



การปรับปรุงสมบัติของไม้กระถินยักษ์ด้วยกระบวนการทอรีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

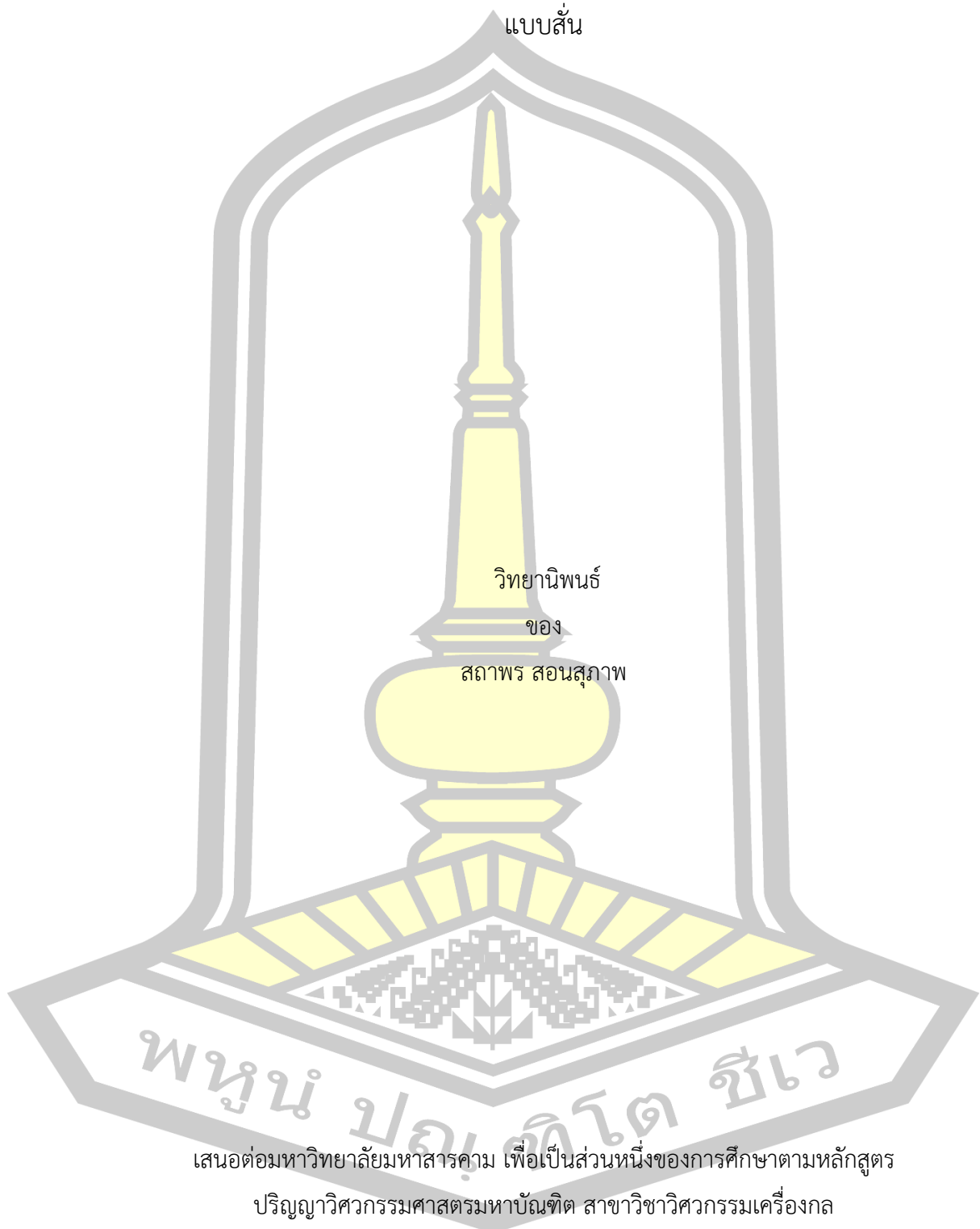
วิทยานิพนธ์
ของ
สถาพร สอนสุภาพ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2561

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การปรับปรุงสมบัติของไม้กระถินยักษ์ด้วยกระบวนการทอรีรีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์

แบบสั้น



วิทยานิพนธ์

ของ

สถาพร สอนสุภาพ

พูน ปลูกโต ชเว

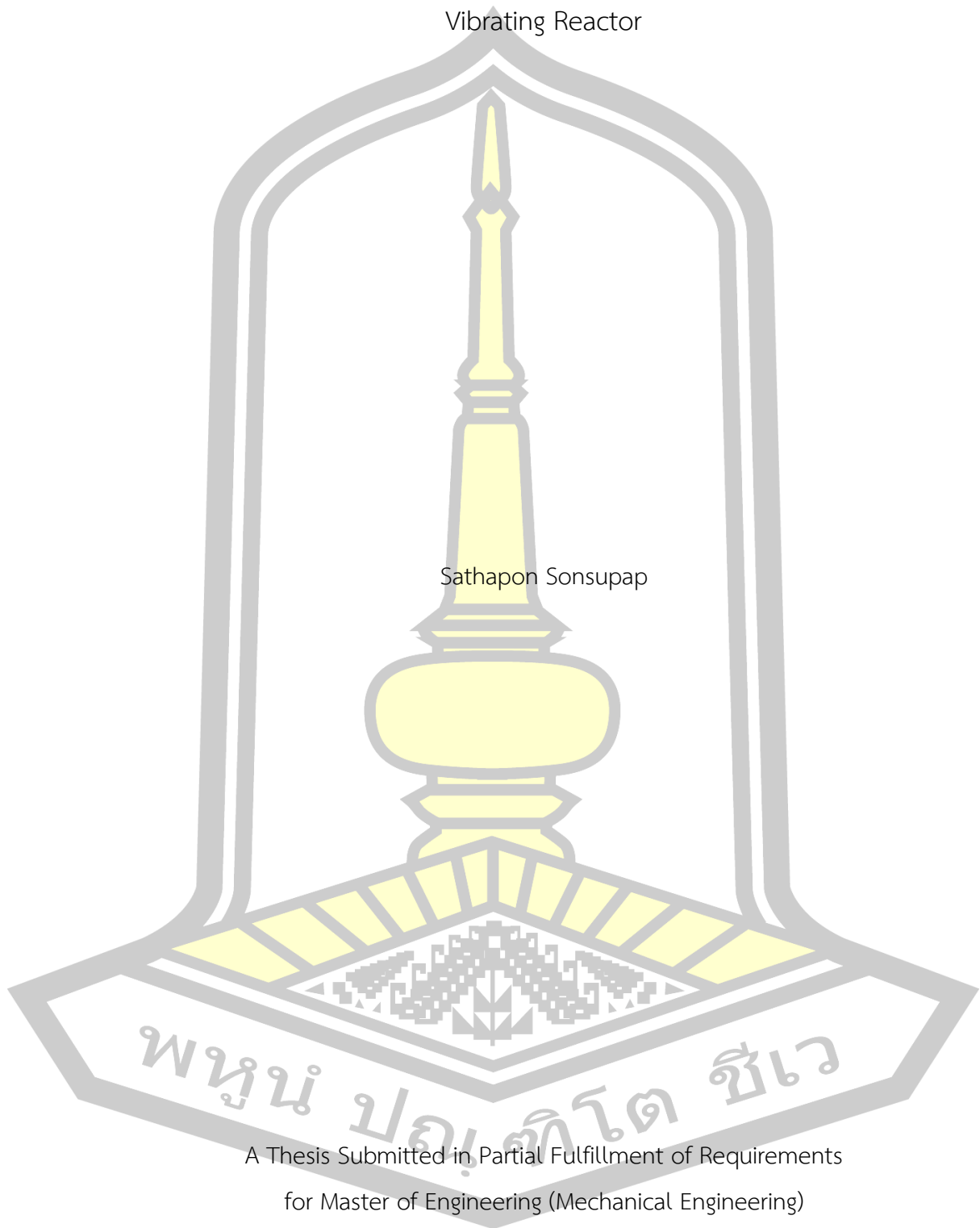
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2561

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Improvement of *Leucaena leucocephala* Properties by Torrefaction in a
Vibrating Reactor



Sathapon Sonsupap

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

Academic Year 2018

Copyright of Maharakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายสถาพร สอนสุภาพ
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อ. ดร. นวรงค์ ชลคุป)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ธีรพัฒน์ ชมภูคำ)

กรรมการ

(ผศ. ดร. ธวัฒน์ชัย คุณะโคตร)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน.....เดือน.....ปี.....

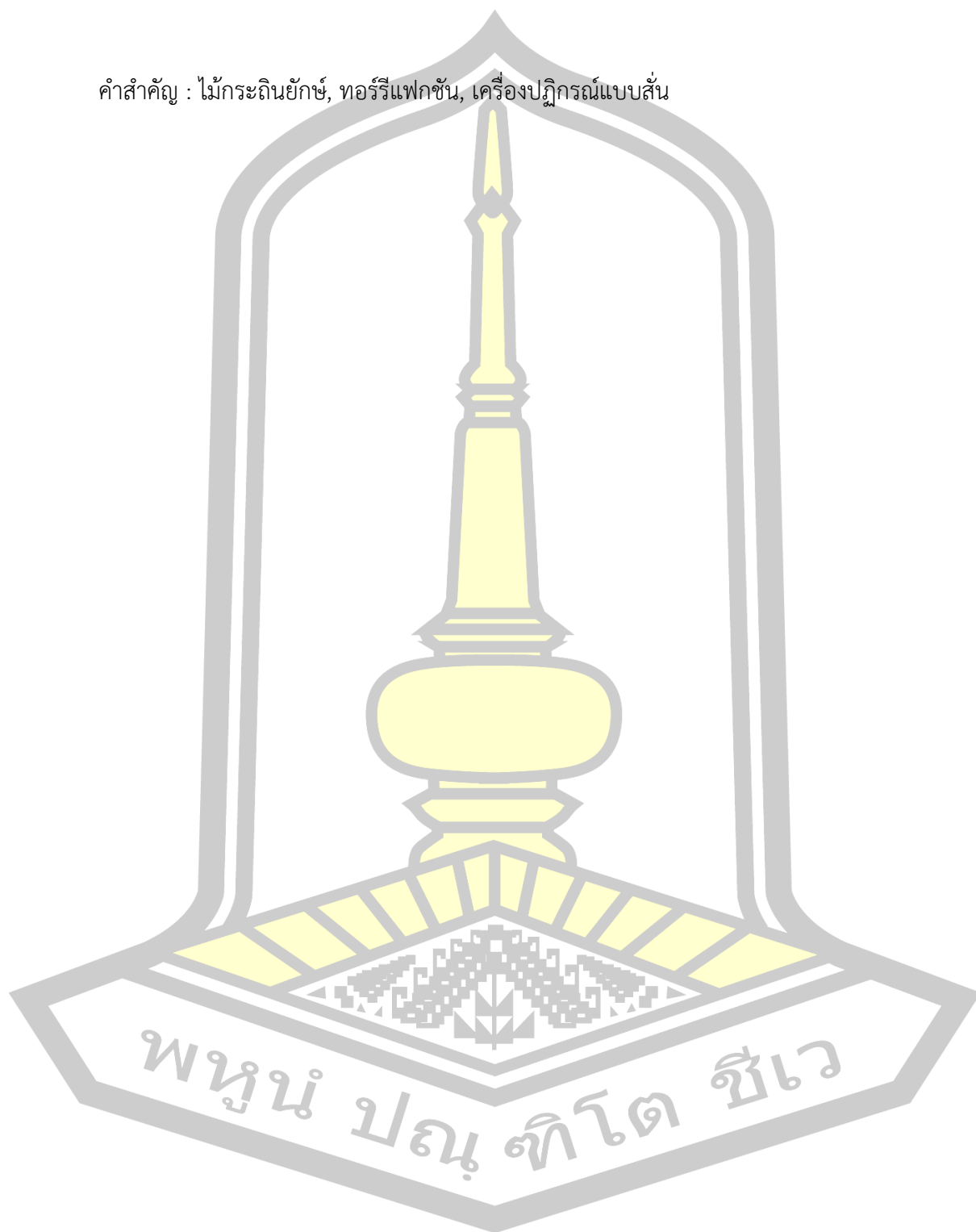
ชื่อเรื่อง	การปรับปรุงสมบัติของไม้กระถินยักษ์ด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น		
ผู้วิจัย	สถาพร สอนสุภาพ		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการทอรรีแฟกซ์เพื่อปรับปรุงสมบัติของชีวมวล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและทดสอบระบบทอรรีแฟกซ์แบบสั่นเทียบกับแบบสกรู และเพื่อมุ่งศึกษาการผลิตถ่านทอรรีไฟต์จากระบบแบบสั่นที่สร้างขึ้นโดยใช้ระยะเวลาคงอยู่ของของแข็งไม่เกิน 5 นาที ผลการออกแบบและสร้างระบบทอรรีแฟกซ์แบบสั่นพบว่าระบบประกอบด้วยระบบป้อนชีวมวล ท่อปฏิกรณ์ ชุดให้ความร้อน ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์ ระบบควบแน่น และแผงควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด เมื่อสร้างและทดสอบระบบพบว่าสามารถป้อนชีวมวลได้ในอัตราสูงสุด 1.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และสามารถควบคุมระยะเวลาคงอยู่ของของแข็งในท่อปฏิกรณ์ได้ในช่วง 1-5 นาที ต่อรอบ โดยมีความสูงของชีวมวลในท่อปฏิกรณ์ 11 มิลลิเมตร คิดเป็นร้อยละ 8 ของปริมาตรท่อปฏิกรณ์ทั้งหมด เมื่อทดลองผลิตถ่านทอรรีไฟต์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นเทียบกับแบบสกรู พบว่าเมื่อใช้ไม้กระถินยักษ์ ใบอ้อย และฟางข้าว อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นร้อยละ 77-88 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และเมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูร้อยละ 42-46 โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยสรุปได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นมีข้อดีเหนือกว่าแบบสกรูหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ การขยายกำลังการผลิต ต้นทุนการสร้างเครื่อง การทำความสะอาด และการเดินระบบ ผลการผลิตถ่านทอรรีไฟต์โดยใช้ไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นที่อุณหภูมิ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 3 และ 5 นาที พบว่าปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ร้อยละ 72.4-94.9 ของเหลวร้อยละ 1.6-24.1 และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ร้อยละ 2.3-8.5 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ร้อยละ 87.1-99.8 โดยถ่านทอรรีไฟต์มีค่าความร้อนสูง 18.3-22.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าชีวมวลเริ่มต้นถึง 1.20 เท่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของถ่านทอรรีไฟต์กับงานวิจัยที่ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งนานกว่า 5 นาที พบว่างานวิจัยนี้สามารถผลิตถ่านทอรรีไฟต์โดยใช้เวลาคงอยู่ที่น้อยกว่าและยังคงผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันได้ได้ในแง่ปริมาณผลได้

เชิงมวล ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน และค่าความร้อน ถึงแม้ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งน้อยกว่า 5 นาที

คำสำคัญ : ไม้กระถินยักษ์, ทอรรีแฟกซ์, เครื่องปฏิกรณ์แบบสัน



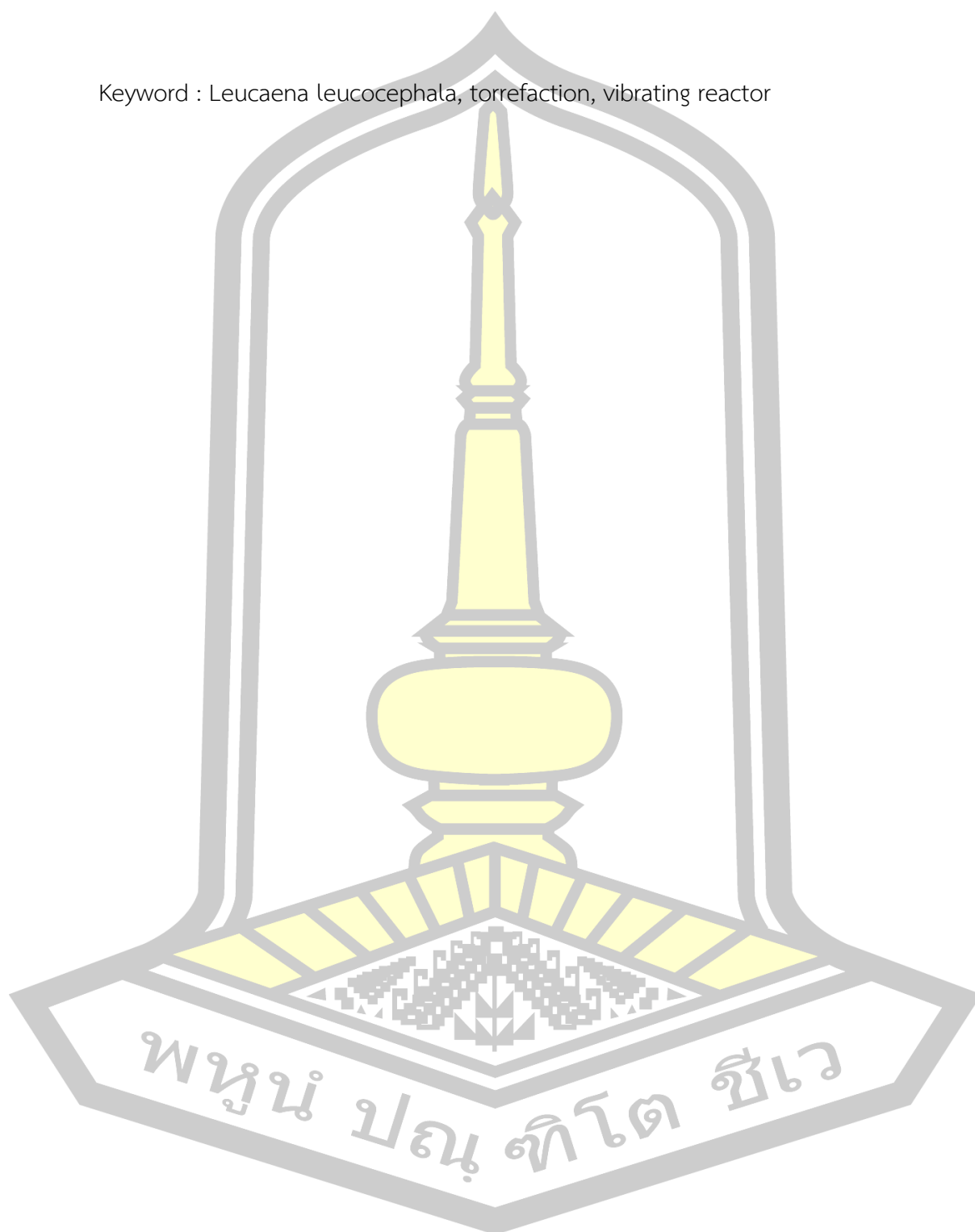
TITLE	Improvement of <i>Leucaena leucocephala</i> Properties by Torrefaction in a Vibrating Reactor		
AUTHOR	Sathapon Sonsupap		
ADVISORS	Associate Professor Adisak Pattiya , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2018

ABSTRACT

This research is a study of torrefaction process for improving biomass properties aiming at the construction and testing of vibrating reactor system in comparison with a screw reactor as well as at the production of torrefied biomass from the built vibrating unit using a solid residence time not more than 5 minutes. The vibrating reactor was composed of a biomass feeding system, a reactor pipe, heaters, a torrefied product container, a condensation system and a control panel. The reactor has a maximum biomass input of 1.5 kg/h with a solid residence time 1-5 minutes per round. This corresponds to a biomass bed height in the reactor pipe of 11 mm occupying 8% of the total reactor volume. When comparing with the screw reactor by torrefying *Leucaena leucocephala*, sugarcane leaves, and rice straw at 280°C for 3 minutes, the results showed that the solid yield was 77-88 wt% for vibrating reactor compared to only 42-46 wt% for the screw reactor. In addition, the vibrating reactor has several advantages over the screw one including temperature control, upscaling, capital cost, system cleaning and operation. The production of torrefied *Leucaena leucocephala* at 260-300°C and 1-5 minutes showed 72-95% solid yields with 2-24% liquid and 2-9% gas yields. The HHV of the torrefied biomass was 18-22 MJ/kg. This is upto 1.2 times higher than that of the original biomass when applying 300°C and 5 minutes. When comparing the properties of torrefied biomass produced with a solid residence time higher than 5 minutes, it has been shown that the torrefied products produced from this research gave similar results in terms of mass and energy yields as well as heating value albeit using a residence time as low

as 5 minutes.

Keyword : *Leucaena leucocephala*, torrefaction, vibrating reactor



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากบุคคลหลายท่านได้กรุณาช่วยเหลือให้ข้อเสนอแนะ คำปรึกษา แนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจแก่ผู้จัดทำ

ขอกราบขอบพระคุณ ท่านรองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาให้ความช่วยเหลือ ให้แนวคิดความรู้ทางวิชาการ แนะนำแนวทางในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ตรวจสอบปริญญาณิพนธ์ทุกขั้นตอน ตลอดจนให้กำลังใจแก่ผู้จัดทำ ซึ่งเป็นผลให้ผู้จัดทำมีความสามารถในการทำและพัฒนาวิทยานิพนธ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขอขอบพระคุณ สมาชิกหน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกท่านที่เสียสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ช่วยเหลือและชี้แนวทางที่เป็นประโยชน์

ขอขอบพระคุณ บุคลากร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตลอดจนบุคคลต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลืออีกมากมาย ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้หมดในที่นี้

ขอขอบพระคุณ ทุนการศึกษาจากโครงการพัฒนาศักยภาพบุคคลากร STEM (Science, Technology Engineering, and Mathematics) เพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับภาคอุตสาหกรรม ประจำปี 2560 รหัสผู้รับทุน SCA-CO-2560-3624-TH และส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สัญญาเลขที่ FDA-CO-2558-1149-TH

สถาพร สอนสุภาพ

พูน ปรณ ทิโต ชีเว

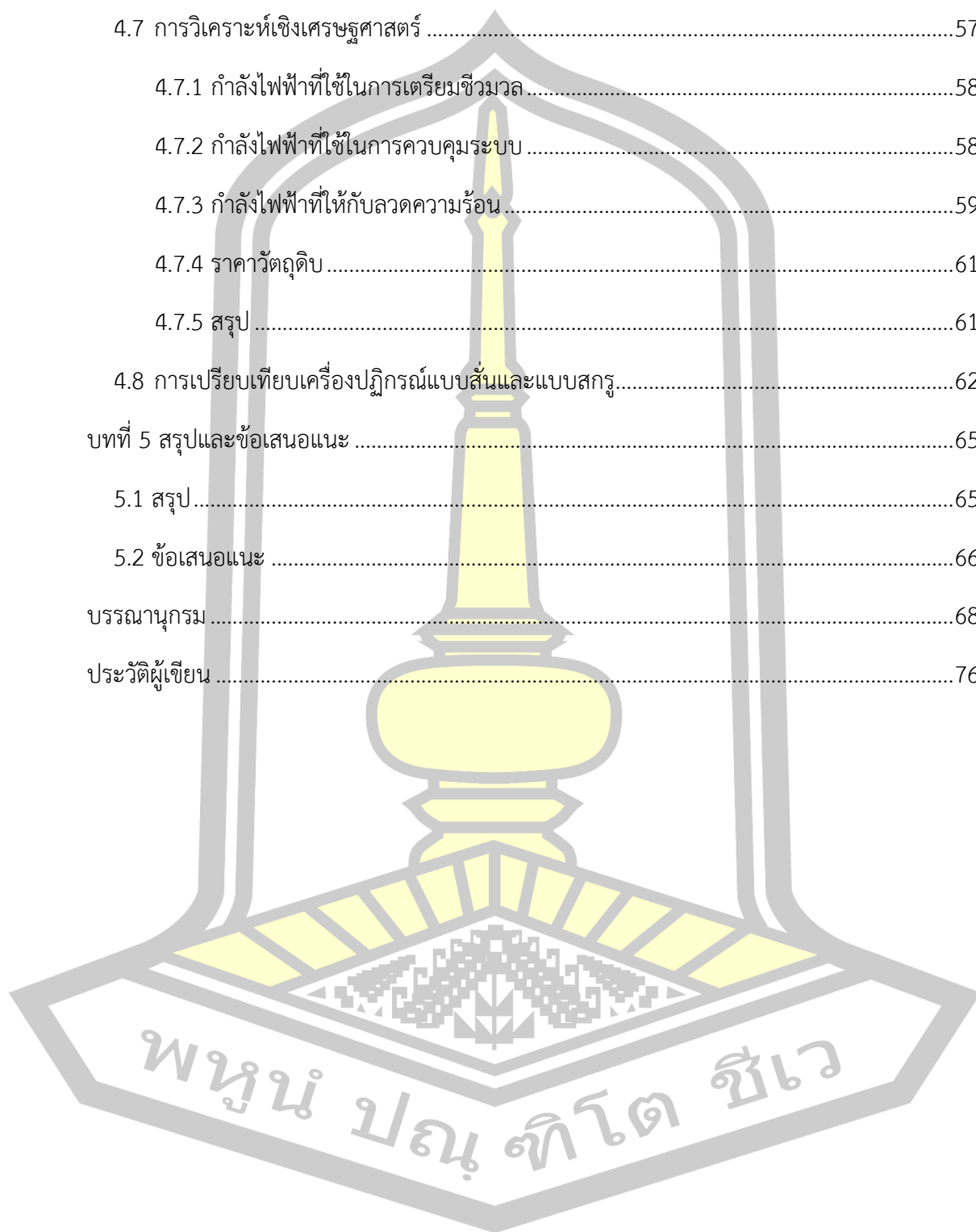
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 หลักการและเหตุผล.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขต.....	3
1.3.1 ตัวแปรต้น.....	3
1.3.2 ตัวแปรควบคุม.....	3
1.3.3 ตัวแปรตาม.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.5 สถานที่ดำเนินการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล.....	5
2.1 ชีวมวล.....	5
2.2 การใช้ประโยชน์พลังงานจากชีวมวล.....	7
2.3 กระบวนการทอรรีแฟกชัน.....	9
2.4 กลไกการสลายตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ของชีวมวล.....	11
2.5 ผลของตัวแปรของกระบวนการทอรรีแฟกชัน.....	12

2.5.1	อุณหภูมิ.....	12
2.5.2	เวลาคงอยู่ของของแข็ง.....	13
2.5.3	ชนิดของชีวมวล.....	14
2.6	เทคโนโลยีทอร์รีแฟกชันในปัจจุบัน.....	14
2.6.1	เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน.....	15
2.6.2	เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู.....	15
2.6.3	เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหลายชั้น.....	16
2.6.4	เครื่องปฏิกรณ์ทอร์เบต.....	17
2.6.5	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ขนาดกะทัดรัด.....	18
2.6.6	เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น.....	18
2.6.7	การเปรียบเทียบเทคโนโลยีทอร์รีแฟกชัน.....	19
2.7	การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันแบบสั่น.....	20
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
2.8.1	กระบวนการทอร์รีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง.....	20
2.8.2	กระบวนการทอร์รีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง.....	21
2.8.3	สรุป.....	21
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	22
3.2	แผนการทดลอง.....	23
3.3	เครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันแบบสั่น.....	25
3.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทอร์รีแฟกชันแบบสั่น.....	26
3.4.1	ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน.....	26
3.4.2	มอเตอร์.....	27
3.4.3	ท่อปฏิกรณ์.....	28

3.4.4	มอเตอร์สั่น	28
3.4.5	ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์	29
3.4.6	ชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต	29
3.5	อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทอรรีแฟกชันแบบสกรู	30
3.6	การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวลและถ่านทอรรีไฟต์	31
3.6.1	การวิเคราะห์แบบประมาณ	31
3.6.2	การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง	32
3.7	การคำนวณปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน	33
3.8	การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน	33
บทที่ 4	ผลการทดลอง	35
4.1	สมบัติพื้นฐานของชีวมวล	35
4.2	ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอริแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น	36
4.2.1	ปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ	36
4.2.2	ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการให้ความร้อน	37
4.2.3	ปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาคงอยู่ของของแข็ง	37
4.3	การทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชัน	38
4.4	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ	40
4.5	ร้อยละปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์	43
4.6	การวิเคราะห์ปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์	46
4.6.1	ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์	48
4.6.2	ปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลว	50
4.6.3	ปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊ส	52
4.6.4	ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟต์	53
4.6.5	ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์	54

4.6.6 การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์	56
4.7 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	57
4.7.1 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล	58
4.7.2 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบ	58
4.7.3 กำลังไฟฟ้าที่ให้กับลดความร้อน	59
4.7.4 ราคาวัตถุดิบ	61
4.7.5 สรุป	61
4.8 การเปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นและแบบสกรู.....	62
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุป.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	68
ประวัติผู้เขียน	76



สารบัญตาราง

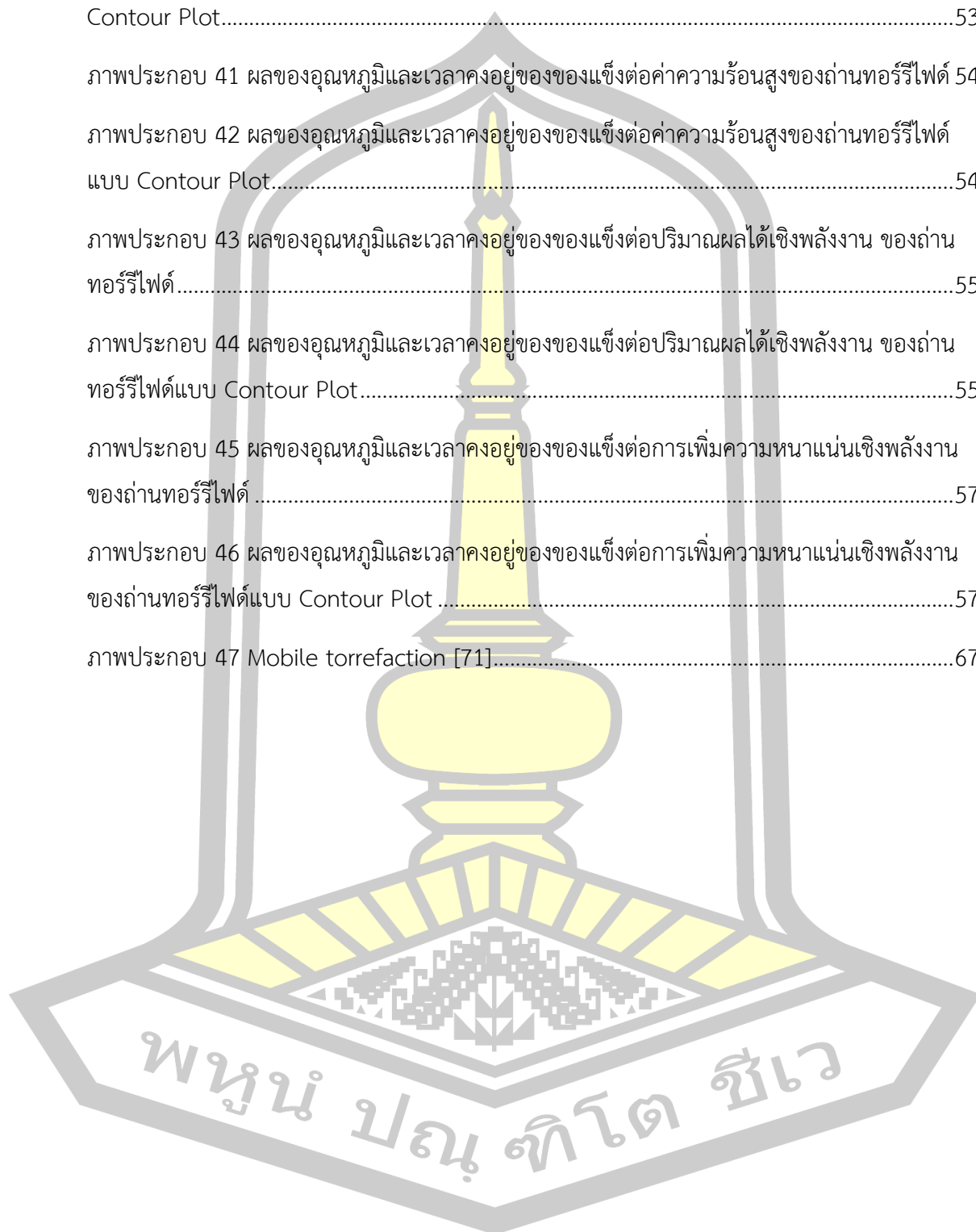
	หน้า
ตาราง 1 การเปรียบเทียบพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2559/60 แปรจากภาพถ่ายดาวเทียม.....	6
ตาราง 2 พื้นที่เก็บเกี่ยวและผลผลิตของข้าว	7
ตาราง 3 สมบัติของถ่านหินและถ่านทอรรีไฟต์ [29, 41]	10
ตาราง 4 เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์และบริษัทที่เกี่ยวข้อง [50].....	14
ตาราง 5 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีทอรรีไฟต์ [25].....	19
ตาราง 6 แผนการทดลองสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟต์แบบสัน	24
ตาราง 7 แผนการทดลองสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟต์แบบสกู.....	24
ตาราง 8 สมบัติพื้นฐานของชีวมวล.....	35
ตาราง 9 ปริมาณผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟต์แบบสกูและแบบสัน ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที	38
ตาราง 10 ผลการทดสอบระบบโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสัน.....	39
ตาราง 11 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง	40
ตาราง 12 น้ำหนัก ปริมาตร ความสูง และร้อยละปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์	45
ตาราง 13 ผลการทดลองโดยใช้ไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบสัน	46
ตาราง 14 ผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยใช้ไม้กระถินยักษ์.....	47
ตาราง 15 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบ	58
ตาราง 16 กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดความร้อน.....	59
ตาราง 17 ประมาณค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือนที่อัตราปกติ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเกินกว่า 150 หน่วยต่อเดือน	60
ตาราง 18 ค่าไฟฟ้าต่อชีวมวลหลังอบแห้ง.....	60
ตาราง 19 กำลังไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อเดือนและกิโลกรัม ของถ่านทอรรีไฟต์	61
ตาราง 20 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์สันและแบบสกู.....	63

สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ไม้กระถินยักษ์ [35].....	5
ภาพประกอบ 2 อ้อย [36].....	6
ภาพประกอบ 3 ฟางข้าว [37].....	7
ภาพประกอบ 4 แกลบ (ก) ก่อนผ่านกระบวนการทอรีรีแฟกซ์ เทียบกับหลังผ่านกระบวนการ ที่ อุณหภูมิ (ข) 250 (ค) 280 และ (ง) 310 องศาเซลเซียส [40]	9
ภาพประกอบ 5 กระบวนการทอรีรีแฟกซ์	10
ภาพประกอบ 6 กลไกการสลายตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ของซีวมวล [39].....	11
ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรีรีไฟด์ [29, 42, 43].....	12
ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรีรีไฟด์ [29, 42].....	12
ภาพประกอบ 9 ผลของเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่าน ทอรี รีไฟด์ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 25 องศาเซลเซียสต่อนาที [44]	13
ภาพประกอบ 10 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน [53].....	15
ภาพประกอบ 11 เครื่องปฏิกรณ์ชนิดสกรู [17].....	16
ภาพประกอบ 12 เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหลายชั้น [52].....	17
ภาพประกอบ 13 เครื่องปฏิกรณ์ทอร์เบต [54].....	17
ภาพประกอบ 14 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ขนาดกะทัดรัด [52].....	18
ภาพประกอบ 15 เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น [24].....	19
ภาพประกอบ 16 ลักษณะการสั่นของมอเตอร์สั่น [55].....	20
ภาพประกอบ 17 การติดตั้งมอเตอร์สั่นให้มีทิศทางการหมุนสวนทางกัน [55]	20
ภาพประกอบ 18 ผลของความถี่ของมอเตอร์สั่นต่อเวลาคงอยู่ของของแข็ง.....	23

ภาพประกอบ 19 ภาพรวมของเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั้น	25
ภาพประกอบ 20 เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั้น ก) ด้านหน้า และ ข) ด้านข้าง.....	25
ภาพประกอบ 21 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั้น	26
ภาพประกอบ 22 ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน.....	27
ภาพประกอบ 23 มอเตอร์.....	27
ภาพประกอบ 24 ท่อปฏิกรณ์.....	28
ภาพประกอบ 25 มอเตอร์สั้น.....	29
ภาพประกอบ 26 ถังเก็บถ่านทอรรีไฟด์.....	29
ภาพประกอบ 27 ชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต.....	30
ภาพประกอบ 28 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสกรู	31
ภาพประกอบ 29 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ [56]	32
ภาพประกอบ 30 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรรีแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั้น	36
ภาพประกอบ 31 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันโดยใช้ไม้กระถินยักษ์.....	42
ภาพประกอบ 32 ผลการเคราะห์แบบประมาณของถ่านทอรรีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์	42
ภาพประกอบ 33 อัตราส่วนเชื้อเพลิงของถ่านทอรรีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์.....	43
ภาพประกอบ 34 ความสูงของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์	44
ภาพประกอบ 35 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวล	50
ภาพประกอบ 36 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของ ถ่านทอรรีไฟด์แบบ Contour Plot.....	50
ภาพประกอบ 37 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลว	51
ภาพประกอบ 38 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวแบบ Contour Plot.....	51
ภาพประกอบ 39 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊ส.....	52

ภาพประกอบ 40 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊สแบบ Contour Plot.....	53
ภาพประกอบ 41 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์	54
ภาพประกอบ 42 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์แบบ Contour Plot.....	54
ภาพประกอบ 43 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงาน ของถ่านทอร์รีไฟต์.....	55
ภาพประกอบ 44 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงาน ของถ่านทอร์รีไฟต์แบบ Contour Plot.....	55
ภาพประกอบ 45 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์.....	57
ภาพประกอบ 46 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์แบบ Contour Plot.....	57
ภาพประกอบ 47 Mobile torrefaction [71].....	67



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันและที่ผ่านมามีการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นจำนวนมาก ผลจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนและสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหาหรือช่วยบรรเทา คือ การสนับสนุนการใช้ชีวมวล ซึ่งทุกวันนี้มีการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงอยู่ในหลายรูปแบบ โดยทั่วไปอาจนำมาใช้ในการเผาไหม้โดยตรง การนำมาอัดเม็ดเพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน หรือการปรับปรุงสมบัติด้วยกระบวนการทางความร้อน เช่น “กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process)” ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 5 ระดับ คือ ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบกลาง (Intermediate pyrolysis) ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) และทอรรีแฟกชัน (Torrefaction) โดย 5 กระบวนการดังกล่าวมีความแตกต่างกันที่อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาคงอยู่ของของแข็งตัวแปรเหล่านี้ส่งผลให้ปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอประมาณ 2-3 วินาที [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลว ส่วนปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งและแก๊สเท่า ๆ กัน กระบวนการไพโรไลซิสแบบกลางใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอประมาณ 10-30 วินาที [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลว แต่น้อยกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าหรือกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งหลายชั่วโมงหรืออาจนานเป็นวัน [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์มีใกล้เคียงกันทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แก๊สซิฟิเคชันใช้อุณหภูมิประมาณ 750-900 องศาเซลเซียส [1] ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นแก๊ส ส่วนปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งและของเหลวเท่า ๆ กัน กระบวนการทอรรีแฟกชันหรือเรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสแบบอ่อน (Mild pyrolysis) [2] ใช้อุณหภูมิประมาณ 200-300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งประมาณ 1-120 นาที ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของแข็ง รองลงมาเป็นของเหลวและมีแก๊สเล็กน้อย โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งเรียกว่า ถ่านทอรรีไฟด์ (Torrefied biomass) หากมีการปรับปรุงสมบัติของถ่านทอรรีไฟด์มากพอ ถ่านสามารถมีค่าพลังงานความร้อนใกล้เคียงกับถ่านหินได้ และดีกว่าถ่านหินในแง่ของปริมาณกำมะถันและไนโตรเจน เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณกำมะถันและไนโตรเจนน้อยมาก

จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านทอร์รีไฟต์และใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพทดแทนถ่านหิน

สมบัติของถ่านทอร์รีไฟต์มีข้อดีหลายอย่าง เช่น ค่าความร้อน สัดส่วนของคาร์บอน [3, 4] การไม่ดูดความชื้นจากอากาศ [4-6] และความเปราะ โดยสมบัติของความเปราะของถ่านทอร์รีไฟต์ส่งผลให้สามารถบดอัดได้ง่าย จึงทำให้มีความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงขึ้นและลดต้นทุนการขนส่งได้ ทั้งนี้ยังสามารถนำถ่านทอร์รีไฟต์ไปประยุกต์ใช้งานร่วมกับโรงไฟฟ้าถ่านหินได้ [7]

ปริมาณผลได้และสมบัติของถ่านทอร์รีไฟต์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและสภาวะของกระบวนการที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ เวลาคงอยู่ของของแข็ง และอัตราการให้ความร้อน โดยอัตราการให้ความร้อนและการกระจายตัวอุณหภูมิสัมพันธ์กับอัตราการป้อนชีวมวล ขนาดอนุภาคชีวมวล และการผสมหรือการคลุกเคล้ากันของชีวมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์ หากชีวมวลแต่ละชนิดได้รับความร้อนสม่ำเสมอจะส่งผลให้ถ่านทอร์รีไฟต์มีความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) ดังนั้นชนิดหรือรูปแบบของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้จึงมีความสำคัญและส่งผลต่อคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้

งานวิจัยที่ผ่านมามีการใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันหลายชนิด เช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed bed reactor) [8, 9] แบบสกรู (Screw reactor) [10-17] แบบหมุน (Rotating reactor) [18-21] และแบบเตาหลายชั้น (Herreshoff oven/ Multiple Hearth Furnace (MHF)) [22, 23] การศึกษาการผลิตถ่านทอร์รีไฟต์แบบต่อเนื่องส่วนใหญ่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถป้อนชีวมวลได้ง่าย โดยการใช้สกรูลำเลียงเข้าสู่โซนร้อนของเครื่องปฏิกรณ์ อย่างไรก็ตามการใช้สกรูนี้มีโอกาสที่ชีวมวลจะเกิดการเคลือบบนผิวของใบสกรูและผนังบริเวณที่เชื่อมต่อชุดป้อนชีวมวลที่มีอุณหภูมิห้องและเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการอุดตันบริเวณดังกล่าวได้ การแก้ปัญหาคือการอุดตันวิธีหนึ่งคือการใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถลำเลียงชีวมวลได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องใช้สกรูลำเลียง เช่น เครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันแบบสั่น (Vibrating torrefaction reactor) เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ลำเลียงชีวมวลโดยการสั่นของมอเตอร์สั่น แรงสั่นถูกส่งถ่ายกำลังไปยังท่อปฏิกรณ์ที่กวาง ส่งผลให้ลดโอกาสการอุดตันของชีวมวลได้ เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ถูกศึกษาโดย Doassans-Carrere และคณะ ประเทศฝรั่งเศส [24] ซึ่งผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ด้วย ไม้สับมะกอก เปลือกไม้สน และฟางข้าว ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็ง 15 ถึง 30 นาที ถ่านทอร์รีไฟต์ที่ผลิตได้มีค่าความร้อนสูง 18-25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม โดยรวมแล้วเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันแบบสั่นมีข้อดีมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ ในด้านการแลกเปลี่ยนความร้อน ความกลมกลืนของผลิตภัณฑ์ ความยืดหยุ่นในการป้อนชีวมวล และความสามารถในการขยายกำลังการผลิต [25]

แม้ว่าข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันแบบสั่นมีมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว แต่การศึกษาเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย อีกทั้งในการบวนการผลิตถ่านทอร์รีไฟต์จากงานวิจัยที่ผ่านมายังใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งสำหรับเครื่องปฏิกรณ์

แบบต่อเนื่อง 6 ถึง 120 นาที [10-15, 17-19, 21, 24] และสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง 0 ถึง 1,140 นาที [26-30] การใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งที่นานนี้ทำให้โอกาสการขยายกำลังการผลิตยากขึ้น เนื่องจากต้องสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อรองรับชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่นานและใช้พลังงานในการให้ความร้อนแก่ชีวมวลนาน ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสร้างและทดสอบระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบสั้นเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู และการลดการใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งให้สั้นลงแต่ยังสามารถผลิตถ่านทอรรีไฟด์ที่มีสมบัติเท่าเทียมกับการใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งที่นาน โดยใช้ไม้กระถินยักษ์เป็นวัตถุดิบ เกณฑ์ในการพิจารณานี้ได้แก่ ปริมาณผลได้เชิงมวล (Mass yield) ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน (Energy yield) และการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน (Energy densification) ของถ่านทอรรีไฟด์

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 สร้างและทดสอบระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบสั้นเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู

1.2.2 เพื่อศึกษาการผลิตถ่านทอรรีไฟด์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบสั้นโดยใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งไม่เกิน 5 นาที

1.3 ขอบเขต

ขอบเขตของการทดลองแบ่งเป็น 3 อย่าง คือ ตัวแปรต้น ตัวแปรควบคุม และตัวแปรตาม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.3.1 ตัวแปรต้น

1.3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟด์แบบสั้นและแบบสกรู

1.3.1.2 ชีวมวลที่ใช้คือ ไม้กระถินยักษ์ ใบอ้อย และฟางข้าว

1.3.1.3 อุณหภูมิทอรรีไฟด์ที่ใช้คือ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส

1.3.1.4 เวลาคงอยู่ของของแข็งที่ใช้คือ 1 3 และ 5 นาที

1.3.2 ตัวแปรควบคุม

1.3.2.1 อัตราการป้อนชีวมวล 1.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

1.3.2.2 ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 6.5 มิลลิเมตร

1.3.2.3 ความชื้นของชีวมวลร้อยละ 3.3 โดยน้ำหนัก

1.3.2.4 ปริมาณชีวมวล 300 กรัมต่อการทดลอง

1.3.2.5 อัตราการไหลของไนโตรเจนรวม 4 ลิตรต่อนาที

บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สามารถแบ่งประเภทของชีวมวลโดยจำแนกตามแหล่งกำเนิดได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่ ชีวมวลจากการเพาะปลูก เช่น ปาล์มน้ำมัน ข้าวโพด ถั่วเหลือง และมันสำปะหลัง ชีวมวลจากของเสียทางการเกษตร ได้แก่ แกลบ ฟางข้าว และกะลาปาล์ม ชีวมวลจากป่าและอุตสาหกรรมป่าไม้ เช่น ไม้เลื้อย และปึกไม้ ชีวมวลจากมูลสัตว์ เช่น มูลวัว มูลแพะ และมูลไก่ และชีวมวลจากขยะชุมชน เช่น เศษผัก และเศษผลไม้

จากข้อมูลข้างต้นเห็นได้ว่าชีวมวลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายแหล่งและมีหลายชนิด การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์ก็มีความต่างกันด้วย เช่น ทำเป็นอาหาร สร้างที่อยู่อาศัย ใช้เป็นปุ๋ย และที่สำคัญอีกอย่างคือการเปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง

ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ไม้กระถินยักษ์ ใบอ้อย และฟางข้าว ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ไม้กระถินยักษ์ (*Leucaena leucocephala*) ดังภาพประกอบ 1 เป็นไม้เศรษฐกิจและไม้โตเร็วชนิดหนึ่ง การเจริญเติบโตที่อายุ 2 ปี ไม้กระถินยักษ์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง เท่ากับ 3.56 เซนติเมตร ผลผลิตต่อไร่เมื่อคิดเป็นพลังงาน พบว่าไม้กระถินยักษ์มีค่าความร้อนสูง 15×10^6 กิโลแคลอรีต่อไร่ [31] ในปัจจุบันมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น การใช้เป็นฟืน นำไปเป็นวัตถุดิบในโรงไฟฟ้าชีวมวล หรือแม้กระทั่งการนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่น กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว [32] ทอรัรีแฟกชัน [33] และไฮโดรไลซิส (hydrolysis) [34]



ภาพประกอบ 1 ไม้กระถินยักษ์ [35]

อ้อย (*Sugar cane*) ดังภาพประกอบ 2 มีชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Saccharum officinarum* L. จัดอยู่ในวงศ์ POACEAE เป็นวงศ์เดียวกับไม้ หญ้า และธัญพืช เช่น ข้าวสาลี ข้าว ข้าวโพด และข้าวบาร์เลย์ จากการดำเนินการสำรวจพื้นที่ปลูกอ้อยในปี 2559/60 ของสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย โดยอาศัยข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมและการเก็บข้อมูลจากการสำรวจภาคสนาม พบว่าประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยทั่วประเทศจำนวน 10.9 ล้านไร่ พื้นที่อ้อยส่งโรงงาน 9.8 ล้านไร่ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นภูมิภาคได้ดังตาราง 1 เห็นได้ว่ามีประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกอ้อยเป็นจำนวนมาก ส่วนหลัก ๆ ที่นำไปใช้คือส่วนของลำต้น แต่ส่วนใบอ้อยยังไม่มีมีการนำไปประโยชน์เยอะเท่าที่ควร หากนำใบอ้อยในส่วนที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์นั้นมาผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันก็ได้เป็นถ่านทอรรีไฟต์จากใบอ้อย ซึ่งสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้

ตาราง 1 การเปรียบเทียบพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2559/60 แปรจากภาพถ่ายดาวเทียม

พื้นที่ปลูก	พื้นที่ปลูกอ้อย (ไร่)	ปริมาณอ้อย ทั้งหมด (ตัน)	พื้นที่อ้อยส่ง โรงงาน (ไร่)	ผลผลิตเฉลี่ย (ตัน/ไร่)
ภาคเหนือ	2,571,431	24,687,554	2,541,017	9.60
รวมภาคกลาง	3,061,101	29,114,647	2,641,673	9.51
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	4,750,671	44,221,977	4,137,059	9.31
ภาคตะวันออก	605,286	5,509,259	544,920	9.10
รวมทั้งประเทศ	10,988,489	103,533,437	9,864,668	9.43

ที่มา: รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2559/60 สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย



ภาพประกอบ 2 อ้อย [36]

ฟางข้าว (*Rice straw*) ดังภาพประกอบ 3 เป็นผลพลอยได้หรือของเหลือใช้จากภาคอุตสาหกรรมการเกษตร จากการสำรวจของกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกาในปี 2557 – 2560 แสดงดังตาราง 2 ประเทศไทยมีพื้นที่เก็บเกี่ยวประมาณ 64.3 ล้านไร่ หรือคิดเป็นร้อยละ 6 ของเนื้อที่เก็บเกี่ยวทั่วโลก ผลผลิตประมาณ 20 ล้านตันข้าวสาร หรือคิดเป็นร้อยละ 4 ของผลผลิตทั่วโลก ซึ่งเนื้อที่เก็บเกี่ยวที่เยอะนี้ก็มีหมายถึงมีปริมาณฟางข้าวที่เยอะด้วย ในหลายพื้นที่หลังจากการเก็บเกี่ยวข้าวแล้วก็เผาฟางข้าวทิ้งโดยไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ หากนำฟางข้าวในส่วนที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์นั้นมาผ่านกระบวนการทอรีรีแฟกชันก็ได้เป็นถ่านทอรีรีไฟต์จากฟางข้าว ซึ่งสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้

ตาราง 2 พื้นที่เก็บเกี่ยวและผลผลิตของข้าว

ประเทศ	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (100,000 ไร่)			ผลผลิต (100,000 ตัน) ¹		
	2557/58	2558/59	2559/60	2557/58	2558/59	2559/60
ไทย	666	601	663	208	181	211
รวมทั่วโลก	10,082	9,958	10,118	4,806	4,743	4,833

ที่มา: กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา

หมายเหตุ: ¹ข้าวสาร



ภาพประกอบ 3 ฟางข้าว [37]

2.2 การใช้ประโยชน์พลังงานจากชีวมวล

การเปลี่ยนรูปเชื้อเพลิงชีวมวลไปใช้ประโยชน์ สามารถเลือกได้หลายแบบตามความเหมาะสมดังต่อไปนี้

2.2.1. การเผาไหม้โดยตรง (Direct combustion) การเผาไหม้โดยตรงเป็นการสันดาปอย่างสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ ชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นพลังงาน คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ เช่นการใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มทำอาหารในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตไม้อัด และกระดาษได้อีกทางหนึ่งด้วย

2.2.2. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis process) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนในการเปลี่ยนโครงสร้างของแข็งให้เป็นแก๊ส ด้วยการการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เป็นของแข็ง เมื่อชีวมวลสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่ร้อน ก็เกิดการสลายตัวแปลงสภาพเป็นแก๊สติดไฟและเถ้า กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการแตกตัวของสารที่มีมวลโมเลกุลใหญ่ ด้วยกระบวนการทางความร้อนภายใต้สภาวะปราศจากอากาศ โดยได้ผลิตภัณฑ์ 3 สถานะ คือ แก๊ส ของแข็ง และของเหลว กระบวนการไพโรไลซิสมีด้วยกันทั้งหมด 5 ประเภท โดยยึดถืออุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และเวลาคงอยู่ของของแข็ง เป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภท

2.2.2.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis process) หรือคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อนในสภาพอับอากาศ กระบวนการที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งหลายชั่วโมงหรืออาจนานเป็นวัน ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์มีใกล้เคียงกันทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

2.2.2.2 กระบวนการไพโรไลซิสแบบกลาง (Intermediate pyrolysis process) เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนกับชีวมวลที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส โดยมีเวลาคงอยู่ของไอน้ำประมาณ 10-30 วินาที โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลวย้อยละ 50 ขณะที่ของแข็งและแก๊สมีประมาณร้อยละ 25

2.2.2.3 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis process) เป็นกระบวนการที่เร่งอุณหภูมิให้สูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับแบบช้าโดยมีอัตราการเร่งที่นาทีละ 10-100 องศาเซลเซียส อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์อยู่ระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส สารระเหยที่ได้ต้องปล่อยออกทันทีหรือให้อยู่ในปฏิกรณ์ไม่เกิน 2-3 วินาที แก๊สผ่านออกถูกควบแน่นอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้ของเหลวในปริมาณที่สูงที่สุด ซึ่งปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลวย้อยละ 50-60 ของแข็งร้อยละ 25-30 และแก๊สร้อยละ 15-20

2.2.2.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านและไม้ให้เป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสภาพแก๊สที่เรียกว่า แก๊สโปรดิวเซอร์ (Producer gas) ซึ่งยังคงมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิง แก๊สที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์แบบการสันดาปภายในหรือใช้ในกระบวนการให้ความร้อนต่าง ๆ

2.2.2.5 กระบวนการทอรรีแฟกชัน (Torrefaction process) เป็นกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 200-300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์หลักจะเป็นของแข็ง สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงแข็งร่วมกับถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน

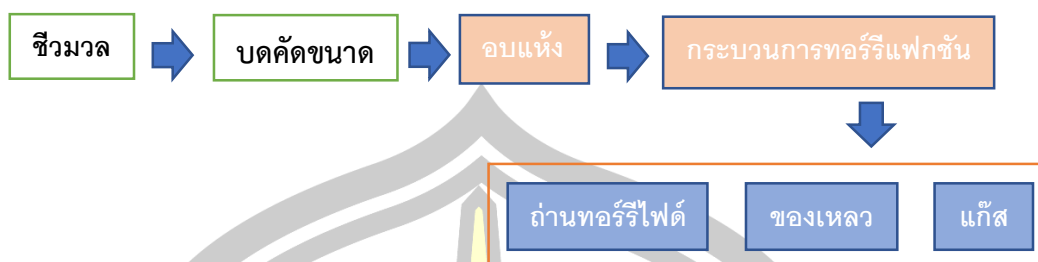
2.3 กระบวนการทอรรีแฟกชัน

กระบวนการทอรรีแฟกชัน คือกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 200-300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศ ใช้แก๊สเฉื่อยในระบบ เวลาคงอยู่ของของแข็งประมาณ 1 ถึง 120 นาที [38] สีของชีวมวลที่ผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มถึงภาพประกอบ 4 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งในกระบวนการทอรรีแฟกชัน ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของถ่านทอรรีไฟต์ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบของชีวมวลแบ่งออกเป็น ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงที่ และเถ้า ซึ่งความชื้นเป็นส่วนที่ไม่ให้พลังงานระเหยที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เฮมิเซลลูโลสให้พลังงานต่ำสลายตัวได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส [39] การระเหยของความชื้นและการสลายของเฮมิเซลลูโลสส่งผลให้ถ่านทอรรีไฟต์มีค่าความร้อนสูงขึ้น



ภาพประกอบ 4 แกลบ (ก) ก่อนผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชัน เทียบกับหลังผ่านกระบวนการที่อุณหภูมิ (ข) 250 (ค) 280 และ (ง) 310 องศาเซลเซียส [40]

ขั้นตอนการดำเนินการโดยทั่วไปสำหรับกระบวนการทอรรีแฟกชันแสดงดัง ภาพประกอบ 5 กระบวนการเริ่มจากนำชีวมวลมาบดคัขนาด ซึ่งขนาดของชีวมวลต้องเหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์นั้น ๆ หลังจากบดคัขนาดก็นำชีวมวลไปอบไล่ความชื้น จากนั้นป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ ถ่านทอรรีไฟต์ของเหลว และแก๊ส



ภาพประกอบ 5 กระบวนการทอรรีไฟต์

เมื่อนำถ่านหินและถ่านทอรรีไฟต์มาเปรียบเทียบกับกันโดยการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และค่าความร้อนสูง (Heating value) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน ส่วนการวิเคราะห์แบบประมาณ ได้แก่ ปริมาณเถ้า (Ash) และคาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) ผลที่ได้แสดงดังตาราง 3

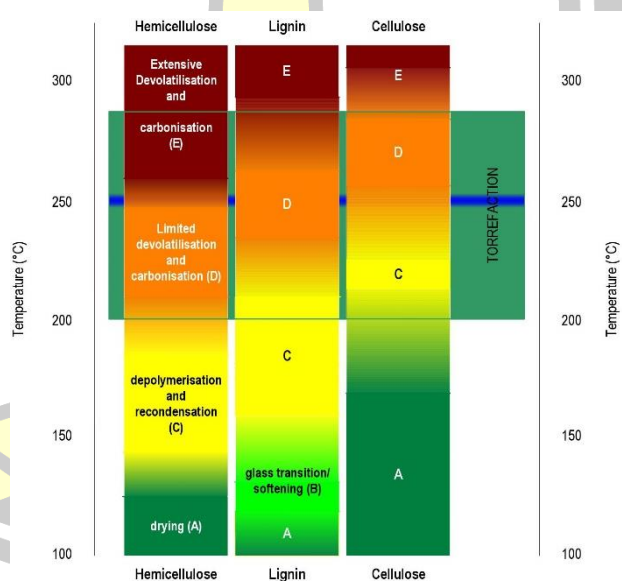
ตาราง 3 สมบัติของถ่านหินและถ่านทอรรีไฟต์ [29, 41]

สมบัติ	ถ่านหิน	ถ่านทอรรีไฟต์
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก,ฐานแห้ง)		
คาร์บอน	64-78	48-59
ไฮโดรเจน	4-5	4.9-5.5
ออกซิเจน	4-10	38-44
ไนโตรเจน	1-2	0.9-1.7
กำมะถัน	0.7-4.9	-
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก,ฐานเปียก)		
ความชื้น	2-4	1-4
สารระเหย	32-37	45-70
เถ้า	2-19	4-6
คาร์บอนคงที่	44-49	23-51
ค่าความร้อนสูงฐานแห้ง (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	27-32	20-27

จากตาราง 3 พบว่าสมบัติของถ่านหินกับถ่านทอรรีไฟด์มีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนคงที่ และค่าความร้อนสูง ข้อดีของถ่านทอรรีไฟด์เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินคือมีปริมาณกำมะถัน ซึ่งในชีวมวลมีปริมาณกำมะถันอยู่น้อย ดังนั้นถ่านทอรรีไฟด์จึงเหมาะที่นำมาเป็นวัตถุดิบหรือนำมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อใช้ทดแทนถ่านหิน

2.4 กลไกการสลายตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ของชีวมวล

ชีวมวลประกอบด้วยโครงสร้างพอลิเมอร์ 3 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยทั่วไปโครงสร้างพอลิเมอร์ของชีวมวลประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ แต่มีค่าพลังงานต่ำกว่า เซลลูโลสและลิกนิน กระบวนการทอรรีแฟกชันมีความมุ่งเน้นเพื่อที่จะกำจัดความชื้นและเฮมิเซลลูโลส ออกให้ได้มากที่สุด โดยไม่ทำให้เซลลูโลสและลิกนินสูญเสียมากนัก เนื่องจากเซลลูโลสและลิกนินมีค่าพลังงานที่สูง จากภาพประกอบ 6 แสดงให้เห็นว่าช่วงที่ดีที่สุดที่ทำให้กำจัดความชื้นและเฮมิเซลลูโลส ออกได้ดีคือ ที่อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส



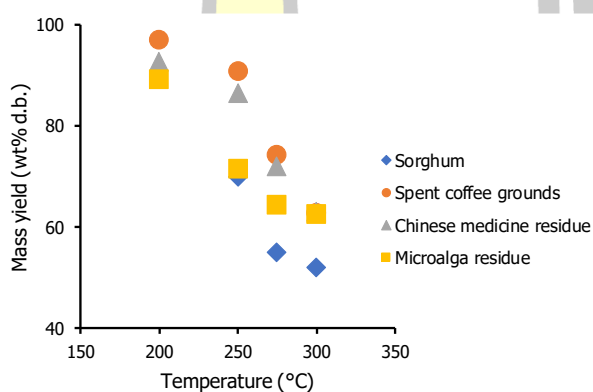
ภาพประกอบ 6 กลไกการสลายตัวของโครงสร้างพอลิเมอร์ของชีวมวล [39]

2.5 ผลของตัวแปรของกระบวนการทอรีแฟกชัน

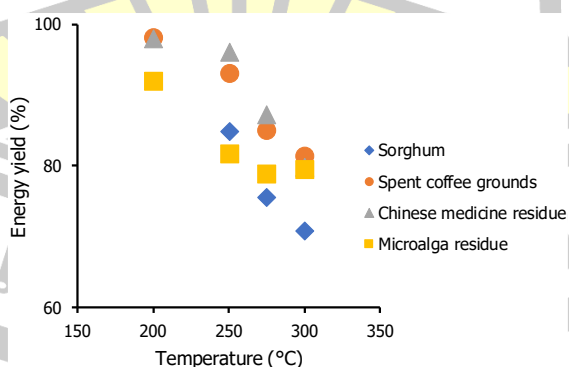
ส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงตัวแปรในการดำเนินงานบางอย่างที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการทอรีแฟกชัน

2.5.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของทอรีแฟกชันเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อการย่อยสลายโครงสร้างของชีวมวล เนื่องจากการย่อยสลายของชีวมวลขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ภาพประกอบ 7 แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรีไฟต์ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและภาพประกอบ 8 ก็แสดงให้เห็นว่าปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรีไฟต์ลดลงด้วย การเพิ่มอุณหภูมิสูงให้ขึ้นทำให้ปริมาณผลได้เชิงมวลและปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรีไฟต์ลดลงก็จริง แต่ทำให้ความหนาแน่นของพลังงานสูงขึ้น



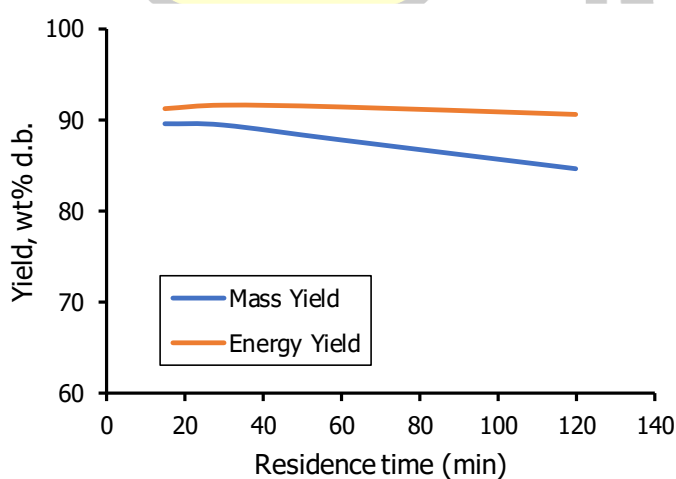
ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรีไฟต์ [29, 42, 43]



ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรีไฟต์ [29, 42]

2.5.2 เวลาคงอยู่ของของแข็ง

เวลาคงอยู่ของของแข็งในเครื่องปฏิกรณ์แบ่งได้เป็น 2 ช่วง ช่วงแรกหากเป็นการให้ความร้อน จากอุณหภูมิห้องไปยังอุณหภูมิที่ต้องการ เช่น 200 หรือ 300 องศาเซลเซียส เวลาในช่วงการเพิ่มของอุณหภูมิต่อคล้อยกับอุณหภูมิที่ต้องการและอัตราการให้ความร้อนของระบบ เรียกเวลาช่วงนี้ว่า Heat up time เมื่อถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วช่วงเวลาตั้งแต่ช่วงนี้เป็นต้นไปเรียกว่า Holding time เวลาคงอยู่ของของแข็งทั้งหมดเรียกว่า Residence time คือ Heat up time + Holding time แต่บางงานให้อุณหภูมิถึงอุณหภูมิที่ต้องการก่อนค่อยป้อนชีวมวลเข้าไปยังปฏิกรณ์ เวลาคงอยู่ของของแข็งนั้นจะไม่รวมเวลาในช่วงการให้อุณหภูมิช่วงแรก เวลาคงอยู่ของของแข็งของชีวมวลที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแพกซ์ มีผลต่อการย่อยสลายทางความร้อนของชีวมวล นั้นหมายความว่า การใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งเป็นระยะเวลาานนี้ส่งผลให้ปริมาณผลได้เชิงมวลและปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ลดลง แต่ในทางกลับกันความหนาแน่นเชิงพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นที่ต้องการสำหรับการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแข็ง ภาพประกอบ 9 แสดงให้เห็นถึงผลของเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ลดลง เมื่อเวลาคงอยู่ของของแข็งนานขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลของเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ก็ไม่เด่นชัดเท่ากับผลของอุณหภูมิต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ดังภาพประกอบ 7 และ ภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 9 ผลของเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 25 องศาเซลเซียสต่อนาที [44]

2.5.3 ชนิดของชีวมวล

ชนิดของชีวมวลก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่อกระบวนการการทอรรีแฟกชัน เนื่องจากชีวมวลแต่ละชนิดมีโครงสร้างพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน โครงสร้างพอลิเมอร์ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสสามารถย่อยสลายได้มากที่สุดในช่วงอุณหภูมิที่ใช้สำหรับกระบวนการทอรรีแฟกชัน ดังนั้นชีวมวลชนิดใดมีปริมาณของเฮมิเซลลูโลสอยู่ เยอะก็มีโอกาสที่จะสูญเสียปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์สูงกว่าชีวมวลที่มีปริมาณของ เฮมิเซลลูโลสน้อย

อย่างไรก็ตามสิ่งที่น่าสนใจคือไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสเท่า ๆ กัน เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชันภายใต้สภาวะเดียวกันกลับได้ปริมาณผลได้เชิงมวลที่ แตกต่างกันมาก [45] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าที่ปริมาณผลได้เชิงมวลที่แตกต่างกันนี้เกิดจาก ปริมาณไซแลน (xylan) [46-48] ที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสที่แตกต่างกัน ปริมาณของ ไซแลนของไม้เนื้อแข็งมีร้อยละ 80-90 ขณะที่ไม้เนื้ออ่อนมีเพียงร้อยละ 15-30 [49]

2.6 เทคโนโลยีทอรรีแฟกชันในปัจจุบัน

เทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันมีหลายอย่าง มีการพัฒนาขึ้นเพื่อการใช้งาน สำหรับการปรับคุณสมบัติของชีวมวล สามารถใช้กับชีวมวลหลากหลายชนิด เช่น ชี้เลื้อย แกลบ ต้นไธ้ค ใบอ้อย ฟางข้าว และอื่น ๆ ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบมีทั้งเล็กและใหญ่ ซึ่งมีเทคโนโลยีของ เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันเพียงไม่กี่เทคโนโลยีเท่านั้นที่สามารถดำเนินการด้วยวัตถุดิบที่มีขนาด อนุภาคขนาดใหญ่ได้ ซึ่งหมายความว่า การเลือกเทคโนโลยีต้องเลือกตามลักษณะของวัตถุดิบ

ที่ผ่านมา มีหลายบริษัทให้ความสนใจและสร้างเครื่องปฏิกรณ์หลากหลายแบบ เช่น เครื่อง ปฏิกรณ์แบบถังหมุน เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหลายชั้น เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีเบด เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ขนาดกะทัดรัด และเครื่องปฏิกรณ์แบบสั้น แสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์และบริษัทที่เกี่ยวข้อง [50]

เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์	บริษัท
เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน	CDS (UK), Torr-Coal (NL), BIO3D (FR), EBES AG (AT), 4Energy Invest (BE), BioEndev/ ETPC (SWE), Atmosclear S.A. (CH), Andritz, Earthcare Products (USA)
เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู	BTG (NL), Blake (NL), FoxCoal (NL), Agri-tech Producers (US)

เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์	บริษัท
เครื่องปฏิกรณ์ทอร์เบด	Tell (NL)
เครื่องปฏิกรณ์แบบสั้น	RevTech (France)

2.6.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน

ภาพประกอบ 10 คือเครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน (Rotary drum) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องและสามารถใช้สำหรับการปรับปรุงสมบัติชีวมวล ในระหว่างกระบวนการชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สามารถรับความร้อนโดยตรงหรือโดยทางอ้อม เช่น จากไอน้ำร้อนยิ่งยวดหรือจากแก๊สไอเสียที่เกิดจากการเผาไหม้ของสารระเหยก็ได้ [51]

กระบวนการทอร์รีแฟกชันสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันประเภทนี้สามารถควบคุมการดำเนินการได้โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ความเร็วในการหมุน ความยาวของท่อปฏิกรณ์ และความชันของเครื่องปฏิกรณ์ ในระหว่างกระบวนการการหมุนทำให้เกิดการผสมของอนุภาคของชีวมวล ข้อจำกัดของเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันแบบถังหมุนคือการขยายกำลังการผลิต [52]

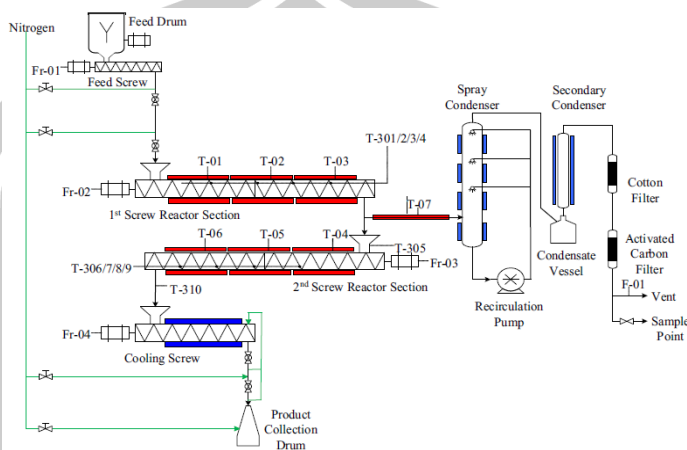


ภาพประกอบ 10 เครื่องปฏิกรณ์แบบถังหมุน [53]

2.6.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู

ภาพประกอบ 11 คือเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Screw reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องประกอบด้วยสกรูหนึ่งหรือหลายตัวก็ได้ สกรูทำหน้าที่ลำเลียงชีวมวลผ่านเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์นี้สามารถติดตั้งได้ทั้งแนวตั้งและแนวนอน เวลาคงอยู่ของของแข็งซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวและความเร็วในการหมุนของสกรู สำหรับกำลังการผลิตที่ไม่สูงเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูมีราคาไม่แพงมากนัก ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดสกรู คือมีความทนทานและเป็น

เครื่องปฏิกรณ์เป็นที่รู้จักกันดี ข้อเสียของเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู คือมีข้อจำกัดในด้านการขยายกำลังการผลิต การผสมกันระหว่างกระบวนการไม่ดีมากนัก และการทำความสะอาดระบบ [52]

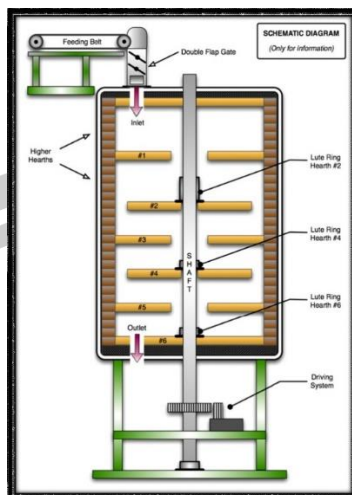


ภาพประกอบ 11 เครื่องปฏิกรณ์ชนิดสกรู [17]

2.6.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหลายชั้น

ภาพประกอบ 12 คือเครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหลายชั้น (Herreshoff oven/ Multiple Hearth Furnace (MHF)) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องภายในเครื่องปฏิกรณ์แบ่งเป็นหลายชั้น ชีวมวลถูกป้อนจากด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์และถูกผลักไปทางด้านล่าง ในระหว่างกระบวนการชีวมวลที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์อาจได้รับความร้อนโดยตรงจากหัวเผาแก๊ส การควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ของแต่ละชั้นแตกต่างกัน โดยอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทีละชั้นตั้งแต่ 220-300 องศาเซลเซียส ทั่วไปแล้วเวลาคงอยู่ของของแข็งจากด้านบนถึงล่างคือ 30 นาที เทคโนโลยีนี้สามารถใช้กับชีวมวลที่มีขนาดอนุภาคได้หลายขนาด เช่น ชี้อเลื่อยและไม้ขนาดใหญ่ [52]

พหุ ประ โท ชีวะ



ภาพประกอบ 12 เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหลายชั้น [52]

2.6.4 เครื่องปฏิกรณ์ทอร์เบต

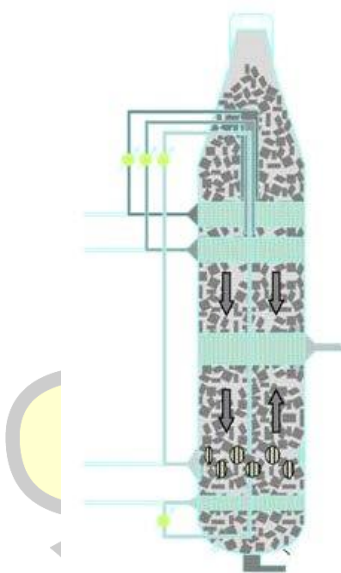
ภาพประกอบ 13 คือเครื่องปฏิกรณ์ทอร์เบต (Torbed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่ผ่านมา มีการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 5 ถึง 7 เมตร ภายในเครื่องปฏิกรณ์มีการเป่าความร้อนจากด้านล่างขึ้นไปยังด้านบน ทำให้อุณหภูมิของมวลภายในเครื่องปฏิกรณ์มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวนอน ส่งผลให้มวลหมุนวนและได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง การถ่ายเทความร้อนที่ดีนี้ส่งผลให้ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งน้อย (ประมาณ 80 วินาที) ทำให้เครื่องปฏิกรณ์มีขนาดค่อนข้างเล็ก อย่างไรก็ตามความยืดหยุ่นในการป้อนชีวมวลของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดอนุภาคของวัตถุดิบคือต้องใช้ขนาดเล็ก [52]



ภาพประกอบ 13 เครื่องปฏิกรณ์ทอร์เบต [54]

2.6.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ขนาดกะทัดรัด

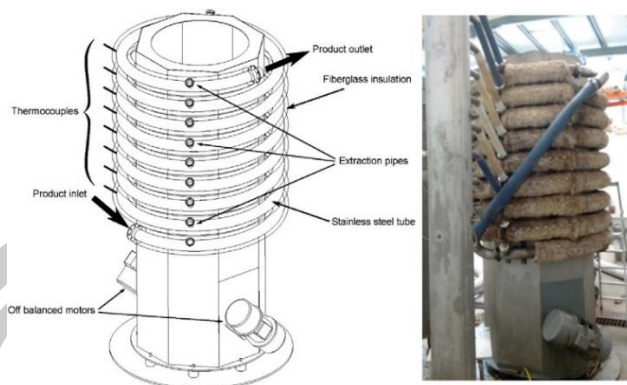
ภาพประกอบ 14 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ขนาดกะทัดรัด (Compact moving bed) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ชีวมวลถูกป้อนจากด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์และค่อย ๆ เคลื่อนที่ลงด้านล่าง ในระหว่างกระบวนการชีวมวลได้รับความร้อนโดยใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง การให้ความร้อนให้จากด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ไปยังด้านบนซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทาง การป้อนของชีวมวล เวลาคงอยู่ของของแข็ง 30 - 40 นาที อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งได้ถูกส่งออกที่ด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนสารระเหยและแก๊สถูกส่งออกที่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ [52]



ภาพประกอบ 14 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดเคลื่อนที่ขนาดกะทัดรัด [52]

2.6.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

ภาพประกอบ 15 คือเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น (Vibrating Reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง การให้ความร้อนโดยใช้ไฟฟ้า เครื่องปฏิกรณ์สามารถติดตั้งได้ทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง (แบบเกลียว) เครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งในแนวตั้งท่อปฏิกรณ์มีลักษณะเป็นเกลียว ชีวมวลถูกป้อนเข้าจากด้านล่างจากนั้นเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน ในระหว่างการเกิดการผสมคลุกเคล้ากันในท่อปฏิกรณ์ที่ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม การให้ความร้อนสามารถทำได้โดยการต่อไฟฟ้าเข้ากับท่อปฏิกรณ์ จากนั้นท่อปฏิกรณ์ก็จะร้อนและนำความร้อนนั้นส่งไปยังชีวมวลที่อยู่ท่อปฏิกรณ์ เวลาคงอยู่ของของแข็งสามารถกำหนดได้จากการปรับความถี่และมุมของมอเตอร์สั่นทั้งสองตัว [24]



ภาพประกอบ 15 เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น [24]

2.6.7 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีทอร์รีแพกซ์

เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของเทคโนโลยีทอร์รีแพกซ์ในด้านของการให้ความร้อน การผสม การแลกเปลี่ยนความร้อน ความสม่ำเสมอ และความยืดหยุ่นในการป้อนชีวมวลของเทคโนโลยี Rotating drum Screw type MHF Torbed reactor Compact moving bed Belt dryer และ Vibrating ดังตาราง 5

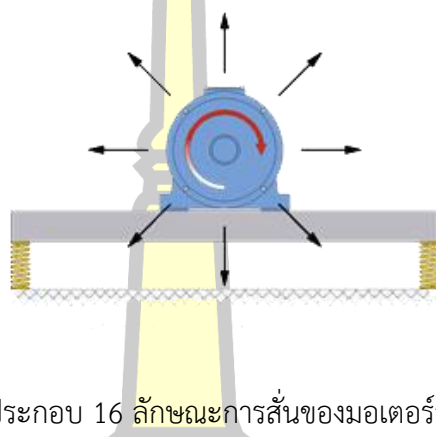
ตาราง 5 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีทอร์รีแพกซ์ [25]

เทคโนโลยี	การให้ความร้อน	การผสม	การแลกเปลี่ยนความร้อน	ความสม่ำเสมอ	ความยืดหยุ่นในการป้อนชีวมวล
Rotating drum	แก๊ส	ดี	ดี	ปานกลาง	ดี
Screw type	น้ำมันร้อน	พอใช้	ดีมาก	ปานกลาง	พอใช้
MHF	แก๊ส	ดี	ดี	ปานกลาง	ดี
Torbed reactor	แก๊ส	ดี	ดีมาก	ปานกลาง	ไม่ดี
Compact moving bed	แก๊ส	ไม่ดี	พอใช้	พอใช้	พอใช้
Vibrating	กระแสไฟฟ้า	ดีมาก	ดีมาก	ดี	ดี

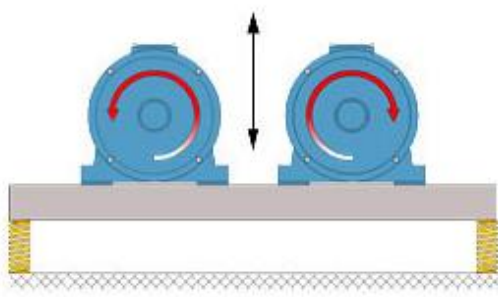
จากตาราง 5 เห็นได้ว่าเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแพกซ์แบบสั่น (Vibrating reactor) มีข้อดีโดยรวมมากกว่าเทคโนโลยีอื่น ๆ จึงเป็นที่มาของการเลือกเทคโนโลยีนี้มาใช้ในการงานวิจัยนี้

2.7 การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่น

เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่นติดตั้งมอเตอร์สั่น 2 ตัว ในทิศทางการหมุนสวนทางกัน ซึ่งมอเตอร์สั่นเป็นอุปกรณ์สร้างแรงสั่นที่มีการกระจายแรงออกไปรอบทิศทางดังภาพประกอบ 16 หากติดตั้งมอเตอร์สั่นให้มีทิศทางการหมุนสวนทางกันทำให้เกิดแรงสั่นในแนวเส้นตรงดังภาพประกอบ 17 ซึ่งสามารถนำแรงที่เป็นเส้นตรงนี้ไปใช้งานการลำเลียงวัสดุได้



ภาพประกอบ 16 ลักษณะการสั่นของมอเตอร์สั่น [55]



ภาพประกอบ 17 การติดตั้งมอเตอร์สั่นให้มีทิศทางการหมุนสวนทางกัน [55]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์สามารถแบ่งการใช้เครื่องปฏิกรณ์ได้เป็น 2 หัวข้อดังนี้

2.8.1 กระบวนการทอรรีแฟกซ์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง

เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (Fixed bed reactor) [8, 9] ใช้อุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 0 ถึง

1,140 นาที [26-30] ข้อจำกัดเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งคือใช้ต้องชีวมวลที่มีขนาดเล็กที่ 75 ถึง 297 ไมโครเมตร [26-30] การเตรียมชีวมวลที่มีขนาดเล็กนี้ต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการเตรียมชีวมวลที่มีขนาดใหญ่และทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นไปด้วย ในด้านการพัฒนาไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรมนั้นสามารถทำได้ยาก เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งต้องทำเป็นแบบกะและยังใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งนานมากจึงนำไปสู่การพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องดังหัวข้อถัดไป

2.8.2 กระบวนการทอรรีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Reactor) ซึ่งมีการสร้างเครื่องปฏิกรณ์หลายแบบ เช่น แบบสกรู (Screw reactor) [10-17] แบบหมุน (Rotating reactor) [18-21] และแบบเตาหลายชั้น (Herreshoff oven/ Multiple Hearth Furnace (MHF)) [22, 23] ใช้อุณหภูมิ 200 ถึง 320 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 6 ถึง 120 นาที [10-15, 17-19, 21, 24] สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องนี้สามารถป้อนชีวมวลที่มีขนาดใหญ่ได้ ซึ่งการเตรียมชีวมวลที่มีขนาดใหญ่นั้นสามารถทำได้ง่าย และยังสามารถใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งน้อยกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ซึ่งเวลาคงอยู่ของของแข็งขึ้นอยู่กับการผสมกันระหว่างกระบวนการ การได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง เป็นต้น การออกแบบและการเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติของชีวมวลให้มีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินได้ เช่น ถ่านหินลิกไนต์ [24, 29, 30] บิทูมินัส [30]

2.8.3 สรุป

เห็นได้ว่ากระบวนการทอรรีแฟกชันสามารถผลิตถ่านทอรรีไฟต์โดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ได้หลายแบบ ถ่านทอรรีไฟต์บางการผลิตมีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์และบิทูมินัส ซึ่งถ่านหินสองชนิดนี้มีการใช้ในโรงงานผลิตไฟฟ้าถ่านหิน หากมีการปรับปรุงสมบัติที่เพียงพอถ่านทอรรีไฟต์สามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าร่วมกับถ่านหินได้

ถึงแม้กระบวนการทอรรีแฟกชันสามารถปรับปรุงสมบัติชีวมวลให้ใกล้เคียงกับถ่านหินได้ แต่ในกระบวนการยังใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งที่นาน หากมีการปรับปรุงกระบวนการให้มีการใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งที่สั้นลงได้แต่ยังได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกับการใช้เวลาคงอยู่ที่ยาว ซึ่งการลดการใช้เวลาคงอยู่ให้สั้นลงนี้ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตและสามารถขยายกำลังการผลิตได้ง่ายยิ่งขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่ศึกษาการลดการใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งให้สั้นลง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

การผลิตถ่านทอรรีไฟต์สำหรับงานวิจัยนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เนื่องจากชีวมวลที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบมีขนาดใหญ่และมีความชื้นสูง ดังนั้นก่อนนำไปเป็นวัตถุดิบในการทดลองต้องนำชีวมวลนั้นไปผ่านการเตรียมก่อน ซึ่งขั้นตอนเริ่มจากการบดคัดขนาดชีวมวลโดยใช้เครื่องบดที่มีขนาดรูตะแกรงเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร นำชีวมวลที่ผ่านการบดคัดขนาดแล้วไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำชีวมวลที่ผ่านการเตรียมแล้วไปผ่านกระบวนการทอรรีไฟต์แพกซ์ต่อไปโดยมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 ขั้นตอนการดำเนินการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟต์แพกซ์แบบสั่น

3.1.1.1 ชั่งชีวมวลที่เตรียมแล้ว 300 กรัม ใส่ลงในถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน

3.1.1.2 กำหนดตามเงื่อนไขการทดลองดังตาราง 6

3.1.1.3 กำหนดเวลาคงอยู่ตามเงื่อนไขโดยดูได้ที่ภาพประกอบ 18

3.1.1.4 บันทึกน้ำหนักก่อนการทดลอง ได้แก่ ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์และชุดควบคุม

3.1.1.5 เริ่มให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิได้ตามเงื่อนไขการทดลอง

3.1.1.6 เริ่มสั่นโดยการกดปุ่มเริ่ม (Start) ที่เครื่องปรับความถี่ของมอเตอร์สั่น

(Inverter)

3.1.1.7 ป้อนชีวมวลจนกระทั่งชีวมวลหมดถังเก็บชีวมวล

3.1.1.8 บันทึกน้ำหนักหลังการทดลอง ได้แก่ ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์และชุดควบคุม

3.1.2 ขั้นตอนการดำเนินการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีไฟต์แพกซ์แบบสกรู

3.1.2.1 ชั่งชีวมวลที่เตรียมแล้ว 300 กรัม ใส่ลงในถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน

3.1.2.2 กำหนดตามเงื่อนไขการทดลองดังตาราง 7

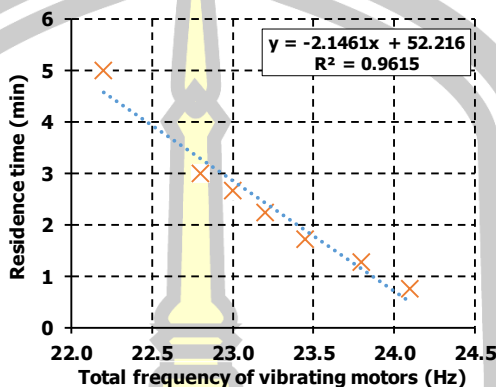
3.1.2.3 กำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ชุดลำเลียงที่ 10 รอบต่อนาที ซึ่งจะได้

เวลาคงอยู่ของของแข็งที่ 3 นาที

3.1.2.4 ป้อนชีวมวลจนกระทั่งชีวมวลหมดถังเก็บชีวมวล

3.1.2.5 บันทึกน้ำหนักหลังการทดลอง ได้แก่ ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์และชุดควบคุม

ปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาคงอยู่ของของแข็งของเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั่นนั้นมีหลายปัจจัย แต่ปัจจัยหลัก ๆ ที่ส่งผลต่อเวลาคงอยู่ของของแข็งมากที่สุดคือ ความถี่ของมอเตอร์สั่น แสดงดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 ผลของความถี่ของมอเตอร์สั่นต่อเวลาคงอยู่ของของแข็ง

จากภาพประกอบ 18 แสดงให้เห็นว่าความถี่ของมอเตอร์สั่นกับเวลาคงอยู่ของของแข็งมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเส้นตรง สามารถหาได้จากสมการ $Y = -2.1461X + 52.216$ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสนใจ $R^2 = 0.9615$ เมื่อ Y คือเวลาคงอยู่ของของแข็ง และ X คือความถี่ของมอเตอร์สั่น

3.2 แผนการทดลอง

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั่น ซึ่งมวลที่ใช้คือไม้กระถินยักษ์ อุณหภูมิที่ใช้คือ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งที่ 1 3 และ 5 นาที ซึ่งมวลที่ใช้ในการทดลองต้องทำการเตรียมโดยการบดขีดขนาดให้มีขนาดเล็กกว่ารูตะแกรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 มิลลิเมตร อบอุ่นความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนรวม 4 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิความแน่นแก๊สจากกระบวนการที่ 30 องศาเซลเซียส อัตราป้อนชีวมวล 1.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และการทดลองแต่ละการทดลองใช้ชีวมวล 300 กรัม หลังจากเตรียมชีวมวลเสร็จแล้วจึงนำมาผ่านกระบวนการทอรรีแฟกชัน ตัวแปรในการออกแบบแผนการทดลองแสดงดังตาราง 6 ซึ่งเป็นแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) จำนวนการทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง ส่วนการทดลองที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสกรูใช้ชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว ใบอ้อย และไม้กระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิ 280 องศา

เซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที จำนวนการทดลองทั้งหมด 3 การทดลอง แสดงดังตาราง 7 เพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั่น

ตาราง 6 แผนการทดลองสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั่น

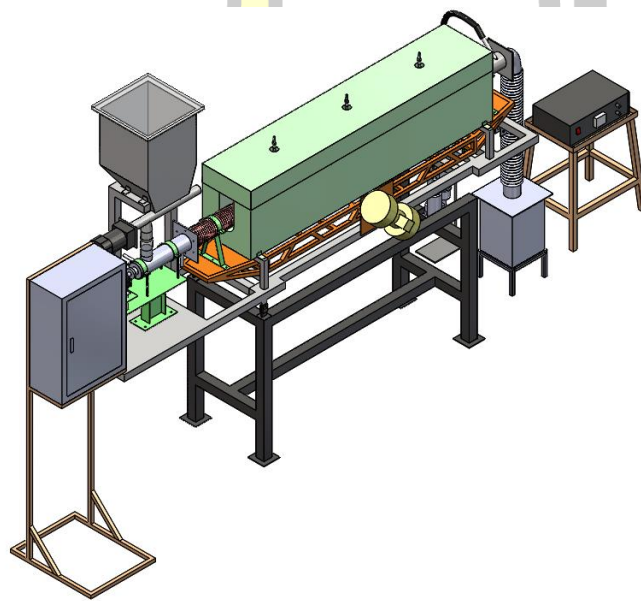
ชีวมวล	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาคงอยู่ของของแข็ง (นาที)
ไม้กระถินยักษ์	260	1
		3
		5
		1
		3
ฟางข้าว	280	5
		1
		3
		5
		3
ใบอ้อย	280	3
		3

ตาราง 7 แผนการทดลองสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสกรู

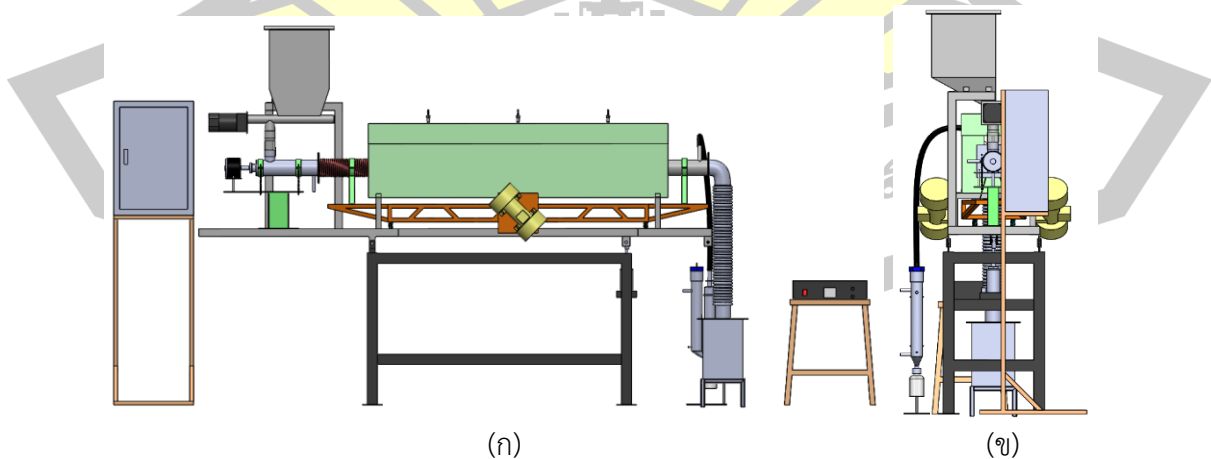
ชีวมวล	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลาคงอยู่ของของแข็ง (นาที)
ไม้กระถินยักษ์	280	3
ฟางข้าว		
ใบอ้อย		

3.3 เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่น

ก่อนสร้างเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่นผู้วิจัยได้ทำการจำลองโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORK เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการสร้าง รายละเอียดหลักของเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่น ได้แก่ ท่อปฏิกรณ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.32 เซนติเมตร หนา 0.15 เซนติเมตร และยาว 1,500 เซนติเมตร ถึงเก็บชีวมวลสามารถบรรจุได้ 32 ลิตร และถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์สามารถบรรจุได้ 12 ลิตร ภาพรวมเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่นที่จำลองด้วยโปรแกรม SOLIDWORK แสดงดังภาพประกอบ 19 และภาพประกอบ 20



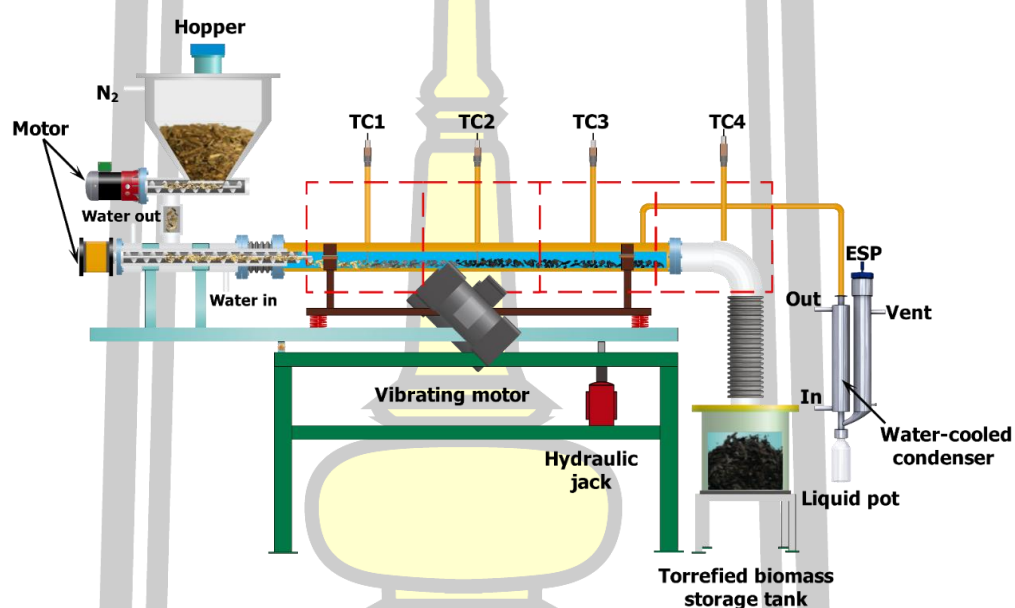
ภาพประกอบ 19 ภาพรวมของเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่น



ภาพประกอบ 20 เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่น ก) ด้านหน้า และ ข) ด้านข้าง

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทอรรีแฟกชันแบบสั่น

อุปกรณ์หลัก ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั่นแบ่งออกเป็น 7 ชั้นส่วน คือ ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน (Hopper) มอเตอร์ (Motor) ท่อปฏิกรณ์ (Reactor) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple, TC) มอเตอร์สั่น (Vibrating motor) ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์ (Torrefied biomass storage tank) ชุดควบแน่นด้วยน้ำและอุปกรณ์กรองด้วยไฟฟ้า (Water-cooled condenser and ESP) โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาแสดงดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั่น

3.4.1 ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน

ภาพประกอบ 22 คือถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บชีวมวลที่ผ่านการคัดขนาดและการอบแห้งเพื่อป้อนเข้าสู่เครื่องทอรรีแฟกชันแบบสั่น ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อนนี้สามารถจุได้ 32 ลิตร วัสดุทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความแข็งแรงและสามารถทนอุณหภูมิได้สูง บริเวณฝาปิดด้านบนทำมาจากอะคริลิกใสที่สามารถมองเห็นชีวมวลที่อยู่ในถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อนได้ ที่ด้านหลังของถังเก็บนี้มีทางเข้าสำหรับไวดิเมทิลไนโตรเจนให้กับระบบ 1 จุด



ภาพประกอบ 22 ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน

3.4.2 มอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนสกรูเพื่อลำเลียงชีวมวลประกอบด้วยมอเตอร์ 2 ตัว ดังภาพประกอบ 23 มอเตอร์ (ก) ใช้ไฟกระแสสลับ มีชุดทดกำลัง และสามารถปรับความเร็วรอบได้ มอเตอร์นี้มีไว้สำหรับควบคุมอัตราป้อนของชีวมวล สาเหตุที่เลือกใช้มอเตอร์ประเภทนี้เนื่องจากขนาดชีวมวลที่ใช้ในการดำเนินการมีขนาดใหญ่ ซึ่งในระหว่างดำเนินการชีวมวลอาจติดที่สกรูได้ ดังนั้นต้นกำลังควรที่จะมีแรงบิดที่สูง มอเตอร์ (ก) ติดตั้งต่อกับถังเก็บชีวมวลเต็มป้อนทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับสกรูที่อยู่ภายในถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน มอเตอร์ (ข) ใช้ไฟกระแสตรง สามารถปรับความเร็วรอบได้ เป็นมอเตอร์ประเภทรอบเร็ว มอเตอร์ (ข) ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับสกรูเพื่อป้อนชีวมวลเข้าไปยังท่อปฏิกรณ์



ภาพประกอบ 23 มอเตอร์

3.4.3 ท่อปฏิกรณ์

ท่อปฏิกรณ์ดังภาพประกอบ 24 เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการ ท่อปฏิกรณ์ทำหน้าที่ส่งถ่ายความร้อนไปยังชีวมวลที่ถูกป้อนเข้ามายังท่อปฏิกรณ์ ซึ่งความร้อนได้รับมาจากลาวความร้อนหรือพลังงานความร้อนรูปแบบอื่น เช่น การใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว ชีวมวลหลังจากที่อบแห้งแล้ว หรือใช้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านทอร์รีไฟต์บางส่วน ท่อปฏิกรณ์วัสดุทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.32 เซนติเมตร หนา 0.15 เซนติเมตร และยาว 1,500 เซนติเมตร ที่ด้านปลายของท่อปฏิกรณ์ต่อกับท่อที่สามารถยืดหยุ่นได้เพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือนที่ส่งถ่ายมาจากมอเตอร์สั่น ที่ด้านบนของท่อปฏิกรณ์มีท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลที่เอาไว้สำหรับวัดอุณหภูมิของชีวมวลที่อยู่ภายในท่อปฏิกรณ์มีทั้งหมด 3 ท่อ



ภาพประกอบ 24 ท่อปฏิกรณ์

3.4.4 มอเตอร์สั่น

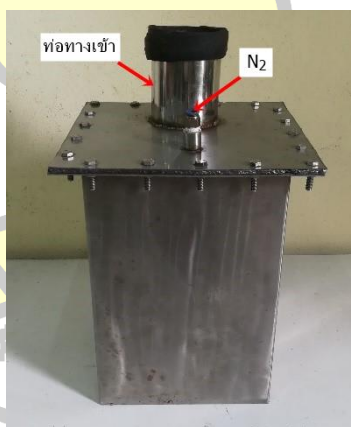
มอเตอร์สั่นรุ่น ZW-3.5 ดังภาพประกอบ 25 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับสร้างแรงสั่นสะเทือนเพื่อส่งถ่ายกำลังไปยังท่อปฏิกรณ์ ซึ่งแรงสั่นสะเทือนนี้เมื่อส่งถ่ายไปยังท่อปฏิกรณ์แล้วจะทำให้ชีวมวลที่อยู่ภายในท่อปฏิกรณ์เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลง และเคลื่อนที่ไปยังท่อปฏิกรณ์ไปยังถังเก็บถ่านทอร์รีไฟต์ที่อยู่ปลายทางออกด้านหนึ่งของท่อปฏิกรณ์



ภาพประกอบ 25 มอเตอร์สัน

3.4.5 ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์

ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์ดังภาพประกอบ 26 คืออุปกรณ์ที่ใช้เก็บถ่านทอรรีไฟต์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชัน วัสดุทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 202 ที่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์สามารถจุได้ 12 ลิตร ที่ตำแหน่งด้านบนของถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7.32 เซนติเมตร และหนา 0.15 เซนติเมตร นอกจากนี้ที่ตำแหน่งด้านบนของถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์ก็ยังมีจุดเชื่อมต่อที่ไว้สำหรับเติมไนโตรเจน เพื่อนำพาแก๊สที่เกิดจากกระบวนการที่มาจากถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์ไปยังชุดควบแน่น



ภาพประกอบ 26 ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์

3.4.6 ชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต

อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับควบแน่นแก๊สที่เกิดจากกระบวนการประกอบด้วย 2 ส่วน คือชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตดังภาพประกอบ 27 ชุดควบแน่นด้วยน้ำทำจากวัสดุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประกอบด้วยท่อ 2 ชั้น ชั้นด้านในมีไว้สำหรับให้แก๊สที่เกิดจากกระบวนการไหล

ผ่าน และชั้นต่อมามีไว้สำหรับหล่อเย็นด้วยน้ำเพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สที่เกิดจากกระบวนการชุดควบแน่นด้วยน้ำนี้มีทางเข้าของน้ำที่ด้านล่างและมีทางออกของน้ำที่ด้านบน ส่วนชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับดักจับแก๊สที่เกิดจากกระบวนการที่ชุดควบแน่นด้วยน้ำไม่สามารถดักจับได้

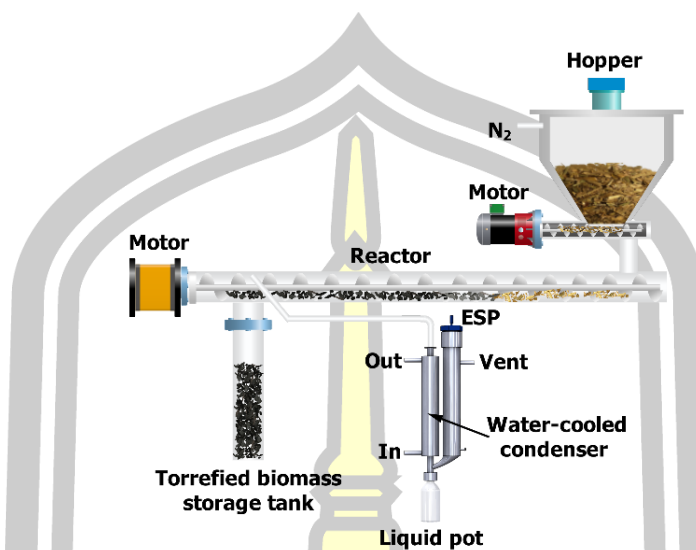


ภาพประกอบ 27 ชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต

3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการทอรรีแฟกชันแบบสกรู

อุปกรณ์หลัก ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสกรูแบ่งออกเป็น 6 ชั้นส่วน คือ 1) ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน 2) มอเตอร์ 3) เตาปฏิกรณ์ 4) สกรูลำเลียง 5) ถังเก็บถ่านทอรรีไฟต์ 6) ชุดควบแน่นด้วยน้ำและอุปกรณ์กรองด้วยไฟฟ้า โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมาแสดงดังภาพประกอบ 28 เครื่องปฏิกรณ์มีขนาด กว้าง x สูง x ยาว เท่ากับ 90 x 190 x 170 เซนติเมตร ถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อนสามารถบรรจุได้ประมาณ 13.5 ลิตร ท่อลำเลียงจากถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และความยาว 15 เซนติเมตร ท่อปฏิกรณ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร และความยาว 130 เซนติเมตร ถังเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร และความยาว 60 เซนติเมตร สามารถบรรจุถ่านทอรรีไฟต์ได้ 2.7 ลิตร ใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนสกรูทั้งหมด 2 ตัว ได้แก่ สกรูถังเก็บชีวมวลเตรียมป้อน และสกรูท่อลำเลียงชีวมวลเข้าไปยังท่อปฏิกรณ์ โดยมอเตอร์ทั้ง 2 ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ ให้ความร้อน

เตาปฏิกรณ์โดยใช้สวดความร้อน การควบคุมเวลาคงอยู่สามารถทำได้โดยการปรับความเร็วของรอบมอเตอร์



ภาพประกอบ 28 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแฟกชันแบบสกรู

3.6 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวลและถ่านทอร์รีไฟต์

งานวิจัยครั้งนี้แบ่งการวิเคราะห์สมบัติของชีวมวลและถ่านทอร์รีไฟต์เป็น 2 ส่วน คือ การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อน (Heating value analysis) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.6.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

3.6.1.1 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 871-82 โดยนำชีวมวลตัวอย่างประมาณ 2-3 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องแล้วอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 103 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักของชีวมวลมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าร้อยละ 0.2 น้ำหนักของชีวมวลตัวอย่างที่หายไปหลังอบคือปริมาณความชื้น

3.6.1.2 สารระเหย (Volatile matter)

สารระเหยวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 872-82 โดยนำชีวมวลตัวอย่างหนัก 1 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องและเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที น้ำหนักของชีวมวลตัวอย่างที่หายไป คือปริมาณความชื้นและสารระเหย ดังนั้นปริมาณสารระเหยคำนวณได้จากปริมาณของชีวมวลตัวอย่างที่หายไปลบด้วยปริมาณความชื้น

3.6.1.3 เถ้า (Ash)

เถ้า คือ สารอนินทรีย์ในชีวมวล ซึ่งปริมาณเถ้าวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E 1755-01 โดยนำชีวมวลไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 575 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง น้ำหนักที่เหลืออยู่คือปริมาณเถ้า

3.6.1.4 คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon)

ปริมาณคาร์บอนคงที่เป็นปริมาณที่จะทราบได้หลังจากรู้ปริมาณของความชื้น สารระเหย และเถ้า เพราะปริมาณคาร์บอนคงที่คำนวณจากปริมาณของชีวมวลตัวอย่างเริ่มต้นลบด้วยปริมาณของความชื้น สารระเหย และเถ้า

3.6.2 การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง

การวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ตามมาตรฐาน ASTM D240 โดยเครื่อง Oxygen Bomb Calorimeter รุ่น 1341 จากบริษัท Parr Instrument Company ดังภาพประกอบ 29 การวิเคราะห์เริ่มต้นจากชั่งน้ำหนักของชีวมวลตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยเผาไหม้แล้ววางลงในถ้วยบอมบ์พร้อมบรรจุออกซิเจน จากนั้นประกอบถ้วยบอมบ์เข้ากับเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์แล้วจุดระเบิดชีวมวลตัวอย่างด้วยเส้นลวดไฟฟ้า หลังการเผาไหม้จะเกิดความร้อนขึ้นภายในถ้วยบอมบ์และถ่ายเทความร้อนนี้ไปยังน้ำ 2 ลิตร ที่ถ้วยบอมบ์แช่อยู่ เมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นปรับเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้สารมาตรฐานจะทราบค่าความร้อนของชีวมวล



ภาพประกอบ 29 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ [56]

พหุ ประถมศึกษา

3.7 การคำนวณปริมาณผลได้เชิงมวลและเชิงพลังงาน

ปริมาณผลได้เชิงมวล (Mass Yield, Y) และเชิงพลังงาน (Energy Yield, EY) เป็นตัวแปรในการประเมินประสิทธิภาพกระบวนการผลิตของกระบวนการทอรรีไฟชั่น สามารถคำนวณเป็นฐานแห้งดังสมการ (1) ถึง (4)

$$Y_S = M_S / (M_B - M_{water}) \times 100\% \quad \dots(1)$$

$$Y_L = (M_L - M_{water}) / (M_B - M_{water}) \times 100\% \quad \dots(2)$$

$$Y_G = 100\% - Y_S - Y_L \quad \dots(3)$$

$$EY_S = Y_S \times (HHV_S / HHV_B) \quad \dots(4)$$

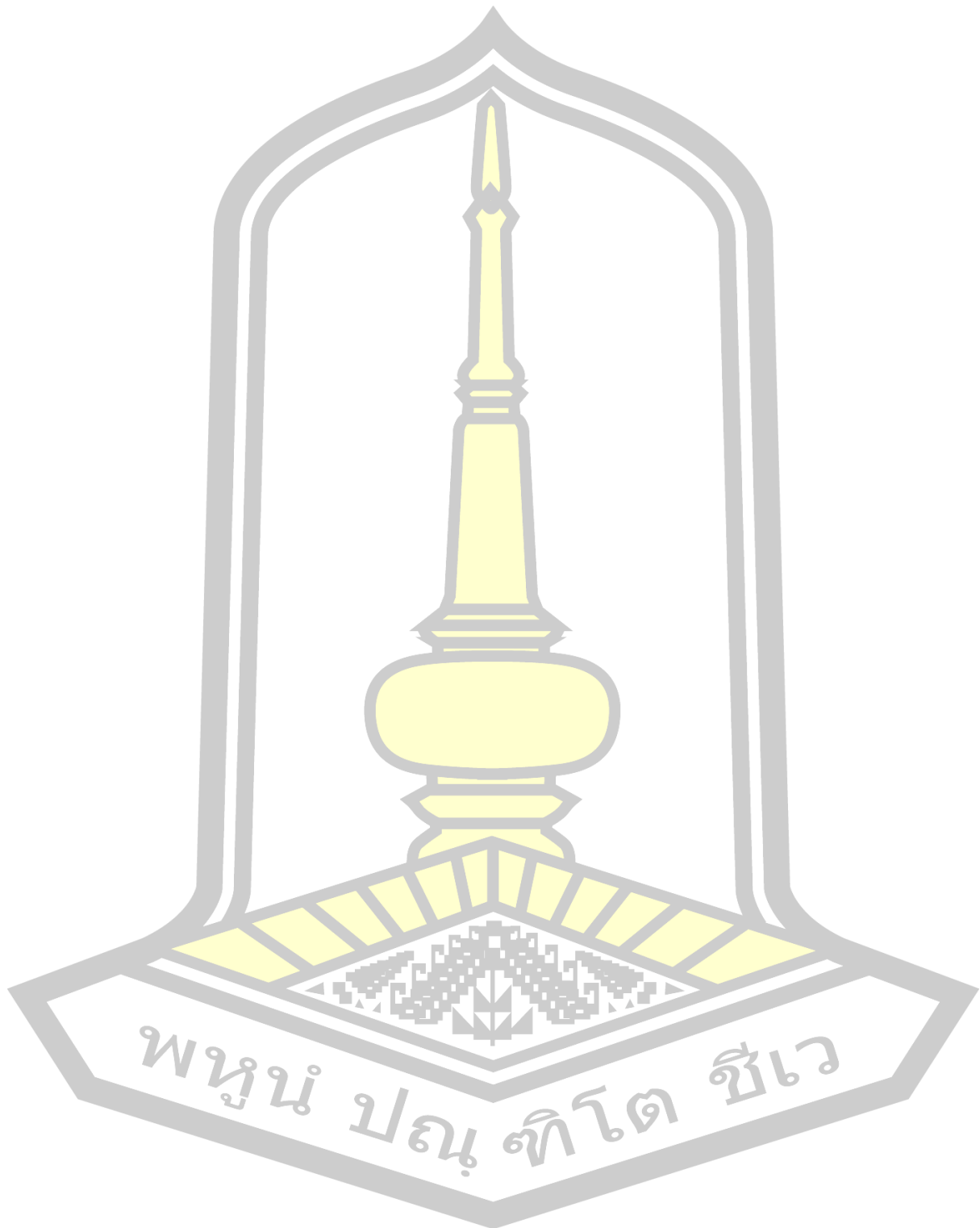
- เมื่อ M_S = น้ำหนักของถ่านทอรรีไฟด์, กรัม
 M_B = น้ำหนักของชีวมวลเริ่มต้น, กรัม
 M_L = น้ำหนักของของเหลว, กรัม
 M_{water} = น้ำหนักของความชื้น, กรัม
 Y_S = ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์, ร้อยละฐานแห้ง
 Y_L = ปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลว, ร้อยละฐานแห้ง
 Y_G = ปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊ส, ร้อยละฐานแห้ง
 EY_S = ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์, ร้อยละฐานแห้ง
 HHV_S = ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์, ฐานแห้ง
 HHV_B = ค่าความร้อนสูงของชีวมวลเริ่มต้น, ฐานแห้ง

3.8 การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน

การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์ (Energy densification, η) คือ ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์ (EY_S) ต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ (Y_S) ดังสมการ (5) การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์หรืออาจเรียกว่า จำนวนเท่าตัวของการเพิ่มค่าความร้อน สามารถคำนวณได้จากค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์ (HHV_S) ต่อค่าความร้อนสูงของชีวมวลเริ่มต้น (HHV_B) การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิต เพราะสามารถบอกได้ถึงประสิทธิภาพของเทคโนโลยีการผลิตได้

$$\eta = EY_S/Y_S = HHV_S/HHV_B$$

...(5)



บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 สมบัติพื้นฐานของชีวมวล

การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของชีวมวลแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์สมบัติแบบประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงที่ และเถ้า การวิเคราะห์สมบัติแบบแยกธาตุ ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ค่าความร้อนสูง ค่าความร้อนต่ำ และความหนาแน่นรวม ผลที่ได้แสดงดังตาราง 8

ตาราง 8 สมบัติพื้นฐานของชีวมวล

การวิเคราะห์	ชนิดชีวมวล		
	ใบอ้อย	ฟางข้าว	ไม้กระถินยักษ์
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานเปียก)			
ความชื้น	5.1	4.8	3.3
สารระเหย	73.2	66.6	77.1
คาร์บอนคงที่ ¹	10.5	18.1	17.1
เถ้า	11.2	10.5	2.5
การวิเคราะห์แบบขั้นสูง (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง, ปราศจากเถ้า)			
คาร์บอน	44.3	48.6	48.2
ไฮโดรเจน	7.2	5.8	5.8
ไนโตรเจน	1.2	0.3	0.5
ออกซิเจน ¹	47.3	45.2	45.6
ค่าความร้อนสูง ² (MJ/kg) (ฐานแห้ง)	16.2	16.0	18.8
ความหนาแน่นรวม (kg/m ³) (ฐานเปียก)	122	117	250

¹ คำนวณจากความแตกต่าง

² ค่าความร้อนสูงได้จากการใช้เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

4.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรีแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

ในกระบวนการทอรีแฟกชันมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และ เวลาคงอยู่ของของแข็ง ดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการทอรีแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

4.2.1 ปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ

ปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิ ได้แก่ อัตราการไหลของไนโตรเจน (N_2 Flow Rate) ตำแหน่งของจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลในท่อปฏิกรณ์ (Thermocouple position in the reactor) อัตราการป้อน ขนาด และความหนาแน่นของชีวมวล (Feed Rate, Particle size and Density of Biomass) ปัจจัยแต่ละอย่างก็ส่งผลต่ออุณหภูมิแตกต่างกันไปดังต่อไปนี้

4.2.1.1 อัตราการไหลของไนโตรเจน

หากในระหว่างกระบวนการมีอัตราการไหลของไนโตรเจนที่สูง ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิลดลงเนื่องจากอุณหภูมิของไนโตรเจนที่เข้าไปในระบบนั้นต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างกระบวนการ

4.2.1.2 ตำแหน่งของจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลในท่อปฏิกรณ์

การควบคุมอุณหภูมิขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลว่าสัมผัสกับชีวมวลหรือไม่ ถ้าจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลไม่สัมผัสกับชีวมวลที่อยู่ภายในท่อปฏิกรณ์ ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมกับอุณหภูมิที่ชีวมวลได้รับไม่เท่ากัน

4.2.1.3 อัตราการป้อน ขนาด และความหนาแน่นของชีวมวล

ปัจจัยของอัตราการป้อน ขนาด และความหนาแน่นของชีวมวลเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างต่อการควบคุมอุณหภูมิเป็นอย่างมาก เนื่องจากปัจจัยในกลุ่มนี้ต้องทำการควบคุมเป็นอย่างดี เช่น ต้องมีอัตราการป้อนที่ไม่สูงจนเกินไป ซึ่งสังเกตได้จากความกลมกลืนของถ่านทอร์รีไฟต์ หากถ่านทอร์รีไฟต์ไม่กลมกลืนกันนั้นแสดงว่ามีอัตราป้อนที่สูงจนเกินไป ทั้งนี้ปัจจัยในกลุ่มนี้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดท่อปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดด้วย

4.2.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการให้ความร้อน

ปัจจัยที่ส่งผลต่ออัตราการให้ความร้อน ได้แก่ ตำแหน่งของจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลในท่อปฏิกรณ์ (Thermocouple position in the reactor) อัตราการป้อน ขนาด และความหนาแน่นของชีวมวล (Feed Rate, Particle size and Density of Biomass) ปัจจัยแต่ละอย่างก็ส่งผลต่ออัตราการให้ความร้อนแตกต่างกันไปดังต่อไปนี้

4.2.2.1 ตำแหน่งของจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลในท่อปฏิกรณ์

ตำแหน่งของจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลมีผลต่ออัตราการให้ความร้อนโดยตรง คือ หากตำแหน่งของจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลไม่สัมผัสกับชีวมวล ส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมกับอุณหภูมิที่ชีวมวลได้รับไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้อัตราการให้ความร้อนเปลี่ยนแปลงไปด้วย

4.2.2.2 อัตราการป้อนและขนาดของชีวมวล

ปัจจัยของอัตราการป้อน ขนาด และความหนาแน่นของชีวมวลเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างต่ออัตราการให้ความร้อนเป็นอย่างมาก หากอัตราการป้อนชีวมวลที่สูงและขนาดชีวมวลใหญ่จนเกินไป ซึ่งทำให้อัตราการให้ความร้อนลดลง ส่งผลให้ถ่านทอร์รีไฟต์ไม่กลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้ปัจจัยในกลุ่มนี้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดท่อปฏิกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดด้วย

4.2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาคงอยู่ของของแข็ง

ปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาคงอยู่ของของแข็ง ได้แก่ อัตราการป้อน ขนาด และความหนาแน่นของชีวมวล (Feed Rate, Particle size and Density of Biomass) มุมเอียงของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor Inclination angle) ความถี่ของมอเตอร์สั่นที่ปรับโดยอินเวอร์เตอร์ (Vibration motor frequency adjusted by the inverter) มุมเอียงของมอเตอร์สั่น (Vibrating Motor Inclination Angle) ตำแหน่งการสั่นบนเครื่องปฏิกรณ์ (Vibrating Position on the Reactor) สปริงซับแรงสั่น (Vibration absorber (Spring constant)) ความสามารถในการไหล (Flow ability) ความถี่ความ

กว้างและความยาวคลื่นของการสั่นสะเทือน (Frequency, Amplitude, and Wavelength of the Vibration) รูปร่าง (Shape) น้ำหนักของอุปกรณ์เสริม (Weight of accessories)

4.3 การทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์

ที่ผ่านมาได้มีการใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสกรูอยู่เยอะ [10-17] และในหน่วยวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียนมีเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสกรูอยู่แล้วจึงมีการการดำเนินการเปรียบเทียบ ผลผลิตที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสกรูกับเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสัน ในการเปรียบเทียบนี้ใช้เงื่อนไขการทดลองเหมือนกัน ชีวมวลที่ใช้ในการเปรียบเทียบ คือ ไม้กระถินยักษ์ ใบอ้อย และฟางข้าว ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที

ตาราง 9 ปริมาณผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสกรูและแบบสัน ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที

ชีวมวล	ปริมาณผลได้เชิงมวล (wt%, d.b.)					
	เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสกรู			เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสัน		
	ของแข็ง	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง	ของเหลว	แก๊ส
ไม้กระถินยักษ์	45.9	37.0	17.1	88.2	4.2	7.6
ใบอ้อย	41.7	36.3	22.0	77.7	11.1	11.2
ฟางข้าว	44.5	29.5	26.0	82.6	8.6	8.7

จากตาราง 9 แสดงถึงปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสกรูและแบบสัน ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 เห็นได้ว่าถึงแม้ใช้เงื่อนไขการทดลองเหมือนกันทั้งชนิดของชีวมวล อุณหภูมิ และเวลาคงอยู่ของของแข็ง แต่ผลที่ได้กลับแตกต่างกัน โดยการเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสกรูมีปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ระหว่างร้อยละ 41.7 - 46.0 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ซึ่งน้อยกว่าที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสันที่มีปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ระหว่างร้อยละ 77.7 - 88.2 โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยทั่วไปปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ควรมีน้อยกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์จากเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบ

สกรูที่น้อยนี้อาจเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ความรุนแรงของการทำปฏิกิริยา ซึ่งประกอบด้วย 2 ปัจจัยหลัก คืออุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็ง เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสกรูนี้สามารถควบคุมเวลาคงอยู่ของของแข็งได้ง่าย ควบคุมโดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ลำเลียง แต่การควบคุมอุณหภูมิสามารถทำได้ยาก เนื่องจากจุดวัดของเทอร์มอคัปเปิลไม่สามารถวัดที่ชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกิริยาได้ ซึ่งในท่อปฏิกิริยามีสรูลำเลียงที่ทำหน้าที่ลำเลียงชีวมวลอยู่ภายใน ดังนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมนั้นจึงไม่ใช่อุณหภูมิที่ชีวมวลได้รับจริง ๆ อีกครั้งการสะสมความร้อนของสกรูเองก็มีส่วนที่ทำให้การทำปฏิกิริยารุนแรงเกินไป ส่งผลให้ได้ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ที่ต่ำด้วย

หลังจากที่ได้เปรียบเทียบปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสกรูและแบบสั่น พบว่าเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั่นสามารถดำเนินการได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงมีการศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ต่อ โดยใช้ชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ ฟางข้าว และใบอ้อย ที่อุณหภูมิ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 3 และ 5 นาที ผลที่ได้แสดงดังตาราง 10 เพื่อทำเป็นฐานข้อมูลและนำไปคำนวณเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทำซ้ำ

ตาราง 10 ผลการทดสอบระบบโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

ชีวมวล	อุณหภูมิ (°C)	เวลาคงอยู่ ของของแข็ง (min)	ปริมาณผลได้เชิงมวล (wt%, d.b.)			HHV _s (MJ/kg, d.b.)	EY _s (wt%, d.b.)	η
			ของแข็ง	ของเหลว	แก๊ส			
ฟางข้าว	260	1	93.0	3.0	4.0	16.85	96.1	1.03
	300	1	74.2	13.5	12.2	18.94	86.2	1.16
	260	5	88.2	3.7	8.1	17.39	94.1	1.07
	300	5	67.6	16.0	16.5	19.64	81.4	1.20
	280	3	82.6	8.6	8.7	17.61	89.2	1.08
	260	3	89.4	5.5	5.1	18.48	94.5	1.06
ใบอ้อย	300	3	76.0	14.6	9.4	19.89	86.4	1.14
	280	1	83.6	5.5	10.9	18.74	89.6	1.07

ชีวมวล	อุณหภูมิ (°C)	เวลาคงอยู่ ของของแข็ง (min)	ปริมาณผลได้เชิงมวล (wt%, d.b.)			HHV _s (MJ/kg, d.b.)	EY _s (wt%, d.b.)	η
			ของแข็ง	ของเหลว	แก๊ส			
ใบอ้อย	280	5	69.8	18.2	12.0	21.09	84.2	1.21
	280	3	77.7	11.1	11.2	20.03	89.0	1.15
	280	3	77.7	9.3	13.0	20.55	91.2	1.17
	280	3	77.3	10.7	12.0	19.52	86.3	1.12
	280	3	78.0	13.2	8.8	19.51	87.0	1.12
	280	3	76.9	11.5	11.6	20.45	90.0	1.17
	280	3	78.4	9.0	12.6	20.73	92.9	1.19

จากตาราง 10 คือผลการทดสอบระบบโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ชีวมวลที่ใช้คือ ฟางข้าวและใบอ้อย อุณหภูมิ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 3 และ 5 นาที พบว่าปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์ร้อยละ 67-93 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ร้อยละ 86-96 โดยน้ำหนักฐานแห้ง การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงสุดที่ 1.21 เมื่อใช้ใบอ้อยเป็นวัตถุดิบ ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที นำผลจากการทดลองโดยใช้ใบอ้อยที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 3 นาที จำนวน 6 การทดลองมาหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานซึ่งผลที่ได้แสดงดังตาราง 11

ตาราง 11 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลอง

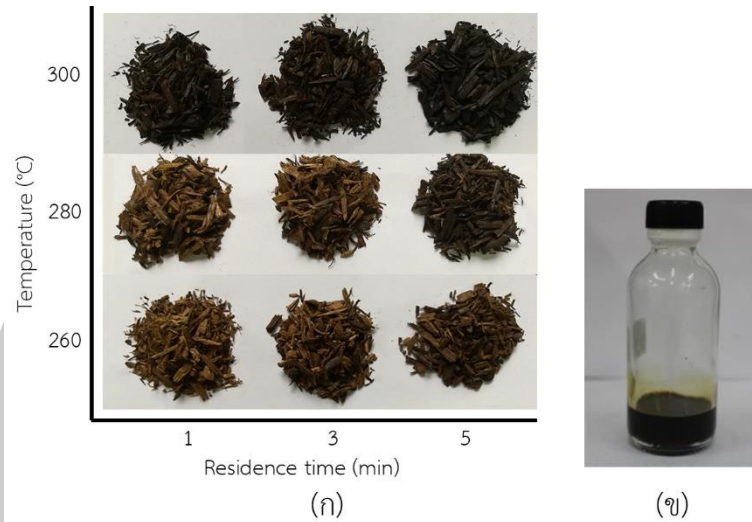
ปริมาณผลได้เชิงมวล (wt%, d.b.)			HHV _s (MJ/kg, d.b.)	EY _s (%)	η
ของแข็ง	ของเหลว	แก๊ส			
±0.5	±1.5	±1.5	±0.5	±2.5	±0.03

4.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการ

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟกชันโดยใช้ไม้กระถินยักษ์ในเครื่องทอร์รีแฟกชันแบบสั่น คือ ถ่านทอร์รีไฟต์ ของเหลว และแก๊ส ถ่านทอร์รีไฟต์ดัง ภาพประกอบ 31 (ก) สีของ

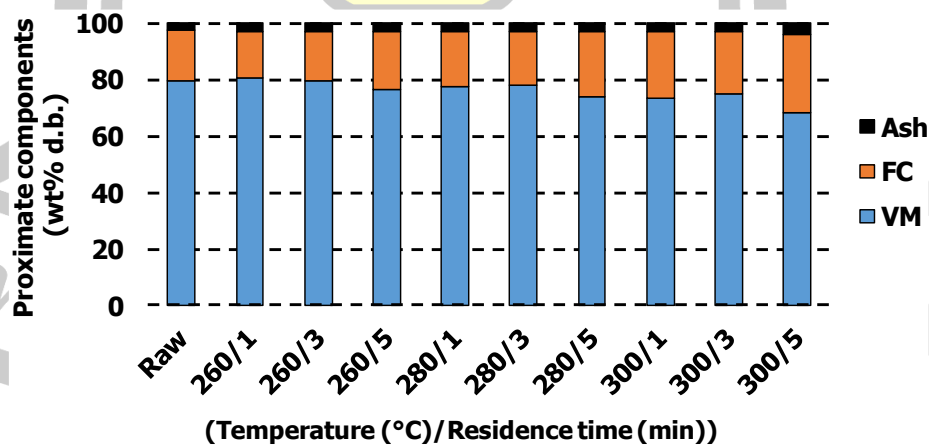
ถ่านทอร์รีไฟต์เป็นสีน้ำตาลจนถึงดำ แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขของการทดลอง ซึ่งสีของถ่านทอร์รีไฟต์นี้สัมพันธ์กับความรุนแรงของการทำปฏิกิริยา นั้นหมายความว่ายิ่งอุณหภูมิสูงและเวลาดังอยู่ของของแข็งนานก็ทำให้สีของถ่านทอร์รีไฟต์นั้นเป็นสีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ สีของถ่านทอร์รีไฟต์ในแต่ละการทดลองนั้นมีความกลมกลืนเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งความกลมกลืนนี้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ หากผลิตภัณฑ์ไม่กลมกลืนกัน บ่งบอกถึงการควบคุมกระบวนการผลิตไม่ดี เช่น การผสมกันในระหว่างกระบวนการ อัตราการให้ความร้อน การควบคุมอัตราป้อน และรวมไปถึงการเลือกใช้ขนาดของชีวมวลอีกด้วย ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวแสดงดัง

ภาพประกอบ 31 (ข) ได้จากชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต ลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มถึงดำ ไม่แยกชั้น และมีกลิ่นฉุน เมื่อนำของเหลวที่ได้จากการทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลาดังอยู่ของของแข็ง 5 นาที ไปแช่ที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส พบว่าของเหลวแบ่งเป็น 2 ส่วน คือมีทั้งส่วนที่ไม่แข็งตัวร้อยละ 68.5 และส่วนที่แข็งตัวร้อยละ 31.5 แต่ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากสารอะไรที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวไม่แข็งตัวที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ในส่วนนี้ควรมีการศึกษาต่อซึ่งอาจนำผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวนี้ไปใช้เป็นสารหล่อเย็นได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าของเหลวที่ได้จากกระบวนการนี้มีส่วนประกอบของ H_2O , Acetic acid และ Formic acid มีสัดส่วนที่แตกต่างกันออกไป [57, 58] สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) หรือ กรดน้ำส้ม คือ กรดอินทรีย์หรือสารประกอบเคมีอินทรีย์ที่พบได้ในธรรมชาติมีฤทธิ์เป็นกรดอ่อน มีลักษณะใส ไม่มีสี และมีกลิ่นฉุน กรดอะซิติกรู้จักกันดีในการนำมาผลิตน้ำส้มสายชูที่ใช้ในการปรุงอาหารให้มีรสเปรี้ยวและช่วยในการถนอมอาหาร [59] กรดฟอร์มิก (Formic acid) เป็นกรดอินทรีย์ (Organic acid) ชนิดหนึ่งอาจเรียกว่า กรดเมทาโนอิก (Methanoic acid) ประโยชน์ในการนำไปใช้คือ ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) เพื่อเป็นสารกันเสีย (Preservative) [60] ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอีกอย่างคือ แก๊ส ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำเอาแก๊สไปวิเคราะห์ พบว่าแก๊สที่เกิดจากกระบวนการนี้ประกอบด้วย O_2 , N_2 , CO , CO_2 และ CH_4 มีสัดส่วนที่แตกต่างกันออกไป [57, 58, 61] เห็นได้ว่ามีแก๊สที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเผาไหม้ได้ เช่น CH_4 จึงมีหลายงานวิจัยนำแก๊สนี้หมุนวนกลับไปเผาไหม้ในระบบเพื่อให้ความร้อนกับเครื่องปฏิกรณ์เอง หรือนำไปอบแห้งชีวมวลเพื่อลดความชื้นก่อนป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์



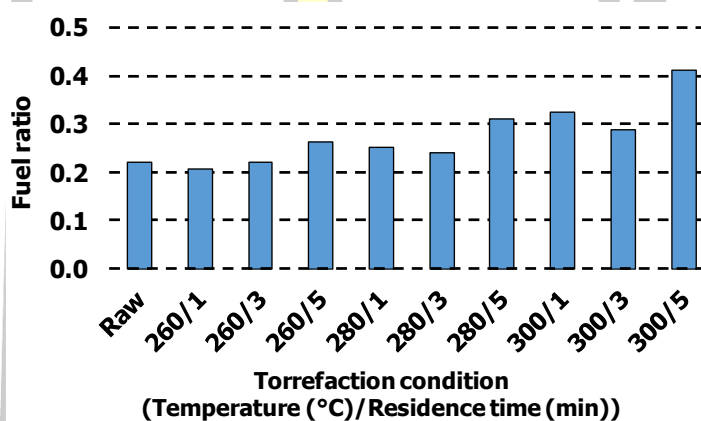
ภาพประกอบ 31 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแฟกชันโดยใช้ไม้กระถินยักษ์
(ก) ถ่านทอรรีไฟด์ (ข) ของเหลว

ผลการเคราะห์แบบประมาณของถ่านทอรรีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์ พบว่าสารระเหย (Volatile Matter, VM) คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon, FC) และเถ้า (Ash) อยู่ช่วงร้อยละ 68-80 16-28 และ 2.6-3.8 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ตามลำดับ ที่อุณหภูมิสูงและเวลาดำเนินการของของแข็งนาน ส่งผลให้สารระเหยลดลงแต่ทำให้คาร์บอนคงที่เพิ่มขึ้นส่วนปริมาณเถ้ามีสัดส่วนเท่าเดิมแสดงดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 ผลการเคราะห์แบบประมาณของถ่านทอรรีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์

เมื่อนำผลการเคราะห์แบบประมาณของถ่านทอร์รีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์ไปคำนวณค่าอัตราส่วนเชื้อ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการนำคาร์บอนคงที่หารด้วยสารระเหย [62] ผลที่ได้แสดงดังภาพประกอบ 33 ค่าแนะนำของอัตราส่วนเชื้อเพลิงสำหรับการใช้โรงไฟฟ้า (Coal-fired power plants) อยู่ที่ 0.5-2.0 [63] อัตราส่วนเชื้อเพลิงสูงสุดสำหรับในงานวิจัยนี้ที่ 0.41 ซึ่งถือว่าน้อยกว่าค่าแนะนำ แต่อย่างไรก็ตามในภาพประกอบ 33 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนเชื้อเพลิงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นและเวลาดังอยู่ของของแข็งนาน งานวิจัยนี้ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งไม่เกิน 5 นาที ซึ่งหมายความว่ามีโอกาสที่จะเพิ่มอัตราส่วนเชื้อเพลิงให้อยู่ในช่วงที่แนะนำได้หากใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งให้นานกว่า 5 นาที



ภาพประกอบ 33 อัตราส่วนเชื้อเพลิงของถ่านทอร์รีไฟด์จากไม้กระถินยักษ์

4.5 ร้อยละปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์

รายละเอียดเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการคำนวณได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อปฏิกรณ์ 7.3 เซนติเมตร ความยาวของท่อปฏิกรณ์ 150 เซนติเมตร ปริมาตรทั้งหมดของท่อปฏิกรณ์ 6.3 ลิตร อัตราป้อนชีวมวลของไม้กระถินยักษ์ ฟางข้าว และใบอ้อย คือ 1.5 0.6 และ 0.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ความหนาแน่นรวมหลังอบแห้งของไม้กระถินยักษ์ ฟางข้าว และใบอ้อย คือ 250 117 และ 122 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

น้ำหนักของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการ (6)

$$WB = (F \times R) / 60$$

...(6)

เมื่อ W_B = น้ำหนักของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์ (กิโลกรัม)

F = อัตราป้อนชีวมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

R = เวลาคงอยู่ของของแข็ง (นาที)

ปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการ (7)

$$V_B = \rho \times W_B \times 1,000 \quad \dots(7)$$

เมื่อ V_B = ปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์ (ลิตร)

ρ = ความหนาแน่นปรากฏของไม้กระถินยักษ์หลังอบแห้ง (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

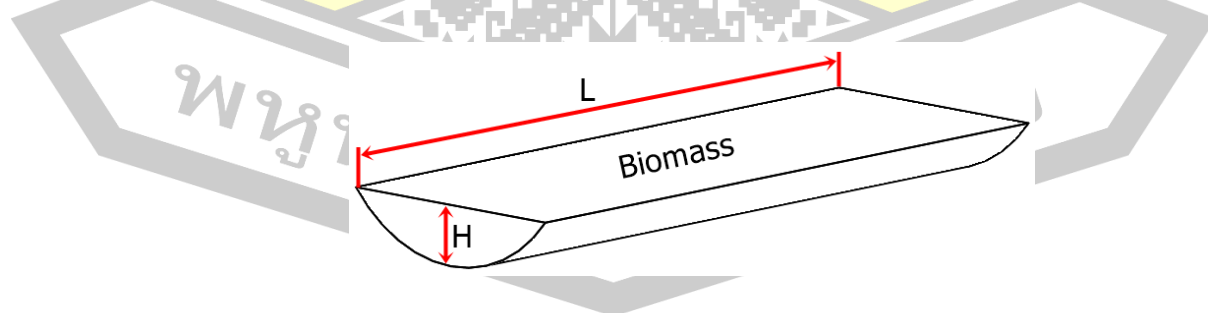
ร้อยละปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์สามารถคำนวณได้จากสมการ (8)

$$\%V_B = (V_B / V_R) \times 100\% \quad \dots(8)$$

เมื่อ $\%V_B$ = ร้อยละปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์ (ร้อยละ)

V_R = ปริมาตรทั้งหมดของท่อปฏิกรณ์ (ลิตร)

ความสูงของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์ (H) ดังภาพประกอบ 34 สามารถหาได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม SOLIDWORKS โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของท่อปฏิกรณ์ (L) และปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์ (V_B) การหาความสูงของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์ทำได้โดยเพิ่มความสูงของชีวมวลไปเรื่อย ๆ จนกว่าได้ปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์เท่ากับที่คำนวณได้จากสมการ (7)



ภาพประกอบ 34 ความสูงของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์

น้ำหนัก ปริมาตร ร้อยละปริมาตร และความสูงของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์แสดงดังตาราง 12

ตาราง 12 น้ำหนัก ปริมาตร ความสูง และร้อยละปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์

ชีวมวล	เวลาคงอยู่ของ ของแข็ง (min)	W_B (kg)	V_B (L)	H (cm)	$\%V_B$ (%)
ไม้กระถินยักษ์	1	0.03	0.10	0.48	1.59
	3	0.08	0.30	0.85	4.76
	5	0.13	0.50	1.13	7.93
ฟางข้าว	1	0.01	0.09	0.48	1.35
	3	0.03	0.26	0.78	4.05
	5	0.05	0.43	1.05	6.76
ใบอ้อย	1	0.01	0.08	0.45	1.30
	3	0.03	0.25	0.75	3.90
	5	0.05	0.41	1.00	6.49

จากตาราง 12 พบว่าอัตราป้อน 1.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สำหรับเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที ร้อยละปริมาตรของชีวมวลที่อยู่ในท่อปฏิกรณ์ 7.92 ถ่านทอร์รีไฟต์ยังคงกลมกลืน ดังนั้นที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 และ 3 นาที สามารถเพิ่มอัตราป้อนให้สูงขึ้นได้ดังสมการ (9)

$$\text{อัตราป้อนชีวมวลใหม่} = ((W_B \text{ ที่เวลาคงอยู่ 5 นาที}) \times 60) / \text{เวลาคงอยู่ของของแข็ง} \quad \dots(9)$$

จากสมการ (9) พบว่าสามารถเพิ่มอัตราป้อนชีวมวลเมื่อใช้เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 และ 3 นาที สำหรับไม้กระถินยักษ์ คือ 7.5 และ 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนฟางข้าวและใบอ้อย คือ 3.0 และ 1.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมที่อัตราป้อนใหม่นี้ว่ายังสามารถผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ที่มีความกลมกลืนกันอยู่หรือไม่

4.6 การวิเคราะห์ปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ปริมาณผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ ค่าความร้อนสูง (HHV_s) ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน (EY_s) และการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน (η) ของถ่านทอร์รีไฟต์ แสดงดังตาราง 13

ตาราง 13 ผลการทดลองโดยใช้ไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

อุณหภูมิ (°C)	เวลาคงอยู่ของ ของแข็ง (min)	ปริมาณผลได้เชิงมวล (wt%, d.b.)			HHV _s (MJ/kg, d.b.)	EY _s (wt%, d.b.)	η
		ของแข็ง	ของเหลว	แก๊ส			
260	1	95	2	4	18.3	92	0.97
	3	92	3	6	18.9	92	1.01
	5	88	4	8	19.9	93	1.06
280	1	93	5	2	19.4	96	1.03
	3	88	4	8	19.2	90	1.02
	5	85	8	7	20.4	92	1.09
300	1	89	7	4	20.5	97	1.09
	3	85	11	3	19.8	90	1.06
	5	72	24	4	22.0	85	1.17

การทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น วัสดุที่ใช้ คือ ไม้กระถินยักษ์ ที่อุณหภูมิ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 3 และ 5 นาที พบว่าปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์ร้อยละ 72-95 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์ 18.3-22.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน 85-97 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงที่สุดที่ 1.17 เห็นได้ว่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาถึงแม้ใช้เวลาคงอยู่ที่ 1-5 นาที ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านแสดงดังตาราง 14 เช่นเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ใช้ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 212 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 87.30 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตติ่ง การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ 1.21 [26] และงานวิจัยที่ใช้ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 250

องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2,100 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ได้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรัรีไฟต์ 1.20 [27]

ตาราง 14 ผลการทดลองจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยใช้ไม้กระถินยักษ์

Reactor type	Temperature (°C)	Heating rate (°C/min)	Holding time (min)	Residence time (min)	Biomass Size (μm)	Y _S (wt%, d.b.)	HHV _S (MJ/kg, d.b.)	EY _S (%)	η	Ref.
Fixed bed	200	10	60	80	less than 212	92.0	17.93 ¹	93.9	1.02	[26]
	225			82.5		88.9	18.54	91.9	1.03	
	250			85		76.7	19.28	82.4	1.08	
	275			87.5		68.8	21.73	83.3	1.21	
	300			90		43.2	24.92	60.1	1.39	
Fixed bed	200	10	30	50	less than 75	91.0	20.3 ¹	93.7	1.03	[27]
	225		30	52.5		86.5	21.2	90.0	1.04	
	250		30	55		73.0	21.2	75.9	1.04	
	275		30	57.5		54.5	22.8	56.7	1.04	
	250		120	145		56.1	21.2	64.5	1.15	
	250		600	625		51.2	23.3	61.4	1.20	
	250		900	925		47.0	24.4	52.6	1.12	
Fixed bed	100	-	-	30	less than 297	56	19.27 ¹	68	1.22	[64]
	150					20	29.18	32	1.51	
	200					17	29.19	25	1.51	
	250					18	29.72	26	1.54	
	300					17	29.83	25	1.55	
	350					15	30.27	23	1.57	

¹ค่าความร้อนสูงของชีวมวลตั้งต้น

Reactor type	Temperature (°C)	Heating rate (°C/min)	Holding time (min)	Residence time (min)	Biomass Size (μm)	Y _s (wt%, d.b.)	HHV _s (MJ/kg, d.b.)	EY _s (%)	η	Ref.
Fixed bed							19.2 ¹			[28]
	250		120	145		80.4	21.4	89.6	1.11	
	280		5	33		79.8	21.3	88.5	1.11	
	300		0	30		80.0	21.3	88.8	1.11	
	250		480	505		70.4	22.4	82.1	1.17	
	280	10	40	68	500–	69.4	22.4	81.0	1.17	
	300		5	35	2,000	70.1	22.3	81.4	1.16	
	320		1	33		69.7	23.0	83.5	1.20	
	250		1140	1,165		60.6	24.4	77.0	1.27	
	280		105	133		59.7	24.5	76.2	1.28	
	300		20	50		60.3	24.7	77.6	1.29	
	320		6	38		60.6	25.7	81.1	1.34	

¹ค่าความร้อนสูงของชีวมวลตั้งต้น

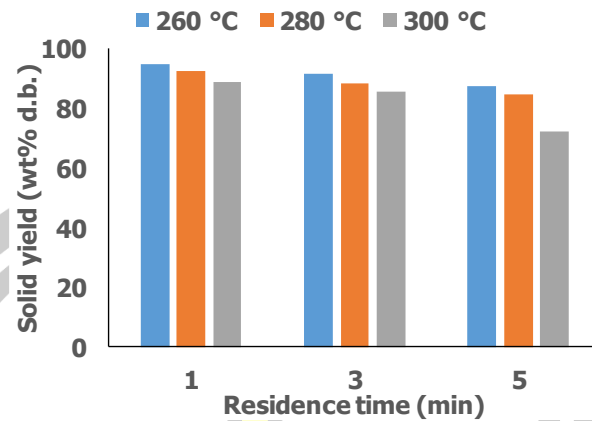
4.6.1 ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์

ทั้งผลของอุณหภูมิและผลของเวลาคงอยู่ของของแข็งส่งผลให้ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์เป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือยิ่งอุณหภูมิสูงและเวลาคงอยู่ของของแข็งนานปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์ก็ลดลง ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์จากงานวิจัยนี้อยู่ระหว่างร้อยละ 72 ถึง 94 โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที มีปริมาณผลได้เชิงมวลถ่านทอร์รีไฟต์ต่ำสุด และอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาที มีปริมาณผลได้เชิงมวลถ่านทอร์รีไฟต์สูงสุดแสดงดังภาพประกอบ 35 สาเหตุที่ทำให้ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์ลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการส่งผลให้เกิดการสลายตัวของความชื้นและสารระเหย สารระเหยส่วนใหญ่ที่สลายตัวคือเอมิเซลลูโลส ส่วนลิกนินเกิดการสลายตัวบางส่วน โดยเอมิเซลลูโลสสลายตัวที่อุณหภูมิ 225 – 320 องศาเซลเซียส เซลลูโลสสลายตัวที่อุณหภูมิ 305 – 375 องศาเซลเซียส และลิกนินสลายตัวที่อุณหภูมิ 250 – 500 องศาเซลเซียส [65] นอกจากนี้ปัจจัยของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณการสลายตัวของสารระเหยแล้ว ปัจจัยของเวลาคงอยู่ของของแข็งก็ส่งผลต่อปริมาณการสลายตัวของสารระเหยเช่นกัน นั่นหมายความว่า

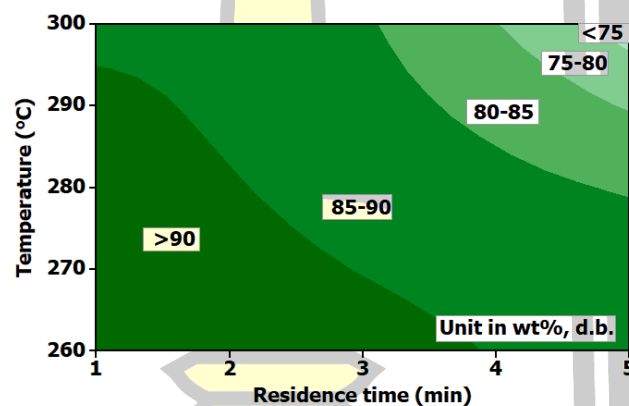
ว่ายิ่งเวลาคงอยู่ของของแข็งนานปริมาณการสลายตัวของสารระเหยก็สูงมากขึ้น อย่างไรก็ตามปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ที่ลดลงนี้ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์เพิ่มขึ้น ดังภาพประกอบ 41 เนื่องจากสารระเหยที่เป็นเฮมิเซลลูโลสเมื่อเทียบโดยน้ำหนักแล้วมีค่าความร้อนต่ำกว่าโครงสร้างพอลิเมอร์ที่เป็นเซลลูโลสและลิกนิน เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์กับงานวิจัยที่ผ่านมาในตาราง 14 ใช้วัตถุดิบคือไม้กระถินยักษ์เหมือนกัน ถึงแม้ในงานวิจัยนี้ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 5 นาที แต่ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ก็ยังมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น จากงานวิจัยของ Matali S. et al [26] ใช้ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 212 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 80 ถึง 90 นาที ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ร้อยละ 43 ถึง 92 โดยน้ำหนักฐานแห้ง จากงานวิจัยของ Wannapeera J. et al [27] ใช้ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 200 ถึง 275 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 50 ถึง 925 นาที ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ร้อยละ 47 ถึง 91 โดยน้ำหนักฐานแห้ง เห็นได้ว่าทั้งการใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งที่น้อยและขนาดชีวมวลที่ใหญ่กว่านี้เป็นข้อพิสูจน์ได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์จากการวิจัยนี้มีโอกาสที่ประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์จากงานวิจัยที่ผ่านมา

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ในโปรแกรม Minitab โดยใช้ฟังก์ชัน Contour Plot ได้เป็นพื้นที่ 2 มิติ ดังภาพประกอบ 36 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ พื้นที่ 2 มิติ นี้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองในครั้งถัดไป การใช้งานคือกำหนดช่วงของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งเพื่อให้ได้ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ตามช่วงที่ต้องการ เช่น หากต้องการปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟด์ที่ร้อยละ 75 ถึง 80 โดยน้ำหนักฐานแห้ง สามารถกำหนดเงื่อนไขการทดลองโดยใช้อุณหภูมิ 290 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ระหว่าง 5 นาที หรือใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็งระหว่าง 4 นาที

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 35 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์



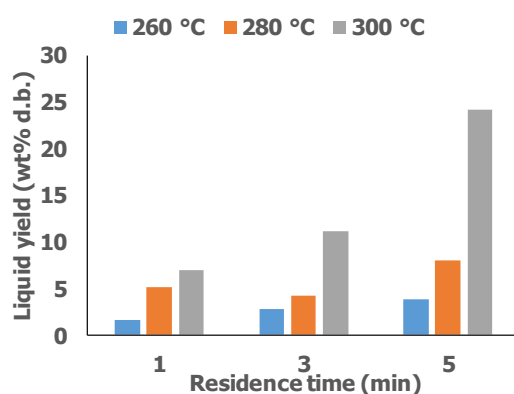
ภาพประกอบ 36 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์แบบ Contour Plot

4.6.2 ปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลว

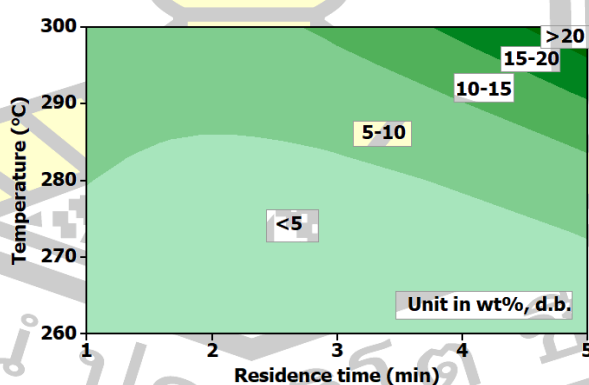
ทั้งผลของอุณหภูมิและผลของเวลาคงอยู่ของของแข็งส่งผลต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือยิ่งอุณหภูมิสูงและเวลาคงอยู่ของแข็งนานปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวจากงานวิจัยนี้อยู่ระหว่างร้อยละ 5 ถึง 27 โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที มีปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวสูงสุด และที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาที มีปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวต่ำสุดแสดงดังภาพประกอบ 37 ปริมาณผลได้

เชิงมวลของของเหลวบ่งบอกถึงปริมาณการสลายตัวของความชื้นและสารระเหยของชีวมวลที่ชุดควบแน่นสามารถควบแน่นได้ ปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวสอดคล้องกับปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียไป

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวในโปรแกรม Minitab โดยใช้ฟังก์ชัน Contour Plot ได้เป็นพื้นที่ 2 มิติ ดังภาพประกอบ 38 ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลว พื้นที่ 2 มิติ นี้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองในครั้งถัดไป การใช้งานคือกำหนดช่วงของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งเพื่อให้ได้ปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลวตามที่ต้องการ ตัวอย่างการใช้งานเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 4.6.1



ภาพประกอบ 37 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลว



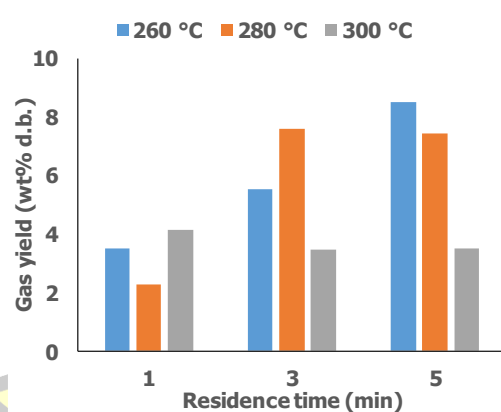
ภาพประกอบ 38 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลว

แบบ Contour Plot

4.6.3 ปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊ส

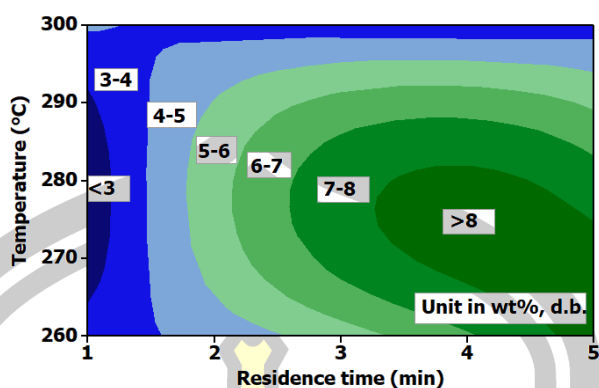
ผลของอุณหภูมิและของเวลาคงอยู่ส่งผลทำให้ได้ปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊สระหว่างร้อยละ 2 ถึง 8 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ดังภาพประกอบ 39 ปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊สมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการควบแน่นของชุดควบแน่น แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้นี้สามารถหมุนเวียนกลับไปเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนกับระบบ ปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊สแปรผันตรงกับปริมาณผลได้เชิงมวลของของเหลว นั่นหมายความว่าหากในระหว่างกระบวนการสามารถควบแน่นของเหลวได้เยอะแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ก็จะน้อย ในทางกลับกันหากในระหว่างกระบวนการสามารถควบแน่นของเหลวได้น้อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ก็มีปริมาณสูง

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊สในโปรแกรม Minitab โดยใช้ฟังก์ชัน Contour Plot ได้เป็นพื้นที่ 2 มิติ ดังภาพประกอบ 40 ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊ส พื้นที่ 2 มิติ นี้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองในครั้งถัดไป การใช้งานคือกำหนดช่วงของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งเพื่อให้ได้ปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊สตามที่ต้องการ ตัวอย่างการใช้งานเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 4.6.1



ภาพประกอบ 39 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊ส

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์



ภาพประกอบ 40 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของแก๊สแบบ

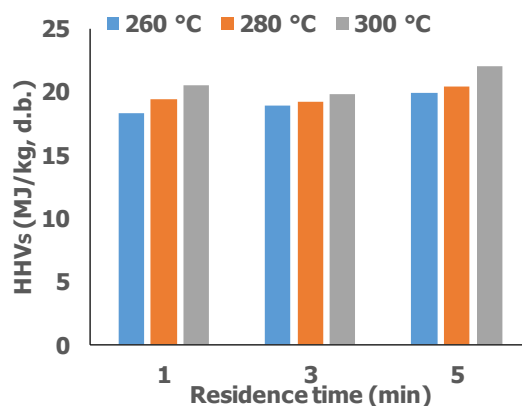
Contour Plot

4.6.4 ค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์

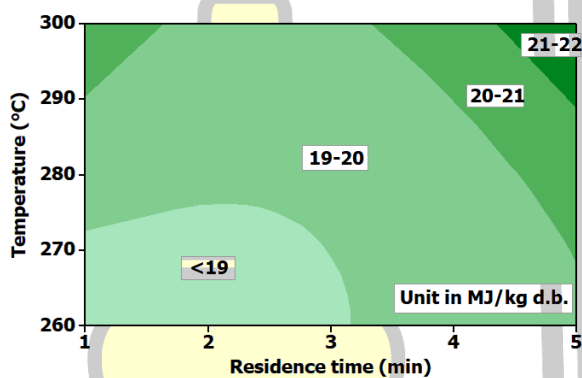
ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งส่งผลต่อค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์ เป็นไปในทิศทางเดียวกันดังภาพประกอบ 41 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตรงข้ามกับปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอร์รีไฟต์ในหัวข้อ 4.6.1 คือยิ่งอุณหภูมิสูงและเวลาคงอยู่ของแข็งนานค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์ก็สูง ค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์จากงานวิจัยนี้อยู่ระหว่างร้อยละ 18.3 - 22.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม, ฐานแห้ง โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที มีค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์สูงสุด และอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาที มีค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์ต่ำสุด ถ่านทอร์รีไฟต์นี้ส่วนใหญ่มีค่าความร้อนสูงกว่าถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศไทย

ถ่านหินส่วนใหญ่ที่ประเทศไทยใช้กับโรงงานผลิตไฟฟ้าในปัจจุบันคือถ่านหินลิกไนต์ มีค่าความร้อนสูงประมาณ 10.47 ถึง 18.42 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [66] จากงานวิจัยนี้ค่าความร้อนสูงอยู่ระหว่าง 18.3 ถึง 22.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ส่วนมากมีค่าสูงกว่าถ่านหินลิกไนต์ที่ประเทศไทยใช้อยู่ หากมีการสนับสนุนให้มีการใช้ถ่านทอร์รีไฟต์ในการผลิตไฟฟ้าเพื่อลดหรือทดแทนการใช้ถ่านหิน ก็จะส่งผลให้การใช้ถ่านหินลดลงได้ ซึ่งเป็นที่รู้อยู่แล้วว่าถ่านหินนั้นก่อกมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก เนื่องจากองค์ประกอบของถ่านหินมีปริมาณกำมะถันมากกว่าชีวมวลเป็นอย่างมาก

เมื่อวิเคราะห์ค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์ในโปรแกรม Minitab โดยใช้ฟังก์ชัน Contour Plot ได้เป็นพื้นที่ 2 มิติ ดังภาพประกอบ 42 ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์ พื้นที่ 2 มิติ นี้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองในครั้งถัดไป การใช้งานคือกำหนดช่วงของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งเพื่อให้ได้ค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์ตามที่ต้องการ ตัวอย่างการใช้งานเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 4.6.1



ภาพประกอบ 41 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์



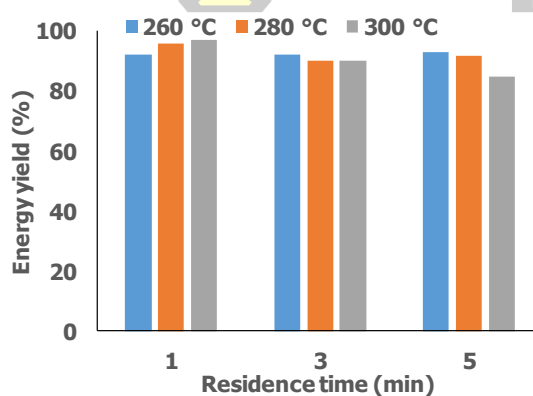
ภาพประกอบ 42 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อค่าความร้อนสูงของถ่านทอร์รีไฟต์
แบบ Contour Plot

4.6.5 ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์

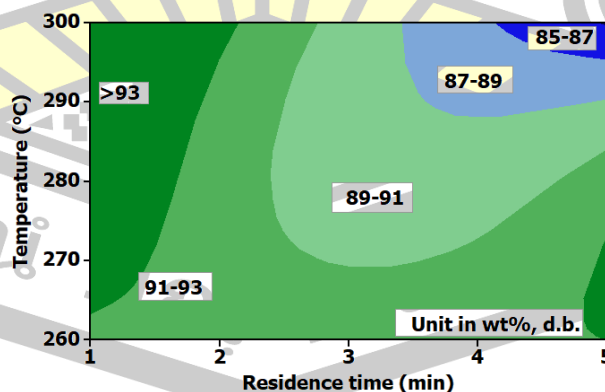
ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์จากงานวิจัยนี้อยู่ระหว่างร้อยละ 78 ถึง 99 โดยน้ำหนักฐานแห้ง แสดงดังภาพประกอบ 43 ซึ่งใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งในช่วง 1 - 5 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้ชีวมวลเดียวกันพบว่ามีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก เช่น จากงานวิจัยของ Matali S. et al [26] ใช้ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 212 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 80 ถึง 90 นาที ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ร้อยละ 83 ถึง 93 โดยน้ำหนักฐานแห้ง งานวิจัยของ Wannapeera J. et al [27] ใช้ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 200 ถึง 275 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 50 ถึง 925 นาที ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ร้อยละ 76 ถึง 93 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ข้อมูล

ข้างต้นทำให้เห็นว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอร์รีแพกซ์แบบสั่นสามารถลดการใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งได้ แต่ยังคงผลิตภัณฑที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เวลาคงอยู่ที่นานหลายนาที่จนถึงหลายชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ในโปรแกรม Minitab โดยใช้ฟังก์ชัน Contour Plot ได้เป็นพื้นที่ 2 มิติ ดังภาพประกอบ 44 ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ พื้นที่ 2 มิติ นี้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองในครั้งถัดไป การใช้งานคือกำหนดช่วงของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งเพื่อให้ได้ปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์ตามที่ต้องการ ตัวอย่างการใช้งานเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 4.6.1



ภาพประกอบ 43 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์



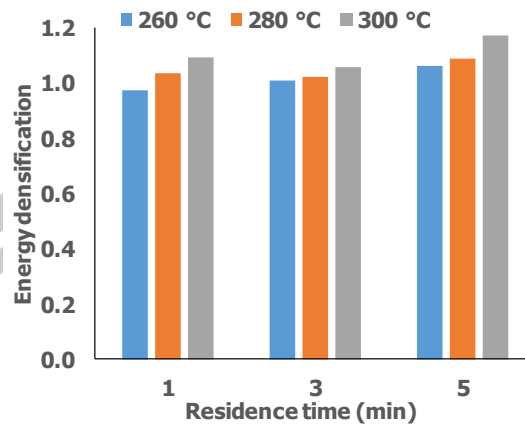
ภาพประกอบ 44 ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อปริมาณผลได้เชิงพลังงานของถ่านทอร์รีไฟต์แบบ Contour Plot

4.6.6 การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์

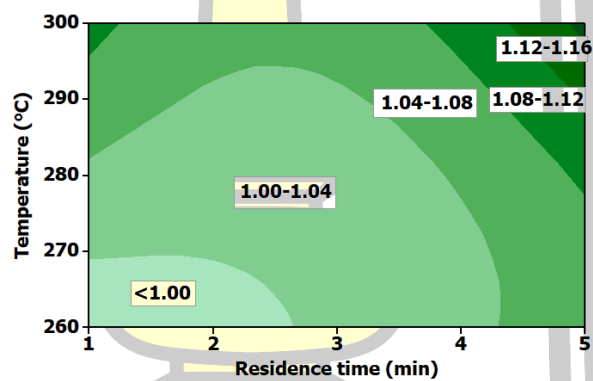
ผลของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์เป็นไปในทิศทางเดียวกันดังภาพประกอบ 45 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟต์ในหัวข้อ 4.6.4 คือยิ่งอุณหภูมิสูงและเวลาคงอยู่ของแข็งนานการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ก็สูง การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์จากงานวิจัยนี้อยู่ระหว่างร้อยละ 0.97 – 1.17 โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที มีการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์สูงสุด และอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาที มีการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์กับงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้ชีวมวลชนิดเดียวกัน พบว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกชันแบบสั่นสามารถผลิตถ่านทอรรีไฟต์ที่มีค่าการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาได้ เช่น งานวิจัยที่ใช้ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 212 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 87.30 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ 1.21 [26] และงานวิจัยที่ใช้ชีวมวลขนาดเล็กกว่า 75 ไมโครเมตร อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2,100 นาที ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง ได้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ 1.20 [27]

เมื่อวิเคราะห์การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ในโปรแกรม Minitab โดยใช้ฟังก์ชัน Contour Plot ได้เป็นพื้นที่ 2 มิติ ดังภาพประกอบ 46ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์พื้นที่ 2 มิติ นี้สามารถนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการทดลองในครั้งถัดไป การใช้งานคือกำหนดช่วงของอุณหภูมิและเวลาคงอยู่ของของแข็งเพื่อให้ได้การเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์ตามที่ต้องการ ตัวอย่างการใช้งานเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.6.1

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 45 ผลของอุณหภูมิและเวลาดังอยู่ของของแข็งต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์



ภาพประกอบ 46 ผลของอุณหภูมิและเวลาดังอยู่ของของแข็งต่อการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟต์แบบ Contour Plot

4.7 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์

ต้นทุนในการผลิตถ่านทอรรีไฟต์สามารถแบ่งการคำนวณออกเป็น 4 ส่วน คือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบ กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดความร้อน และราคาชีวมวล

4.7.1 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเตรียมชีวมวล

การบดชีวมวลในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องบดที่มีมอเตอร์ขนาด 5 แรงม้า หรือ 3.7 กิโลวัตต์ กำลังการผลิต 300 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คิดเป็น 0.012 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมชีวมวลเปียก หรือ คิดเป็น 0.0184 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมชีวมวลแห้งอบ หลังจากบดชีวมวลแล้วจากนั้นนำชีวมวลไปอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับเครื่องอบที่ใช้ในงานวิจัยสามารถจุได้ 20 ลิตรต่อครั้ง หรือสำหรับไม้กระถินยักษ์หลังบดแล้วได้ 8 กิโลกรัมต่อครั้ง ไม้กระถินยักษ์สดมีความชื้น ร้อยละ 38 ความชื้นหลังจากที่ผ่านการอบแล้วเหลือร้อยละ 3.3 กำลังไฟฟ้าที่ใช้สำหรับอบไล่ความชื้น คือ 0.68 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมชีวมวลแห้งอบ

4.7.2 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบ

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบแบ่งเป็น 6 ส่วน คือ ป้อนน้ำหล่อเย็น มอเตอร์รอบเร็ว มอเตอร์ถังป้อน มอเตอร์สั่น เครื่องแยกแก๊สไนโตรเจน และชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต แสดงดังตาราง 15

ตาราง 15 กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบ

รายการ	กำลังไฟฟ้า (วัตต์-ชั่วโมง)
ป้อนน้ำหล่อเย็น	30.0
มอเตอร์รอบเร็ว	85.3
มอเตอร์ถังป้อน	75.8
มอเตอร์สั่น	236.9
เครื่องแยกแก๊สไนโตรเจน	14.2
ชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต	68.7

จากตาราง 15 สามารถนำมาคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายในส่วนของกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบในแต่ละชั่วโมงได้ โดยการนำผลรวมของกำลังไฟฟ้า (วัตต์-ชั่วโมง) หารด้วย 1,000 ดังนั้น กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการควบคุมระบบคือ

$$(30.0+85.3+75.8+236.9+14.2+68.7)/1,000 = 0.511 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง}$$

4.7.3 กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดความร้อน

กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดความร้อนแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดความร้อนช่วงแรก (Heat up) และกำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดความร้อนขณะดำเนินการ ซึ่งแสดงดังตาราง 16

ตาราง 16 กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดความร้อน

อุณหภูมิ (°C)	กำลังไฟฟ้าที่ให้กับหลอดความร้อน	
	ช่วงแรก (หน่วย)	ขณะดำเนินการ (kWh)
260	1.20	2.41
280	1.33	2.51
300	1.49	2.56

การทดลองนี้ใช้ชีวมวลคือไม้กระถินยักษ์มีอัตราป้อนชีวมวล 1.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เครื่องปฏิกรณ์สามารถเดินระบบต่อเนื่องได้ 1 เดือน หลังจากนั้นจะหยุดการเดินระบบเพราะซ่อมบำรุง ดังนั้นชีวมวลที่ใช้ต่อเดือนสามารถหาได้จาก $1.5 \text{ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)} \times 24 \text{ (ชั่วโมง)} \times 30 \text{ (วัน)} = 1,080 \text{ กิโลกรัมต่อเดือน}$

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือนสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน (หน่วย)} &= (\text{กำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อวัน (หน่วย/วัน)} + \text{กำลังไฟฟ้าที่ให้กับ} \\ &\text{หลอดความร้อนในช่วงแรก (หน่วย/วัน)}) \times 30 \text{ (วัน)} + \text{จำนวนชีวมวลที่ใช้ต่อเดือน (กิโลกรัมต่อเดือน)} \\ &\times (\text{กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการอบ (หน่วย/กิโลกรัม)} + \text{กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการبرد (หน่วย/กิโลกรัม)}) \end{aligned}$$

หลังจากที่ได้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือน ซึ่งสามารถประมาณได้จากเว็บไซต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค กฟภ. [67] โดยกำหนดประเภทไฟฟ้าเป็นประเภทที่ 2 (กิจการขนาดเล็ก อัตราปกติ) ประจำเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2561 ที่อุณหภูมิ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในเดือนคือ 2,417.87 2,478.07 และ 2,509.69 หน่วย ตามลำดับ ค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือนแสดงดังตาราง 17

ตาราง 17 ประมาณค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อเดือนที่อัตราปกติ ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าเกินกว่า 150 หน่วยต่อเดือน

	อุณหภูมิ (°C)		
	260	280	300
ส่วนที่ 1 ค่าพื้นฐานไฟฟ้า			
ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท)	11,174.69	11,456.11	11,604.63
ค่าบริการ (บาท)	312.24	312.24	312.24
รวมค่าไฟฟ้าฐาน (บาท)	11,486.93	11,768.35	11,916.87
ส่วนที่ 2 ค่าไฟฟ้าผันแปร (Ft)			
จำนวนพลังงานไฟฟ้า x ค่า Ft (บาท)	-454.58	-466.03	-472.07
ส่วนที่ 3 ค่าภาษีมูลค่าเพิ่ม 7%			
(ค่าไฟฟ้าฐาน + ค่า Ft) x 7/100 (บาท)	772.26	791.16	801.14
รวมเงินค่าไฟฟ้า (บาท)	11,804.61	12,093.48	12,245.94

นำค่าไฟฟ้าจากตาราง 17 มาคำนวณหาค่าไฟต่อชีวมวลหลังอบแห้ง 1 กิโลกรัม ซึ่งคำนวณได้จาก ค่าไฟฟ้าต่อเดือนหารด้วยน้ำหนักของชีวมวลหลังอบแห้ง ค่าไฟฟ้าต่อกิโลกรัมที่ได้แสดงดังตาราง 18

ตาราง 18 ค่าไฟฟ้าต่อชีวมวลหลังอบแห้ง

อุณหภูมิ (°C)	ค่าไฟฟ้า	
	ต่อเดือน (บาท)	ต่อกิโลกรัม (บาท)
260	11,804.61	10.93
280	12,093.48	11.20
300	12,245.94	11.34

4.7.4 ราคาวัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบคือไม้กระถินยักษ์ซึ่งมีราคาประมาณ 800 บาทต่อตันสด หรือประมาณ 0.8 บาท ต่อกิโลกรัมสด [68] ความชื้นของไม้กระถินยักษ์ร้อยละ 38 โดยน้ำหนัก [31] ดังนั้นราคาไม้กระถินยักษ์ต่อกิโลกรัมแห้งคือ

$$\begin{aligned} \text{ราคาไม้กระถินยักษ์แห้ง (บาท)} &= \text{ราคาไม้กระถินยักษ์สด (บาท)} \times 100 / (100 - \text{ร้อยละของความชื้น}) \\ &= 0.8 \text{ บาท} \times 100 / (100 - 38) \\ &= 1.3 \text{ บาท} \end{aligned}$$

4.7.5 สรุป

ราคาถ่านทอรรีไฟต์ต่อกิโลกรัมแสดงดังตาราง 19 สามารถคำนวณได้ดังนี้

ราคาถ่านทอรรีไฟต์ต่อกิโลกรัม (บาท/กิโลกรัม) = ราคาวัตถุดิบแห้ง + (100 × ค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อซีมวลเริ่มต้น 1 กิโลกรัม (บาท/kg)) / (ปริมาณผลได้เชิงมวลของถ่านทอรรีไฟต์, Y_s (wt% w.b.))

ตาราง 19 กำลังไฟฟ้าและค่าไฟฟ้าต่อเดือนและกิโลกรัม ของถ่านทอรรีไฟต์

อุณหภูมิ (°C)	เวลาคงอยู่ของแข็ง (min)	Y_s wt%, d.b.	ราคาถ่านทอรรีไฟต์ต่อกิโลกรัม (บาท/กิโลกรัม)
260	1	95	12.9
	3	92	13.3
	5	88	13.9
280	1	93	13.5
	3	88	14.2
	5	85	14.8
300	1	89	14.2
	3	85	14.8
	5	72	17.5

จากตาราง 19 แสดงให้เห็นว่าราคาต้นทุนในการผลิตถ่านทอรรีไฟต์ 1 กิโลกรัม มีต้นทุนในการผลิตอยู่ในช่วง 12.9 ถึง 17.5 บาท ซึ่งราคานี้สัมพันธ์กับความรุนแรงของการทำปฏิกิริยาทอรรี-แพกซ์ขึ้น นั้นหมายความว่ายิ่งอุณหภูมิสูงเวลาคงอยู่นานต้นทุนในการผลิตถ่านทอรรีไฟต์ก็จะแพง แต่อย่างไรก็ตามราคาต้นทุนนี้ประมาณร้อยละ 90 เกิดมาจากค่าพลังงานที่ใช้ เนื่องจากในการศึกษานี้เป็นการศึกษาในระดับขนาดห้องทดลองจึงใช้ไฟฟ้า ดังนั้นต้นทุนจึงมีราคาแพงกว่าความเป็นจริงในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งมาสามารถลดต้นทุนได้โดยการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนรูปแบบอื่น เช่น การใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว ซึ่งมวลหลังจากที่อบแห้งแล้ว หรือใช้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านทอรรีไฟต์บางส่วน นำไปใช้ทั้งในแง่ของการอบแห้งและในแง่ของการให้ความร้อนกับเตาปฏิกรณ์ระหว่างกระบวนการทอรรีแพกซ์ขึ้น ก็สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ หากเทียบราคาของถ่านทอรรีไฟต์กับราคาของถ่านหินลิกไนต์ซึ่งในประเทศไทยมีการใช้เป็นจำนวนมาก ถ่านหินลิกไนต์มีราคาประมาณ 2 บาทต่อกิโลกรัม ที่ความชื้นร้อยละ 38.8 [69] หากพิจารณาเป็นฐานแห้งแล้วถ่านหินลิกไนต์มีราคาประมาณ 3.3 บาทต่อกิโลกรัม ถึงแม้ราคาแตกต่างกันอยู่มากแต่ราคาของถ่านทอรรีไฟต์นั้นสามารถลดได้ดังที่กล่าวมาข้างต้น หากมีการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีการใช้พลังงานให้น้อยลงอาจทำให้ราคาของถ่านทอรรีไฟต์กับถ่านหินไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นการผลิตถ่านทอรรีไฟต์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับระบบขนาดใหญ่จึงมีความเป็นไปได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอรรีแพกซ์ขึ้นอีกอย่างคือของเหลว ซึ่งผลิตภัณฑ์นี้อาจมีสมบัติเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับน้ำส้มควันไม้ที่มีสรรพคุณไล่หรือกำจัดแมลง ในปัจจุบันมีการซื้อขายน้ำส้มควันไม้ราคาอยู่ในช่วง 80-300 บาทต่อลิตร [70] อย่างไรก็ตามควรนำของเหลวไปวิเคราะห์สมบัติเปลี่ยนแปลงเทียบกับน้ำส้มควันไม้และการนำของเหลวไปทดลองไล่หรือกำจัดแมลงว่าสามารถทำได้หรือไม่

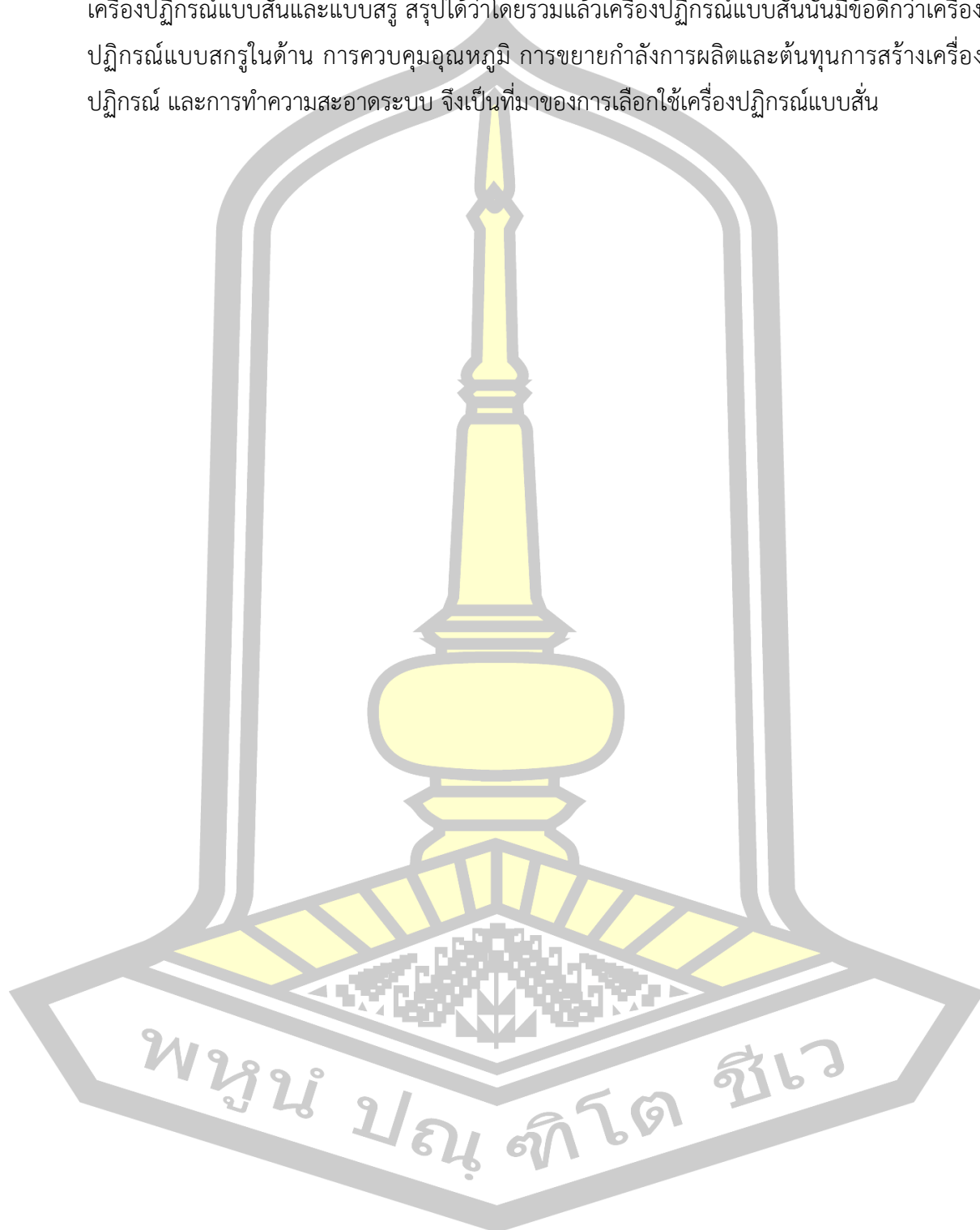
4.8 การเปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นและแบบสกรู

การเปรียบเทียบกระบวนการทอรรีแพกซ์ขึ้นโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นและแบบสกรู โดยใช้เกณฑ์ในการเปรียบเทียบ ได้แก่ การควบคุมอุณหภูมิ การควบคุมเวลาคงอยู่ของของแข็ง การขยายกำลังการผลิตและต้นทุนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ และการทำความสะอาดระบบ การเปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นและแบบสกรูนี้แสดงดังตาราง 20

ตาราง 20 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์สั่นและแบบสกรู

รายการ	เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น	เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู
การควบคุมอุณหภูมิ	สามารถรู้อุณหภูมิที่ชีวมวลได้รับจริง ๆ เนื่องจากท่อปฏิกรณ์กลวงจึงสามารถใช้เทอร์โมคัปเปิลแทงทะลุเข้าไปวัดที่ชีวมวลได้	ไม่สามารถรู้อุณหภูมิที่ชีวมวลได้รับจริง ๆ เนื่องจากภายในท่อปฏิกรณ์มีสกรูอยู่ภายในจึงไม่สามารถใช้เทอร์โมคัปเปิลแทงทะลุเข้าไปวัดที่ชีวมวลได้
การควบคุมเวลาคงอยู่	สามารถทำได้โดยการปรับความเร็วของมอเตอร์สั่นและมุมเอียงของเครื่องปฏิกรณ์	สามารถทำได้โดยการปรับความเร็วรอบของมอเตอร์และระยะพิทของสกรูชุดลำเลียง
การขยายกำลังการผลิตและต้นทุนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์	การขยายกำลังการผลิตสามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดและความยาวของท่อปฏิกรณ์สามารถเพิ่มความยาวได้ทั้งในแนวตรง หรือจากงานวิจัยที่ผ่านมาเพิ่มความยาวของท่อปฏิกรณ์ในแนวตั้งในลักษณะเป็นเกลียว [24] ต้นทุนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู	การขยายกำลังการผลิตสามารถทำได้ยากเนื่องจากต้องเพิ่มขนาดของท่อปฏิกรณ์และขนาดของสกรู การผลิตสกรูที่มีขนาดใหญ่ นั้นสามารถทำได้ยากอีกทั้งใช้ต้นทุนสูง เมื่อสกรูมีขนาดใหญ่และยาวขึ้นจำเป็นต้องใช้มอเตอร์ที่มีกำลังที่สูงหรืออาจใช้มอเตอร์หลายตัว จึงทำให้ต้นทุนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์สูงตามไปด้วย
การทำความสะอาดระบบ	สามารถทำงานได้ง่ายเนื่องจากท่อปฏิกรณ์กลวงจึงสามารถใช้อากาศเป่าเพื่อทำความสะอาดได้	สามารถทำได้ยากเนื่องจาก การทำความสะอาดระบบต้องถอดสกรูออกมาเพื่อทำความสะอาด หากสกรูที่มีขนาดใหญ่การถอดออกมานั้นเป็นเรื่องยากมาก

จากตาราง 20 แสดงถึงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทอรีรีแฟกซ์แบบต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นและแบบสรู สรุปได้ว่าโดยรวมแล้วเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นนั้นดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูในด้าน การควบคุมอุณหภูมิ การขยายกำลังการผลิตและต้นทุนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ และการทำความสะอาดระบบ จึงเป็นที่มาของการเลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของชีวมวลด้วยกระบวนการทอรรีแฟกซ์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ดำเนินการโดยการสร้างและทดสอบเครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่นกับเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู พบว่าโดยรวมแล้วเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นนั้นมีข้อดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูในด้านการควบคุมอุณหภูมิ การขยายกำลังการผลิตและต้นทุนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ และการทำความสะอาดระบบ ในการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ทอรรีแฟกซ์แบบสั่น วัสดุที่ใช้คือไม้กระถินยักษ์ อุณหภูมิ 260 280 และ 300 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของ 1 3 และ 5 นาที ปริมาณผลได้เชิงมวลของผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ถ่านทอรรีไฟด์ร้อยละ 72-95 ของเหลวร้อยละ 2-24 และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ร้อยละ 2-8 โดยน้ำหนักฐานแห้ง ค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์ 18.3-22.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน 85-97 โดยน้ำหนักฐานแห้ง และการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานสูงสุดที่ 1.17 ในการทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 5 นาที พบว่าได้ค่าความร้อนสูงสูงสุดที่ 22.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งการทดลองนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไฟฟ้า เช่น ในโรงไฟฟ้าชีวมวลที่มีอยู่อย่างน้อย 164 บริษัท หรือนำไปผสมกับถ่านหินสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหิน เนื่องจากค่าความร้อนสูงของถ่านทอรรีไฟด์สูงกว่าถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งประเทศไทยใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นจำนวนมาก ค่าความร้อนสูงของถ่านหินลิกไนต์ที่ประเทศไทยใช้อยู่ระหว่าง 10.5 ถึง 18.4 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

เมื่อเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์จากงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา ได้แก่ ปริมาณผลได้เชิงมวล ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน ค่าความร้อนสูง และการเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงานของถ่านทอรรีไฟด์ พบว่างานวิจัยนี้สามารถผลิตถ่านทอรรีไฟด์โดยใช้เวลาคงอยู่ที่น้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมาถึงแม้ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งน้อยกว่าก็ยังผลิตถ่านทอรรีไฟด์ที่มีสมบัติที่ใกล้เคียงกันได้ การใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งที่น้อยนี้บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ ข้อดีของการใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งน้อยมีหลายประการ เช่น ง่ายต่อการขยายกำลังการผลิต เนื่องจากไม่จำเป็นต้องสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อรองรับปริมาณวัตถุดิบที่อยู่ในระบบระหว่างดำเนินการลดต้นทุนในการผลิต เนื่องจากเวลาคงอยู่ของของแข็งสัมพันธ์กับพลังงานที่ให้กับชีวมวล ซึ่งพลังงานที่ให้กับชีวมวลนี้เป็นค่าใช้จ่ายหลักสำหรับการผลิตถ่านทอรรีไฟด์ นั้นหมายความว่ายิ่งใช้เวลาคงอยู่ของ

ของแข็งนานค่าใช้จ่ายก็ยิ่งสูง และหากมีการสนับสนุนจากภาครัฐหรือภาคเอกชนอย่างจริงจังสำหรับการนำถ่านทอร์รีไฟต์ไปผสมกับถ่านหินสำหรับโรงไฟฟ้าถ่านหิน ทำให้สามารถลดการใช้ถ่านหินลงได้ เนื่องจากรายงานประจำปี 2559 ของกระทรวงพลังงาน พบว่าในปัจจุบันและหลายปีที่ผ่านมา ประเทศไทยผลิตถ่านหินลิกไนต์จำนวน 17 ล้านตันต่อปี และการใช้งานถ่านหินลิกไนต์จำนวน 39 ล้านตันต่อปี กำลังการผลิตไม่เพียงพอต่อการใช้งานจึงมีการนำเข้าถ่านหินจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้ปัจจัยของการนำถ่านทอร์รีไฟต์ไปใช้งานคือราคาต้นทุนการผลิต

การวิเคราะห์ผลเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าราคาต้นทุนในการผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ 1 กิโลกรัม อยู่ในช่วง 12.9 ถึง 17.5 บาท ซึ่งราคานี้สัมพันธ์กับความรุนแรงของการทำปฏิกิริยาทอร์รีแฟกชัน นั้นหมายความว่ายิ่งอุณหภูมิสูงเวลาคงอยู่นานต้นทุนในการผลิตถ่านทอร์รีไฟต์ก็จะแพง แต่อย่างไรก็ตาม ราคาต้นทุนนี้ประมาณร้อยละ 90 เกิดมาจากค่าพลังงานที่ใช้ เนื่องจากในการศึกษานี้เป็นการศึกษาในระดับขนาดห้องทดลองจึงใช้ไฟฟ้า ดังนั้นต้นทุนจึงมีราคาแพงกว่าความเป็นจริงในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถลดต้นทุนได้โดยการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนรูปแบบอื่น เช่น การใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว ชีวมวลหลังจากที่อบแห้งแล้ว หรือใช้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านทอร์รีไฟต์บางส่วนนำไปใช้ทั้งในแง่ของการอบแห้งและในแง่ของการให้ความร้อนกับเตาปฏิกรณ์ระหว่างกระบวนการทอร์รีแฟกชัน ก็สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการทอร์รีแฟกชันอีกอย่างคือของเหลว ซึ่งผลิตภัณฑ์นี้อาจมีสมบัติเทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับน้ำส้มควันไม้ที่มีสรรพคุณไล่หรือกำจัดแมลง ในปัจจุบันมีการซื้อขายน้ำส้มควันไม้ราคาอยู่ในช่วง 80-300 บาทต่อลิตร อย่างไรก็ตามควรนำของเหลวไปวิเคราะห์สมบัติเปลี่ยนเทียบกับน้ำส้มควันไม้และการนำของเหลวไปทดลองไล่หรือกำจัดแมลงว่าสามารถทำได้หรือไม่

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรสร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่มีท่อปฏิกรณ์ยาวขึ้นเพื่อให้สามารถหาเวลาคงอยู่ที่นานได้ และเพิ่มอัตราป้อนชีวมวล

5.2.2 เสริมอุณหภูมิความร้อนให้หนาและแข็งแรง

5.2.3 นำแก๊สจากกระบวนการหมุนวนกลับไปในระบบหรือนำไปใช้อบชีวมวล

5.2.4 เพิ่มอัตราป้อนชีวมวลสำหรับเงื่อนไขที่ใช้เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 และ 3 นาที เป็น

7.5 และ 2.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

5.2.5 นำถ่านทอร์รีไฟต์ไปอัดแท่งเพื่อเพิ่มความหนาแน่นเชิงพลังงาน

5.2.6 ทดสอบหาความสามารถในการอบ

5.2.7 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของถ่านทอรรีไฟด์ ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน เพื่อนำมาคำนวณเป็นสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุ จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับสัดส่วนขององค์ประกอบธาตุของถ่านหิน

5.2.8 วิเคราะห์สารที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเทียบกับน้ำส้มควันไม้

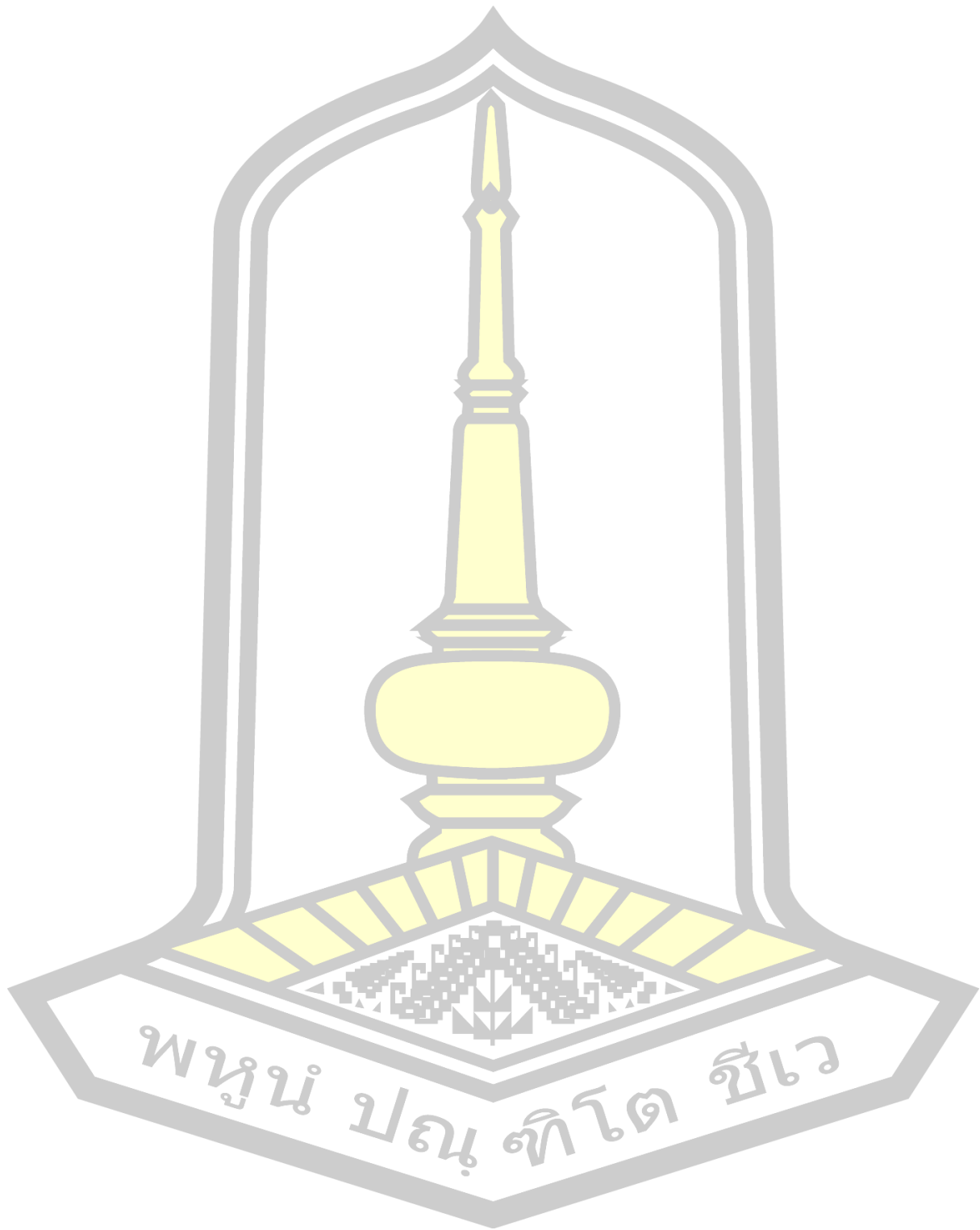
5.2.9 วิเคราะห์หาสารที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวแข็งตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า -10 องศาเซลเซียส ซึ่งอาจสามารถนำไปใช้เป็นสารหล่อเย็นได้

5.2.10 สร้างเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถเคลื่อนย้ายไปยังแห่งวัตถุประสงค์ได้ง่ายหรือเรียกว่า Mobile torrefaction ดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 47 Mobile torrefaction [71]

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

1. Bridgwater AV. "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading". *Biomass and Bioenergy*. 2012;38:68-94.
2. Wang MJ, Huang YF, Chiueh PT, Kuan WH, Lo SL. "Microwave-induced torrefaction of rice husk and sugarcane residues". *Energy*. 2012;37(1):177-84.
3. Madanayake BN, Gan S, Eastwick C, Ng HK. "Thermochemical and structural changes in *Jatropha curcas* seed cake during torrefaction for its use as coal co-firing feedstock". *Energy*. 2016;100:262-72.
4. Li M-F, Chen C-Z, Li X, Shen Y, Bian J, Sun R-C. "Torrefaction of bamboo under nitrogen atmosphere: Influence of temperature and time on the structure and properties of the solid product". *Fuel*. 2015;161:193-6.
5. Li M-F, Li X, Bian J, Xu J-K, Yang S, Sun R-C. "Influence of temperature on bamboo torrefaction under carbon dioxide atmosphere". *Industrial Crops and Products*. 2015;76:149-57.
6. Acharya B, Dutta A. "Fuel property enhancement of lignocellulosic and nonlignocellulosic biomass through torrefaction". *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2016;6(2):139-49.
7. Tumuluru JS, Wright CT, Hess JR, Kenney KL. "A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application". *Biofuels, Bioprod Bioref*. 2011;5:683-707.
8. Cen K, Chen D, Wang J, Cai Y, Wang L. "Effects of Water Washing and Torrefaction Pretreatments on Corn Stalk Pyrolysis: Combined Study Using TG-FTIR and a Fixed Bed Reactor". *Energy & Fuels*. 2016;30(12):10627-34.
9. Mazlan MAF, Uemura Y, Osman NB, Yusup S. "Fast pyrolysis of hardwood residues using a fixed bed drop-type pyrolyzer". *Energy Conversion and Management*. 2015;98:208-14.
10. Zheng A, Zhao Z, Chang S, Huang Z, Wang X, He F, et al. "Effect of torrefaction on structure and fast pyrolysis behavior of corncobs". *Bioresource Technology*. 2013;128:370-7.

11. Atienza-Martínez M, Mastral JF, Ábrego J, Ceamanos J, Gea G. "Sewage Sludge Torrefaction in an Auger Reactor". *Energy & Fuels*. 2015;29(1):160-70.
12. Recari J, Berrueco C, Puy N, Alier S, Bartrolí J, Farriol X. "Torrefaction of a solid recovered fuel (SRF) to improve the fuel properties for gasification processes". *Applied Energy*. 2017;203:177-88.
13. Woytiuk K, Campbell W, Gerspacher R, Evitts RW, Phoenix A. "The effect of torrefaction on syngas quality metrics from fluidized bed gasification of SRC willow". *Renewable Energy*. 2017;101:409-16.
14. Atienza-Martínez M, Rubio I, Fonts I, Ceamanos J, Gea G. "Effect of torrefaction on the catalytic post-treatment of sewage sludge pyrolysis vapors using γ -Al₂O₃". *Chemical Engineering Journal*. 2017;308:264-74.
15. Bert V, Allemon J, Sajet P, Dieu S, Papin A, Collet S, et al. "Torrefaction and pyrolysis of metal-enriched poplars from phytotechnologies: Effect of temperature and biomass chlorine content on metal distribution in end-products and valorization options". *Biomass and Bioenergy*. 2017;96:1-11.
16. Sirijanusorn S, Sriprateep K, Pattiya A. "Pyrolysis of cassava rhizome in a counter-rotating twin screw reactor unit". *Bioresource Technology*. 2013;139:343-8.
17. Nachenius RW, van de Wardt TA, Ronsse F, Prins W. "Torrefaction of pine in a bench-scale screw conveyor reactor". *Biomass and Bioenergy*. 2015;79:96-104.
18. Mei Y, Liu R, Yang Q, Yang H, Shao J, Draper C, et al. "Torrefaction of cedarwood in a pilot scale rotary kiln and the influence of industrial flue gas". *Bioresource Technology*. 2015;177:355-60.
19. Granados DA, Basu P, Chejne F, Nhuchhen DR. "Detailed Investigation into Torrefaction of Wood in a Two-Stage Inclined Rotary Torrefier". *Energy & Fuels*. 2017;31(1):647-58.
20. Nhuchhen DR, Basu P, Acharya B. "Investigation into overall heat transfer coefficient in indirectly heated rotary torrefier". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016;102:64-76.
21. Nhuchhen DR, Basu P, Acharya B. "Torrefaction of Poplar in a Continuous Two-Stage, Indirectly Heated Rotary Torrefier". *Energy & Fuels*. 2016;30(2):1027-38.

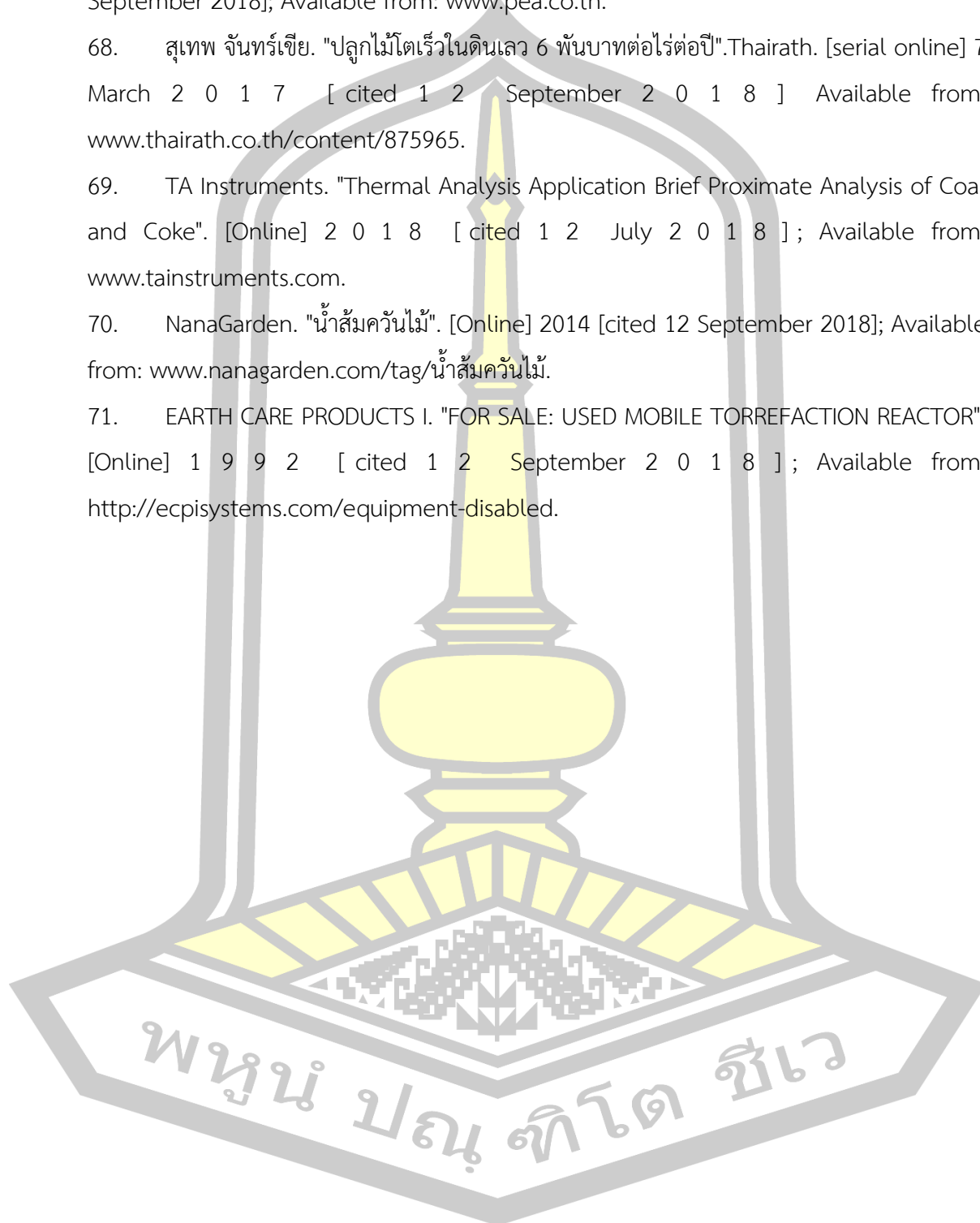
22. Lampe KE, DE) , Denker JB, DE) , Beyer CM, DE) , Erpelding RS, DE) inventors DEVICE AND METHOD FOR THE DRYING AND TORREFACTION OF AT LEAST ONE CARBON-CONTAINING MATERIAL FLOW IN A MULTIPLE HEARTH FURNACE. United States patent US 2012/0137538 A1. 2012.
23. Lonardi E, Hutmacher P, Kraemer E, Tockert P, inventors Multiple hearth furnace. United States patent US 20100129759 A1. 2010.
24. Doassans-Carrère N, Muller S, Mitzkat M. "REVE — a new industrial technology for biomass torrefaction: pilot studies". Fuel Processing Technology. 2014;126:155-62.
25. Jaap K, Shahab S, Staffan M, Sebnem M. "Status overview of torrefaction technologies". IEA Bioenergy Task 32 report (Enschede). 2012.
26. Matali S, Rahman NA, Idris SS, Yaacob N, Alias AB. "Lignocellulosic Biomass Solid Fuel Properties Enhancement via Torrefaction". Procedia Engineering. 2016;148:671-8.
27. Wannapeera J, Fungtammasan B, Worasuwanarak N. "Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass". Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2011;92(1):99-105.
28. Wannapeera J, Worasuwanarak N. "Examinations of chemical properties and pyrolysis behaviors of torrefied woody biomass prepared at the same torrefaction mass yields". Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2015;115:279-87.
29. Yue Y, Singh H, Singh B, Mani S. "Torrefaction of sorghum biomass to improve fuel properties". Bioresource Technology. 2017;232:372-9.
30. Phanphanich M, Mani S. "Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass". Bioresource Technology. 2011;102(2):1246-53.
31. มะลิวัลย์ หฤทัยธนาสันต์, เกษม หฤทัยธนาสันต์, เอกพงษ์ ธนะวีติ, ศักดา พรหมเลิศ, เอกชัย ป้ายแสงจันทร์. "ศักยภาพของกระถินยักษ์ ยูคาลิปตัส กระถินเทพา และกระถินเทพณรงค์ในการปลูกเป็นสวนป่าพืชพลังงาน". กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2010.
32. Morgan TJ, Turn SQ, Sun N, George A. "Fast Pyrolysis of Tropical Biomass Species and Influence of Water Pretreatment on Product Distributions". PLOS ONE. 2016;11(3):e0151368.

33. Huang Y-F, Cheng P-H, Chiueh P-T, Lo S-L. "Leucaena biochar produced by microwave torrefaction: Fuel properties and energy efficiency". *Applied Energy*. 2017;204:1018-25.
34. Loaiza JM, López F, García MT, García JC, Díaz MJ. "Biomass valorization by using a sequence of acid hydrolysis and pyrolysis processes. Application to *Leucaena leucocephala*". *Fuel*. 2017;203:393-402.
35. Green Country Project. "*Leucaena leucocephala*". [Online] 2008 [cited 12 September 2018]; Available from: www.greencoun.com/Leucaena1.php.
36. Office of the Cane and Sugar Board. "รายงานพื้นที่ปลูกอ้อยปีการผลิต 2558/59". 2016.
37. Tröger N, Richter D, Stahl R. "Effect of feedstock composition on product yields and energy recovery rates of fast pyrolysis products from different straw types". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2013;100:158-65.
38. van der Stelt MJC, Gerhauser H, Kiel JHA, Ptasinski KJ. "Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review". *Biomass and Bioenergy*. 2011;35(9):3748-62.
39. Uslu A, Faaij APC, Bergman PCA. "Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation". *Energy*. 2008;33(8):1206-23.
40. Zhang S, Dong Q, Chen T, Xiong Y. "Combination of Light Bio-oil Washing and Torrefaction Pretreatment of Rice Husk: Its Effects on Physicochemical Characteristics and Fast Pyrolysis Behavior". *Energy & Fuels*. 2016;30(4):3030-7.
41. Mardon SM, Hower JC. "Impact of coal properties on coal combustion by-product quality: examples from a Kentucky power plant". *International Journal of Coal Geology*. 2004;59(3-4):153-69.
42. Zhang C, Ho S-H, Chen W-H, Xie Y, Liu Z, Chang J-S. "Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index". *Applied Energy*. 2018;220:598-604.

43. Mahadevan R, Adhikari S, Shakya R, Wang K, Dayton DC, Li M, et al. "Effect of torrefaction temperature on lignin macromolecule and product distribution from HZSM-5 catalytic pyrolysis". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2016;122:95-105.
44. Zhang Y, Yao A, Song K. "Torrefaction of cultivation residue of *Auricularia auricula-judae* to obtain biochar with enhanced fuel properties". *Bioresource Technology*. 2016;206:211-6.
45. Prins MJ, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. "More efficient biomass gasification via torrefaction". *Energy*. 2006;31(15):3458-70.
46. Basu P, Rao S, Dhungana A. "An investigation into the effect of biomass particle size on its torrefaction". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2013;91(3):466-74.
47. Basu P, Dhungana A, Rao S, Acharya B. "Effect of oxygen presence in torrefier". *Journal of the Energy Institute*. 2013;86(3):171-6.
48. Basu P, Rao S, Acharya B, Dhungana A. "Effect of torrefaction on the density and volume changes of coarse biomass particles". *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2013;91(6):1040-4.
49. Sudo S, Takahashi F, Takeuchi M. "Chemical properties of biomass". *Biomass Handbook*. 1989:892-933.
50. KEMA. "Statusoverzicht en impactanalyse van torrefactie in Nederland". 30920555-Consulting 10-0508 Confidential. 2010.
51. Kleinschmidt CP. "Overview of international developments in torrefaction". 2011.
52. Koppejan J, Sokhansanj S, Melin S, Madrali S. "Status overview of torrefaction technologies" 2012. 1-54 p.
53. Thamer D. "New challenges in torrefaction of biomass," *ACB Torrefaction*. 2013.
54. Nunes LJR, De Oliveira Matias JC, Da Silva Catalão JP. "Chapter 1 - Introduction". *Torrefaction of Biomass for Energy Applications: Academic Press*; 2018. p. 1-43.

55. Pneumax. "Vibrator". [Online] 2010 [cited 12 September 2018]; Available from: www.pneumax.co.th/Article/Vibrator.php.
56. Parr Instrument Company. "1341 Plain Jacket Bomb Calorimeter". [Online] 2018 [cited 12 September 2018]; Available from: www.parrinst.com/products/oxygen-bomb-calorimeters/1341-plain-jacket-bomb-calorimeter/.
57. Prins MJ, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. "Torrefaction of wood: Part 1. Weight loss kinetics". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2006;77(1):28-34.
58. Prins MJ, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. "Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2006;77(1):35-40.
59. Amprohealth. "กรดอะซิติกคืออะไรและมีประโยชน์อย่างไร?". [Online] 2017 [cited 12 September 2018]; Available from: <https://amprohealth.com/nutrition/acetic-acid/>.
60. Food Network Solution. "Formic acid". [Online] 2018 [cited 12 September 2018]; Available from: www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1571/formic-acid-กรดฟอร์มิก.
61. Rudolfsson M, Borén E, Pommer L, Nordin A, Lestander TA. "Combined effects of torrefaction and pelletization parameters on the quality of pellets produced from torrefied biomass". *Applied Energy*. 2017;191:414-24.
62. Jae-Kyung Y, Sang-Woo P, Kyung-Ryul B. "Fuel Ratio and Combustion Characteristics of Torrefied Biomass". *Journal of Korea Society of Waste Management*. 2013;30(4):376-82.
63. Ohm T-I, Chae J-S, Kim J-K, Oh S-C. "Study on the characteristics of biomass for co-combustion in coal power plant". *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2015;17(2):249-57.
64. Huang Y-F, Sung H-T, Chiueh P-T, Lo S-L. "Co-torrefaction of sewage sludge and leucaena by using microwave heating". *Energy*. 2016;116, Part 1:1-7.
65. Shafizadeh F. "Pyrolytic Reactions and Products of Biomass". In: Overend RP, Milne TA, Mudge LK, editors. *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*. Dordrecht: Springer Netherlands; 1985. p. 183-217.
66. Department of Alternative Energy Development and Efficiency. "Energy Situation January - May 2018.". 2018.

67. Provincial Electricity Authority. "ประมาณการค่าไฟฟ้า". [Online] 2018 [cited 12 September 2018]; Available from: www.pea.co.th.
68. สุเทพ จันทร์เขีย. "ปลุกไม้โตเร็วในดินเลข 6 พันบาทต่อไร่ต่อปี". Thairath. [serial online] 7 March 2017 [cited 12 September 2018] Available from: www.thairath.co.th/content/875965.
69. TA Instruments. "Thermal Analysis Application Brief Proximate Analysis of Coal and Coke". [Online] 2018 [cited 12 July 2018]; Available from: www.tainstruments.com.
70. NanaGarden. "น้ำส้มควันไม้". [Online] 2014 [cited 12 September 2018]; Available from: www.nanagarden.com/tag/น้ำส้มควันไม้.
71. EARTH CARE PRODUCTS I. "FOR SALE: USED MOBILE TORREFACTION REACTOR". [Online] 1992 [cited 12 September 2018]; Available from: <http://ecpisystems.com/equipment-disabled>.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสถาพร สอนสุภาพ
วันเกิด	วันที่ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2536
สถานที่เกิด	อำเภอเอราวัณ จังหวัดเลย
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 12 หมู่ 13 บ้านโนนถาวร ตำบลเอราวัณ อำเภอเอราวัณ จังหวัดเลย รหัสไปรษณีย์ 42220
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2552 มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนเอราวัณวิทยาคม ตำบลเอราวัณ อำเภอเอราวัณ จังหวัดเลย พ.ศ. 2555 มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนเอราวัณวิทยาคม ตำบลเอราวัณ อำเภอเอราวัณ จังหวัดเลย พ.ศ. 2559 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ. 2561 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	โครงการพัฒนาศักยภาพบุคลากร STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) เพื่อการวิจัยและพัฒนาสำหรับ ภาคอุตสาหกรรม ประจำปี 2559 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีแห่งชาติ สัญญาเลขที่ SCA-CO-2560-3624-TH

พูน ปณ ทัโต ชีเว