



การไฟโรไลซีชีวมวลแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนที่มีการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊ส
กลับมาใช้ใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบฟอง

วิทยานิพนธ์
ของ
ปรีชา แนวจำปา

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ตุลาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การไฟฟระไลสขั้วมวลแบบเร็วโดยใชัตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองชั้นตอนที่มีการหมุนวนผลิตภันท์แก๊ส
กลับมามีใหม่ในเครื่องปฏิกิริยาฟลูอิดไคซ์เบดแบบพอง

วิทยานิพนธ์
ของ
ปรีชา แนวจำปา

พหุบัน ปณณลิต ชัเว

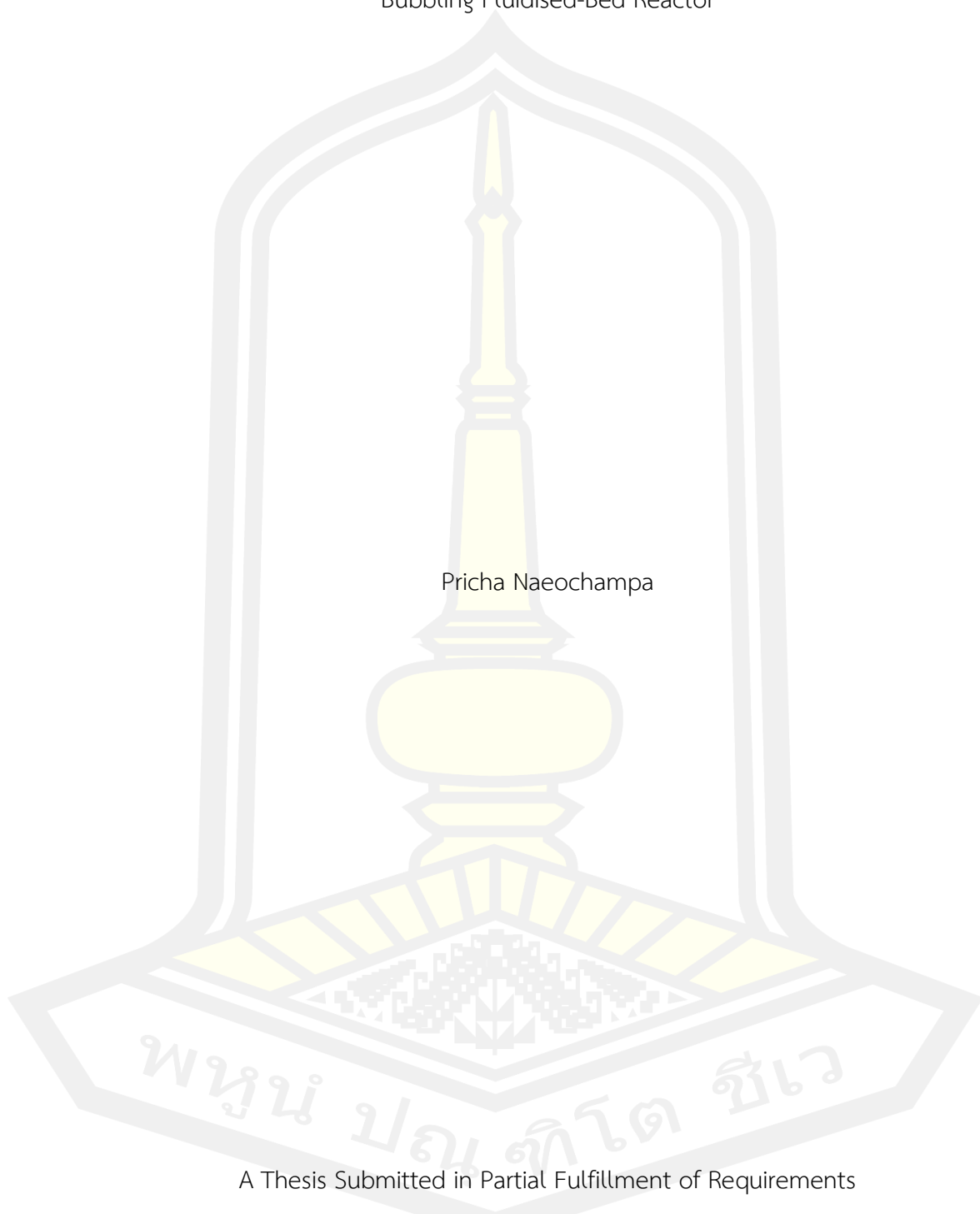
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

ตุลาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Two-Stage Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass with Product Gas Circulation in a
Bubbling Fluidised-Bed Reactor

Pricha Naeochampa



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

October 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายปรีชา แนวจำปา แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร. กันย์ กังวานสายชล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อธิวัฒน์ ขมภูคำ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ยศฐา ศรีเทพ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การไฟโรไลซิสชีวมวลแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนที่มีการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง		
ผู้วิจัย	ปรีชา แนวจำปา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

การไฟโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการที่นิยมใช้ในการแปลงชีวมวลให้เป็นไบโอออยล์ที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัญหาที่สำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข เช่น ซีเอสเอ็มไฟว์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการไฟโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต้นทุนต่ำเป็นขั้นตอนแรกและตัวเร่งปฏิกิริยาซีเอสเอ็มไฟว์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขั้นที่สอง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาได้คัดกรองโดยใช้ระบบไมโครรีแอกเตอร์ไฟโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์ จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกมาทดสอบในหน่วยไฟโรไลซิสแบบเร็วที่มีอัตราป้อนอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพองด้วยระบบที่มีและไม่มี การหมุนเวียนของผลิตภัณฑ์แก๊ส การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนของโคบอลต์โมลิบดีนัมและแคลเซียมออกไซด์ แสดงให้เห็นว่าการเกิดไฮโดรคาร์บอนเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีเอสเอ็มไฟว์ มีเพียงตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมที่มีค่าใกล้เคียงมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้โคบอลต์โมลิบดีนัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหลัก ผลการวิจัยพบว่าการไฟโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่มีการหมุนวนแก๊ส พบว่ามีปริมาณไบโอออยล์ ถ่านชีวภาพ และแก๊สเท่ากับร้อยละ 75 17 และ 8 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อใช้การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊ส ปริมาณไบโอออยล์ลดลงเหลือร้อยละ 64 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 18 โดยน้ำหนักในขณะที่ปริมาณถ่านชีวภาพมีปริมาณเท่าเดิม เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสารอินทรีย์ในไบโอออยล์ถูกแยกออกเป็นเฟสหนักและเฟสเบา การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเอสเอ็มไฟว์เพียงอย่างเดียว พบว่าไบโอออยล์เฟสหนักเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5.3 เป็นร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สไบโอออยล์เฟสเบาลดลงเล็กน้อยจากร้อยละ 3.3 เป็นร้อยละ 2.9 โดยน้ำหนัก การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพองมีปริมาณไบโอออยล์เฟสหนักประมาณร้อยละ 5.2-5.4 โดยน้ำหนักในขณะที่ปริมาณไบโอออยล์เฟสเบาลดลงอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับร้อยละ 0.4-0.5 โดยน้ำหนักในระบบที่มีและไม่มี การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊ส

คำสำคัญ : ไม้ยางพารา, ไฟโรไลซิสแบบเร็ว, หมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊ส, ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองชั้นตอน,
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชด์แบบพอง



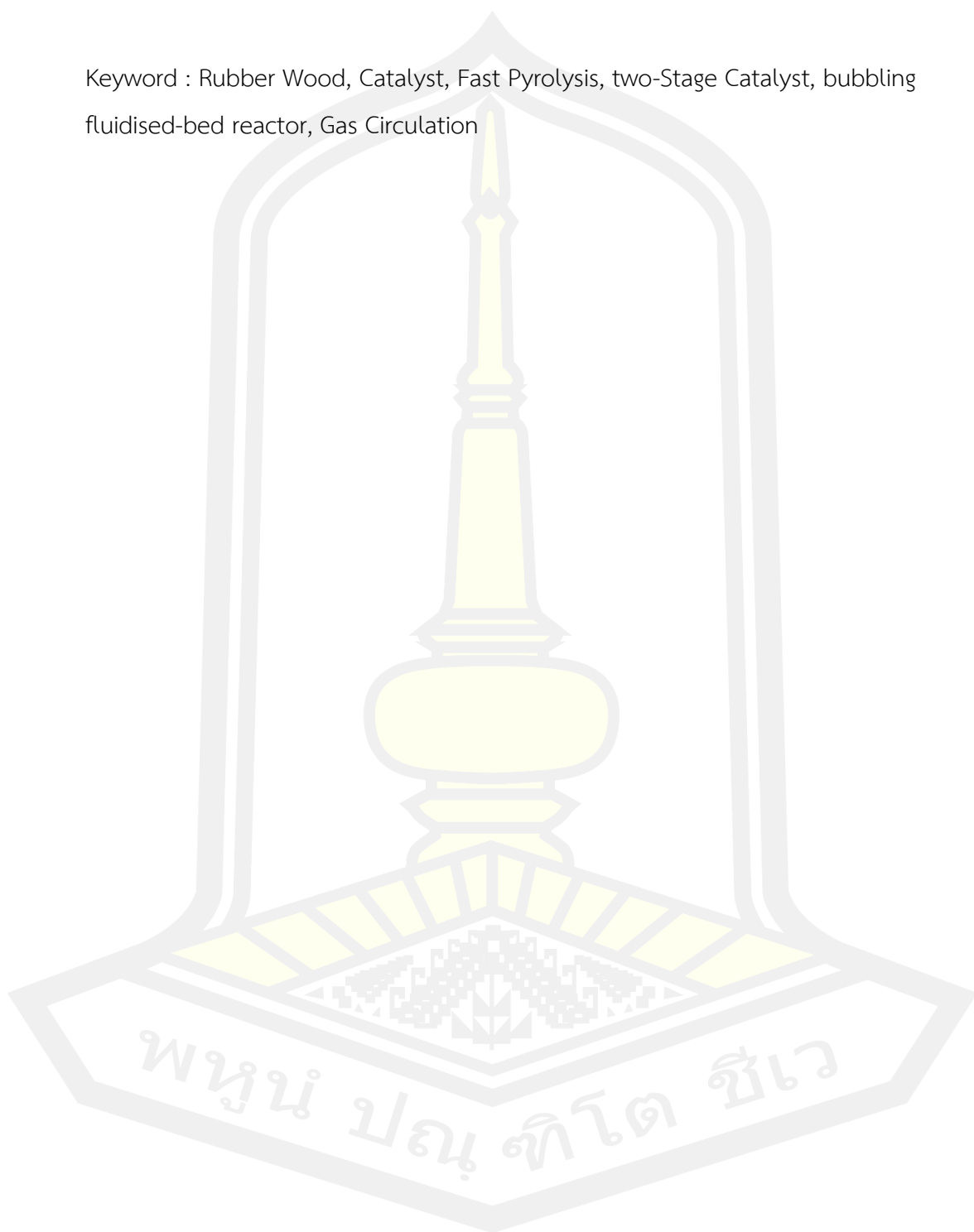
TITLE	Two-Stage Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass with Product Gas Circulation in a Bubbling Fluidised-Bed Reactor		
AUTHOR	Pricha Naeochampa		
ADVISORS	Associate Professor Adisak Pattiya , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Mechanical Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

Catalytic fast pyrolysis is known as a process for converting solid biomass into high quality bio-oil with reduced oxygen content. Nevertheless, rapid deactivation of traditional catalyst like ZSM-5 is a crucial problem to be solved. In this work, two-stage catalytic fast pyrolysis was applied by using a primary low-cost catalyst as a first stage and a typical ZSM-5 catalyst as a second stage catalyst bed. Several types of catalysts were screened using a micro-reactor pyrolysis-GC/MS system. Subsequently, selected catalysts were tested in a continuously-feeding fast pyrolysis unit based on bench-scale bubbling fluidised-bed (BFB) reactor with and without product gas circulation. In the two-stage catalyst screening test, CoMo/Al₂O₃ and CaO showed equivalent potential for hydrocarbon production in comparison with ZSM-5 catalyst. In the bench scale study, only CoMo catalyst was selected as candidate primary catalyst. The result showed that for non-catalytic pyrolysis without the gas circulation, the bio-oil, char and gas yields were 75, 17 and 8 wt%, respectively. When applying the gas circulation, the bio-oil yield was decreased to 64 wt% with the increase of gas yield to 18wt%, whereas the char yield remained unaffected. When applying catalysts, the bio-oil organic-rich fraction was separated into heavy and light phases. By using only ZSM-5 in the bench-scale unit, the heavy bio-oil was increased from 5.3 wt% to 6.2 wt% when applying product gas circulation, but the light fraction slightly decreased from 3.3 wt% to 2.9 wt%. When applying two-stage catalytic process in the BFB reactor, the heavy bio-oil remained around 5.2-5.4 wt%, whereas the light fraction reduced significantly to merely 0.4-0.5

wt% for both with and without product gas circulation.

Keyword : Rubber Wood, Catalyst, Fast Pyrolysis, two-Stage Catalyst, bubbling fluidised-bed reactor, Gas Circulation



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากการให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ความคิดเห็น และกำลังใจที่มีต่อผู้ดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและแนวคิดว่าความรู้ทางวิชาการ แนะนำการจัดทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งส่งผลให้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์มีความรู้ความสามารถในการพัฒนาวิทยานิพนธ์อย่างมีประสิทธิภาพ

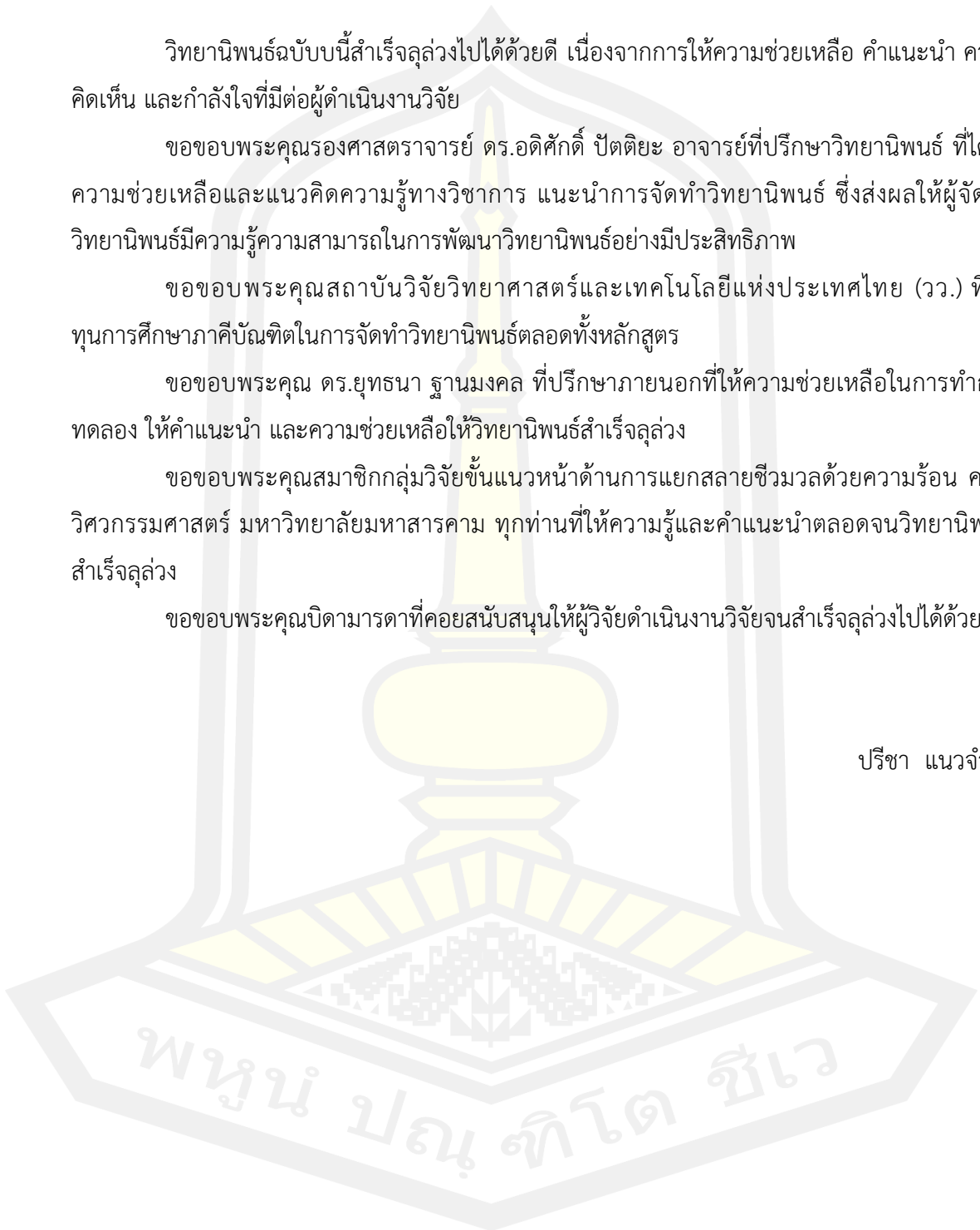
ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ที่ให้ทุนการศึกษาภาคิบัณฑิตในการจัดทำวิทยานิพนธ์ตลอดทั้งหลักสูตร

ขอขอบพระคุณ ดร.ยุพธนา ฐานมงคล ที่ปรึกษาภายนอกที่ให้ความช่วยเหลือในการทำการทดลอง ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณสมาชิกกลุ่มวิจัยขั้นแนวหน้าด้านการแยกสลายชีวมวลด้วยความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกท่านที่ให้ความรู้และคำแนะนำตลอดจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยสนับสนุนให้ผู้วิจัยดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ปรีชา แนวจำปา



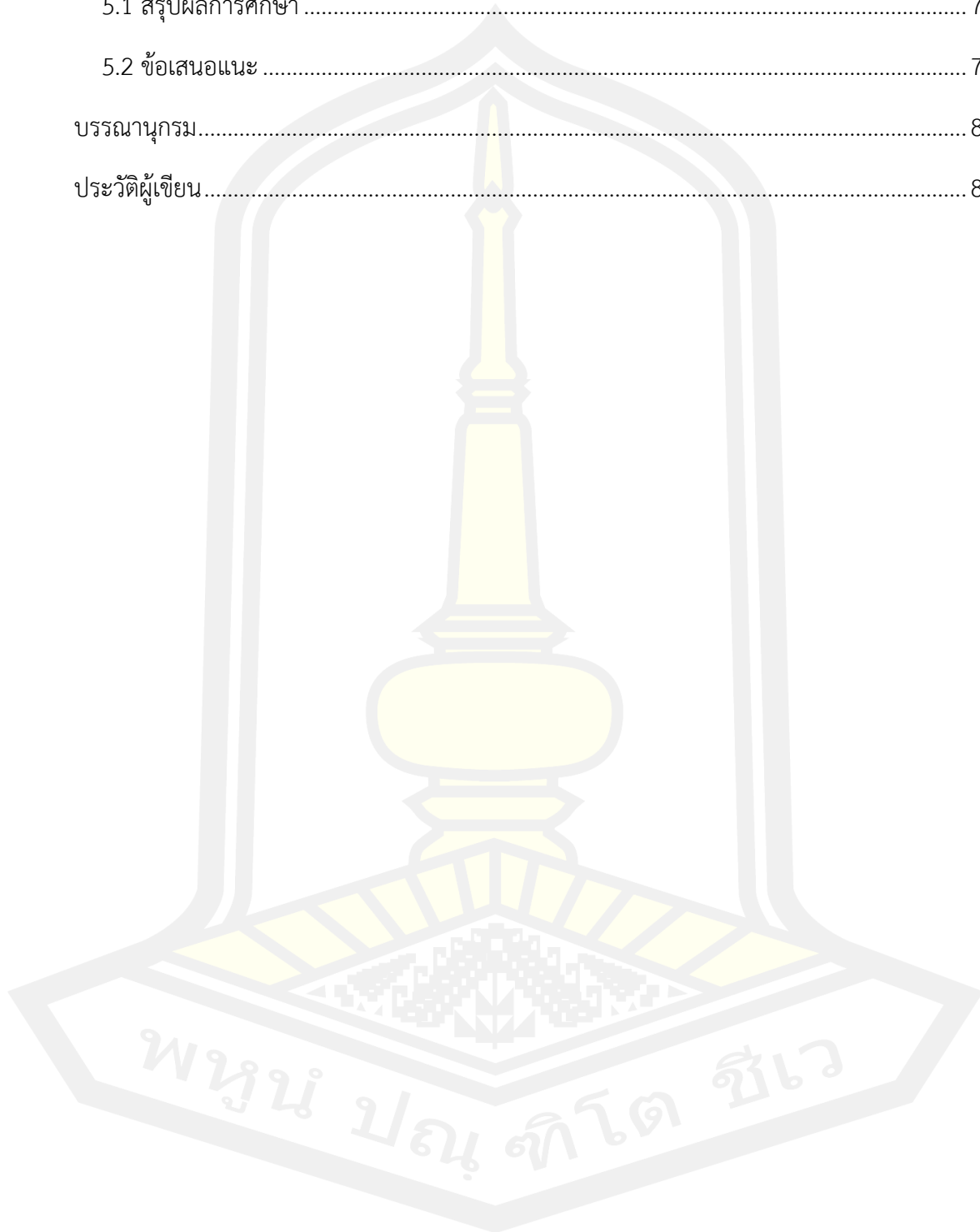
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพประกอบ.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.3.1 เครื่องไฟโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปคโตรมิเตอร์.....	4
1.3.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง	5
1.4 ผลที่ได้รับ.....	6
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	7
1.6 แผนการดำเนินงาน	8
1.7 งบประมาณ	9
1.8 สถานที่ดำเนินงานวิจัย	10
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล	11
2.1 ชีวมวล	11
2.1.1 องค์ประกอบเคมีของชีวมวล.....	11
2.1.2 สมบัติพื้นฐานของชีวมวล.....	12

2.1.3 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย	13
2.2 ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย	15
2.3 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว	15
2.3.1 ชนิดของกระบวนการไพโรไลซิส	16
2.3.2 อุปกรณ์หลัก	16
2.3.3 หลักการทำงานในระบบไพโรไลซิสแบบเร็ว	18
2.3.4 การหมุนวนแก๊ส	18
2.4 เครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์	18
2.5 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด	20
2.5.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง	20
2.5.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน	20
2.6 ไบโอมอยล์	21
2.6.1 สมบัติของไบโอมอยล์	21
2.6.2 การนำไปใช้ประโยชน์	22
2.6.3 ปัญหาที่เกี่ยวข้องและวิธีการแก้ไข	24
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา	24
2.7.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์	25
2.7.2 การเร่งปฏิกิริยาวีวิพันธ์	25
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิส	25
2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส	26
2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่	28
2.8.4 สรุป	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	30

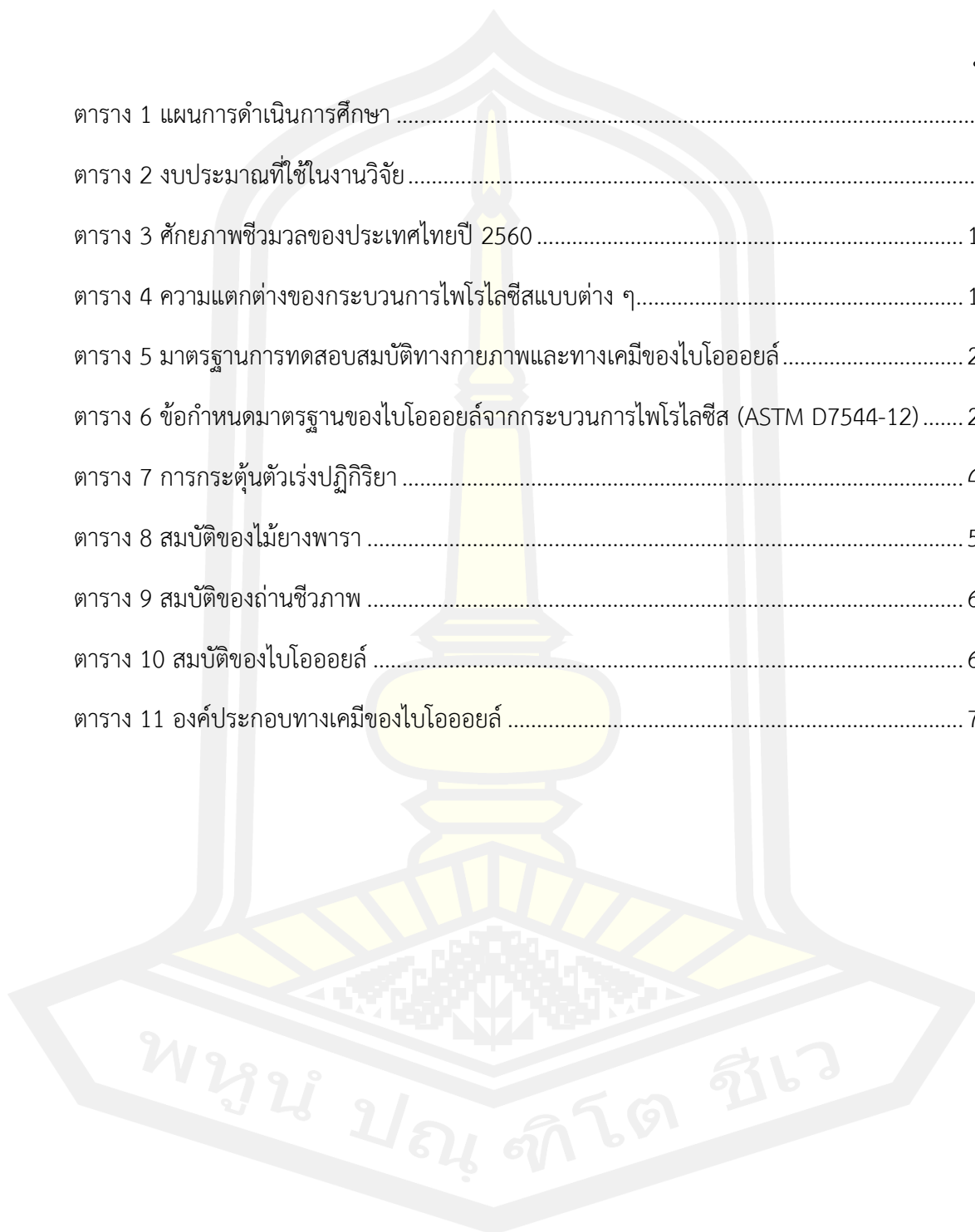
3.1 การเตรียมและการวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล	30
3.1.1 การเตรียมชีวมวล	30
3.1.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล	32
3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง	33
3.2.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา	33
3.2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	46
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	47
3.3.1 เครื่องไฟโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์	47
3.3.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง	49
3.3.3 ลำดับขั้นตอนการทดลอง	52
3.3.4 การออกแบบแผนการทดลอง	53
3.3.5 การเก็บข้อมูล	54
3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์	54
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	58
4.1 สมบัติของชีวมวล	58
4.2 การไฟโรไลซิสในเครื่องไฟโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์	59
4.2.1 การไฟโรไลซิสแบบขั้นตอนเดียว	59
4.2.2 การไฟโรไลซิสแบบสองขั้นตอน	60
4.3 การไฟโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง	61
4.3.1 การไฟโรไลซิสแบบเร็ว	61
4.3.2 การไฟโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	64
4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์	67
4.4.1 สมบัติของถ่านชีวภาพ	67
4.4.2 สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีของไบโอออยล์	68

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	78
5.1 สรุปผลการศึกษา	78
5.2 ข้อเสนอแนะ	79
บรรณานุกรม.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	86



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 แผนการดำเนินการศึกษา	8
ตาราง 2 งบประมาณที่ใช้ในงานวิจัย	9
ตาราง 3 ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทยปี 2560	14
ตาราง 4 ความแตกต่างของกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่าง ๆ.....	16
ตาราง 5 มาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอออยล์	22
ตาราง 6 ข้อกำหนดมาตรฐานของไบโอออยล์จากกระบวนการไพโรไลซิส (ASTM D7544-12)	23
ตาราง 7 การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา	46
ตาราง 8 สมบัติของไม้ยางพารา	58
ตาราง 9 สมบัติของถ่านชีวภาพ	67
ตาราง 10 สมบัติของไบโอออยล์	69
ตาราง 11 องค์ประกอบทางเคมีของไบโอออยล์	70



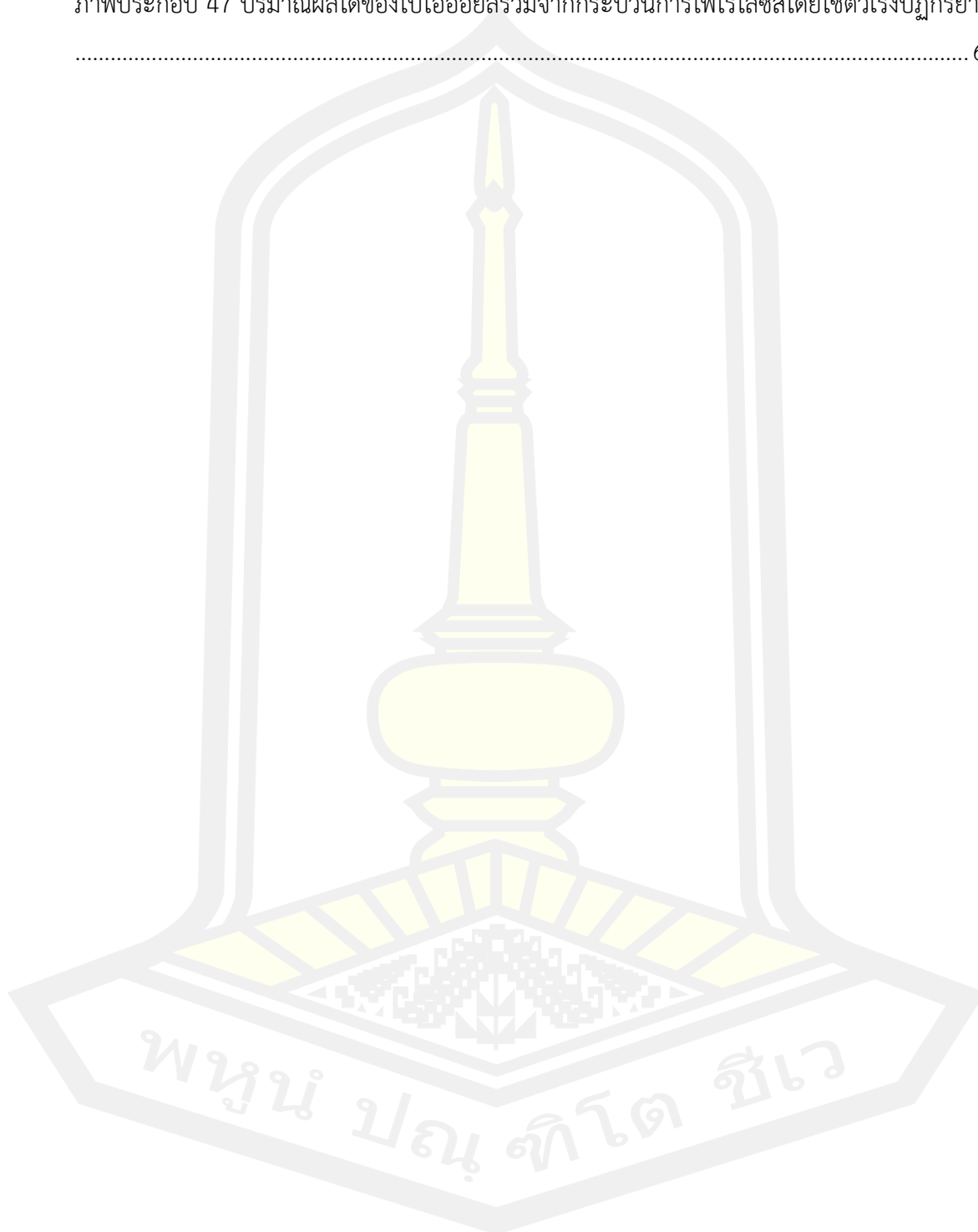
สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างขององค์ประกอบชีวมวล	11
ภาพประกอบ 2 ปีกไม้ (ก) และซี่เลื่อยไม้ยาง (ข).....	15
ภาพประกอบ 3 เครื่องไฟโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	19
ภาพประกอบ 4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบฟอง	20
ภาพประกอบ 5 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน	21
ภาพประกอบ 6 การนำไปใช้งานของไบโอออยล์ [26]	23
ภาพประกอบ 7 ไม้ยางพารา	30
ภาพประกอบ 8 เครื่องบดหยาบ (ก) และเครื่องบดละเอียด (ข)	31
ภาพประกอบ 9 เครื่องร่อนมาตรฐานและตะแกรง	31
ภาพประกอบ 10 เตาเผา	31
ภาพประกอบ 11 ซีเอสเอ็มไพร์	33
ภาพประกอบ 12 เอ็นเอชดีดับเบิลยู.....	34
ภาพประกอบ 13 ซิงค์ออกไซด์.....	35
ภาพประกอบ 14 คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์	35
ภาพประกอบ 15 ซีเอสเอ็มไพร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ	36
ภาพประกอบ 16 ไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทส.....	37
ภาพประกอบ 17 ไทเทเนียมไดออกไซด์	37
ภาพประกอบ 18 ไทเทเนียมไดออกไซด์ รูไทล์	38
ภาพประกอบ 19 โคบอลต์/โมลิบดีนัม	39
ภาพประกอบ 20 ดินขาวเคโอลิน	39
ภาพประกอบ 21 เบนโทไนท์	40

ภาพประกอบ 22 คีร์ก้า.....	41
ภาพประกอบ 23 โคโลไมต์.....	41
ภาพประกอบ 24 พัมมิส.....	42
ภาพประกอบ 25 เพอร์ไลต์.....	43
ภาพประกอบ 26 เวอร์มิคิวไลต์.....	43
ภาพประกอบ 27 เวอร์มิคิวไลต์กระตุ้นด้วยกรด.....	44
ภาพประกอบ 28 ซีโอไลต์ธรรมชาติ	45
ภาพประกอบ 29 แคลเซียมออกไซด์.....	45
ภาพประกอบ 30 ถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่าง	47
ภาพประกอบ 31 เครื่องชั่งยี่ห้อ mettler toledo รุ่น AB204-S	48
ภาพประกอบ 32 เครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์	48
ภาพประกอบ 33 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง.....	51
ภาพประกอบ 34 ชุดหมุนวนแก๊ส.....	51
ภาพประกอบ 35 แผนภาพการจัดลำดับตัวอย่างในถ้วยแบบ (ก) หนึ่งชั้นตอนและ (ข) สองชั้นตอน.....	53
ภาพประกอบ 36 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำ.....	55
ภาพประกอบ 37 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์	56
ภาพประกอบ 38 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี.....	57
ภาพประกอบ 39 การไพโรไลซิสแบบหนึ่งชั้นตอน.....	60
ภาพประกอบ 40 การไพโรไลซิสแบบสองชั้นตอน	61
ภาพประกอบ 41 ถ่านชีวภาพ	62
ภาพประกอบ 42 ไบโอดีออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส.....	62
ภาพประกอบ 43 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส	63
ภาพประกอบ 44 ปริมาณผลได้ของไบโอดีออกไซด์รวมจากกระบวนการไพโรไลซิส.....	64
ภาพประกอบ 45 ไบโอดีออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	64

ภาพประกอบ 46 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 66

ภาพประกอบ 47 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมจากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
..... 66



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ชีวมวล (biomass) เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีสำคัญ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนและหาได้ตามธรรมชาติ ซึ่งแตกต่างจากซากดึกดำบรรพ์ที่ต้องใช้เวลาในการทับถมกันเป็นเวลานานและเมื่อนำมาใช้ประโยชน์ด้วยการเผาไหม้ (combustion) ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อบรรยากาศก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ปัจจุบันมีการแก้ไขปัญหาโดยการนำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานทางเลือกที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าการใช้เชื้อเพลิงจากซากดึกดำบรรพ์ กระบวนการแปรรูปชีวมวลได้รับความนิยมและเป็นทางเลือกที่น่าสนใจคือกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบช้า แบบกลาง และแบบเร็ว สภาวะของแต่ละกระบวนการที่มีความแตกต่างกันนั้นส่งผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นกระบวนการแยกสลายทางความร้อนที่ปราศจากออกซิเจนที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส และมีเวลาคงอยู่ของไพโรไลซิสประมาณ 1 วินาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบไปด้วยของเหลวหรือไบโอออยล์ (bio-oil) ร้อยละ 75 ของแข็งหรือถ่านชีวภาพ (char) ร้อยละ 12 และแก๊ส (gas) ร้อยละ 13 [1] งานวิจัยของ Bridgwater [1] มีการอธิบายเครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้กับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน แบบเสียดลละลาย แบบสุญญากาศ แบบตกอิสระ และแบบฟลูอิดไชน์เบดที่มีการใช้งานจำนวนมาก ซึ่งมีหลักการที่แตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่นคือการใช้แก๊สเฉื่อยเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ทำให้ตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนหรือทราบดีการเคลื่อนที่และสัมผัสกับชีวมวลที่ถูกป้อนเข้ามา ตัวกลางถ่ายโอนความร้อนช่วยให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงและมีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูง เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน [2] แบบพอง [3] และแบบปั่นป่วน [4] เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวนมีการใช้ออกซิเจนในปริมาณที่เหมาะสมเข้าไปในระบบเพื่อเผาไหม้ถ่านชีวภาพที่เคลือบผิวตัวกลางถ่ายโอนความร้อนและหมุนวนนำกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้ตัวกลางถ่ายโอนความร้อนยังคงประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อน เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้ไม่เหมาะสำหรับห้องปฏิบัติการเพราะมีขั้นตอนที่ซับซ้อนและผลที่ได้ไม่แตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบพองมากนัก เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบพองใช้แก๊สพาเข้าไปในระบบทำให้เกิดการเคลื่อนที่คล้ายพอง และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบปั่นป่วนมีการใช้

อัตราการไหลของแก๊สเฉื่อยที่มากกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง ดังนั้นการเคลื่อนที่ของตัวกลางถ่ายโอนความร้อนมีทิศทางและความเร็วที่ไม่แน่นอน ส่งผลให้ทรายมีโอกาสสัมผัสกับชีวมวลน้อยกว่าหรืออัตราการนำความร้อนต่ำกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง อัตราการถ่ายโอนความร้อนมีความสำคัญในการผลิตไบโอเอทานอล ซึ่งในกระบวนการถ้าวอัตราการถ่ายโอนความร้อนต่ำผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนใหญ่และมีปริมาณไบโอเอทานอลต่ำ งานวิจัย Mohammad Amir Firdaus Mazlan [5] ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้ชี้เสื่อยไม้ยางพาราในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณไบโอเอทานอลร้อยละ 33 มีปริมาณน้ำสูงในผลิตภัณฑ์ไบโอเอทานอลและมีปริมาณผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่สูงมาก หากเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ไบโอเอทานอลที่ได้จากใบและยอดอ้อยในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ไบโอเอทานอลรวมสูงสุดร้อยละ 62 แบ่งออกเป็นไบโอเอทานอลหนักร้อยละ 42 และไบโอเอทานอลเบาร้อยละ 20 เมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ชีวมวลและถ่านชีวภาพสลายตัวเพิ่มขึ้นกลายเป็นแก๊สทำให้ปริมาณผลได้ลดลง [6] แสดงให้เห็นว่าการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดให้ปริมาณผลได้ของไบโอเอทานอลสูงและปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพต่ำ

ไบโอเอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำและมีสมบัติคล้ายน้ำมันเตาสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผาและหม้อต้มไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อน ไบโอเอทานอลมีข้อจำกัด ได้แก่ ค่าพีเอชต่ำ ปริมาณน้ำสูง ความหนืดสูง และปริมาณออกซิเจนสูง ทำให้ไม่สามารถผสมเข้ากับปิโตรเลียมได้ หากต้องการปรับปรุงข้อด้อยต่าง ๆ ของไบโอเอทานอลสามารถยกระดับด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งการยกระดับนั้นสามารถทำได้หลังกระบวนการผลิตหรือยกระดับในกระบวนการ การเลือกยกระดับในกระบวนการจึงเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและมีขั้นตอนน้อยกว่าการยกระดับหลังการผลิต งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยายกระดับของไบโอเอทานอลมีการทดสอบตัวเร่งปฏิกิริยามากมายหลายชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์ (zeolite) ซีโอเอสเอ็มไฟว์ (ZSM-5 based) ซีโอไลต์ไลค์ (zeolite-like) โลหะออกไซด์ (metal oxides) และแร่ธรรมชาติ (natural minerals) [7]

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียวสามารถปรับปรุงสมบัติของไบโอเอทานอลได้เพียงเล็กน้อยและปัญหาส่วนใหญ่ที่พบคือการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยากับไคโรไลซิสทำให้เกิดถ่านโค้ก ส่วนใหญ่ถ่านโค้กเกิดในช่วงเวลา 20 นาทีแรกของการทดลอง [8] งานวิจัยของ Wongsiriwittaya และคณะ มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ค่าความร้อนของไบโอเอทานอลเพิ่มขึ้น สามารถยืดอายุการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอเอทานอลลดลง และผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น [6] แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ โดยการหมวนผลิตถ่านโค้ก

ซึ่งเป็นการลดการใช้แก๊สเฉื่อยที่ปล่อยเข้าไปในระบบ นอกจากนั้นยังมีการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณของไบโอเออยล์เพิ่มขึ้น ความหนืดลดลง และปริมาณของแข็งลดลง [9, 10] การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 1 ขั้นตอน พบว่ามีปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์เพิ่มขึ้นและค่าความร้อนของไบโอเออยล์สูงขึ้น นอกจากนั้นยังมีค่าความหนืดและความหนาแน่นลดลง [11]

อย่างไรก็ตามยังไม่มีผลการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน ดังนั้นจึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติ สามารถหาได้ง่ายและมีราคาต่ำ เพื่อลดต้นทุนของกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ ซีเอสเอ็มไฟว์, เอ็นเอชดีดับเบิลยู, ซิงค์ออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์/สังกะสีออกไซด์, ซีเอสเอ็มไฟว์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส), ไทเทเนียมไดออกไซด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์), โคบอลต์/โมลิบดีนัม, ดินขาวเคโอลิน, ดินเบนโทไนท์, หินศิรี้ก้า, โดโลไมต์, พัมมิส, เพอร์ไลต์, เวอร์มิคูไลต์, เวอร์มิคูไลต์กระตุ้นด้วยกรด, ซีโอไลต์ และแคลเซียมออกไซด์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนดังต่อไปนี้

ศึกษาอุณหภูมิและลำดับของตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์แบบไมโครสเกล เพื่อลดระยะเวลาการทดลองและมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน จากนั้นนำผลการศึกษาไปต่อยอดในระบบที่ใหญ่ขึ้นด้วยเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบพองที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนและมีการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ เพื่อผลิตไบโอเออยล์ที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำและปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์สูง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อหาลำดับของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนด้วยเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสและการเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ที่ผลิตจากไม้ยางพาราในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง

1.2.3 เพื่อหาลำดับของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนที่ส่งผลให้ปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ดีที่สุดภายใต้ขอบเขตที่ศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง

1.2.4 เพื่อศึกษาผลของการใช้แก๊สผลิตภัณฑ์หมุนวนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ที่ผลิตจากไม้ยางพาราในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการทดลองในเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.3.1 เครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์

1.3.1.1 ตัวแปรต้น

1. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนึ่งขั้นตอน ได้แก่ ซีเอสเอ็มไฟว์, เอ็นเอชดีดับเบิ้ลยู, ซิงค์ออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์, ซีเอสเอ็มไฟว์กระตุ้นด้วยไอน้ำ, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส), ไทเทเนียมไดออกไซด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์), โคบอลต์/โมลิบดีนัม, ดินขาวเคโอลิน, ดินเบนโทไนท์, หินศิรี้ก้า, โดโลไมต์, พัมมิส, เพอร์ไลท์, เวอร์มิคูไลต์, เวอร์มิคูไลต์กระตุ้นด้วยกรด, ซีโอไลต์ และแคลเซียมออกไซด์

2. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ เอ็นเอชดีดับเบิ้ลยู, ซิงค์ออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์, ซีเอสเอ็มไฟว์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส), ไทเทเนียมไดออกไซด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์), โคบอลต์/โมลิบดีนัม, ดินขาวเคโอลิน, ดินเบนโทไนท์, หินศิรี้ก้า, โดโลไมต์, พัมมิส, เพอร์ไลท์, เวอร์มิคูไลต์, เวอร์มิคูไลต์ผสมกรด, ซีโอไลต์ และแคลเซียมออกไซด์ และส่วนขั้นตอนที่สองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเอสเอ็มไฟว์

3. อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และซีเมนต์ 2:1 3:1 และ 4:1

1.3.1.2 ตัวแปรตาม

1. องค์ประกอบทางเคมีของผลการใช้ตัวเร่ง

1.3.1.3 ตัวแปรควบคุม

1. ไม้ยางพาราขนาดอนุภาค 0.075-0.150 มิลลิเมตร

2. อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและซีเมนต์ 2:1

3. อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส

4. คอลัมน์ Ultra-alloy capillary column (30 m - 0.25 mm - 0.25 μ m)

5. ควบคุมอุณหภูมิเตาอบที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที เพิ่มจาก 45 เป็น 300 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อนาที รักษาอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที

6. อัตราการไหลแก๊สฮีเลียมเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที

1.3.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง

1.3.2.1 ตัวแปรต้น

1. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนึ่งขั้นตอนและแบบสองขั้นตอน

2. การใช้ผลิตภัณฑ์แก๊สประกอบไปด้วยการหมุนวนและไม่หมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่

1.3.2.2 ตัวแปรตาม

1. ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ได้แก่ ไบโอดีเซลและถ่านชีวภาพ

2. สมบัติของถ่านชีวภาพ ได้แก่ ค่าพลังงานความร้อนและปริมาณผลได้ทางพลังงาน

3. สมบัติของไบโอดีเซล ได้แก่ ปริมาณน้ำ (water content) ค่าความร้อน (heating value) การวิเคราะห์ธาตุพื้นฐาน (CHNO) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (GC/MS)

1.3.2.3 ตัวแปรควบคุม

1. ไม้ยางพาราขนาดอนุภาค 0.212-0.600 มิลลิเมตร

2. อัตราการป้อนวัตถุดิบ 160-170 กรัมต่อชั่วโมง

3. อุณหภูมิไพโรไลซิสและเร่งปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส

4. เวลาที่ใช้ในการทดลอง 90-100 นาที

5. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในถังป้อนชีวมวล 4 ลิตรต่อนาที
 6. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในเตาปฏิกรณ์ 6 ลิตรต่อนาที
 7. ทรายที่มีขนาดอนุภาค 0.250-0.425 มิลลิเมตร
 8. ปริมาณทรายในเตาปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง 150 กรัม
 9. ทรายถูกเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
 10. อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและชีวมวลเท่ากับ 2:1
 11. ความเร็วปฏิกิริยา 0.28-0.30 ชั่วโมง⁻¹
 12. อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นชุดควบแน่นด้วยน้ำประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส
- จำนวน 1 ชุด
13. ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตนที่อุณหภูมิประมาณ -70 องศาเซลเซียส จำนวน 6 ชุด

1.4 ผลที่ได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงองค์ประกอบเคมีของกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์
- 1.4.2 ทราบถึงการลำดับขั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนในเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์
- 1.4.3 ทราบถึงสถานะของตัวแปรที่เหมาะสมของอุณหภูมิการไพโรไลซิสและอุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาจากไม้ยางพาราต่อปริมาณผลได้สูงและสมบัติของไบโอออยล์ที่มีค่าความร้อนสูง
- 1.4.4 ทราบถึงการลำดับขั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง
- 1.4.5 สามารถผลิตไบโอออยล์ที่มีปริมาณผลได้และสมบัติที่ดีจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนโดยการหมุนวนแก๊สกลับมาใช้ใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพอง
- 1.4.6 ได้รับองค์ความรู้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์
- 1.4.7 สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปต่อยอดในงานวิจัยต่อไป
- 1.4.8 บทความวิจัยเป็นที่ยอมรับในระดับประเทศหรือระดับนานาชาติ

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) หมายถึงกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส โดยปราศจากออกซิเจนและมีเวลาคงอยู่ของไอลไพโรไลซิสน้อยกว่า 5 วินาที

1.6.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไรซ์เบดแบบฟอง (bubbling fluidized-bed reactor) หมายถึงเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วและใช้ทรายเป็นตัวถ่ายโอนความร้อนที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ของตัวกลางถ่ายโอนความร้อนคล้ายฟองอากาศ

1.6.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) หมายถึงสารที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาของไอลไพโรไลซิส ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นและปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์

1.6.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน หมายถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มสมบัติของไบโอออยล์และลดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

1.6.5 การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊ส (gas circulation) หมายถึงการนำไอลไพโรไลซิสจากกระบวนการที่ไม่สามารถควบแน่นได้มาหมุนวนกลับมาใช้ในระบบอีกครั้ง โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ

1.6.6 ผลิตภัณฑ์ หมายถึงสิ่งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ของแข็งเรียกว่า ถ่านชีวภาพ ของเหลวเรียกว่าไบโอออยล์ และแก๊ส

1.6.7 ไบโอออยล์ (bio-oil) หมายถึงของเหลวที่ได้จากการควบแน่นด้วยน้ำและชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิตของไอลไพโรไลซิสมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีดำ

1.6.8 ถ่านชีวภาพ (char) หมายถึงชีวมวลที่ถูกสลายตัวทางความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ

1.6.9 แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (non-condensable gases) หมายถึงไอลไพโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นด้วยน้ำและชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิตได้

1.6 แผนการดำเนินงาน

การทำวิจัยมีแผนการดำเนินงานอยู่ในภาคเรียนที่ 1/2562 ถึงภาคเรียนที่ 1/2563 รวมเป็น 3 ภาคเรียนโดยมีรายละเอียดดังตาราง 1

ตาราง 1 แผนการดำเนินการศึกษา

แผนงานวิจัย	1/62		2/62		1/63	
	ส.ค. - ต.ค.	พ.ย. - ธ.ค.	ม.ค. - ก.พ.	มี.ค. - พ.ค.	ส.ค. - ต.ค.	พ.ย. - ธ.ค.
1. จัดทำเค้าโครงวิทยานิพนธ์	←	→				
2. สอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์		←→				
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฟโรไลซิส		←→		→		
4. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยา		←→		→		
5. ศึกษาผลการจัดลำดับตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน			←→	→		
6. ศึกษาผลของการหมุนวนแก๊สผลิตภัณฑ์				←→		
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง					←→	
8. เขียนวิทยานิพนธ์			←			→
9. สอบวิทยานิพนธ์						←→
10. เผยแพร่ผลงานวิจัย						←→

1.7 งบประมาณ

งานวิจัยมีค่าใช้จ่ายในการซื้อวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังตาราง 2

ตาราง 2 งบประมาณที่ใช้ในงานวิจัย

รายการ	จำนวน (หน่วย)	ราคาต่อหน่วย (บาท)	รวม (บาท)
แอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ 20 ลิตร	1	1,600	1,600
ตัวเร่งปฏิกิริยา	1	4,540	4,540
อะซิโตน 95 เปอร์เซ็นต์ 2.5 ลิตร	1	1,020	1,020
วาล์ว 1/2 นิ้ว	3	75	225
เกจวัดแรงดัน	1	800	800
วาล์วนิรภัย	2	300	600
ข้อต่อทองเหลืองสามทาง	2	40	80
one way วาล์ว	1	520	520
ชุดกรองลมดักน้ำปรับแรงดันลม	1	600	600
ข้อต่อสายลม 1/2 นิ้ว	12	30	360
ใยแก้ว	10	10	100
สายยาง 50 เมตร 1/2 นิ้ว	1	730	730
ปั๊มสุญญากาศ	1	2,200	2,200
ฉนวนเซรามิค (60 cm x 100 cm x 2.5 cm)	1	900	900
ถุงมือยาง	5	100	500
ผ้าปิดจมูก	5	45	225
รวม			15,000

1.8 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1.1 ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมพลังงานสะอาดและสิ่งแวดล้อม (ศนพ.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

1.2 กลุ่มวิจัยขั้นแนวหน้าด้านการแยกสลายชีวมวลด้วยความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



บทที่ 2

ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

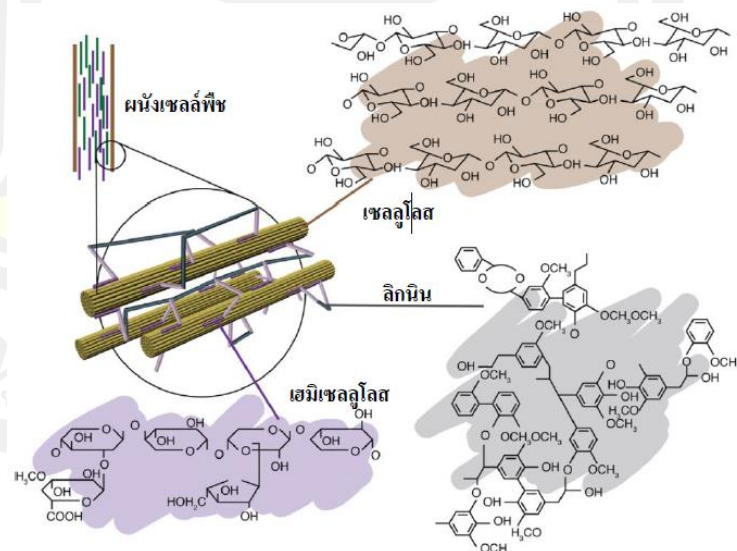
งานวิจัยนี้ศึกษาปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนที่มีการหมุนวนและไม่หมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชด์แบบฟอง ซึ่งได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นข้อมูลภายใต้ขอบเขตงานวิจัย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ชีวมวล

ชีวมวลคือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงและเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่ให้พลังงานความร้อนอีกทั้งยังเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่ได้ตามธรรมชาติ ซึ่งชีวมวลมีองค์ประกอบที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.1.1 องค์ประกอบเคมีของชีวมวล

องค์ประกอบหลักของชีวมวลแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ดังภาพประกอบ 1 [12] มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างขององค์ประกอบชีวมวล

2.1.1.1 เซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดเดียวคือ กลูโคส (glucose) ประมาณ 50,000 โมเลกุล เชื่อมต่อกันเป็นสายโพลิเมอร์ (polymer chain) และจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบดังภาพประกอบ 1 จึงทำให้มีความเป็นผลึกสูง พันธะมีความแข็งแรงและสลายตัวช้ากว่าเฮมิเซลลูโลส มีสูตรทางเคมีของเซลลูโลสคือ $(C_6H_{10}O_5)_m$ เมื่อ m คือระดับของพอลิเมอร์ไรเซชัน [13] เซลลูโลสย่อยสลายที่อุณหภูมิ 240-350 องศาเซลเซียส [12] เนื่องจากการสลายตัวเป็นปฏิกิริยาแบบดูดกลืนความร้อน (endothermic) สามารถสลายตัวกลายเป็นไอ (volatilization) ทำให้มีปริมาณถ่านชีวภาพน้อย

2.1.1.2 เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์คล้ายกับเซลลูโลส แต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด ได้แก่ กลูโคส (glucose) กาแลกโตส (galactose) แมนโนส (mannose) ไซโลส (xylose) อะราบินโนส (arabinose) โครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อเป็นสายยาว แต่ละสายจะเรียงขนานดังภาพประกอบ 1 ทำให้มีลักษณะเป็นเส้นใย ซึ่งพันธะมีความแข็งแรงน้อยจึงง่ายต่อการย่อยสลายตัวทางความร้อน มีสูตรทางเคมีของเฮมิเซลลูโลสคือ $(C_5H_8O_4)_m$ [13] เฮมิเซลลูโลสย่อยสลายที่อุณหภูมิ 130-260 องศาเซลเซียส [12] และเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic) คล้ายกับลิกนิน โดยเป็นกระบวนการหลักที่ทำให้เกิดถ่านชีวภาพ

2.1.1.3 ลิกนินเป็นอสัณฐาน (amorphous) ซึ่งเชื่อมต่อกับเรซินแบบร่างแห (cross-link resin) เป็นโครงสร้างไม่แน่นอนมีกิ่งก้านเป็นสามมิติ ประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนของออกซิเจนเตตฟีนิลโพรเพน (oxygenated phenyl propane) ลิกนินเป็นส่วนประกอบในผนังเซลล์ร่วมกับเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และส่วนประกอบเพคติน (pectin) ซึ่งเชื่อมต่อกับเฮมิเซลลูโลสด้วยพันธะโควาเลนต์เป็นการเชื่อมต่อแบบร่างแหของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ต่างกัน ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรงขึ้นดังภาพประกอบ 1 สูตรทางเคมีของลิกนินคือ $[C_9H_{10}O_3 \cdot (OCH_3)_{0.9-1.7}]_m$ [13] ลิกนินย่อยสลายที่อุณหภูมิ 280-500 องศาเซลเซียส [12] ลิกนินกับเฮมิเซลลูโลสเกิดปฏิกิริยาแบบคายความร้อนมีการสร้างพันธะใหม่ส่งผลให้ปริมาณถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะลิกนิน ซึ่งมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยวงอะโรมาติกยากต่อการสลายตัวทางความร้อน

2.1.2 สมบัติพื้นฐานของชีวมวล

สมบัติของชีวมวลเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำชีวมวลมาแปลงเป็นพลังงาน (conversion process) เนื่องจากสมบัตินั้นเป็นตัวช่วยในการเลือกกระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงานที่เหมาะสมที่สุด โดยสมบัติของชีวมวลประกอบด้วย ปริมาณความชื้นหรือปริมาณน้ำ (moisture content) สารระเหย (volatile content) คาร์บอนคงที่ (fixed carbon) เถ้า (ash) และค่าความร้อน (calorific value) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.2.1 ปริมาณความชื้นหรือปริมาณน้ำเป็นส่วนที่อยู่ในชีวมวลต่อน้ำหนักของชีวมวลทั้งหมด ซึ่งเป็นค่าคงที่ไม่คิดปริมาณความชื้นที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ปริมาณความชื้นเป็นสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการแปลงชีวมวลเป็นพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการแปลงพลังงานโดยใช้ความร้อน (thermal conversion process) หากชีวมวลมีปริมาณความชื้นมากส่งผลให้มีค่าความร้อนต่ำ (lower heating value)

2.1.2.2 สารระเหยที่อยู่ในชีวมวล เมื่อถูกทำให้ร้อนที่อุณหภูมิสูงมีแนวโน้มกลายเป็นไอก่อนที่ถูกเผาไหม้ ในขณะเดียวกันหากชีวมวลมีสารระเหยต่ำกระบวนการเผาไหม้ทำให้เกิดถ่านชีวภาพ สมบัตินี้มีผลต่อการออกแบบและการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์

2.1.2.3 คาร์บอนคงที่เป็นรูปแบบของพลังงานเคมี (chemical energy) ที่ถูกเก็บไว้ในชีวมวลแต่ละชนิด ซึ่งเป็นค่าที่มีความสำคัญในการชีวัดชีวมวลแต่ละชนิดควรแปลงพลังงานโดยวิธีการเผาไหม้หรือการทำให้เป็นแก๊ส

2.1.2.4 ถ้าเป็นเศษที่เหลือจากกระบวนการที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หรือปริมาณคาร์บอนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (nonbiodegradable carbon) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญปัจจัยหนึ่งในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์

2.1.2.5 ค่าความร้อนเป็นปริมาณความร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ (combustion) โดยทั่วไปค่าความร้อนแสดงในรูปของปริมาณความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักหรือหนึ่งหน่วยปริมาตร เช่น MJ/kg สำหรับของแข็งและของเหลว และ MJ/CM³ สำหรับแก๊ส ค่าความร้อนแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบได้แก่ ค่าความร้อนสูง (higher heating value) เป็นค่าความร้อนที่ปล่อยมาจากการเผาไหม้และรวมกับค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำของความชื้นที่อยู่ในชีวมวล และค่าความร้อนต่ำ (lower heating value) ค่าความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ชีวมวลมีผลโดยตรงกับค่าความชื้น [14]

2.1.3 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย

ประเทศไทยมีอาชีพเกษตรกรรมสูง ในแต่ละปีนั้นมีผลพลอยได้ที่สำคัญจากผลผลิตการเกษตรคือ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือจากการแปรรูป เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย เหน้้ำมัน ลำปะหูล และปาล์มน้ำมัน เป็นต้น ปริมาณชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้ในแต่ละปีจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศดังตาราง 3 [15]

ตาราง 3 ศักยภาพชีวมวลของประเทศไทยปี 2560

ชนิด	ผลผลิต (เมกะตัน)	ชีวมวล	ปริมาณที่นำไป ใช้ประโยชน์ (เมกะตัน)	ปริมาณชีวมวลเหลือใช้ (เมกะตัน)	ค่าความร้อน* (MJ/kg)	อ้างอิง
อ้อย	28.862	ชานอ้อย	0.126	8.399	6.43	[16]
		ยอดและใบ	0.131	8.716	6.82	
ข้าว	25.236	แกลบ	0.186	5.808	12.85	[17]
		ฟางข้าว	0.361	11.277	8.83	
ไม้ ยางพารา	4.655	ลำต้น	4.185	0.47	14.98	[18]
มัน สำปะหลัง	30.940	กากและเปลือก	0.095	2.719	13.38	[19]
		เหง้า	0.529	15.162	10.61	
ปาล์ม น้ำมัน	14.916	ทะล่าย เปล้า	0.677	6.390	16.44	[20]
		ใบ	0.233	2.199	16.19	
		กะลา	0.077	0.728	17	
		ใบ	4.119	8.848	7.97	
		ก้าน	0.369	3.479	14.86	
ข้าวโพด	4.892	ซังข้าวโพด	0.288	1.220	16.63	[21, 22]
รวม	109.501		11.376	75.415		

*ค่าความร้อนต่ำ (lower heating value, LHV)

2.2 ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัย

ไม้ยางพารา (rubber wood) ชื่อทางวิทยาศาสตร์ *Hevea brasiliensis* เป็นไม้ยืนต้นที่มีอายุประมาณ 20-25 ปี มีความสูงประมาณ 30-40 เซนติเมตร ลำต้นที่มีอายุน้อยเปลือกมีสีเขียวแต่เมื่ออายุมากขึ้นเปลือกเป็นสีเทาอ่อน เทาดำ และน้ำตาล น้ำยางมีลักษณะสีขาวหรือเหลืองอยู่ภายในเปลือกไม้และสามารถเริ่มกรีดยางได้ตั้งแต่อายุประมาณ 5-6 ปี เมื่อน้ำยางเริ่มน้อยลงจนไม่คุ้มค่ากรีดค่าบำรุงรักษาจำเป็นต้องโค่นและปลูกใหม่ ไม้ยางที่ถูกโค่นนำเข้าโรงเลื่อยเพื่อแปรรูปเป็นท่อนสำหรับใช้เป็นไม้วัตถุดิบแปรรูปเป็นเฟอร์นิเจอร์ กระบวนการเลื่อยไม้ยางมีส่วนเหลือจากการเลื่อย 2 ส่วน คือ ขี้เลื่อยดังภาพประกอบ 2 (ข) และปึกไม้ที่ไม่ได้ขนาดดังภาพประกอบ 2 (ก) [23] ในส่วนของขี้เลื่อยนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต้มน้ำไว้สำหรับอบไม้ในโรงงานเพื่อช่วยประหยัดพลังงาน ส่วนเศษไม้และปึกไม้นำไปผลิตเป็นไม้อัด ปัจจุบันได้มีการนำไม้ยางพารามาแปลงสภาพโดยการใช้กระบวนการไพโรไลซิสเพื่อเปลี่ยนเป็นไบโอออยล์ [5] ที่มีค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำเท่ากับ 22.5 และ 21.2 MJ/kg ตามลำดับ ดังนั้นไม้ยางพาราเป็นอีกหนึ่งทางเลือกเพื่อนำมาใช้ผลิตพลังงานทดแทนเพราะมีปริมาณกำมะถันต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 2 ปึกไม้ (ก) และขี้เลื่อยไม้ยาง (ข)

2.3 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ไพโรไลซิส (pyrolysis) คือกระบวนการแยกสลายทางความร้อนในภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งแตกต่างจากการเผาไหม้ (combustion) ที่เป็นการแยกสลายในสภาวะที่มีออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสภาวะของกระบวนการและสามารถเลือกผลิตภัณฑ์ได้จากการปรับสภาวะของกระบวนการดังตาราง 4 สรุปความแตกต่างของกระบวนการไพโรไลซิสในแต่ละสภาวะของกระบวนการและปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

2.3.1 ชนิดของกระบวนการไฟโรไลซิส

ในกระบวนการไฟโรไลซิส ถ้าอุณหภูมิที่ใช้ต่ำและเวลาคงอยู่นานทำให้ชีวมวลส่วนใหญ่กลายเป็นถ่าน แต่ถ้าใช้อุณหภูมิที่สูงเวลาที่ไอของไฟโรไลซิสอยู่ในระบบนานจะทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้คือแก๊ส ถ้าใช้อุณหภูมิปานกลางและเวลาที่ไอไฟโรไลซิสอยู่ในระบบน้อยจะทำให้ได้ปริมาณของเหลวสูงมีรายละเอียดดังตาราง 4 [1]

ตาราง 4 ความแตกต่างของกระบวนการไฟโรไลซิสแบบต่าง ๆ

กระบวนการ	สภาวะในกระบวนการ	ปริมาณผลได้ (ร้อยละโดยมวล)		
		ของเหลว	ของแข็ง	แก๊ส
ไฟโรไลซิสแบบเร็ว	ใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอประมาณ 1 วินาที	75	12	13
ไฟโรไลซิสแบบกลาง	ใช้อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอประมาณ 10-30 วินาที	50	25	25
ไฟโรไลซิสแบบช้า	ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งนานถึง ชั่วโมงต่อวัน	30	35	35
แก๊สซิฟิเคชัน	ใช้อุณหภูมิประมาณ 750-900 องศาเซลเซียส	5	10	80
ทอริแฟกชัน	ใช้อุณหภูมิประมาณ 290 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งประมาณ 1-60 นาที	5	80	15

2.3.2 อุปกรณ์หลัก

2.3.2.1 ถังพักชีวมวล

ชีวมวลที่เตรียมไว้ถูกนำไปเก็บไว้ในถังพักชีวมวล (hopper) ซึ่งในถังพักชีวมวลควรเป็นบรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจน การออกแบบถังพักชีวมวลมีความสำคัญเนื่องจากมีผลต่อการป้อนชีวมวล ชีวมวลถูกลำเลียงผ่านชุดป้อนชีวมวลหรือสกรูลำเลียง (screw feeder) โดยทั่วไปจะออกแบบให้ชุดป้อนชีวมวลอย่างน้อย 2 ชุด ชุดแรกเป็นชุดควบคุมอัตราป้อนของชีวมวลเป็นการลำเลียงโดยใช้สกรูที่มีความเร็วในการหมุนช้า (slow screw) ดังนั้นการออกแบบสกรูมีความสำคัญมากเนื่องจากการป้อน ชีวมวลจะทำให้ระบบอุดตัน เมื่อชีวมวลถูกลำเลียงมายังสกรูที่ 2 เรียกว่าสกรู

เร็ว (fast screw) ชีวมวลถูกลำเลียงเข้าเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) อย่างรวดเร็วและระยะเวลาที่ชีวมวลอยู่ในสกรูที่ 2 สั้นมากเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมายังสกรูที่ 2 ควรมีระบบหล่อเย็น (cooling jacket) ระหว่างสกรูที่ 2 และเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีน้ำหรือสารทำความเย็นอยู่ในท่อภายนอกเพื่อระบายความร้อนให้ท่อลำเลียงชีวมวล [24]

2.3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ (reactor) ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสมีหลายชนิด โดยรายละเอียดของชนิดเครื่องปฏิกรณ์ได้อธิบายในหัวข้อถัดไป เครื่องปฏิกรณ์นั้นมีหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนกับอนุภาคชีวมวลที่ถูกป้อนเข้า โดยภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีตัวกลางช่วยในการถ่ายโอนความร้อน เช่น เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบพองหรือแบบหมุนวนที่ใช้ทรายเป็นตัวกลาง เครื่องปฏิกรณ์เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็ว เมื่ออนุภาคชีวมวลเข้ามาในบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง (ประมาณ 500 องศาเซลเซียส) ชีวมวลถูกสลายตัวอย่างรวดเร็วกลายเป็นควันและชีวมวลที่ถูกสลายตัวเป็นถ่านชีวภาพจะถูกลำเลียงออกจากเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับไอลไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วไปยังชุดไซโคลน ซึ่งมีชุดไซโคลนอย่างน้อย 2 ชุด ชุดที่ 1 เป็นชุดไซโคลนที่มีขนาดใหญ่เพื่อแยกถ่านชีวภาพที่มีขนาดใหญ่และชุดที่ 2 ชุดไซโคลนที่มีขนาดเล็กเพื่อแยกถ่านชีวภาพที่มีขนาดเล็กออกจากไอลไพโรไลซิสที่แยกถ่านชีวภาพออกแล้วนั้นถูกลำเลียงผ่านชุดกรองไอล โดยมีเยกั่วอยู่ภายในชุดกรองไอลทำให้ไอลไพโรไลซิสที่ได้สะอาด [24]

2.3.2.3 ชุดดักจับไอล

การควบแน่นไอลไพโรไลซิสต้องทำให้เร็วที่สุด โดยให้อุณหภูมิของไอลไพโรไลซิสลดลงอย่างรวดเร็ว ชุดควบแน่นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยประเภทที่ 1 คือการให้ความเย็นภายนอกโดยไม่มีการสัมผัสกับไอลไพโรไลซิส (indirect content) และประเภทที่ 2 คือการให้ความเย็นสัมผัสกับไอลไพโรไลซิสโดยตรง (direct content) ซึ่งในกรณีแรกใช้อุปกรณ์ที่เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (double pipe heat exchanger) สารที่ใช้ในการหล่อเย็นอาจเป็นน้ำที่อุณหภูมิห้องหรือสารหล่อเย็น ส่วนประเภทที่ 2 โดยทั่วไปเรียกว่าหอหล่อเย็น (quench column) ซึ่งมีการสเปรย์สารช่วยในการควบแน่นให้มีการสัมผัสกับไอลไพโรไลซิสที่มีอุณหภูมิสูงทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว สารที่ใช้ในการสเปรย์อาจเป็นสารที่ไม่ผสมกับไอลหรืออาจจะนำไอลที่ได้นำมาหมุนวนผ่านปั๊มหัวฉีด ซึ่งการออกแบบชุดควบแน่นมีความสำคัญมากถ้าหากไม่สามารถควบแน่นไอลไพโรไลซิสได้ ทำให้ปริมาณผลได้ของไอลมีปริมาณน้อย [24]

อุปกรณ์ที่ใช้ในการดักจับไอลไพโรไลซิสอีกอย่างที่สำคัญ คือชุดดักจับไอลไพโรไลซิสด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) การควบแน่นโดยการให้ความเย็นอาจไม่สามารถควบแน่นได้หมด เนื่องจากไอลไพโรไลซิสอยู่ในรูปของไอที่มีของเหลวผสมอยู่เรียกว่า ละอองลอย

(aerosol) ดังนั้นการใช้ไฟฟ้าสถิตสามารถช่วยรวมอนุภาคของละอองลอยให้รวมตัวกันกลายเป็นของเหลว และยังมีชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง (dry-ice condenser) ที่มีอุณหภูมิประมาณ -70 องศาเซลเซียส ชุดน้ำแข็งแห้งมีหน้าที่ควบแน่นไอไพโรไลซิสที่ไม่สามารถดักจับด้วยชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตได้ ซึ่งการควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งนี้จะทำให้ปริมาณน้ำสูง [24]

2.3.3 หลักการทำงานในระบบไพโรไลซิสแบบเร็ว

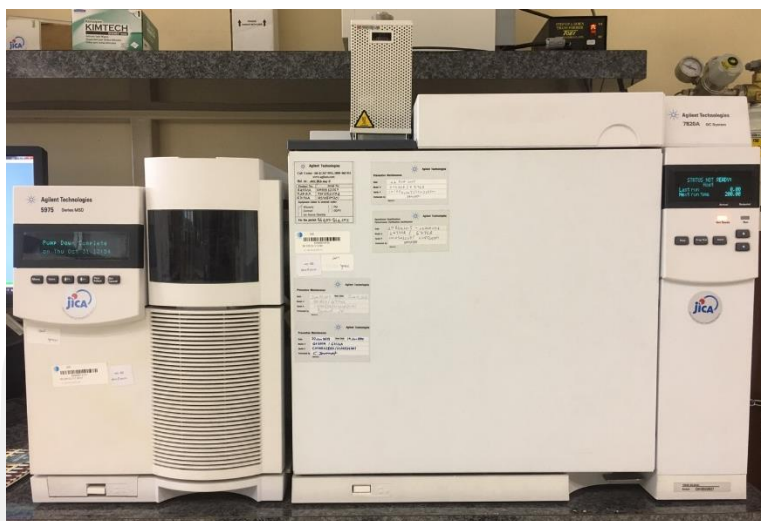
ระบบไพโรไลซิสแบบเร็วถูกให้ความร้อนด้วยขดลวดความร้อน ใช้ฉนวนหุ้มเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน โดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาหะมวลเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อชีวมวลสัมผัสกับทรายที่เป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดไอไพโรไลซิสผ่านชุดไซโคลนและชุดกรองไอร้อนทำหน้าที่ดักจับอนุภาคถ่านชีวภาพเพื่อให้ไอไพโรไลซิสสะอาดก่อนควบแน่นโดยชุดควบแน่น ซึ่งชุดควบแน่นจะประกอบไปด้วย ควบแน่นด้วยน้ำหล่อเย็น (water-cold condenser) ชุดควบแน่นด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (ESP) ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง (dry-ice condenser) และสุดท้ายไอไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการจะผ่านชุดกรองสำคัญปล่อยออกสู่อากาศ [24]

2.3.4 การหมุนวนแก๊ส

การนำไอไพโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นได้กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการ เพื่อลดปริมาณการใช้แก๊สไนโตรเจน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ จากงานวิจัยคมสัน ชันนาม และคณะ [18] พบว่าได้ปริมาณไบโอออยล์ร้อยละ 56.47 และเมื่อนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ทำให้ได้ไบโอออยล์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 65.9

2.4 เครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Py-GC/MS) สามารถวิเคราะห์ชนิดองค์ประกอบในสารได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงปริมาณ (quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) ที่มีการติดตั้งเครื่องไพโรไลซิส (pyrolyzer) ร่วมกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatograph/mass spectrometer, GC/MS) ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 เครื่องไฟโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์

เครื่องไฟโรไลซิสสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ของแข็งกึ่งเหลว และของเหลว โดยใส่ตัวอย่างในถ้วยบรรจุตัวอย่างและถูกปล่อยลงเตาเผาขนาดเล็กที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้ตัวอย่างเกิดการไฟโรไลซิสเป็นสารระเหยเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์เพื่อวิเคราะห์

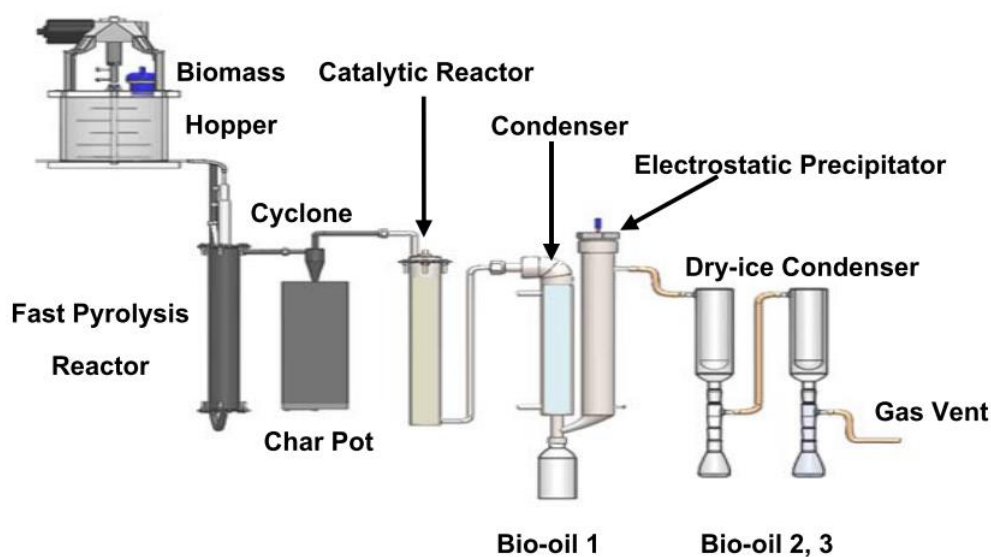
หลักการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์คือการแยกองค์ประกอบของสารผสม โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของแต่ละองค์ประกอบของสารผสมบนเฟสคงที่ (stationary phase) ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) สำหรับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งเฟสคงที่คือสารที่อยู่ภายในคอลัมน์และเฟสเคลื่อนที่คือแก๊สฮีเลียม เมื่อแก๊สที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและส่วนแก๊สถูกพาเข้าสู่คอลัมน์โดยแก๊สฮีเลียม ซึ่งภายในคอลัมน์จะเกิดการแยกสารผสม (separation) โดยอาศัยการทำปฏิกิริยา (interaction) ระหว่างสารที่อยู่ภายในคอลัมน์ (stationary phase) และแก๊ส จากนั้นโมเลกุลของสารเชิงเดี่ยวจะถูกพาเข้าสู่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectrometer)

สารเชิงเดี่ยวเข้าสู่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ โมเลกุลของสารเชิงเดี่ยวได้รับพลังงานจากลำแสงอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ค่า 70 อิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปประจุ เรียกว่า “molecular ion, M^+ หรือ $M^{+•}$ ” และมีรูปแบบการแตกตัวของแต่ละโมเลกุลมีลักษณะเฉพาะ เรียกว่า “mass spectrum” โดยแสดงการแตกตัว (fragmentation) ในรูปของ “mass to charge ratio (m/z)”

2.5 ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบด

2.5.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟอง

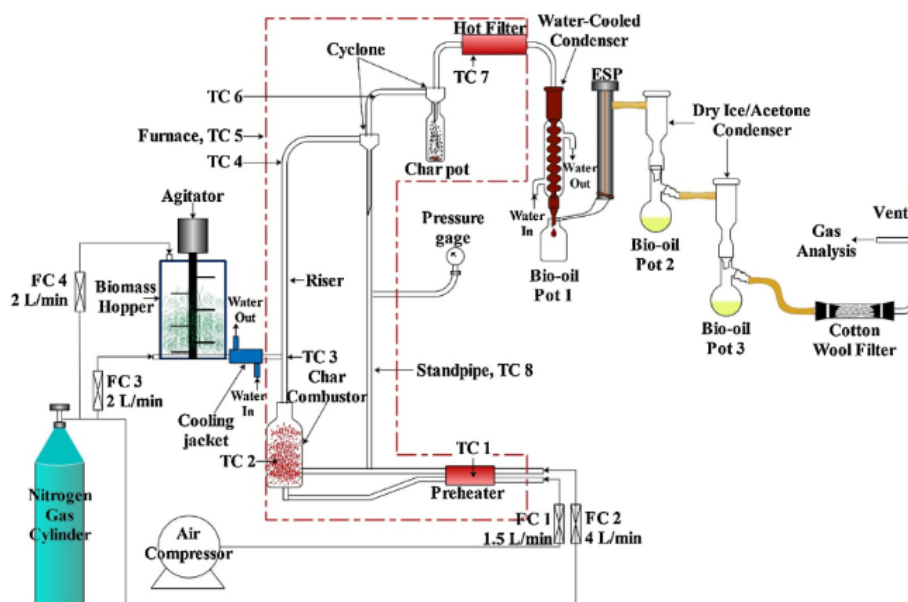
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟอง (bubbling fluidised-bed) ที่มีการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วได้จากการสัมผัสระหว่างชีวมวลและตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้ทรายที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้นกระจายตัวมีลักษณะคล้ายฟองโดยใช้แก๊สเฉื่อยปล่อยเข้าด้านล่างดังภาพประกอบ 4 [3, 6] ก่อนเริ่มกระบวนการทรายและแก๊สเฉื่อยถูกให้ความร้อนประมาณ 500 องศาเซลเซียส เพื่อให้ชีวมวลที่ถูกลำเลียงเข้ามาในเครื่องปฏิกรณ์และสัมผัสกับตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว



ภาพประกอบ 4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟอง

2.5.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวน

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวน (circulating fluidised-bed reactor) มีการปล่อยออกซิเจนเข้าไปในระบบเพื่อให้เกิดการเผาไหม้ถ่านชีวภาพที่เคลือบผิวของตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่ผ่านการใช้งานหลุดออกจากรันหมุนวนกลับมาใช้ใหม่ เพื่อให้ตัวกลางถ่ายโอนความร้อนยังคงประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบหมุนวน ดังภาพประกอบ 5 [2] ซึ่งเครื่องปฏิกรณ์มีชั้นมีขั้นตอนและการออกแบบที่ซับซ้อนไม่เหมาะสมสำหรับห้องทดลอง จึงเป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่นิยมมากนักและเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไธซ์เบดแบบฟองปริมาณผลได้ของไบโอยล์ไม่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 5 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบหมุนวน

2.6 ไบโอดีเซล

การนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วหรือกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis) จะได้ผลิตภัณฑ์หลักคือ ไบโอดีเซล (bio-oil) โดยทั่วไปมีสีน้ำตาลเข้มถึงดำมีลักษณะหนืดคล้ายน้ำมันเตา เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานความร้อน ซึ่งมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับน้ำมันเตา ไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมีสมบัติที่ต่างกันอย่างมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.1 สมบัติของไบโอดีเซล

โดยทั่วไปมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติของไบโอดีเซลสรุปได้ดังตาราง 5 [25] โดยสมบัติที่ใช้บ่งบอกถึงคุณภาพของไบโอดีเซลคือ ค่าความร้อน ปริมาณน้ำ ความหนืด ความหนาแน่น ปริมาณของแข็ง และค่าพีเอช เป็นต้น

ตาราง 5 มาตรฐานการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของไบโอดีเซล

สมบัติ	วิธีการทดสอบ
ค่าความร้อนสูง (gross heat combustion)	ASTM D240
ค่าปริมาณน้ำ (water content)	ASTM E203
ค่าปริมาณของแข็ง (solid content)	ASTM D7579
ความหนืดจลน์ ที่ 40 องศาเซลเซียส (kinematic viscosity)	ASTM D445A
ความหนาแน่น ที่ 20 องศาเซลเซียส (density)	ASTM D4052
ปริมาณกำมะถัน (sulfur content)	ASTM 4294
ปริมาณเถ้า (ash content)	ASTM D482
ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)	ASTM E70
จุดวาบไฟ (flash point)	ASTM D93-B
จุดไหลเท (pour point)	ASTM D97

2.6.2 การนำไปใช้ประโยชน์

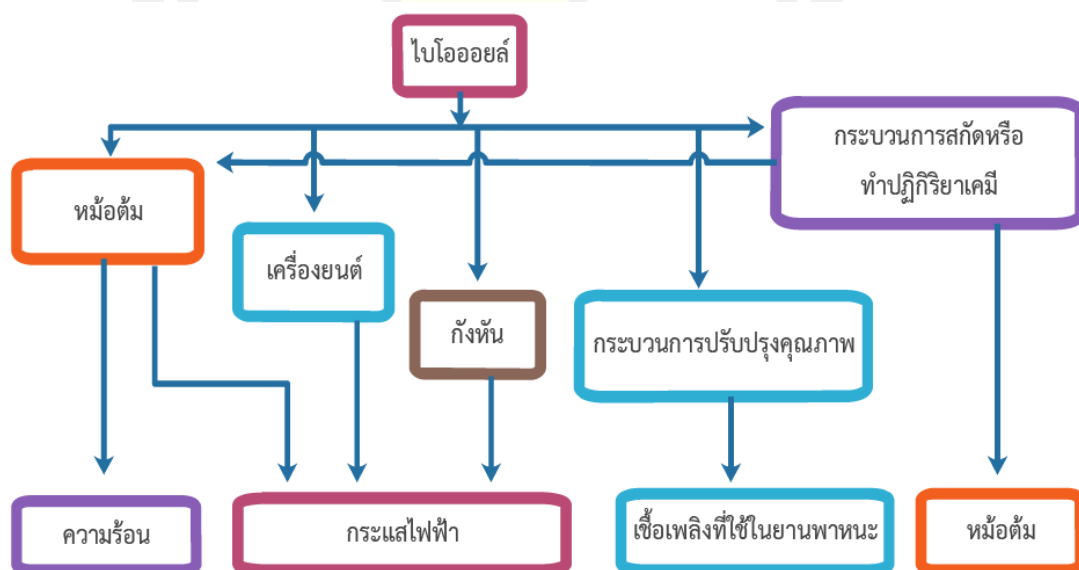
การกำหนดมาตรฐานของไบโอดีเซลขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ตามมาตรฐาน ASTM D7544-12 ดังตาราง 6 [25] สามารถนำไบโอดีเซลไปใช้ผลิตเป็นพลังงาน ความร้อน กระแสไฟฟ้า และเชื้อเพลิงที่ใช้ในยานพาหนะ โดยผ่านอุปกรณ์เช่น หม้อไอน้ำ (boiler) เครื่องยนต์ (engine) หรือกังหัน (turbine) และสารเคมีโดยผ่านกระบวนการสกัดหรือทำปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากไบโอดีเซลประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิด หากต้องการนำไบโอดีเซลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงยานพาหนะต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนดังภาพประกอบ 6 [26]

ตาราง 6 ข้อกำหนดมาตรฐานของไบโอดีเซลจากกระบวนการไพโรไลซิส (ASTM D7544-12)

สมบัติ	ค่ากำหนด
ค่าความร้อนสูง (gross heat combustion)	ไม่ต่ำกว่า 15 เมกะจูล/กิโลกรัม
ค่าปริมาณน้ำ (water content)	ไม่สูงกว่าร้อยละ 30 โดยมวล
ค่าปริมาณของแข็ง (solid content)	ไม่สูงกว่าร้อยละ 2.5* หรือ 0.25**
ความหนืดจลน์ ที่ 40 องศาเซลเซียส (kinematic viscosity)	ไม่สูงกว่า 125 เซนติสโตกส์
ความหนาแน่น ที่ 20 องศาเซลเซียส (density)	1.1-1.3 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ปริมาณกำมะถัน (sulfur content)	ไม่สูงกว่าร้อยละ 0.05 โดยมวล
ปริมาณเถ้า (ash content)	ไม่สูงกว่าร้อยละ 0.25* หรือ 0.15**
ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)	รายงาน
จุดวาบไฟ (flash point)	ไม่ต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส
จุดไหลเท (pour point)	ไม่สูงกว่า -9 องศาเซลเซียส

หมายเหตุ: *กรณีใช้เป็นเชื้อเพลิงเกรด G สำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม

**กรณีใช้เป็นเชื้อเพลิงเกรด D สำหรับเตาเผาอุตสาหกรรม/เชิงพาณิชย์ที่ต้องการเชื้อเพลิงที่มีค่าของแข็งและเถ้าต่ำ



ภาพประกอบ 6 การนำไปใช้งานของไบโอดีเซล [26]

2.6.3 ปัญหาที่เกี่ยวข้องและวิธีการแก้ไข

ไบโอออยล์สามารถใช้ในเตาอุตสาหกรรมคล้ายกับน้ำมันเตา แต่ยังมีค่าความร้อนตามกำหนดมาตรฐานที่มีค่าต่ำกว่าน้ำมันเตาที่มีค่าความร้อนประมาณ 42 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความหนืดของไบโอออยล์อยู่ในช่วงชนิดที่ 1 และ 2 ของข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันเตาและไบโอออยล์ยังมีค่าปริมาณกำมะถันไม่สูงเกินร้อยละ 0.05 ซึ่งเทียบกับน้ำมันเตาแล้วมีข้อกำหนดมาตรฐานน้ำมันเตาชนิดที่ 1-4 มีค่ากำหนดไม่เกินร้อยละ 2.0 และชนิดที่ 5 มีค่าไม่สูงเกินร้อยละ 0.5 ทำให้ทราบว่าไบโอออยล์มีคุณภาพดีกว่าน้ำมันเตาในด้านสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรไบโอออยล์ยังมีค่าปริมาณน้ำเกินกว่าข้อกำหนดมาตรฐานซึ่งกำหนดไม่สูงกว่าร้อยละ 30 [24] ดังนั้นหากต้องการนำไบโอออยล์ไปใช้งานให้ได้หลากหลายขึ้นจำเป็นต้องนำไปปรับปรุงสมบัติ ซึ่งสามารถยกระดับได้โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ การยกระดับหลังกระบวนการผลิตและยกระดับในกระบวนการผลิต โดยการเลือกยกระดับในกระบวนการผลิตจึงเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อนเหมือนกับการยกระดับหลังกระบวนการผลิต ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบการยกระดับไบโอออยล์ในกระบวนการผลิตโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ปริมาณน้ำลดลงทำให้ไบโอออยล์มีค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นและยังช่วยเพิ่มปริมาณอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน [6, 27]

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) คือสารประกอบทางเคมีที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้น [28] ถูกนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อให้ไบโอออยล์มีคุณภาพสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงและไม่เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อให้มีสมบัติตามต้องการ การใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วสามารถทำได้โดยใส่รวมลงไปในตัวกลางนำความร้อนหรือวัสดุติด ยังสามารถใส่ลงไปในส่วนท้ายของเครื่องปฏิกรณ์ หรืออาจมีการสร้างเครื่องปฏิกรณ์อีกเครื่องแยกออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเพื่อใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาในการปรับปรุงคุณภาพของไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว [29] การเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดดังต่อไปนี้

2.7.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเดียวกันกับตัวทำปฏิกิริยาแต่กลไกในการเร่งแตกต่างกันกับปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) โดยปกติตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเนื้อเดียวกันเกิดการละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสม เช่น ตัวอย่างหนึ่งของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีเนื้อสารเดียวกันกับตัวทำละลายไอออนไฮโดรเจนในเอสเทอร์ของกรดคาร์บอกซิลิกคือ ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดเมทิลอะซิเตตจากกรดแอซิติกและเมทานอล

2.7.2 การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

เป็นการเร่งปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและตัวเร่งมีวัฏภาคมีความแตกต่างกัน (heterogeneous catalyst) ปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งที่เป็นของแข็งในการเร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นอยู่ในวัฏภาคแก๊สหรือของเหลวซึ่งเกิดปฏิกิริยากันที่ผิวของตัวปฏิกิริยาที่สำคัญและอุตสาหกรรมผลิตสารเคมีจะใช้การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ เช่น การสังเคราะห์แอมโมเนีย การผลิตกรดไนตริกและการผลิตตัวเร่งกำจัดไอเสีย เป็นต้น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิส

Akeem M. Azeez และคณะ [30] ศึกษาการไพโรไลซิสของลิกโนเซลลูโลสชีวมวลด้วยเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์และเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบตชีวมวลที่ใช้ประกอบด้วย ต้นปืช ต้นสน ไม้สักแอฟริกา สกุนถ่อน และซังข้าวโพด ที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 470 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบต พบว่าได้ปริมาณไบโอออยล์เท่ากับร้อยละ 62.7, 62.7, 50.6, 54.7, 56.2 ตามลำดับ ส่วนเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์ พบสารอัลดีไฮด์ คีโตน เมทานอล ไฮดรอกซีอะลดีไฮด์ ไฮดรอกซีโพรเพน และฟิวรัลดีไฮด์ ความเข้มข้นของกรดอะซิติกและโพรพิโอนิกมากถึง 4 เท่า นอกจากนี้ความเป็นกรดของไบโอออยล์สามารถลดลงได้ด้วยการควบคุมอุณหภูมิในการควบแน่น

Mohammad Amir Firdaus Mazlan [5] ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้ชีเลื่อยไม้ยางพาราในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณไบโอออยล์ร้อยละ 33 มีปริมาณน้ำสูงในผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์และมีปริมาณผลิตภัณฑ์ถ่านชีวภาพที่สูงมาก

Adilah Shariff และคณะ [31] ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า โดยใช้ชีวมวลไม้ยางพาราที่มีการวิเคราะห์สมบัติได้แก่ การวิเคราะห์ขั้นต้นประกอบด้วยความชื้นร้อยละ 4.13 สารละลายร้อยละ 86.3 เถ้าร้อยละ 0.6 คาร์บอนคงที่ร้อยละ 13.10 การวิเคราะห์ขั้นสูง

ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 44.33 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.26 ไนโตรเจนร้อยละ 19.31 กำมะถันร้อยละ 0.31 และออกซิเจนร้อยละ 29.79 ค่าความร้อนสูงเท่ากับ 22.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ค่าความร้อนต่ำเท่ากับ 21.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ที่ 27 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรดเท่ากับ 6.83 พบว่าที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ร้อยละ 25.14 ทราบว่าการใช้ไม้ยางพารามีความน่าสนใจเพราะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีปริมาณกำมะถันต่ำ

มนตรี วงศ์ศิริวิทยา และคณะ [6] ศึกษาการผลิตไบโอออยล์ที่ได้จากใบและยอดอ้อยในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชด์แบบพอง พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมสูงสุดร้อยละ 62 แบ่งออกเป็นไบโอออยล์หนักร้อยละ 42 และไบโอออยล์เบาร้อยละ 20 เมื่อใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้ชีวมวลและถ่านชีวภาพสลายตัวเพิ่มขึ้นกลายเป็นแก๊สทำให้ปริมาณผลได้ลดลง

Keyoon Duanguppama และคณะ [2] ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิไพโรไลซิสของชีเลื่อยปนเปื้อนด้วยน้ำมันแร่และของแข็งโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชด์แบบหมุนเวียน พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีปริมาณไบโอออยล์ร้อยละ 67 ถ่านร้อยละ 18 และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ร้อยละ 15

2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส

ณัฐพันธ์ พรหมสำเภา และคณะ [32] ศึกษาผลการนำตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 มาใช้ใหม่ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์ พบว่าการนำตัวเร่งกลับมาใช้ใหม่ผลของปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยอยู่ในช่วงร้อยละ 38.1 ลดลงเหลือร้อยละ 29.2 ปริมาณผลได้ของแก๊สร้อยละ 46.8 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชเพสหนักและเพสเบาของไบโอออยล์มีค่า 5 และ 3 ตามลำดับ ปริมาณน้ำในไบโอออยล์ของเพสหนักและเพสเบาเท่ากับร้อยละ 6.7 และ 2.9 ตามลำดับ

มนตรี วงศ์ศิริวิทยา และคณะ [33] ศึกษาการไพโรไลซิสแบบเร็วของใบและยอดอ้อยที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ไดโลไมต์ ดินขาวเคโอลิน และ ZSM-5 แบบสองขั้นตอนที่มีอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล 1:1 ความเร็วปฏิกิริยา 0.3 h^{-1} และอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 600 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์เป็นตัวช่วยเสริม ZSM-5 มีปริมาณผลได้ของ Toluene และ o-Xylene ร้อยละ 30.8 และ 7.4 ตามลำดับ

นิกรศิลป์ บุญสมบัติ และคณะ [27] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติได้แก่ชีโอไลต์ธรรมชาติ เพอร์ไลต์ และดินขาวเคโอลิน ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเห้ง้ามันสำหรับในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงสุดโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเป็นร้อยละ 62 ซึ่งเทียบเท่ากับปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 46 และมีค่าความร้อนสูงเท่ากับ 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และกรณีมีตัวเร่งปฏิกิริยาใช้

อุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยาคงที่เท่ากับ 500 องศาเซลเซียส พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดส่งผลให้ปริมาณผลได้และเชิงพลังงานของไบโอออยล์ลดลง ในบรรดาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดินขาวเคโอลินเหมาะสมที่สุด ซึ่งมีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ร้อยละ 46 และเชิงพลังงานร้อยละ 20 นอกจากนี้ค่าความร้อนที่ได้เพิ่มขึ้นเป็น 19.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

มนตรี วงศ์ศิริวิทยา และคณะ [6] ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยใช้ไบและยอตอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบฟอง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส มีปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 43.6 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาเป็น 550 องศาเซลเซียส มีผลต่อปริมาณผลได้เชิงมวลของไบโอออยล์บาลลดลง เนื่องจากเกิดการแตกตัวของไฮโดรไลซิสเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้

Meesuk Sirimirin และคณะ [34] ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ไพโรไลซิส เช่น บรรยากาศแก๊ส ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนของแกลบและองค์ประกอบของไบโอออยล์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบด พบว่าปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากไฮโดรคาร์บอนที่มีออกซิเจนส่งผลให้เกิดการก่อตัวของน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาใช้ปริมาณออกซิเจนของน้ำมันไบโอออยล์ลดลงจากร้อยละ 31.1 เป็นร้อยละ 25.91 26.51 และ 10.1 โดยนิกเกิลต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ โดโลไมต์ และโคบอลต์โมลิบดีนัมต่ออะลูมิเนียมออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นและอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น

Donghoon Ro และคณะ [35] ศึกษาการใช้ตัวเร่งแบบสองขั้นตอนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบนโทไนท์ปริมาณ 50 กรัม ผสมเข้ากับชีวมวลลิกนินในอัตราส่วน 1:1 ในเตาปฏิกรณ์และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ในเตาปฏิกรณ์เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่ามีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ร้อยละ 27 ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยลดการเสื่อมสภาพและยังสามารถนำไปกระตุ้นเพื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 กลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5 ครั้ง

Donghoon Ro และคณะ [36] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของน้ำมันปาล์มโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเบนโทไนท์และโดโลไมต์เทียบกับ ZSM-5 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าไบโอออยล์ที่ได้จากเบนโทไนท์ โดโลไมต์ และ ZSM-5 มีปริมาณร้อยละ 33, 32 และ 31 ตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากเบนโทไนท์ โดโลไมต์ และ ZSM-5 มีปริมาณร้อยละ 1.0, 1.5 และ 40.4 ตามลำดับ

Linlin Yi และคณะ [37] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยใช้ชีวมวล ได้แก่ เมล็ดสบู่ดำ เปลือกถั่ว ชั่งข้าวโพดและขานอ้อย ซึ่งมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวช่วยเสริม ZSM-5 พบว่าการใช้แคลเซียม

ออกไซด์ร่วมกับ Nano-ZSM-5 ให้ผลดีที่สุดในแง่ของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำ แคลเซียมออกไซด์ช่วยลดปริมาณออกซิเจนในไฮโดรไลซิสก่อนที่จะผ่าน Nano-ZSM-5 ที่มี mesopore และ acid site ที่ผิวของตัวเร่งมากกว่า ZSM-5

Mingfa Yang และคณะ [38] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งใช้ชีวมวลเซลลูโลสที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ร่วมกับ ZSM-5 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ส่งผลให้ได้ปริมาณโอเลฟินเพสเบาร้อยละ 5.59 และอะโรมาติกร้อยละ 13.42 โดยมีอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง CaO และ ZSM-5 เท่ากับ 15:85

2.8.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่

คมสัน ชันนาม และคณะ [18] ศึกษาการใช้แก๊สหมุนวนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบด พบว่าการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณไบโอออยล์ร้อยละ 56.47 และเมื่อนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ทำให้ได้ไบโอออยล์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 65.9

Su-Hwa Jung และคณะ [39] ศึกษาการผลิตไบโอออยล์จากฟางข้าวและขี้เลื่อยไม้ไผ่ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดและระบบแยกถ่าน พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไบโอออยล์อยู่ระหว่าง 440-500 องศาเซลเซียส ในกรณีของฟางข้าวและขี้เลื่อยไม้ไผ่ใช้อุณหภูมิ 405 และ 440 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงสุดประมาณร้อยละ 72 ซึ่งการใช้ชีวมวลที่มีขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการผลิตไบโอออยล์เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนที่ดี การนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้นั้นช่วยเพิ่มปริมาณผลได้ของไบโอออยล์และมีค่าความร้อนสูงประมาณ 19 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

Hyeon So Heo และคณะ [40] ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอออยล์ของเกลบในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบด พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 400-450 องศาเซลเซียส การเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สและอัตราการป้อนชีวมวลให้สูงขึ้นไม่ได้ส่งผลต่อไบโอออยล์อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สช่วยเพิ่มปริมาณผลได้ของไบโอออยล์จากประมาณร้อยละ 50 เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 60

Mehmet Pala และคณะ [41] ศึกษาการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สโดยใช้ไม้สนในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบด ซึ่งใช้แก๊สพาได้แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และอาร์กอน พบว่าการใช้ปริมาณแก๊สพาร้อยละ 75 และ 90 ที่อุณหภูมิ 430 และ 500 องศาเซลเซียส เมื่อใช้การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่าปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์มีค่าไม่ต่างกัน

2.8.4 สรุป

จากงานวิจัยการไฟโรไลซิสชีวมวลแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชด์เบดมีการใช้อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส [2, 6, 33] การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนสามารถลดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและการเกิดปฏิกิริยาที่ออกซิเจนเข้มข้นดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบขั้นตอนเดียว [33, 35] ส่งผลให้ไบโอออยล์มีค่าความร้อนที่สูง ปริมาณน้ำต่ำ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้มีปริมาณสูง [32] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ที่ช่วยลดปริมาณการใช้แก๊สไนโตรเจนที่ป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ [9]



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาการไฟโรไลซิสชีวมวลแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนที่มีการหมุนวนและไม่หมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบฟอง มีขั้นตอนการทดลองและรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมและการวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยคือ ไม้ยางพาราตัดภาพประกอบ 7 ที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท กมลลาไสยไบโอเพาเวอร์ จำกัด จังหวัดกาฬสินธุ์ที่จัดหาและสับให้มีขนาดเล็ก เพื่อให้มีความสะดวกต่อการจัดเก็บและการขนส่ง นอกจากนี้ยังมีการเตรียมชีวมวลให้มีความเหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการกระบวนการไฟโรไลซิส โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 7 ไม้ยางพารา

3.1.1 การเตรียมชีวมวล

ชีวมวลถูกนำไปไล่ความชื้นโดยการตากแดดประมาณ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบดด้วยเครื่องบดหยาบดังภาพประกอบ 8 (ก) ต่อด้วยเครื่องบดละเอียดดังภาพประกอบ 8 (ข) และแยกขนาดโดยใช้เครื่องร่อนมาตรฐานขนาด 0.212-0.600 ดังภาพประกอบ 9 จากนั้นนำวัตถุดิบที่ผ่านการแยกขนาดไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ด้วยเตาเผา ดังภาพประกอบ 10 ก่อนนำไปใช้งาน



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 8 เครื่องบดหยาบ (ก) และเครื่องบดละเอียด (ข)



ภาพประกอบ 9 เครื่องร่อนมาตรฐานและตะแกรง



ภาพประกอบ 10 เตาเผา

3.1.2 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล ได้แก่ ความหนาแน่นและการวิเคราะห์แบบประมาณ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.2.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงที่ ซึ่งวิเคราะห์จากความแตกต่างที่เปลี่ยนแปลงไป โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM 871-82 โดยการทดลองใช้ชีวมวลตัวอย่าง 1-2 กรัม ใส่ถ้วยกระเบื้องซึ่งน้ำหนักแล้วบันทึกค่า นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งน้ำหนักของชีวมวลตัวอย่างเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.2 ซึ่งน้ำหนักที่หายไปคือปริมาณความชื้น

ปริมาณ สารระเหยตามมาตรฐาน ASTM E 872-82 โดยการนำชีวมวลที่มีน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องและชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำเข้าเตาเผา แล้วเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที จากนั้นปล่อยให้เย็น นำชีวมวลที่ผ่านการอบมาชั่งน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักที่หายไปคือสารระเหย

ปริมาณเถ้าในชีวมวลทำได้ตามมาตรฐาน ASTM E 1755-01 โดยการนำถ้วยกระเบื้องจากขั้นตอนการหาสารระเหยใส่เข้าไปในเตาเผาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำถ้วยกระเบื้องออกจากเตาทำให้แห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำกลับเข้าเตาที่อุณหภูมิ 575 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำถ้วยชีวมวลออกจากเตามาชั่งน้ำหนักและทำซ้ำ ๆ จนกระทั่งน้ำหนักของชีวมวลที่ทำการอบคงที่ในช่วง 0.3-0.0003 กรัม

คาร์บอนคงที่เป็นโครงสร้างที่มีความเสถียรที่สุด สามารถคำนวณได้จากร้อยละความแตกต่างดังสมการ 3.1

$$\text{Fixed carbon (\%)} = 100 - \text{Moisture} - \text{Volatile} - \text{Ash} \quad (3.1)$$

3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแร่ธรรมชาติ สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูก เพื่อลดต้นทุนในงานวิจัยและศึกษาประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยา โดยมีรายละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

3.2.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ในการทดลองนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 19 ชนิด ได้แก่ ซีเอสเอ็มไฟว์ เอ็นเอชดีดับเบิ้ลยู ซิงค์ออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์ ซีเอสเอ็มไฟว์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์) โคบอลต์โมลิบดีนัม ดินขาว เคโอลิน ดินเบนโทไนท์ หินศิรี้ก้า โดโลไมต์ ฟัมมิส เพอร์ไลท์ เวอร์มิคูไลต์ เวอร์มิคูไลต์ผสมกรด ซีโอไลต์ และแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1.1 ซีเอสเอ็มไฟว์

ซีเอสเอ็มไฟว์ (ZSM-5) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากการสังเคราะห์ดังภาพประกอบ 11 ที่มี 3 ขั้นตอนคือ การเตรียมอสัญฐานเจล Hydrothermal treatment และ Calcination hydrothermal treatment เป็นการดำเนินการภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ขั้นตอนนี้ใช้เวลานานที่สุดเมื่อเทียบกับการเตรียมอสัญฐานเจล การเผาและการผลิตซีโอไลต์ชนิดซีเอสเอ็มไฟว์ในที่นี้ตัวแปรคืออัตราการให้ความร้อนของอุณหภูมิเป็น 2 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิช่วงแรกและอุณหภูมิช่วงหลัง ส่วนการใช้อุณหภูมิเพื่อให้ปริมาณซีโอไลต์สูงสุดและผลึกที่ได้มีสมบัติทางกายภาพคงตัวที่สุด



ภาพประกอบ 11 ซีเอสเอ็มไฟว์

3.2.1.2 เอ็นเอชดีดับเบิลยู

เอ็นเอชดีดับเบิลยู (non-hydrodewaxing catalyst, NHDW) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผลิตมาจากซีเอสเอ็มไฟว์ดิงภาพประกอบ 12 เพื่อใช้กับกระบวนการแปลงไขจากปิโตรเลียมให้ได้ น้ำมันดีเซลที่มีจุดเยือกแข็งต่ำและแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ออกแบบมาใช้น้ำมันที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ซึ่งอาจสอดคล้องกับลักษณะของไฮโดรไลซิสในส่วนที่มีโมเลกุลใหญ่ จึงคาดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถเร่งปฏิกิริยาเพื่อแปลงสภาพโมเลกุลไฮโดรไลซิสให้เล็กลงเพื่อให้มีสมบัติที่ดีขึ้นในแง่ของปริมาณออกซิเจนและสารประกอบไฮโดรคาร์บอน



ภาพประกอบ 12 เอ็นเอชดีดับเบิลยู

3.2.1.3 ซิงค์ออกไซด์

ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 10 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 13 โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นผงสีขาวไม่ละลายน้ำและถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งในวัสดุและผลิตภัณฑ์มากมาย เช่น ยาง พลาสติก เซรามิก แก้ว ซีเมนต์ และแบตเตอรี่ เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใช้ในกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 13 ซิงค์ออกไซด์

3.2.1.4 คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์

คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์ (CuO/ZnO) ดังภาพประกอบ 14 ใช้การสังเคราะห์โดยใช้วิธีโซล-เจล [42] มีส่วนผสมของซิงค์ 5.3247 กรัม เอทิลีนไกลคอล 25 มิลลิลิตร น้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร และกรดซิตริก 6.3 กรัม กวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผสมกับคอปเปอร์ซัลเฟตที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เก็บในที่มืดอีก 48 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส [43]



ภาพประกอบ 14 คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์

3.2.1.5 ซีเอสเอ็มที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

ซีเอสเอ็มไฟร์ถูกกระตุ้นด้วยไอน้ำดังภาพประกอบ 15 โดยมีหลักการคือไอน้ำไหลผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อน เมื่อไอน้ำสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยานั้นช่วยเติมออกซิเจนในโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเผาไหม้ของผงถ่านหรือฝุ่นที่อยู่ภายในได้และสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ พบว่ามีสมบัติที่ดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ [44]



ภาพประกอบ 15 ซีเอสเอ็มไฟร์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

3.2.1.6 ไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทส

แอนาเทส (TiO_2 anatase) เป็นหนึ่งในสามรูปแบบของแร่ไทเทเนียมไดออกไซด์มีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กเพียง 20 นาโนเมตร ดังภาพประกอบ 16 ไม่ละลายน้ำเจือจางกรดอินทรีย์และเจือจางต่าง



ภาพประกอบ 16 ไทเทเนียมไดออกไซด์อนาเทส

3.2.1.7 ไทเทเนียมไดออกไซด์

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่มาจาก Ilmenite Rutile และ Anatase มีการใช้งานที่หลากหลายส่วนใหญ่มีบทบาทในอุตสาหกรรมอาหาร มีลักษณะเป็นผงสีขาว ดังภาพประกอบ 17 ไร้กลิ่น รสจืด และค่าพีเอชเท่ากับ 7.5



ภาพประกอบ 17 ไทเทเนียมไดออกไซด์

3.2.1.8 ไทเทเนียมไดออกไซด์รูไทล์

รูไทล์ (TiO_2 rutile) เป็นหนึ่งในสามรูปแบบของไทเทเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวประกอบ 18 เกิดขึ้นตามธรรมชาติในปริมาณเล็กน้อยพบในหินอัคนีและหินแปร การนำไปใช้งาน เช่น เป็นส่วนประกอบในการเคลือบผิวลวดเชื่อม การย้อมสีของเครื่องปั้นดินเผา การเคลือบ และเป็นสารกระตุ้นเพชร



ภาพประกอบ 18 ไทเทเนียมไดออกไซด์ รูไทล์

3.2.1.9 โคบอลต์โมลิบดีนัม

โคบอลต์โมลิบดีนัม (CoMo) บนตัวรองรับอะลูมินา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร ความยาวประมาณ 15 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 19 โดยมีงานวิจัยที่ศึกษา [34] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์/โมลิบดีนัมสามารถลดปริมาณออกซิเจนในไบโอเอทิลและเพิ่มสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ที่เป็นอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนอีกด้วย

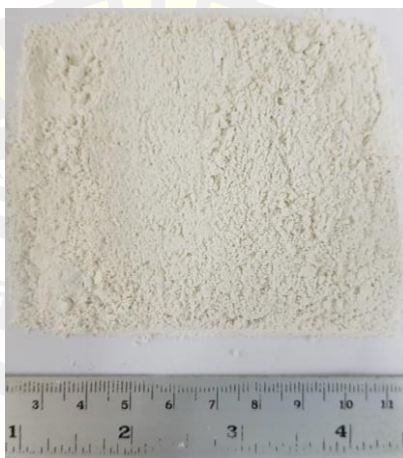
พหุ ประ โภ ชัย



ภาพประกอบ 19 โคบอลต์/โมลิบดีนัม

3.2.1.10 ดินขาวเคโอลิน

ดินขาวเคโอลิน (kaolin) เกิดจากการทับถมกันของดินภูเขาไฟ มีลักษณะเป็นสีขาว ดังภาพประกอบ 20 มีส่วนประกอบหลัก ๆ เป็นแร่ดินกลุ่ม Kaolinite ดินขาวเคโอลินมีอยู่หลายชนิด แตกต่างกันไป ตามแหล่งที่อยู่บนผิวโลกแบ่งตามแหล่งต้นกำเนิดที่เป็นภูเขาหรือแหล่งสะสมที่เกิดในที่ลุ่ม ส่วนประกอบโดยทั่วไปของดินขาวจะประกอบไปด้วย อะลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ และน้ำ ในอัตราส่วนที่ต่างกันตามพื้นที่ สามารถนำมาใช้เป็นสารยึดเกาะในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาได้



ภาพประกอบ 20 ดินขาวเคโอลิน

3.2.1.11 เบนโทไนท์

เบนโทไนท์ (bentonite) เป็นหินภูเขาไฟที่เปลี่ยนไปเป็นเนื้อดินต่งภาพประกอบ 21 อยู่ในกลุ่มแร่สมิ์คไทท์ (smectite) หรือมอนต์มอริลโลไนท์ (montmorillonite) ที่เป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนประกอบรองลงมาก็คือ ซิลิคอน อลูมินา เหล็ก แคลเซียม ควอร์ต และแมกนีเซียม ส่วนประกอบรองลงมาก็คือ ซิลิคอน อลูมินา เหล็ก แคลเซียม ควอร์ต และแมกนีเซียม เบนโทไนท์มีในการดูดซับที่ดีและยังดูดซับกลิ่นของเสีย



ภาพประกอบ 21 เบนโทไนท์

3.2.1.12 คีรีก้า

หินธรรมชาติคีรีก้า (kiriga) มีประสิทธิภาพตกตะกอนได้เร็ว ลดการเกิดตะไคร่น้ำ ดับกลิ่น ปรับค่ากรดต่างให้เป็นค่ากลาง มีรูพรุนสูงต่งภาพประกอบ 22 ช่วยจับฝุ่นผง เป็นที่อยู่อาศัยของแบคทีเรีย เก็บแร่ธาตุได้เป็นอย่างดี และมีสารประกอบ Calcium montmorillonite clay ที่ช่วยเร่งการเจริญเติบโต



ภาพประกอบ 22 คีรีก้า

3.2.1.13 โดโลไมต์

แร่โลหะหรือแร่อุตสาหกรรมมีลักษณะคล้ายหินปูนบางครั้งอาจพบเป็นผลึกรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน และมีลักษณะเป็นเม็ดเนื้อแน่นไม่แสดงเป็นรูปผลึกมีหลายสีแต่ที่พบบ่อยคือสีขาวเทา สูตรทางเคมีของโดโลไมต์ (dolomite) คือ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ มี CaO 30.4 % MgO 21.7% และ CO_2 47.9% และลักษณะเด่นมีสีขาวอมเหลืองถึงเทาต้งภาพประกอบ 23 ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไฟโรไลซิสมากขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้ปริมาณของไบโอออยล์และถ่านชีวภาพลดลง แต่แก๊สเพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของแก๊สนี้ส่งผลให้แก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นด้วย



ภาพประกอบ 23 โดโลไมต์

3.2.1.14 พัมมิส

หินพัมมิสหรือพูไมส์ (pumice) เป็นหินภูเขาไฟเกิดจากการหลอมละลายของลาวา และเมื่อกำจัดตัวแข็งโดยฉับพลันกับชั้นอากาศและฟองอากาศ (ในกรณีไหลลงน้ำ) มีรูพรุนจำนวนมากคือฟองอากาศ ขณะที่ลาวากำลังร้อนระอุผนวกเข้ากับความเย็นจากอากาศและน้ำจับตัวแข็งเป็นก้อน เกิดโพรงและรูพรุนจำนวนมากมีคุณสมบัติลอยน้ำได้ น้ำหนักเบา และแร่ธาตุมากมาย ดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 พัมมิส

3.2.1.15 เพอร์ไลต์

วัสดุธรรมชาติที่เกิดจากการสลายตัวของหินภูเขาไฟเป็นซิลิกาสีขาวอมเทาได้มาจากลาวาของภูเขาไฟ เมื่อเผาแล้วเพอร์ไลต์ (perlite) ที่มีความหนาแน่นประมาณ 95-145 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีความสามารถในการอุ้มน้ำและระบายอากาศได้ดี เมื่อขยายตัวแล้วมีเสถียรภาพดี มีการยุบตัวน้อย ขนาดเม็ดประมาณ 5-10 มิลลิเมตร ดังภาพประกอบ 25 ตัวเร่งปฏิกิริยาเพอร์ไลต์ลดปริมาณผลได้ของแก๊ส เนื่องจากการดูดซับสารประกอบแก๊สในโครงสร้างที่มีรูพรุนอย่างละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 25 เพอร์ไลต์

3.2.1.16 เวอร์มิคูไลต์

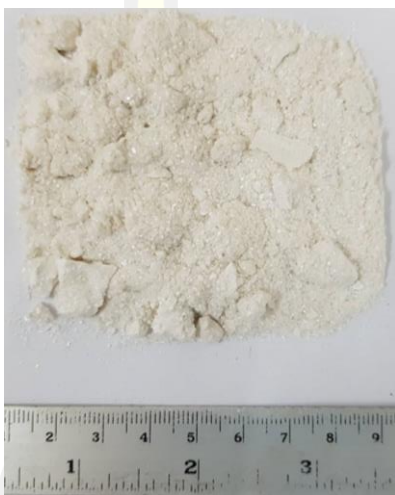
เวอร์มิคูไลต์ (vermiculite) มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ เรียงตัวซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ ดังภาพประกอบ 26 เวอร์มิคูไลต์ดิบยังไม่เหมาะสมต้องนำมาเผาเพื่อให้แผ่นอะลูมิโนซิลิเกต (alumino-silicate) ที่ซ้อนทับกันขยายออกเรียกกระบวนการนี้ว่าการหลุดออกเป็นแผ่น (exfoliation) ความหนาแน่นรวมลดลงเหลือประมาณ 95-145 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขยายตัวขึ้นเมื่อได้รับความร้อน เมื่อขยายตัวทำให้น้ำหนักเบาและมีปฏิกิริยาเป็นตัวกลางต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้ดีไม่ละลายน้ำมีความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง ในเวอร์มิคูไลต์มีธาตุโพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียมที่สามารถนำใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งวัสดุธรรมชาติที่หาได้ง่ายและมีองค์ประกอบของธาตุที่เหมาะสมกับการใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 26 เวอร์มิคูไลต์

3.2.1.17 เวอร์มิคูไลต์กระตุ้นด้วยกรด

การสังเคราะห์เวอร์มิคูไลต์กระตุ้นด้วยกรด (acid-pretreated vermiculite) ใช้สารเคมี ซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่มีขนาดอนุภาค 22.75 ไมโครเมตร ผสมที่อัตราส่วน 10 มิลลิลิตร ต่อเวอร์มิคูไลต์ 1 กรัม และกวนสารที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปผสมกรดซัลฟิวริกและกรดฟอสฟอริก นำไปกรองเพื่อแยกของเหลวและของแข็งโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ ทำให้แห้งโดยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 27 เวอร์มิคูไลต์กระตุ้นด้วยกรด

3.2.1.18 ซีโอไลต์

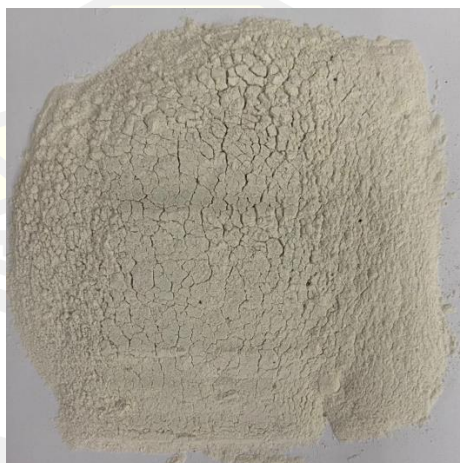
ซีโอไลต์ (clinoptilolite) มีสูตรทางเคมี $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})_{2-3} \text{Al}_3 (\text{Al}, \text{Si})_2 \text{Si}_{13} \text{O}_{36} \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเกิดจากการเย็นตัวและตกผลึกของหินหลอมเหลวที่ไหลขึ้นมาบนผิวโลกหรือใกล้ผิวโลกจากการระเบิดของภูเขาไฟ จึงทำให้ลักษณะการเกิดของหินภูเขาไฟมีลักษณะที่มีเนื้อหินที่ละเอียด เพราะอัตราการเย็นตัวและตกผลึกของหินหลอมเหลวเป็นไปอย่างรวดเร็ว หินลาวาแดงเป็นหินแข็ง สาก เปราะ เบา และมีรูพรุนไม่ทนต่อการสึก มีเนื้อผนังเป็นพวกหินบะซอลต์ที่มีผลึกแร่ขนาดเล็กปนรวมกันอยู่ในเนื้อบ้างและมีสีเข้มดำดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 ซีโอไลต์ธรรมชาติ

3.2.1.19 แคลเซียมออกไซด์

แคลเซียมออกไซด์มีสูตรทางเคมี CaO มีลักษณะเป็นผงสีขาวดังภาพประกอบ 29 การผลิตแคลเซียมออกไซด์ได้ด้วยการเผาแคลเซียมคาร์บอเนต CaCO_3 เพื่อดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออก ดังนั้นแคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งที่สามารถทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตดั้งเดิม



ภาพประกอบ 29 แคลเซียมออกไซด์

3.2.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสทั้งหมด 19 ชนิด ได้แก่ ซีเอสเอ็มไฟว์ เอ็นเอชดีดับเบิลยู ซิงค์ออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์ ซีเอสเอ็มไฟว์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย ไขมัน ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส) ไทเทเนียมไดออกไซด์ ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์) โคบอลต์/โมลิบดีนัม ดินขาวเคโอลิน ดินเบนโทไนท์ หินศิรี้ก้า โดโลไมต์ พัมมิส เพอร์ไลท์ เวอร์มิคูไลต์ เวอร์มิคูไลต์กระตุ้นด้วยกรด ซีโอไลต์ และแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งมีรายละเอียดดังตาราง 7

ตาราง 7 การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เวลา (ชั่วโมง)
ซีเอสเอ็มไฟว์	550	5
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส)	180	4
ไทเทเนียมไดออกไซด์	200	6
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์)	180	4
โคบอลต์/โมลิบดีนัม	550	4
ดินขาวเคโอลิน	750	4
ดินเบนโทไนท์	550	3
หินศิรี้ก้า	550	4
ซิงค์ออกไซด์	350	4
คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์	350	4
เอ็นเอชดีดับเบิลยู	550	4
ซีเอสเอ็มไฟว์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไขมัน	550	4
โดโลไมต์	900	3
พัมมิส	750	4
เพอร์ไลท์	500	4
เวอร์มิคูไลต์	600	5
เวอร์มิคูไลต์กระตุ้นด้วยกรด	550	4
ซีโอไลต์ธรรมชาติ	550	4
แคลเซียมออกไซด์	900	3

การเผากระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยามีขั้นตอนการกระตุ้นด้วยวิธีการเริ่มจากนำตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมาทำการคัดแยกส่วนที่เป็นฝุ่นออกก่อนโดยการร่อนด้วยเครื่องร่อนมาตรฐาน จากนั้นนำตัวเร่งที่ได้มาใส่ภาชนะที่สามารถทนอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาและนำเข้าเตาเผา ทำการตั้งอุณหภูมิที่ใช้กระตุ้นตัวเร่งแต่ละชนิด หลังจากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผามาคัดแยกฝุ่นอีกครั้งก่อนนำไปใช้งาน

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองไพโรไลซิสชีวมวลแบบเร็วประกอบไปด้วย การวิเคราะห์ด้วยเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์ การเตรียมเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบพอง ออกแบบการทดลอง และการบันทึกผลการทดลอง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 เครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์

ถ้วยบรรจุตัวอย่างดังภาพประกอบ 30 โดยนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งดังภาพประกอบ 31 และนำถ้วยใส่เข้าไปในเครื่องไพโรไลซิส (PY2020ID/Frontier) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC/MS) (agilent technologies 7820a/5975) ดังภาพประกอบ 32 โดยใช้คอลัมน์ Ultra-alloy capillary column (30 m - 0.25 mm - 0.25 μ m) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิเตาอบที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที เพิ่มจาก 45 เป็น 320 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อนาที รักษาอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และอัตราการไหลแก๊สฮีเลียมเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที



ภาพประกอบ 30 ถ้วยสำหรับใส่ตัวอย่าง



ภาพประกอบ 31 เครื่องชั่งยี่ห้อ mettler toledo รุ่น AB204-S



ภาพประกอบ 32 เครื่องไฟโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปคโตรมิเตอร์

3.3.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง

เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองเป็นเครื่องที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วตั้งโดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

3.3.2.1 ถังป้อน

ถังป้อน (hopper) ทำหน้าที่บรรจุวัตถุดิบสำหรับป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ ถังป้อนทำจากท่ออะคริลิกใสที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 17 เซนติเมตร และสูง 16 เซนติเมตร สามารถควบคุมอัตราป้อนของวัตถุดิบได้โดยปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ (motor) ที่ยึดติดกับใบกวน (stirrer) สำหรับกวาดอนุภาคของวัตถุดิบเข้าสู่เตาปฏิกรณ์โดยผ่านท่อป้อนวัตถุดิบ โดยท่อป้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร และมีท่อสำหรับหล่อเย็นท่อป้อนอีกสองชั้นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 และ 2 เซนติเมตร โดยใช้อากาศหรือแก๊สไนโตรเจน เพื่อไม่ให้วัตถุดิบได้รับความร้อนสูงจนทำให้เกิดการสลายตัวก่อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

3.3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ (reactor) เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วัตถุดิบเกิดการสลายตัวกลายเป็นไอไพโรไลซิส ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และมีความสูง 40 เซนติเมตร โดยภายในบรรจุทรายที่เป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อนประมาณ 150 กรัม ให้วัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ นอกจากนี้ยังมีชุดอุ่นแก๊สไนโตรเจนที่ทำจากลูกเหล็กอยู่ในส่วนล่างสุดของเตาปฏิกรณ์เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ลดลงเมื่อเปิดแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่ระบบ

3.3.2.3 ไซโคลน

ไซโคลน (cyclone) ทำหน้าที่แยกอนุภาคของถ่านชีวภาพออกจากไอไพโรไลซิส ถ่านที่ถูกเหวี่ยงตกลงไปในถังเก็บถ่านชีวภาพ (char pot) ไซโคลนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาว 2 เซนติเมตร เชื่อมต่อกับกรวยที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 2 เซนติเมตร และด้านล่าง 1 เซนติเมตร ความยาวของกรวย 3 เซนติเมตร ส่วนถังเก็บถ่านชีวภาพมีขนาดความกว้าง 10 เซนติเมตร ความยาว 5 เซนติเมตร และความสูง 31 เซนติเมตร

3.3.2.4 ชุดกรองไอร้อน

ชุดกรองไอร้อน (hot filter) มีขนาดเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ภายในชุดกรองไอร้อนบรรจุใยแก้วประมาณ 10 กรัม สำหรับกรองอนุภาคถ่านชีวภาพขนาดเล็กที่หลุดมาจากไซโคลน

เพื่อให้ไอโพลีไธสบริสุทธิ์มากขึ้น ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชุดกรองไอร้อนทำหน้าที่สำหรับบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาประมาณ 400 กรัม สำหรับทำปฏิกิริยากับไอโพลีไธส

3.3.2.5 ชุดควบแน่นด้วยน้ำ

ชุดควบแน่นด้วยน้ำ (water-cooled condenser) มีลักษณะเป็นท่อสองชั้นทำหน้าที่ควบแน่นไอโพลีไธสที่อุณหภูมิประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส โดยชั้นแรกเป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ความยาว 40 เซนติเมตร สำหรับให้ไอโพลีไธสไหลผ่าน ส่วนชั้นที่สองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความยาว 30 เซนติเมตร สำหรับให้น้ำหล่อเย็นไหลผ่าน ทำให้ไอโพลีไธสเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลว

3.3.2.6 ชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต

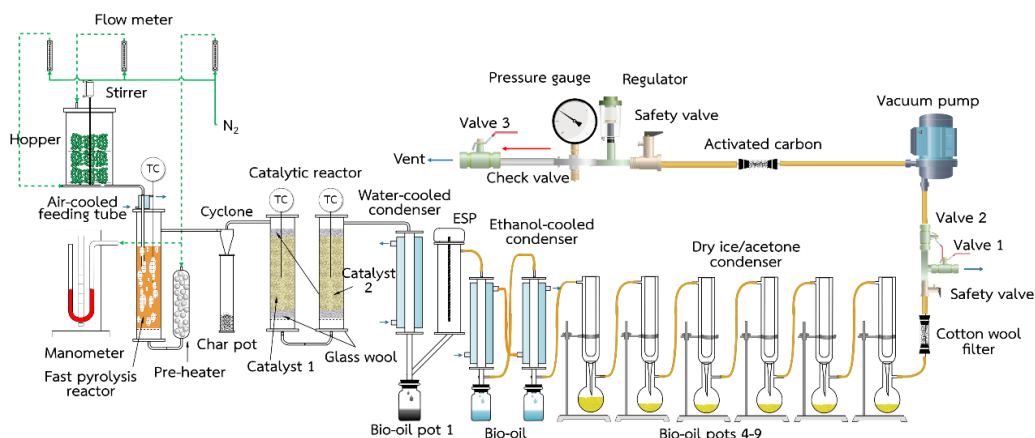
ชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator, ESP) เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับชุดควบแน่นด้วยน้ำดังภาพประกอบ 33 ทำหน้าที่ดักจับไอโพลีไธสที่ไม่สามารถควบแน่นด้วยน้ำได้ เป็นท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร ภายในมีแกนที่ทำจากไม้พันด้วยลวดทองแดงสำหรับสร้างแรงดันไฟฟ้า ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตคือ ไบโอะออยล์เฟสหนืดที่ไหลมารวมอยู่ในขวดเก็บไบโอะออยล์ขนาด 60 มิลลิลิตร

3.3.2.7 ชุดควบแน่นด้วยเอทานอล

ชุดควบแน่นด้วยเอทานอล (ethanol-cooled condenser) มีทั้งหมด 2 ชุด ที่มีอุณหภูมิประมาณ -20 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ดักจับไอน้ำที่ลอยมากับไอโพลีไธสก่อนเข้าไปควบแน่นด้วยชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตต่อไป

3.3.2.8 ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอซีโตน

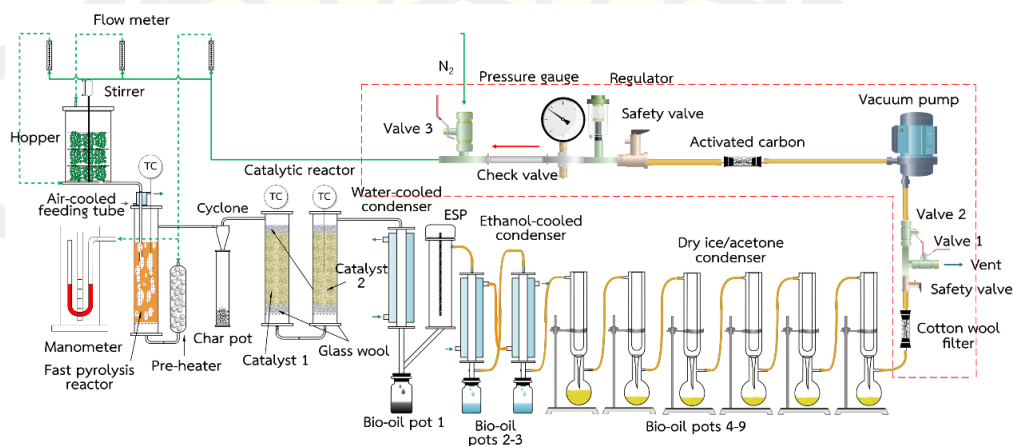
ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอซีโตน (dry-ice/acetone condenser) ทั้งหมด 6 ชุดที่มีอุณหภูมิประมาณ -70 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ควบแน่นไอโพลีไธสที่ไม่สามารถควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต ผลึกภัณฑ์ที่ได้เป็นไบโอะออยล์เฟสเบาหรือเฟสติดไฟในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ชุดควบแน่นนี้ทำจากแก้วที่มีลักษณะเป็นกระเปาะสองชั้น โดยชั้นแรกเป็นส่วนที่มีไว้สำหรับใส่น้ำแข็งแห้งผสมแอซีโตน ส่วนชั้นที่สองเป็นช่องว่างสำหรับให้ไอโพลีไธสไหลผ่านทำให้เกิดการควบแน่น และไอโพลีไธสที่ไม่สามารถควบแน่นได้ถูกกรองด้วยชุดกรองสาลี (cotton wool filter) ดังภาพประกอบ 33 ก่อนปล่อยทิ้งไปสู่บรรยากาศภายนอก



ภาพประกอบ 33 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไอดีซ์แบบฟอง

3.3.2.9 ชุดหมุนวนแก๊ส

ชุดหมุนวนแก๊ส (gas circulation) ทำหน้าที่หมุนวนไอไพโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นได้กลับมาใช้ในระบบอีกครั้งดังภาพประกอบ 34 โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ทำหน้าที่ดูดไอไพโรไลซิสผ่านตัวกรองสำลีเพื่อกรองละอองของน้ำมันที่อาจหลุดออกมาจากปั๊มสุญญากาศ หลังจากผ่านตัวกรองสำลีไอไพโรไลซิสไหลผ่านวาล์วนิรภัย (safety valve) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่รักษาแรงดันในระบบ โดยวาล์วถูกเปิดเพื่อระบายแรงดันส่วนที่เกินกว่าที่กำหนดออกเพื่อป้องกันอุปกรณ์หรือผลิตภัณฑ์เสียหาย จากนั้นไหลผ่านเครื่องควบคุมแรงดัน (pressure regulator) ที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมแรงดันให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานและเกจวัดความดัน (pressure gauge) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงดันและปล่อยไอเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง



ภาพประกอบ 34 ชุดหมุนวนแก๊ส

3.3.3 ลำดับขั้นตอนการทดลอง

1. นำอุปกรณ์เครื่องต่าง ๆ ได้แก่ ถังป้อน เครื่องปฏิกรณ์ ไชโคลน ชุดกรองไอร้อน ชุดควบแน่นด้วยน้ำ ชุดควบแน่นด้วยไฟฟ้าสถิตและชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งมาชั่งน้ำหนักหาปริมาณเพื่อบันทึกค่า

2. นำชีวมวลที่ผ่านการอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาใส่ลงในถังป้อนชีวมวลและนำไปชั่งน้ำหนัก

3. ประกอบอุปกรณ์เครื่องปฏิกรณ์เข้าด้วยกัน ตรวจสอบระบบไฟเพื่อความปลอดภัย และเริ่มให้ความร้อนโดยใช้กระแสไฟฟ้า 220 โวลต์ ให้ชุดลดความร้อนมีอุณหภูมิตามที่ตั้งค่าไว้

4. เมื่ออุณหภูมิคงที่ เริ่มเปิดไนโตรเจนเข้าสู่ท่อลำเลียงของถังชีวมวลด้วยอัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที ด้านบนของถังป้อนชีวมวลเพื่อช่วยดันชีวมวลลงในท่อลำเลียงใช้อัตราการไหล 4 ลิตรต่อนาที และชุดอุ่นไนโตรเจนใช้อัตราการไหล 7 ลิตรต่อนาที เพื่อไม่ให้มีออกซิเจนในระบบ

5. เปิดปั๊มสุญญากาศเพื่อนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ปล่อยทิ้งนำกลับมาใช้ในระบบ ปิดวาล์วปล่อยแก๊สทิ้งและวาล์วไนโตรเจนต่อจากนั้นเปิดวาล์วเข้าสู่ระบบ โดยกำหนดความดันในระบบให้คงที่ประมาณ 0.2 บาร์

6. เริ่มเปิดมอเตอร์กวนชีวมวลให้ไหลผ่านท่อลำเลียงไปสู่เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งการใช้ อัตราการไหลของไนโตรเจน 6 ลิตรต่อนาที ทำให้ทรายที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เคลื่อนที่แบบพองและสัมผัสกับชีวมวลเกิดการถ่ายโอนความร้อนกับชีวมวลทำให้เกิดไอไฟโรไลซิส ไอไฟโรไลซิสและชีวมวลที่ถูกย่อยสลายไหลผ่านไชโคลนทำให้เกิดแรงเหวี่ยงชีวมวลที่ถูกย่อยสลายให้ตกลงไปสู่ถังเก็บ ถ่านชีวภาพ ไอไฟโรไลซิสไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่ 2 และ 3 ผ่านการทำปฏิกิริยาเข้าสู่ชุดควบแน่นด้วยน้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 28-35 องศาเซลเซียส เพื่อให้อุณหภูมิของไอไฟโรไลซิสลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นไหลเข้าสู่ชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ส่วนไอไฟโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นได้ไหลเข้าไปยังชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมด้วยแอซิโตนที่มีอุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส และไหลผ่านชุดกรองสาลิเพื่อดักไอน้ำก่อนที่จะเข้าไปยังปั๊มสุญญากาศและนำแก๊สกลับมาใช้ในระบบ

7. เมื่อครบเวลาการทดลองที่กำหนดปิดระบบการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าและปั๊มสุญญากาศ

8. รอให้เครื่องปฏิกรณ์เย็นแล้วถอดอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ ไชโคลน ถังเก็บถ่านชีวภาพ ชุดกรองไอร้อน ชุดตกตะกอนด้วยไอน้ำ และไฟฟ้าสถิตมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง

9. นำอุปกรณ์ไปล้างทำความสะอาดคราบของไบโอออยล์ด้วยเอทานอลและนำไปเป่าให้แห้ง

10. นำอุปกรณ์ที่ทำความสะอาดแล้วมาเตรียมพร้อมสำหรับการทดลองต่อไป

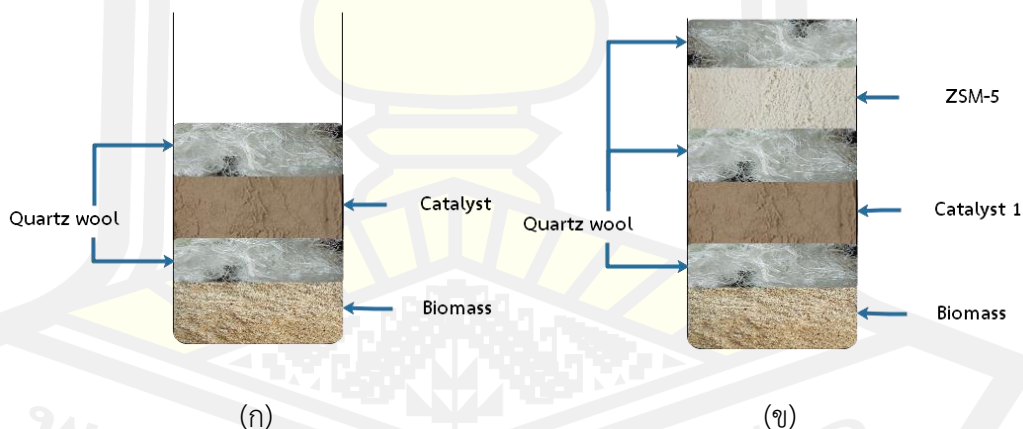
11. นำไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการมาทดสอบวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี

3.3.4 การออกแบบแผนการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการทดลองในเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์และส่วนที่สองทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.4.1 การทดลองในเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์

การทดลองไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ไม้ยางพาราในปริมาณ 1.5 มิลลิกรัม ที่มีขนาดอนุภาค 75-150 ไมโครเมตร ที่มีอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและชีวมวลเท่ากับ 2:1 อุณหภูมิไพโรไลซิสเท่ากับ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ได้แก่ ซีเอสเอ็มไฟว์, เอ็นเอชดีดับเบิ้ลยู, ซิงค์ออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์ซิงค์ออกไซด์, ซีเอสเอ็มไฟว์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส), ไทเทเนียมไดออกไซด์, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์), โคบอลต์โมลิบดีนัม, ดินขาวเคโอลิน, ดินเบนโทไนท์, หินศิรี้ก้า, โดโลไมต์, พัมมิส, เพอร์ไลท์, เวอร์มิคูไลต์, เวอร์มิคูไลต์ผสมกรด, ซีโอไลต์ และแคลเซียมออกไซด์ ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอนได้นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่กล่าวมาข้างต้นให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลำดับที่ 1 และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเอสเอ็มไฟว์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาลำดับที่ 2 ดังภาพประกอบ 35 ซึ่งทุกการทดลองมีการทดลองอย่างน้อย 2 ซ้ำ



ภาพประกอบ 35 แผนภาพการจัดลำดับตัวอย่างในถ้วยแบบ (ก) หนึ่งขั้นตอนและ (ข) สองขั้นตอน

3.3.4.2 การทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง

การทดลองแบ่งออก 3 ส่วน ลำดับแรกทดลองศึกษาผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ในกระบวนการโดยใช้อุณหภูมิไพโรไลซิสและอุณหภูมิของห้อง กรองไอร้อนเท่ากับ 500 และ 380 องศาเซลเซียสตามลำดับ ใช้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนของ

ชุดอ่อนไนโตรเจน ท่อลำเลียง ด้านบนถึงเก็บชีวมวลเท่ากับ 6 1 และ 3 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ รวมทั้งระบบเท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที ในส่วนที่ 2 ศึกษาผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนึ่งขั้นตอน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 และ CoMo และแบบสองขั้นตอนใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo ลำดับที่ 1 และตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 เป็นลำดับที่ 2 และส่วนที่ 3 ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน โดยแบ่งตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo และในส่วนที่สองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ซึ่งในแต่ละส่วนมีการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ในกระบวนการมีการศึกษาทั้งแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง ซึ่งใช้ปฏิกิริยาเป็นตัวช่วยในการหมุนวน โดยควบคุมปริมาณน้ำของมานอมิเตอร์ให้อยู่ในระดับความดันบรรยากาศ

3.3.5 การเก็บข้อมูล

ปริมาณผลิตภัณฑ์ (yield) คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนที่เป็นของเหลวคือไบโอออยล์ ส่วนที่เป็นของแข็งคือถ่านชีวภาพ และส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้คือแก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์ทั้งหมดสามารถหาปริมาณได้จากสมดุลมวล (mass balance) โดยการชั่งน้ำหนักชีวมวล ถังป้อนชีวมวล เครื่องปฏิกรณ์ ไชโคลน ถังเก็บถ่านชีวภาพ ไยแก้ว ชุดกรองไอร้อน ชุดควบแน่น และถังเก็บไบโอออยล์ ทำการบันทึกผลก่อนและหลังการทดลอง ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไบโอออยล์จะอยู่ในชุดควบแน่นด้วยน้ำ ชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต (ESP) ถังเก็บชีวมวล และชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมเอซิโตน และปริมาณของแข็งอยู่ในส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ ไชโคลน และชุดกรองไอร้อน ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถควบแน่นได้นั้นคำนวณได้จากค่าความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ดังสมการต่อไปนี้

การคำนวณปริมาณชีวมวลที่ใช้

$$\text{ปริมาณชีวมวลที่ใช้} = \text{น้ำหนักชีวมวลก่อนการทดลอง} - \text{น้ำหนักชีวมวลหลังการทดลอง} \quad (3.2)$$

การคำนวณปริมาณผลได้ของของเหลว

$$\text{ร้อยละไบโอออยล์} = (\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลว} / \text{ปริมาณชีวมวลที่ใช้}) \times 100 \quad (3.3)$$

การคำนวณปริมาณของของแข็ง

$$\text{ร้อยละถ่านชีวภาพ} = (\text{ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็ง} / \text{ปริมาณชีวมวลที่ใช้}) \times 100 \quad (3.4)$$

การคำนวณปริมาณผลได้ของแก๊ส

$$\text{ร้อยละแก๊ส} = 100 - \text{ร้อยละไบโอออยล์} - \text{ร้อยละถ่านชีวภาพ} \quad (3.5)$$

3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

3.3.6.1 ปริมาณน้ำ

การวิเคราะห์หาปริมาณน้ำ (water content) ในไบโอออยล์ตามมาตรฐาน ASTM E203 ด้วยเครื่องมือวัดปริมาณน้ำแบบปริมาตรยี่ห้อ Metrohm รุ่น 890 Titrando ดังภาพประกอบ 36 ใช้วิธีการไทเทรตแบบคาลฟีเซอร์ (karl-fisher titration) โดยใช้ Medium K

เป็นสารไทเทรตและ Composite 5 เป็นสารละลาย ในขั้นตอนการทดลองไบโอออยล์ถูกป้อนเข้าไป เพื่อทำการวิเคราะห์



ภาพประกอบ 36 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณน้ำ

3.3.6.2 ค่าพลังงานความร้อน

การวิเคราะห์ค่าความร้อน (heating value) โดยใช้เครื่อง Bomb Colorimeters ตามมาตรฐาน ASTM D-7582 D-5373 D-4239 และ D-5865 สามารถวิเคราะห์โดยการใส่ตัวอย่าง ลงไปในลูก Bomb นำลูก Bomb ใส่ไปในเครื่อง Bomb โดยรอบ ๆ ลูก Bomb จะมีน้ำที่ควบคุม อุณหภูมิ เครื่องทำงานโดยการจุดติดไฟเพื่อเผาไหม้ตัวอย่างจนสมบูรณ์และให้ความร้อนออกมาทำให้ ความร้อนแพร่กระจายไปยังน้ำที่อยู่รอบ ๆ ลูก Bomb เครื่องตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ น้ำ และคำนวณออกมาเป็นค่าพลังงานความร้อน

3.3.6.3 ปริมาณผลได้ทางพลังงาน

การวิเคราะห์หาค่าปริมาณผลได้ทางพลังงาน (energy yield) ของผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ สามารถคำนวณได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ปริมาณผลได้ทางพลังงาน (\%)} = \text{Mass yield} \times \text{HHV}_{\text{Product}} / \text{HHV}_{\text{Raw material}} \quad (3.8)$$

เมื่อ Mass yield คือปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

$\text{HHV}_{\text{Product}}$ คือค่าความร้อนสูงของผลิตภัณฑ์

$\text{HHV}_{\text{Raw material}}$ คือค่าความร้อนสูงของวัตถุดิบตั้งต้น

3.3.6.4 การวัดค่าพื้นฐานในไบโอออยล์

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHNO) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์แร่พื้นฐาน Truspec CHN/CHNS MicroCarbon/Hydrogen/Nitrogen/Sulfur/Determinators โดยหลักการการทำงานของเครื่องมือหาปริมาณของธาตุด้วยการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash combustion) เพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างเปลี่ยนเป็นแก๊สที่สัมพันธ์กับธาตุนั้น ๆ ที่มีสัดส่วนแน่นอน เช่น ธาตุไนโตรเจนถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจน ธาตุคาร์บอนถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และธาตุไฮโดรเจนถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ จากนั้นแยกแก๊สผสมออกจากกันเพื่อหาปริมาณแก๊สแต่ละชนิด [45]

3.3.6.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอออยล์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatograph) Agilent technologies รุ่น 7820A และแมสสเปกโตรมิเตอร์ (mass spectrometer) Agilent technologies รุ่น 5975 ดังภาพประกอบ 37 โดยใช้ ultra-alloy capillary column (30 m–0.25 mm–0.25 μ m) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิเตาที่ 45 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 นาที เพิ่มอุณหภูมิ 45 เป็น 300 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อนาทีและควบคุมอุณหภูมิเตาที่ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที อัตราการไหลของฮีเลียม 1 มิลลิตรต่อนาที และช่วงมวลที่ใช้สำหรับตัวตรวจวัดมวลรวมคือ 40–550 m/z โดยมีขั้นตอนการทดลองคือ นำไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วผสมด้วยเอทานอลที่อัตราส่วน 50 ต่อ 950 หน่วยไมโครลิตร หรือร้อยละ 5 ใส่ลงในขวดไวแอล (vial) โดยตัวอย่างถูกกรองผ่านกรองไนลอนที่มีขนาดรู 0.2 ไมโครเมตร ก่อนทำการฉีดเข้าสู่เครื่องวิเคราะห์



ภาพประกอบ 37 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์

3.3.6.6 การวิเคราะห์แก๊ส

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatograph, GC) Agilent Technologies รุ่น 7890B ดังภาพประกอบ 38 ใช้สำหรับวิเคราะห์กลุ่มของสารประกอบอินทรีย์ระเหยได้ง่าย (volatile organic compounds, OCs) และระเหยได้ปานกลาง (semi-volatile organic compounds) โดยเก็บแก๊สใส่ภาชนะบรรจุแก๊สและนำมาฉีดเข้าเครื่อง



ภาพประกอบ 38 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การศึกษาการไพโรไลซิสชีวมวลแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนที่มีการหมุนวนและไม่หมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพองแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อต่อไปนี้

4.1 สมบัติของชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยคือไม้ยางพาราที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทกมลไสยไบโอเพาเวอร์ 2010 จำกัด ซึ่งได้นำมาผ่านกระบวนการบด คัดขนาดที่ 0.212-0.600 มิลลิเมตร และอบไล่ความชื้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาสมบัติของชีวมวลดังตาราง 8

ตาราง 8 สมบัติของไม้ยางพารา

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานเปียก)	งานวิจัยนี้	Mohammad และคณะ [5]	Mazlan และคณะ [46]
ความชื้น (moisture)	8.07	4	4.3
สารระเหย (volatile matter)	77.01	79.3	79.8
คาร์บอนคงที่ ¹ (fixed carbon)	13.87	15.4	14.1
เถ้า (ash)	1.05	1.3	1.8
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานเปียก)			
คาร์บอน (C)	47.18	46.60	44.2
ไฮโดรเจน (H)	6.71	7.10	7.2
ไนโตรเจน (N)	<0.001	0.30	0.3
ออกซิเจน (O)	45.06	46.00	48.3
อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C)*	1.71	1.81	1.94
อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C)*	0.72	0.74	0.82
องค์ประกอบพื้นฐาน (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานเปียก)			
เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)	-	-	34.6
เซลลูโลส (cellulose)	-	-	18.3
ลิกนิน (lignin)	-	-	25.5

ค่าพลังงานความร้อน (MJ/kg)			
ค่าพลังงานความร้อนสูง (HHV)	17.32	19.4	18.89
ค่าพลังงานความร้อนต่ำ (LHV)	15.89	15.91	15.24
ความหนาแน่น (kg/m³)			
ความหนาแน่นรวม (bulk)	163.75	-	-
ความหนาแน่นปรากฏ (apparent)	1070.7	-	-
*สูตรโมเลกุลของ CH _{1.7} O _{0.72} ในงานวิจัยนี้			

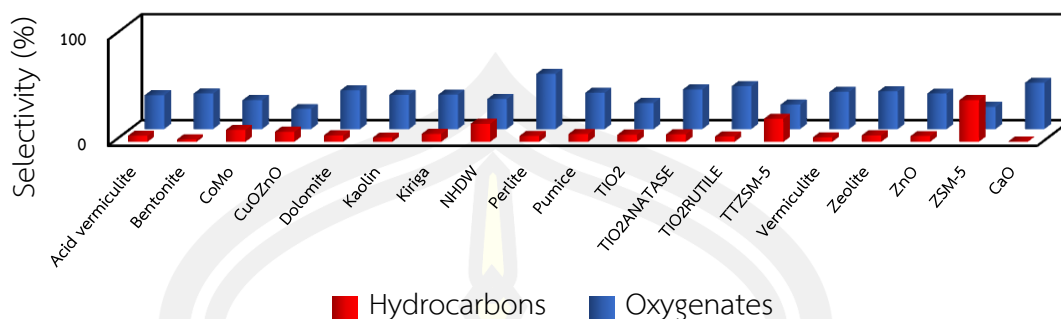
4.2 การไพโรไลซิสในเครื่องไพโรไลซิสแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรมิเตอร์

การศึกษาการไพโรไลซิสในเครื่อง GC/MS โดยใช้ไม้ยางพาราปริมาณ 1.5 มิลลิกรัม ที่มีขนาดอนุภาค 75-150 ไมโครเมตร อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส ใช้คอลัมน์ Ultra-alloy capillary column (30 m - 0.25 mm - 0.25 μ m) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิเตาอบที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที เพิ่มจาก 45 เป็น 320 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 6 องศาเซลเซียสต่อนาที รักษาอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และอัตราการไหลแก๊สฮีเลียมเท่ากับ 1 มิลลิตรต่อนาที ช่วงมวลที่ใช้สำหรับตัวตรวจวัดมวลรวมคือ 40–550 m/z ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 การไพโรไลซิสแบบขั้นตอนเดียว

ผลการไพโรไลซิสแบบเร็วที่มีการใช้อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล ได้แก่ 2:1, 3:1 และ 4:1 พบว่าที่อัตราส่วน 2:1 และ 3:1 อัตราการเกิดของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อใช้อัตราส่วน 4:1 พบว่าอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากถึงประมาณ 3 เท่า ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าและต้องใช้ต้นทุนสูงกว่าถ้าเทียบในเชิงเศรษฐศาสตร์ ดังนั้นการเลือกใช้อัตราส่วน 2:1 จึงเป็นตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้

ผลการไพโรไลซิสแบบหนึ่งขั้นตอนด้วยเครื่อง Py-GC/MS พบว่า ZSM-5, TTZSM-5 และ NHDW มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 39, 22 และ 17 ตามลำดับและมีปริมาณออกซิเจนเนตร้อยละ 21, 23 และ 28 ตามลำดับ ซึ่ง ZSM-5 มีอัตราการเลือกของเบนซีน โทลูอิน และไซลีนร้อยละ 2.30, 2.36 และ 0.01 ตามลำดับดังภาพประกอบ 39

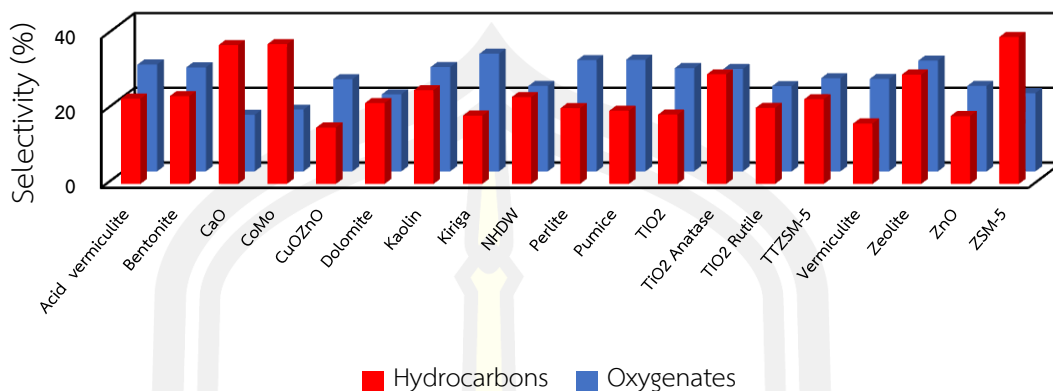


ภาพประกอบ 39 การไพโรไลซิสแบบหนึ่งขั้นตอน

ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 มีปริมาณเบนซีน (benzene) โทลูอีน (toluene) และไซลีน (xylene) มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ (metal oxides) และแร่ธรรมชาติ (natural minerals) เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 จัดอยู่ในกลุ่มของซีโอไลต์ (zeolite) ที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนลิกนินและเซลลูโลสเป็นอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน [47]

4.2.2 การไพโรไลซิสแบบสองขั้นตอน

การไพโรไลซิสแบบเร็วที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนในเครื่อง Py-GC/MS โดยเลือกใช้ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหลักที่มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนสูงจากการทดลองแบบหนึ่งขั้นตอน ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนต่ำกว่า ZSM-5 นำมาเป็นตัวช่วยเสริมเพื่อลดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo และ CaO มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 37.4 และ 37.1 ตามลำดับใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ที่มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 39.3 ดังภาพประกอบ 40 ซึ่ง CoMo มีอัตราการเลือกเกิดของเบนซีนร้อยละ 2.78 โทลูอีนร้อยละ 5.02 และไซลีนร้อยละ 1.16 และ CaO มีอัตราการเลือกเกิดของเบนซีนร้อยละ 1.00 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Co/Mo และ CaO ช่วยลดการเสื่อมสภาพและปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของ ZSM-5 และมีปริมาณไฮโดรคาร์บอนใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ratnasari [48] ที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน เพื่อให้อิมเมกซ์ขนาดใหญ่ของไพโรไลซิสแตกตัวให้มีขนาดเล็กลง โดยผ่านเข้าไปยังตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุน ทำปฏิกิริยากับ ZSM-5 เพื่อเปลี่ยนเป็นโอเลฟินและอะโรมาติกและงานวิจัยของ Linlin Yi [37] ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CaO ช่วยลดปริมาณออกซิเจนในไพโรไลซิส



ภาพประกอบ 40 การไพโรไลซิสแบบสองขั้นตอน

สรุปผลการไพโรไลซิสในเครื่อง Py-GC/MS พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 แบบขั้นตอนเดียวมีปริมาณไฮโดรคาร์บอนสูงที่สุด เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo และ CaO ช่วยลดการเสื่อมสภาพและปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 [38] สามารถนำไปต่อยอดในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองในขั้นต่อไป

4.3 การไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพอง

ศึกษาผลของอุณหภูมิการไพโรไลซิส 400-600 องศาเซลเซียส ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่าปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพและแก๊สลดลง ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ 500-600 องศาเซลเซียส ปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพและไบโอออยล์ลดลงและมีปริมาณแก๊สเพิ่มสูงขึ้น [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิการไพโรไลซิสแบบเร็วที่ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 10 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อน 180 กรัมต่อชั่วโมง

การไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั้งสองส่วนนั้นมีการหมุนวนและไม่หมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ในระบบ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 การไพโรไลซิสแบบเร็ว

ผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชีวภาพมีน้ำหนักเบา

และลักษณะสีดำดังภาพประกอบ 41 ที่ลอยไปกับไอไฟโรไลซิสผ่านชุดไซโคลนเพื่อแยกถ่านชีวภาพให้ตกไปอยู่ในถังเก็บถ่านชีวภาพและชุดกรองไอร้อนเพื่อป้องกันถ่านชีวภาพที่หลุดมาจากชุดไซโคลน ผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือไบโอออยล์มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำและมีความหนืดสูง ส่วนน้ำมีสีเหลืองขุ่น ดังภาพประกอบ 42 ที่ได้จากการควบแน่นด้วยน้ำ ไฟฟ้าสถิต และน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตน และผลิตภัณฑ์แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้

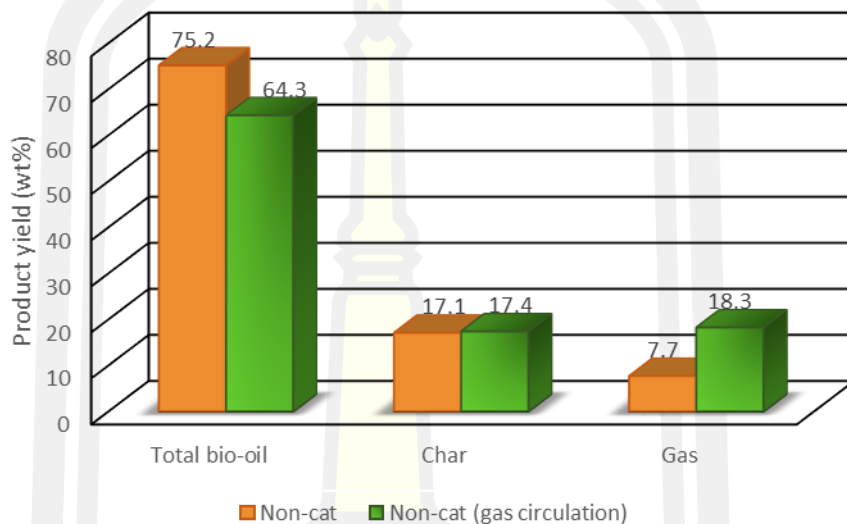


ภาพประกอบ 41 ถ่านชีวภาพ



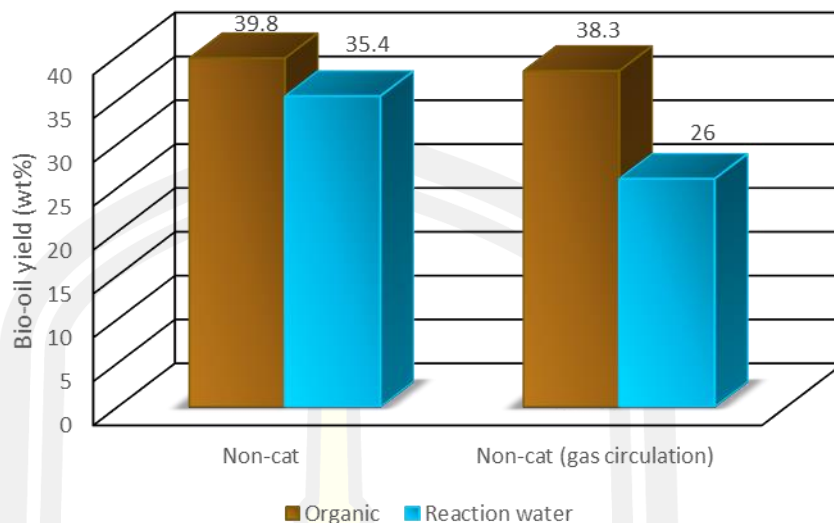
ภาพประกอบ 42 ไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวม (total bio-oil) ถ่านชีวภาพ (char) และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (gas) เท่ากับร้อยละ 75, 17, 8 ตามลำดับดังภาพประกอบ 43 ซึ่งไบโอออยล์รวมแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เฟสหนัก (heavy phase) ร้อยละ 40 และน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยา (aqueous phase) ร้อยละ 35 ดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 43 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส

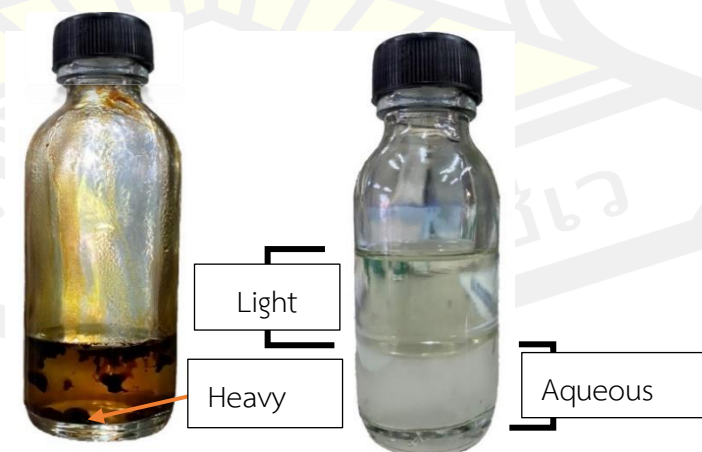
เมื่อหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ในระบบ พบว่าปริมาณผลได้ของน้ำลดลงจากร้อยละ 35 เป็น 26 และแก๊สเพิ่มขึ้นร้อยละ 8 เป็น 18 ซึ่งผลที่ได้แตกต่างจากงานวิจัยของ Mehmet Pala [41] ได้ศึกษาการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สนั้นไม่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์เมื่อเทียบกับการใช้แก๊สไนโตรเจน เนื่องจากมีการป้อนแก๊สกรดอะซิติกผสมเข้ากับผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการไหล 2 ลิตร ต่อนาทีเข้าสู่ระบบด้วย High Performance Liquid Chromatography Pump ที่สามารถควบคุมอัตราการไหลให้คงที่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ปั๊มสุญญากาศในการหมุนวน ส่งผลให้ปั๊มดูดแก๊สเร็วเกินไปทำให้ไโอไพโรไลซิสไม่สามารถควบแน่นได้ทั้งหมดทำให้เกิดแก๊สเป็นส่วนใหญ่และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ถูกป้อนเข้าสู่ระบบโดยทันทีที่ออกจากปั๊ม การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แก๊สไนโตรเจน พบว่าปริมาณไฮโดรเจนและมีเทนเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง [49] ซึ่งการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สช่วยลดการใช้แก๊สไนโตรเจนในระบบ



ภาพประกอบ 44 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมจากกระบวนการไพโรไลซิส

4.3.2 การไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การไพโรไลซิสแบบเร็วใช้อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยาที่ 500 องศาเซลเซียส ความเร็วปฏิกิริยา 0.3 ชั่วโมง⁻¹ และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล 2:1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบไปด้วย ถ่านชีวภาพ โค้ก ไบโอออยล์ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ เฟสหนัก (heavy phase) มีลักษณะสีดำ หนืดสูง และไม่ผสมกับน้ำ เฟสเบา (light phase) มีลักษณะใสและแยกชั้นกับเฟสน้ำ (aqueous phase) ดังภาพประกอบ 45 การไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 45 ไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

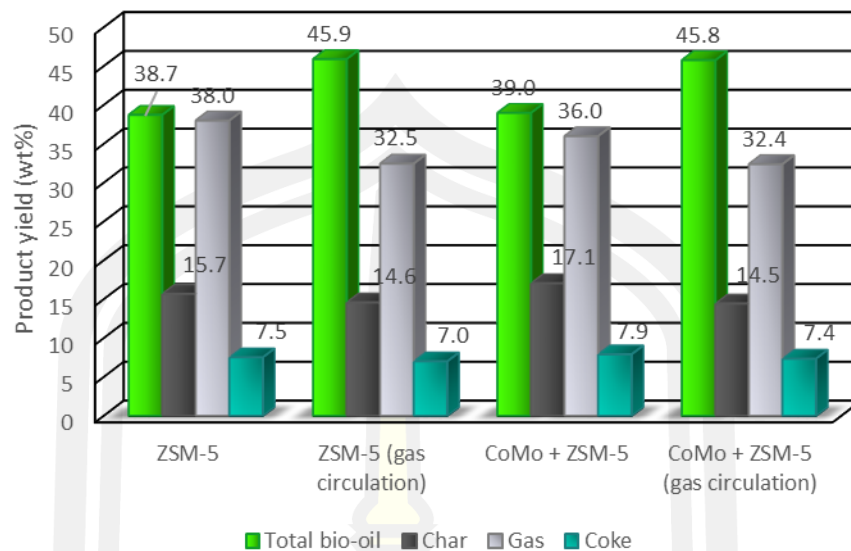
4.3.2.1 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนึ่งขั้นตอน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ ZSM-5 โดยใช้ปริมาณตัวเร่ง 600 กรัม โดยแยกเตาปฏิกรณ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 2 เตา เตาละ 300 กรัม ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมร้อยละ 9 โดยแบ่งเป็นเฟสหนักและเฟสเบาร้อยละ 5.5, 3.5 ตามลำดับ ปริมาณโค้กร้อยละ 7.5 ปริมาณผลได้ของแก๊สและน้ำเพิ่มขึ้นมากกว่ากระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 43, 31 จาก 4, 24 ตามลำดับ เนื่องจากไฮโฟโรไลซิสที่เป็นสารประกอบออกซิเจนทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาเรียกว่า ดีโออกซิเจนเนชัน (deoxygenation) ซึ่งออกซิเจนสามารถเปลี่ยนสภาพเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยปฏิกิริยา decarboxylation แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ด้วยปฏิกิริยา decarbonylation และน้ำ ด้วยปฏิกิริยา dehydration [50]

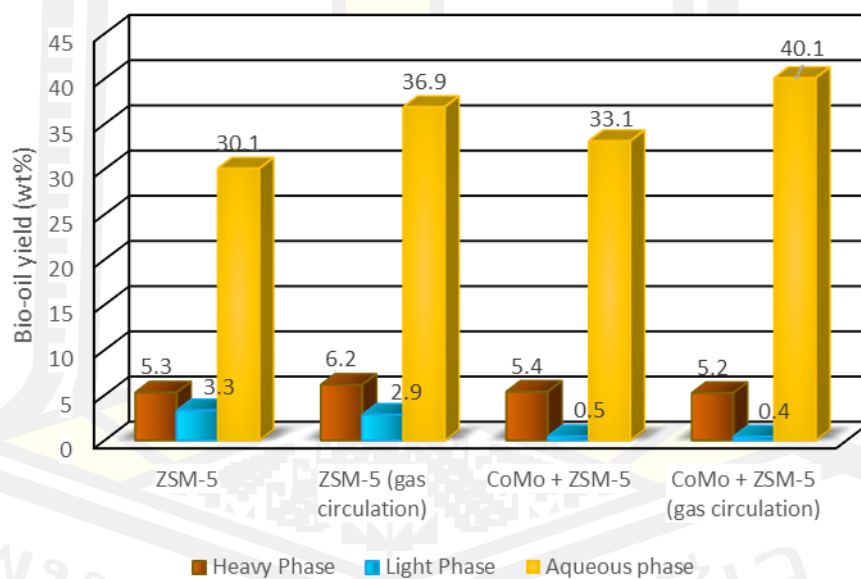
การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณผลได้ของน้ำเพิ่มขึ้น ร้อยละ 38 จาก 31 และแก๊สลดลงร้อยละ 36 จาก 42 ดังภาพประกอบ 46 ซึ่งการหมุนวนผลิตภัณฑ์ แก๊สมีปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์มาก เมื่อหมุนวนกลับมาทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ทำ ปฏิกิริยาในกระบวนการและเกิดปฏิกิริยาดีโออกซิเจนเนชันกับตัวเร่งปฏิกิริยา

4.3.2.2 ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่อยอดจากเครื่อง Py-GC/MS คือ ZSM-5 และ CoMo โดยแยกเตาปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาออกเป็น 2 เตา ในเตาปฏิกรณ์ตัวเร่งปฏิกิริยาแรกใช้ CoMo และ ขั้นที่สองใช้ ZSM-5 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งแต่ละชนิด 300 กรัม รวมเป็น 600 กรัมต่อการทดลอง พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนักร้อยละ 5.6 ไม่แตกต่างกันกับการใช้ตัวเร่งแบบขั้นตอน เดียวร้อยละ 5.5 แต่ในส่วนของเฟสเบาลดลงจากร้อยละ 3.5 เป็น 0.5 ส่งผลให้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 31 เป็นร้อยละ 34 ดังภาพประกอบ 46 การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบบสองขั้นตอน พบปริมาณผลได้ของน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 42 จาก 34 และแก๊สลดลงร้อยละ 36 จาก 41 ดังภาพประกอบ 47



ภาพประกอบ 46 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพประกอบ 47 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมจากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สรุปการไฟโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพองผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์แบ่งออกเป็น 2 เฟส ได้แก่ เฟสหนักร้อยละ 5.5 และเฟสเบาร้อยละ 3.5 ปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพและโค้กร้อยละ 17 และ 7.5 ตามลำดับ ปริมาณผลได้ของแก๊สและน้ำเพิ่มมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 43, 31 จาก 4, 24 ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สมีปริมาณผลได้ของน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 จาก 31 และแก๊สลดลงร้อยละ 36 จาก 42 การไฟโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนโดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co/Mo และ ZSM-5 พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาร้อยละ 5.6 และ 0.5 ตามลำดับ เมื่อหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 42 จาก 34 และแก๊สลดลงร้อยละ 36 จาก 41

4.4 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วแบ่งออกเป็น ถ่านชีวภาพและไบโอออยล์ โดยนำไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 สมบัติของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพองที่มีค่าความร้อนสูง 26 เมกะจูลต่อกิโกรัมดังตาราง 9 ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน ถ่านชีวภาพส่วนใหญ่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูงและสามารถดูดซับไนโตรเจนดีมาก ซึ่งถ่านชีวภาพมีปริมาณรูพรุน (microporosity) เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้แทนปุ๋ยที่ช่วยกักเก็บน้ำ แร่ธาตุ และลดความเป็นกรดของดิน ซึ่งเกษตรกรส่วนใหญ่นำถ่านชีวภาพไปใช้เพื่อการเกษตรเพื่อลดปริมาณการใช้ปุ๋ย

ตาราง 9 สมบัติของถ่านชีวภาพ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)

ความชื้น (moisture)	5.12
สารระเหย (volatile matter)	28.00
คาร์บอนคงที่ ¹ (fixed carbon)	57.67
เถ้า (ash)	9.22

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)

คาร์บอน (C)	72.13
ไฮโดรเจน (H)	4.20
เถ้า (ash)	9.22
ออกซิเจน (O)	14.29
H/C*	0.70
O/C*	0.15
ค่าพลังงานความร้อน (MJ/kg,)	
ค่าพลังงานความร้อนสูง (HHV)	26.05
ค่าพลังงานความร้อนต่ำ (LHV)	25.16
ปริมาณผลได้ทางพลังงาน (%)	23

*สูตรโมเลกุล $\text{CH}_{1.43}\text{O}_{0.75}$ ของถ่านชีวภาพ

4.4.2 สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีของไบโอออยล์

ไบโอออยล์ที่ได้จากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบพอง โดยนำไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุด้วยเครื่องวิเคราะห์ CHNO และวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี/แมสสเปกโตรเมตรี โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.2.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์

ผลการวิเคราะห์ไบโอออยล์พบว่าการไพโรไลซิสแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสเบาน้อยมากและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo ร่วมกับ ZSM-5 ส่งผลให้ได้ปริมาณเฟสหนักน้อยมาก การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สส่งผลให้ปริมาณค่าความร้อนลดลง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo ร่วมกับ ZSM-5 ส่งผลให้ปริมาณค่าความร้อนสูงลดลงเมื่อเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 เพียงขั้นตอนเดียวดังตาราง 10

ตาราง 10 สมบัติของไบโอออยล์

Properties	Bio-oil							
	Heavy phase				Light phase			
	Non cat	Non cat (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	ZSM-5+CoMo	ZSM-5+CoMo (gas)*
Ultimate analysis (wt%)								
Carbon	47.6	34.5	81.5	71.9	88.5	88.1	87.3	61.9
Hydrogen	7.02	8.2	7.38	7.71	8.97	8.95	8.87	9.51
Nitrogen	0.24	0.11	0.04	0.07	0	0	0	0
Oxygen*	45.14	57.19	11.08	20.32	2.53	2.95	3.83	28.59
Heating value (MJ/Kg)								
High heating value	19.92	17.02	29.72	27.24	32.76	32.64	32.36	25.63
Low heating value	16.18	12.65	25.79	23.13	27.98	27.87	27.63	20.56
Energy yield (%)	51.06	42.12	9.10	9.70	6.32	5.38	0.79	0.69
Water content (wt%)	22	51	<0.002					

(gas)* Gas circulation, *Calculated by difference

ผลของไบโอออยล์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เฟสหนัก มีค่าความร้อนสูง 29 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเฟสเบา ค่าความร้อนสูง 32 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่าเฟสหนักมีค่าความร้อนสูงลดลงเป็น 27 และเฟสเบา มีค่าความร้อนสูงไม่แตกต่างจากการไม่หมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊ส ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้ Co/Mo และ ZSM-5 พบว่าไบโอออยล์เฟสเบา มีค่าความร้อนสูง 32 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเมื่อหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สส่งผลให้ค่าความร้อนสูงลดลงเหลือ 25 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ปริมาณน้ำในไบโอออยล์ต่ำ

4.4.2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบโอออยล์

ผลขององค์ประกอบทางเคมีของไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสและที่ได้จากกระบวนการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สมีปริมาณของเบนซีนร้อยละ 2.3 และ 14.6 ตามลำดับ ผลการ

ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 พบว่าเฟสเบาามีปริมาณเบนซีนและโทลูอินร้อยละ 17.8 และ 52.2 ตามลำดับ เมื่อหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สส่งผลให้ปริมาณเบนซีน โทลูอิน และไซลีนเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 19.4, 53.6 และ 15.3 ตามลำดับ ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ 2 ขั้นตอน โดยใช้ Co/Mo และ ZSM-5 พบว่าเฟสเบาามีปริมาณเบนซีน โทลูอิน และไซลีนร้อยละ 24.6, 55.1 และ 12.1 ตามลำดับ เมื่อหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สส่งผลให้ปริมาณเบนซีนและโทลูอินลดลงเป็นร้อยละ 21.8 และ 55.2 ตามลำดับดังตาราง 11

ตาราง 11 องค์ประกอบทางเคมีของไบโอออยล์

RT	name	Peak area (%)							
		Heavy phase				Light phase			
		Non cat	Non cat (gas) *	ZSM- 5	ZSM-5 (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	CoMo+ ZSM-5	CoMo+ ZSM-5 (gas)*
Acids		12.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.8751	Acetic acid	12.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.7116	Propanoic acid	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5.0419	Propanoic acid, 2-oxo-, methyl ester	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aldehyde		1.24	2.12	0.66	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
4.6302	3-Hydroxypropanal	0.49	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4.8705	Butanedial	0.74	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.1958	3-Furaldehyde	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26.0967	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	0.00	1.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38.3965	Benz[a]anthracene	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40.0694	Benz[a]anthracene, 7-methyl-	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
41.5112	Benz(a)anthracene, 4,7-dimethyl-	0.00	0.00	0.31	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
41.8037	Benz(a)anthracene, 8,12-dimethyl-	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Alkene		0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.8519	2-Butanone	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

RT	name	Peak area (%)							
		Heavy phase				Light phase			
		Non cat	Non cat (gas) *	ZSM- 5	ZSM-5 (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	CoMo+ ZSM-5	CoMo+ ZSM-5 (gas)*
Cycloalkene		0.00	0.00	0.00	1.27	0.00	0.00	0.00	0.00
11.4261	D-Limonene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29.8168	Hexane, 3-methyl-	0.00	0.00	0.00	1.27	0.00	0.00	0.00	0.00
Furans		0.00	0.00	1.11	1.68	0.00	0.00	0.00	0.00
6.1392	Furfural	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.5710	2(3H)-Furanone	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.1547	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.6261	Benzofuran	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
13.3893	Benzofuran, 7-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
13.6556	Benzofuran, 2-methyl-	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
16.1864	Benzofuran, 4,7-dimethyl-	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
23.0741	Dibenzofuran	0.00	0.00	0.65	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
25.6169	Dibenzofuran, 4-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
33.7143	Benzo[b]naphtho[2,3-d]furan	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
35.2809	11H-Benzo[b]fluorene	0.00	0.00	0.23	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00
42.4566	Benzo[k]fluoranthene	0.00	0.00	0.00	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00
43.4538	Benzo[e]pyrene	0.00	0.00	0.07	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
47.2122	Benzo[ghi]perylene	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Hydrocarbons		8.49	1.54	1.94	1.94	4.25	3.40	2.39	0.33
2.8151	1,3-Cyclohexadiene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
4.3341	1,3,5-Cycloheptatriene	8.49	1.54	1.21	1.20	3.72	2.64	2.36	0.00
11.5986	Indane	0.00	0.00	0.65	0.60	0.49	0.74	0.00	0.29
11.9146	Indene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00
15.5997	Azulene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
36.8031	o-Terphenyl	0.00	0.00	0.08	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00

RT	name	Peak area (%)							
		Heavy phase				Light phase			
		Non cat	Non cat (gas) *	ZSM- 5	ZSM-5 (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	CoMo+ ZSM-5	CoMo+ ZSM-5 (gas)*
Indenes		0.26	0.43	8.41	1.75	0.00	0.11	0.00	0.05
14.3705	1H-Indene, 2,3-dihydro-5-methyl-	0.00	0.00	1.15	0.84	0.00	0.05	0.00	0.05
14.6632	2-Methylindene	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
16.7242	1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro-3-methyl-	0.00	0.00	0.06	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
17.1472	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl-	0.00	0.00	0.29	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
17.2815	1H-Indene, 1,3-dimethyl-	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.9107	1H-Indene, 2,3-dihydro-4,7-dimethyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.0583	1,2,3-Trimethylindene	0.00	0.00	0.64	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
20.1969	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-	0.00	0.00	5.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.7999	1,2,3-Trimethoxybenzene	0.26	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.0272	1H-Phenylene	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ketone		2.67	6.19	0.33	0.38	0.05	0.08	0.00	0.00
2.7282	Cyclopentane, methyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00
2.8910	Cyclohexene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00
3.1361	2-Propanone, 1-hydroxy-	2.56	2.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3.3464	Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
4.5621	1-Hydroxy-2-butanone	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.1432	2-Cyclopenten-1-one	0.11	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7.0994	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.1181	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8.3834	Butyrolactone	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9.8810	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11.9332	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

RT	name	Peak area (%)							
		Heavy phase				Light phase			
		Non cat	Non cat (gas) *	ZSM- 5	ZSM-5 (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	CoMo+ ZSM-5	CoMo+ ZSM-5 (gas)*
22.3847	Acenaphthene	0.00	0.00	0.45	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00
22.5820	1,1'-Biphenyl, 4-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00
23.6626	4,6,8-Trimethylazulene	0.00	0.00	0.05	0.41	0.00	0.00	0.00	0.00
24.3966	Fluorene	0.00	0.00	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
24.8656	1,1'-Biphenyl, 2-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00
25.4163	[1,1'-Biphenyl]-4-carboxaldehyde	0.00	0.00	0.14	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
25.7099	9H-Xanthene	0.00	0.00	0.15	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00
26.1620	Anthracene, 9,10-dihydro-	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
26.5416	9H-Fluorene, 1-methyl-	0.00	0.00	0.27	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00
26.9025	9H-Fluorene, 2-methyl-	0.00	0.00	0.32	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
27.3545	9H-Fluorene, 9-methyl-	0.00	0.00	0.74	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00
27.5357	9H-Fluorene, 4-methyl-	0.00	0.00	0.00	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00
28.2654	Phenanthrene	0.00	0.00	0.06	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00
28.2709	Anthracene	0.00	0.00	0.13	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
30.3117	Phenanthrene, 2-methyl-	0.00	0.00	0.12	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00
31.1527	Anthracene, 9-methyl-	0.00	0.00	0.11	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
31.9128	Phenanthrene, 3,6-dimethyl-	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32.0056	Phenanthrene, 2,5-dimethyl-	0.00	0.00	0.10	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
32.0947	Phenanthrene, 1,7-dimethyl-	0.00	0.00	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
32.4090	Phenanthrene, 2,7-dimethyl-	0.00	0.00	0.18	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
32.5994	Phenanthrene, 2,3-dimethyl-	0.00	0.00	0.05	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
33.1541	Phenanthrene, 2-ethyl-	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33.2058	Phenanthrene, 4,5-dimethyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33.5586	Pyrene	0.00	0.00	0.06	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
33.8033	Anthracene, 9-ethenyl-	0.00	0.00	0.36	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00

RT	name	Peak area (%)							
		Heavy phase				Light phase			
		Non cat	Non cat (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	CoMo+ ZSM-5	CoMo+ ZSM-5 (gas)*
34.1509	Phenanthrene, 2,3,5-trimethyl-	0.00	0.00	0.35	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00
35.3363	Pyrene, 1-methyl-	0.00	0.00	0.22	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00
36.7291	Pyrene, 1,3-dimethyl-	0.00	0.00	0.22	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00
38.4024	Triphenylene	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00
38.5509	Chrysene	0.00	0.00	0.10	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
39.8408	Chrysene, 1-methyl-	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
40.3985	9H-Cyclopenta[a]pyrene	0.00	0.00	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
Phenols		0.71	1.23	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
12.4739	Phenol, 2-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
12.4748	Phenol, 4-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.1012	Phenol, 3-methyl-	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
13.2459	Phenol, 2-methoxy-	0.14	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13.7034	Phenol, 2,6-dimethyl-	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
15.7103	Phenol, 3,5-dimethyl-	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
16.0817	Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	0.02	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17.9848	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18.9268	2-Methoxy-4-vinylphenol	0.04	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.6617	Phenol, 2,6-dimethoxy-	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.8115	Eugenol	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.9286	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.9174	Vanillin	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.9341	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (E)-	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21.7654	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23.4760	5-tert-Butylpyrogallol	0.09	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

RT	name	Peak area (%)							
		Heavy phase				Light phase			
		Non cat	Non cat (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	ZSM-5	ZSM-5 (gas)*	CoMo+ ZSM-5	CoMo+ ZSM-5 (gas)*
26.6714	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	0.06	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28.3043	Desaspidinol	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Other Hydrocarbon compounds		0.02	0.16	0.66	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00
24.2164	3',5'-Dimethoxyacetophenone	0.02	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27.0867	(E)-Stilbene	0.00	0.00	0.19	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
28.6672	4-Phenanthrenol, 1,2,3,4-tetrahydro-4-methyl-	0.00	0.00	0.11	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
36.2115	2H-Phenanthro[9,10-b]pyran	0.00	0.00	0.36	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00
Identifide peak area		28.05	27.18	51.04	26.84	75.82	93.78	94.69	77.79
Unidentifide peak area		71.95	72.82	48.96	73.16	24.18	6.22	5.31	22.21

(gas)* Gas circulation



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การสรุปผลการทดลองของงานวิจัยและอภิปรายผล โดยเนื้อหาในบทนี้ได้สรุปผลการทดลองในบทที่ 4 เพื่อให้เข้าใจผลการวิจัยที่ผ่านมาได้ง่าย นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอแนะและทิศทางการต่อยอดของงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่อง Py-GC/MS โดยใช้ไม้ยางพาราแบ่งออกเป็น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนึ่งและสองขั้นตอน โดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด 19 ชนิด ได้แก่ ดังต่อไปนี้ ซีเอสเอ็มไฟว์, เอ็นเอชดีดับเบิลยู, ซิงค์ออกไซด์, คอปเปอร์ออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์, ซีเอสเอ็มไฟว์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำ, ไทเทเนียมไดออกไซด์ (อนาเทส), ไทเทเนียมไดออกไซด์ (รูไทล์), โคบอลต์/โมลิบดีนัม, ดินขาวเคโอลิน, ดินเบนโทไนท์, หินศิรี้ก้า, โดโลไมต์, พัมมิส, เพอร์ไลท์, เวอร์มิคูไลต์, เวอร์มิคูไลต์กระตุ้นด้วยกรด, ซีโอไลต์ และแคลเซียมออกไซด์ พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนึ่งขั้นตอนของ ZSM-5 ในอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวลเท่ากับ 2:1 ให้ปริมาณผลไฮโดรคาร์บอนสูงที่สุด ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co/Mo และ CaO มาเป็นตัวช่วยเสริม ZSM-5 ส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรคาร์บอนมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ชนิดเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co/Mo และ CaO ช่วยลดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5

การไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบพอง โดยอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสม 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 10 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อน 180 กรัมต่อชั่วโมง มีปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ไบโอออยล์ร้อยละ 45 ถ่านชีวภาพร้อยละ 17 และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ร้อยละ 4 เมื่อนำผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ในระบบอีกครั้ง พบว่าปริมาณผลได้น้ำตาลลดลงจากร้อยละ 24 เป็น 17 และแก๊สเพิ่มขึ้นร้อยละ 4 เป็น 13

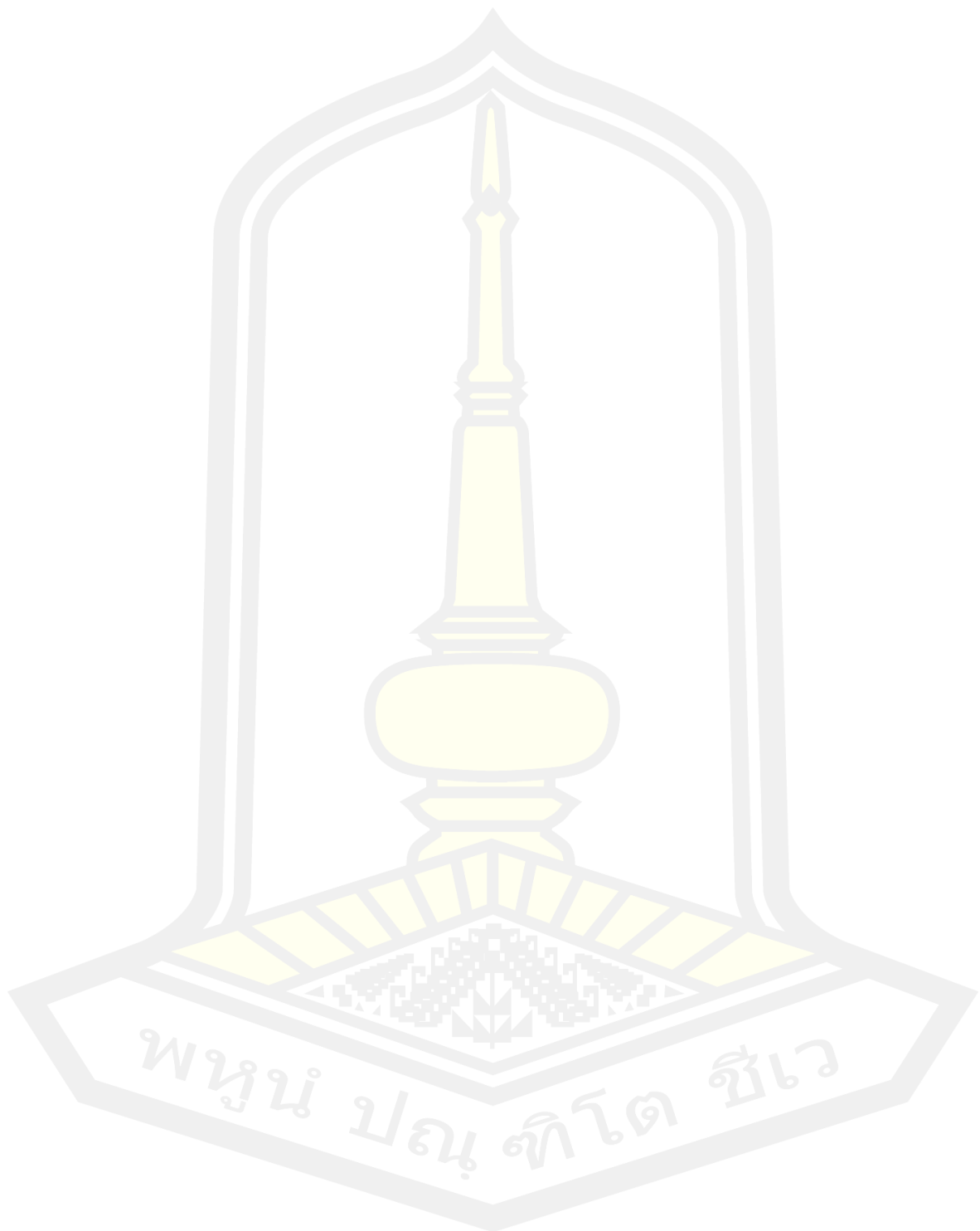
การไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส ความเร็วปริภูมิ 0.3 ชั่วโมง⁻¹ อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและชีวมวลเท่ากับ 2:1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ 600 กรัม ผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์แบ่งออกเป็น 2 เฟส ได้แก่ เฟสหนักร้อยละ 5.5 และเฟสเบาร้อยละ 3.5 ปริมาณผลได้ของถ่านชีวภาพและไคกร้อยละ 17 และ 7.5 ตามลำดับ ปริมาณผลได้ของแก๊สและน้ำเพิ่มมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 43, 31 จาก 4, 24 ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาไดออกซิเจนชัน การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สมีปริมาณผลได้ของน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 38 จาก 31 และแก๊สลดลงร้อยละ 36 จาก 42 การไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนโดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co/Mo และ ZSM-5 ที่สอดคล้องกับผลของ Py-GC/MS พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาร้อยละ 5.6 และ 0.5 ตามลำดับ เมื่อหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สพบว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 42 จาก 34 และแก๊สลดลงร้อยละ 36 จาก 41

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สในระบบต้องให้เป็นระบบสุญญากาศและต้องไม่ให้ออกซิเจนเข้าไปในระบบได้ เพื่อป้องกันการเผาไหม้ในระบบอาจส่งผลกระทบต่อในส่วนของปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์
2. การหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สไม่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของไบโอออยล์และถ่านชีวภาพ แต่ช่วยลดการใช้ปริมาณไนโตรเจน
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ยังมีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ค่อนข้างน้อย ควรมีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นที่มีราคาถูกและหาได้ง่าย เพื่อลดต้นทุนการผลิต
4. การนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปปรับปรุงสมบัติทางเคมีเพื่อเพิ่มปริมาณรพูนของตัวเร่งปฏิกิริยา
5. การวิเคราะห์ผลของการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ในระบบ เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาในการหมุนวนผลิตภัณฑ์แก๊สกลับมาใช้ใหม่ที่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

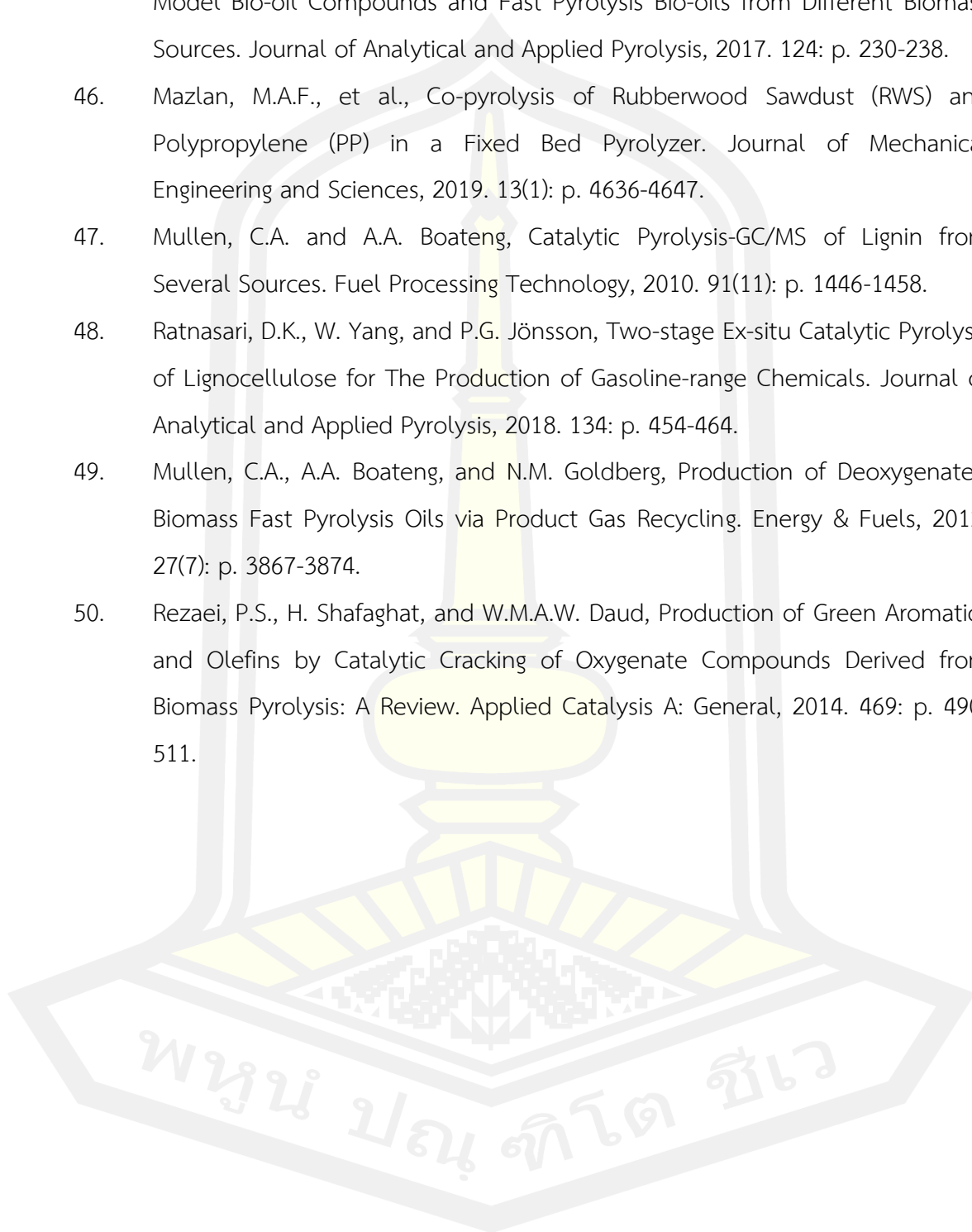
1. Bridgwater, A.V., Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading. Biomass and Bioenergy, 2012. 38: p. 68-94.
2. Duanguppama, K., N. Suwapaet, and A. Pattiya, Fast Pyrolysis of Contaminated Sawdust in a Circulating Fluidised Bed Reactor. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016. 118: p. 63-74.
3. Pattiya, A., et al., Effects of Heat Transfer Media on Bio-Oil Yiled from Sugarcane Leaves. Burapha Science Journal, 2017. 22: p. 168-175.
4. Du, B., et al., Gas and Solids Mixing in a Turbulent Fluidized Bed. AIChE Journal, 2002. 48(9): p. 1896-1909.
5. Mazlan, M.A.F., et al., Fast Pyrolysis of Hardwood Residues Using a Fixed Bed Drop-type Pyrolyzer. Energy Conversion and Management, 2015. 98: p. 208-214.
6. Wongsiriwittaya, M. and A. Pattiya, Bio-Oil from Catalytic Fast Pyrolysis of Sugarcane Leaves and Topsin a Bubbling Fluidised Bed Reactor. SWU Enginerring Journal, 2017. 12: p. 114-126.
7. Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications. 2018, The Officers' Mess Business Centre, Royston Road, Duxford, CB22 4QH, United Kingdom 50 Hampshire Street, 5th Floor, Cambridge, MA 02139, United States The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, United Kingdom: Joe Hayton.
8. Heracleous, E., et al., Characterization of Deactivated and Regenerated Zeolite ZSM-5-based Catalyst Extrudates Used in Catalytic Pyrolysis of Biomass. Journal of Catalysis, 2019. 380: p. 108-122.
9. Khannam, K., S. Inthidech, and A. Pattiya, Influence of Product Gas Recycle on Yields and Properties of Bio-oil from Fast Pyrolysis of Leucaena leucocephala. Science and Technology Mahasarakham University, 2013. 32: p. 510-515.
10. Zhang, J., et al., The Pyrolysis Gas Recirculation of Biomass Fast Pyrolysis. BioTechnology: An Indian Journal, 2012. 6: p. 6-11.

11. Mante, O.D., et al., The Influence of Recycling Non-condensable Gases in The Fractional Catalytic Pyrolysis of Biomass. *Bioresource Technology*, 2012. 111: p. 482-490.
12. Tumuluru, J.S., et al., A Review on Biomass Torrefaction Process and Product Properties for Energy Applications. *Industrial Biotechnology*, 2011. 7: p. 384-401.
13. Chen, W.-H., et al., An Evaluation on Improvement of Pulverized Biomass Property for Solid Fuel Through Torrefaction. *Applied Energy*, 2011. 88(11): p. 3636-3644.
14. McKendry, P., Energy Production from Biomass (part 1): Overview of Biomass. *Bioresource Technology*, 2002. 83(1): p. 37-46.
15. Pattiya, A., Thermochemical Characterization of Agricultural Wastes from Thai Cassava Plantations. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2011. 33(8): p. 691-701.
16. รายงานผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตอ้อยและน้ำตาลทรายของโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ. 2561, สำนักบริหารอ้อยและน้ำตาลทราย. p. 1-2.
17. เนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของข้าว. 2560, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
18. รายงานสภาวะอุตสาหกรรมผลิตภัณท์ยางและไม้ยางพาราของไทย. 2018, สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม ร่วมกับ สถาบันพลาสติก. p. 9.
19. มันสำปะหลัง. 2560, กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์.
20. แบบแสดงรายการข้อมูลประจำปี 2560. 2560, บริษัท สหอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) p. 13.
21. ร้อยละและปริมาณผลผลิตจากการเก็บเกี่ยวของข้าวโพดหวาน. 2560, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
22. เนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. 2560, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร.
23. Palangkaset.com, Rubberwood, Rubberwood, Editor. 2017.
24. pattiya, a., Biofuel Production Technologies. 2018, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม: 1. 311.

25. Jourabchi, S.A., S. Gan, and H.K. Ng, Comparison of Conventional and Fast Pyrolysis for The Production of Jatropha Curcas Bio-oil. *Applied Thermal Engineering*, 2016. 99: p. 160-168.
26. Bridgwater, A.V., D. Meier, and D. Radlein, An Overview of Fast Pyrolysis of Biomass. *Organic Geochemistry*, 1999. 30(12): p. 1479-1493.
27. Boonsombut, N. and A. Pattiya, Effect of Natural Catalysts in Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Free-Fall Reactor. *SWU Engineering Journal*, 2017. 12: p. 1-11.
28. Gautam, R. and R. Vinu, Non-catalytic Fast Pyrolysis and Catalytic Fast Pyrolysis of *Nannochloropsis Oculata* using Co-Mo/V-Al₂O₃ Catalyst for Valuable Chemicals. *Algal Research*, 2018. 34: p. 12-24.
29. Remón, J., et al., Production of Gaseous and Liquid Bio-fuels from The Upgrading of Lignocellulosic Bio-oil in Sub and Supercritical Water: Effect of Operating Conditions on The Process. *Energy Conversion and Management*, 2016. 119: p. 14-36.
30. Azeez, A.M., et al., Fast Pyrolysis of African and European Lignocellulosic Biomasses Using Py-GC/MS and Fluidized Bed Reactor. *Energy & Fuels*, 2010. 24(3): p. 2078-2085.
31. Shariff, A., R. Hakim, and N. Abdullah, Rubber Wood as a Potential Biomass Feedstock for Biochar via Slow Pyrolysis. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 2016. International Science Index 120, 2016: p. 120.
32. ณัฐพันธ์ พรหมสำเภา, อติศักดิ์ ปัตติยะ, Effect of ZSM-5 Catalyst Regeneration in Fast Pyrolysis of *Leucaena Leucocephala* on Yields and Properties of Bio-oil. *Energy network of thailand* 13, 2560.
33. มนตรี วงศ์ศิริวิทยา, ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของใบและยอดอ้อยในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดแบบฟองต่อปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์. 2560, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
34. Meesuk, S., et al., Fast Pyrolysis of Rice Husk in a Fluidized Bed: Effects of the Gas Atmosphere and Catalyst on Bio-oil with a Relatively Low Content of Oxygen. *Energy & Fuels*, 2011. 25(9): p. 4113-4121.

35. Ro, D., et al., Production of an Upgraded Lignin-derived Bio-oil using The Clay Catalysts of Bentonite and Olivine and The Spent FCC in a Bench-scale Fixed Bed Pyrolyzer. *Environ Res*, 2019. 172: p. 658-664.
36. Ro, D., et al., Bench Scale Catalytic Fast Pyrolysis of Empty Fruit Bunches Over Low Cost Catalysts and HZSM-5 using a Fixed Bed Reactor. *Journal of Cleaner Production*, 2018. 176: p. 298-303.
37. Yi, L., et al., Catalytic Pyrolysis of Biomass Wastes Over Org-CaO/Nano-ZSM-5 to Produce Aromatics: Influence of Catalyst Properties. *Bioresour Technol*, 2019. 294: p. 122186.
38. Yang, M., et al., Enhancing The Production of Light Olefins and Aromatics from Catalytic Fast Pyrolysis of Cellulose in a Dual-catalyst Fixed Bed Reactor. *Bioresour Technol*, 2019. 273: p. 77-85.
39. Jung, S.-H., B.-S. Kang, and J.-S. Kim, Production of Bio-oil from Rice Straw and Bamboo Sawdust Under Various Reaction Conditions in a Fast Pyrolysis Plant Equipped with a Fluidized Bed and a Char Separation System. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2008. 82(2): p. 240-247.
40. Heo, H.S., et al., Fast Pyrolysis of Rice Husk Under Different Reaction Conditions. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2010. 16(1): p. 27-31.
41. Pala, M., et al., Recycling of Product Gas Does Not Effect Fast Pyrolysis Oil Yield and Composition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2020. 148.
42. Giah, M., et al., Synthesis of CuO/ZnO Nanoparticles and Their Application for Photocatalytic Degradation of Lidocaine HCl by the Trial-and-error and Taguchi Methods. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 2013. 34.
43. Widiarti, N., J.K. Sae, and S. Wahyuni, Synthesis CuO-ZnO Nanocomposite and its Application as an Antibacterial Agent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017. 172: p. 012036.
44. Aho, A., et al., Catalytic Upgrading of Woody Biomass Derived Pyrolysis Vapours Over Iron Modified Zeolites in a Dual-fluidized Bed Reactor. *Fuel*, 2010. 89(8): p. 1992-2000.

45. Staš, M., et al., Application of Orbitrap Mass Spectrometry for Analysis of Model Bio-oil Compounds and Fast Pyrolysis Bio-oils from Different Biomass Sources. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017. 124: p. 230-238.
46. Mazlan, M.A.F., et al., Co-pyrolysis of Rubberwood Sawdust (RWS) and Polypropylene (PP) in a Fixed Bed Pyrolyzer. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 2019. 13(1): p. 4636-4647.
47. Mullen, C.A. and A.A. Boateng, Catalytic Pyrolysis-GC/MS of Lignin from Several Sources. *Fuel Processing Technology*, 2010. 91(11): p. 1446-1458.
48. Ratnasari, D.K., W. Yang, and P.G. Jönsson, Two-stage Ex-situ Catalytic Pyrolysis of Lignocellulose for The Production of Gasoline-range Chemicals. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018. 134: p. 454-464.
49. Mullen, C.A., A.A. Boateng, and N.M. Goldberg, Production of Deoxygenated Biomass Fast Pyrolysis Oils via Product Gas Recycling. *Energy & Fuels*, 2013. 27(7): p. 3867-3874.
50. Rezaei, P.S., H. Shafaghat, and W.M.A.W. Daud, Production of Green Aromatics and Olefins by Catalytic Cracking of Oxygenate Compounds Derived from Biomass Pyrolysis: A Review. *Applied Catalysis A: General*, 2014. 469: p. 490-511.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายปรีชา แนวจำปา
วันเกิด วันที่ 20 มิถุนายน พ.ศ. 2538
สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 81 หมู่ที่ 6 บ้านเหล่ากลาง ตำบลหนองใหญ่ อำเภอศรีสมเด็จ
จังหวัดร้อยเอ็ด รหัสไปรษณีย์ 45000
ประวัติการศึกษา
พ.ศ. 2553 มัธยมศึกษาตอนต้น
โรงเรียนพลาญชัยพิทยาคม จังหวัดร้อยเอ็ด
พ.ศ. 2556 มัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนพลาญชัยพิทยาคม จังหวัดร้อยเอ็ด
พ.ศ. 2560 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.)
สาขาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

