



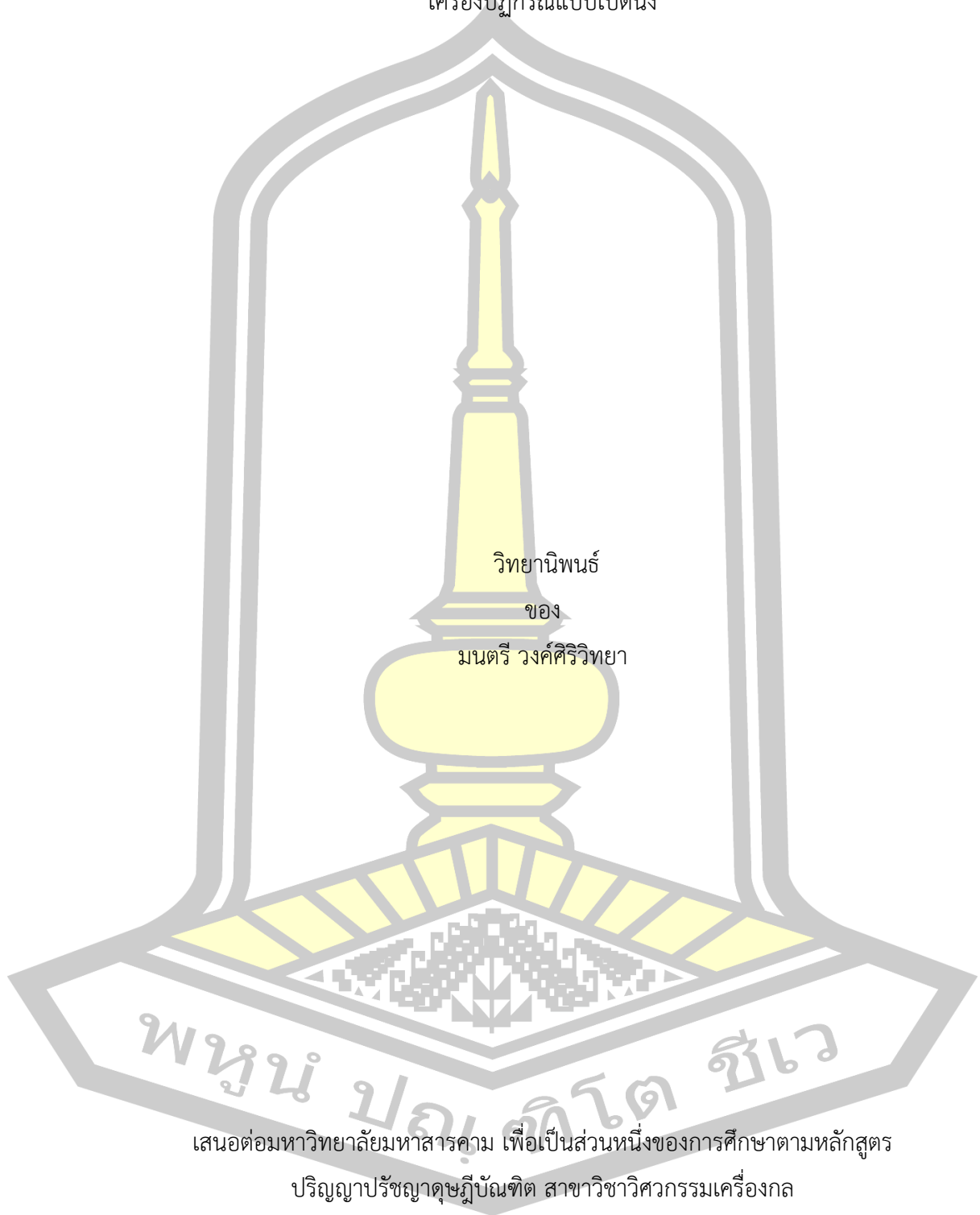
การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบ ด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกชันใน  
เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

วิทยานิพนธ์  
ของ  
มนตรี วงศ์ศิริวิทยา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบ ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ใน  
เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

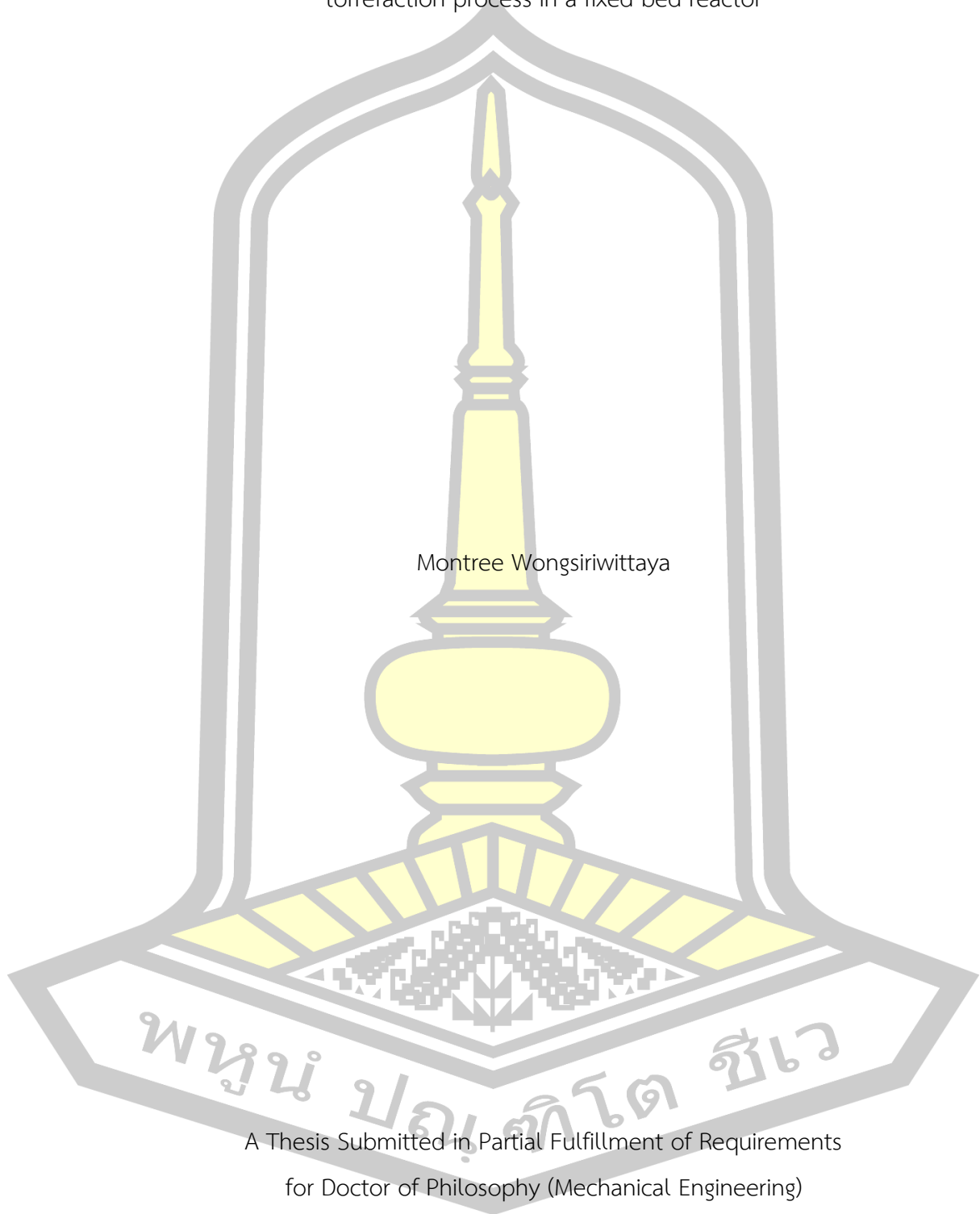


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Improvement of physical properties of rice husk biomass fuel pellets with the  
torrefaction process in a fixed bed reactor



Montree Wongsiriwittaya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

May 2023

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายมนตรี วงศ์ศิริวิทยา  
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. สกุลตลา วรณปะเข)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. บพิธ บุปผไชติ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. อรุมา ลาสุนนท์)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ธวัฒน์ชัย คุณะโคตร)

กรรมการ

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

<b>ชื่อเรื่อง</b>	การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแกลบ ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง		
<b>ผู้วิจัย</b>	มนตรี วงศ์ศิริวิทยา		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	รองศาสตราจารย์ ดร. บพิช บุปผโชติ		
<b>ปริญญา</b>	ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต	<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมเครื่องกล
<b>มหาวิทยาลัย</b>	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	<b>ปีที่พิมพ์</b>	2566

### บทคัดย่อ

การศึกษากระบวนการทอรรีแฟกซ์แบบเบตนิ่งเพื่อปรับปรุงค่าความร้อนของชีวมวลแกลบและการอัดเม็ดเชื้อเพลิง"

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองและปรับปรุงกระบวนการทอรรีแฟกซ์แบบเบตนิ่งเพื่อเพิ่มค่าความร้อนของชีวมวลแกลบและการอัดเม็ดเชื้อเพลิง งานวิจัยถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนตามวัตถุประสงค์ดังนี้ ส่วนที่ 1. การปรับปรุงสมบัติความร้อนของชีวมวลแกลบด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ในเตาปฏิกรณ์เบตนิ่ง โดยใช้ชื่อว่า "ถ่านทอรรีไฟด์" ในส่วนนี้ได้ศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการที่เกี่ยวข้อง รวมถึงปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟด์และน้ำมันเตา และส่วนที่ 2. เลือกใช้ผลการทดลองที่ได้จากส่วนที่ 1 เพื่ออัดเม็ดเชื้อเพลิงและศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิง ได้แก่ ค่าความเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้ ค่าการดูดคืนความชื้น ปริมาณเถ้า ค่าความทนทาน ค่าความหนาแน่น และค่าความหนาแน่นรวม

ในการศึกษาสมบัติทางความร้อนของชีวมวลแกลบด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ตามวัตถุประสงค์ที่ 1 ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งและแก๊สหมุนวนในระบบแทนไนโตรเจนเพื่อปรับปรุงชีวมวลแกลบให้เป็นผลิตภัณฑ์แบบแข็งที่เรียกว่า "ถ่านทอรรีไฟด์" ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงค่าความร้อน ปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟด์ และการวิเคราะห์ค่าแบบประมาณและแบบแยกธาตุ ในการทดลองนี้ ช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ 200-320 องศาเซลเซียส และเวลาดังอยู่ที่ 10, 20, และ 30 นาที ผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วงค่า 18-23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเวลาดังอยู่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนความร้อนของชีวมวล การเพิ่มอุณหภูมิจะลดการระเหยของน้ำที่อยู่ในชีวมวลตัวอย่าง การเพิ่มอุณหภูมิอีกอันหนึ่งอาจมีผลต่อค่าความร้อนที่ได้เนื่องจากลักษณะของชีวมวล อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิที่สูงขึ้นไม่ได้หมายความว่าคุณสมบัติทางความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้นอาจส่งผลต่อการไล่ความชื้นและสารระเหยในเนื้อชีวมวล ดังนั้น การเลือกใช้อุณหภูมิ

และเวลาที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในกระบวนการเทอร์รีแฟกซ์ดังกล่าว

ส่วนที่สองของการศึกษานี้เน้นที่การใช้ผลการทดลองที่ดีที่สุดจากวัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อศึกษาเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตจากกระบวนการอัดเม็ดด้วยถ่านเทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ค่าความเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้ ค่าความทนทาน ค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นรวม ค่าด้านการดูดซับความชื้นของชีวมวล และค่าความร้อนสูง ผลการทดลองพบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้: ค่าความเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้อยู่ในช่วงร้อยละ 4-6 โดยน้ำหนัก ค่าความทนทานผ่านมาตรฐานและสูงถึงร้อยละ 97.93 โดยน้ำหนัก ค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นรวมเป็น 688.5 และ 1,108.73 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรตามลำดับ ค่าด้านการดูดซับความชื้นมีผลการทดลองที่ค่าด้านการดูดซับความชื้นสูงกว่าร้อยละ 95 และค่าความร้อนสูงของเม็ดเชื้อเพลิงสูงถึง 23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการเทอร์รีแฟกซ์แบบเบดนิ่งเพื่อเพิ่มค่าความร้อนของชีวมวลและการอัดเม็ดเชื้อเพลิง ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของถ่านเทอร์รีไฟต์และเม็ดเชื้อเพลิงให้มีค่าที่สูงขึ้น ซึ่งอาจมีผลที่ดีต่อการใช้งานและประสิทธิภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมและแหล่งพลังงานไฟฟ้าเชิงพลังงานทดแทน

คำสำคัญ : กระบวนการเทอร์รีแฟกซ์, เตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง, ถ่านเทอร์รีไฟต์, สมบัติทางกายภาพ, เม็ดเชื้อชีวมวล

พูนุ ปณู ทิโต ชีเว

<b>TITLE</b>	Improvement of physical properties of rice husk biomass fuel pellets with the torrefaction process in a fixed bed reactor		
<b>AUTHOR</b>	Montree Wongsiriwittaya		
<b>ADVISORS</b>	Associate Professor Bopit Bubphachot , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Doctor of Philosophy	<b>MAJOR</b>	Mechanical Engineering
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2023

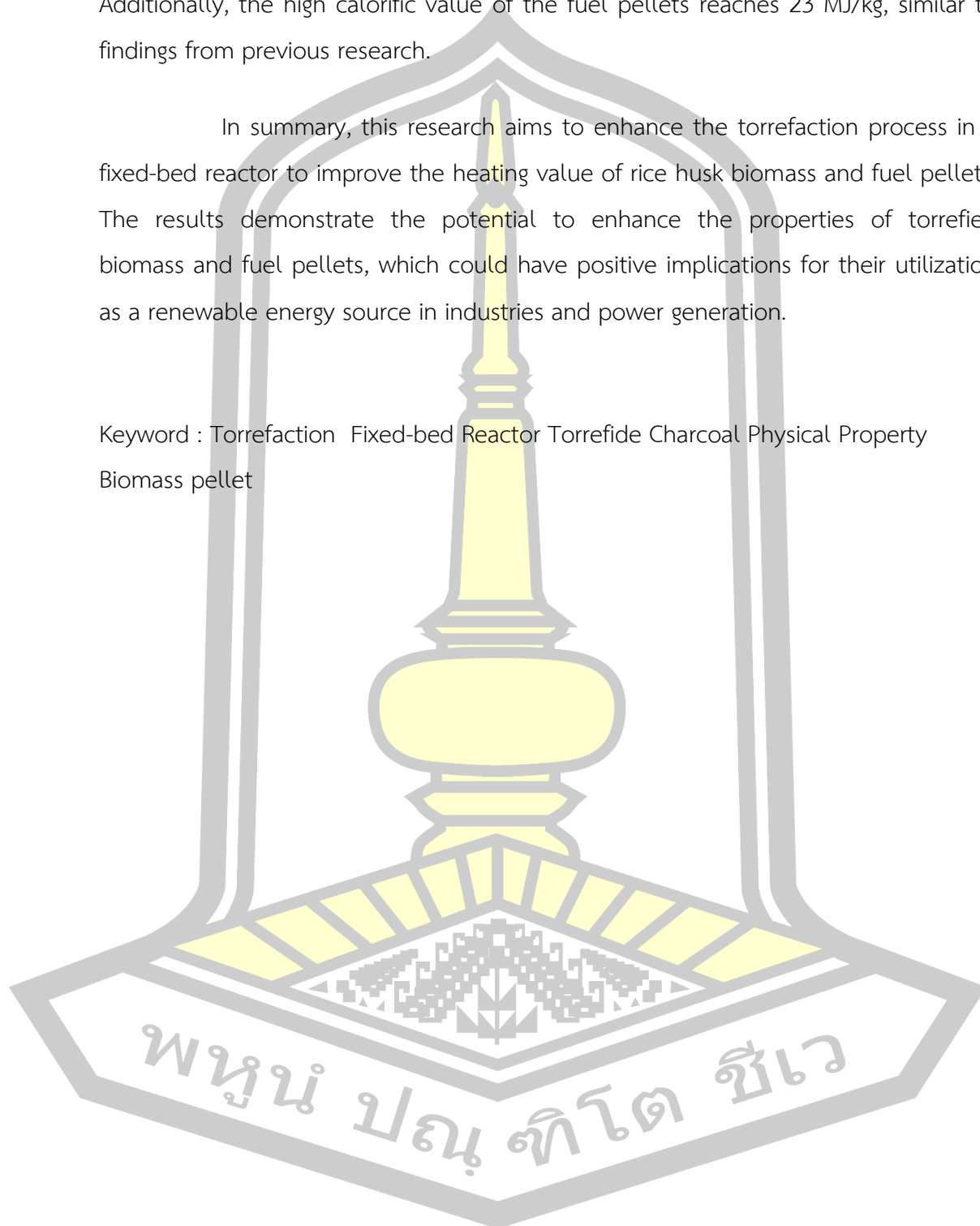
### ABSTRACT

This research focuses on studying the torrefaction process in a fixed-bed reactor to improve the heating value of rice husk biomass and fuel pellets. The experiment is divided into two parts based on the objectives. Part 1: Improving the thermal properties of rice husk biomass through torrefaction in a fixed-bed reactor, referred to as "torrefied biomass." This part aims to determine the suitable temperature range and duration for the torrefaction process to achieve higher heating value and yield of torrefied charcoal and fuel oil. The experiment involves studying the temperature and time parameters, ranging from 200 to 320 °C and durations of 10, 20, and 30 minutes. The results show that the heating value of the torrefied biomass falls within the range of 18 to 23 MJ/kg. It is important to note that the residence time during heating affects the higher heating value by influencing the evaporation of moisture from the biomass. Higher temperatures may not necessarily lead to an improvement in the higher heating value, as they can impact the biomass's characteristics and moisture content. Part 2: Using the best results obtained from Part 1, this part focuses on compressing the torrefied biomass into fuel pellets. The physical properties of the fuel pellets, such as higher heating value, hygroscopicity, ash content after burning, durability, density, and bulk density, are determined. The experimental results indicate that the ash content after burning ranges from 4 to 6% by weight. The durability meets the standard, with values reaching up to 97.93% by weight. The density and bulk density of the fuel pellets are measured at 688.5 and 1,108.73 kg/m<sup>3</sup>, respectively. The fuel pellets also

demonstrate high resistance to moisture reabsorption, with values exceeding 95%. Additionally, the high calorific value of the fuel pellets reaches 23 MJ/kg, similar to findings from previous research.

In summary, this research aims to enhance the torrefaction process in a fixed-bed reactor to improve the heating value of rice husk biomass and fuel pellets. The results demonstrate the potential to enhance the properties of torrefied biomass and fuel pellets, which could have positive implications for their utilization as a renewable energy source in industries and power generation.

Keyword : Torrefaction Fixed-bed Reactor Torrefide Charcoal Physical Property Biomass pellet





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ซึ่งได้ให้แนวคิดและคำปรึกษารวมทั้งแนะนำการทำวิจัย การแสดงความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ขอกราบขอบพระคุณ ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.สกุศลลา วรณปะเข กรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอุมา ลาสุนนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธวัฒน์ชัย คุณะโคตร และ รองศาสตราจารย์ ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.บพิธ บุปผโชติ ที่ทุกท่านได้สละเวลาให้ความช่วยเหลือ ให้แนวคิดความรู้ทางวิชาการ แนะนำแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์ และร่วมกันตรวจสอบเล่มวิทยานิพนธ์นี้ในทุกขั้นตอน ซึ่งทำให้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์มีกำลังใจในการทำงาน การทดลองมาโดยดีตลอด ซึ่งเป็นผลให้มีความรู้ ความสามารถในการทำการทดลองและพัฒนาวิทยานิพนธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

ขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้โอกาสในการเข้าศึกษา ระดับดุษฎีบัณฑิต รวมทั้งการใช้สถานที่ในการทำการทดลอง การเขียนวิทยานิพนธ์ และความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้โอกาสในการลาศึกษาต่อระดับดุษฎีบัณฑิต และการใช้พื้นที่ในการทำงานวิจัย การทดลอง และการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และภรรยาที่รัก ที่คอยให้การสนับสนุน การให้กำลังใจตลอดจนแนวคิดต่างๆ สำหรับการทดลอง การเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

มนตรี วงศ์ศิริวิทยา

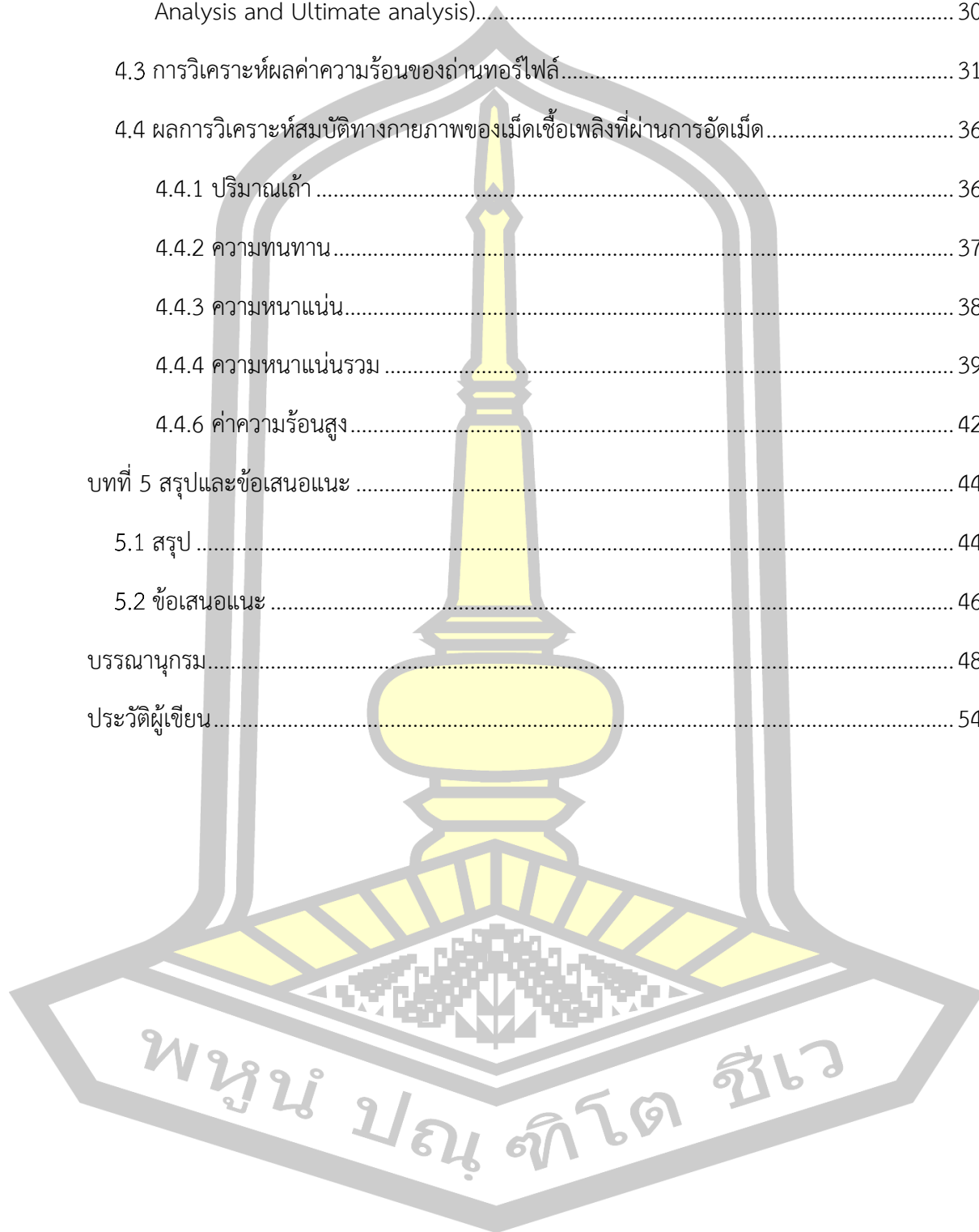
พูน ปณ ทิโต ชีเว

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพประกอบ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขต.....	2
1.3.1 ตัวแปรต้น (ขั้นตอนการเตรียมถ่านทอรรีไฟล์).....	2
1.3.2 ตัวแปรตาม (ขั้นตอนการเตรียมถ่านทอรรีไฟล์).....	2
1.3.3 ตัวแปรควบคุม (ขั้นตอนการเตรียมถ่านทอรรีไฟล์).....	3
1.3.4 ตัวแปรต้น (ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง).....	3
1.3.5 ตัวแปรตาม (ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง).....	3
1.3.6 ตัวแปรควบคุม (ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง).....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล.....	5
2.1 วัตถุประสงค์ และเม็ดเชื้อเพลิง.....	5
2.2 องค์ประกอบชีวมวล.....	6

2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	6
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	7
2.2.3 ลิกนิน (Lignin).....	7
2.3 กระบวนการทอรรีแฟกชัน .....	8
2.3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน .....	9
2.3.2 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการทอรรีแฟกชัน .....	9
2.3.3 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการทอรรีแฟกชันสกู.....	10
2.4 การแปรรูปชีวมวลสู่เม็ดเชื้อเพลิง .....	13
2.5 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของเอเชีย .....	14
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	18
3.2 ขั้นตอนการสร้างเครื่องเผาแกลบโดยกระบวนการทอรรีแฟกชันแบบแบนนิ่ง .....	19
3.3 การออกแบบแผ่นเพลท และสร้างเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล .....	21
3.4 การออกแบบแผนการทดลอง.....	22
3.5 การวิเคราะห์ผลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	24
3.5.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis).....	25
3.5.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง .....	25
3.5.4 เครื่องทดสอบความทนทานเชื้อเพลิงอัดเม็ด .....	26
3.5.5 การทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิง .....	27
3.5.6 การทดลองหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล.....	28
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	29
4.1 สมบัติพื้นฐานของชีวมวล .....	29

4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านทอรรีไฟด์จากกระบวนการทอรรีแฟกชั่น (Proximate Analysis and Ultimate analysis).....	30
4.3 การวิเคราะห์ผลค่าความร้อนของถ่านทอรรีไฟล์.....	31
4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงที่ผ่านการอัดเม็ด.....	36
4.4.1 ปริมาณเถ้า.....	36
4.4.2 ความทนทาน.....	37
4.4.3 ความหนาแน่น.....	38
4.4.4 ความหนาแน่นรวม.....	39
4.4.6 ค่าความร้อนสูง.....	42
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	44
5.1 สรุป.....	44
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
บรรณานุกรม.....	48
ประวัติผู้เขียน.....	54

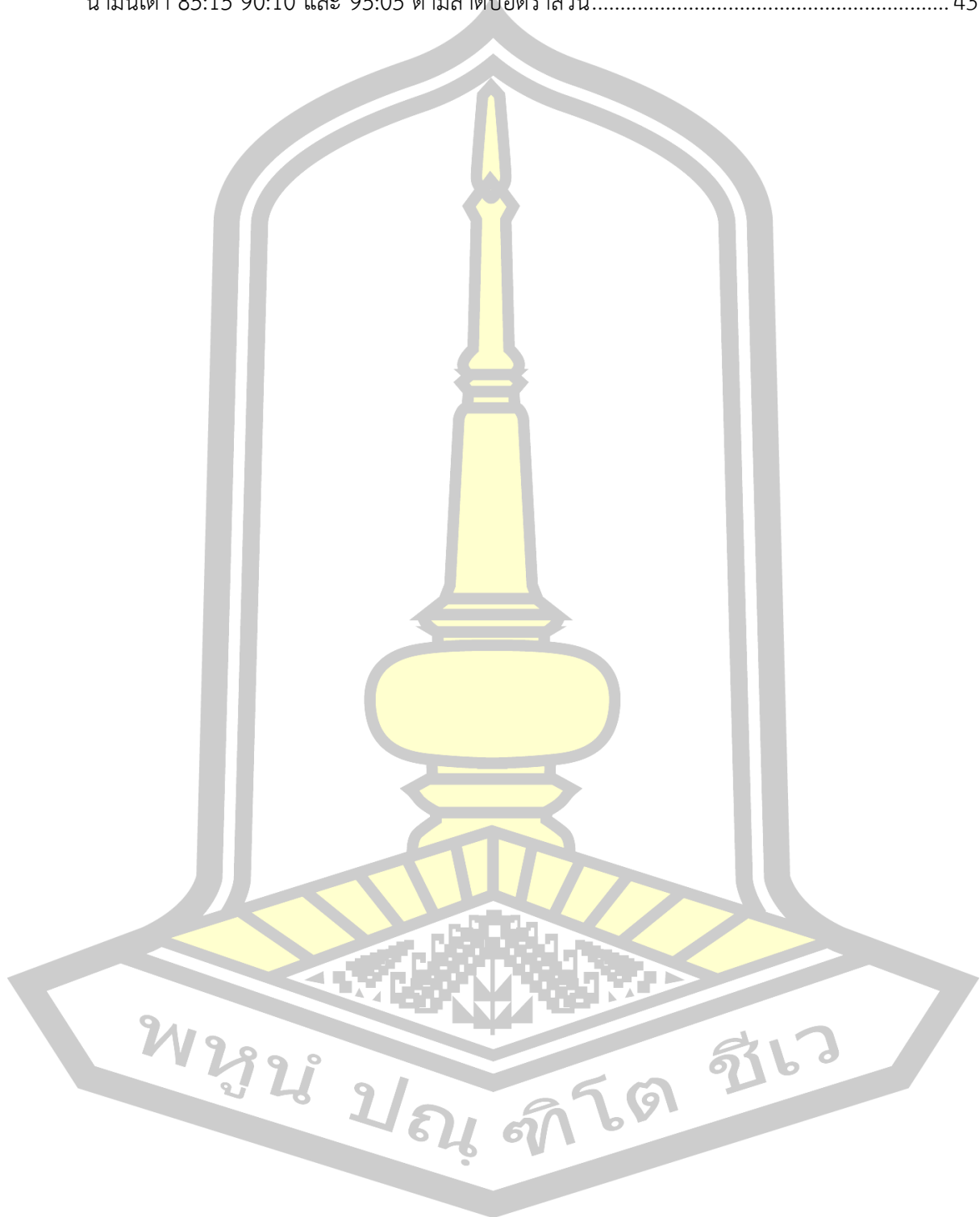


## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ชีวมวลมีองค์ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) [20]	6
ตารางที่ 2	ประเภทของเตาปฏิกรณ์และบริษัทที่มีความเกี่ยวข้อง [20]	8
ตารางที่ 3	แสดงสมบัติของถ่านหินและถ่านทอร์รีไฟต์	13
ตารางที่ 4	แผนการทดลองปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของแกลบจากกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบเบดนิ่งด้วยวิธีการทดลองแบบสุ่ม	22
ตารางที่ 5	แผนการทดลองสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (ถ่านทอร์รีไฟต์จากแกลบ)	23
ตารางที่ 6	การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าพลังงานความร้อน	29
ตารางที่ 7	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านทอร์รีไฟต์ด้วยกระบวนการ (Proximate Analysis and Ultimate analysis)	30
ตารางที่ 8	แสดงสมบัติทางความร้อนของถ่านทอร์รีไฟต์ น้ำมันเตา และปริมาณผลได้จากกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบเบดนิ่ง	34
ตารางที่ 9	แผนการทดลองสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (ถ่านทอร์รีไฟต์จากแกลบ)	35
ตารางที่ 10	การเปรียบเทียบปริมาณเถ้าของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดเม็ดที่อัตราส่วนการทดลองของถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน	37
ตารางที่ 11	การเปรียบเทียบปริมาณค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน	38
ตารางที่ 12	การเปรียบเทียบปริมาณค่าความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน	39
ตารางที่ 13	การเปรียบเทียบปริมาณค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน	40
ตารางที่ 14	การเปรียบเทียบปริมาณค่าการต้านการดูดคืนความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน	41

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบปริมาณค่าค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟด์และ  
น้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน..... 43



## สารบัญภาพประกอบ

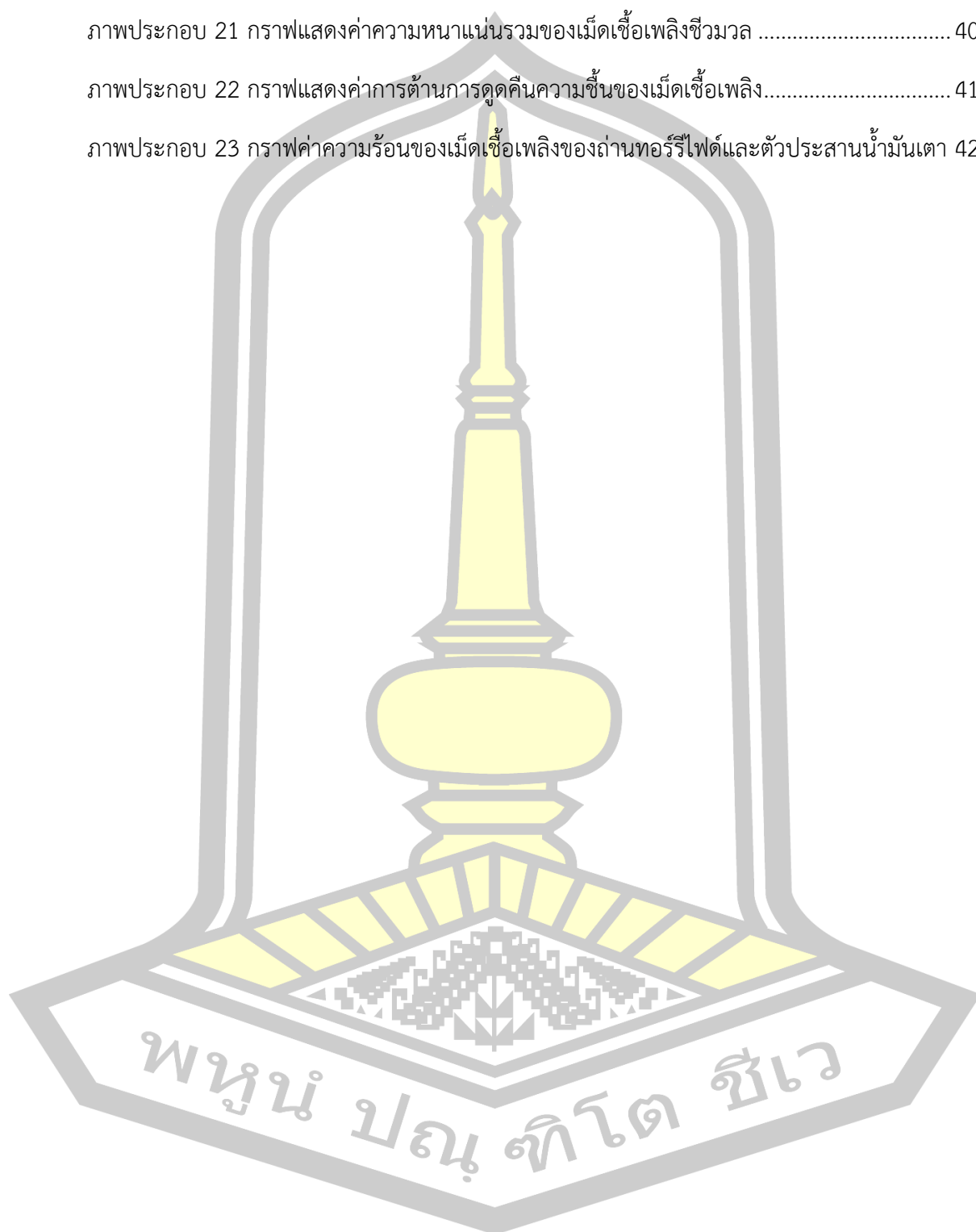
	หน้า
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [23].....	7
ภาพประกอบ 2 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [23] .....	7
ภาพประกอบ 3 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [23].....	8
ภาพประกอบ 4 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการทอรีรีแฟกชันแบบถังหมุน [23].....	9
ภาพประกอบ 5 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการทอรีรีแฟกชันแบบขนาดกะทัดรัด [26].....	10
ภาพประกอบ 6 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการทอรีรีแฟกชันสกรู [27].....	11
ภาพประกอบ 7 เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรีรีแฟกชัน 1) 200 2) 250 และ 3) 300 องศาเซลเซียส [29] .....	11
ภาพประกอบ 8 กระบวนการทอรีรีแฟกชันแบบเบตนิ่ง.....	12
ภาพประกอบ 9 กระบวนการอัดเป็นก้อนประกอบด้วย 5 ขั้นตอน.....	14
ภาพประกอบ 10 แผนผังกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแห้งตะเกียบ .....	15
ภาพประกอบ 11 ขั้นตอนการสร้างเครื่องเผาแกลบโดยกระบวนการทอรีรีแฟกชันแบบเบตนิ่ง .....	20
ภาพประกอบ 12 ชุดทดลองกระบวนการทอรีรีแฟกชันแบบเบตนิ่ง .....	21
ภาพประกอบ 13 การออกแบบและเจาะรูของแผ่นเพลทที่มุม $70^\circ$ $90^\circ$ และ $110^\circ$ [43] .....	22
ภาพประกอบ 14 เครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ .....	26
ภาพประกอบ 15 เครื่องทดสอบความทนทานเชื้อเพลิงอัดเม็ด.....	27
ภาพประกอบ 16 ภาพสำหรับการทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล .....	27
ภาพประกอบ 17 ปริมาณผลได้และค่าความร้อนของถ่านทอรีรีไฟต์จากกระบวนการทอรีรีแฟกชัน 32	
ภาพประกอบ 18 การแสดงปริมาณเถ้าของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดเม็ดที่อัตราส่วนการทดลองของถ่านทอรีรีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน .....	36
ภาพประกอบ 19 ค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอรีรีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน .....	38

ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ..... 39

ภาพประกอบ 21 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ..... 40

ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงค่าการต้านการดูดคืนความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิง..... 41

ภาพประกอบ 23 กราฟค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงของถ่านทอร์รีไฟต์และตัวประสานน้ำมันเตา 42





## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันการใช้พลังงานชีวมวลโดยส่วนใหญ่จะเป็นการใช้เผาไหม้โดยตรง หรือการนำมาปรับปรุงสมบัติโดยใช้เทคโนโลยี เช่น Pyrolysis Gasification Torrefaction และ Biomass pellets ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เปลี่ยนสมบัติทางความร้อนของชีวมวลที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้ประโยชน์จากชีวมวลอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อสร้างความร้อนและพลังงานได้จริงจัง [1] ดังนั้นการเผาไหม้ของชีวมวลร่วมกับเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งในโรงไฟฟ้าถ่านหินที่มีอยู่เป็นวิธีที่น่าสนใจ และยังสามารถใช้เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าได้ เพื่อเป็นโอกาสในการลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล [2] เนื่องด้วยปัจจุบันมนุษย์เรามีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ราคาน้ำมันและก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและนอกจากนี้การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล [3] ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและภาวะโลกร้อน ดังนั้นการคิดค้นเทคโนโลยีเพื่อพัฒนาพลังงานทางเลือกมีความจำเป็นอย่างมากต่อการเลือกใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ และเป็นอีกเหตุผลสำคัญต่อการใช้ชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนเพิ่มให้มากขึ้น โดยเฉพาะเทคโนโลยีการอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิง

อย่างไรก็ตามการใช้ประโยชน์จากชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงานชีวภาพจะหนีไม่พ้นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับสมบัติทางกายภาพของชีวมวล เช่น ความหนาแน่น ความทนทาน พลังงานความร้อนต่ำ และค่าความชื้นสูง ซึ่งสมบัติเหล่านี้ส่งผลให้มีต้นทุนในการจัดการชีวมวลสูง รวมทั้งการเก็บรักษาและการปรับปรุงพลังงานชีวมวลที่มีประสิทธิภาพทำให้ดีขึ้นได้นั้น [4] จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสมบัติก่อนที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยอาศัยกระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction) ที่เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถปรับปรุงสมบัติชีวมวลเพื่อเป็นพลังงานชีวภาพได้ดี [5, 6]

กระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction) เป็นกระบวนการย่อยสลายทางความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 200 - 300 องศาเซลเซียส โดยการแลกเปลี่ยนความร้อนกับชีวมวล [7] จากนั้นชีวมวลก็จะปล่อยความชื้นและสารระเหยออกมาบางส่วน และชีวมวลที่ผ่านกระบวนการนี้เรียกว่า ถ่านทอรรีไฟล์ (Torrefild) และสารระเหยที่ถูกปล่อยออกมาจะควบแน่นที่อุณหภูมิบรรยากาศแล้วเป็นของเหลว ได้แก่ น้ำส้มควันไม้ น้ำมันเตา ส่วนที่เหลือจะเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ และแก๊สนี้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนได้ ซึ่งข้อดีของถ่านทอรรีไฟล์ (Torrefild) คือมีองค์ประกอบเป็นเนื้อเดียวกันสามารถต้านทานการดูดซับความชื้น [5] และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ [8, 9] ซึ่งง่ายต่อการจัดเก็บและการขนส่งมากกว่าชีวมวลดิบ โดยผ่านขั้นตอนของการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพโดยการอัดเม็ดเชื้อเพลิง (Biomass Pellets) เป็นการอัดเม็ดที่สามารถเพิ่มค่าความทนทานต่อการแตกหักของเม็ดเชื้อเพลิง และต้องมีค่าความหนาแน่นประมาณ 600 - 1,400 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [10] อีกสมบัติหนึ่งของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีขนาดสม่ำเสมอจะมีความสามารถในการไหลของเม็ดเชื้อเพลิงส่งผลต่อกระบวนการป้อนเข้าห้องเผาไหม้ได้ดี ซึ่งสมบัติทั้งหมดนี้จะมีผลโดยตรงต่อการดำเนินการด้านการเก็บรักษาและลดต้นทุนโลจิสติกส์ได้

สมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้นั้นต้องประกอบด้วย ขั้นตอนของกระบวนการอัดเม็ด การเลือกใช้ตัวประสานเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นและความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงที่ดี สมบัติทางความร้อนของถ่านทอร์รีไฟล์ และการปล่อยฝุ่นละอองหลังการเผาไหม้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อศึกษาการนำถ่านทอร์รีไฟล์ (Torrefield) อัดขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล [6] โดยนำเสนอวิธีการผสมระหว่างการใช้น้ำมันเตา (Tar) กับถ่านทอร์รีไฟล์ (Torrefield) [11] เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงโดยใช้เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแผ่นกลม และผลิตเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ตามมาตรฐาน เพื่อสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็งแทนการใช้ถ่านหิน หรือเพื่อชะลอการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาช่วงอุณหภูมิ 200 240 282 และ 320 องศาเซลเซียส และระยะเวลาคงอยู่ของ แกลบในกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบเบตนิ่งที่ 10 20 และ 30 นาที ที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
2. เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิง โดยเลือกใช้น้ำมันเตาจากกระบวนการทอร์รีแฟกชันเป็นตัวประสาน และศึกษามุมฝายแผ่นเพลทที่มีผลต่อสมบัติเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

## 1.3 ขอบเขต

โครงร่างวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการที่ 1 การเตรียมถ่านทอร์รีไฟล์โดยกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบเบตนิ่งที่อุณหภูมิ 200 240 280 และ 320 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ในเตาเผาชีวมวลเป็น 10 20 และ 30 นาที ซึ่งกระบวนการนี้ได้ผลิตภัณฑ์คือ ถ่านทอร์รีไฟล์ น้ำส้มควันไม้ และน้ำมันเตา และการทดลองหาค่าความร้อนของถ่านทอร์รีไฟล์และน้ำมันเตา ส่วนกระบวนการที่ 2 เป็นการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนผสมระหว่างถ่านทอร์รีไฟล์และน้ำมันเตาที่อัตราส่วน 95:5 90:10 และ 85:15 โดยน้ำหนัก และใช้อัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงที่มุม 70 90 และ 110 องศา และนำเม็ดเชื้อเพลิงหาสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตัวแปรต้น ตัวแปรตาม และตัวแปรควบคุม

**กระบวนการที่ 1** การเตรียมถ่านทอร์รีไฟล์และน้ำมันเตาจากกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบเบตนิ่งของแกลบ

### 1.3.1 ตัวแปรต้น (ขั้นตอนการเตรียมถ่านทอร์รีไฟล์)

1.3.1.1 ถ่านทอร์รีไฟล์จากกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบเบตนิ่ง ที่อุณหภูมิ 200 240 280 และ 320 องศาเซลเซียส

1.3.1.2 ระยะเวลาคงอยู่ของแกลบในกระบวนการที่ 10 20 และ 30 นาที

### 1.3.2 ตัวแปรตาม (ขั้นตอนการเตรียมถ่านทอร์รีไฟล์)

1.3.2.1 สมบัติทางความร้อนของถ่านทอร์รีไฟล์และน้ำมันเตา

1.3.2.2 ร้อยละปริมาณผลได้

1.3.3 ตัวแปรควบคุม (ขั้นตอนการเตรียมถ่านทอรรีไฟล์)

1.3.3.1 กระบวนการทอรรีไฟล์แพกชั้นแบบเบตนิ่ง

1.3.3.2 อัตราการไหลของแก๊สในระบบ 10 ลิตรต่อนาที

1.3.3.3 ชีวมวลแกลบ

**กระบวนการที่ 2** เป็นการอัดขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้ส่วนผสมระหว่างถ่านทอรรีไฟล์และน้ำมันเตาเป็นตัวประสาน

1.3.4 ตัวแปรต้น (ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง)

1.3.4.1 อัตราส่วนผสมระหว่างถ่านทอรรีไฟล์และน้ำมันเตา 95:5 90:10 และ 85:15

โดยน้ำหนัก

1.3.4.2 มุมฝ่ายของรูแผ่นเพลทอัดเม็ดเชื้อเพลิง 70 90 และ 110 องศา

1.3.5 ตัวแปรตาม (ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง)

1.3.5.1 สมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิง ได้แก่ ปริมาณเถ้า ค่าความทนทาน ค่า

ความหนาแน่นและความหนาแน่นรวม ร้อยละการดูดความชื้น และค่าความร้อนสูง

1.3.6 ตัวแปรควบคุม (ขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง)

1.3.6.1 เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแผ่นกลม

1.3.6.2 ชีวมวลแกลบ

1.3.6.3 ถ่านทอรรีไฟล์จากกระบวนการทอรรีไฟล์แพกชั้นแกลบ

1.3.6.4 ตัวประสานใช้น้ำมันเตาจากกระบวนการทอรรีไฟล์แพกชั้น

1.3.6.5 อุณหภูมิแผ่นเพลท  $80 \pm 5$  องศาเซลเซียส

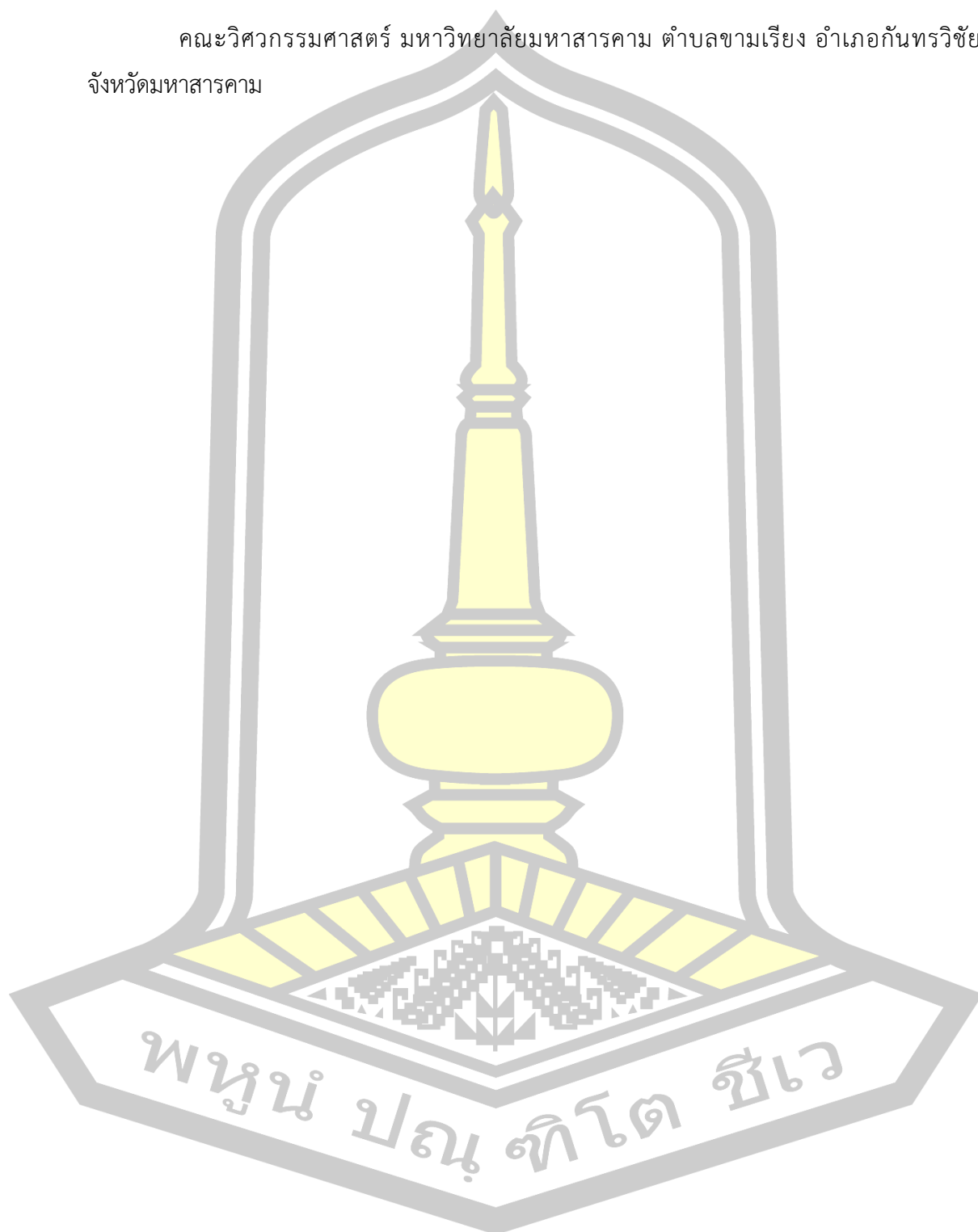
1.3.6.6 เม็ดเชื้อเพลิงขนาด 6 มิลลิเมตร

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการทอรรีไฟล์แพกชั้นแบบเบตนิ่งที่มีผลต่อค่าความร้อนของถ่านทอรรีไฟล์จากชีวมวลแกลบ
2. ทราบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการทอรรีไฟล์แพกชั้น และมุมอัดแผ่นเพลทของเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิง
3. ทราบสมบัติทางความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการ และไม่ผ่านกระบวนการทอรรีไฟล์แพกชั้น
4. สามารถเลือกใช้น้ำมันเตาจากกระบวนการทอรรีไฟล์แพกชั้นเป็นตัวประสาน

### 1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย  
จังหวัดมหาสารคาม



## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

มนุษย์ใช้ไม้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงแข็งมาโดยตลอด โดยไม้ถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนด้วยการนำมาเผาไหม้ให้เกิดความร้อน เผาเพื่อให้ความร้อนไปใช้อบแห้ง การผลิตไอน้ำ พลังงานไฟฟ้า และความต้องการทางอุตสาหกรรมอื่น ๆ และนอกเหนือจากไม้พื้น เศษไม้ และใบไม้ จากการเกษตรแล้ว [12] ยังมีการนำเศษไม้มาปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ เช่น การนำมาอัดเป็นก้อน เพื่อง่ายต่อการขนส่ง และการเพิ่มความหนาแน่น ความทนทาน เพื่อให้รูปทรงของเม็ดเชื้อเพลิงง่ายต่อการจัดเก็บ [1] แต่ถ้าย้อนกลับไปในปี พ.ศ. 2507 สิทธิบัตรแรกสำหรับกระบวนการเชื้อเพลิงอัดเม็ดเกิดขึ้นในสหรัฐอเมริกาและสวีเดน [6, 13] มีการขายเชื้อเพลิงแข็งในตลาดตั้งแต่ปลายปี พ.ศ. 2513 เกิดวิกฤตการณ์ของราคาน้ำมันและปัญหาการพัฒนาตลาดเม็ดเชื้อเพลิงในสหรัฐอเมริกา ต่อมาในปี พ.ศ. 2525 เกิดโรงงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงโรงแรกในสวีเดน และมีการพัฒนาของกระบวนการผลิตที่เป็นในรูปแบบของเชื้อเพลิงเหลว คือ ไบโอบอยล์ เป็นพลังงานในรูปแบบของน้ำมัน อย่างไรก็ตามในปี พ.ศ. 2534 รัฐบาลสวีเดนได้ประกาศใช้ภาษีการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) สำหรับเชื้อเพลิงฟอสซิลและเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น เม็ดเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ต้องมาจากกระบวนการของพลังงานทดแทน [14] และต้องมีมาตรฐานการอัดเม็ดเชื้อเพลิงที่ถูกต้อง โดยเริ่มจากการปรับปรุงสมบัติของเม็ดเชื้อเพลิงที่ดินนั้นต้องมีการเพิ่มความหนาแน่น ความทนทาน และง่ายต่อการจัดเก็บ แต่ยังมีปัญหาอีกอย่างคือวัตถุดิบไม้ที่ใช้ทำเม็ดเชื้อเพลิงนั้นค่อนข้างหายาก และค่าความร้อนของไม้ไม่สูงมากนัก [15] จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนจากเทคโนโลยีเทอร์รีแฟกชัน และกระบวนการอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิง เพื่อให้ได้สมบัติทางกายภาพที่ดี เพื่อการพัฒนาไปสู่ระดับอุตสาหกรรม

#### 2.1 วัตถุดิบ และเม็ดเชื้อเพลิง

วัตถุดิบสำหรับเม็ดเชื้อเพลิงเป็นคอมโพสิตธรรมชาติที่ซับซ้อนมีองค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างที่แตกต่างกันไปตามชนิดของไม้ ชั้นส่วนของไม้ที่ใช้ ขั้นตอนการปรับปรุงสมบัติของแต่ละกระบวนการ [16] แต่เม็ดเชื้อเพลิงยังมีอีกปัญหาหนึ่งคือการดูดซับความชื้นของเนื้อไม้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการดูดซับความชื้น จากงานวิจัยที่ผ่านมาทราบว่าเม็ดเชื้อเพลิงที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 6 จะแสดงว่ามีการดูดซับความชื้นได้ดีกว่าเม็ดที่มีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 10 และขนาดอนุภาคของเม็ดเชื้อเพลิงก็มีผลต่อการดูดซับความชื้นเช่นกัน และยังทราบอีกว่าเม็ดที่ทำจากเศษอนุภาคเล็กกว่าจะดูดซับความชื้นได้ง่ายกว่าเม็ดที่ทำจากเศษอนุภาคใหญ่ [17] แต่ก็ยังมีอีกปัจจัยหนึ่ง

ที่สำคัญไม่แพ้เลย คือ อุณหภูมิบรรยากาศที่มีผลต่อความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิง ปริมาณความชื้น และแรงกดเป็นสามปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเม็ดเชื้อเพลิง [16]

## 2.2 องค์ประกอบชีวมวล

สิ่งมีชีวิตต่อหน่วยพื้นที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และ สารประกอบอื่น ๆ เช่น โปรตีน น้ำตาล เกลือ แป้ง น้ำ ไฮโดรคาร์บอน และเถ้า และมีองค์ประกอบในชีวมวลแตกต่างกันไปตามชนิด อายุ สถานที่เจริญเติบโต และสภาพการเจริญเติบโต จะมีผลโดยตรงต่อผนังเซลล์ของพืชให้แข็งแรงและเป็นชั้นที่แข็ง ซึ่งบอกถึงโครงสร้างเนื้อไม้ได้ [13] ส่วนประกอบสำคัญของผนังเซลล์ของพืช คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แสดงในตารางที่ 1 และเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ในสารชีวมวลของพืชโดยทั่วไปอยู่ระหว่างร้อยละ 40 - 50 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เฮมิเซลลูโลส และลิกนินทั่วไปอยู่ในช่วงร้อยละ 20 - 30 และ 15 - 30 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยทั่วไปแล้วไม้เนื้ออ่อนมีลิกนินสูงกว่าเมื่อเทียบกับไม้เนื้อแข็ง แล้วยังมีความแตกต่างที่สำคัญระหว่างไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งคือมีความสัมพันธ์กับเฮมิเซลลูโลส [11]

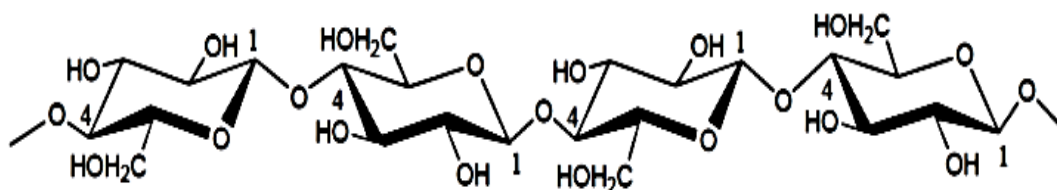
สารประกอบทางเคมีที่ได้จะมีค่าเฉลี่ยของสารสกัดในชีวมวลร้อยละ 1 - 3 โดยน้ำหนัก แต่ชีวมวลบางชนิดอาจมีสารสกัดมากกว่าร้อยละ 3 และส่วนที่สกัดได้ต่างกัน ได้แก่ กรดเรซิน ไขมัน เทอร์พีน ฟลาโวนอยด์ คาร์โบไฮเดรต คาร์โบไฮเดรต และอนินทรีย์ ซึ่งส่วนสารประกอบนี้ยังสามารถเป็นตัวป้องกันจุลินทรีย์ในขณะที่บางสารสามารถนำมาสกัดเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ [18, 19]

ตารางที่ 1 ชีวมวลมีองค์ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) [20]

ลำดับ	ฟางข้าว	ไม้เนื้ออ่อน	ไม้เนื้อแข็ง	เปลือกมะขาม [21]	แกลบ
เซลลูโลส	33-45	35-50	45-50	40	20-25
เฮมิเซลลูโลส	20-25	25-30	20-25	35	30-40
ลิกนิน	15-20	27-30	20-25	25	19-45

### 2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

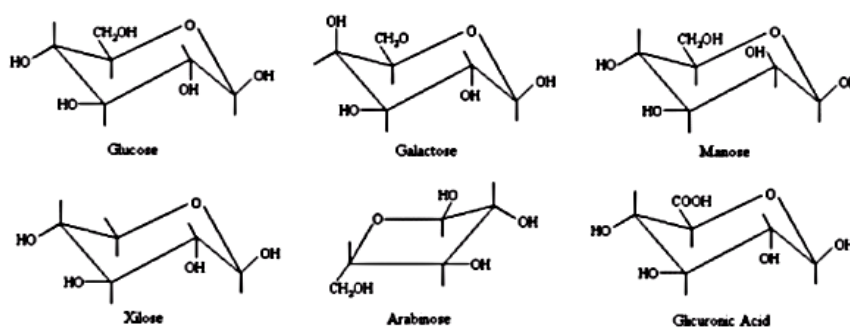
เซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ที่มีโมเลกุลสูงถึง 1,000 หรือสูงกว่า และมีการจัดเรียงเป็นเส้นใยชีวมวลคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนนี้ประกอบไปด้วยโซ่ไม่มีbranซ์ของหน่วยกลูโคสที่เชื่อมโยงดังแสดงภาพประกอบ 1 เซลลูโลสมีแนวโน้มที่จะสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลและระหว่างโมเลกุลโดยกลุ่มไฮดรอกซิล ซึ่งทำให้โซ่ตรงและแข็งตัวรวมกันเป็นโครงสร้างผลึกสร้างเส้นใยเซลลูโลสที่มีความแข็งแรงเชิงกลสูง [22] การย่อยสลายของเซลลูโลสเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 240 - 350 องศาเซลเซียส ที่จะส่งผลให้เกิดเซลลูโลสปราศจากและเลโวกลูโคซาน [5] โครงสร้างผลึกต่อต้านการลดลงของความร้อนได้ดีกว่าเฮมิเซลลูโลสที่ไม่มีโครงสร้าง



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส [23]

### 2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีเมอร์ที่แตกแขนง ประกอบด้วยโซ่สั้น 500 - 3000 หน่วยน้ำตาล เมื่อเทียบกับโมเลกุลน้ำตาลกลูโคส 7,000 - 15,000 ต่อพอลิเมอร์ในเซลลูโลส โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลส ประกอบด้วยไซโลส อาราบิโนส กาแลคโตส สกลูโคส และมานูส ที่มีโครงสร้างทางเคมีของส่วนประกอบหลักในเฮมิเซลลูโลสแสดงภาพประกอบ 2 เฮมิเซลลูโลสที่มีมากที่สุดคือไซแลนและกลูโคแมนแนน ไซแลนเป็นส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่สำคัญของผนังเซลล์ทุติยภูมิสูงถึงร้อยละด้วย 18 - 25 [24] ของไม้เนื้อแข็งและชีวมวลของพืชสมุนไพรมัน เฮมิเซลลูโลสจากแมนแนน เช่น Glucomannan และ Galactoglucomannan เป็นส่วนประกอบของเฮมิเซลลูโลสหลักของผนังเซลล์ทุติยภูมิของไม้เนื้ออ่อน การย่อยสลายด้วยความร้อนของเฮมิเซลลูโลสเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 130 - 260 องศาเซลเซียส โดยส่วนใหญ่ของการสูญเสียน้ำหนักจะเกิดที่ 180 องศาเซลเซียส และขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชนิดชีวมวล โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวในรูปของสารระเหยทำให้เกิดการเสียดสีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเซลลูโลส [25]

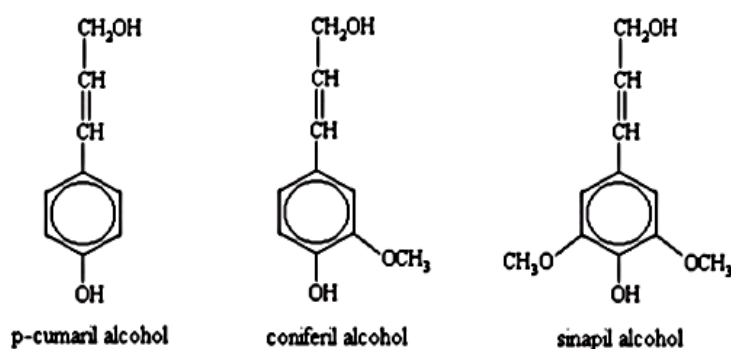


ภาพประกอบ 2 โครงสร้างทางเคมีของเฮมิเซลลูโลส [23]

### 2.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบพีนอลิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และเชื่อมโยงแบบสุ่มสับสนและมึ้นน้ำหนักมาก ลิกนินเป็นตัวเติมช่องว่างในผนังเซลล์ระหว่างส่วนประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ

เพคติน โดยมีการเชื่อมโยงโควาเลนเซียนกับเฮมิเซลลูโลส และยังเชื่อมโยงกับพอลิแซ็กคาไรด์ เพื่อสร้างให้เกิดความแข็งแรงเชิงกลกับผนังเซลล์ [13] โครงสร้างทางเคมีของลิกนินนั้นซับซ้อนมาก ได้แก่ แอลกอฮอล์ และสารอะโรมาติก อีก 3 ชนิดคือ p-coumaril coniferyl และ sinapyl alcohols แสดงภาพประกอบ 3 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของ methoxylation ส่วนประกอบของแอลกอฮอล์เหล่านี้ในโพลีเมอร์เรียกว่า p-hydroxybenzyl และ syringyl [20] ลิกนินในไม้ส่วนใหญ่มีหน่วย guaiacyl และ syringyl ในขณะที่ลิกนินของชีวมวลมีแอลกอฮอล์ทั้งสามหน่วย การย่อยสลายลิกนินเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 280 - 500 องศาเซลเซียส และลิกนินเป็นสารประกอบที่ทำนทานการคายน้ำ ดังนั้นจึงมีลักษณะเป็นถ่านมากกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส



ภาพประกอบ 3 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [23]

### 2.3 กระบวนการทอรีแฟกชัน

เทคโนโลยีจากกระบวนการทอรีแฟกชัน ได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อการใช้งานสำหรับการปรับคุณสมบัติของชีวมวล เช่น ชี้อ้อย แกลบ ฟางข้าว ใบอ้อย และชีวมวลอื่น ๆ การเลือกใช้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบมีหลายขนาดทั้งเล็กและใหญ่ ซึ่งมีเทคโนโลยีของ เครื่องปฏิกรณ์ทอรีแฟกชันเพียงไม่กี่เทคโนโลยีเท่านั้นที่สามารถดำเนินการด้วยวัตถุดิบที่มีขนาด อนุภาคขนาดใหญ่ได้ ซึ่งหมายความว่า การเลือกเทคโนโลยีต้องเลือกตามลักษณะของวัตถุดิบ ที่ผ่านมามีหลายบริษัทให้ความสนใจและสร้างเครื่องปฏิกรณ์หลากหลายแบบ เช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหลายชั้น เครื่องปฏิกรณ์ทอร์เบต เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตเคลื่อนที่ขนาดกะทัดรัด เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น และเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง แสดงตารางที่ 2 ตารางที่ 2 ประเภทของเตาปฏิกรณ์และบริษัทที่มีความเกี่ยวข้อง [20]

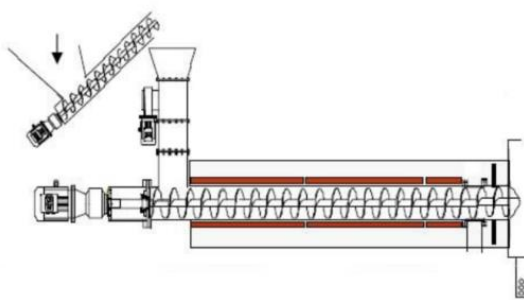
เครื่องปฏิกรณ์	บริษัท
เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน	1) CDS (UK) 2) Torr-Coal (NL)



เครื่องปฏิกรณ์	บริษัท
	3) BIO3D (FR) 4) EBES AG (AT) 5) 4 Energy Invest (BE) 6) BioEndev/ETPC (SWE) 7) Atmosclear S.A. (CH) 8) Andritz 9) Earthcare Products (USA)
เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู	1) BTG (NL) 2) Blake (NL) 3) FoxCoal (NL) 4) Agri-tech Producers (US)
เครื่องปฏิกรณ์ทอร์เบด	1) Tell (NL)
เครื่องปฏิกรณ์แบบสั้น	1) RevTech (France)

### 2.3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน

จากภาพประกอบ 4 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน (Rotary drum) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องและสามารถใช้สำหรับการปรับปรุงสมบัติชีวมวล ในระหว่างกระบวนการชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สามารถรับความร้อนโดยตรงหรือโดยทางอ้อม เช่น จากไอน้ำร้อนยิ่งยวดหรือจากแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของสารระเหยก็ได้ [23]

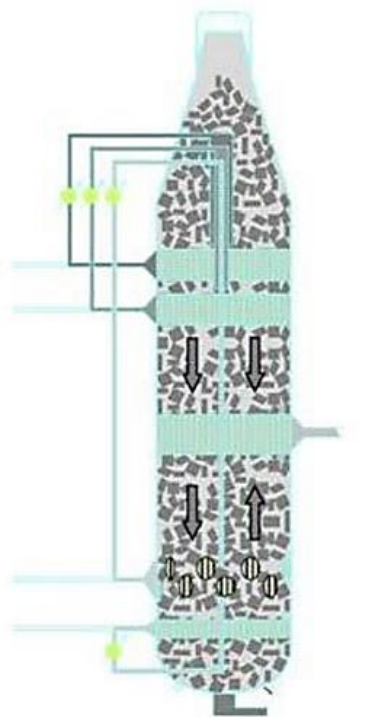


ภาพประกอบ 4 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบถังหมุน [23]

### 2.3.2 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการทอร์รีแฟกชัน

จากภาพประกอบ 5 เตาปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ขนาดกะทัดรัด (Compact moving bed) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ชีวมวลถูกป้อนจากด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์และค่อย ๆ เคลื่อนที่ลงด้านล่าง ในระหว่างกระบวนการชีวมวลได้รับความร้อนโดยใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง การให้

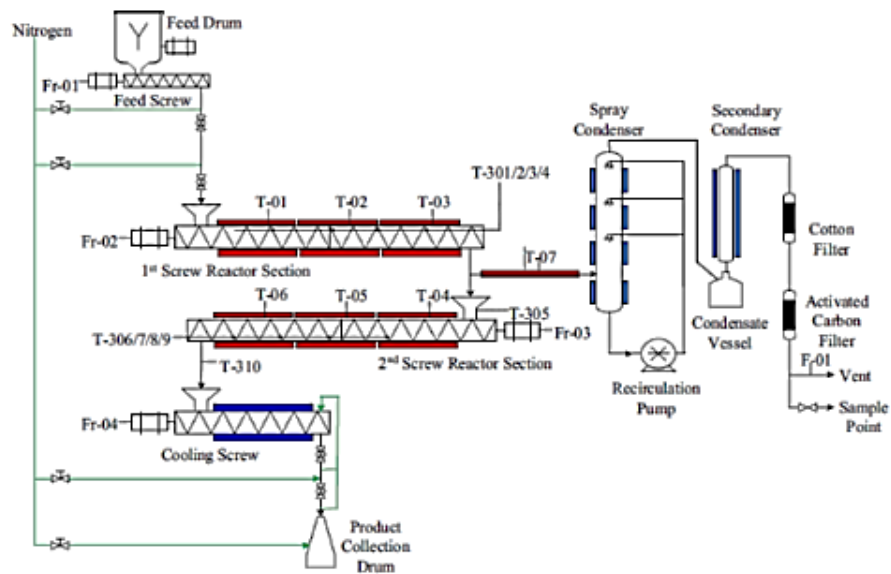
ความร้อนให้จากด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ไปยังด้านบนซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทาง การป้อนของชีวมวล เวลาคงอยู่ของของแข็ง 30 ถึง 40 นาที อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งได้ถูกส่งออกที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนสารระเหยและแก๊สถูกส่งออก ที่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ [23]



ภาพประกอบ 5 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการรีแฟกซ์แบบขนาดกะทัดรัด [26]

### 2.3.3 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการรีแฟกซ์สกรู

ภาพประกอบ 6 คือเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Screw reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องประกอบด้วยสกรูหนึ่งหรือหลายตัวก็ได้ สกรูทำหน้าที่ลำเลียงชีวมวลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์นี้สามารถติดตั้งได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน เวลาคงอยู่ของแข็งขึ้นที่อยู่ที่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับความยาวและความเร็วในการหมุนของสกรู สำหรับกำลังการผลิตที่ไม่สูงเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูมีราคาไม่แพงมากนัก ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดสกรู คือมีความทนทานและเป็นเครื่องปฏิกรณ์เป็นที่รู้จักกันดี ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู คือมีข้อจำกัดในด้านการขยายกำลังการผลิต การผสมกันระหว่างกระบวนการไม่ดีมากนัก และการทำความสะอาดระบบ



ภาพประกอบ 6 เตาปฏิกรณ์จากกระบวนการทอริแฟกชันสกรู [27]

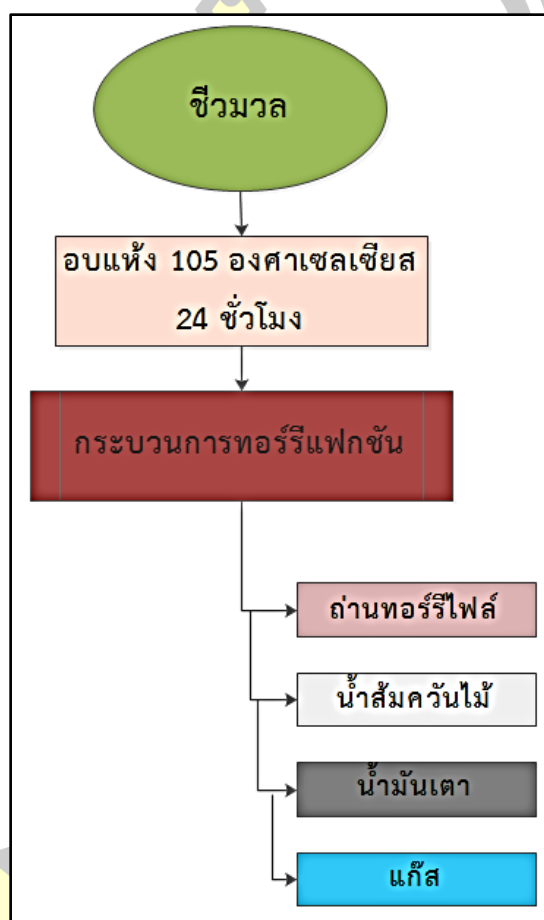
สมบัติบางอย่างของชีวมวลนั้นยังไม่เหมาะต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ และการแปรสภาพเป็นแก๊สจะมีปริมาณออกซิเจนสูง ค่าความร้อนที่ต่ำ และธรรมชาติของชีวมวลคือชอบการดูดความชื้น [5, 28] นอกเหนือจากนั้นมันยังเป็นเส้นใยและวงแหวนโครงสร้างและองค์ประกอบที่เป็นเนื้อเดียวกันทำให้ยากต่อการนำมาใช้เผาไหม้ กระบวนการทอริแฟกชัน (Torrefaction) เป็นกระบวนการอย่างหนึ่งที่เรียกว่าการคั่วแบบอ่อนจากกระบวนการไพโรไลซิส หรือการทำให้แห้งด้วยอุณหภูมิสูงช่วง 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส โดยไม่มีออกซิเจนในระบบ และกระบวนการนี้ยังทำหน้าที่ช่วยตัดต่อโครงสร้างเส้นใยของชีวมวล และเพิ่มค่าความร้อนของชีวมวลได้ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายบางส่วนและองค์ประกอบสารระเหยอินทรีย์มีโมเลกุลต่ำที่ระเหยจากชีวมวลส่งผลให้มวลลดลงในขณะที่ปริมาณพลังงานเริ่มต้นลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตามผลที่ตามมาคือความหนาแน่นพลังงานของชีวมวลเพิ่มขึ้นทำให้น่าสนใจยิ่งขึ้นในฐานะเชื้อเพลิง [26] ชีวมวลที่นำมาผ่านกระบวนการทอริแฟกชันจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มแสดงภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอริแฟกชัน

1) 200 2) 250 และ 3) 300 องศาเซลเซียส [29]

กระบวนการทอรรีแฟกชันมีขั้นตอนที่ดำเนินการแสดงดังภาพประกอบ 8 กระบวนการเริ่มต้นโดยการนำชีวมวลไปบดให้ได้ขนาดที่เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์ของกระบวนการ จากนั้นนำชีวมวลไปอบแห้งที่ประมาณ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่ออบไล่ความชื้น และนำชีวมวลที่ผ่านการอบแห้งป้อนเข้าสู่กระบวนการทอรรีแฟกชัน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ถ่านทอรรีไฟล์ แก๊ส และของเหลว ได้แก่ น้ำส้มควันไม้ น้ำมันเตา [1]



ภาพประกอบ 8 กระบวนการทอรรีแฟกชันแบบเบตนิง

จากกระบวนการทอรรีแฟกชันได้ถ่านทอรรีไฟล์ และนำมาเปรียบเทียบกับถ่านหินด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และการทดลองหาค่าความร้อนสูงของชีวมวลตารางที่ 3 และพบว่าสมบัติของถ่านหินกับถ่านทอรรีไฟล์มีความใกล้เคียงกัน ในส่วนที่เป็นปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนคงที่ และค่าความร้อนสูง และข้อดีของถ่านทอรรีไฟล์เมื่อเปรียบเทียบกับค่าของซัลเฟอร์กับถ่านหิน ทราบอีกว่าในชีวมวลมีปริมาณอยู่น้อย ดังนั้นถ่านทอรรีไฟล์จึงเหมาะที่นำมาเป็นวัตถุดิบหรือนำมาเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ทดแทนถ่านหินได้ [30, 31]

ตารางที่ 3 แสดงสมบัติของถ่านหินและถ่านทอรรีไฟล์

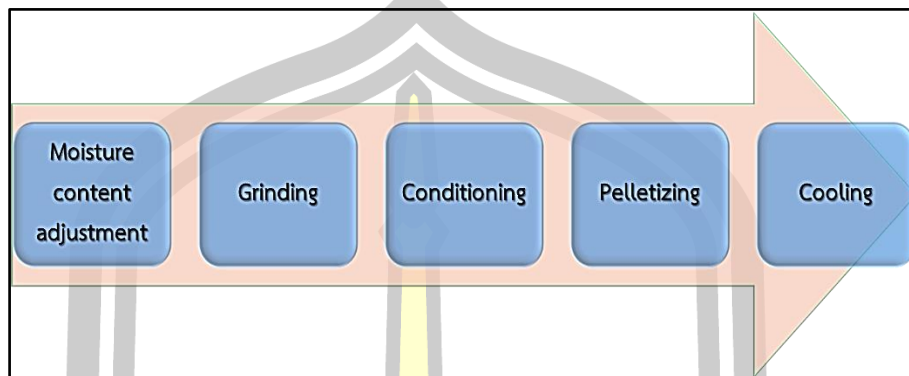
สมบัติ	แกลบ [27]	ถ่านหิน [7]	ถ่านทอรรีไฟล์ [32]
<b>วิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)</b>			
ความชื้น	11.7	2-4	1-4
สารระเหย	53.1	32-37	45-70
คาร์บอนคงที่	20.4	44-49	23-51
เถ้า	14.8	2-19	4-6
<b>วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)</b>			
คาร์บอน	36.7	64-78	48-59
ไฮโดรเจน	5.51	4-5	4.9-5.5
ไนโตรเจน	0.28	4-10	38-44
ออกซิเจน	42.55	1-2	0.9-1.7
ซัลเฟอร์	0.55	0.7-4.9	-
<b>ค่าพลังงานความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)</b>			
ค่าความร้อนสูง (ฐานแห้ง)	15.70	27-32	20-27

## 2.4 การแปรรูปชีวมวลสู่เม็ดเชื้อเพลิง

กระบวนการอัดเป็นก้อนการเพิ่มความหนาแน่นเชิงกลของสารชีวมวลเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการยอมรับในตลาดมานานกว่าศตวรรษ กระบวนการเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลได้พัฒนาโดยนายวิลเลียม แฮโรลด์สมิธ ในซีกาโกรัฐอิลลินอยส์อธิบายถึงกระบวนการนำเอาขี้เลื่อยจากโรงเลื่อยไม้มาให้ความร้อนที่ 150 องศาเซลเซียส และถูกบีบอัดด้วยแรงดันเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิง และมีการพัฒนาต่อเนื่องมาจนถึงระดับอุตสาหกรรม โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อแก้ไขวิกฤติพลังงานจากฟอสซิล

กระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงประกอบด้วยหลายขั้นตอนแสดงภาพประกอบ 9 ซึ่งรวมถึงการปรับสภาพวัตถุดิบการอัดเป็นก้อนและการปรับปรุงสมบัติภายหลัง [33] แต่ขั้นตอนการใช้เทคโนโลยีการปรับปรุงทางกายภาพก่อนที่จะมาเป็นเม็ดเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบ และองค์ประกอบส่วนอื่นด้วย รวมทั้งขนาดของชีวมวลก่อนอัดเม็ดเชื้อเพลิง การอบแห้ง และการปรับ

สภาพ หลังจากการอัดเป็นเม็ดแล้วจะถูกส่งไปยังจุดคัดเลือกว่าแต่เม็ดเชื้อเพลิงที่มีรูปร่างสมบูรณ์ต่อไป [34]



ภาพประกอบ 9 กระบวนการอัดเป็นก้อนประกอบด้วย 5 ขั้นตอน

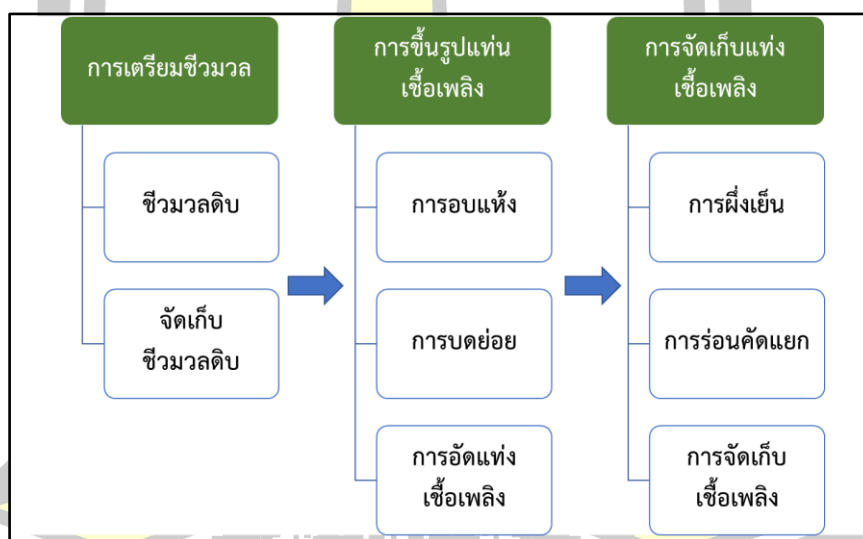
## 2.5 มาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลอัดเม็ดของเอเชีย

การผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแท่งตะเกียบได้พัฒนาจากการผลิตในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ รูปแบบของการผลิตจะเริ่มจากการนำชีวมวลใส่ลงในเครื่องอัดแบบวงแหวน (Ring die Press Machine) โดยที่ลูกหมุนอัด (Roller) จะหมุนอัดแท่งชีวมวลผ่านรูเล็กๆ รอบวงแหวน (Ring die) เมื่อบดอัดเม็ดเชื้อเพลิงที่ผ่านการอัดออกมาจากวงแหวนก็จะมีขนาดตัดให้มีความยาวเท่าๆ กันกลายเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแท่งตะเกียบ [35] ซึ่งในปัจจุบันกลไกการขึ้นรูปเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแท่งตะเกียบประกอบด้วยกระบวนการหลักที่สำคัญ คือ การรวบรวมชีวมวลจากการเกษตร หรือแหล่งชีวมวลต่างๆ เข้าสู่การบดอัดความชื้น การบดย่อยลดขนาดชีวมวล การปรับปรุงชีวมวลก่อนการอัดแท่ง การอัดเม็ดเชื้อเพลิง การผึ่งเย็นเม็ดเชื้อเพลิง การร่อนคัดแยกเม็ดเชื้อเพลิง และการบรรจุเก็บเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งแต่ละกระบวนการมีความสำคัญเท่าๆ กัน แต่เนื่องจากทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิตจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเม็ดเชื้อเพลิง โดยแผนผังกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแท่งตะเกียบ แสดงดังภาพประกอบ 10 สามารถอธิบายรายละเอียดของการดำเนินการแต่ละขั้นตอนของการผลิต ดังนี้ การรวบรวมชีวมวลจากพื้นที่เกษตรกรรมและจากแหล่งชีวมวลต่าง ๆ คือ การนำวัสดุดิบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแท่งตะเกียบ เช่น เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและกิ่งไม้หรือใบไม้ [36]

การบดอัดความชื้นเป็นวิธีการพาปริมาณของน้ำออกจากเนื้อชีวมวลก่อนที่จะนำมาอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแท่งตะเกียบ โดยจะควบคุมความชื้นของชีวมวลให้ได้ประมาณร้อยละ 10-15 ซึ่งการบดอัดความชื้นจะใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 105 องศาเซลเซียส ต่อเนื่องกัน 24 ชั่วโมง [37] ส่วนการบดย่อยลดขนาดของชีวมวลให้เล็กลงด้วยเครื่องบดย่อยให้ได้ขนาดประมาณ 3-6 มิลลิเมตร [11] ขนาดของชีวมวลที่ผ่านการย่อยแล้วจะต้องมีขนาดไม่เกินขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบตะเกียบ แต่ถ้าหากขนาดของชีวมวลเล็กมากจะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งปนเปื้อนที่จะเข้าไปผสมกับเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลในขณะที่ทำการขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงได้ [38]

การอัดเม็ดเชื้อเพลิงเป็นการนำชีวมวลที่ผ่านการบดย่อยแล้วมาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบตะเกียบ โดยเครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบตะเกียบมีทั้งรูปแบบหัวอัดแนวนอน (Flat-die) และรูปแบบหัวอัดแนวตั้ง (Vertical mounted ring-die) [6] ก่อนการอัดแท่งต้องทำให้มีความชื้นและกระตุ้นให้ลิกนินในชีวมวลดูดซึมน้ำให้ได้ประมาณร้อยละ 15 และเมื่อลิกนินดูดซึมน้ำเข้าไปแล้วจะทำหน้าที่ประสานระหว่างอนุภาคของชีวมวลเข้าด้วยกัน การอัดชีวมวลที่มีสมบัติทางกายภาพดีนั้นต้องอาศัยแรงกดระหว่างลูกหมุนอัด (Roller) กับแผ่นรังผึ้งอัด (Pellet mill die) เพื่อให้สามารถขึ้นรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงได้ ส่วนการลดอุณหภูมิของเม็ดเชื้อเพลิง เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ผ่านการอัดขึ้นรูปจะมีความร้อนและการอ่อนตัวสูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดอุณหภูมิลงเพื่อให้เม็ดเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงและทนทานต่อการเคลื่อนย้าย

การคัดแยกเม็ดเชื้อเพลิงเป็นการแยกเม็ดเชื้อเพลิงออกจากผงในกระบวนการ และเอาผงที่แตกออกจากเม็ดย้อนกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง ส่วนเม็ดเชื้อเพลิงที่แยกออกมาจะถูกลำเลียงไปยังถังเก็บเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งเชื้อเพลิงชีวมวลแบบตะเกียบที่มีคุณภาพจะต้องมีฝุ่นผงเจือปนอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.5 โดยมวลของเม็ดเชื้อเพลิง และการบรรจุเก็บเม็ดเชื้อเพลิงจะทำการเก็บบรรจุด้วยระบบอัตโนมัติ ซึ่งการบรรจุนี้ถือเป็นกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแท่งตะเกียบขั้นสุดท้ายที่เสร็จสมบูรณ์ จากนั้นก็จะนำไปจำหน่ายต่อผู้ใช้ต่อไป [29]



ภาพประกอบ 10 แผนผังกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแท่งตะเกียบ

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้นำเสนอการปรับปรุงสมบัติของชีวมวลด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกชัน และนำถ่านทอรีรีไฟล์มาแปรรูปเป็นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล โดยการใช้เครื่องอัดเม็ดแบบแผ่นหมุน เพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพของเม็ดที่ดีต่อไป

2.6.1 การปรับปรุงสมบัติของชีวมวล โดยกระบวนการทอรีรีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) ใช้อุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส [22] อัตราการ

ให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาคงอยู่ของของแข็งที่ 10 20 และ 30 นาที เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งจะเป็นระบบค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิขึ้น และยังใช้เวลาคงอยู่ของแข็งนานมาก [39]

2.6.2 กระบวนการทอรรีแพกซ์ขึ้นโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Reactor) ซึ่งมีการสร้างเครื่องปฏิกรณ์หลายแบบ เช่น แบบสกรู (Screw reactor) แบบหมุน (Rotating reactor) และแบบเตาหลายชั้น (Multiple Hearth Furnace (MHF)) ใช้อุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส [40] และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 10 ถึง 110 นาที สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องนี้สามารถป้อนชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ได้ [22] ซึ่งการเตรียมชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ นั้นสามารถทำได้ง่าย และยังสามารถใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งน้อยกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ซึ่งเวลาคงอยู่ของของแข็งขึ้นอยู่กับการผสมกันระหว่างกระบวนการ และการได้รับความร้อนอย่างทั่วถึงของเนื้อชีวมวล การออกแบบและการเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก [6, 22] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติของชีวมวลให้มีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินได้ เช่น ถ่านหินลิกไนต์ และบิทูมินัส เป็นต้น [30, 31]

2.6.3 การผลิตเม็ดเชื้อเพลิงจากชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็นหกขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ การเลือกใช้ชนิดชีวมวล การอบแห้ง การบด การอัดเม็ด การบรรจุ และการขนส่ง

2.6.3.1 การเลือกใช้ชนิดชีวมวลและแหล่งที่มาของชีวมวลถูกต้องตามกฎหมาย เพื่อนำมาทำเม็ดเชื้อเพลิง เช่น ชี้เลื้อยจากผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ไม้ เศษซากชีวมวลที่เหลือจากการตัดไม้ และเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

2.6.3.2 การอบแห้งเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนไล่ไอน้ำออกจากชีวมวล และต้องทำให้แห้งโดยให้ความชื้นประมาณร้อยละ 8 ถึง 10 สำหรับกระบวนการทอรรีแพกซ์ และความชื้นร้อยละ 15 สำหรับกระบวนการอัดเม็ดเชื้อเพลิง ส่วนชีวมวลที่ผ่านการอบแห้งสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตได้ เพราะว่าการอบแห้งสามารถทำการตัดเส้นใยของชีวมวลได้บางส่วน ซึ่งจะทำการอัดเม็ดได้ดี

2.6.3.3 การบดชีวมวลเป็นการคัดกรองวัสดุของชีวมวลให้มีขนาดที่ต้องการ และต้องมีขนาดที่ไม่ใหญ่กว่ารูของแผ่นเพลทที่ใช้ในการอัดเม็ด

2.6.3.4 การอัดเม็ดเชื้อเพลิงจะถูกกดผ่านรูของแผ่นเพลทที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับของเม็ดประมาณ 6 มิลลิเมตร ในระหว่างขั้นตอนการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจะต้องมีแรงกดอย่างมาก เพิ่มความร้อนของเม็ดทำให้ลิกนินธรรมชาติในไม้จับเม็ดเข้าด้วยกันทำหน้าที่เหมือนกาว และเม็ดเชื้อเพลิงออกจากกระบวนการอัดที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส และเมื่อเม็ดอาหารเย็นตัว ลิกนินจะแข็งตัวกลายเป็นเม็ดเชื้อเพลิง และจากนั้นเม็ดเชื้อเพลิงจะถูกคัดกรองเพื่อให้แน่ใจว่ามีขนาดที่เหมาะสมกับกระบวนการที่จะใช้ร่วมกับถ่านหิน หรือกระบวนการอื่น



2.6.3.5 การบรรจุภัณฑ์และการจัดส่งเม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับผู้บริโภคตามที่อยู่อาศัยจะถูกบรรจุลงในถุงแล้วจะทำการจัดส่ง

1. สมบัติทางกายภาพ โดยกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงเพื่อสร้างพันธะที่แข็งแรงและทนทานในผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูงนั้น การอัดเม็ดเชื้อเพลิงสามารถทำได้ และได้มีการทดสอบความแข็งแรง เช่น ความต้านทานแรงอัด ความต้านทานแรงกระแทก และการดูดความชื้น เพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งจะส่งผลดีต่อการขนย้ายขนส่งและการจัดเก็บ [41]

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนที่ใช้ในการวัดความแข็งแรงและความทนทานของผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่นสูง ผลกระทบขององค์ประกอบของชีวมวล เช่น แปะงโปรตีน ไฟเบอร์ ไขมัน ลิกนิน สารระเหย ปริมาณความชื้น ขนาดอนุภาค และอุณหภูมิ ซึ่งที่กล่าวมานั้นมีผลต่อการปรับสภาพ และการยึดเกาะของเม็ดเชื้อเพลิง และอีกตัวแปรหนึ่งของอุปกรณ์การเพิ่มความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงนั้นคือ แรงกดขึ้นรูป และเครื่องบดอัดเม็ด ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความแข็งแรง ความทนทาน และความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิง และปัจจุบันมีงานวิจัยนำเสนอแนวทางในการพัฒนามาตรฐานเกี่ยวกับเกณฑ์ระดับความแข็งแรงและความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูง [42] ขั้นตอนนี้ทำเพื่อประเมินผลกระทบต่อเม็ดเชื้อเพลิงตามปัจจัยการผลิตต่าง ๆ

2. สรุปได้ว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันสามารถผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ได้ด้วยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ และถ่านทอร์รีไฟต์จากกระบวนการทดลองมีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์ และปิทูมินัส [31] หากมีการปรับปรุงสมบัติที่เพียงพอถ่านทอร์รีไฟต์สามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าร่วมกับถ่านหินได้ ถึงแม้กระบวนการทอร์รีแฟกชันสามารถปรับปรุงสมบัติชีวมวลให้ใกล้เคียงกับถ่านหินได้ แต่เพื่อง่ายต่อการขนส่งและการจัดเก็บจึงต้องมีการนำถ่านทอร์รีไฟต์มาปรับปรุงสมบัติทางกายภาพด้วยวิธีการอัดเม็ดเชื้อเพลิงให้ได้มาตรฐานต่อไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเรื่องการปรับปรุงสมบัติโดยการนำถ่านทอร์รีไฟต์มาอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงที่มีสมบัติทางกายภาพ และค่าความร้อนสูงที่สามารถนำมาใช้ร่วมกับการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวลต่อไป



### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้ คือส่วนที่ 1 เพื่อปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของแกลบจากช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาคงอยู่ของกระบวนการทอรีรีแฟกซ์แบบเบตนิ่ง โดยเลือกใช้แกลบจากพื้นที่จังหวัดพิษณุโลก เนื่องด้วยชีวมวลแกลบใหม่มีความชื้นสูง ดังนั้นการทดลองต้องมีกระบวนการอบไล่ความชื้นก่อน ด้วยวิธีการคั่วขนาดของชีวมวล และอบที่ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และส่วนที่ 2 เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิง ด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ชีวมวลแกลบ และขั้นตอนนี้จะได้ถ่านทอรีรีไฟต์และน้ำมันเตา โดยเลือกใช้ใช้น้ำมันเตาจากกระบวนการทอรีรีแฟกซ์เป็นตัวประสาน และวิธีการอัดเม็ดเชื้อเพลิงจากการเปลี่ยนมุมฝายแผ่นเพลทของเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลแบบแผ่นกลม และมีขั้นตอนการสร้างเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงแบบลูกกลิ้งหมุนวน การศึกษามุมฝายของแผ่นเพลท จากนั้นจะทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงให้เป็นไปตามมาตรฐาน

#### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนดำเนินการวิจัยโดยการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของแกลบ ด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกซ์แบบเบตนิ่ง เริ่มต้นกระบวนการด้วยการนำแกลบมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกให้เหลือน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากนั้นเริ่มคัดแยกชีวมวลแกลบโดยใช้ตะแกรงร่อนเพื่อไม่ให้เศษผงติดปะปนมากับชีวมวลแกลบแล้วนำชีวมวลแกลบมาใส่ถุงแล้วชั่งน้ำหนักให้ได้ 1,000 กรัม และนำแกลบไปเทใส่ถาดของเตาอบแห้งเพื่อนำเข้าเตาอบแห้งลมร้อนที่อุณหภูมิ 105±2 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาการอบแห้ง 24 ชั่วโมง จากนั้นจะทำการแยกตัวอย่างของแกลบบางส่วนไปทำการทดลองหาค่าความร้อนเบื้องต้นของแกลบหลังการอบแห้ง โดยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D240 และผลการทดลองทราบว่ามีความร้อนสูงอยู่ที่ 15.650 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และหลังจากอบแห้งครบชั่วโมงตามที่กำหนดแล้ว ก็จะนำออกมาใส่ถุงชั่งน้ำหนักแล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งเพื่อหาค่าความชื้นก่อนและหลังการอบแห้ง และเพื่อให้ตัวอย่างแกลบที่ใช้ในการทดลองมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างชีวมวลแกลบ

หลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง และการออกแบบขั้นตอนการทำงาน เริ่มด้วยการป้อนชีวมวลแกลบตัวอย่างที่ได้เตรียมไว้ที่น้ำหนัก 500 กรัมลงในเครื่องปฏิกรณ์ และจากนั้นให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงอุณหภูมิศึกษาคือ 200 240 280 และ 320 องศาเซลเซียส ต่อมา

เป็นการศึกษาระยะเวลาคงอยู่ของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยการแลกเปลี่ยนความร้อนให้กับชีวมวลแก่ลบบที่ตามอุณหภูมิที่กำหนดและได้กำหนดระยะเวลาคงอยู่เป็น 10 20 และ 30 นาที [27] และนำวิธีการทำงานมาออกแบบตัวเครื่องที่มีชุดเตาแลกเปลี่ยนความร้อน ชุดควบแน่น ชุดหล่อเย็นด้วยน้ำ ชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิต และชุดนำแก๊สกลับเข้าสู่ระบบอีกครั้ง

3.1.1 เริ่มต้นโดยการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในการให้ความร้อนให้กับชุดเตาปฏิกรณ์

3.1.2 หลังจากอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์ได้ตามที่กำหนดแล้วจะเปิดพัดลมดูดอากาศเพื่อให้แก๊สที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนความร้อนของชีวมวลหมุนวนในระบบ

3.1.3 เปิดปั๊มน้ำ และให้น้ำไหลวนในชุดควบแน่น

3.1.4 เปิดชุดอุปกรณ์ควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิต

3.1.5 จับเวลาคงอยู่การแลกเปลี่ยนความร้อนของชีวมวลตามขอบเขตวิจัยที่ 10 20 และ 30 นาที

3.1.6 หลังจากครบตามเวลากำหนดแล้วนำน้ำมันเตาและน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการควบแน่นด้วยน้ำและไฟฟ้าสถิตมาชั่งน้ำหนัก

3.1.7 หลังจากอุณหภูมิในเตาปฏิกรณ์เย็นลงที่อุณหภูมิบรรยากาศ แล้วจะนำเอาถ่านทอร์รีไฟล์ที่ได้ออกมาชั่งน้ำหนัก

3.1.8 นำถ่านทอร์ไฟล์และน้ำมันเตาไปวิเคราะห์หาค่าความร้อนโดยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (วิเคราะห์ 3 ซ้ำ) และนำผลการทดลองมาสรุปตามวัตถุประสงค์

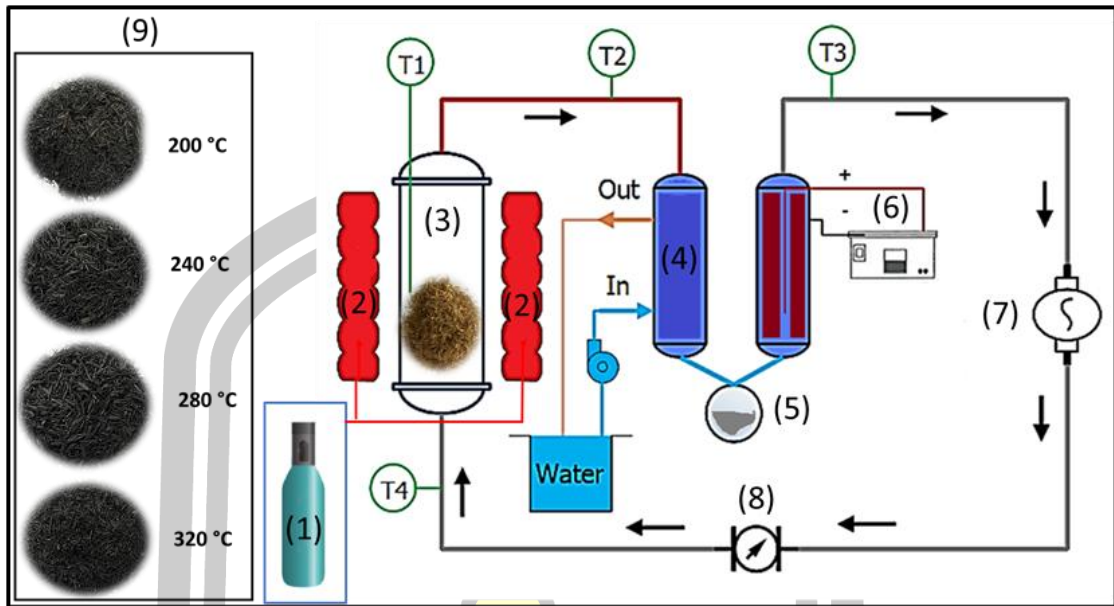
### 3.2 ขั้นตอนการสร้างเครื่องเผาแกลบโดยกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบแบดนิ่ง

เริ่มด้วยการศึกษาข้อมูลของวัสดุแต่ละชนิดที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น เหล็กที่จะนำมาใช้เป็นโครงสร้าง แผ่นเหล็กหรืออุปกรณ์สำหรับเครื่องปฏิกรณ์ และอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ได้แก่ ชุดควบแน่นด้วยน้ำและไฟฟ้า พัดลมดูดอากาศเพื่อให้แก๊สภายในเกิดการหมุนวน รวมทั้งราคาที่เหมาะสม เพื่อเป็นข้อมูลการตัดสินใจเลือกซื้อและลงมือสร้างเครื่องให้สามารถใช้งานได้ แสดงในภาพประกอบ 11 ที่แสดงด้วยการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ ลงมือตัดและประกอบสร้างเครื่อง และภาพสุดท้ายเป็นเครื่องที่สร้างเพื่อนำมาใช้ทดลองในวัตถุประสงค์แรก



ภาพประกอบ 11 ขั้นตอนการสร้างเครื่องเผาเกลือโดยกระบวนการทอรีรีแฟกซ์แบบเบตนึ่ง

ภาพประกอบ 12 อธิบายหลักการทำงานของกระบวนการทอรีรีแฟกซ์แบบเบตนึ่ง โดยชุดทดลองกระบวนการทอรีรีแฟกซ์แบบเบตนึ่ง ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม SOLIDWORK สามารถใช้เป็นตัวแบบในการสร้าง และมีรายละเอียด ได้แก่ ชุดเผาไหม้ชีวมวล หรือเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนึ่งมีพื้นที่การบรรจุได้ถึง 3,000 กรัม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร และใช้แหล่งความร้อนด้วยแก๊สจากด้านนอก และชีวมวลภายในเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและกลายเป็นไอไหลสู่ชุดควบแน่นต่อไป ชุดควบแน่นด้วยน้ำและไฟฟ้าสถิต โดยการป้อนน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 35 องศาเซลเซียส สู่ชุดควบแน่นด้วยน้ำเพื่อทำการแลกเปลี่ยนความร้อนและยังสามารถทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว และไอที่ไหลผ่านจะถูกกลั่นเป็นหยดน้ำและไหลลงสู่ขวดเก็บตัวอย่าง และมีไอบางส่วนที่สามารถควบแน่นด้วยน้ำได้จะไหลสู่ชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิตและถูกควบแน่นมาเป็นน้ำมันเช่นกัน จากนั้นไอที่เหลือจะไหลผ่านเครื่องเป่าลมโดยเครื่องนี้จะมีหลักการทำงานให้แก๊สที่เหลือไหลสู่เครื่องปฏิกรณ์อีกครั้งเป็นการทำงานครบ 1 รอบและจะทำแบบนี้ไปจนกว่าจะได้ตามเวลาที่กำหนดในแผนการทดลอง และเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์



ภาพประกอบ 12 ชุดทดลองกระบวนการทอริฟิเคชันแบบแบดนิ่ง

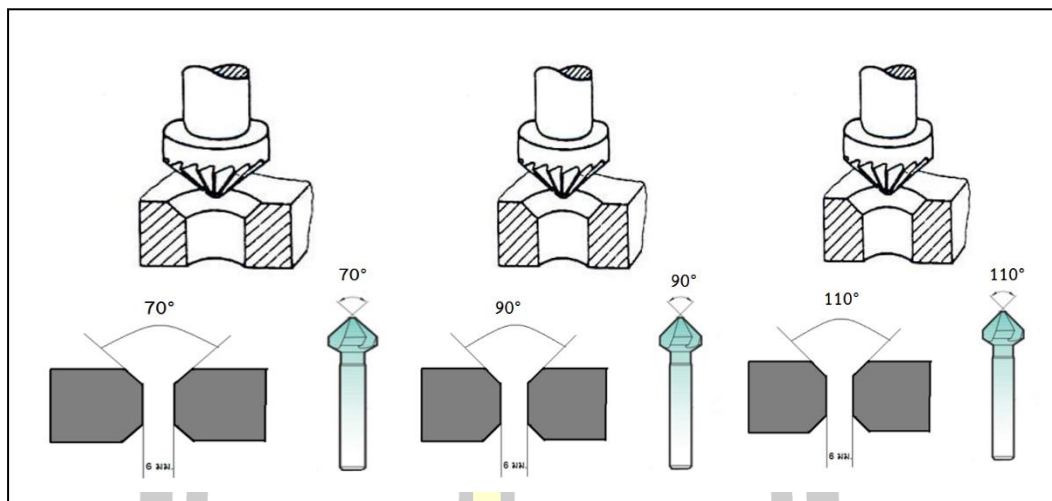
### 3.3 การออกแบบแผ่นเพลท และสร้างเครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

3.3.1 งานวิจัยนี้ได้เลือกการอัดเม็ดเชื้อเพลิงโดยวิธีการหมุนของลูกกลิ้งหมุนบนแผ่นเพลท และได้ออกแบบแผ่นเพลทให้มีรูฝายที่ 70 90 และ 110 องศา เพื่ออัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิง และทำการทดลองสมบัติทางกายภาพต่อไป

3.3.2 ขั้นตอนการสร้างและเจาะรูของแผ่นเพลทที่มุม 70° 90° และ 110°

การสร้างและเจาะรูแผ่นเพลท โดยเริ่มต้นจากการเขียนแบบแผ่นเพลทให้ได้ขนาดของความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง และมุมฉายของรูอัด 70° 90° และ 110° จากนั้นนำแผ่นเพลทขึ้นแท่นเจาะ แล้วทำการวางแบบที่หน้าแผ่นเพลทเพื่อทำการตอกเหล็กนำศูนย์ตามแบบแล้วนำดอกสว่านขนาด 2 มิลลิเมตร เจาะนำตามที่ทำศูนย์ไว้แล้วนำดอกสว่านขนาด 6 มิลลิเมตร มาเจาะขยายรูให้ได้ตามแบบแล้วนำดอกคว้านหัวเตเปอร์ ขนาด 70° 90° และ 110° มาเจาะคว้านรูให้ได้ตามแบบที่กำหนด แสดงภาพประกอบ 13

พหุ ประถม โท ชีวะ



ภาพประกอบ 13 การออกแบบและเจาะรูของแผ่นเพชรที่มุม 70° 90° และ 110° [43]

### 3.4 การออกแบบแผนการทดลอง

การออกแบบแผนการทดลองของงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

1. การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของซีเมนต์มวลกลับด้วยกระบวนการเทอร์ริแฟกชัน เพื่อทำการหาช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทดลองโดยผ่านกระบวนการเทอร์ริแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ซึ่งกระบวนการนี้ได้ตัวอย่างที่ออกมาเรียกว่า ถ่านเทอร์ริไฟต์ และนำถ่านเทอร์ริไฟต์ที่มีค่าความร้อนสูงสุดมาทำการอัดเม็ดเชื้อเพลิงแสดงตารางที่ 4 และสามารถแบ่งการทดลองทั้งหมด 12 การทดลอง และแต่ละการทดลองทำการเก็บ 3 ครั้ง จะได้ทั้งหมด 36 การทดลอง

ตารางที่ 4 แผนการทดลองปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของมวลกลับจากกระบวนการเทอร์ริแฟกชันแบบเบดนิ่งด้วยวิธีการทดลองแบบสุ่ม

ลำดับ	ลำดับการทดลอง แบบสุ่ม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาดังอยู่ (นาที)
1	1	200	10
2	4	240	10
3	2	200	20
4	5	240	20
5	3	200	30
6	6	240	30
7	9	280	30
8	8	280	20
9	12	320	30

ลำดับ	ลำดับการทดลอง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาคงอยู่ (นาที)
	แบบสุ่ม		
10	7	280	10
11	10	320	10
12	11	320	20

2. งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองโดยเลือกใช้วิธีการสุ่มลำดับการทดลองโดยมีการศึกษาของอัตราส่วนการผสมระหว่างถ่านทอรรีไฟต์และน้ำมันเตาที่ร้อยละ 95:5 90:10 และ 85:15 โดยน้ำหนักตามลำดับ และการอัดเม็ดเชื้อเพลิงที่ขนาดของมุมผายแผ่นเพลท 70° 90° และ 110° องศาตามลำดับ และการทดลองได้ทำการวิเคราะห์ผล 3 ซ้ำ รวมการทดลองทั้งหมด 27 การทดลอง และสรุปได้ดังแสดงตารางที่ 5 แสดงลำดับการทดลอง โดยเริ่มจากการผสมอัตราส่วน การอัดเม็ดเชื้อเพลิงที่มุมของรูผายแผ่นเพลทต่างขนาดกัน และสุดท้ายวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิง โดยต่อมาจะเป็นการเริ่มกระบวนการอัดเม็ดด้วยการนำเอาถ่านทอรรีไฟต์มาผสมกับน้ำมันเตาตามอัตราส่วนที่กำหนด และทำการเดินเครื่องให้ลูกกลิ้งหมุนทำงาน จากนั้นจะป้อนตัวอย่างที่เตรียมไว้สู่กระบวนการอัดเม็ด และได้เม็ดเชื้อเพลิงออกมา และนำเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาถึงสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิง คือ ปริมาณเถ้า ความทนทาน ความหนาแน่น ความหนาแน่นรวม ค่าการดูดความชื้น และค่าความร้อนสูง และรวมการทดลองของส่วนนี้ จาก 27 การทดลอง 6 สมบัติทางกายภาพ รวมทั้งหมดเป็น 162 การทดลอง แต่แต่ละการทดลองทำ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 486 การทดลอง

ตารางที่ 5 แผนการทดลองสมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (ถ่านทอรรีไฟต์จากแกลบ)

ลำดับการทดลอง	อัตราส่วนถ่านต่อน้ำมันเตา (น้ำหนัก)	มุมอัดแผ่นเพลท (องศา)
1	85:15	70
2	85:15	90
3	85:15	110
4	90:10	70
5	90:10	90
6	90:10	110
7	95:05	70
8	95:05	90
9	95:05	110

ลำดับการทดลอง	อัตราส่วนถ่านต่อน้ำมันเตา (น้ำหนัก)	มุมอัดแผ่นเพลท (องศามุม)
10	85:15	70
11	85:15	90
12	85:15	110
13	90:10	70
14	90:10	90
15	90:10	110
16	95:05	70
17	95:05	90
18	95:05	110
19	85:15	70
20	85:15	90
21	85:15	110
22	90:10	70
23	90:10	90
24	90:10	110
25	95:05	70
26	95:05	90
27	95:05	110

### 3.5 การวิเคราะห์ผลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

วิธีการและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นขั้นตอนในการหาสมบัติทางความร้อนของแกลบ และการอธิบายหลักการวิเคราะห์ที่ใช้เครื่องมือมาตรฐาน การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (Heating value analysis) ของชีวมวลแกลบ ดังต่อไปนี้

3.5.1 การวิเคราะห์โดยประมาณ (Proximate Analysis) เริ่มต้นด้วยการนำชีวมวลแกลบไปอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อหาน้ำหนักที่หายไป หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งแล้วไปเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที เพื่อคำนวณหาปริมาณของสารระเหย และหาปริมาณเถ้าด้วยวิธีการนำชีวมวลตัวอย่างมาเผาที่อุณหภูมิ 575 องศา



เซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [44] โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D3172 ในการหาปริมาณของความชื้น คาร์บอนคงที่ สารระเหย และเถ้า

3.5.1.1 สารระเหย โดยการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 872-82 โดยนำชีวมวลตัวอย่างหนัก 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องและเผาที่อุณหภูมิ  $950 \pm 20$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที น้ำหนักของ ชีวมวลตัวอย่างที่หายไป คือปริมาณความชื้นและสารระเหย ดังนั้นปริมาณสารระเหยคำนวณได้จาก ปริมาณของชีวมวลตัวอย่างที่หายไปลบด้วยปริมาณความชื้น

3.5.1.2 ความชื้น ปริมาณความชื้นวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 871-82 โดยนำชีวมวลตัวอย่างประมาณ 2 ถึง 3 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องแล้วอบในเตาอบที่อุณหภูมิ  $103 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักของชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 0.2 น้ำหนักของชีวมวล ตัวอย่างที่หายไปหลังอบคือปริมาณความชื้น

3.5.1.3 คาร์บอนคงที่ เป็นปริมาณคาร์บอนคงที่ ซึ่งจะทราบได้หลังจากรู้ปริมาณของความชื้น สารระเหย และเถ้า เพราะปริมาณคาร์บอนคงที่คำนวณจากปริมาณของชีวมวลตัวอย่าง เริ่มต้นลบด้วย ปริมาณของความชื้น สารระเหย และเถ้า

3.5.1.4 เถ้า คือ สารอนินทรีย์ในชีวมวล ซึ่งปริมาณเถ้าวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 1755-01 โดยนำชีวมวลไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $575 \pm 25$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำหนักที่เหลืออยู่คือปริมาณเถ้า

### 3.5.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

โดยวิธี ASTM D5291 เริ่มต้นด้วยการหาสัดส่วนของธาตุหลัก ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ เครื่องวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน รุ่น Micro-Tru Spec CHNS/O โดยหลักการทำงานของเครื่อง เครื่องจะเผาตัวอย่างในเตาเผาแบบขดลวดต้านทานในบรรยากาศออกซิเจน และหลังทำปฏิกิริยาการเผาไหม้จะได้ก๊าซ  $H_2O$   $CO_2$  และ  $NO_2$  ซึ่งก๊าซเหล่านี้จะถูกพาไปวัดหาปริมาณธาตุของแต่ละธาตุ โดย H C จะใช้แบบ Infrared Absorption Detector ส่วน N จะใช้ Thermal conductivity Detector ผลการวิเคราะห์จะออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน โดยการทำงานใช้เวลาในการวิเคราะห์ธาตุทั้งหมดในเวลา 4 นาที

### 3.5.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง

การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D240 โดยเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter รุ่น 1341 จากบริษัท Parr Instrument Company ดังภาพประกอบ 29 การวิเคราะห์เริ่มต้นจากชั่งน้ำหนักของชีวมวลตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยเผาไหม้แล้ววางลงในถ้วยบอมบ์พร้อมบรรจุออกซิเจน จากนั้นประกอบถ้วยบอมบ์เข้ากับเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์แล้วจุดระเบิดชีวมวลตัวอย่างด้วยเส้นลวดไฟฟ้า หลังการ

เผาไหม้จะเกิดความร้อนขึ้นภายในถ้วยบอมบ์และถ่ายเทความร้อนนี้ไปยังน้ำ 2 ลิตร ที่ถ้วยบอมบ์แช่อยู่ เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้สารมาตรฐานจะทราบค่าความร้อนของชีวมวลดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 14 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

#### 3.5.4 เครื่องทดสอบความทนทานเชื้อเพลิงอัดเม็ด

งานวิจัยนี้ได้สร้างกล่องสแตนเลสที่มีขนาด (300 X 300 X 125) มิลลิเมตร แสดงภาพประกอบ 15 และออกแบบให้ด้านในมีใบกวนที่มีการหมุนที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที เพื่อทำการทดสอบการแตกหักของเม็ดเชื้อเพลิง เริ่มต้นการทดลองด้วยการนำเม็ดเชื้อเพลิงหนักประมาณ 500 กรัม เทลงในกล่องสี่เหลี่ยม จากนั้นจะปิดกล่องแล้วทำการเปิดเครื่องทำงานและควบคุมการหมุนที่ 50 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 10 นาที ต่อจากนั้นจะนำตัวอย่างเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลออกมาทำการร่อนเพื่อแยกเศษผงที่แตกออกด้วยตะแกรงขนาด 3 มิลลิเมตร และนำมาชั่งน้ำหนักเพื่อคิดเป็นร้อยละน้ำหนักของเศษที่แตกออก และนำข้อมูลดังกล่าวมาเทียบกับมาตรฐานต่อไป



ภาพประกอบ 15 เครื่องทดสอบความทนทานเชื้อเพลิงอัดเม็ด

### 3.5.5 การทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิง

การทดลองหาค่าความหนาแน่นในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบภาชนะที่ใช้ในการทดลองให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 78 มิลลิเมตร ความสูง 60 มิลลิเมตร และภาชนะหนัก 21 กรัม แสดงภาพประกอบ 16 โดยมีวิธีการทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากแกลบ เริ่มโดยการนำภาชนะมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผลของภาชนะ จากนั้นใส่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลลงในภาชนะ โดยเทจากความสูง 150 มิลลิเมตร และทำการเคาะ 5 ครั้งจากความสูง 150 มิลลิเมตร เพิ่มเม็ดเชื้อเพลิงลงไป และถ้าเม็ดเชื้อเพลิงเกินจากขอบภาชนะให้เอาออก และนำชั่งน้ำหนักรวมของภาชนะ และเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล จากนั้นคำนวณค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิง



ภาพประกอบ 16 ภาชนะสำหรับการทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

### 3.5.6 การทดลองหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

การหาความหนาแน่นสามารถคำนวณได้จากสมการ 1 คือ การคำนวณหาค่าความหนาแน่นเม็ดชีวมวลโดยนำแท่งเชื้อเพลิงชีวมวลไปชั่งน้ำหนัก และหาค่าปริมาตร จากสมการที่ 1

สูตร ความหนาแน่น

$$\text{bulk density} = \frac{M(g)}{V(ml)} \times 1000 \left( \frac{kg}{m^3} \right) \quad (1)$$

เมื่อ	$\rho$	คือ ความหนาแน่น	(g/m <sup>3</sup> )
	m	คือ น้ำหนักของตัวอย่าง	(g)
	V	คือ ปริมาตรของตัวอย่าง	(m <sup>3</sup> )

สูตร ปริมาตรทรงกระบอก  $V = \pi r^2 \times h$

เมื่อ	V	คือ ปริมาตรของตัวอย่าง	(m <sup>3</sup> )
	r	คือ รัศมี	(mm)
	h	คือ สูง	(mm)

### 3.5.7 การทดลองอัตราการด้านการดูดคืนความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์ค่าการดูดคืนความชื้นของชีวมวลของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากแกลบ และเริ่มการทดลองโดยการหาค่าการดูดคืนความชื้นจากข้อกำหนดการทดลองใช้เวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 โดยการทดลองจะทำการชั่งน้ำหนักทุก 1 ชั่วโมง [12] และการทดลองนี้ได้เก็บข้อมูลทั้งหมด 3 ชั่วโมงต่อตัวอย่างการทดลองและได้ออกแบบแผนการทดลองโดยใช้วิธีการแบบสุ่มจากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของเม็ดเชื้อเพลิงเทียบกับชีวมวลแกลบที่อบแห้ง 105 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาการทดลอง 24 ชั่วโมง [37]

การทดลองค่าการดูดคืนความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิงการทดสอบ ด้วยวิธีการทดลองหาค่าการด้านการดูดคืนความชื้นของชีวมวลด้วยสมการ hygroscopicity reduction extent (HRE)

$$\text{HRE (\%)} = \left( 1 - \frac{\text{EMC}_{\text{Torrefild}}}{\text{EMC}_{\text{raw}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 สมบัติพื้นฐานของชีวมวล

การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของชีวมวลแกลบในเขตจังหวัดพิษณุโลก โดยแบ่งออกเป็น การวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ (Proximate Analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงที่ และเถ้า ส่วนการวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ค่าความร้อนสูง

จากการทดลองหาค่าองค์ประกอบของถ่านทอร์รีไฟต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลแกลบและได้ทำการเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ตารางที่ 6 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าพลังงานความร้อน

รายการ	ชีวมวลแกลบ (ตัวอย่าง)	แกลบ [45]	แกลบ [46]	แกลบ [47]	แกลบ [48]	แกลบ [49]
<b>วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis)</b>						
ความชื้น	10.6	9.0	11.7	-	7.70	6.44
สารระเหย	58.8	68.5	53.1	73.5	60.70	80.45
คาร์บอนคงที่	14.8	17.4	20.4	14.7	16.60	8.60
เถ้า	10.2	14.1	14.8	11.8	15.00	10.95
<b>วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)</b>						
คาร์บอน	38.9	43.10	36.74	40.8	38.50	44.04
ไฮโดรเจน	5.5	4.90	5.51	5.7	5.70	6.55
ไนโตรเจน	0.33	0.50	0.28	1.2	0.60	43.94
ออกซิเจน	36.5	37.30	42.55	40.5	0.30	0.24
ซัลเฟอร์	0.8	0.41	0.55	0.75	32.20	-
<b>ค่าพลังงานความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)</b>						
ค่าความร้อนสูง	15.65	15.24	15.70	16.2	16.00	17.41
ค่าความร้อนต่ำ	14.15	13.97	-	-	-	-

#### 4.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านทอรรีไฟต์จากกระบวนการทอรรีแฟกซ์ (Proximate Analysis and Ultimate analysis)

ผลที่ได้แสดงการวิเคราะห์ (Proximate Analysis and Ultimate analysis) ตารางที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์หาค่าประมาณ (Proximate Analysis) ถ่านทอรรีไฟต์จากการทดลองที่ระยะเวลาคงอยู่ 10 20 และ 30 นาที จากการทดลองช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิมีผลต่อสารระเหยในถ่านทอรรีไฟต์ โดยการทดลองของระยะเวลาคงอยู่ 10 นาที ทราบว่ามีปริมาณของสารระเหยลดลงจากร้อยละ 57.4 เป็น 38.6 โดยน้ำหนัก ส่วนการทดลองระยะเวลาคงอยู่ 20 นาที ทราบว่ามีปริมาณของสารระเหยลดลงจากร้อยละ 55.1 เป็น 36.1 โดยน้ำหนัก และสุดท้ายการทดลองระยะเวลาคงอยู่ 30 นาที ค่าปริมาณของสารระเหยลดลงจากร้อยละ 53.5 เป็น 32.5 โดยน้ำหนัก คาร์บอนคงที่ การทดลองของระยะเวลาคงอยู่ 10 นาที ทราบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 16.6 เป็น 30.3 โดยน้ำหนัก ส่วนการทดลองของระยะเวลาคงอยู่ 20 นาที ทราบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 19.3 เป็น 31.3 โดยน้ำหนัก และสุดท้ายการทดลองระยะเวลาคงอยู่ 30 นาที ทราบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 20.7 เป็น 34.2 โดยน้ำหนัก ปริมาณของเถ้าของถ่านทอรรีไฟต์ โดยการทดลองของระยะเวลาคงอยู่ 10 นาที ทราบว่าเพิ่มจากร้อยละ 11.8 เป็น 13.1 ส่วนการทดลองของระยะเวลาคงอยู่ 20 นาที ทราบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.0 เป็น 13.5 โดยน้ำหนัก และสุดท้ายการทดลองระยะเวลาคงอยู่ 30 นาที ทราบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 13.0 เป็น 14.1 โดยน้ำหนัก และจากการทดลองหาค่าองค์ประกอบของถ่านทอรรีไฟต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลแกลบ ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านทอรรีไฟต์ด้วยกระบวนการ (Proximate Analysis and Ultimate analysis)

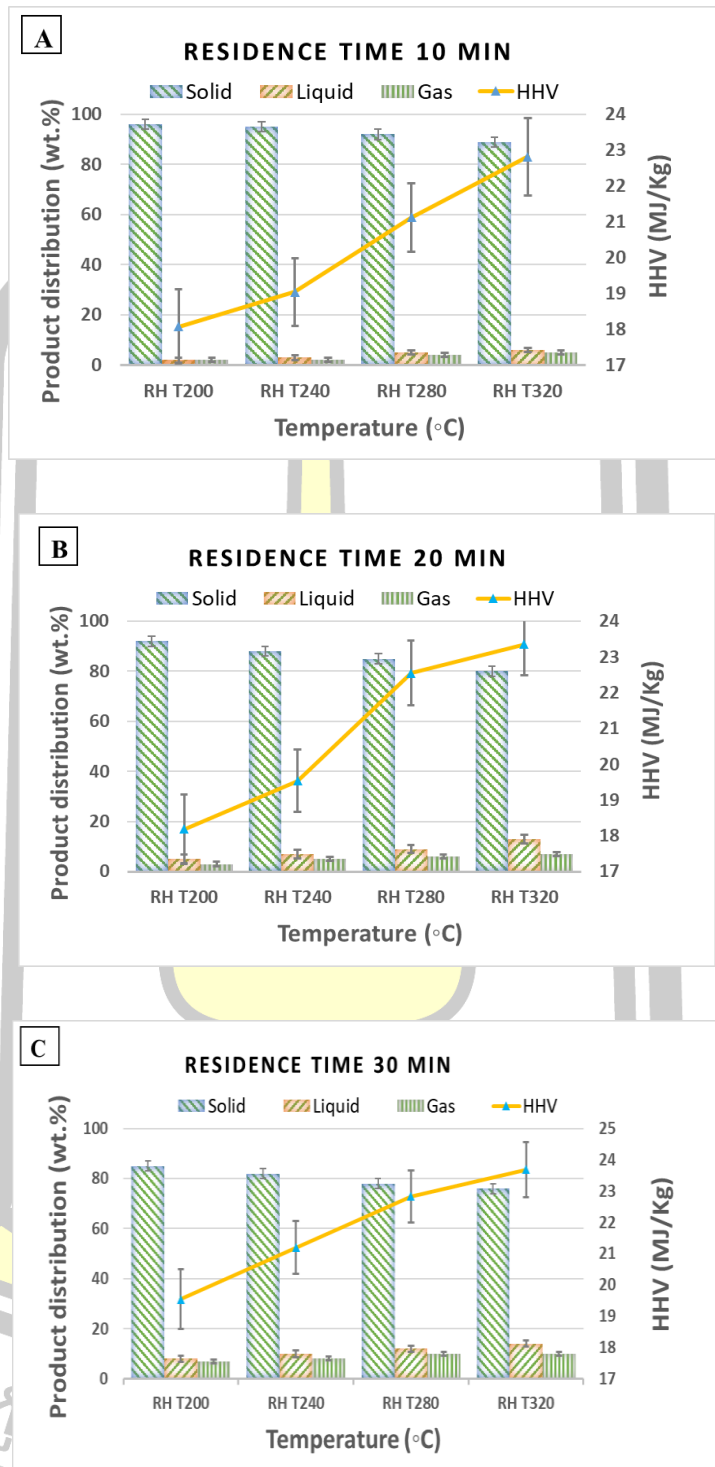
ตัวอย่างการทดลอง	การวิเคราะห์หาค่าประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, แห้ง)			การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, แห้ง)			
	สารระเหย	คาร์บอนคงที่	เถ้า	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
ระยะเวลาคงอยู่ 10 นาที							
แกลบตัวอย่าง	58.8	14.8	10.2	38.9	5.4	0.33	36.5
แกลบ T200	57.4	16.6	10.8	45.6	5.3	0.30	35.3
แกลบ T240	52.9	19.8	11.2	50.2	5.0	0.31	33.8
แกลบ T280	48.2	23.3	12.2	53.8	5.0	0.30	29.1
แกลบ T320	38.6	30.3	12.8	59.7	4.8	0.29	22.5

ตัวอย่างการทดลอง	การวิเคราะห์หาค่าประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, แห่ง)			การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, แห่ง)			
	สารระเหย	คาร์บอนคงที่	เถ้า	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
<b>ระยะเวลาคงอยู่ 20 นาที</b>							
แกลบ T200	55.1	19.3	12.0	48.2	5.1	0.31	34.6
แกลบ T240	48.3	23.5	12.5	52.2	4.9	0.30	31.4
แกลบ T280	45.2	27.1	13.1	59.5	4.9	0.30	28.4
แกลบ T320	36.1	31.3	13.5	60.8	4.5	0.30	21.7
<b>ระยะเวลาคงอยู่ 30 นาที</b>							
แกลบ T200	53.5	20.7	13.0	49.2	5.0	0.30	34.1
แกลบ T240	47.6	24.4	13.5	55.5	5.0	0.30	30.2
แกลบ T280	41.2	28.6	13.8	60.1	4.9	0.30	26.0
แกลบ T320	32.5	34.2	14.0	63.4	4.3	0.29	20.5

จากตารางที่ 7 แสดงค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านทอรรีไฟต์ ที่การทดลองช่วงอุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ระยะเวลาคงอยู่ของชีวมวลที่ 30 นาที ทราบว่าปริมาณของคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 49.2 เป็น 63.4 แต่ปริมาณของออกซิเจนกลับลดลงจากร้อยละ 34.1 เป็น 20.5 ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองที่ผ่านมา [19] เพราะเกิดกระบวนการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส ส่วนผลกระทบที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนจากกระบวนการทอรรีแฟกชัน [20] ที่มีช่วงอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้มีการลดลงประมาณร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนัก

#### 4.3 การวิเคราะห์ผลค่าความร้อนของถ่านทอรรีไฟต์

จากภาพประกอบ 17 ผลการทดลองแสดง (A B และ C) ของถ่านทอรรีไฟต์จากกระบวนการทอรรีแฟกชันชีวมวลแกลบ โดยอาศัยการหมุนวนแก๊สในระบบปิด ที่ช่วงอุณหภูมิทดลอง 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส และระยะเวลาคงอยู่ของชีวมวลแกลบในเตาปฏิกรณ์คือ 10 20 และ 30 นาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ช่วงอุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟต์ที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเพราะจากการย่อยสลาย และเกิดการระเหยของสารประกอบในเนื้อชีวมวลแกลบ จึงทำให้น้ำหนักของถ่านหายไป แต่ในทางกลับกันจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความร้อนสูงที่ได้ของถ่านทอรรีไฟต์ที่สูงขึ้น ซึ่งเกิดจากปริมาณคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น และไฮโดรเจนบางส่วนในชีวมวลแกลบถูกเผาไหม้ในระหว่างการทอรรีแฟกชัน



ภาพประกอบ 17 ปริมาณผลได้และค่าความร้อนของถ่านทอรรีไฟต์จากกระบวนการทอรรีแฟกซ์

การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของแกลบจากกระบวนการทอรรีแฟกซ์ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส และระยะเวลาคงอยู่ 30 นาที โดยการกำจัดออกซิเจนจาก 34.1 เป็น 20.5 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าความร้อนเดิมของชีวมวลแกลบตัวอย่างที่เพิ่มจาก 15.65 เป็น 22.69 MJ/Kg ที่แสดงในภาพประกอบ 17 (C) และการทดลองผ่านกระบวนการทอรรีแฟกซ์ เพื่อหา



ค่าพลังงานความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์ และทราบว่ากระบวนการทอร์รีแฟกชันที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ 30 นาที ผลของค่าความร้อนอยู่ช่วงประมาณ 23.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งได้ค่าพลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นจากแกลบตัวอย่างถึง 7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันเตาได้ประมาณ 24.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้ได้นำเสนอค่าที่ดีที่สุดของการทดลอง [50] ดังนั้นจึงเลือกใช้ช่วงอุณหภูมิของการทดลองที่ 320 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาคงอยู่ของชีวมวลแกลบเป็น 30 นาที และใช้เป็นตัวเลือกในวัตถุประสงค์แรกของ การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของแกลบต่อไป

ตารางที่ 8 แสดงสมบัติทางความร้อนของถ่านทอร์รีไฟต์ น้ำมันเตา และปริมาณผลได้จากกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบเบตนิ่ง โดยการทดลองทราบว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่ค่าความร้อนของการทดลองเวลาคงอยู่ที่ 10 20 และ 30 นาที มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย เนื่องจากเวลาคงอยู่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของชีวมวลใช้เวลาสั้นก็จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนได้เพราะระยะการระเหยของน้ำที่อยู่ในชีวมวลตัวอย่างออกน้อยด้วยเช่นกัน [26] ส่วนเวลาคงอยู่ 10 นาที ที่ 240 องศาเซลเซียส จากการทดลองทราบว่าได้ค่าความร้อนเพิ่มอีกประมาณ 1.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลต่อการไล่ความชื้นและสารระเหยในเนื้อชีวมวลได้ [5] แต่ในขณะเดียวกันนั้นถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีกก็อาจส่งผลต่อค่าความร้อนที่จะได้เนื่องจากชนิดของชีวมวลดังผลการทดลองที่อุณหภูมิ 280 และ 320 องศาเซลเซียส สามารถอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นก็ไม่ได้แสดงว่าจะปรับปรุงสมบัติทางความร้อนให้สูงได้



ตารางที่ 8 แสดงสมบัติทางความร้อนของถ่านทอรรีไฟต์ น้ำมันเตา และปริมาณผลได้จากกระบวนการทอรรีไฟต์แบบเบตนิง

ลำดับ การทดลอง แบบสุ่ม	ลำดับ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาคงอยู่ (นาที)	ค่าความร้อน ถ่านทอรรีไฟต์ (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	ค่าความร้อน น้ำมันเตา (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	ปริมาณผลได้	
						ของแข็ง	ของเหลว แก๊ส
11	1	200	10	18.079±1.02	19.553±0.82	96	2
7	2	200	20	18.189±0.96	20.356±1.12	92	5
9	3	200	30	19.539±0.94	20.510±0.95	85	8
8	4	240	10	19.039±0.93	20.121±1.22	95	3
10	5	240	20	19.538±0.86	20.552±1.52	88	7
6	6	240	30	21.197±0.84	20.697±1.12	82	10
1	7	280	10	21.119±0.95	20.951±1.35	92	5
3	8	280	20	22.551±0.90	21.605±0.92	85	9
5	9	280	30	22.828±0.82	22.365±1.21	78	12
2	10	320	10	22.813±1.08	22.955±0.92	89	6
4	11	320	20	23.360±0.86	23.015±0.85	80	13
12	12	320	30	23.693±0.87	24.325±1.01	76	14
	13	-	-	15.65	-	-	-

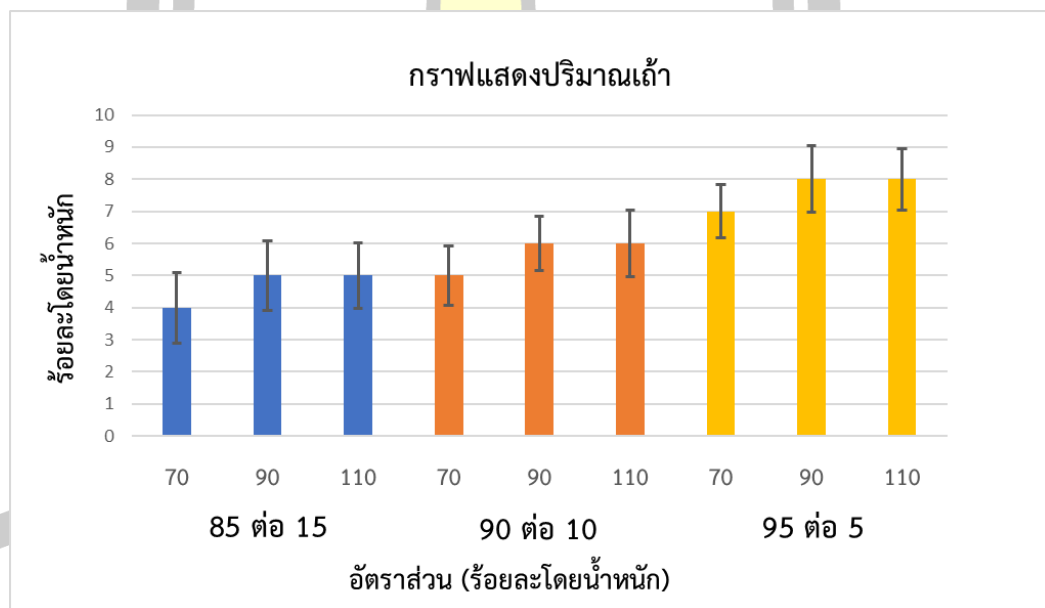
ตารางที่ 9 แผนการทดลองสมบัติน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล (ถ่านทอรรพีฟต์จากแกลบ)

ลำดับทดลอง	ลำดับ	อัตราส่วน (น้ำหนัก)	มอดุลแผ่นเพลท (องศา)	สมบัติน้ำหนักของเม็ดเชื้อเพลิง				ค่าความร้อนสูง		
				ปริมาณเถ้า	ความหนาแน่นรวม	ความหนาแน่น (กลักริมต่อลูกบาศก์เมตร)	ด้าน การดูดความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
1	1	85:15	70	4±1.10	92.42±0.55	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1056.85±32	614.33±23	0.656±0.25	(เมกะจูลต่อกลักริม)
8	2	85:15	90	5±1.08	93.82±0.62	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1078.87±51	634.81±38	0.592±0.19	22.95±0.65
3	3	85:15	110	5±1.03	95.68±0.45	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1093.39±26	655.29±56	0.613±0.20	22.87±0.35
9	4	90:10	70	5±0.92	97.26±1.15	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1096.95±62	651.19±61	0.685±0.45	21.81±0.72
6	5	90:10	90	6±0.86	97.45±1.28	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1108.73±54	675.75±82	0.651±0.58	21.57±0.51
7	6	90:10	110	6±1.05	97.93±1.21	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1014.12±73	688.05±34	0.668±0.36	21.77±0.68
5	7	95:05	70	7±0.82	95.67±1.05	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1090.75±42	573.37±65	0.801±0.15	21.13±0.37
2	8	95:05	90	8±1.03	96.33±0.95	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1005.82±84	593.85±35	0.758±0.26	21.29±0.22
4	9	95:05	110	8±0.95	96.93±1.10	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1026.41±78	618.43±51	0.772±0.18	21.11±0.39

#### 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเม็ดเชื้อเพลิงที่ผ่านการอัดเม็ด

##### 4.4.1 ปริมาณเถ้า

ผลการวิเคราะห์ของปริมาณเถ้าของเม็ดเชื้อเพลิงด้วยวิธีการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 1755-01 โดยนำเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดเม็ดที่อัตราส่วนการทดลองของถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน และทำการเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ  $575 \pm 25$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อศึกษาปริมาณเถ้าจากการเผาไหม้ ซึ่งทราบว่าสามารถลดปริมาณของเถ้าของเม็ดเชื้อเพลิงที่มุ่งหมาย 70 90 และ 110 องศาเซลเซียส และจากการทดลองทราบว่าที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 โดยน้ำหนัก หลังการทดลองมีปริมาณเถ้าที่ร้อยละ 4 ถึง 5 ต่อมาที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 90:10 โดยน้ำหนัก หลังการทดลองมีปริมาณเถ้าที่ร้อยละ 5 ถึง 6 และการทดลองสุดท้ายที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 95:5 โดยน้ำหนัก หลังการทดลองมีปริมาณเถ้าที่ร้อยละ 7 ถึง 8 ซึ่งการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าปริมาณของน้ำมันเตามีผลต่อการเผาไหม้ได้ดีกว่าการเผาแค่ถ่านทอร์รีไฟต์ แสดงภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 การแสดงปริมาณเถ้าของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดเม็ดที่อัตราส่วนการทดลองของถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน

จากข้อมูลเบื้องต้นเมื่อเทียบกับถ่านทอร์รีไฟต์ที่ได้จากการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส ทราบว่าปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 11 ถึง 15 โดยน้ำหนัก และจากวัตถุประสงค์ที่ 2 คือการใช้ไขมันเตาทดลองใช้เป็นตัวประสานการอัดเม็ดเชื้อเพลิง และทราบว่ามียผลต่อการเผาไหม้ที่ดีและลดปริมาณของเถ้าหลังการเผาไหม้ได้สูงถึงร้อยละ 10 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ จึงทำให้หลังการเผาไหม้และเถ้าที่น้อยกว่าถ่านทอร์รีไฟต์

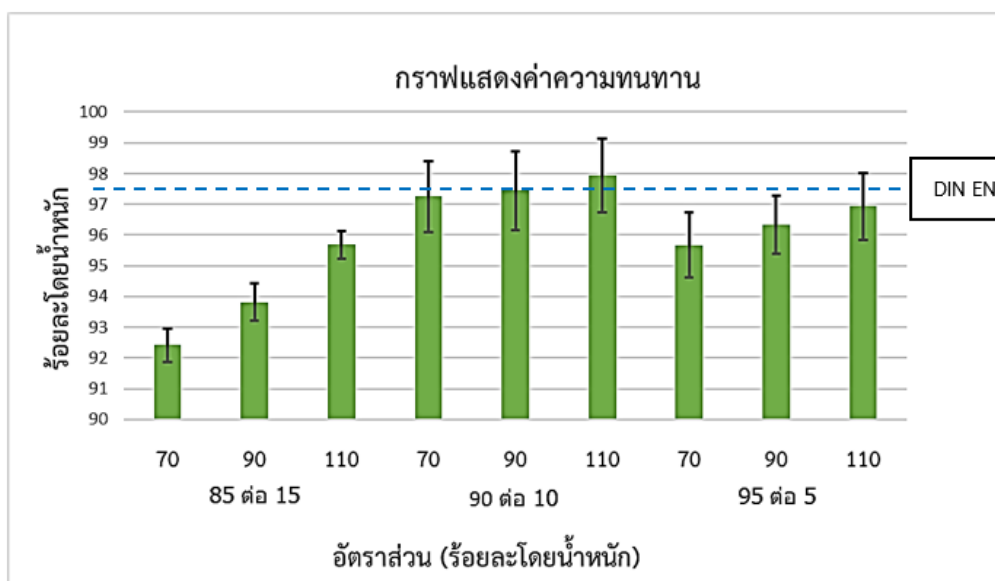
ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบปริมาณเถ้าของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการอัดเม็ดที่อัตราส่วนการทดลองของถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน

	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	44448	2	22224	220.221	$3.63 \times 10^{-16}$	3.402826105
Within Groups	2422	24	100.916			
Total	46870	26				

จากตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบความแตกต่างปริมาณเถ้าของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ถูกจำแนกตามระดับอัตราส่วนผสมของถ่านทอร์รีไฟต์และมูอัดของแผนเพลท และกำหนดค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 จึงได้ทดสอบความแตกต่างเป็นรายคู่พบว่า ค่า F คือ 220.221 และค่า p-value คือ  $3.63 \times 10^{-16}$  (น้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด) ซึ่งสรุปได้ว่าการแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มที่กำหนดในการวิเคราะห์นี้

#### 4.4.2 ความทนทาน

ผลการวิเคราะห์ค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:5 ตามลำดับอัตราส่วน ดังภาพประกอบ 19 แสดงผลการทดสอบความทนทานเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วน 85:15 โดยน้ำหนัก และอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงโดยแผนเพลทที่มีมูอัด ร้อยละ 70 90 และ 110 องศา พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความทนทานคือ 92.42 93.82 และ 95.68 ร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดไว้ที่ร้อยละ 97.5 และต่อมาเป็นการทดลองที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 90:10 พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความทนทานคือ 97.26 97.45 และ 97.93 ร้อยละโดยน้ำหนัก และการทดลองที่อัตราส่วนนี้ที่มีมูอัด 110 องศา ซึ่งสามารถสร้างความทนทานให้เม็ดเชื้อเพลิงผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ และสุดท้ายการทดลองที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตาที่ร้อยละ 95:5 พบว่าเม็ดเชื้อเพลิงมีความทนทานคือ 95.67 96.33 และ 96.93 ร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย



ภาพประกอบ 19 ค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน

จากการทดลองความทนทานเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:5 ร้อยละโดยน้ำหนักตามลำดับ ที่มอดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงโดยแผ่นเพลทที่มีมุมผายรูอัด 70 90 และ 110 องศา ทราบว่าเม็ดเชื้อเพลิงส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อย และค่าที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คือ การทดลองอัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตาที่ 90 ต่อ 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก และเป็นไปตามมาตรฐานคือค่าความทนทานสูงถึงร้อยละ 97.93 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ดีที่สุดของการทดลองนี้

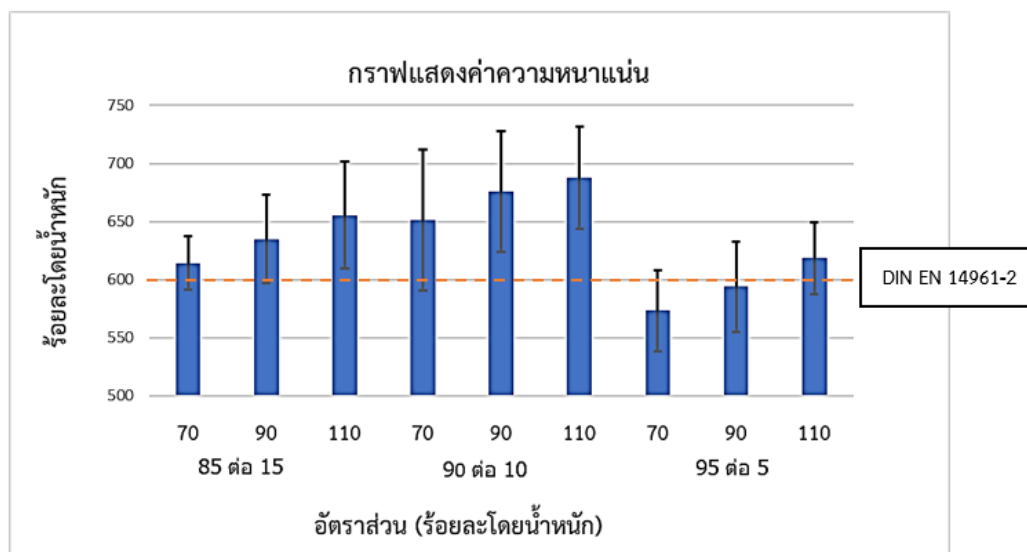
ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบปริมาณค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	45513.16291	2	22756.58145	242.946727	3.03164E-15	3.466800112
Within Groups	1967.049388	21	93.66901845			
Total	47480.2123	23				

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบค่าความทนทานของเม็ดเชื้อเพลิงถูกจำแนกตามระดับอัตราส่วนผสมของถ่านทอร์รีไฟต์และมอดของแผ่นเพลท และกำหนดค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 จึงได้ทดสอบความแตกต่างเป็นรายคู่ พบว่า ค่า F คือ 242.946727 และค่า p-value คือ  $3.03164 \times 10^{-15}$  (น้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด) ซึ่งสรุปได้ว่าการแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มที่กำหนดในการวิเคราะห์นี้

#### 4.4.3 ความหนาแน่น

จากภาพประกอบ 20 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่ได้จากการทดลองหาค่าความหนาแน่นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากถ่านทอร์รีไฟต์และตัวประสานน้ำมันเตาที่อัตราส่วน 85 ต่อ 15 90 ต่อ 10 และ 95 ต่อ 5 ตามลำดับอัตราส่วน และทดลองอัดเม็ดเชื้อเพลิงที่มีมุมผาย 70 90 และ 110 องศา ทราบว่าทุกการทดลองผ่านมาตรฐาน 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คือ 85 ต่อ 15 ที่มีมอดอัด 110 องศา สามารถทำให้ได้ค่าความทนทานสูงถึง 688.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงผลการทดสอบความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบปริมาณค่าความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ที่อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟต์ และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1774941.504	2	887470.752	1534.405712	4.76753E-26	3.402826105
Within Groups	13881.1384	24	578.3807667			
Total	1788822.642	26				

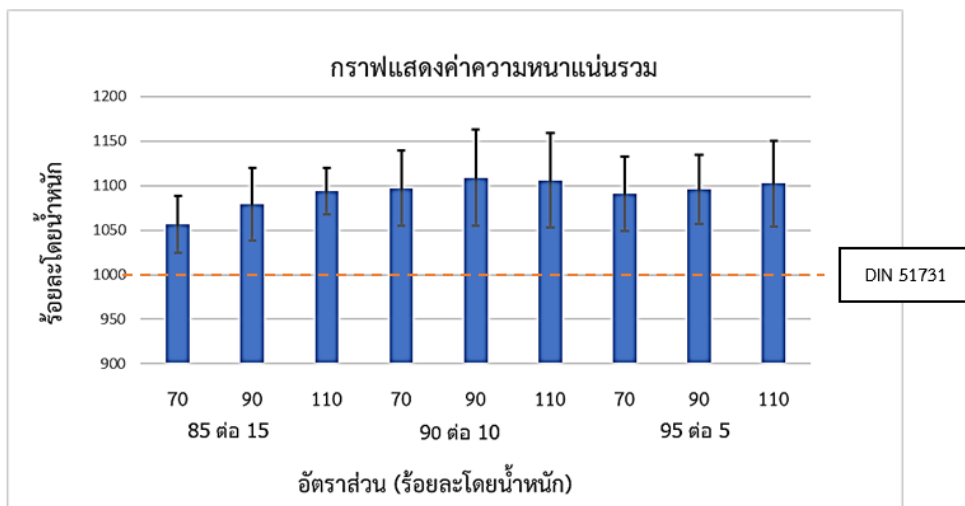
ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ถูกจำแนกตามระดับอัตราส่วนผสมของถ่านทอรรีไฟต์และมุมอัดของแผ่นเพลท และกำหนดค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 จึงได้ทดสอบความแตกต่างเป็นรายคู่ พบว่า ค่า F คือ 1534.405712 และค่า p-value คือ  $4.76753 \times 10^{-26}$  (น้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด) ซึ่งสรุปได้ว่าการแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มที่กำหนดในการวิเคราะห์นี้

#### 4.4.4 ความหนาแน่นรวม

จากการทดลองหาค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากถ่านทอรรีไฟต์และตัวประสานน้ำมันเตาที่อัตราส่วน 85 ต่อ 15 90 ต่อ 10 และ 95 ต่อ 5 ตามลำดับอัตราส่วน และทดลองอัดเม็ดเชื้อเพลิงที่มุมฝาย 70 90 และ 110 องศา จากนั้นนำเม็ดเชื้อเพลิงมาทำการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นด้วยภาชนะที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 78 มิลลิเมตร ความสูง 60 มิลลิเมตร และน้ำหนักของกระบอก 21 กรัม เพื่อทำการทดสอบความหนาแน่นรวมของเม็ดชีวมวล โดยนำภาชนะมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผลของภาชนะ จากนั้นใส่เม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลลงในภาชนะโดยเทจากความสูง

ประมาณ 150 มิลลิเมตร หรือเพิ่มเม็ดเชื้อเพลิงลงไป ถ้าเกินจากขอบภาชนะให้เอาออกมาชั่งน้ำหนัก รวมของภาชนะและเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล จากนั้นคำนวณค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิง

ภาพประกอบ 21 แสดงผลการทดลองที่ทำการทดลองผ่านมาตรฐาน DIN 51731 คือค่าความหนาแน่นรวมต้องได้มากกว่า 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการทดลองนี้ทุกอัตราส่วนผ่านตามาตราฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันเตาที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันนั้นมีผลต่อค่าความหนาแน่น และค่าความหนาแน่นรวม



ภาพประกอบ 21 กราฟแสดงค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล

ตารางที่ 13 การเปรียบเทียบปริมาณค่าความหนาแน่นรวมของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ที่อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน

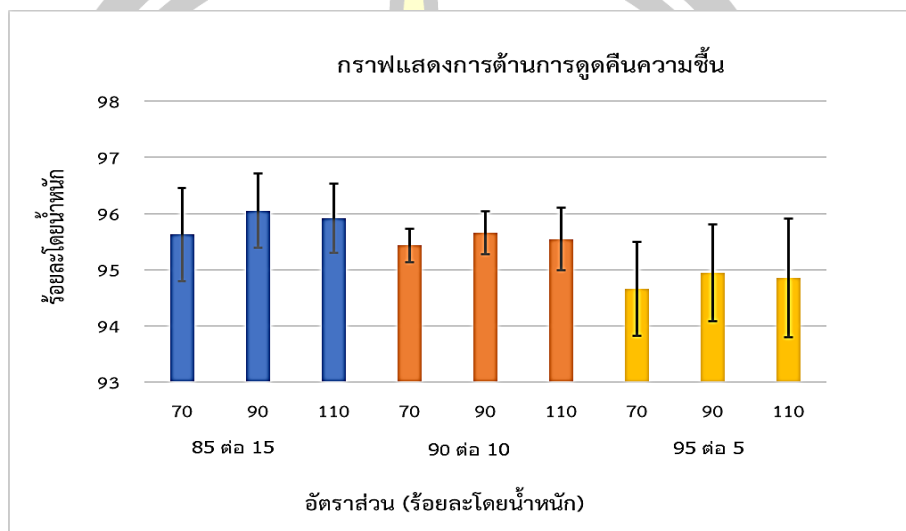
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	5549610.827	2	2774805.413	4124.912547	5.61099E-28	3.466800112
Within Groups	14126.5816	21	672.6943619			
Total	5563737.408	23				

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ถูกจำแนกตามระดับอัตราส่วนผสมของถ่านทอรรีไฟต์และมูมอัดของแผนเพลท และกำหนดค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 จึงได้ทดสอบความแตกต่างเป็นรายคู่ พบว่า ค่า F คือ 4124.912547 และค่า p-value คือ  $5.61099 \times 10^{-28}$  (น้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด) ซึ่งสรุปได้ว่าการแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มที่กำหนดในการวิเคราะห์นี้

#### 4.4.5 การดำเนินการดูดคืนความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล



ภาพประกอบ 22 ผลการทดลองค่าการดูดคืนความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิงการทดสอบ Equilibrium moisture content (EMC) ตัวอย่างบล็อกร้างถูกวางไว้ในห้องที่มีความชื้น 25 องศาเซลเซียส ที่มีความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 55 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [37] และเพื่อทำการทดลองหาค่าการต้านการดูดคืนความชื้นของชีวมวลด้วยสมการ hygroscopicity reduction extent (HRE) กำหนดไว้ในสมการที่ 2



ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงค่าการต้านการดูดคืนความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิง

จากภาพประกอบ 22 อัตราส่วนผสมถ่านทอรรีไฟต์และน้ำมันเตาที่ 85 ต่อ 15 ร้อยละโดยน้ำหนัก และทดลองอัดเม็ดที่มุมฝาย 70 90 และ 110 องศา ทราบว่ามีการต้านทานการดูดคืนความชื้นที่ร้อยละ 96 ที่การทดลองอัดมุมฝาย 90 องศา จากนั้นได้เปลี่ยนอัตราส่วนถ่านทอรรีไฟต์และน้ำมันเตาเป็น 90 ต่อ 10 ร้อยละโดยน้ำหนัก ทราบว่ามีการต้านทานการดูดคืนความชื้นที่ร้อยละ 95.5 โดยน้ำหนัก และการทดลองสุดท้ายใช้อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟต์และน้ำมันเตาที่ 95 ต่อ 5 ร้อยละโดยน้ำหนัก ทราบว่าค่าการต้านทานการดูดคืนความชื้นที่ร้อยละ 95

จากการทดลองครั้งนี้ทราบว่า การใช้ น้ำมันเตาที่ได้จากระบวนการทอรรีไฟต์แพกซ์ขึ้น เพื่อเป็นตัวประสานในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากถ่านทอรรีไฟต์สามารถต้านการดูดคืนความชื้นได้ดี และที่อัตราของน้ำมันเตามากก็จะต้านการดูดคืนความชื้นได้ดีตามลำดับ ตารางที่ 14 การเปรียบเทียบปริมาณค่าการต้านการดูดคืนความชื้นของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	47859.32373	2	23929.66187	225.2166052	2.80824E-16	3.402826105
Within Groups	2550.042366	24	106.2517653			

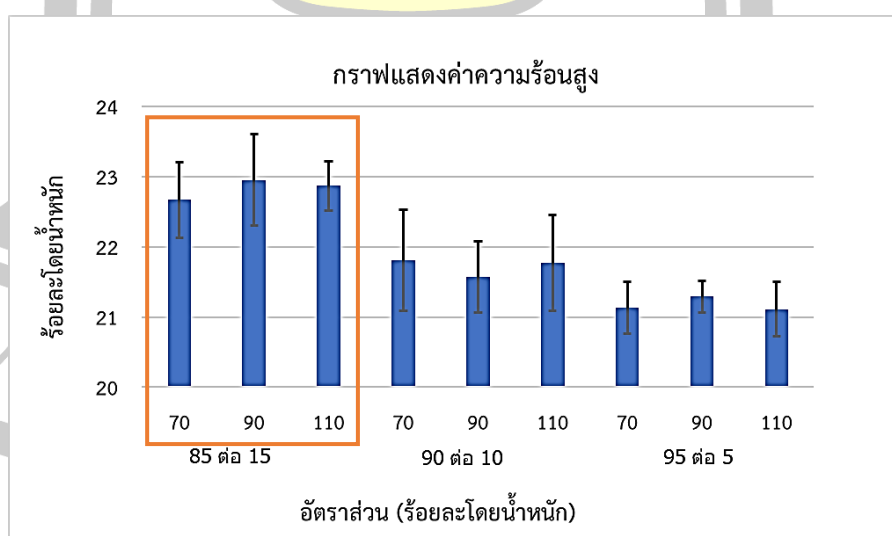
ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ถูกจำแนกตามระดับอัตราส่วนผสมของถ่านทอรรีไฟด์และมูมอัดของแผ่นเพลท และกำหนดค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 จึงได้ทดสอบความแตกต่างเป็นรายคู่ พบว่า ค่า F คือ 225.2166052 และค่า p-value คือ  $2.80824 \times 10^{-16}$  (น้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด) ซึ่งสรุปได้ว่าการแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มที่กำหนดในการวิเคราะห์นี้

#### 4.4.6 ค่าความร้อนสูง

ภาพประกอบ 23 แสดงผลจากการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างถ่านทอรรีไฟด์และตัวประสานใช้น้ำมันเตา ซึ่งมีผลต่อค่าความร้อนสูงของเม็ดเชื้อเพลิง จากข้อมูลที่อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟด์ร้อยละ 85 ต่อตัวประสานน้ำมันเตาร้อยละ 15 และการทดลองมูมอัดของแผ่นเพลทที่ 70 90 และ 110 ทราบว่าค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ที่ 22.67 22.95 และ 22.87 เมกะจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ

การทดลองที่อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟด์ร้อยละ 90 ต่อตัวประสานน้ำมันเตาร้อยละ 10 และการทดลองมูมอัดของแผ่นเพลทที่ 70 90 และ 110 ทราบว่าค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ที่ 21.57 21.77 และ 21.81 เมกะจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ

การทดลองที่อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟด์ร้อยละ 95 ต่อตัวประสานน้ำมันเตาร้อยละ 5 และการทดลองมูมอัดของแผ่นเพลทที่ 70 90 และ 110 ทราบว่าค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ที่ 21.13 21.29 และ 21.11 เมกะจูลต่อกิโลกรัมตามลำดับ



ภาพประกอบ 23 กราฟค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงของถ่านทอรรีไฟด์และตัวประสานน้ำมันเตา จากการทดลองเพื่อหาค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนและมูมอัดต่างกันทราบว่าค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 21 ถึง 23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเทียบกับค่าความร้อน

ของถ่านทอรรีไฟต์ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 18 ถึง 22 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าเป็นไปในทางเดียวกัน แต่งานวิจัยนี้เป็นการอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งสะดวกต่อการจัดเก็บและการขนส่งและค่าความร้อนที่สม่ำเสมอ หรือสามารถใช้งานร่วมกับถ่านหิน หรือใช้ในโรงไฟฟ้าชีวมวลได้

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบปริมาณค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิง ที่อัตราส่วนถ่านทอรรีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:05 ตามลำดับอัตราส่วน

Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	27819.30436	2	13909.65218	130.6909813	1.25146E-13	3.402826105
Within Groups	2554.358756	24	106.4316148			
Total	30373.66312	26				

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวล ถูกจำแนกตามระดับอัตราส่วนผสมของถ่านทอรรีไฟต์และมูมอัดของแผนเพลท และกำหนดค่าความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05 จึงได้ทดสอบความแตกต่างเป็นรายคู่ พบว่า ค่า F คือ 130.6909813 และค่า p-value คือ  $1.25146 \times 10^{-13}$  (น้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด) ซึ่งสรุปได้ว่าการแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มที่กำหนดในการวิเคราะห์นี้



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วนตามวัตถุประสงค์ คือ 1. การปรับปรุงสมบัติความร้อนของชีวมวลแกลบด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ในเตาปฏิกรณ์เบตนิ่ง และได้ผลิตภัณฑ์เรียกว่า “ถ่านทอรรีไฟต์” เพื่อหาช่วงอุณหภูมิและระยะเวลาคงอยู่ของกระบวนการที่เหมาะสม และมีผลต่อค่าความร้อน ปริมาณผลได้ ของถ่านทอรรีไฟต์และน้ำมันเตา ต่อมาในส่วนที่ 2 เป็นการเลือกผลการทดลองที่ได้จากวัตถุประสงค์ที่ 1 เพื่อนำมาทำอัดเม็ดเชื้อเพลิง และหาสมบัติทางกายภาพได้แก่ ค่าความร้อน ค่าการดูดคืนความชื้น ปริมาณเถ้า ค่าความทนทาน ค่าความหนาแน่นและค่าความหนาแน่นรวม ต่อไป

5.1.1 การศึกษาสมบัติทางความร้อนของชีวมวลแกลบด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์ตามวัตถุประสงค์ที่ 1 โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งและใช้แก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้หมุนวนในระบบแทนไนโตรเจน และสามารถปรับปรุงชีวมวลแกลบให้เป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งที่เรียกว่า “ถ่านทอรรีไฟต์” โดยที่ขั้นตอนการทดลอง ได้แก่ ศึกษาหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงค่าความร้อน ศึกษาปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟต์ วิเคราะห์ค่าประมาณและปริมาณธาตุ

##### 5.1.1.1 ศึกษาหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงค่าความร้อน

สมบัติทางความร้อนของถ่านทอรรีไฟต์ และน้ำมันเตา และปริมาณผลได้จากกระบวนการทอรรีแฟกซ์แบบเบตนิ่ง โดยการทดลองทราบว่าที่อุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส ที่ค่าความร้อนของการทดลองเวลาคงอยู่ที่ 10 20 และ 30 นาที ซึ่งได้ผลการทดลองอยู่ในช่วง 18 ถึง 23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และทราบว่าเวลาคงอยู่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนของชีวมวลใช้เวลาอย่างน้อยก็จะส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนได้เพราะระยะเวลาการระเหยของน้ำที่อยู่ในชีวมวลตัวอย่างออกน้อยด้วยเช่นกัน ด้วยการที่เพิ่มอุณหภูมิแสดงให้เห็นว่ามีผลต่อการไล่ความชื้นและสารระเหยในเนื้อชีวมวลได้ แต่ในขณะเดียวกันนั้นถ้าเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นอีกก็อาจส่งผลต่อค่าความร้อนที่จะได้เนื่องจากชนิดของชีวมวล เพราะว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปไม่ได้แสดงว่าจะปรับปรุงสมบัติทางความร้อนให้สูงได้

##### 5.1.1.2 วิเคราะห์ค่าประมาณและวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

**การวิเคราะห์หาค่าประมาณ (Proximate Analysis)** ถ่านทอรรีไฟต์จากการทดลองที่ระยะเวลาคงอยู่ 10 20 และ 30 นาที จากการทดลองช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงช่วงอุณหภูมิมีผลต่อสารระเหยในถ่านทอรรีไฟต์ ทราบว่ามีปริมาณของสารระเหยลดลงจากร้อยละ 57.4 เป็น 32.5 โดยน้ำหนัก ปริมาณของคาร์บอนคงที่ ทราบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นจากร้อย

ละ 16.6 เป็น 34.2 โดยน้ำหนัก และปริมาณเถ้าที่ได้หลังการเผาไหม้ทราบว่าจะอยู่ในช่วงร้อยละ 11 ถึง 15 โดยน้ำหนัก จากการทดลองหาค่าองค์ประกอบของถ่านทอร์รีไฟต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลต่อการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวลแกลบ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการผลิตถ่านทอร์รีไฟต์

**ค่าการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)** ของถ่านทอร์รีไฟต์ ที่การทดลองช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส ระยะเวลาคงอยู่ของชีวมวลที่ 10 20 และ 30 นาที ทราบว่าปริมาณของคาร์บอนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 45.6 เป็น 63.4 แต่ปริมาณของออกซิเจนกลับลดลงจากร้อยละ 35.3 เป็น 20.5 และไฮโดรเจนลดลงจากร้อยละ 5.3 เป็น 4.3 ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลองที่ผ่านมา เพราะเกิดกระบวนการย่อยสลายเอมิเซลลูโลส ส่วนผลกระทบที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนจากกระบวนการทอร์รีแฟกชัน

5.1.2 ศึกษาเม็ดเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการอัดเม็ดด้วยถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา เพื่อหาสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ค่าความเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้ ค่าความทนทาน ค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นรวม ค่าต้านการดูดคืนความชื้นของชีวมวล และค่าความร้อนสูง

#### 5.1.2.1 ค่าความเป็นเถ้าหลังการเผาไหม้

ถ่านทอร์รีไฟต์ที่ได้จากการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส ทราบว่าปริมาณเถ้าอยู่ในช่วงร้อยละ 11 ถึง 15 โดยน้ำหนัก และจากวัตถุประสงค์ที่ 2 คือการใช้ น้ำมันเตาทดลองใช้เป็นตัวประสานการอัดเม็ดเชื้อเพลิง และทราบว่ามีผลต่อการเผาไหม้ที่ดีและลดปริมาณของเถ้าหลังการเผาไหม้ได้สูงถึงร้อยละ 10 ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเผาไหม้ จึงทำให้หลังการเผาไหม้และเถ้าที่น้อยกว่าถ่านทอร์รีไฟต์

#### 5.1.2.2 ค่าความทนทาน

ค่าความทนทานเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลที่อัตราส่วนถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตา 85:15 90:10 และ 95:5 ร้อยละโดยน้ำหนักตามลำดับ ที่มอดเป็นเม็ดเชื้อเพลิงโดยแผ่นเพลทที่มีมุมผายรูอัด 70 90 และ 110 องศา ทราบว่าเม็ดเชื้อเพลิงส่วนใหญ่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อย แต่การทดลองนี้ได้ค่าที่ดีที่สุดของการทดลองคือ การทดลองอัตราถ่านทอร์รีไฟต์และน้ำมันเตาที่ร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก และเป็นไปตามมาตรฐานคือค่าความทนทานสูงถึงร้อยละ 97.93 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ดีที่สุดของการทดลองนี้

#### 5.1.2.3 ค่าความหนาแน่น

การทดลองอัดเม็ดเชื้อเพลิงที่มีมุมผาย 70 90 และ 110 องศา ทราบว่าทุกการทดลองผ่านมาตรฐาน 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และอัตราส่วนที่ดีที่สุดของการทดลองนี้คือ 85:15 ที่มอด 110 องศา สามารถทำให้ได้ค่าความหนาแน่นสูงถึง 688.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

#### 5.1.2.4 ค่าความหนาแน่นรวม

การทดลองที่ทำการทดลองผ่านมาตรฐาน DIN 51731 คือค่าความหนาแน่นรวมต้องได้มากกว่า 1,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และการทดลองนี้ทุกอัตราส่วนผ่านตามมาตรฐาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำมันเตาที่ได้จากกระบวนการทอรีรีแฟกซ์นั้นนั้นมีผลต่อค่าความหนาแน่น และค่าความหนาแน่นรวม

#### 5.1.2.5 ค่าด้านการดูดคืนความชื้นของชีวมวล

จากการทดลองครั้งนี้ทราบว่า การใช้น้ำมันเตาที่ได้จากกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ เพื่อเป็นตัวประสานในการอัดเม็ดเชื้อเพลิงชีวมวลจากถ่านทอรีรีไฟต์สามารถด้านการดูดคืนความชื้นได้ดี และที่อัตราของน้ำมันเตามากก็จะด้านการดูดคืนความชื้นได้ดีตามลำดับ โดยผลการทดลองครั้งนี้ที่ทำการทดลองมีค่าด้านการดูดคืนความชื้นสูงกว่าร้อยละ 95

#### 5.1.2.6 ค่าความร้อนสูง

ค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงที่อัตราส่วนและมุมอัดต่างกันทราบได้ว่าค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิงอยู่ในช่วง 21 ถึง 23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเทียบกับค่าความร้อนของถ่านทอรีรีไฟต์ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 18 ถึง 22 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แสดงให้เห็นว่าเป็นไปในทางเดียวกัน แต่กระบวนการปรับปรุงสมบัติความร้อนครั้งนี้ไม่ได้ใช้ในโตรเจนในการไหลวนในระบบ ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้

จากนั้นจะนำถ่านทอรีรีไฟต์ที่ได้สู่การอัดเป็นเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งจะสะดวกต่อการจัดเก็บและการขนส่ง และค่าความร้อนที่สม่ำเสมอ หรือสามารถใช้งานร่วมกับถ่านหิน หรือใช้ในโรงไฟฟ้าชีวมวล

ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน ค่าความร้อนสูง และการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรีรีไฟต์ พบว่างานวิจัยนี้สามารถผลิตถ่านทอรีรีไฟต์ที่มีค่าความร้อนสูงถึง 23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และสมบัติที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาได้ และการใช้น้ำมันเตาเป็นตัวประสานในการอัดเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งมีผลการทดลองที่ดีต่อสมบัติทางกายภาพได้ แต่เนื่องจากระยะเวลาคงอยู่การทดลองนานถึง 30 นาที ซึ่งจะมีผลต่อการใช้พลังงานแหล่งความร้อนได้ จึงควรมีปรับปรุงหรือศึกษาระยะเวลาคงอยู่ที่น้อยกว่านี้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การเตรียมตัวอย่างชีวมวลกลบเริ่มต้นด้วยวิธีการอบแห้ง ควรเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิททันทีเพื่อป้องกันความชื้นเข้า

5.2.2 การทดลองด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกซ์แต่ละครั้งควรตรวจสอบอุปกรณ์ไม่ควรให้อากาศเข้าระบบเพราะจะเกิดการเผาไหม้ชีวมวลตัวอย่าง

5.2.3 การใช้น้ำมันเตาเป็นตัวประสานการอัดเม็ดเชื้อเพลิงควรมีกระบวนการเก็บให้ดีเพราะอาจเกิดความชื้นและจะมีผลต่อค่าความร้อนของเม็ดเชื้อเพลิง

5.2.6 ข้อเสนอแนะสำหรับการต่อยอดงานวิจัย

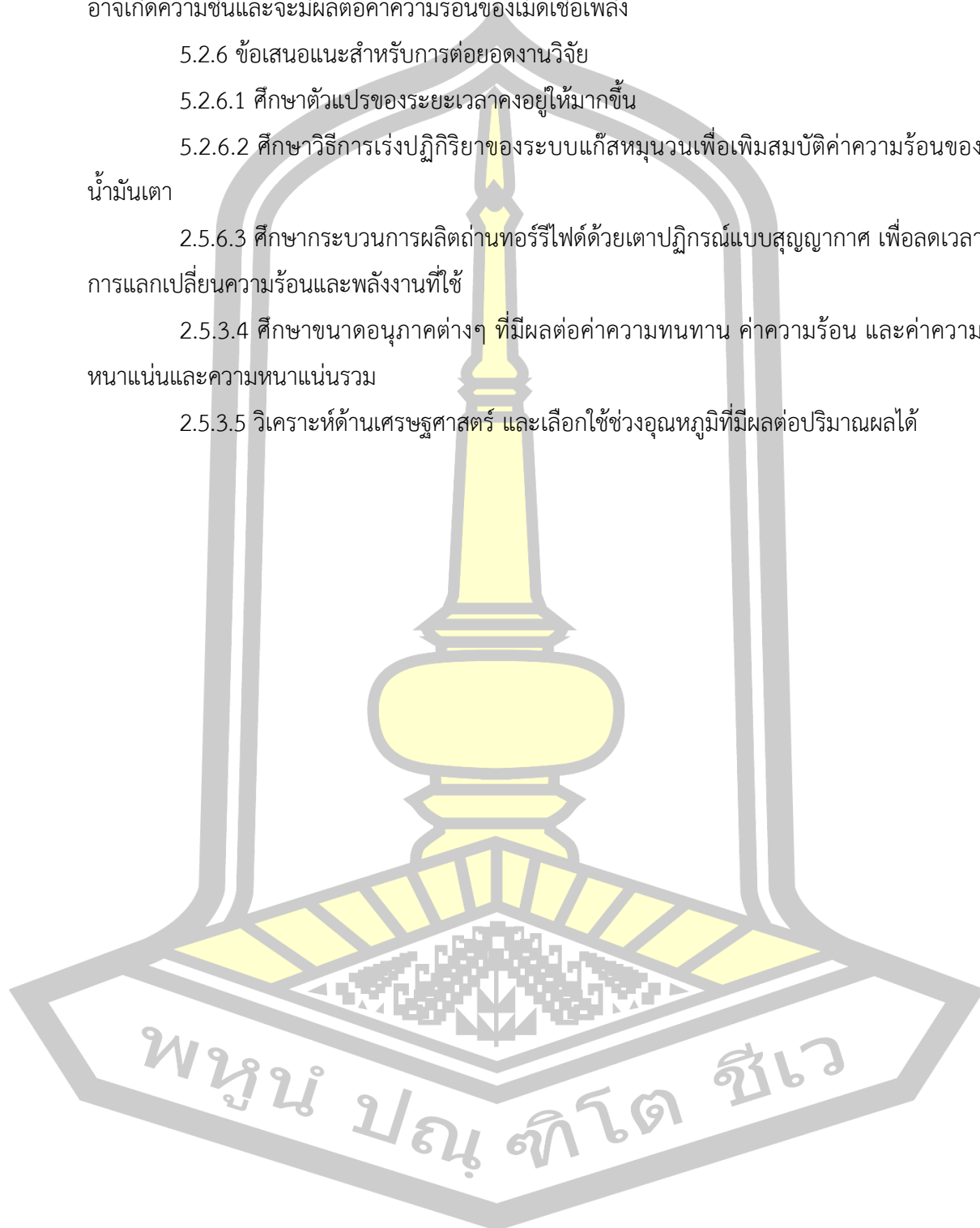
5.2.6.1 ศึกษาตัวแปรของระยะเวลาคงอยู่ให้มากขึ้น

5.2.6.2 ศึกษาวิธีการเร่งปฏิกิริยาของระบบแก๊สหมุนวนเพื่อเพิ่มสมบัติค่าความร้อนของน้ำมันเตา

2.5.6.3 ศึกษากระบวนการผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ด้วยเตาปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ เพื่อลดเวลาการแลกเปลี่ยนความร้อนและพลังงานที่ใช้

2.5.3.4 ศึกษาขนาดอนุภาคต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความทนทาน ค่าความร้อน และค่าความหนาแน่นและความหนาแน่นรวม

2.5.3.5 วิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์ และเลือกใช้ช่วงอุณหภูมิที่มีผลต่อปริมาณผลได้



บรรณานุกรม





## บรรณานุกรม

1. Ferreira, P.T., M.E. Ferreira, and J.C. Teixeira, *Analysis of Industrial Waste in Wood Pellets and Co-combustion Products*. Waste and Biomass Valorization, 2013. **5**(4): p. 637-650.
2. Phihusut, D. and M. Chantharat, *Removal of Methylene Blue Using Agricultural Waste: A Case Study of Rice Husk and Rice Husk Ash from Chaipattana Rice Mill Demonstration Center*. Environment and Natural Resources Journal, 2017. **15**(2): p. 30-38.
3. Bawa Susana, I.G., I.B. Alit, and I.D.K. Okariawan, *Rice husk energy rotary dryer experiment for improved solar drying thermal performance on cherry coffee*. Case Studies in Thermal Engineering, 2023. **41**: p. 102616.
4. Vijay Ramamurthi, P., et al., *Logistics cost analysis of rice residues for second generation bioenergy production in Ghana*. Bioresource Technology, 2014. **173**: p. 429-438.
5. Cahyanti, M.N., T.R.K.C. Doddapaneni, and T. Kikas, *Biomass torrefaction: An overview on process parameters, economic and environmental aspects and recent advancements*. Bioresource Technology, 2020. **301**: p. 122737.
6. Yang, Y., et al., *A fundamental research on synchronized torrefaction and pelleting of biomass*. Renewable Energy, 2019. **142**: p. 668-676.
7. Singh, S., J.P. Chakraborty, and M.K. Mondal, *Torrefaction of woody biomass (Acacia nilotica): Investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel*. Renewable Energy, 2020. **153**: p. 711-724.
8. Pimchuai, A., A. Dutta, and P. Basu, *Torrefaction of Agriculture Residue To Enhance Combustible Properties†*. Energy & Fuels, 2010. **24**(9): p. 4638-4645.
9. Li, H., et al., *Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets*. Applied Energy, 2012. **93**: p. 680-685.

10. Wang, Y., Y. Sun, and K. Wu, *Methods to Determine the Interactions Between the Biomass and the Pellet Channel During Biomass Pelletizing Process*. Waste and Biomass Valorization, 2019.
11. Králik, T., et al., *Impact of pelleting cost on competitiveness of intentionally grown biomass for local space heating: Case example of the Czech Republic*. Energy Reports, 2019.
12. Arulprakasajothi, M., et al., *Investigating the Physio-chemical Properties of Densified Biomass Pellet Fuels from Fruit and Vegetable Market Waste*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019. **45**(2): p. 563-574.
13. García, R., et al., *Pelletization of torrefied biomass with solid and liquid bio-additives*. Renewable Energy, 2019.
14. Pachón-Morales, J., et al., *Effect of torrefaction intensity on the flow properties of lignocellulosic biomass powders*. Biomass and Bioenergy, 2019. **120**: p. 301-312.
15. Bennamoun, L., N.Y. Harun, and M.T. Afzal, *Effect of Storage Conditions on Moisture Sorption of Mixed Biomass Pellets*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017. **43**(3): p. 1195-1203.
16. García, R., et al., *Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets*. Fuel, 2019. **251**: p. 739-753.
17. Ríos-Badrán, I.M., et al., *Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw*. Renewable Energy, 2020. **145**: p. 500-507.
18. Wang, X., et al., *High-temperature pyrolysis of biomass pellets: The effect of ash melting on the structure of the char residue*. Fuel, 2021. **285**: p. 119084.
19. Limsangouan, N., et al., *High pressure processing of tamarind (*Tamarindus indica*) seed for xyloglucan extraction*. Lwt, 2020. **134**: p. 110112.

20. Acharya, B., I. Sule, and A. Dutta, *A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing*. Biomass Conversion and Biorefinery, 2012. **2**(4): p. 349-369.
21. Adams, Z.S., et al., *Improved Yam-Baobab-Tamarind flour blends: Its potential use in extrusion cooking*. Scientific African, 2019. **6**: p. e00126.
22. Oh, K.C., et al., *Development and validation of mass reduction model to optimize torrefaction for agricultural byproduct biomass*. Renewable Energy, 2019. **139**: p. 988-999.
23. *Status overview of torrefaction technologies*. IEA Bioenergy, 2015.
24. Agarwal, S., et al., *Synthesis and characterization of tamarind kernel powder-based antimicrobial edible films loaded with geraniol*. Food Packaging and Shelf Life, 2020. **26**: p. 100562.
25. Paz, M., et al., *Validation of QuEChERS method for organochlorine pesticides analysis in tamarind (Tamarindus indica) products: Peel, fruit and commercial pulp*. Food Control, 2015. **54**: p. 374-382.
26. Brachi, P., et al., *Fluidized bed torrefaction of biomass pellets: A comparison between oxidative and inert atmosphere*. Powder Technology, 2019. **357**: p. 97-107.
27. Chen, D., et al., *Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction*. Fuel, 2020. **275**: p. 117936.
28. Campbell, W.A., A. Collier, and R.W. Evitts, *Comparing severity of continuous torrefaction for five biomass with a wide range of bulk density and particle size*. Renewable Energy, 2019. **141**: p. 964-972.
29. Sirous, R., et al., *Mixed biomass pelleting potential for Portugal, step forward to circular use of biomass residues*. Energy Reports, 2020. **6**: p. 940-945.
30. Moon, C., et al., *NO<sub>x</sub> emissions and burnout characteristics of bituminous coal, lignite, and their blends in a pulverized coal-fired furnace*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015. **62**: p. 99-108.

31. Uzarowicz, Ł., et al., *Technogenic soils (Technosols) developed from fly ash and bottom ash from thermal power stations combusting bituminous coal and lignite. Part II. Mineral transformations and soil evolution*. Catena, 2018. **162**: p. 255-269.
32. Mamvura, T.A. and G. Danha, *Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production*. Heliyon, 2020. **6**(3): p. e03531.
33. Kung, K.S., S.K. Thengane, and A.F. Ghoniem, *Functional mapping of torrefied product characteristics with index of torrefaction*. Fuel Processing Technology, 2020. **202**: p. 106362.
34. González Martínez, M., et al., *Assessing the impact of woody and agricultural biomass variability on its behaviour in torrefaction through Principal Component Analysis*. Biomass and Bioenergy, 2020. **134**: p. 105474.
35. Jiang, L., et al., *A life-cycle based co-benefits analysis of biomass pellet production in China*. Renewable Energy, 2020. **154**: p. 445-452.
36. Rajabi Hamedani, S., et al., *Comparative energy and environmental analysis of agro-pellet production from orchard woody biomass*. Biomass and Bioenergy, 2019. **129**: p. 105334.
37. Chen, W.-H., et al., *Hygroscopic transformation of woody biomass torrefaction for carbon storage*. Applied Energy, 2018. **231**: p. 768-776.
38. Iftikhar, M., et al., *Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets*. Biomass and Bioenergy, 2019. **122**: p. 1-16.
39. Niu, Y., et al., *Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **115**: p. 109395.
40. Tong, S., et al., *Gas-pressurized torrefaction of biomass wastes: Roles of pressure and secondary reactions*. Bioresource Technology, 2020. **313**: p. 123640.

41. Kaliyan, N. and R. Vance Morey, *Factors affecting strength and durability of densified biomass products*. Biomass and Bioenergy, 2009. **33**(3): p. 337-359.
42. a, E.G., L.M.L.G. b, and J. Moran, *Fuel lignocellulosic briquettes, die design and products study*. Renewable Energy 2002. **27**: p. 561–573.
43. Jonsson, C.Y.C., *Raw material composition, mechanical strength, moisture content, particle size distribution and processing*. MASTER'S THESIS, 2009.
44. Pattiya, A., *Bio-oil production via fast pyrolysis of biomass residues from cassava plants in a fluidised-bed reactor*. Bioresour Technol, 2011. **102**(2): p. 1959-67.
45. Junfeng, L., et al., *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in China*. Biomass and Bioenergy, 2005. **29**(3): p. 167-177.
46. XiuLi Yin, C.Z.W., Shun Peng Zheng, Yong Chen, *Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk*. Biomass and Bioenergy, 2002. **23**: p. 181–187.
47. Zhang, S., et al., *Effects of wet torrefaction on the physicochemical properties and pyrolysis product properties of rice husk*. Energy Conversion and Management, 2017. **141**: p. 403-409.
48. Gong, X., et al., *Investigation on Pyrolysis of Low Lipid Microalgae *Chlorella vulgaris* and *Dunaliella salina**. Energy & Fuels, 2013. **28**(1): p. 95-103.
49. Wang, M.J., et al., *Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues*. Energy, 2012. **37**(1): p. 177-184.
50. Zhang, S., et al., *Impacts and release characteristics of K and Mg contained in rice husk during torrefaction process*. Energy, 2019. **186**: p. 115888.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายมนตรี วงศ์ศิริวิทยา
วันเกิด	วันที่ 11 เดือนมิถุนายน พ.ศ.2526
สถานที่เกิด	อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 83 หมู่ 6 ตำบลสบเปิง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ รหัสไปรษณีย์ 50330
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	เลขที่ 156 หมู่ 5 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ตำบลพลาชุมพล อำเภอเมือง จังหวัด พิษณุโลก รหัสไปรษณีย์ 65000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2550 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล (พลังงาน) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2560 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2566 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด) สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	ทุนสนับสนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ ประจำปี 2566 ประเภทส่งเสริมการตีพิมพ์สำหรับนิสิตระดับบัณฑิตศึกษา (ปริญญาเอก)
ผลงานวิจัย	Improvement of higher heating value and hygroscopicity reduction of torrefied rice husk by Torrefaction and circulating gas in system

พูน ปณ ทัโต ชีเว