุดเริ่มมีสีดำแต่ยังคงมีสีน้ำตาลเล็กน้อยและผิวเศษเหลือจากมังคุดเริ่มมีความมันเงา ในขณะที่นำเศษเหลือจากมังคุดมาผ่านการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 210 และ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ลักษณะสีที่ปรากฏจากเศษเหลือจากมังคุดมีสีดำปรากฏและผิวเศษเหลือจากมังคุดยังมีลักษณะมันเงามากขึ้นตามลำดับ และเมื่อนำมาผ่านการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ลักษณะสีที่ปรากฏจากเศษเหลือจากมังคุดมีสีดำคล้ำมากขึ้น โดยที่ผิวเศษเหลือจากมังคุดยังมีลักษณะเริ่มคล้ายถ่าน เมื่อนำมาผ่านการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ลักษณะสีที่ปรากฏจากเศษเหลือจากมังคุดเปลี่ยนเป็นสีดำสนิทและผิวเศษเหลือจากมังคุดมีความมันเงาคล้ายถ่านมาก

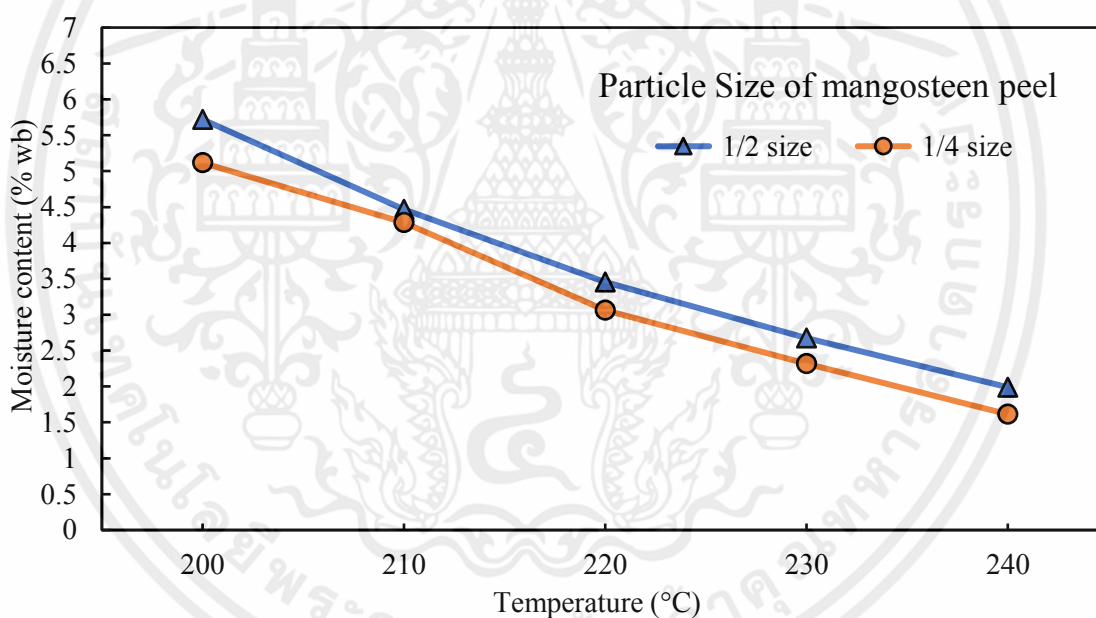
จากการทอรีไฟต์เศษเหลือจากมังคุด จะเห็นได้ว่าเริ่มต้นกระบวนการเศษเหลือจากมังคุดจะมีลักษณะสีที่ปรากฏเป็นสีน้ำตาลจากนั้นเมื่อผ่านการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เศษเหลือจากมังคุดจะค่อย ๆ กลายเป็นสีน้ำตาลเข้ม ซึ่งเมื่อผ่านการทอรีไฟต์ในอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่ 210 ถึง 230 องศาเซลเซียส เศษเหลือจากมังคุดจะมีลักษณะสีที่ปรากฏเป็นสีน้ำตาลเข้มค่อย ๆ กลายเป็นสีดำ ทั้งนี้เมื่อผ่านการทอรีไฟต์ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เศษเหลือจากมังคุดจะมีลักษณะสีที่ปรากฏเป็นสีดำเข้มสนิทเหมือนถ่านและสีจะคล้ายคลึงกับถ่านที่ได้จากการเผา เช่น ถ่านไม้ต่าง ๆ สีเศษเหลือจากมังคุดจะเข้มขึ้นเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นการผ่านการทอรีไฟต์อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เศษเหลือจากมังคุดจะคายน้ำที่ดูดซับอยู่ในระหว่างเซลล์ และน้ำอยู่ในผนังเซลล์เท่านั้น จะไม่มีน้ำที่เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างเจือปนออกมาเลย จึงทำให้สีเศษเหลือจากมังคุดในช่วงนี้ยังไม่เปลี่ยนสีไปมาจากเดิม ช่วงอุณหภูมิ 210 ถึง 220 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เฮมิเซลลูโลสจะเริ่มสลายตัวออกมาและจะสลายตัวจนหมดที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส ควรรักษาอุณหภูมินี้ไว้นานพอสมควร เพื่อให้เศษเหลือจากมังคุดได้สะสมความร้อนได้ใกล้เคียงกันทั่วทุกจุดของเตาปฏิกรณ์ ช่วงนี้จึงทำให้ถ่านที่ได้กลายเป็นสีน้ำตาล อุณหภูมิระหว่าง 230 ถึง 240 องศาเซลเซียส ช่วงนี้เซลลูโลสยังสลายตัวอย่างต่อเนื่อง และลิกนินจะเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส การสลายตัวทั้งหมดจะเสร็จสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมินี้ทำให้ถ่านชีวมวลที่ได้เป็นสีน้ำตาลเข้มค่อนข้างไปทางดำ เนื่องจากลิกนินสลายตัวหมด ดังนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน โดยเริ่มตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟต์มีผลในการทำให้ลักษณะสีเศษเหลือจากมังคุดเข้มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง [31]

4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอรีไฟต์

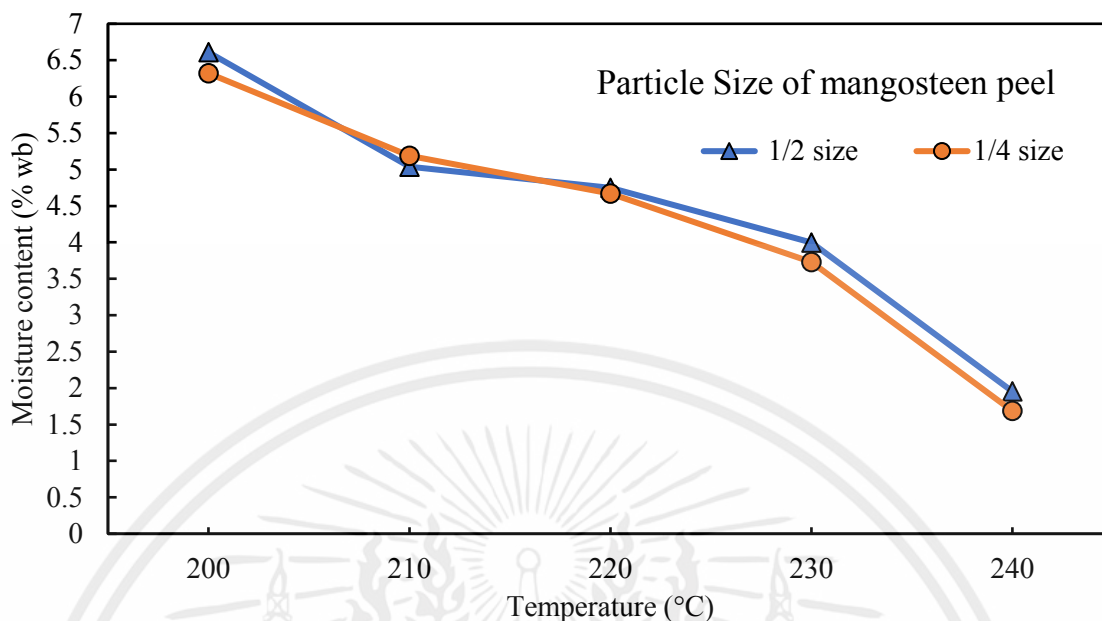
การวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอรีไฟต์เป็นการตรวจสอบความสามารถในการเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

4.2.1 การหาค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังคุด

ค่าความชื้น เป็นคุณสมบัติที่สำคัญเพราะชีวมวลแต่ละชนิดที่นำมาใช้ส่วนใหญ่ต้องการนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ หากชีวมวลมีค่าความชื้นที่สูงก็ไม่ควรนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ เนื่องจากปริมาณความชื้นจะส่งผลต่อค่าความร้อนทำให้ค่าความร้อนลดลง ดังนั้นเมื่อนำเศษเหลือจากมังคุดไปลดความความชื้นก่อนนำไปผ่านการทอรีไฟต์แล้ว เมื่อผ่านการทอรีไฟต์เสร็จแล้วจึงนำเศษเหลือจากมังคุดมาหาค่าความชื้นอีกครั้ง ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้แสดงแนวโน้มค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอรีไฟต์แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.3 ค่าความชื้นของเศษเปลือกจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 45 นาที

จากรูปที่ 4.2 ที่เวลาในการทอรรีไฟต์ 30 นาที จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 210 องศาเซลเซียส เปลือกมังคุดขนาดใหญ่จะมีความชื้นลดลงเร็วกว่าขนาดกลาง หลังจากช่วงอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ทั้งขนาดใหญ่และขนาดกลางมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งในช่วงอุณหภูมิ 220 ถึง 240 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นจะลดลงและเกือบเท่ากัน สรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความชื้นลดลง หรือกล่าวได้ว่าความชื้นของเปลือกมังคุดจะแปรผกผันกับอุณหภูมิในการทอรรีไฟต์

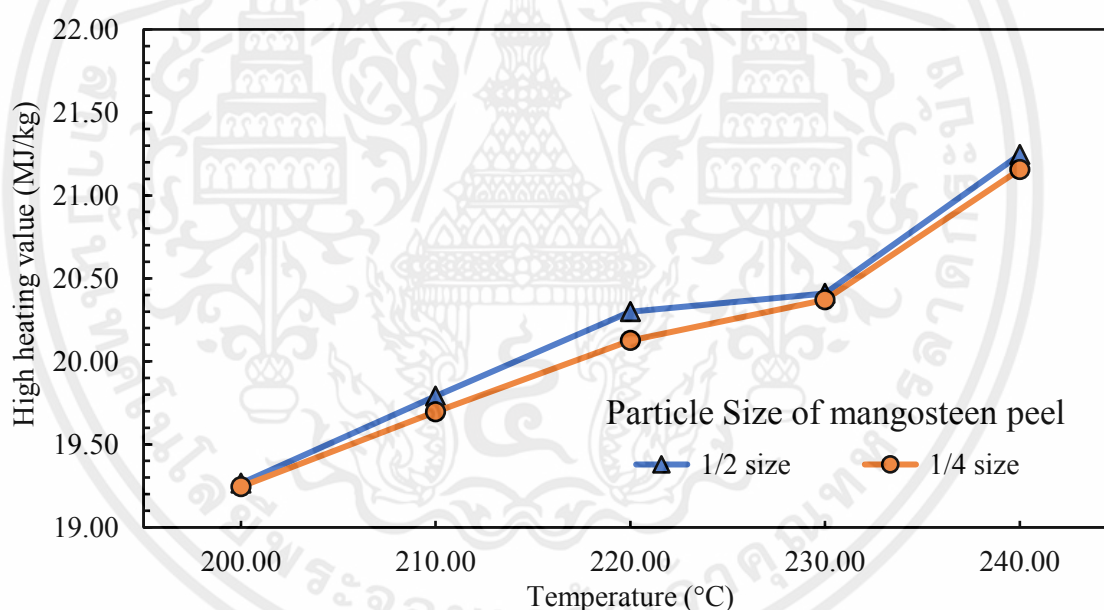
จากรูปที่ 4.3 เมื่อเวลาในการทอรรีไฟต์เป็น 45 นาที จะเห็นได้ว่าค่าความชื้นโดยมีความชื้นแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ช่วงแรกคืออุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ขนาดใหญ่เปลือกมังคุดมีค่าความชื้นสูงสุดและรองลงมาคือขนาดกลาง ช่วงที่ 2 คืออุณหภูมิที่ 210 ถึง 230 องศาเซลเซียส ความชื้นในเปลือกมังคุดจะลดลงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ ที่ ช่วงที่ 3 คือช่วงอุณหภูมิ 230 ถึง 240 องศาเซลเซียส ช่วงนี้จะมีค่าความชื้นลดลงมาก ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับเวลาในการทอรรีไฟต์ 30 นาที

ก่อนนำเศษเปลือกจากมังคุดมาผ่านการทอรรีไฟต์เศษเปลือกจากมังคุดจะมีค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ที่ 15 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์ค่าความชื้นของเศษจากมังคุดมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดคือ มีการลดลงของความชื้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีค่าความชื้นลดลงเหลือประมาณ 6.0 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 210 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นลดลงเหลือ 4.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 220 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นลดลงเหลือประมาณ 4.0 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 230 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นลดลงเหลือ 3.1 เปอร์เซ็นต์ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึง

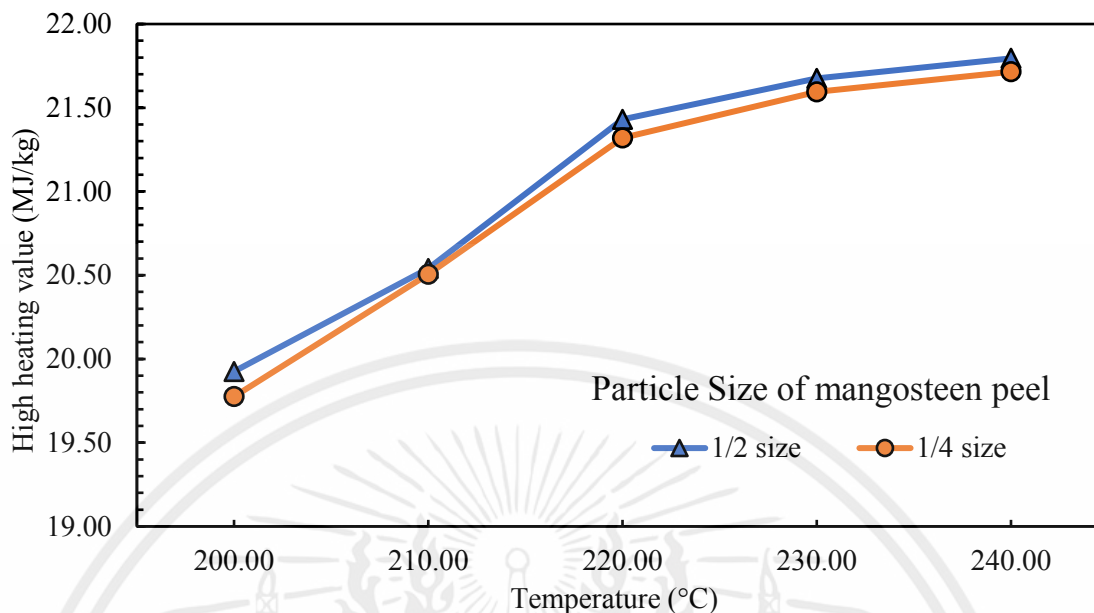
240 องศาเซลเซียส ค่าความชื้นจะลดลงน้อยมากซึ่งจะมีค่าความชื้นประมาณ 1.8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเศษเหลือจากมังคุดมีน้ำเป็นองค์ประกอบ เมื่ออุณหภูมิในการทอร์รีไฟต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ความชื้นในเศษเหลือจากมังคุดลดลง [34]

4.2.2 การหาค่าความร้อนสูงของเศษเหลือจากมังคุด

ค่าความร้อน เป็นปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เศษเหลือจากมังคุด ซึ่งจะแยกออกเป็นดังนี้ 1. เป็นค่าความร้อนที่สูง (High heating value) และ 2. เป็นค่าความร้อนที่ต่ำ (Low heating value) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการหาเพียงค่าความร้อนสูง โดยทำการหาจากเครื่องบอมม์แคลอรีมิเตอร์ เมื่อเครื่องแสดงผลแล้วจึงทำการจดบันทึกค่าที่ได้ หากเศษเหลือจากมังคุดมีคุณสมบัติค่าความร้อนสูงจะถือว่าเศษเหลือจากมังคุดนั้นมีความเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดี เพราะสามารถบอกถึงระดับพลังงานของถ่านชีวมวลแต่ละประเภทได้ ในการศึกษานี้จึงได้แสดงแนวโน้มค่าความร้อนสูงที่ได้จากเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอร์รีไฟต์แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 ค่าความร้อนสูงของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.5 ค่าความร้อนสูงของเศษเปลือกจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 45 นาที

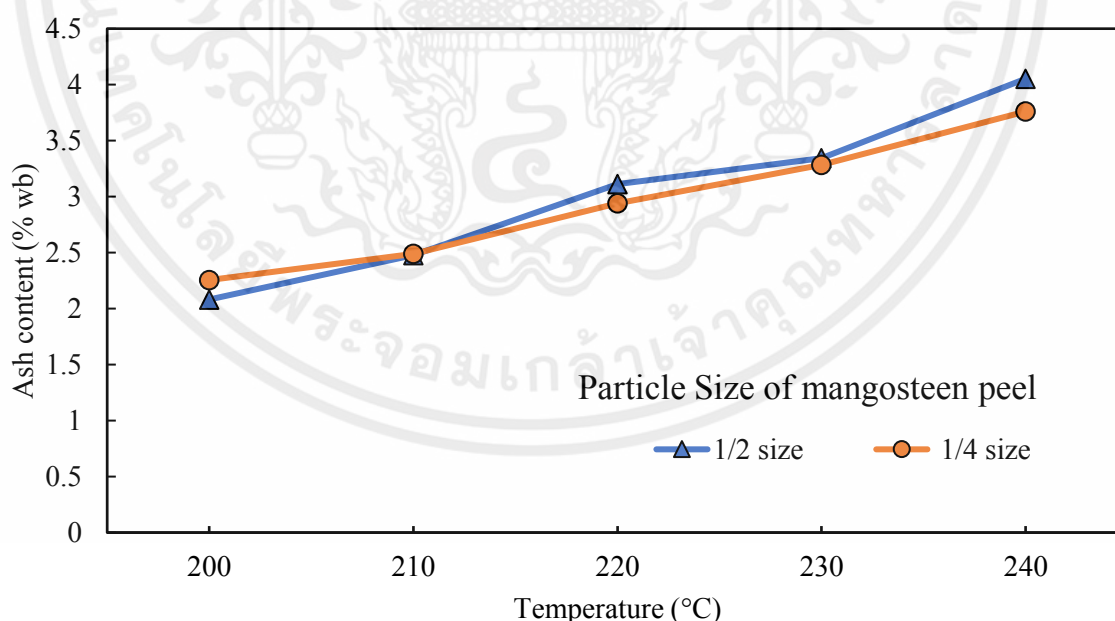
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำค่าความร้อนสูงของเศษเปลือกจากมังคุดที่ผ่านการทอร์รี่ไฟด์แล้ว มาเทียบกับอุณหภูมิในการทอร์รี่ไฟด์ เศษเปลือกจากมังคุดในช่วงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ขนาดใหญ่ จะให้ค่าความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 19.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และขนาดกลางจะให้ค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 19.25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความร้อนสูง อย่างเห็นได้ชัด และจะสังเกตเห็นว่า ขนาดใหญ่ให้ค่าความร้อนสูงมากที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นขนาด มีผลต่อค่าความร้อน โดยขนาดใหญ่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความร้อนก็จะ สูงขึ้น ทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียสจะให้ค่าความร้อนสูงที่สุด จากกราฟจึงสรุปได้ว่าขนาดของถ่าน ชีวมวลและอุณหภูมิที่ใช้ในการทอร์รี่ไฟด์มีผลกระทบต่อค่าความร้อนของถ่านชีวมวล เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าความร้อนเมื่อผ่านการทอร์รี่ไฟด์เศษเปลือกจากมังคุดในช่วงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ขนาดใหญ่จะให้ค่าความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 19.93 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และขนาดกลาง จะให้ค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 19.78 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความร้อน ก็จะสูงขึ้นด้วยจะสังเกตเห็นว่า ขนาดใหญ่ให้ค่าความร้อนสูงมากที่สุดในทุกช่วงอุณหภูมิ ดังนั้นขนาดมีผล ต่อค่าความร้อนโดยขนาดใหญ่ให้ค่าความร้อนสูงที่สุดและเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่าความร้อนก็จะสูงขึ้น ทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส จะให้ค่าความร้อนสูงที่สุด

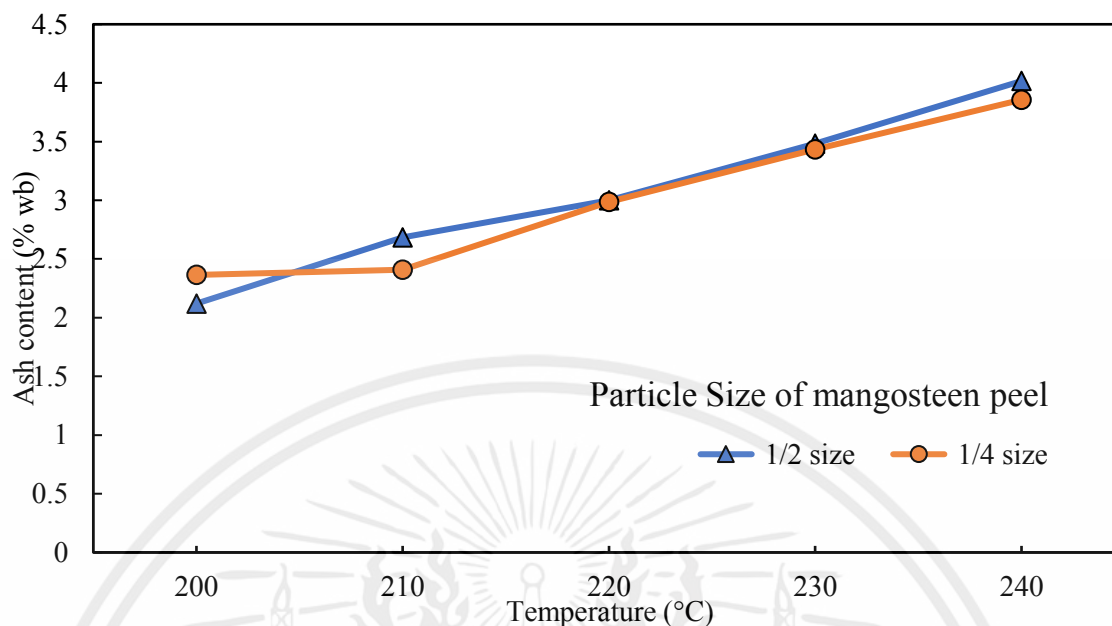
ก่อนนำเศษเหลือจากมังคุดมาผ่านการทอรรีไฟด์ เศษเหลือจากมังคุดจะมีค่าความร้อนสูงเริ่มต้นอยู่ที่ 19.10 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อนำเศษเหลือจากมังคุดมาผ่านการทอรรีไฟด์ค่าความร้อนสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดคือ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 19.55 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 210 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 20.13 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 220 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 20.79 เมกะจูลต่อกิโลกรัม อุณหภูมิอยู่ในช่วง 230 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสูงเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 21.01 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 240 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนสูงจะเพิ่มสูงที่สุด ซึ่งจะมีค่าร้อนสูงอยู่ที่ 21.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากเศษเหลือจากมังคุดมีค่าความร้อนสูงเป็นองค์ประกอบ เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ค่าความร้อนสูงในเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอรรีไฟด์นั้นเพิ่มขึ้น [34]

4.2.3 การหาปริมาณขี้เถ้าของเศษเหลือจากมังคุด

ปริมาณขี้เถ้า คือส่วนของสารอนินทรีย์ที่เหลือจากสถานะสันดาปภายในจะประกอบด้วย ซิลิกา แคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งในถ่านชีวมวลทั่วไปจะมีปริมาณขี้เถ้าอยู่ที่ 1 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นชีวมวลจำพวกฟางข้าวและแกลบที่มีปริมาณขี้เถ้าอยู่ที่ 10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ [31] ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้แสดงถึงแนวโน้มปริมาณขี้เถ้าจากเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอรรีไฟด์ที่ช่วงเวลา 30 และ 45 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 ค่าปริมาณขี้เถ้าของเศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.7 ค่าปริมาณขี้เถ้าของเศษเปลือกจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง เป็นเวลา 45 นาที

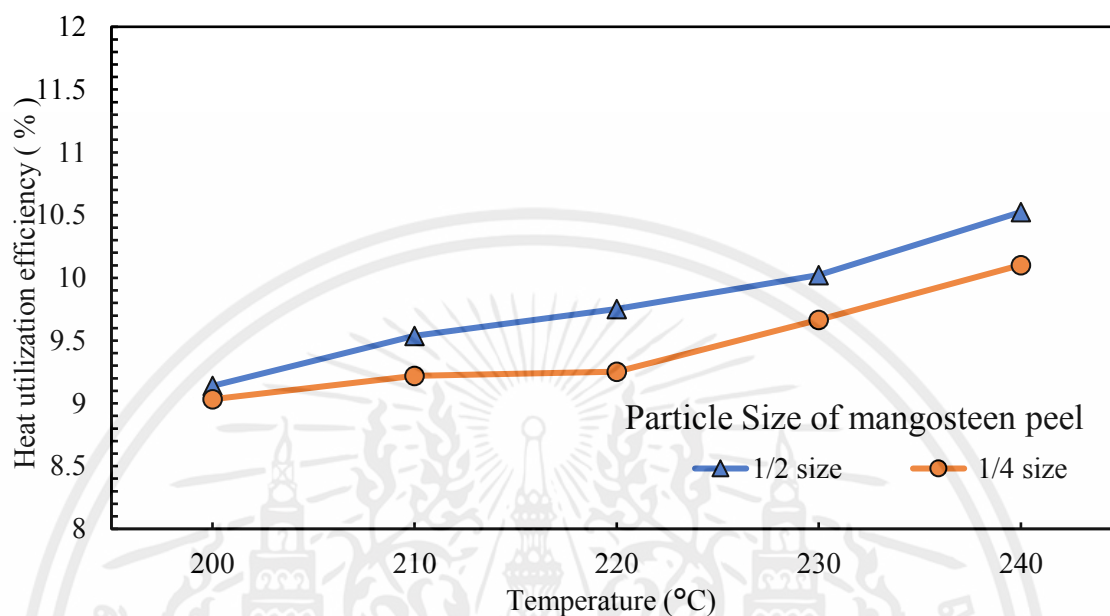
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณขี้เถ้าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิแล้วผ่านการทอรีไฟด์เศษเปลือกจากมังคุดในอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมังคุดจะให้ค่าปริมาณขี้เถ้า น้อยกว่าขนาดกลางหรือขนาด 1/4 ของลูกมังคุด และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเส้นกราฟจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เรื่อย ๆ ที่อุณหภูมิ 210 กับ 230 องศาเซลเซียส ทั้งขนาดใหญ่และขนาดกลาง ซึ่งค่าความปริมาณขี้เถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มเกือบจะเท่ากันทั้งนี้ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส มีค่าปริมาณขี้เถ้าที่มากที่สุดและสรุปได้ว่าในช่วงอุณหภูมิในการทอรีไฟด์ต่ำจะได้ปริมาณขี้เถ้าที่น้อยแต่เมื่อช่วงอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีปริมาณขี้เถ้าที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ปริมาณขี้เถ้าจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิในการทอรีไฟด์

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาณขี้เถ้าเมื่อเทียบกับอุณหภูมิแล้วผ่านการทอรีไฟด์เศษเปลือกจากมังคุดในช่วงอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ขนาดใหญ่จะให้ค่าปริมาณขี้เฝ้าน้อยที่สุด และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเส้นกราฟจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ที่ช่วงอุณหภูมิ 220 ถึง 230 องศาเซลเซียส ทั้งขนาดใหญ่ และขนาดกลาง จะมีค่าความปริมาณขี้เถ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มเกือบจะเท่ากันและจะสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิต่ำจะได้ปริมาณขี้เฝ้าน้อยแต่เมื่อช่วงอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีปริมาณขี้เฝ้าที่เพิ่มสูงขึ้นด้วย ปริมาณขี้เฝ้าจะแปรผันตรงกับช่วงอุณหภูมิในการทอรีไฟด์เช่นเดียวกันกับที่เวลา 30 นาที

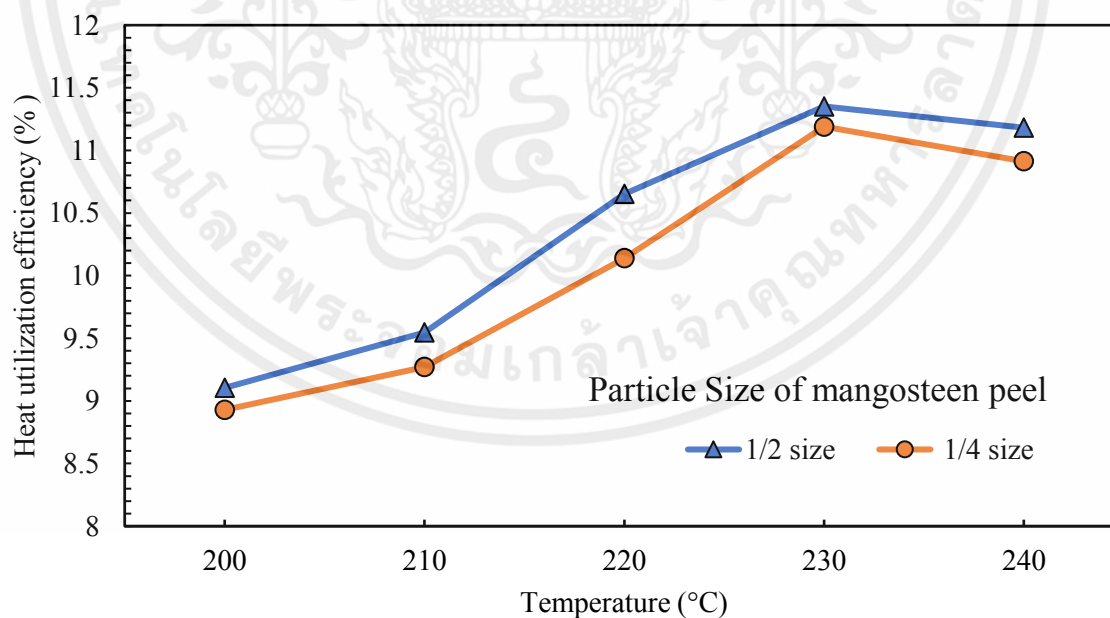
4.2.4 การหาประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเศษเปลือกจากมังคุดที่ผ่านการทอรีไฟด์แล้ว

ประสิทธิภาพการใช้ความร้อน จะมีกระบวนการทดสอบก่อนนำไปใช้งานจริง มีวิธีการทดลอง อยู่ 3 วิธี ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดสอบด้วยวิธี Water boiling test, WBT หรือวิธีการต้มน้ำ

และได้แสดงแนวโน้มประสิทธิภาพการใช้ความร้อนที่ได้ของเศษเปลือกจากมังคุดที่ผ่านการทอรีไฟต์แล้ว
 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเศษเปลือกจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง
 เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเศษเปลือกจากมังคุดขนาดใหญ่และขนาดกลาง
 เป็นเวลา 45 นาที

จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเศษเหลือจากมังคุดที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ถ่านเปลือกมังคุดขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพการใช้ความร้อนดีที่สุด เพราะว่าลักษณะทางกายภาพมีลักษณะคล้ายถ่านมากที่สุด ทำให้ส่งผลไปยังปริมาณซีเถ้ามากไปด้วยและที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ขนาดกลางจะมีประสิทธิภาพการใช้ความร้อนแต่ไม่สามารถเทียบเท่ากับประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของขนาดใหญ่ เพราะว่าลักษณะทางกายภาพยังไม่เป็นไปตามที่กำหนด ส่วนในช่วงอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส ของขนาดใหญ่และขนาดกลางจะมีปริมาณซีเถ้าที่น้อยที่สุด แต่ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนก็น้อยที่สุดเช่นกัน จึงสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิต่ำจะได้ปริมาณซีเถ้าที่น้อยและประสิทธิภาพการใช้ความร้อนน้อยแต่เมื่อช่วงอุณหภูมิสูงขึ้นจะมีปริมาณซีเถ้าที่เพิ่มสูงขึ้นและประสิทธิภาพการใช้ความร้อนก็สูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจากขนาดมีผลต่ออุณหภูมิในการทอรรีไฟต์

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของเศษเหลือจากมังคุดที่ช่วงอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ขนาดใหญ่จะมีประสิทธิภาพการใช้ความร้อนดีที่สุด เพราะว่าลักษณะทางกายภาพมีลักษณะคล้ายถ่าน ทำให้ส่งผลไปยังปริมาณซีเถ้ามากไปด้วย ทั้งนี้ที่ขนาดใหญ่และขนาดกลางที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการใช้ความร้อนที่ต่ำลง เพราะในช่วงอุณหภูมินี้มีเศษเหลือจากมังคุดบางส่วนที่กลายเป็นซีเถ้าก่อนนำมาทดสอบและที่ช่วงอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ขนาดกลางจะมีประสิทธิภาพการใช้ความร้อนดี แต่ไม่สามารถเทียบเท่ากับประสิทธิภาพการใช้ความร้อนของขนาดใหญ่ได้ ซึ่งลักษณะทางกายภาพมีลักษณะคล้ายถ่านเหมือนกัน แต่ขนาดเล็กกว่าจึงส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้ความร้อน ส่วนในช่วงอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียส ของขนาดใหญ่และขนาดกลางจะมีปริมาณซีเถ้าที่น้อยที่สุด จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้ความร้อนก็น้อยที่สุดเช่นกัน จึงสรุปได้ว่าช่วงอุณหภูมิต่ำจะได้ปริมาณซีเถ้าที่น้อยและประสิทธิภาพการใช้ความร้อนน้อย เนื่องจากขนาดมีผลต่ออุณหภูมิในการทอรรีไฟต์ [36]

4.3 การเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านชีวมวลที่ผ่านการทอรรีไฟต์แล้ว

จากการศึกษาครั้งนี้จึงนำเศษเหลือจากมังคุดมาเปรียบเทียบคุณสมบัติเบื้องต้นกับเชื้อเพลิงชีวมวลชนิดต่าง ๆ ภายในประเทศไทยที่ผ่านการทอรรีไฟต์แล้ว ดังแสดงในตารางที่ 4.3 เพื่อแสดงถึงความเป็นไปได้ในการนำเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอรรีไฟต์แล้ว มาใช้เป็นเชื้อเพลิงถ่านชีวมวลว่าจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงชีวมวลเศษเหลือจากมังคุดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลภายในประเทศไทยที่ผ่านการทอร์รีไฟด์แล้ว [34,37,38]

ชื่อตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ค่าความชื้น (%)	ซีเถ้า (%)	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)
ชานอ้อย	250	60	2.45	7.10	20.92
	300	60	1.96	11.71	23.35
ไม้ไผ่	250	60	3.32	1.43	21.02
	300	60	2.97	1.95	27.26
เศษไม้	225	30	3.11	1.33	19.79
	250	30	2.66	1.45	21.21
	275	30	2.64	1.83	22.03
	300	30	2.36	2.27	26.41
อัลมอนต์	250	60	2.55	1.10	23.55
	300	60	2.50	1.78	26.66
ปาล์ม	250	60	3.69	9.97	20.61
	300	60	3.21	13.52	23.54
เปลือกไม้สน	225	30	3.30	0.26	19.48
	250	30	2.88	0.24	20.08
	275	30	2.46	0.34	21.82
	300	30	2.57	0.42	27.38

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงชีวมวลเศษเหลือจากมังคุดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลภายในประเทศไทยที่ผ่านการทอร์รีไฟด์แล้ว (ต่อ) [34,37,38]

ชื่อตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ค่าความชื้น (%)	ซีเถ้า (%)	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)
แกลบ	250	60	2.67	13.54	17.68
	300	60	2.39	23.68	21.48
เศษเหลือจาก มังคุดขนาดใหญ่ (1/2)	200	30	5.72	2.08	19.27
	210	30	4.46	2.47	19.79
	220	30	3.45	3.11	20.30
	230	30	2.67	3.34	20.41
	240	30	1.98	4.05	21.25
เศษเหลือจาก มังคุดขนาดกลาง (1/4)	200	30	5.11	2.25	19.25
	210	30	4.28	2.48	19.70
	220	30	3.06	2.93	20.13
	230	30	2.31	3.28	20.37
	240	30	1.61	4.25	21.16
เศษเหลือจาก มังคุดขนาดใหญ่ (1/2)	200	45	6.32	2.12	19.78
	210	45	5.18	2.68	20.51
	220	45	4.66	3.00	21.32
	230	45	3.72	3.48	21.60
	240	45	1.68	4.01	21.72

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของเชื้อเพลิงชีวมวลเศษเหลือจากมังคุดเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลภายในประเทศไทยที่ผ่านการทอร์รีไฟด์แล้ว (ต่อ) [34,37,38]

ชื่อตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ค่าความชื้น (%)	ซีเถ้า (%)	ค่าความร้อน (MJ/kg)
เศษเหลือจาก มังคุดขนาดกลาง (1/4)	200	45	6.60	2.36	19.93
	210	45	5.03	2.40	20.54
	220	45	4.74	2.98	21.43
	230	45	3.99	3.43	21.68
	240	45	1.95	3.85	21.80

จากตารางที่ 4.3 จากการเปรียบเทียบจะพบว่าเศษเหลือจากมังคุดมีค่าความชื้นอยู่ที่ 1.61 เปอร์เซ็นต์ เป็นค่าความชื้นที่ดีที่สุดในการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลภายในประเทศไทยที่ผ่านการทอร์รีไฟด์แล้ว ส่วนปริมาณซีเถ้าที่น้อยที่สุดของเศษเหลือจากมังคุดมีปริมาณซีเถ้าอยู่ที่ 2.12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการเปรียบเทียบเชื้อเพลิงชีวมวลภายในประเทศไทยเศษไม้จะมีปริมาณซีเถ้าที่ใกล้เคียงกับเศษเหลือจากมังคุดมากที่สุดและแกลบจะมีปริมาณซีเถ้ามากที่สุดอยู่ที่ 23.68 เปอร์เซ็นต์ ส่วนค่าความร้อนสูงที่สุดของเศษเหลือจากมังคุดอยู่ที่ 21.80 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งในการเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลภายในประเทศไทยเปลือกไม้สนจะมีค่าความร้อนสูงที่ใกล้เคียงกับเศษเหลือจากมังคุดมากที่สุดและแกลบจะมีค่าความร้อนสูงน้อยที่สุดอยู่ที่ 17.68 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการทอรีไฟต์เศษเหลือจากมั่งคุดเพื่อผลิตเป็นถ่านชีวมวลระดับครัวเรือนซึ่งกำหนดขนาดที่ใช้ในการทดลองคือ ขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมั่งคุด และขนาดกลางหรือขนาด 1/4 ของลูกมั่งคุด โดยใช้อุณหภูมิในการทอรีไฟต์ที่ช่วงอุณหภูมิ 200 210 220 230 และ 240 องศาเซลเซียส กำหนดให้ค่าความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 18 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ และนำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ขนาดของเศษเหลือจากมั่งคุดที่ผ่านการทอรีไฟต์ เมื่อขนาดแตกต่างกันจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้ความร้อน เนื่องจากขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมั่งคุดสามารถติดไฟได้นานกว่าขนาดกลางหรือขนาด 1/4 ของลูกมั่งคุดและขนาดของเศษเหลือจากมั่งคุดที่ผ่านการทอรีไฟต์ จะไม่มีผลต่อค่าความชื้น ค่าความร้อนสูง และปริมาณขี้เถ้า

2. เวลาที่ใช้ในการทอรีไฟต์เศษเหลือจากมั่งคุด เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อ ค่าความชื้น ค่าความร้อนสูง ปริมาณขี้เถ้า และประสิทธิภาพการใช้ความร้อน เนื่องจากค่าความชื้น ค่าความร้อนสูง ปริมาณขี้เถ้า และประสิทธิภาพการใช้ความร้อนจะแปรผันตรงกับเวลา

3. อุณหภูมิที่ใช้ในการทอรีไฟต์เศษเหลือจากมั่งคุด เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อ ค่าความร้อนสูง ปริมาณขี้เถ้า และประสิทธิภาพการใช้ความร้อน เนื่องจากคุณสมบัติเบื้องต้นจะแปรผันตรงกับอุณหภูมิ ส่วนค่าความชื้นจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ

จากการทดลองสรุปได้ว่าการทอรีไฟต์เศษเหลือจากมั่งคุดสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งในเตาระดับครัวเรือน ขนาดใหญ่หรือขนาด 1/2 ของลูกมั่งคุดเป็นขนาดที่ดีที่สุด และอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่ใช้ในการทอรีไฟต์คืออุณหภูมิที่ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เหมาะกับการเป็นเชื้อเพลิงแข็งมากที่สุด ซึ่งประสิทธิภาพการใช้ความร้อนที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ 11.35 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นอยู่ที่ 3.99 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณขี้เถ้าอยู่ที่ 3.48 เปอร์เซ็นต์ และค่าความร้อนสูงอยู่ที่ 21.68 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเปลี่ยนวาล์วควบคุมอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนให้มีอัตราการไหลที่คงที่มากกว่านี้
2. ควรหาอัตราส่วนในการนำเศษเหลือจากมังคุดที่ผ่านการทอดรีไฟต์มาอัดเป็นเม็ดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความร้อน
3. ควรเพิ่มขนาดของเตาปฏิกรณ์ให้มีพื้นที่ในการทอดรีไฟต์มากขึ้น
4. ควรติดตั้งโบลเวอร์เพื่อดูดควันออกจากเตาปฏิกรณ์ให้ออกด้านนอกอาคาร



เอกสารอ้างอิง

- [1] สมจิต โยธะคง. 2543. **เกษตรกรรมกับสังคมไทย**. กรุงเทพมหานคร. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช. หน้า 41-58.
- [2] ปาจารย์ เตียวสุวรรณ. 2557. **การศึกษาความชื้นสำหรับใช้ภายในคอนกรีตโดยใช้คุณสมบัติของถ่านไม้และออกแบบผลิตภัณฑ์ของตกแต่งตุ๊กตกลีน**. ปรินญาตลปะมหาบัณฑิต. สาขาวิชา การออกแบบผลิตภัณฑ์. มหาวิทยาลัยศิลปกรหน้า 9-15.
- [3] ทรงอมร ชุ่มอุทัย, วัชรกิติ จำแก้ว และศิริมล เพ็ชรกลิ่ง. 2559. **การประเมินศักยภาพของเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อการนำไปใช้กับเตาชีวมวลในระดับครัวเรือน**. ปรินญาตลปะมหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร. หน้า4-26.
- [4] เดชรัช สุขกำเนิด. 2557. **งานที่มีพลังงาน**. กรุงเทพมหานคร. มูลนิธิโลกสีเขียว. หน้า 126-128.
- [5] กรมพัฒนาสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. (2553). **รายงานข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร ปี 2553**. หน้า 21-25.
- [6] Ke-Miao Lu et al. (2019) “ Exporation of the ranges of the global potential of biomass for energr.” **Bioresource Technology** 25, 3 (Augst) : 109-117
- [7] Zhang, C., Ho, S.H., Chen, W.H., Fu, Y. (2019) **Biomass Nutshells** “ Evaluations of Energy Efficiency as Well as Biomass Transportation and Storage.” 428-411.
- [8] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **ศักยภาพของชีวมวลของประเทศไทย**. 2561. [ระบบออนไลน์] หน้า 251-267.
- [9] svgroup. 2020 **มังคุด**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง : <https://www.svgroun.co.th/blog/wp-content/uploads/2019/>
- [10] svgroup. 2020 **ลักษณะของราก**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง : <https://www.svgroun.co.th/blog/wp-content/uploads/2019/>
- [11] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. 2019. **ลักษณะของลำต้น**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง : <https://www.data:image/jpeg;base64,/9j/>
- [12] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. 2019. **ลักษณะของใบ**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง : <https://www.data:image/jpeg;base64,/9j/>

- [13] สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. 2019. **ลักษณะของดอก**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง :
<https://www.data:image/jpeg;base64,/9j/>
- [14] วิกีพีเดียสารานุกรมเสรี. 2016. **ลักษณะของผล**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง :
<https://th.wikipedia.org/wiki/ลักษณะของผล/>
- [15] medthai. 2018 **ลักษณะของเมล็ด**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง :
[https:// medthai.com/images/2014/](https://medthai.com/images/2014/)
- [16] bp.blogspot. 2015 **กระบวนการทอรีรีแฟคชั่น**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง :
<https://bp.blogspot.com/2010/>
- [17] data:image. 2018 **องค์ประกอบของชีวมวล**. [Online]. แหล่งที่เข้าถึง :
<https://www.data:image/jpeg;base56,/3j/>
- [18] นันทวุฒิ กังฉิน และ ธนาตล สันติธรรม. 2558. **การเพิ่มค่าความร้อนให้ถ่านซีถ้ายางพารา**.
 ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร. คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้า10
- [19] Mock Chinsung, Lee Hookyun, Choi Sangmin et al. (2017). “Flame structures and
 ignition characteristics of torrefied and raw sewage sludge particles at rapid heating
 rates.” **Fuel** 200, 15 (July): 476-480
- [20] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. พลังงานชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. เอเบิล
 คอนซัลแตนท์ จำกัด: กรุงเทพมหานคร. หน้า 3-7
- [21] Matali S., Rahman N.A., Idris S. et al. (2016). “Ligocellulosic Biomass solid Fuel
 Properties Enhancement via Torrefaction.” **Procedie Engineering** 148, 670-680
- [22] Mamvura T.A., Pahla G., and Muzenda E. (2018). “Torrefaction of waste biomass for
 application in energy production in South Africa.” **South Africa Journal of
 Chrmical Engineering** 25, (June): 1-3
- [23] Martalin-Lara M.A., Ronda A., Zamora M.C. et al. (2017). “Torrefaction of olive tree
 pruning: Effect of operating conditions on solid product properties.” **Fuel** 202,15
 (February)” 100-120
- [24] Wang Liang, Barta-Rajnai Eszter, Skreiberg Oyvind et al. (2017). “impact of Torrefaction
 on Wood Biomass Properties.” **Energy Procedia** 105, (May): 1140-1151.
- [25] Li ShU-Xian, Chang-Zhou, Li Ming-Fei et al. (2018). “Torrefaction of corncob to produce

- charcoal under nitrogen and carbon dioxide atmospheres.” **Bioresource Technology** 249, (Augst): 3-12.
- [26] Yan Zhang, Yi Zhang, ping et al. (2017). “Synergistic co-processing of biomass torrefaction products with coal and coal char.” **Energy proedria** 142, (June): 1380-1390.
- [27] Isemin Rafail, Mikhalev Alexander et al. (2017). “Torrefaction and combustion of pellets made made of a mixture of coal sludge and straw.” **Fuel** 210, 15 (December): 860-865.
- [28] Gan Yong Yang, Ong Hwai Chyuan, Pau Loke Show et al. (2018). “Torrefaction of microalgal biochar as potential coal fuel application as bio-adsorbent.” **Energy Conversion and Management** 165, 1 (June): 151-160
- [29] Toscano G., Pizzi A., Foppa Pedretti E. et al. (2015). “Torrefaction of tomato industry residues.” **Fuel** 144, 1 (March): 81-89.
- [30] สราภุณี ชูมณี และคณะ. 2552. **ชุดปฏิบัติตัวแปลงสัญญาณตัวรับรู้ทางไฟฟ้า**. โครงสร้างบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีปทุม. หน้า 4-12.
- [31] ประริญา จำเริญ. 2556. **การศึกษาคักยภาพกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทอนินทรีย์สาร เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง**. ปรินญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. หน้า 15-16.
- [32] Yokoyama Shinya. (2010). “Biomass handbook.” **Japanese institute** of ED: 15-25.
- [33] ณัฐรัตน์ ฉัตรวิบูลกุล. 2560. **การปรับปรุงชีวมวลผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์ด้วยเตาแบบหมุน**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. หน้า 22.
- [34] ทศนพงษ์ อาชาวิวัฒน์ สถาพร สุขแสนและน้ำฝน พันธุ์พราหมณ์. 2560. **การทอรรีไฟต์ชั้นกากตะกอนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันเพื่อการผลิตถ่านชีวภาพ**. ปรินญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล. คณะวิศวกรรมศาสตร์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังวิทยาเขตชุมพร. หน้า 75-80.
- [35] กฤษฏา บุญชม นิลกุล ไชยสมปาน. 2020. **การศึกษาก่อนอัดแท่งจากไม้ลำไย**. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ภาควิชาฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์ทั่วไป มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่. หน้า 54-55.

- [36] ทิพย์วรรณ ช่วยทอง ธเนศ ไชยชนะและศุภลักษณ์ อ่ำลอย. 2557. **สมบัติของถ่านจากเปลือกหมาก ถ่านไม้ยางพาราและถ่านมังคุด**. สาขาฟิสิกส์. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยทักษิณ. หน้า 72-74.
- [37] ธเนศ ไชยชนะ จอมภพ แววศักดิ์ จตุพร แก้วอ่อนและอุษา อินทอง. 2557. **สมบัติความเป็นเชื้อเพลิงของถ่านเปลือกมังคุด**. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. ปีที่ 17 ฉบับที่ 3 ฉบับพิเศษ. หน้า 33-35.
- [38] ชิชณูชา แซ่ม้าและขวัญฤทัย ทองบุญฤทธิ. 2020. **การศึกษาประสิทธิภาพถ่านอัดแท่งจากขี้ข้าวโพดและเหง้ำมันสำปะหลัง**. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. หน้า 610-613.
- [39] Uemura Yoshimitsu, Matsumoto Ryunosuke, Saadon Shazleen et al. (2018). "A study on torrefaction of Laminaria japonica." **Fuel Processing Technology** 138, (October): 133-138.
- [40] เรวดี ดินซุด. (2556). **การผลิตโปรตีนเคอร์แกล์โดยใช้มังคุดตกเกรดและถ่านมังคุดตกเกรดเป็นเชื้อเพลิง**. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์-พลังงาน) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ (วิทยาเขตพัทลุง). หน้า 56-60.
- [41] อัจฉรา อัครวิกุลชัย. (2555). **ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเปลือกทุเรียนและเปลือกมังคุดมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง**. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. หน้า 81-83



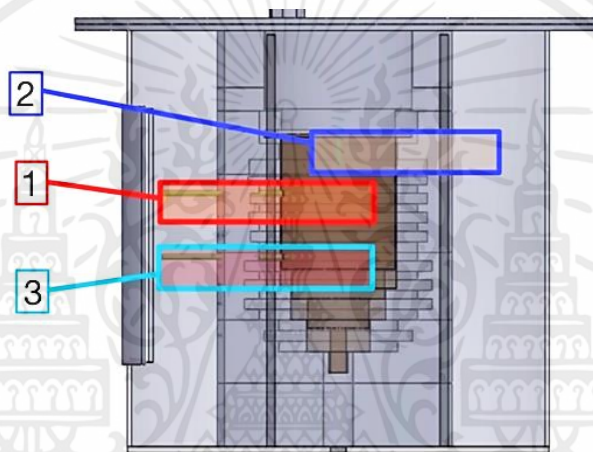
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ตรวจสอบการกระจายของอนุภูมิภายในเตาปฏิกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.1 ตรวจสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์

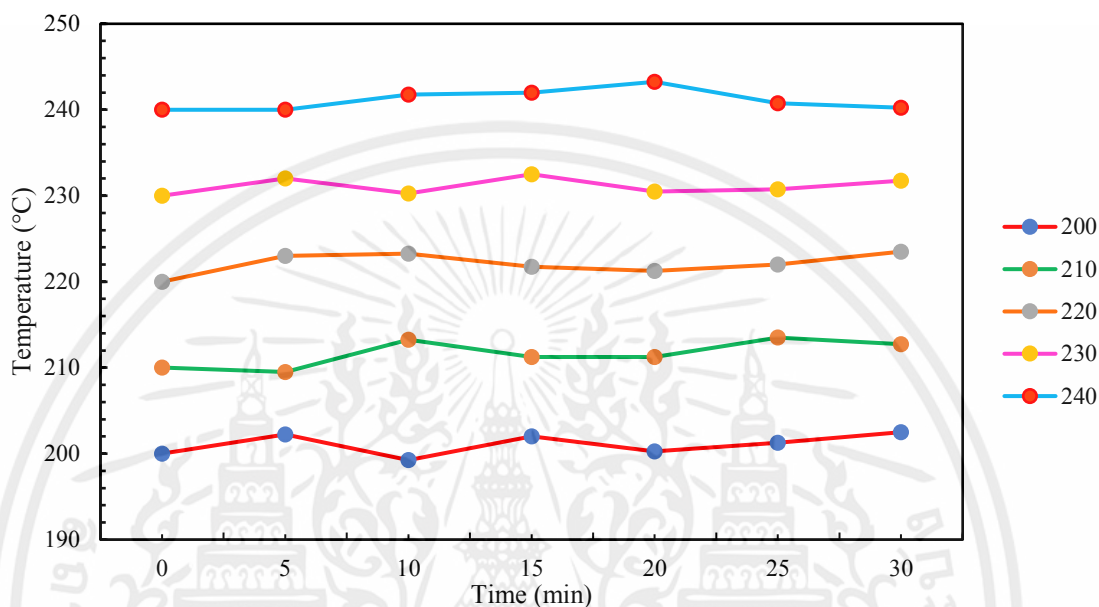
ตรวจสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์เป็นการแสดงค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ เพื่อให้ทราบถึงค่าอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเพราะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่อคุณสมบัติของถ่านชีวมวลภายในเตาปฏิกรณ์ ในการศึกษาจึงได้ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจำนวน 3 จุด โดยจุดที่ 1 จะเป็นจุดที่อยู่กึ่งกลางเตาปฏิกรณ์ในแนวตั้ง จุดที่ 2 จะเป็นจุดวัดอุณหภูมิที่อยู่กึ่งกลางในแนวระดับและจุดที่ 3 จะเป็นจุดที่อยู่ใกล้กับจุดที่วางเศษเหลือจากมังคุดมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ ก.1



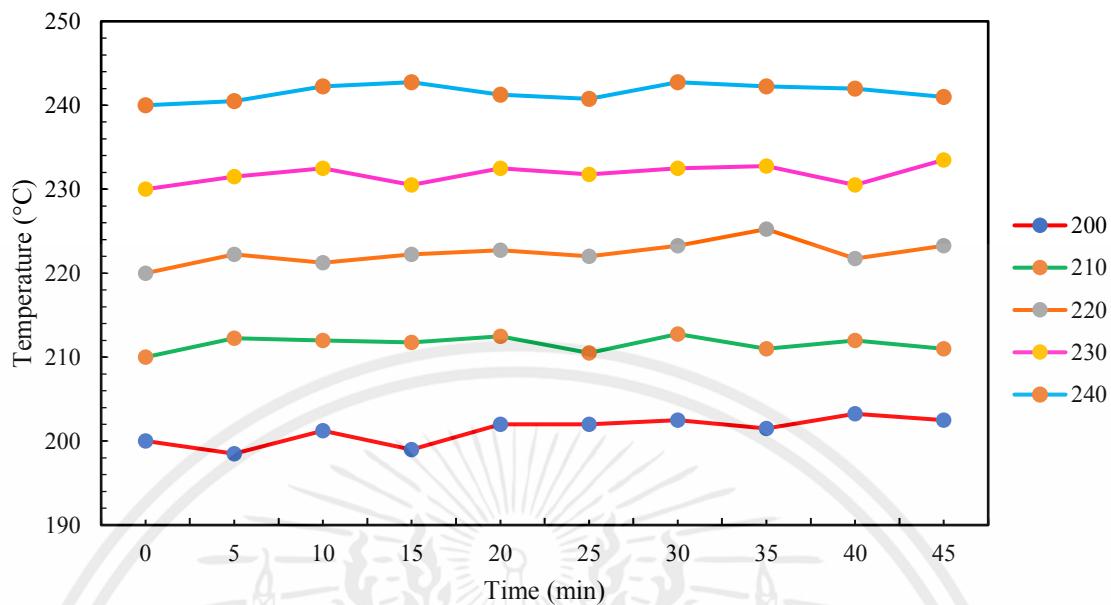
ก. รูปที่ 1 การติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิจำนวน 3 จุดภายในเตาปฏิกรณ์

รูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิทั้ง 3 จุด ภายในเตาปฏิกรณ์เพื่อให้อ่านค่าที่เกิดขึ้นจริงภายในเตาปฏิกรณ์ ได้ทำการกำหนดให้จุดที่ 1 สีแดงแทนสัญลักษณ์จุดนี้เป็น T_1 จะวัดอุณหภูมิที่อยู่กึ่งกลางเตาปฏิกรณ์ในแนวตั้งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ตามที่กำหนดช่วงอุณหภูมิและอุณหภูมิในจุดนี้จะมีค่าสูงที่สุด จุดที่ 2 สีน้ำเงินแทนสัญลักษณ์จุดนี้เป็น T_2 จะวัดอุณหภูมิที่อยู่กึ่งกลางเตาปฏิกรณ์ในแนวระดับ โดยอุณหภูมิในจุดนี้จะมีค่าต่ำที่สุดและจุดที่ 3 สีฟ้าแทนสัญลักษณ์จุดนี้เป็น T_3 เป็นจุดที่อยู่ใกล้กับจุดที่วางเศษเหลือจากมังคุดมากที่สุด เราจึงทำการยึดจุดที่ 3 เพื่อความแน่ใจให้เห็นว่าจุดที่วางเศษเหลือจากมังคุดมีอุณหภูมิใกล้กับช่วงอุณหภูมิที่กำหนดไปใช้ในการทอรีไฟต์ โดยคาดว่าอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์แต่ละจุดนั้นจะมีอุณหภูมิที่ไม่เท่ากันการกระจายตัวของ

อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ที่ทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิที่ 200 ถึง 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 กับ 45 นาที โดยในแต่ละการทดลองจะทำการจับเวลาและจดบันทึกค่าในทุกๆ 5 นาที เนื่องจากการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติของถ่านชีวมวล



ก. รูปที่ 2 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ 30 นาที



ก. รูปที่ 3 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ 45 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

ภาคผนวก ข ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	200	86	161
5	202	126	186
10	200	138	188
15	203	146	192
20	203	152	193
25	201	160	194
30	203	165	195

ตารางที่ ข.2 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	210	95	171
5	208	134	183
10	213	152	189
15	210	164	192
20	209	171	194
25	212	179	195
30	213	188	197

ตารางที่ ข.3 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	220	104	186
5	222	146	205
10	223	162	211
15	221	172	211
20	222	179	214
25	223	188	217
30	224	194	217

ตารางที่ ข.4 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	230	111	203
5	233	155	210
10	231	170	220
15	231	182	225
20	230	189	229
25	231	195	230
30	232	204	231

ตารางที่ ข.5 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	240	110	204
5	239	158	220
10	242	177	228
15	243	189	231
20	242	200	234
25	240	211	235
30	240	221	238

ตารางที่ ข.6 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	200	91	167
15	202	134	182
10	199	145	188
15	201	155	191
20	198	163	193
25	202	166	195
30	202	169	194

ตารางที่ ข.7 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	210	104	171
5	210	139	190
10	213	150	196
15	212	157	197
20	213	162	198
25	214	165	200
30	212	169	201

ตารางที่ ข.8 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	220	101	179
5	224	138	202
10	223	154	207
15	222	165	209
20	220	172	209
25	220	478	210
30	222	184	211

ตารางที่ ข.9 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	230	88	182
5	231	133	206
10	229	151	211
15	234	166	216
20	230	178	216
25	230	181	217
30	231	188	219

ตารางที่ ข.10 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	240	109	195
5	241	155	220
10	241	169	225
15	241	182	228
20	244	190	233
25	241	198	234
30	240	208	235

ตารางที่ ข.11 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)
0	200	84	166
5	199	128	184
10	202	140	187
15	202	148	189
20	200	153	189
25	201	155	190
30	204	158	192
35	199	161	190
40	204	163	193
45	202	167	193

ตารางที่ ข.12 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)
0	210	84	170
5	213	123	197
10	213	139	200
15	210	146	200
20	212	150	202
25	211	158	202
30	210	163	202
35	212	166	202
40	213	169	202
45	211	172	202

ตารางที่ ข.13 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)
0	220	69	177
5	223	103	199
10	221	121	203
15	220	133	203
20	222	151	205
25	219	163	206
30	221	169	207
35	225	175	209
40	221	178	208
45	224	181	209

ตารางที่ ข.14 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)
0	230	68	161
5	232	107	206
10	234	128	211
15	231	143	212
20	233	156	213
25	230	159	215
30	231	166	217
35	230	173	219
40	231	183	219
45	234	192	221

ตารางที่ ข.15 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดใหญ่

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	240	95	189
5	239	139	215
10	244	157	227
15	245	172	233
20	239	184	234
25	241	169	237
30	244	199	237
35	242	205	237
40	241	207	237
45	240	208	237

ตารางที่ ข.16 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	200	87	162
5	198	125	179
10	202	141	186
15	198	149	186
20	202	156	192
25	202	161	192
30	202	165	193
35	202	169	194
40	204	172	194
45	202	175	195

ตารางที่ ข.17 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	210	83	166
5	211	124	188
10	212	139	181
15	212	150	197
20	212	157	200
25	211	164	201
30	212	169	202
35	212	174	202
40	210	178	202
45	215	181	204

ตารางที่ ข.18 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$	$T_3(^{\circ}\text{C})$
0	220	84	167
5	221	127	194
10	221	144	200
15	221	155	204
20	223	163	207
25	225	175	210
30	225	180	211
35	225	188	214
40	222	194	214
45	222	199	214

ตารางที่ ข.19 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ของระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)
0	230	68	173
5	231	118	202
10	231	137	208
15	229	152	209
20	232	163	216
25	233	172	220
30	233	179	222
35	235	188	224
40	229	199	223
45	233	206	224

ตารางที่ ข.20 ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ระหว่างการดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที เศษเหลือจากมังคุดขนาดกลาง

เวลา (นาที)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)
0	240	107	192
5	241	155	218
10	240	174	224
15	240	187	225
20	243	195	229
25	240	203	230
30	241	209	232
35	242	216	234
40	243	220	234
45	242	223	235

ตารางที่ ข.21 ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังกุดก่อนนำมาผ่านกระบวนการทอรีไฟต์

มังกุด	ปริมาณค่าความชื้น (% wb.)			ระยะเวลาการลดความชื้น
	1	2	3	
ขนาดใหญ่	1762	1924	1773	12 ชั่วโมง
ขนาดกลาง	1651	1697	1842	12 ชั่วโมง

ตารางที่ ข.22 ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังกุดหลังนำมาผ่านกระบวนการทอรีไฟต์เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณค่าความชื้น (% wb.)		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ขนาดใหญ่	ขนาดกลาง		
200	5.7204	5.1155	5.4180	0.4277
210	4.4655	4.2830	4.3743	0.1290
220	3.4526	3.0603	3.2564	0.2774
230	2.6748	2.3189	2.4969	0.2517
240	1.9892	1.6127	1.8009	0.2662
รวม			3.4693	0.1063

ตารางที่ ข.23 ค่าความชื้นของเศษเหลือจากมังกุดหลังนำมาผ่านกระบวนการทอรีไฟต์เป็นเวลา 45 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณค่าความชื้น (% wb.)		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ขนาดใหญ่	ขนาดกลาง		
200	6.3207	6.6086	6.4646	0.2036
210	5.1869	5.0391	5.1130	0.1045
220	4.6690	4.7477	4.7083	0.0556
230	3.7288	3.9963	3.8626	0.1891
240	1.6870	1.9548	1.8209	0.1894
รวม			4.3939	0.0650

ตารางที่ ข.24 ค่าความร้อนสูงของเศษเหลือจากมังคุดหลังนำมาผ่านกระบวนการทอรีไฟด์เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ขนาดใหญ่	ขนาดกลาง		
200	19.2650	19.2450	19.2550	0.0141
210	19.7900	19.6950	19.7425	0.0672
220	20.3000	20.1250	20.2125	0.1237
230	20.4100	20.3700	20.3900	0.0283
240	21.2450	21.1550	21.2000	0.0636
รวม			20.1600	0.0425

ตารางที่ ข.25 ค่าความร้อนสูงของเศษเหลือจากมังคุดหลังนำมาผ่านกระบวนการทอรีไฟด์เป็นเวลา 45 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ค่าความร้อนสูง (MJ/kg)		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ขนาดใหญ่	ขนาดกลาง		
200	19.7750	19.9250	19.8500	0.1061
210	20.5050	20.5400	20.5225	0.0247
220	21.3200	21.4300	21.3750	0.0778
230	21.5950	21.6750	21.6350	0.0566
240	21.7150	21.7950	21.7550	0.0566
รวม			21.0275	0.0300

ตารางที่ ข.26 ปริมาณซีเมนต์ของเศษเหลือจากมังกุคหลังจากนำมาผ่านการทอรีไฟด์เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณซีเมนต์ (% wb.)		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ขนาดใหญ่	ขนาดกลาง		
200	2.0817	2.2554	2.1685	0.1228
210	2.4780	2.4890	2.4835	0.0078
220	3.1112	2.9396	3.0254	0.1213
230	3.3440	3.2825	3.3133	0.0435
240	4.0534	4.2593	4.1564	0.1456
รวม			3.0294	0.0593

ตารางที่ ข.27 ปริมาณซีเมนต์ของเศษเหลือจากมังกุคหลังจากนำมาผ่านการทอรีไฟด์เป็นเวลา 45 นาที

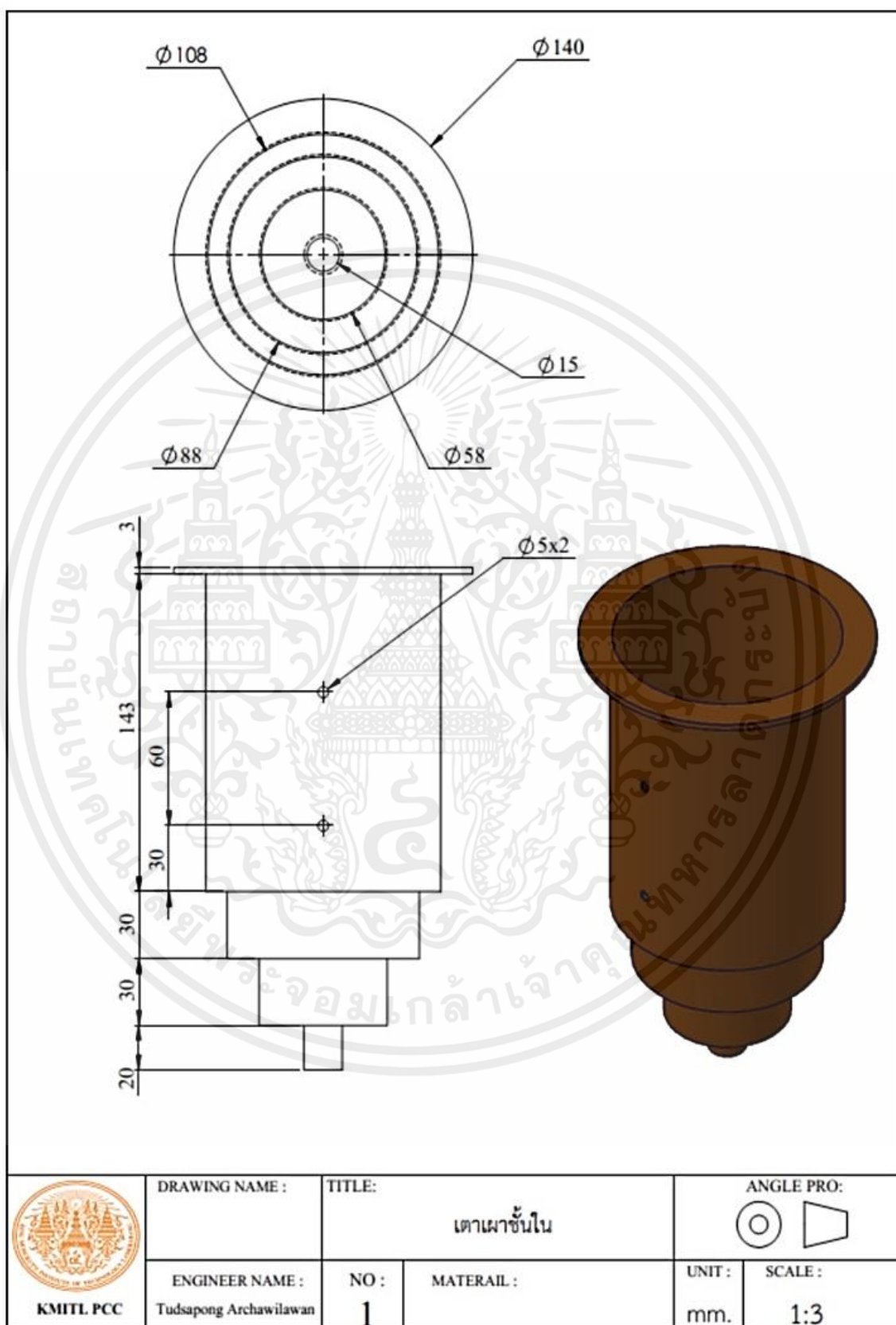
อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณซีเมนต์ (% wb.)		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	ขนาดใหญ่	ขนาดกลาง		
200	2.1201	2.3643	2.2422	0.1726
210	2.6846	2.4093	2.5470	0.1947
220	3.0006	2.9857	2.9931	0.0105
230	3.4818	3.4345	3.4582	0.0335
240	4.0165	3.8569	3.9367	0.1129
รวม			3.0354	0.0817



ภาคผนวก

ภาคผนวก ค แบบเตาเผาชั้นใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล นางสาวพรพนิต ชุมศรี
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 3 พฤษภาคม พ.ศ. 2543
 ภูมิลำเนา จังหวัดนครศรีธรรมราช
 ที่อยู่ 109 หมู่ 3 ตำบลชะมาย อำเภอทุ่งสง
 จังหวัดนครศรีธรรมราช 80110
 E-mail 61512057@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย สายวิทย์ - คณิต ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนมัธยมเทศบาลวัดท่าแพ
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- เข้าร่วมประชุมวิชาการโครงการวิศวกรรมเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 26 ณ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปี 2563
- ผ่านการฝึกงาน ในส่วนวิศวกรรมเครื่องกล ณ บริษัท วารี รีซอร์สเซส จำกัด ปี 2564
- ได้รับรางวัลการประกวด KMITL Chumphon Project Day 2022 ด้านวิศวกรรมศาสตร์

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล นายวรรณัย อุ่นสกล

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 6 มิถุนายน พ.ศ.2543

ภูมิลำเนา จังหวัดชุมพร

ที่อยู่ 235 หมู่ 11 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว
จังหวัดชุมพร 86160

E-mail 61514013@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย สายวิทย์ - คณิต ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนปะทิววิทยา
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมพลังงาน) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงาน ในส่วนวิศวกรรมพลังงาน ณ บริษัท AJ ปาล์มออยล์ ปี 2564
- ได้รับรางวัลการประกวด KMITL Chumphon Project Day 2022 ด้านวิศวกรรมศาสตร์

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ - นามสกุล นางสาวศิริพร สระทอง

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ.2542

ภูมิลำเนา จังหวัดชุมพร

ที่อยู่ 378 หมู่ 11 ตำบลนาขา อำเภอหลังสวน
จังหวัดชุมพร 86110

E-mail 61514019@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลาย สายวิทย์ - คณิต ปีการศึกษา 2560 จากโรงเรียนเมืองหลังสวน
- สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วศ.บ. (วิศวกรรมพลังงาน) ปีการศึกษา 2564 จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

ผลงานและกิจกรรม

- ผ่านการฝึกงาน ในส่วนวิศวกรรมพลังงาน ณ บริษัท AJ ปาล์มออยล์ ปี 2564
- ได้รับรางวัลการประกวด KMITL Chumphon Project Day 2022 ด้านวิศวกรรมศาสตร์