



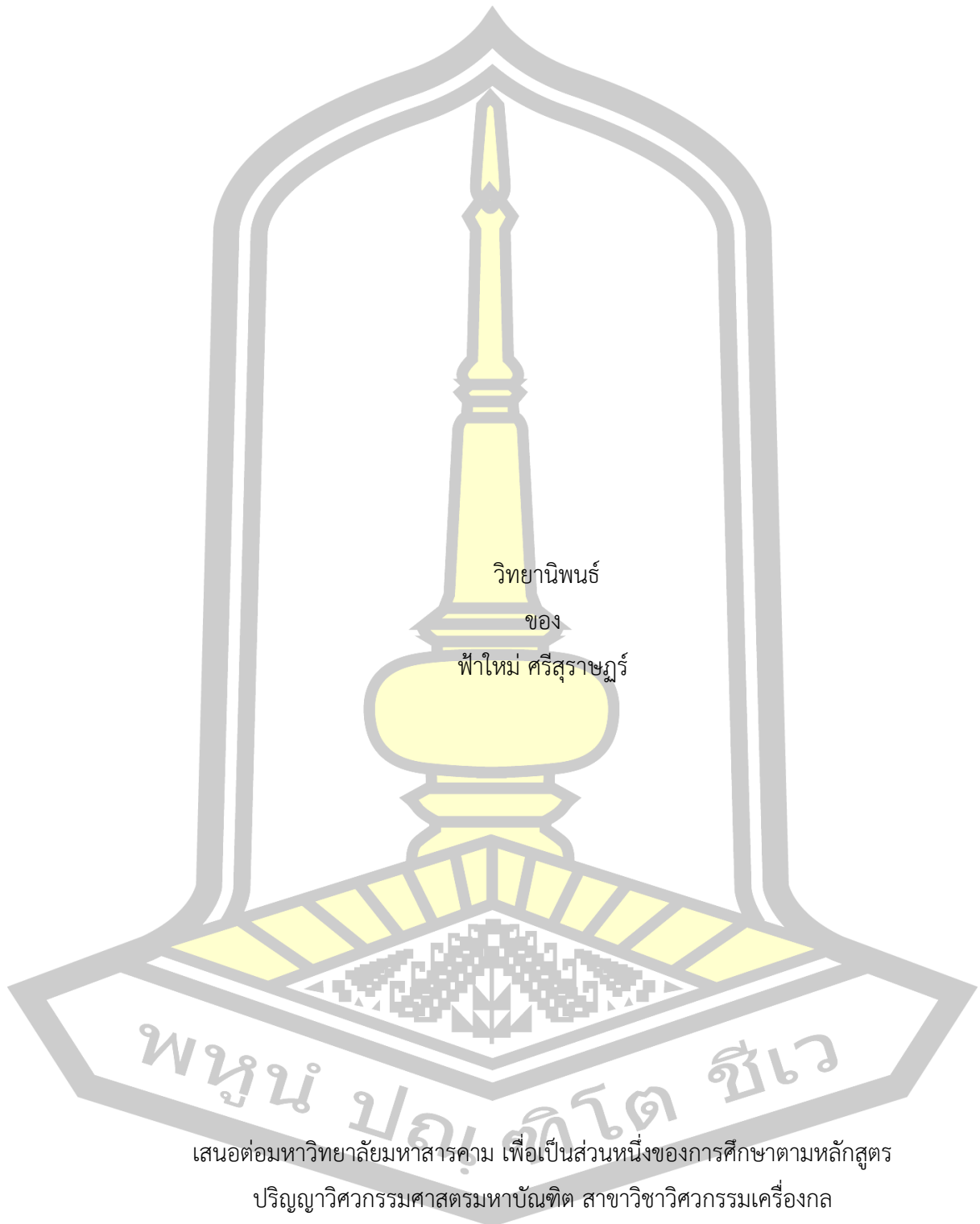
การไฟโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

วิทยานิพนธ์
ของ
ฟ้าใหม่ ศรีสุราษฎร์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
กุมภาพันธ์ 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การไฟโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น



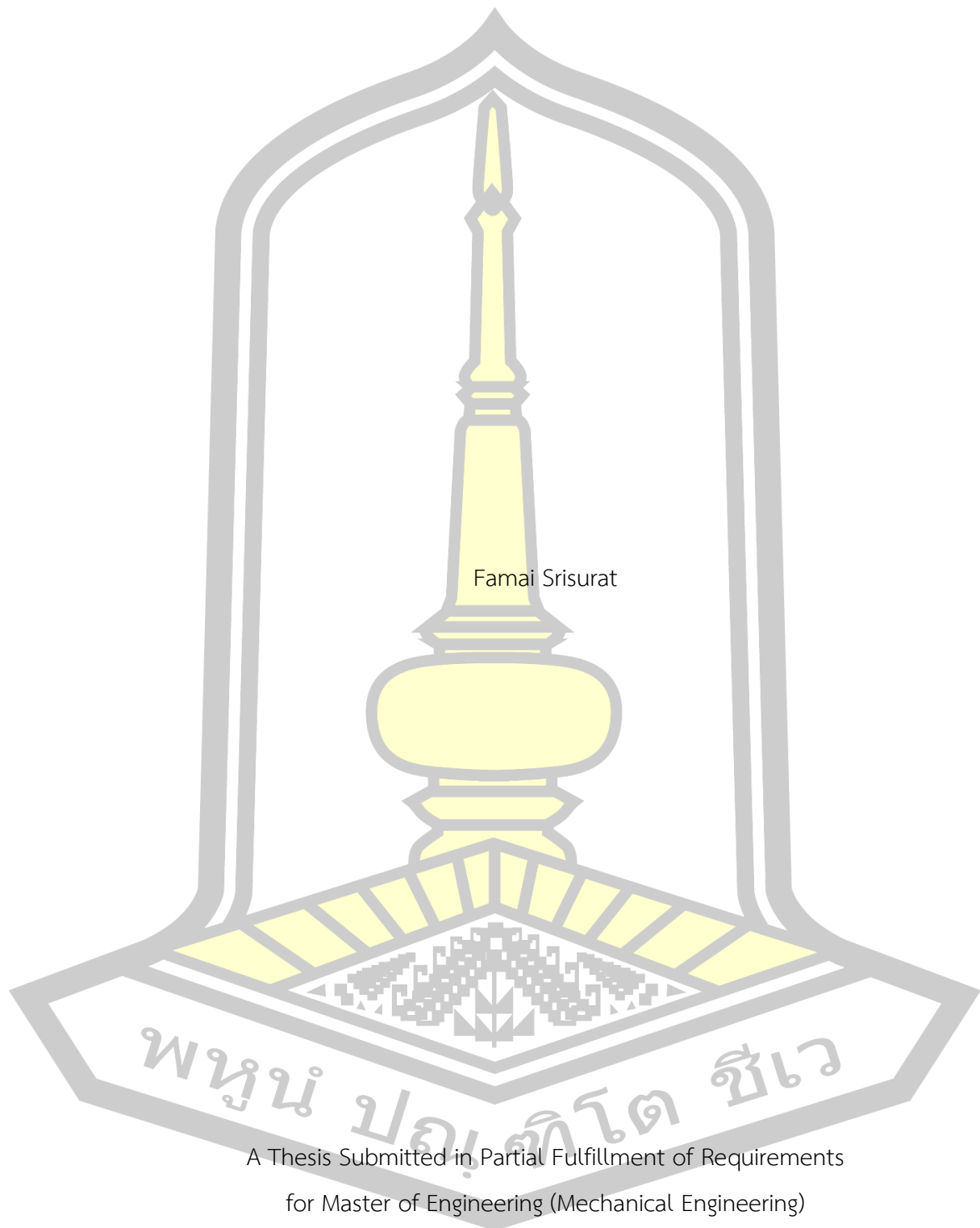
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

กุมภาพันธ์ 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Catalytic Pyrolysis of Biomass in a Vibrating Reactor



Famai Srisurat

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

February 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายฟ้าใหม่ ศรีสุราษฎร์
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร. นวรงค์ ชลคุป)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. อธิวัฒน์ ชมภูคำ)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ยศฐา ศรีเทพ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

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

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง การไฟโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น
ผู้วิจัย ฟ้าใหม่ ศรีสุราษฎร์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2564

บทคัดย่อ

การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเร็วเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผลิตไบโอออยล์ที่มีปริมาณผลได้สูงและคุณภาพสูง โดยมีถ่านชาร์และแก๊สเป็นผลพลอยได้ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดเบดแบบพองเป็นที่รู้จักกันดีว่ามีการใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อวัตถุประสงค์นี้ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวกลางถ่ายโอนความร้อน เช่น ทRAY และความจำเป็นที่ต้องใช้การไหลของแก๊สพาที่สูงเป็นข้อด้อยหลักของระบบนี้ อนุภาคทรายละเอียดสามารถเคลื่อนที่จากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังถังเก็บถ่านชาร์ ทำให้ไม่สามารถผลิตถ่านชาร์ที่ปราศจากการปนเปื้อนได้ ซึ่งถ่านชาร์นี้สามารถอัพเกรดเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีมูลค่าสูงได้ การไหลของแก๊สพาทำให้ประสิทธิภาพทางความร้อนและการควบแน่นลดลง ข้อบกพร่องถูกแก้ไขในงานวิจัยที่ผ่านมาโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระที่อนุภาคชีวมวลตกลงมาในแนวตั้งจากด้านบนลงด้านล่างในขณะที่ถูกไฟโรไลซิสไปพร้อม ๆ กัน อย่างไรก็ตามการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่อาศัยการพาความร้อนและบางส่วนอาศัยการนำความร้อนจากผนังเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบใหม่เพื่อควบคุมให้อนุภาคชีวมวลมีการไฟโรไลซิสในแนวนอนโดยรับความร้อนด้วยการนำความร้อนเป็นส่วนใหญ่ไปพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่ด้วยการสั่นสะเทือนไปตามเครื่องปฏิกรณ์ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์นี้ถูกนำมาใช้ในการไฟโรไลซิสชีวมวลแบบรวดเร็วเป็นครั้งแรก จำเป็นต้องมีการศึกษาตัวแปรของกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ ลักษณะเครื่องปฏิกรณ์(ทรงกระบอกหรือทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า) อุณหภูมิไฟโรไลซิส (450-525 องศาเซลเซียส) อนุภาคชีวมวล (0.2-2.0 มิลลิเมตร) อัตราการป้อนชีวมวล (0.5-5.0 กิโลกรัม/ชั่วโมง) อัตราการไหลของไนโตรเจน (0-10 ลิตร/นาที) ความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ (50-150 เซนติเมตร) เวลาคงอยู่ของของแข็ง (1-3 นาที) และความดันสูญญากาศ (0-10 เซนติเมตรน้ำ) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้ในงานนี้ยังมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ ได้แก่ ZSM-5 โดโลไมต์และเวอร์มิคูไลท์ในรูปแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ผลการวิจัยพบว่าเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมสูงสุดเมื่อใช้ไม้กระถินยักษ์ คือ ร้อยละ 67.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลง แต่เพิ่มปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสเบาหรือเฟสติดไฟจากน้อยกว่าร้อยละ 0.5 เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นประมาณร้อยละ 2

ของชีวมวลแห้ง ไบโอดีออกไซด์เฟสเบามีปริมาณออกซิเจนต่ำมากที่สุดที่ร้อยละ 3.7 เมื่อใช้ ZSM-5 ซึ่งทำให้มีค่าความร้อน 41.3 MJ/kg การวิเคราะห์ GC/MS ของไบโอดีออกไซด์ที่ไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าส่วนใหญ่มีสารประกอบออกซิเจน อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการพบว่าไบโอดีออกไซด์มีสัดส่วนอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น ดังนั้นผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นที่พัฒนาขึ้นมาใหม่นี้มีศักยภาพสูง ไม่เพียงแต่สำหรับการผลิตไบโอดีออกไซด์ทั่วไปเท่านั้นแต่ยังรวมถึงไบโอดีออกไซด์เชิงเร่งปฏิกิริยาได้ด้วย

คำสำคัญ : ปริมาณผลได้ไบโอดีออกไซด์, ไพโรไลซิสแบบเร็ว, ตัวเร่งปฏิกิริยา



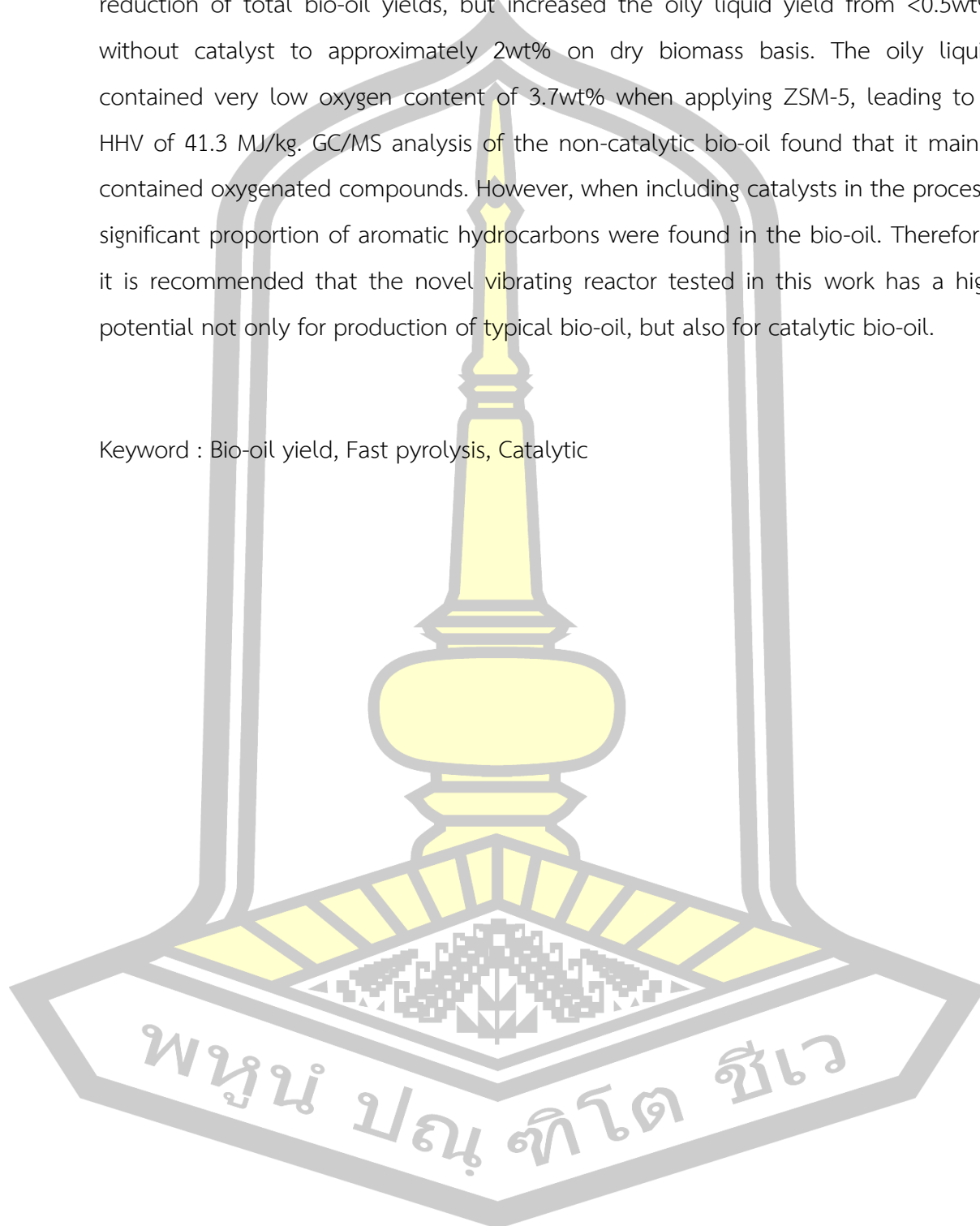
TITLE Catalytic Pyrolysis of Biomass in a Vibrating Reactor
AUTHOR Famai Srisurat
ADVISORS Associate Professor Adisak Pattiya , Ph.D.
DEGREE Master of Engineering **MAJOR** Mechanical Engineering
UNIVERSITY Mahasarakham **YEAR** 2021
University

ABSTRACT

Fast pyrolysis reactor design is crucial for efficient production of high-yield and high-quality bio-oil with char and gases as by-products. Fluidised-bed reactors are well known to be most widely used for this purpose. Nevertheless, the use heat transfer medium such as sand and the need for high carrier gas flow to fluidise the medium are their main drawbacks. Fine sand particles can be carried over from reactor bed to char storage, thus preventing the production of clean char, which could be further upgraded to value-added activated carbon. High carrier gas flow causes the reduction of thermal and cooling efficiency. These shortcomings were previously circumvented by applying simpler free-fall or drop-tube pyrolysers where biomass particles are allowed to drop vertically from top of bottom part while being pyrolysed. However, their heat transfer relies mainly on convection and partly on conduction heat from reactor wall. Therefore, this research aims to solve all of the aforementioned problems by using a novel vibrating reactor to allow biomass particles to be horizontally pyrolyzed by mainly conduction heat while moving by vibration along the reactor. Since this reactor was adopted in biomass fast pyrolysis for the first time, process parameters including reactor shape (cylinder or cuboid), pyrolysis temperature (450-525), biomass particles (0.2-2.0 mm), biomass feed rate (0.5-5.0 kg/h), nitrogen flow rate (0-10 l/min), reactor heated length (50-150 cm), solid residence time (1-3 min) and vacuum pressure (0-10 cmH₂O) need to be elucidated and optimized. Also covered in this work is the application of catalysts including ZSM-5, dolomite and vermiculite, in ex-situ fixed-bed reactor. The results showed that, for thermal pyrolysis, the maximum total bio-oil yield when pyrolyzing

Leucaena leucocephala woody biomass was 67.4 wt%. All catalyst led to the reduction of total bio-oil yields, but increased the oily liquid yield from <0.5wt% without catalyst to approximately 2wt% on dry biomass basis. The oily liquid contained very low oxygen content of 3.7wt% when applying ZSM-5, leading to a HHV of 41.3 MJ/kg. GC/MS analysis of the non-catalytic bio-oil found that it mainly contained oxygenated compounds. However, when including catalysts in the process, significant proportion of aromatic hydrocarbons were found in the bio-oil. Therefore, it is recommended that the novel vibrating reactor tested in this work has a high potential not only for production of typical bio-oil, but also for catalytic bio-oil.

Keyword : Bio-oil yield, Fast pyrolysis, Catalytic



กิตติกรรมประกาศ

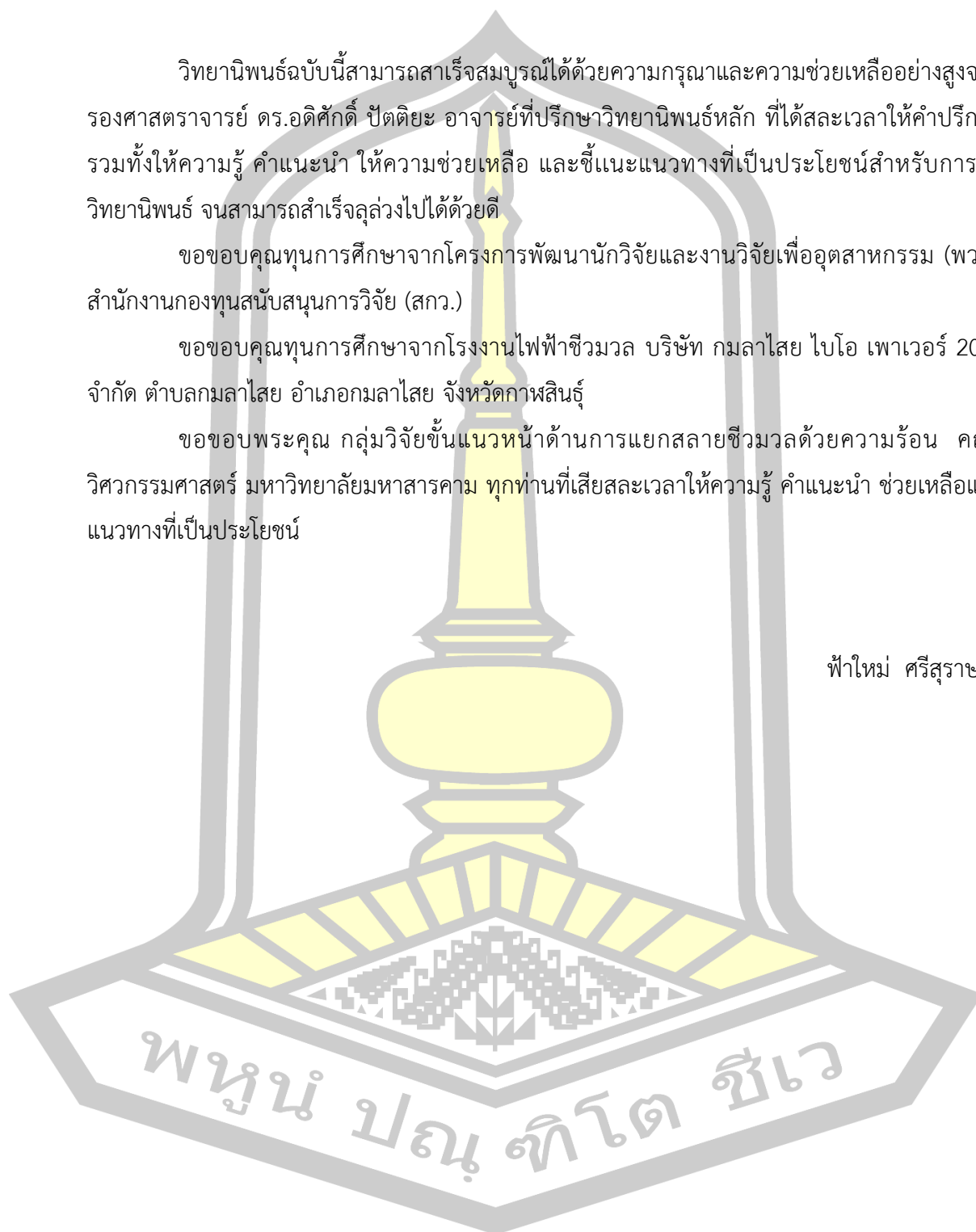
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงจาก
รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา
รวมทั้งให้ความรู้ คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์สำหรับการทำ
วิทยานิพนธ์ จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากโครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.)
สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากโรงงานไฟฟ้าชีวมวล บริษัท กมลไสย ไบโอ เพาเวอร์ 2010
จำกัด ตำบลกมลไสย อำเภอกมลไสย จังหวัดกาฬสินธุ์

ขอขอบพระคุณ กลุ่มวิจัยขั้นแนวหน้าด้านการแยกสลายชีวมวลด้วยความร้อน คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทุกท่านที่เสียสละเวลาให้ความรู้ คำแนะนำ ช่วยเหลือและ
แนวทางที่เป็นประโยชน์

ฟ้าใหม่ ศรีสุราษฎร์



สารบัญ

หน้า

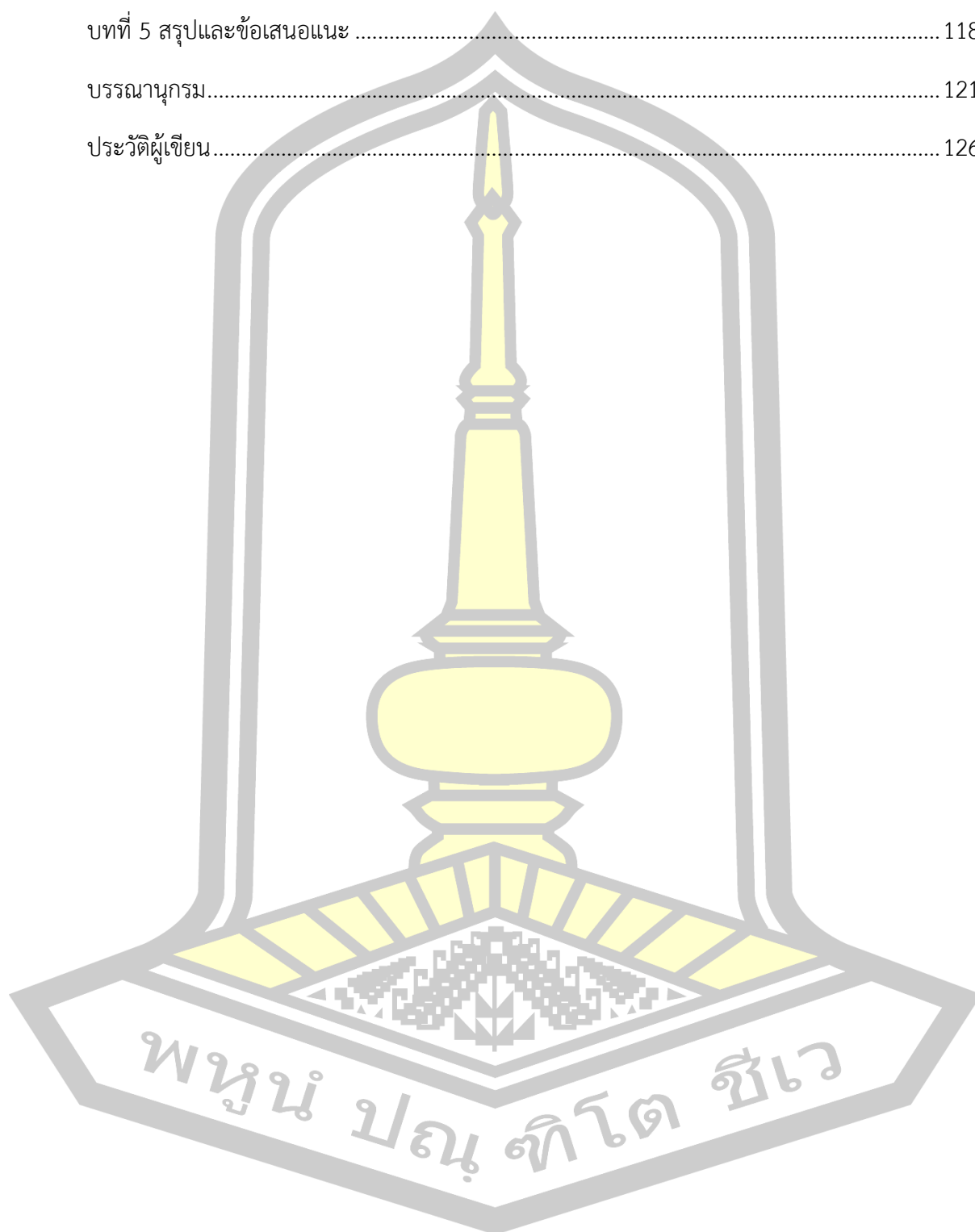
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ณ
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญภาพประกอบ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 .วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.3.1 ตัวแปรต้น.....	5
1.3.2 ตัวแปรตาม.....	5
1.3.3 ตัวแปรควบคุม.....	6
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	7
1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	7
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	7
บทที่ 2 ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล	9
2.1 ชีวมวล.....	9
2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล.....	9
2.1.2 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย	12
2.1.3 ชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง.....	12

2.1.4 การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์.....	13
2.2 กระบวนการไพโรไลซิส	13
2.2.1 ไพโรไลซิส.....	13
2.2.2 หลักการไพโรไลซิสแบบเร็ว.....	14
2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส.....	15
2.2.4 เครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว.....	16
2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว.....	23
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	25
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง.....	26
2.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์.....	26
2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลท์.....	27
2.5.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่าง ๆ.....	30
2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	31
2.6.3 สรุป.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	33
3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย.....	33
3.2 การเตรียมชีวมวล.....	34
3.3 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล.....	35
3.3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ.....	35
3.3.2 การวิเคราะห์ขั้นสูง.....	36
3.3.3 ค่าความร้อน.....	36
3.3.4 ความหนาแน่น.....	37

3.4 อุปกรณ์และวิธีการทดลองไฟโรไลซิสแบบเร็ว.....	38
3.4.1 ถังเก็บชีวมวล	40
3.4.2 ชุดวัดความดันในระบบหรือแมนอมิเตอร์	40
3.4.3 ถังเก็บถ่านชาร์.....	41
3.4.4 มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนสกรู	41
3.4.5 ท่อปฏิกิริยาหลัก.....	42
3.4.6 ชุดไซโคลน ชุดกรองไอร้อนและท่อเพล็กซ์	43
3.4.7 ชุดเร่งปฏิกิริยา.....	43
3.4.8 มอเตอร์สั่น	46
3.4.9 ชุดควบแน่นด้วยน้ำ ชุดดักจับไฟฟ้าสถิตและชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น	46
3.4.10 บั๊มสุญญากาศ	47
3.4.11 ขั้นตอนการทดลอง	48
3.5 การคำนวณปริมาณผลได้.....	50
3.6 กระบวนการกลั่นไบโอออยล์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	51
3.7 แผนการทดลอง	52
3.7.1 การทดลองกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	52
3.7.2 การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	53
3.8 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์.....	54
3.8.1 วิเคราะห์ค่าความหนืด	54
3.8.2 วิเคราะห์ปริมาณน้ำ.....	55
3.8.3 วิเคราะห์ปริมาณของแข็ง.....	55
3.8.4 วิเคราะห์ปริมาณเถ้า.....	56
3.8.5 วิเคราะห์ค่าพีเอช.....	56
3.8.6 วิเคราะห์จุดวาบไฟ	57

3.8.7 วิเคราะห์ค่าจุดไหลเท	57
3.8.8 วิเคราะห์ค่าความร้อนสูง.....	57
3.8.9 วิเคราะห์ความหนาแน่น	57
3.8.10 วิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุ.....	57
3.8.11 วิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมี	58
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	59
4.1 สมบัติของชีวมวล	59
4.2 การไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและสมบัติของไบโอออยล์	60
4.2.1 ผลของลักษณะท่อปฏิกรณ์	61
4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคชีวมวล.....	63
4.2.3 ผลของความยาวท่อปฏิกรณ์.....	65
4.2.4 ผลของเวลาคงอยู่ของของแข็ง.....	68
4.2.5 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส.....	69
4.2.6 ผลของอัตราป้อนชีวมวล.....	70
4.2.7 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจน	72
4.2.8 สมบัติของไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบา	73
4.3 การไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและสมบัติของไบโอออยล์	79
4.3.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	79
4.3.2 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว.....	83
4.3.3 ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	84
4.3.4 สมบัติของไบโอออยล์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและถ่านชาร์	86
4.4 ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการกลั่นไบโอออยล์เฟสเบาของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ.....	89
4.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5	89
4.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมต์.....	97

4.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลท์.....	110
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	118
บรรณานุกรม.....	121
ประวัติผู้เขียน.....	126



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ข้อกำหนดมาตรฐานของไบโอออยล์ (ASTM D7544-12).....	23
ตาราง 2 สภาพที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
ตาราง 3 แผนการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในท่อทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ชีวมวลที่ใช้ 1.2 กิโลกรัม และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาที.....	52
ตาราง 4 แผนการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้ชีวมวล 1 kg.....	53
ตาราง 5 แผนการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	54
ตาราง 6 สมบัติของชีวมวล.....	59
ตาราง 7 สมบัติไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาเทียบกับมาตรฐาน (ASTM D7544-12).....	74
ตาราง 8 ผลการเปรียบเทียบปริมาณผลได้และสมบัติต่าง ๆ กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	75
ตาราง 9 สารเคมีในไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบา.....	77
ตาราง 10 สมบัติไบโอออยล์เฟสหนัก เฟสเบาและถ่านชาร์.....	88
ตาราง 11 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5.....	91
ตาราง 12 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	99
ตาราง 13 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาจากตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์.....	105
ตาราง 14 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลท์.....	111

พูน ปณ จิต ชีวะ

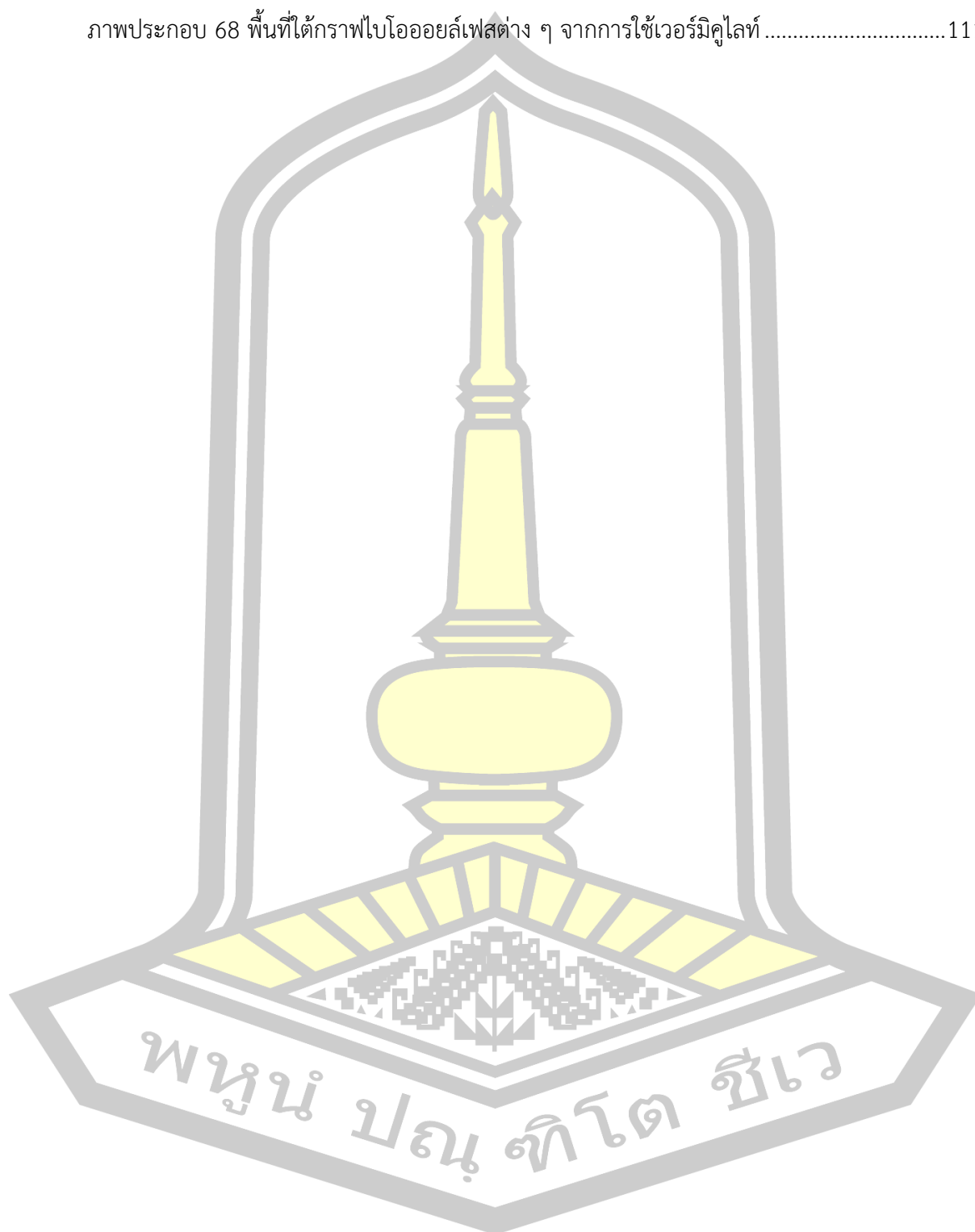
สารบัญภาพประกอบ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของชีวมวล.....	10
ภาพประกอบ 2 ไม้กระถินยักษ์.....	12
ภาพประกอบ 3 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบพอง.....	17
ภาพประกอบ 4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบหมุนวน.....	18
ภาพประกอบ 5 เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน.....	19
ภาพประกอบ 6 เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดละลาย.....	19
ภาพประกอบ 7 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู.....	20
ภาพประกอบ 8 เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ.....	22
ภาพประกอบ 9 เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น.....	22
ภาพประกอบ 10 การใช้ประโยชน์ของไบโอออยล์.....	24
ภาพประกอบ 11 ตัวเร่งปฏิกิริยา (ด้านซ้าย) ในเครื่องปฏิกรณ์ และ (ด้านขวา) นอกเครื่องปฏิกรณ์.....	25
ภาพประกอบ 12 ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์.....	27
ภาพประกอบ 13 ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลท์.....	28
ภาพประกอบ 14 โครงสร้างอะลูมิเนียมซิลิเกต.....	29
ภาพประกอบ 15 ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5.....	29
ภาพประกอบ 16 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย.....	33
ภาพประกอบ 17 ชีวมวลจากโรงงาน (ซ้าย) ก่อนเข้าเครื่องบด และ (ขวา) หลังบดจากเครื่องบด.....	34
ภาพประกอบ 18 การตากชีวมวลจากโรงงาน.....	34
ภาพประกอบ 19 อุปกรณ์เตรียมชีวมวล.....	35
ภาพประกอบ 20 เต้าเผา.....	38
ภาพประกอบ 21 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นเมื่อใช้ชุดเร่งปฏิกิริยา.....	39
ภาพประกอบ 22 ถังเก็บชีวมวลและเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส.....	40

ภาพประกอบ 23 ชุดวัดความดันในระบบ	41
ภาพประกอบ 24 ถังเก็บถ่านชาร์	41
ภาพประกอบ 25 มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (ก) ลำเลียงชีวมวล และ (ข) ติดตั้งต่อกับท่อปฏิกิริยา.....	42
ภาพประกอบ 26 ท่อปฏิกิริยา (ซ้าย) ท่อสปีเลียมพื้นผิว และ (ขวา) ท่อทรงกระบอก	43
ภาพประกอบ 27 ชุดไซโคลน ชุดกรองไอร้อนและท่อเฟล็กซ์.....	43
ภาพประกอบ 28 ชุดเร่งปฏิกิริยา (ก) ภายนอก และ (ข) ภายใน.....	44
ภาพประกอบ 29 แผนภาพรวมพร้อมชุดเร่งปฏิกิริยา	45
ภาพประกอบ 30 มอเตอร์สั่น.....	46
ภาพประกอบ 31 ชุดควบแน่น ได้แก่ ชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับไฟฟ้าสถิต เครื่องทำความเย็น ชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น (ชุดคอยล์เย็น) และชุดควบแน่นน้ำแข็งแห้งผสมแอสีโทน	47
ภาพประกอบ 32 บั๊มสุญญากาศและวาล์วปรับความดัน	48
ภาพประกอบ 33 ท่อแยกระหว่างมอเตอร์สกรู (ซ้าย) ยังไม่เปิดท่อแยง และ (ขวา) เปิดท่อแยงและนำ ขวดพลาสติกมารองรับชีวมวล	48
ภาพประกอบ 34 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกลั่น	51
ภาพประกอบ 35 (ขวา) เครื่องวัดความหนืด และ (ซ้าย) หลอดแก้วใส่ไบโอเอทอยล์.....	55
ภาพประกอบ 36 เครื่องวัดปริมาณน้ำ.....	55
ภาพประกอบ 37 ชุดวิเคราะห์ปริมาณของแข็งในไบโอเอทอยล์	56
ภาพประกอบ 38 เครื่องวิเคราะห์ค่าพีเอช.....	56
ภาพประกอบ 39 เครื่องวิเคราะห์ค่าพีเอช.....	57
ภาพประกอบ 40 องค์ประกอบทางเคมี.....	58
ภาพประกอบ 41 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว	60
ภาพประกอบ 42 ผลของท่อปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิดต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	61
ภาพประกอบ 43 ลักษณะท่อปฏิกิริยา (ก) ท่อสปีเลียมพื้นผิว และ (ข) ท่อทรงกระบอก	62
ภาพประกอบ 44 ผลของขนาดอนุภาคชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ท่อสปีเลียมพื้นผิว.....	63

ภาพประกอบ 45 ผลของขนาดอนุภาคชีวมวลในท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	64
ภาพประกอบ 46 ความยาวท่อปฏิกรณ์ (ด้านบนทรงกระบอก) และ (ด้านล่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า)	65
ภาพประกอบ 47 ผลของความยาวท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	66
ภาพประกอบ 48 ผลของความยาวท่อปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์....	67
ภาพประกอบ 49 ผลของเวลาคงอยู่ของของแข็ง (นาที) ต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์	69
ภาพประกอบ 50 ผลของอุณหภูมิไพโรซิสต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	70
ภาพประกอบ 51 ผลของอัตราป้อนชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	71
ภาพประกอบ 52 ผลอัตราการผลิตของไนโตรเจนของท่อแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อปริมาณผลได้ของไบโอออยล์	72
ภาพประกอบ 53 การแยกไบโอออยล์เฟสหนัก	80
ภาพประกอบ 54 ไบโอออยล์เฟสเบาจากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสีโตน	80
ภาพประกอบ 55 ไบโอออยล์เฟสน้ำจากชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น	81
ภาพประกอบ 56 ลักษณะของไบโอออยล์จากการการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด	82
ภาพประกอบ 57 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาและหลังใช้งาน.....	83
ภาพประกอบ 58 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน .	84
ภาพประกอบ 59 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	85
ภาพประกอบ 60 ปริมาณได้จากกระบวนการการกลั่นของเฟสต่าง ๆ	89
ภาพประกอบ 61 ไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการกลั่นจาก ZSM-5	90
ภาพประกอบ 62 พื้นที่ใต้กราฟไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากการใช้ ZSM-5.....	91
ภาพประกอบ 63 ไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการกลั่นจากโดโลไมต์	98
ภาพประกอบ 64 พื้นที่ใต้กราฟไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากการใช้โดโลไมต์.....	99
ภาพประกอบ 65 เฟสหนักจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้โดโลไมต์และน้ำมันกลั่น	104
ภาพประกอบ 66 พื้นที่ใต้กราฟไบโอออยล์เฟสหนักจากการใช้โดโลไมต์.....	105

ภาพประกอบ 67 เฟสเบาที่ผ่านกระบวนการกลั่นจากเวอร์มิคูไลท์.....	110
ภาพประกอบ 68 พื้นที่ได้กราฟไปโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากการใช้เวอร์มิคูไลท์	111



บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและเหตุผล

ในปัจจุบันหลายประเทศทั่วโลกมุ่งเน้นเกี่ยวกับการพัฒนาทางเทคโนโลยีและระบบเศรษฐกิจกันอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีความจำเป็นอย่างยิ่ง สวนทางกับปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีแนวโน้มลดลงและไม่สามารถผลิตได้ทันตามความต้องการ เนื่องจากในปัจจุบันได้นำเชื้อเพลิงฟอสซิลมาใช้เป็นจำนวนมาก ผลจากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อนและสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ วิธีหนึ่งในการแก้ไขปัญหา คือ การสนับสนุนการใช้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทน เพราะสามารถแปลงสภาพเป็นพลังงานได้หลายรูปแบบ เช่น เชื้อเพลิงอัดแท่ง เชื้อเพลิงเหลว และเชื้อเพลิงแก๊ส เป็นต้น ในประเทศไทยชีวมวลเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมแก่การนำมาเป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากชีวมวลสามารถหาได้ง่ายหรือได้จากการทำเกษตรกรรม ยกตัวอย่างเช่น เศษใบไม้ ชี้เลื้อย ชานอ้อย ฟางข้าว กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง และซังข้าวโพด รวมไปถึงของเสียจากภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาแปลงสภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis process)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว คือ การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ระยะเวลาคงอยู่ของไอลประมาณ 2-3 วินาที [1] อุปกรณ์ระบบปิดหรือควบคุมอากาศสำหรับเผาไหม้ให้น้อยลงทำให้ชีวมวลสลายตัวเป็นไอลไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วและควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักคือของเหลวที่เรียกว่า ไบโอบอยล์ (bio-oil) ร้อยละ 50-70 [2, 3] ไบโอบอยล์สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย เช่น เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์กังหันแก๊สเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและสามารถนำไปสกัดเป็นสารเคมีได้ ในปัจจุบันมีเครื่องปฏิกรณ์หลายชนิดที่ถูกนำมาใช้กระบวนการนี้ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง [1, 2, 4-9] เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนวน [1, 10-12] เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุนวน [1, 13, 14] เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดลละลาย [1, 15, 16] เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู [1, 17, 18] และเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ [19-22]

โดยในบรรดาเครื่องปฏิกรณ์ที่กล่าวมาเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดถูกนำมาใช้ในระดับห้องทดลองและอุตสาหกรรมแล้ว โดยเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดมีข้อดีคือ หลักการทำงานไม่ซับซ้อน สามารถพัฒนาเพิ่มขนาดเครื่องปฏิกรณ์ได้ง่าย เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกแนวตั้ง ภายในบรรจุตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายฟองสบู่สำหรับทำปฏิกิริยากับชีวมวล เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดนี้ให้ปริมาณผลได้ของไบโอบอยล์สูงถึงร้อยละ 70-75

[2, 8, 23] แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้แก๊สพามากในการยกทราย์ขึ้นทำให้ต้องใช้อุปกรณ์สร้างแรงดันแก๊สขนาดใหญ่และยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์ กล่าวคือแก๊สพาที่มีอัตราการไหลสูงอาจทำให้อุณหภูมิลดลงซึ่งปัญหานี้ต้องแก้โดยการเพิ่มชุดอุ่นแก๊สก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน นอกจากนี้การใช้แก๊สพาในปริมาณที่สูงส่งผลให้ความเข้มข้นของไอไฟโรไลซิสลดลง เนื่องจากถูกเจือจางโดยแก๊สพาซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการควบแน่นไอไฟโรไลซิส ทำให้ต้องใช้พลังงานในการดึงความร้อนออก (cooling load) เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังต้องใช้ชุดควบแน่นขนาดใหญ่เพื่อรองรับปริมาณแก๊สที่สูง ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพไฟโรไลซิสแบบเร็ว การออกแบบเครื่องที่ใช้แก๊สพาในปริมาณน้อยจึงเป็นประเด็นที่สำคัญและเป็นที่มาของการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ [21]

เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระออกแบบโดยการใช้ท่อตรงในแนวดิ่งที่มีการป้อนชีวมวลจากด้านบน ชีวมวลรับความร้อนในระหว่างที่ตกลงมาและเกิดปฏิกิริยาไฟโรไลซิสกลายเป็นควันและถ่านชาร์เป็นของแข็งที่เหลือ การถ่ายโอนความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระส่วนใหญ่ได้จากการพาความร้อนจากผนังของท่อปฏิกรณ์ผ่านมายังแก๊สพาและแก๊สพาส่งต่อให้ชีวมวล ขณะที่อนุภาคบางส่วนรับความร้อนโดยตรงจากผนังผ่านการนำความร้อน แม้ว่าเครื่องปฏิกรณ์ตกอิสระใช้แก๊สพาน้อยเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไต์เบด แต่เครื่องปฏิกรณ์ตกอิสระมีข้อเสียที่สำคัญ 2 ประการ คือ ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนจากผนังมายังชีวมวลยังคงต่ำอยู่ เนื่องจากชีวมวลสัมผัสผนังเตาเพียงเล็กน้อยในขณะที่ตกลงมาและชีวมวลมีโอกาสสุดตันที่ท่อปฏิกรณ์เนื่องจากการสะสมของถ่านชาร์ ทำให้การเดินระบบไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวเครื่องปฏิกรณ์รูปแบบใหม่จึงถูกออกแบบมาโดยใช้เงื่อนไขการออกแบบ 2 ประการ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ต้องใช้แก๊สน้อยที่สุดและต้องมีอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังไปยังชีวมวลที่สูง จึงเป็นที่มาของการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบสั้นที่เป็นท่อตรงวางในแนวระดับอาศัยแรงสั่นสะเทือนจากมอเตอร์ทำให้อนุภาคชีวมวลเคลื่อนที่และรับความร้อนจากผนังท่อปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์แบบสั้นนี้มีการนำมาใช้ในกระบวนการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำหรือที่เรียกว่าเทอร์รีแฟกชันเพื่อมุ่งเน้นผลิตถ่านเทอร์รีไฟด์สำหรับใช้เป็นเชื้อชีวภาพแข็งทดแทนถ่านหิน [24] แต่ยังไม่มีการนำเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้มาใช้ในกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วเพื่อมุ่งผลิตเชื้อเพลิงเหลวชีวภาพหรือไบโอเออยล์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งทดสอบการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์แบบสั้นสำหรับกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็ว

นอกจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ส่งผลต่อกระบวนการไฟโรไลซิสแล้วยังมีตัวแปรต่าง ๆ อีกมากมายที่ส่งผล ได้แก่ ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับชีวมวล เช่น ขนาดอนุภาคชีวมวล [15, 17, 19, 25] ความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารสกัด สัดส่วนเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเช่น อุณหภูมิไฟโรไลซิส [2, 9-12, 15, 17, 19-22] ชนิดและอัตราการไหลของแก๊สพา [11, 15, 17, 19] เวลาคงอยู่ของของแข็งและไอไฟโรไลซิส และอัตราการป้อนชีวมวล เป็นต้น ตัว

แปรเหล่านี้นี้มีการศึกษามากมากในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวถึงแล้วข้างต้น แต่ยังไม่มีการศึกษาตัวแปรเหล่านี้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาผลของขนาด อุณหภูมิ อัตราการป้อนชีวมวล อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และเวลาคงอยู่ของของแข็งและไพลโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น เพื่อหาตัวแปรที่เหมาะสมในการผลิตไบโอออยล์ที่ปริมาณสูงที่สุดและคุณภาพดีที่สุดในแง่ของค่าความร้อน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณธาตุ CHNO และองค์ประกอบทางเคมี GC/MS

ไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยทั่วไปมีสมบัติคล้ายน้ำมันเตาสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เช่น หม้อไอน้ำ กังหัน เครื่องยนต์และสามารถใช้ในเครื่องยนต์เคียว น้ำมันเตาได้ อย่างไรก็ตามไบโอออยล์ทั่วไปยังมีปัญหาและอุปสรรคในการนำไปใช้งาน ทั้งในแง่ของค่าความหนืด ค่าพีเอชหรือความเป็นกรด ปริมาณน้ำ ค่าความร้อนและการกัดกร่อนเมื่อนำไปใช้งาน ดังนั้นก่อนที่จะนำไปไบโอออยล์ไปใช้งานจึงควรศึกษาในเชิงลึกเพื่อปรับปรุงสมบัติของไบโอออยล์ให้มีความเหมาะสมโดยวิธีการหนึ่งที่สามารถทำได้คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วหรือเรียกว่า กระบวนการไพโรไลซิสเร่งด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (fast pyrolysis catalytic)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีจุดเด่นในการปรับปรุงไบโอออยล์ให้ปริมาณออกซิเจนลดลงเป็นผลทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การปรับปรุงสมบัติของไบโอออยล์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ ชนิดของชีวมวล อัตราการป้อนชีวมวล อัตราการไหลของแก๊สในระบบ เวลาคงอยู่ของของแข็งและขนาดอนุภาคของชีวมวล ตัวแปรเหล่านี้ส่งผลต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์

การเลือกชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการนำมาใช้งานก็มีผลในการปรับปรุงเช่นกัน ที่ผ่านมามีการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์ (zeolite) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมือนกับซีโอไลต์ (zeolite-like catalysts) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทโลหะออกไซด์ (metal oxides) และตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติ (natural catalysts) โดยมีรายละเอียดตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้ในเอกสารที่เกี่ยวข้อง [26] ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดและให้ผลดีที่สุดในการลดปริมาณออกซิเจนไบโอออยล์คือ ZSM-5 ซึ่งสามารถผลิตไบโอออยล์ที่มีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 93 [26] และไบโอออยล์ที่ผลิตได้สามารถติดไฟได้ง่าย อย่างไรก็ตาม ZSM-5 ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีราคาค่อนข้างสูง การหาตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติที่สามารถใช้ทดแทน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ได้จะช่วยลดต้นทุนการผลิตไบโอออยล์ได้

งานวิจัยที่ผ่านมา [6] ได้นำโดโลไมต์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติที่มีราคาต่ำเมื่อเทียบกับ ZSM-5 มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อผลิตไบโอออยล์จากต้นทิวลิป โดยทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเผา 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้เครื่องปฏิกรณ์

ฟลูอิดซ์เบตแบบพองในการการทดลอง ใช้อนุภาคชีวมวลขนาด 0.4-0.6 0.8-1.2 และ 1.3-1.7 มิลลิเมตร อัตราป้อนชีวมวล 100 กรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 7.5 ลิตร/นาที่ ใช้อุณหภูมิไพโรไลซิส 400-550 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าที่อนุภาคชีวมวล 0.8-1.2 มิลลิเมตร ให้ปริมาณผลได้สูงสุดร้อยละ 49 และเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลทำให้ปริมาณของไบโอออยล์ ลดลงจากร้อยละ 40 และ 49 เป็นร้อยละ 28 และ 44 โดยน้ำหนัก แต่มีผลทำให้สมบัติของไบโอออยล์ดีขึ้นได้เช่น ปริมาณออกซิเจนลดลงจากร้อยละ 34-41 เป็นร้อยละ 29-41 ค่าความร้อนของไบโอออยล์เพิ่มจาก 21-24 MJ/kg เป็น 23-28 MJ/kg และส่งผลให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 2.4-2.8 เป็น 4-5.9 แม้ว่างานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าโดโลไมต์ที่ใช้เร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบต (in-situ) สามารถปรับปรุงไบโอออยล์ได้บางส่วน แต่มีความเป็นไปได้สูงที่โดโลไมต์จะเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากสัมผัสกับชีวมวลโดยตรงจึงอาจมีการสะสมของถ่านชาร์ละเอียดและโค้กบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นหากนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้เร่งภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส (ex-situ) อาจทำให้ไบโอออยล์มีสมบัติที่ดีมากขึ้น อย่างไรก็ตามประเด็นนี้ยังเป็นสมมุติฐานต้องได้รับการพิสูจน์ต่อไป

แม้ว่าโดโลไมต์จะมีศักยภาพในการปรับปรุงของไบโอออยล์ตามงานวิจัยดังกล่าว นิกรศิลป์ บุญสมบัติ [21] ได้เปรียบเทียบโดโลไมต์กับตัวเร่งปฏิกิริยาอีก 7 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลท์ธรรมชาติชนิดหินลาวาแดง ดินขาวเคโอลิน เพอร์ไลท์ เวอร์มิคูไลท์ โคบอลต์โมลิบดีนัม ซิงค์ออกไซด์และZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระโดยใช้เหง้ามันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ ผลการทดลองพบว่า ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณน้ำมันเพสติดไฟหรือก็คือไฮโดรคาร์บอนสูงสุดร้อยละ 3 รองลงมาคือตัวเร่งเวอร์มิคูไลท์และโดโลไมต์ซึ่งให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพเพสติดไฟร้อยละ 1.6 และ 1.1 ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเวอร์มิคูไลท์และโดโลไมต์เป็นเร่งปฏิกิริยาที่มีศักยภาพในการนำมาใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อปรับปรุงสมบัติของไบโอออยล์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวใช้เครื่องปฏิกรณ์ที่มีอัตราการป้อนชีวมวล 100-200 กรัม/ชั่วโมง ซึ่งจัดได้ว่าเป็นขนาดค่อนข้างเล็กสำหรับผลิตไบโอออยล์ให้มีปริมาณที่สูงพอต่อการนำไปวิเคราะห์โดยละเอียด โดยนิกรศิลป์ บุญสมบัติ [21] วิเคราะห์สมบัติ GC/MS เท่านั้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาเพื่อต่อยอดของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเวอร์มิคูไลท์เทียบกับ ZSM-5 ในกระบวนการไพโรไลซิสในระบบเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ขึ้นหรืออยู่ในช่วง 200-1500 กรัม/ชั่วโมง โดยตัวเร่งปฏิกิริยาใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่แยกออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา และมีการวิเคราะห์ปริมาณผลได้และสมบัติไบโอออยล์โดยละเอียดซึ่งรวมถึงค่าความร้อน ความหนาแน่น ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณธาตุ CHNO และองค์ประกอบทางเคมี GC/MS

1.2 .วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อหาตัวแปรของกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอออยล์โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ZSM-5 โดโลไมต์ และเวอร์มิคูไลต์ ต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของการวิจัยได้แบ่งตัวการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การศึกษาผลของตัวแปรเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การศึกษาผลของตัวแปรในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.1 ตัวแปรต้น

สำหรับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.1.1 ลักษณะท่อปฏิกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและแบบทรงกระบอก

1.3.1.2 ความยาวท่อปฏิกรณ์ที่ใช้ ได้แก่ 55 110 และ 165 เซนติเมตร

1.3.1.3 อุณหภูมิไพโรไลซิส ได้แก่ 450 500 และ 525 องศาเซลเซียส

1.3.1.4 ขนาดอนุภาคชีวมวล ได้แก่ 0.2-0.6 ,0.6-1, 0.2-1.0 และ 1-2 มิลลิเมตร

1.3.1.5 อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 0, 5 และ 10 ลิตร/นาที

1.3.1.6 ป้อนสุญญากาศช่วยดูด 0 และ -20 เซนติเมตรน้ำ

1.3.1.7 เวลาคงอยู่ของของแข็ง ได้แก่ 1 2 และ 3 นาที

1.3.1.8 อัตราการป้อนชีวมวล ได้แก่ 0.5, 1, 3.3 และ 5 กิโลกรัม/ชั่วโมง

สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.1.9 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ZSM-5 เวอร์มิคูไลต์ และ โดโลไมต์

1.3.2 ตัวแปรตาม

1.3.2.1 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ไบโอออยล์ (เฟสหนัก เฟสน้ำและเฟสเบา)

ถ่านชาร์ และแก๊ส

1.3.2.2 สมบัติของไบโอออยล์ ได้แก่ ค่าหนาแน่น ค่าความร้อน ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณธาตุ CHNO และองค์ประกอบทางเคมี GC/MS

1.3.3 ตัวแปรควบคุม

กรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

- 1.3.3.1 ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือ ไม้กระถินยักษ์
- 1.3.3.2 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นขนาดห้องทดลอง
- 1.3.3.3 ความชื้นของชีวมวลเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 10
- 1.3.3.4 ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสีโทน 6 ชุด ที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส
- 1.3.3.5 ชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น 2 ชุด ที่อุณหภูมิ -15 ถึง -20 องศาเซลเซียส

กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

- 1.3.3.6 ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองคือ ไม้กระถินยักษ์
- 1.3.3.7 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นขนาดห้องทดลอง
- 1.3.3.8 ความชื้นของชีวมวลเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 10
- 1.3.3.9 ลักษณะท่อที่ใช้คือ ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- 1.3.3.10 ขนาดอนุภาคชีวมวล 0.2-0.6 มิลลิเมตร
- 1.3.3.11 อุณหภูมิไฟโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส
- 1.3.3.12 อัตราป้อน 600 กรัม/ชั่วโมง
- 1.3.3.13 อัตราการไหลไนโตรเจน 10 ลิตร/นาที่
- 1.3.3.14 ป้อนสุญญากาศ -20 เซนติเมตรน้ำ
- 1.3.3.15 ชีวมวลที่ใช้ 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง
- 1.3.3.16 อุณหภูมิเร่งปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส
- 1.3.3.17 อัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล 2:1
- 1.3.3.18 เวลาในการทดลอง 1 ชั่วโมง 40 นาที
- 1.3.3.19 ความเร็วปฏิกรณ์ (WHSV 0.3 h⁻¹)
- 1.3.3.20 ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสีโทน 6 ชุด ที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส
- 1.3.3.21 ชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น 2 ชุด ที่อุณหภูมิ -15 ถึง -20 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้กระบวนการเร่งปฏิกิริยารูปแบบใหม่ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติและทราบวิธีการเตรียมตัวเร่งนั้น ๆ
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้ที่สามารถนำไปต่อยอดในการทำวิจัยครั้งต่อไป
- 1.4.3 ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

1.5 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 กลุ่มวิจัยขั้นแนวหน้าด้านการแยกสลายชีวมวลด้วยความร้อน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม
- 1.5.2 บริษัท กมลลาไสย ไบโอ เพาเวอร์ 2010 จำกัด ตำบลกมลลาไสย อำเภอกมลลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์
- 1.5.3 ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

- 1.6.1 ไพโรไลซิสแบบเร็ว หมายถึง กระบวนการแยกสลายทางความร้อนของชีวมวลในสภาวะไร้ออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของไอสั่นและควบแน่นในอุณหภูมิที่ต่ำทำให้เกิดผลิตภัณฑ์หลักคือ ของเหลวที่เรียกว่า ไบโอะออยล์ (bio-oil)
- 1.6.2 ท่อกลม คือ ท่อทรงกระบอกมีหน้าที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส
- 1.6.3 ท่อกล่อ่ง คือ ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีหน้าที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส
- 1.6.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว หมายถึง ไบโอะออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊ส
- 1.6.5 ไบโอะออยล์แบ่งออกเป็น 3 ส่วน/เฟส ได้แก่
 - 1.6.5.1 เฟสหนัก คือ ของเหลวหนืดมีลักษณะสีดำ ที่ได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิต ของเหลวหนืดสามารถติดไฟได้
 - 1.6.5.2 เฟสน้ำ คือ ของเหลวที่ได้จากชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นมีลักษณะเป็นสีเหลืองถึงสีน้ำตาล

1.6.5.3 เฟสเบา คือ ของเหลวที่ควบแน่นได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้ง มีลักษณะเป็นสีใสหรือเหลืองใส โดยทั่วไปจะแยกชั้นอยู่บนเฟสเบา เป็นส่วนที่สามารถติดไฟได้และมีค่าความร้อนสูง

1.6.6 ถ่านชาร์ หมายถึง ของแข็งที่ได้จากถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นสีดำเหมือนถ่านทั่วไป

1.6.7 แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ หมายถึง แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่อุณหภูมิ 30 และ -70 องศาเซลเซียส

1.6.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น หมายถึง เครื่องปฏิกรณ์ที่มีลักษณะเป็นท่อกลอง สามารถลำเลียงวัตถุดิบโดยการสั่นจากมอเตอร์สั่น

1.6.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา หมายถึง สารประกอบทางเคมีที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นหรือได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างออกไปจากเดิม

1.6.9 ถ่านโค้ก หมายถึง ของแข็งที่หลุดออกจากชุดไซโคลนที่ดักจับไม่อยู่แล้วไปติดอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา



บทที่ 2

ปรีทัศน์เอกสารข้อมูล

2.1 ชีวมวล

ชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์ในรูปของพันธะเคมี ผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วย ชีวมวลส่วนใหญ่ได้มาจากการทำเกษตร เช่น พางข้าว แกลบ เหม้ามันสำปะหลัง ชังข้าวโพด ชานอ้อย กากปาล์ม เศษอาหาร และของเสียจากพืช ชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาแปลงสภาพเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานทดแทนได้ อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สะอาดและยั่งยืนเพราะสามารถก่อตัวขึ้นเองอยู่ตลอดเวลาตามธรรมชาติจากการปฏิสัมพันธ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ ดิน และแสงแดด

2.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลประกอบไปด้วยธาตุหลัก 4 ธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) และมีองค์ประกอบของธาตุรองอื่น ๆ ในปริมาณที่เล็กน้อยซึ่งเป็นองค์ประกอบของเถ้า เช่น โลหะแอลคาไล ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นธาตุพื้นฐานธาตุที่รวมกันเป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวล ได้แก่ ความชื้นหรือน้ำ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน สารสกัดอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1.1 ความชื้น

ความชื้น (moisture) คือ ปริมาณน้ำที่อยู่ในชีวมวล ความชื้นจะมีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและสามารถแปรเปลี่ยนได้ตามสภาวะการจัดเก็บ ความชื้นของชีวมวลมีความสำคัญต่อกระบวนการแปลงสภาพเป็นไบโอเอทอลล์ ส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนของชีวมวล ดังนั้นก่อนนำชีวมวลมาใช้งาน ควรทำให้แห้งก่อนนำไปใช้เพื่อผลิตเป็นไบโอเอทอลล์

2.1.1.2 เซลลูโลส

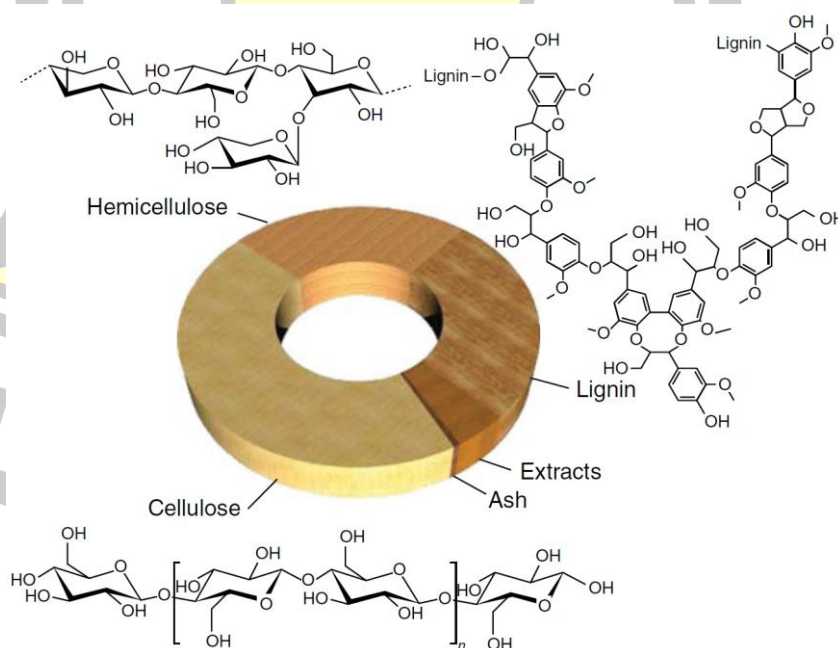
เซลลูโลส (cellulose) คือ พอลิเมอร์ธรรมชาติที่เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทโฮโมพอลิแซคคาไรด์ (homopolysaccharide) ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) มีสูตรเคมี $(C_6H_{10}O_5)_n$ เซลลูโลสมีสูตรพื้นฐานที่มีหน่วยย่อยที่เหมือนและซ้ำกันเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส แดสดังภาพประกอบ 1 โดยทั่วไปชีวมวลประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 40-50 เซลลูโลสสลายในช่วงอุณหภูมิ 350-500 องศาเซลเซียส เมื่อได้รับความร้อนสูงในภาวะจำกัดออกซิเจน

2.1.1.3 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วย น้ำตาล 5 ชนิด เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ดังภาพประกอบ 1 โดย 2 ชนิด เป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 ตัว ได้แก่ ไซโลส (xylose) และอะราบินอส (arabinose) ซึ่งเป็นโซ่หลักอาจ มีน้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแลกโทส (galactose) หรือกลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลัก ด้วยและมีน้ำตาลชนิดอื่น ๆ มาเชื่อมต่อเป็นโซ่สาขาหรือโซ่แขนง มีสูตรทางเคมี $(C_5H_8O_4)_n$ โครงสร้าง ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นกิ่งโดยธรรมชาติและสามารถแยกสลายด้วยน้ำหรือไฮโดรไลซิส (hydrolysis) กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและเฮมิเซลลูโลสสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส

2.1.1.4 ลิกนิน

ลิกนิน (lignin) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในชีวมวล ที่มีความซับซ้อน และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ลิกนินเป็นสารที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด โครงสร้างของลิกนินจะไม่จับตัวกันเหมือนกับเซลลูโลสและ เฮมิเซลลูโลส แต่มีโครงสร้างที่มีลักษณะซับซ้อน ดังภาพประกอบ 1 ลิกนินทำให้เกิดความแข็งแรง ทนทานต่อสารเคมีและลิกนินสลายตัวได้ยากในกระบวนการไพโรไลซิส



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของชีวมวล [27]

2.1.1.5 ส่วนที่เผาไหม้ได้

ส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustible substance) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (volatile matter) และคาร์บอนคงที่ (fixed carbon) สารระเหยเป็นส่วนที่เผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลที่มีปริมาณสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย

2.1.1.6 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้

ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ คือ เถ้า (ash) ชีวมวลส่วนใหญ่มีเถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าวที่มีสัดส่วนเถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งมีปัญหาในการเผาไหม้และการกำจัด ชีวมวลที่มีปริมาณเถ้าสูงทำให้มีค่าพลังงานความร้อนต่ำ

2.1.1.7 สารสกัด

สารสกัดเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของชีวมวล ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น สารสกัดอินทรีย์ (organic extractives) และสารสกัดอนินทรีย์ (inorganic extractives) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1.7.1 สารสกัดอินทรีย์

สารสกัดอินทรีย์ (organic extractives) ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบหลักและมีธาตุชนิดอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วม เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส กำมะถัน และคลอรีน เป็นต้น สารสกัดอินทรีย์เป็นสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำและเป็นกลุ่มเดียวที่ไม่เป็นพอลิเมอร์ มีสมบัติเฉพาะที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) แต่สามารถละลายได้ดีด้วยตัวทำละลาย เช่น เอทานอล โทลูอิน แอซีโตน และเฮกเซน โดยส่วนใหญ่สารที่พบมากที่สุด ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เทอร์ปีน ยางเหนียว เรซิน น้ำตาล แป้ง สารฟีนอล น้ำมันหอมระเหย เพกทิน เมือก ไกลโคไซด์ ซาโปนิน และสารอื่น ๆ โดยที่ความเข้มข้นและลักษณะของสารอินทรีย์อาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการไพโรไลซิส

2.1.1.7.2 สารสกัดอนินทรีย์

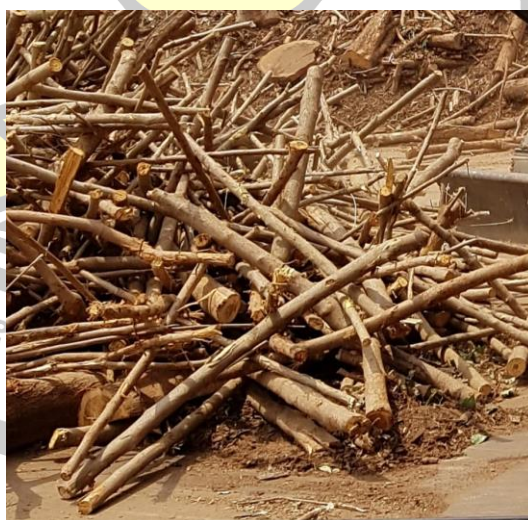
สารสกัดอนินทรีย์ (inorganic extractives) ไม่ใช่สารที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยทั่วไปแล้วธาตุหลักที่พบได้แก่ แคลเซียม (Ca) ซิลิกอน (Si) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) แมกนีเซียม (Mg) และมีธาตุอื่นในปริมาณเล็กน้อย ได้แก่ เหล็ก (Fe) ฟอสฟอรัส (P) กำมะถัน (S) แมงกานีส (Mn) และอลูมิเนียม (Al) ซึ่งธาตุเหล่านี้มีทั้งไม่มีประจุและมีประจุองค์ประกอบเหล่านี้เกิดขึ้นเป็น ออกไซด์ (O^{2-}) คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ซัลเฟต (SO_4^{2-}) คลอไรด์ (Cl^-) และฟอสเฟต (PO_4^{3-}) เป็นต้น สารอนินทรีย์เหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายทางความร้อนได้ วัสดุที่มีสารอนินทรีย์ในปริมาณมาก อาจส่งผลก่อให้เกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสให้สูงขึ้น ส่งผลให้อไพโรไลซิสเกิดการแตกตัว (cracking reaction) มากขึ้น

2.1.2 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สามารถใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ เป็นพลังงานที่สามารถปลูกทดแทนได้ในเวลาไม่นาน ทั้งยังไม่ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น ประเทศไทยมีชีวมวลหลายชนิดที่สามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้ โดยเฉพาะชีวมวลที่เกิดจากเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ ใบและยอดอ้อย ชังข้าวโพด ทะลายปาล์ม เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีประชาชนประกอบอาชีพเกษตรกรรมมากกว่าร้อยละ 50 ที่สำคัญจากผลการเพาะปลูกทางการเกษตร ยังมีวัสดุเหลือทิ้งอีกมากมาย ซึ่งสามารถบอกได้ว่าประเทศไทยมีศักยภาพในการนำชีวมวลไปผลิตเป็นพลังงาน

2.1.3 ชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาผลของการไพโรไลซิสแบบเร็วเชิงเร่งปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นต่อปริมาณผลได้และสมบัติของผลิตภัณฑ์ ชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยคือ ไม้กระถินยักษ์ ที่ได้จากบริษัทกมลไสย ไบโอ เพาเวอร์ 2010 จำกัด ราคาต้นละ 1000 บาท ดังภาพประกอบ 2 ซึ่งเป็นไม้ยืนต้นที่ได้รับสนับสนุนจากหน่วยงานรัฐและเอกชน ให้นำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเนื่องจากเพาะปลูกได้ง่าย มีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว ดูแลรักษาง่ายและยังให้พลังงานที่สูง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าไม้กระถินยักษ์มีค่าความร้อนสูง 18-20 MJ/kg [9, 24] ในปัจจุบันมีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น การใช้เป็นฟืน นำไปเป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลหรือแม้กระทั่งนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว



ภาพประกอบ 2 ไม้กระถินยักษ์

2.1.4 การนำชีวมวลไปใช้ประโยชน์

การนำชีวมวลไปแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบตามความเหมาะสมดังต่อไปนี้

2.1.4.1 การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผาไหม้จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวลความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ไม้ฟืน เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มทำอาหารในชีวิตประจำวัน นอกจากนี้ยังนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล

2.1.4.2 การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและเกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า

2.1.4.3 การผลิตแอลกอฮอล์ การผลิตเอทิลแอลกอฮอล์จากผลผลิตที่เหลือจากพืชจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง หรือกากน้ำตาล ก็เป็นวิธีหนึ่งของการนำพลังงานจากชีวมวลมาใช้ เอทิลแอลกอฮอล์สามารถนำไปผสมในเครื่องตัดที่มีแอลกอฮอล์ นำไปใช้ทำยารักษาโรค เป็นเชื้อเพลิง และนำไปผสมกับน้ำมันเบนซิน เพื่อใช้กับเครื่องยนต์เบนซิน

2.1.4.4 กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis process) เป็นกระบวนการทางเคมีความร้อนเพื่อย่อยสลายโครงสร้างของชีวมวลให้เล็กลงในสภาวะจำกัดออกซิเจน ผลที่ได้จากขั้นตอนนี้คือ ไโอไพโรไลซิส ถ่านชาร์ และแก๊ส ถ่านชาร์ถูกแยกออกจากไอดีด้วยไซโคลน จากนั้นไอดีไพโรไลซิสส่วนหนึ่งถูกควบแน่นด้วยชุดควบแน่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากชุดควบแน่นคือ ไบโอออยล์ อีกทั้งยังมีแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นและแก๊สที่ติดไฟได้

2.2 กระบวนการไพโรไลซิส

2.2.1 ไพโรไลซิส

ไพโรไลซิสเป็นการสลายทางความร้อนในสภาวะจำกัดออกซิเจน ซึ่งแตกต่างจากการเผาไหม้ (combustion) ที่มีการแยกสลายในสภาวะที่มีออกซิเจน กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ารู้จักกันมาเป็นเวลานานแล้ว เช่น การผลิตถ่าน ขณะที่กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพิ่งมีการค้นพบและพัฒนา ในกระบวนการไพโรไลซิสถ้าอุณหภูมิที่ใช้ต่ำและเวลาดำรงอยู่ของของแข็งนานทำให้ชีวมวลส่วนใหญ่กลายเป็นถ่าน แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงและเวลาดำรงอยู่ของไอดีไพโรไลซิสนานทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ได้คือแก๊ส ขณะที่ถ้าใช้อุณหภูมิต่ำปานกลางและเวลาดำรงอยู่ของไอดีไพโรไลซิสสั้นทำให้ปริมาณของเหลว

ที่สูง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับสถานะของกระบวนการและสามารถเลือกผลิตภัณฑ์ได้จากการปรับสถานะ ในกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภท โดยแตกต่างกันในแง่ของสถานะของกระบวนการและปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

2.2.1.1 กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis process) เป็นกระบวนการสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อนในสภาพอับอากาศกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งหลายชั่วโมงหรืออาจนานเป็นวัน ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์มีใกล้เคียงกันทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส

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

2.2.1.3 กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis process) เป็นกระบวนการที่เร่งอุณหภูมิให้สูงขึ้นที่อุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์อยู่ระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส แก๊สที่ได้จากกระบวนการต้องอยู่ในปฏิกรณ์ไม่เกิน 2-3 วินาที แก๊สถูกควบแน่นอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้ของเหลวในปริมาณที่สูงที่สุด ซึ่งปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลวประมาณร้อยละ 50-60 ของแข็งร้อยละ 25-30 และแก๊สร้อยละ 15-20

2.2.1.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (gasification process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็ง เช่น ถ่านและไม้ให้เป็นเชื้อเพลิงที่อยู่ในสภาพแก๊สที่ซึ่งยังคงมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิ 750-900 องศาเซลเซียส แก๊สที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์แบบการสันดาปภายในหรือใช้กับกังหันแก๊ส (gas turbine) ในกระบวนการให้ความร้อนต่าง ๆ

2.2.1.5 กระบวนการทอร์รีแฟกชัน (torrefaction process) เป็นกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง 200-300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์หลักจะเป็นของแข็ง สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงแข็งร่วมกับถ่านหินในโรงงานผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหิน

2.2.2 หลักการไพโรไลซิสแบบเร็ว

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของชีวมวลเป็นการนำชีวมวลที่เป็นของแข็งหลังจากผ่านกระบวนการบดหรือย่อยสลาย แล้วมาผ่านกระบวนการทางความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส เพื่อย่อยสลายโครงสร้างทางเคมีของชีวมวลให้เล็กลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ ไอน้ำไพโรไลซิส (pyrolysis vapour) และถ่านชาร์ (char) ถ่านถูกแยกออกจากไอน้ำโดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไซโคลน (cyclone) จากนั้นไอน้ำไพโรไลซิสส่วนหนึ่งจะถูกควบแน่นที่ชุดควบแน่น

(condenser) และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากชุดควบแน่นคือ ของเหลวสีดำหรือสีน้ำตาลเข้มที่เรียกว่า ไบโอยล์ (bio-oil) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักและมีปริมาณผลได้สูงถึงร้อยละ 75 ของน้ำหนักชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วอย่างอื่นคือ แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (non-condensable gas) ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และแก๊สที่สามารถติดไฟได้ เช่น มีเทน (CH_4) โพรเพน (C_3H_8) โพรพิลีน (C_3H_6) อีเทน (C_2H_6) เอทิลีน (C_2H_4) และไฮโดรเจน (H_2)

2.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

อุปกรณ์พื้นฐานที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย เครื่องบดชีวมวล (grinder) เครื่องอบแห้ง (dryer) ถังป้อน (hopper) เครื่องป้อนชีวมวล (screw feeder) เครื่องปฏิกรณ์ (reactor) ไซโคลน (cyclone) ชุดกรองไอร้อน (hot filter) ถังเก็บถ่านชาร์ (char pot) และระบบเก็บไบโอยล์ (bio-oil collection system) การนำอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาเชื่อมต่อกันเป็นระบบไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยมีรายละเอียดของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.2.3.1 เครื่องบดชีวมวล ทำหน้าที่บดชีวมวลให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร เนื่องจากชีวมวลที่ได้จากโรงงานมีขนาดใหญ่ หากนำชีวมวลไปป้อนอาจทำให้สกรูลำเลียงชีวมวลติดขัดได้ ดังนั้นควรนำชีวมวลมาบดให้มีขนาดเล็กก่อนนำไปใช้ในการทดลองและยังส่งผลให้ถ่ายเทความร้อนได้อย่างรวดเร็ว หรือมีอัตราการให้ความร้อนสูง (high heating rate)

2.2.3.2 เครื่องอบแห้ง ใช้สำหรับอบแห้งชีวมวลที่มีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 10 แต่บางกรณีหากชีวมวลถูกปล่อยไว้ให้แห้งกลางแดดจนชีวมวลมีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 ก็ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องอบแห้ง ซึ่งช่วยลดการใช้พลังงาน

2.2.3.3 ถังป้อน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บอนุภาคชีวมวลที่ผ่านการอบแห้งและบดย่อยจนได้ขนาดที่ต้องการพร้อมป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ การออกแบบถังเก็บชีวมวลควรออกแบบตามลักษณะการทำงานของหน่วยผลิตซึ่งเป็นถึงระบบปิด

2.2.3.4 เครื่องป้อนชีวมวล ทำหน้าที่ป้อนชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยอาศัยสกรูลำเลียงให้ชีวมวลไหลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์อย่างรวดเร็ว แต่อย่างไรก็ตามควรมีการออกแบบสกรูให้เหมาะสมกับระบบเครื่องปฏิกรณ์

2.2.3.5 เครื่องปฏิกรณ์ เป็นอุปกรณ์หลักของระบบไพโรไลซิสแบบเร็ว เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายองค์ประกอบทางเคมีด้วยความร้อนของชีวมวล และให้ความร้อนกับวัสดุที่ใช้เป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์บางชนิดเช่น เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง ซึ่งตัวกลางที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อน (heating medium) ส่วนมากนิยมใช้ทราย (silica

sand) โดยอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตาม เครื่องปฏิกรณ์บางชนิดไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางถ่ายเทความร้อน เช่น เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระและเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ซึ่งมีข้อดีในแง่การลดความซับซ้อนของระบบได้ แต่ประสิทธิภาพจะแตกต่างหรือเทียบเคียงกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคด์แบบฟองหรือไหม ขึ้นอยู่กับการออกแบบระบบ

2.2.3.6 ไชโคลน เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกถ่านชาร์ออกจากระบบไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสแก๊สหมุนวน (vortex) ภายในไชโคลน จึงสามารถแยกอนุภาคถ่านชาร์ออกจากแก๊สได้ การเกิดกระแสหมุนวนทำได้โดยการให้แก๊สไหลเข้าสู่ไชโคลนในแนวสัมผัสหรือแนวแกน ขนาดของถ่านชาร์ที่ถูกแยกได้ขึ้นอยู่กับขนาดของชีวมวลที่ป้อนและขนาดของไชโคลน กลไกที่ใช้แยกอนุภาคถ่านชาร์ในไชโคลนเกิดจากแรงหนีศูนย์กลางหรือแรงเหวี่ยงซึ่งเกิดจากการทำให้กระแสแก๊สมีการหมุนทำให้อนุภาคถูกเหวี่ยงไปยังผนังของไชโคลน และแรงโน้มถ่วงเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ถึงผนังของไชโคลน ทำให้อนุภาคถ่านชาร์ที่หนักได้รับแรงโน้มถ่วงทำให้อนุภาคถ่านชาร์ตกลงไปยังถังเก็บด้านล่างในระบบแยกถ่านชาร์

2.2.3.7 ชุดกรองไอร้อน เป็นส่วนที่เชื่อมต่อเข้ากับไชโคลนเพื่อกรองอนุภาคของถ่านชาร์เล็ก ๆ ที่ไชโคลนไม่สามารถแยกออกได้ถูกดักจับโดยตัวกรองไอร้อน อุปกรณ์นี้ต่อใช้งานถัดจากชุดไชโคลน ภายในบรรจุด้วยใยแก้ว (glass wool) ที่มีสมบัติทนความร้อนได้ดี เพื่อทำหน้าที่ดักจับถ่านชาร์ขนาดเล็กซึ่งช่วยลดการปนเปื้อนของถ่านชาร์ในไบโอออยล์ที่ได้ เพราะผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสที่ได้จากกระบวนการนั้นมีถ่านชาร์ขนาดเล็กผสมอยู่ หากควมแน่นเป็นไบโอออยล์ทำให้ถ่านชาร์ผสมรวมอยู่ด้วย

2.2.3.8 ถังเก็บถ่านชาร์ ทำหน้าที่เก็บถ่านชาร์ที่แยกออกจากไพโรไลซิส เพื่อให้ไพโรไลซิสที่ส่งต่อไปยังชุดควบแน่นเกิดการควบแน่นกลายเป็นของเหลวที่ปราศจากของแข็งเจือปน ซึ่งมีผลต่อสมบัติของของเหลวโดยตรง เช่น ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณของแข็งในไบโอออยล์มาก

2.2.3.9 ระบบเก็บไบโอออยล์ (bio-oil collection system) ประกอบไปด้วยชุดควบแน่นด้วยน้ำ (condenser) ชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต (electrostatic precipitator) และขวดเก็บไบโอออยล์ (bio-oil pot) โดยที่ชุดควบแน่นด้วยน้ำทำให้ไพโรไลซิสเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วกลายเป็นไบโอออยล์ ส่วนไพโรไลซิสที่ไม่เป็นของเหลวถูกดักจับอีกครั้งด้วยเครื่องดักจับตะกอนไฟฟ้าสถิตและไบโอออยล์ที่ได้ถูกเก็บในขวดเก็บไบโอออยล์

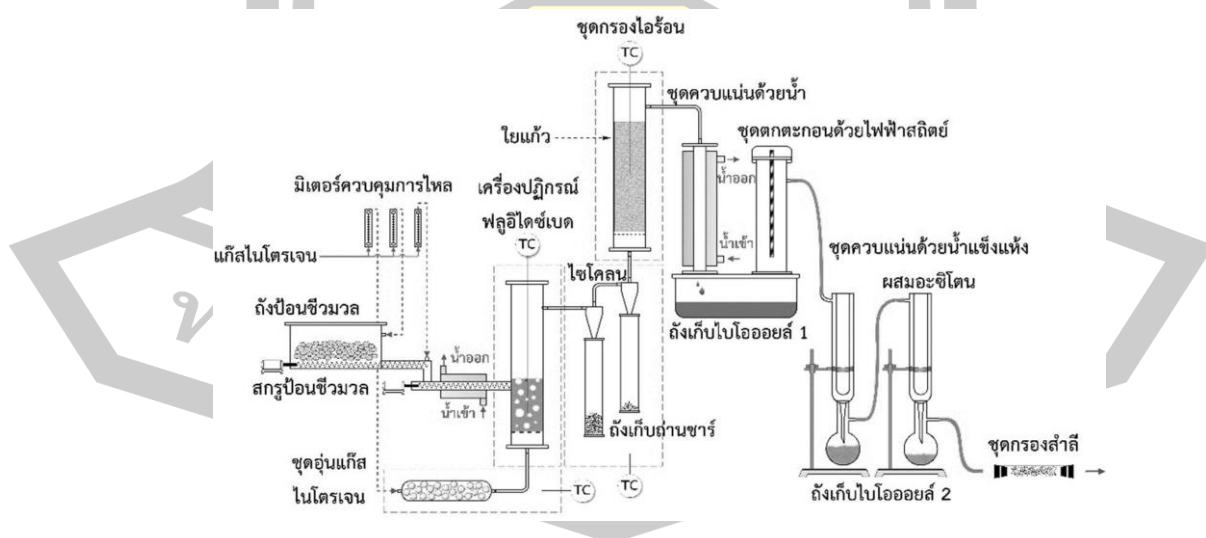
2.2.4 เครื่องปฏิกรณ์ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

เครื่องปฏิกรณ์เป็นอุปกรณ์หลักในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ที่ทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนจากห้องเผาไหม้ให้กับชีวมวล เพื่อเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน โดยเครื่อง

ปฏิกรณ์ที่สามารถใช้ในกระบวนการนี้มีหลายชนิดเช่น เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง (bubbling fluidized-bed reactor) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน (circulating fluidized-bed reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน (rotating cone reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดสลาย (ablative pyrolysis reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (auger reactor) เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ (free-fall reactor) และ เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น (vibrating reactor) และ เครื่องปฏิกรณ์บางชนิดมีการใช้และไม่มีการใช้ทรายซิลิกาเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.2.4.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง

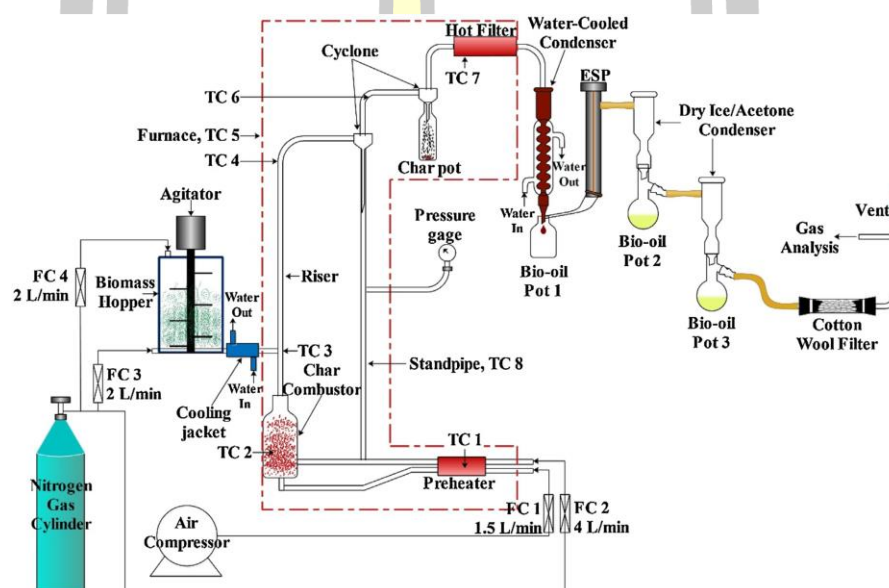
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟองเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็วโดยการสัมผัสกันของชีวมวลกับตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน ส่วนมากจะนิยมใช้ทรายซิลิกากระจายตัวโดยแก๊สที่อยู่ด้านล่าง ส่วนมากเป็นแก๊สเฉื่อยที่ไม่มีออกซิเจน เช่น แก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สหมุนเวียนจากระบบ ทรายถูกยกขึ้นแต่ไม่มากพอที่จะหลุดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อทรายได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ชีวมวลถูกป้อนโดยสกรูที่ติดตั้งกับชุดหล่อเย็น เพื่อให้ชีวมวลที่อยู่ในห่อที่มีอุณหภูมิไม่สูงมากหรือยังไม่เกิดปฏิกิริยา จนชีวมวลถูกป้อนเข้าไปสัมผัสกับทรายร้อน ชีวมวลสลายตัวทางความร้อนโดยอาศัยหลักการนำความร้อนจากทรายและการพาความร้อนของแก๊สเฉื่อยที่มีอุณหภูมิสูง ซึ่งส่วนหนึ่งกลายเป็นไอน้ำ อีกส่วนหนึ่งกลายเป็นถ่านชาร์มีลักษณะสีดำ ไอไพโรไลซิสและถ่านชาร์ถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์ผ่านไซโคลนเพื่อแยกถ่านชาร์ออก ส่วนไอไพโรไลซิสเข้าไปในระบบควบแน่นต่อไป แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าวประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง [5]

2.2.4.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน

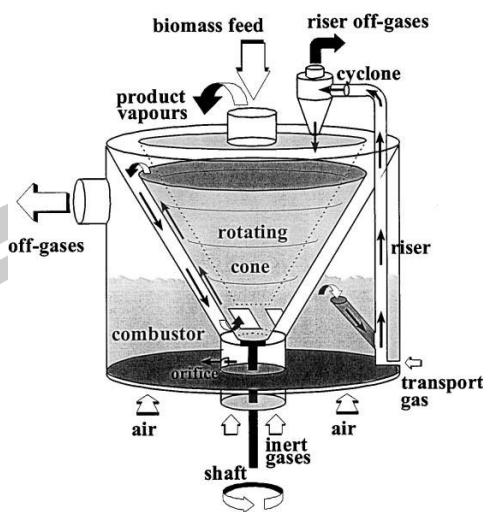
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนวนมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง โดยมีตัวกลางถ่ายโอนความร้อนสัมผัสกับชีวมวลและเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็ว แต่ส่วนที่แตกต่างกันคือ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนวนมีการหมุนวนตัวกลางถ่ายโอนความร้อนกลับมาใช้ใหม่ดังภาพประกอบ 4 หลังจากเผาล่านชาร์ที่ติดกับตัวกลางถ่ายโอนความร้อนออกไปแล้ว ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง



ภาพประกอบ 4 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบหมุนวน [12]

2.2.4.3 เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน

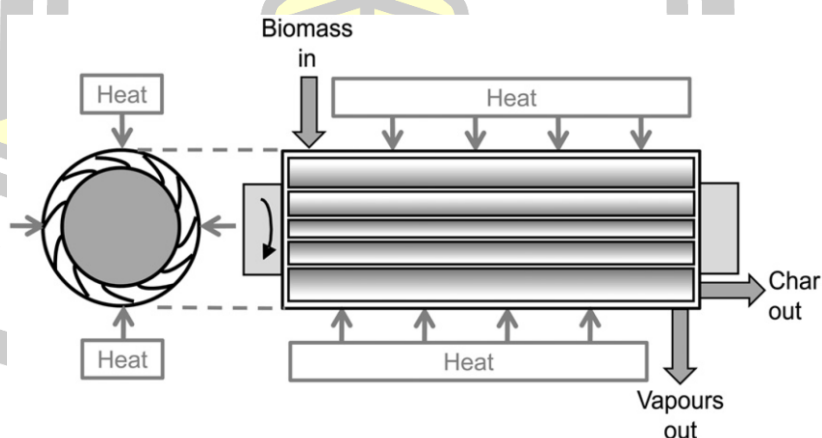
เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุนมีลักษณะการทำงานด้วยการส่งถ่ายแรงเหวี่ยงจากกรวยหมุน โดยชีวมวลและทรายร้อนถูกป้อนเข้าสู่กรวยเพื่อสร้างแรงเหวี่ยงเข้าสู่เครื่อง ส่วนด้านล่างเครื่องจะแยกทรายและถ่านชาร์ออกไปยังห้องเผาไหม้ ทรายที่ถูกเผาจนร้อนและสะอาดจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการดังภาพประกอบ 5 จุดเด่นของเครื่องปฏิกรณ์นี้คือ ทรายและถ่านชาร์ถูกนำไปเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ถ่านชาร์ แล้วนำทรายร้อนกลับมาใช้ใหม่ได้และสามารถรวบรวมผลิตภัณฑ์ได้ง่าย เนื่องจากการออกแบบที่กะทัดรัด ไม่จำเป็นต้องใช้แก๊สพาเหมือนเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ซึ่งเมื่อไม่ใช้แก๊สพา ไอไพโรไลซิสมีความเข้มข้นสูงทำให้การควบแน่นเป็นไปได้ง่าย



ภาพประกอบ 5 เครื่องปฏิกรณ์แบบกรวยหมุน [14]

2.2.4.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดละลาย

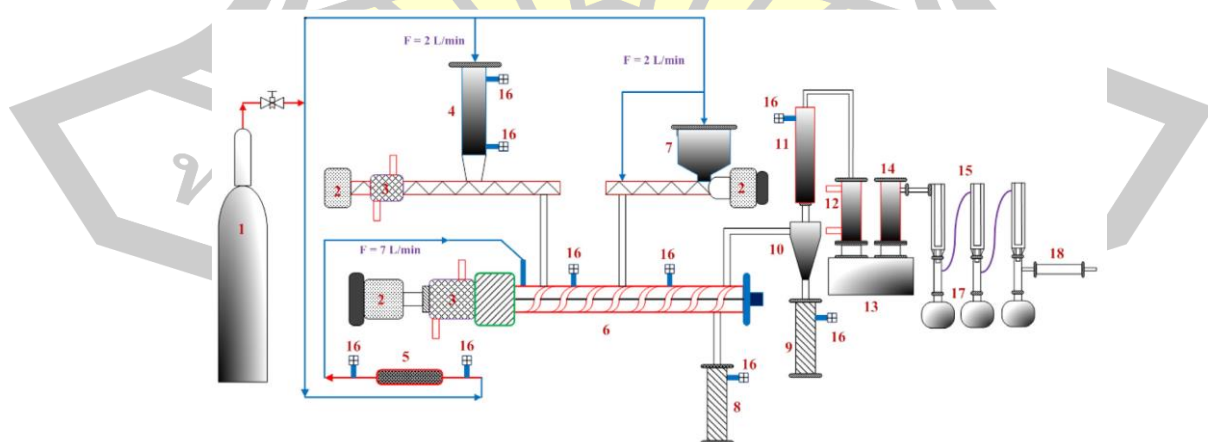
เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดละลายที่มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ภายในมีแกนหมุนที่มีคัลิบหรือแผ่นเหล็กแบน ๆ ที่ทำหน้าที่กดทับอนุภาคชีวมวลลงบนผิวท่อที่มีความร้อน ทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังภาพประกอบ 6 จุดเด่นของเครื่องปฏิกรณ์นี้คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดละลายไม่จำเป็นต้องมีแก๊สเฉื่อยนำพาและสามารถใช้กับชีวมวลที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ต้นทุนในการผลิตไบโอออยล์ต่ำ ส่วนจุดด้อยคือ การขยายขนาดของเครื่องปฏิกรณ์และการควบคุมอุณหภูมิตรงพื้นผิวที่ชีวมวลสัมผัสทำได้ยาก



ภาพประกอบ 6 เครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดละลาย [1]

2.2.4.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู

เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูเป็นอีกเครื่องปฏิกรณ์ชนิดหนึ่งที่ถูกออกแบบมาโดยใช้สกรูทำหน้าที่ลำเลียงชีวมวลในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสภายใน สกรูยังทำหน้าที่เป็นตัวกลางถ่ายโอนความร้อนให้อนุภาคชีวมวลด้วย เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้สามารถใช้หนึ่งสกรูหรือสองสกรูก็ได้ กรณีใช้สองสกรู สกรูอาจหมุนไปในทิศทางเดียวกันหรือทิศทางตรงกันข้ามก็ได้ดังภาพประกอบ 7 เป็นการใส่สกรูคู่เข้าหากัน เพื่อให้สกรูช่วยบีบอัดอนุภาคชีวมวลในทำนองเดียวกันกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดละลาย เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อน นอกจากนี้สามารถใช้ตัวกลางถ่ายโอนความร้อนเพิ่มเติมเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ได้เพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนให้สูงกว่าเดิม โดยตัวกลางถ่ายโอนความร้อนอาจเป็นทรายซิลิกาหรือโลหะชนิดอื่นเช่น เหล็ก สแตนเลส เซรามิก เป็นต้น หัวใจหลักของการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูคือการควบคุมเวลาคงอยู่ของไพอไพโรไลซิสและชีวมวลให้เหมาะสม ซึ่งสามารถควบคุมได้จากการไหลของแก๊สและความเร็วรอบของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนสกรู ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบ สกรูคือ การใช้ปริมาณแก๊สพาที่ต่ำเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไเบด ทำให้เป็นการลดต้นทุนเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการจ่ายแก๊สและอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบแน่นไพอไพโรไลซิสเมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไเบด อย่างไรก็ตามจุดอ่อนที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้คือ การเดินระบบต่อเนื่องเป็นเวลานานและการบำรุงรักษา เนื่องจากอาจมีอนุภาคถ่านชาร์ชีวมวลบางส่วนบดเป็นผงขนาดเล็กติดที่ใบสกรูและผนังท่อปฏิกรณ์ หากมีการสะสมถึงจุดหนึ่งจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาขั้นที่สอง ทำให้ไพอไพโรไลซิสแตกตัวทำให้ไม่สามารถควบแน่นได้และอาจทำให้เกิดการอุดตันทำให้สกรูไม่สามารถหมุนต่อไปได้ ดังนั้นจึงมีการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อกรวงเพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากสกรูเช่น เครื่องปฏิกรณ์อิสระและเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นดังรายละเอียดหัวข้อถัดไป



ภาพประกอบ 7 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู [17]

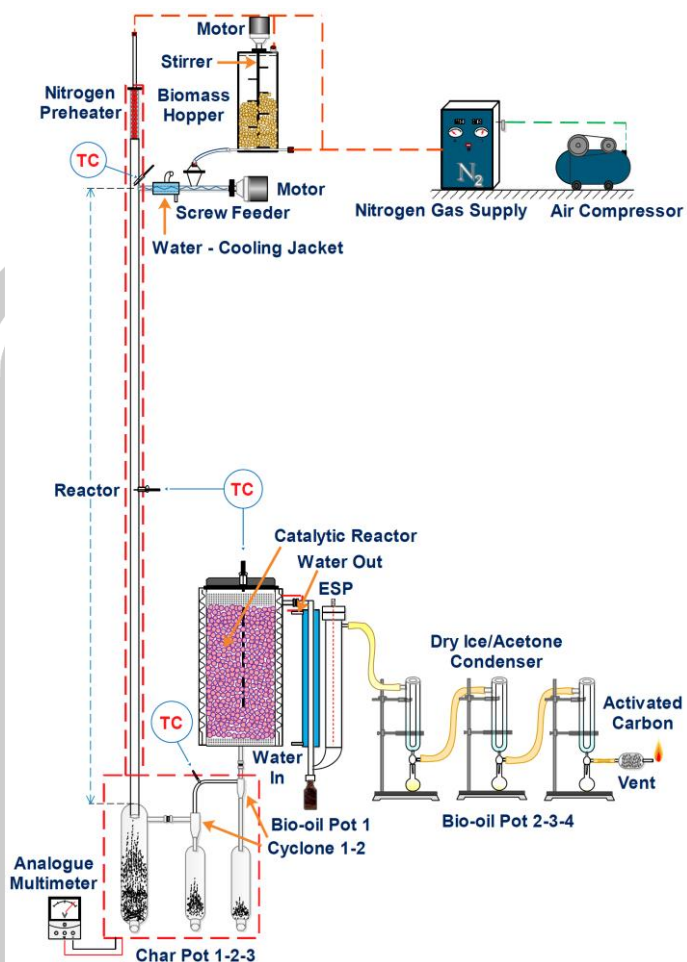
2.2.4.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ

เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระแสดงดังภาพประกอบ 8 เป็นเครื่องที่ทำงานแบบเรียบง่ายไม่ซับซ้อน มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกแนวตั้งง่ายต่อการออกแบบตรงที่การปล่อยชีวมวลให้ตกตามแรงโน้มถ่วงของโลก โดยไม่ต้องใช้ตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนในการแลกเปลี่ยนความร้อน อาศัยความยาวของท่อปฏิกรณ์ในการสลายตัวของชีวมวล ถ่านชาร์จะตกลงไปในถังเก็บถ่านชาร์ นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ ยังใช้ปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่น้อย มีความซับซ้อนน้อย และง่ายต่อการขยายกำลังผลิต

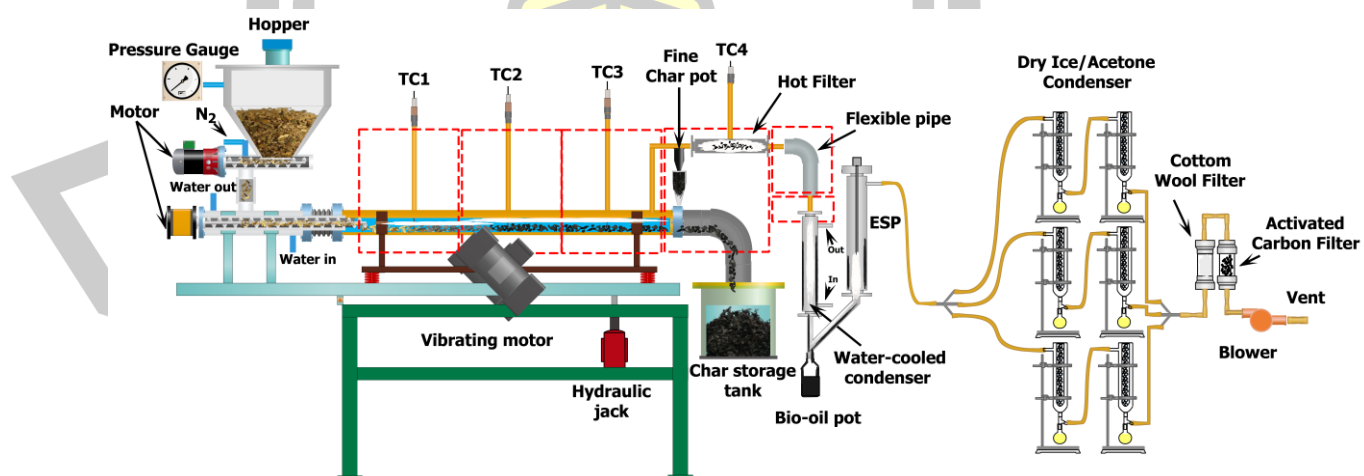
2.2.4.7 เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น

เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นแตกต่างจากเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่นตรงที่ใช้มอเตอร์ในการสั่นเพื่อสร้างแรงสั่นให้มีการกระจายแรงออกไปรอบทิศทาง ทำให้ชีวมวลที่ป้อนเข้าไปเครื่องปฏิกรณ์เกิดการคลุกเคล้ากันและเคลื่อนที่ในเครื่องปฏิกรณ์ การให้ความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำได้จากการใช้ขดลวดความร้อนต่อจากภายนอกถ่ายเทไปยังท่อปฏิกรณ์ ทำให้เกิดการสะสมความร้อนในท่อและนำความร้อนนั้นถ่ายเทไปยังชีวมวลทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนดังภาพประกอบ 9 นอกจากนี้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นยังมีข้อดีคือ ไม่ต้องใช้ตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อน สามารถใช้ชีวมวลที่มีขนาดที่ใหญ่ได้ รวมไปถึงอัตราป้อนชีวมวลและกำลังการผลิตที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น ส่วนเวลาคงอยู่ของของแข็ง สามารถกำหนดได้จากการปรับความถี่จากมอเตอร์สั่นทั้งสองตัวและเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นสามารถนำไปใช้ในกระบวนการทอรรีแฟกชันเพื่อผลิตถ่านทอรรีไฟต์และกระบวนการ ไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อผลิตไบโอออยล์ ส่วนข้อเสียคือ อัตราการให้ความร้อนต่อชีวมวลอาจไม่ดีเท่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดแบบพอง เพราะเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดแบบพอง มีตัวกลางในการถ่ายโอนความร้อนไปยังชีวมวล ทำให้ชีวมวลสลายตัวได้สมบูรณ์ แต่เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นไม่มีตัวกลางถ่ายโอนความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์หลักที่ได้อาจไม่ดีเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดแบบพอง

พหุ ประทีป ชีวะ



ภาพประกอบ 8 เครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ [21]



ภาพประกอบ 9 เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น [24]

2.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนที่ 1 ของแข็งเรียกว่า ถ่านชาร์ (char) ส่วนที่ 2 ของเหลวเรียกว่า ไบโอยล์ (bio-oil) และส่วนที่ 3 แก๊ส (gas) หรือแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (non-condensable gas) โดยมีรายละเอียดของผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้

2.3.1 ถ่านชาร์เป็นของแข็งที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยมีประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 โดยน้ำหนักชีวมวล ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานโดยการอัดแท่งเป็นถ่านก้อน เนื่องจากถ่านที่ผลิตได้สามารถติดไฟได้ง่ายและให้ความร้อนสูง บางครั้งถ่านชาร์ที่ได้สามารถสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติเพื่อผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ และยังสามารถนำไปใช้เป็นสารดูดซับแก๊สพิษได้ ถ่านชาร์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอยล์ลดลงและยังมีผลต่อคุณภาพและเสถียรภาพของไบโอยล์

2.3.2 ไบโอยล์ เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว มีสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำ มีลักษณะเหนียวคล้ายน้ำมันดิบ องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นออกซิเจน ส่วนไบโอยล์เกิดจากการแตกตัวของความร้อนอย่างรวดเร็วของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตามด้วยตามด้วยการควบแน่นอย่างรวดเร็ว ไบโอยล์ที่ผลิตจากชีวมวลต่างชนิดกันจะมีสมบัติที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปไบโอยล์สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำเครื่องยนต์ดีเซล หรือกังหันแก๊ส สมบัติของไบโอยล์ควรผ่านเกณฑ์มาตรฐานของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิส (ASTM D7544-12) ดังตาราง 1

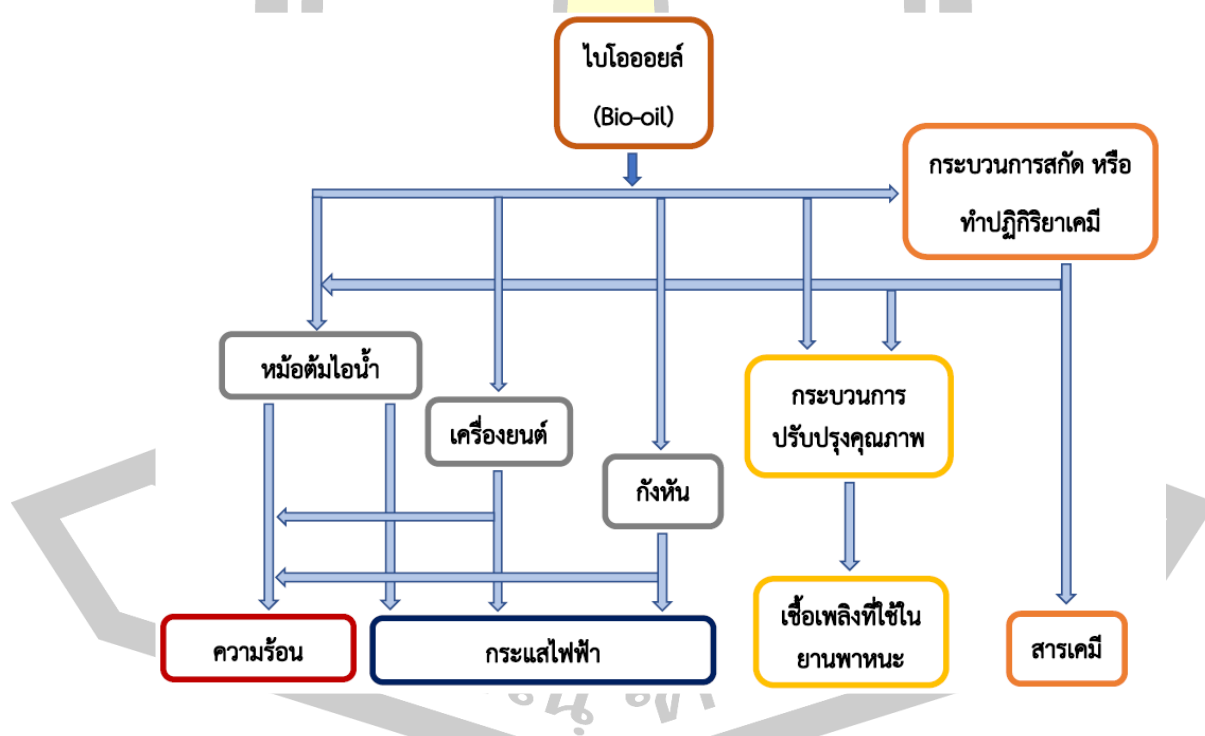
ตาราง 1 ข้อกำหนดมาตรฐานของไบโอยล์ (ASTM D7544-12) [28]

สมบัติ	เกรด G	เกรด D
ค่าความร้อน (MJ/kg)	>15	>15
ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยมวล)	<30	<30
ปริมาณของของแข็ง (ร้อยละโดยมวล)	2.5	0.25
ค่าความหนืด ที่ 40 °C (เซนติสโตกส์)	<125	<125
ค่าความหนาแน่น ที่ 20 °C (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เดซิเมตร)	1.1-1.3	1.1-1.3
ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยมวล)	0.25	0.15

ข้อกำหนดมาตรฐานของไบโอดีเซล (ASTM D7544-12) (ต่อ)

ค่าพีเอช	Report	Report
จุดวาบไฟ °C	>45	>45
จุดไหลเท °C	-9	-9

ไบโอดีเซลสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายดังภาพประกอบ 10 สรุปการใช้งานผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว แสดงให้เห็นว่าไบโอดีเซลสามารถนำมาผลิตเป็นความร้อน กระแสไฟฟ้า เชื้อเพลิงที่ใช้ในยานพาหนะและสารเคมีโดยผ่านอุปกรณ์หรือกระบวนการต่าง ๆ เช่น การนำไบโอดีเซลไปผลิตความร้อนและกระแสไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ คือ หม้อกำเนิดไอน้ำ (boiler) เครื่องยนต์ (engine) หรือ กังหัน (turbine) หากต้องการนำไบโอดีเซลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานพาหนะจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพก่อน และหากต้องการไบโอดีเซลเป็นสารเคมีจำเป็นต้องมีการสกัดหรือผ่านการทำปฏิกิริยาเคมีก่อน เนื่องจากไบโอดีเซลประกอบด้วยสารเคมีหลายชนิดและมีสารประกอบออกซิเจน (oxygenated compounds) ในปริมาณมาก

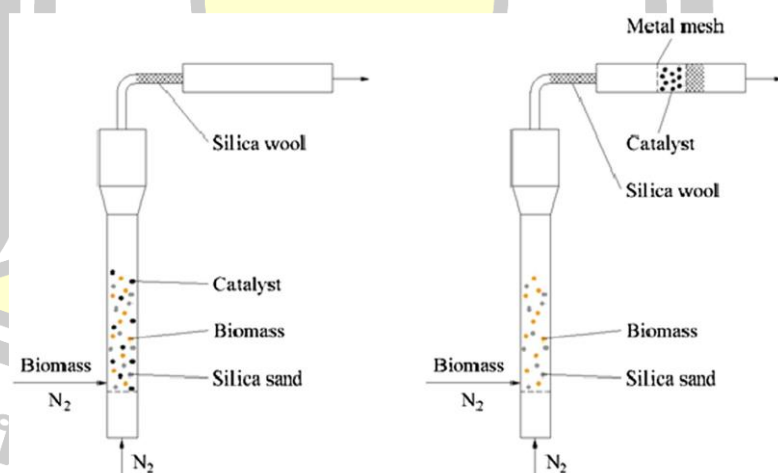


ภาพประกอบ 10 การใช้ประโยชน์ของไบโอดีเซล [29]

2.3.3 แก๊สเป็นผลิตภัณฑ์ที่ 3 ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) และแก๊สไฮโดรคาร์บอน ตั้งแต่ C_1 ถึง C_3 ซึ่งแก๊สเหล่านี้สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการได้บางส่วน หรือสามารถใช้เป็นแก๊สเพื่อไล่ออกซิเจนออกจากกระบวนการในระบบได้และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้สามารถหมุนวนมาใช้เป็นแก๊สเฉื่อยแทนแก๊สไนโตรเจนในกระบวนการได้

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารประกอบทางเคมีที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาจะไม่สูญหายในระหว่างทำปฏิกิริยาหรือไม่เข้าเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์และจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด การเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสให้มีสมบัติที่ดีขึ้น การใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสสามารถทำได้โดยการใส่รวมกับชีวมวลและทรายซิลิกาหรือใส่ลงไปในชุดกรองไอที่อยู่ส่วนท้ายของเครื่องปฏิกรณ์หรืออาจสร้างเครื่องปฏิกรณ์อีกเครื่องแยกออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส เพื่อใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเฉพาะ ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ตัวเร่งปฏิกิริยา (ด้านซ้าย) ในเครื่องปฏิกรณ์ และ (ด้านขวา) นอกเครื่องปฏิกรณ์

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปแบบของสารอนินทรีย์และนิยมนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ปิโตรเลียม ตลอดจนอยู่ในรูปของเอนไซม์ในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

2.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกันกับสารตั้งต้นที่นำมาทำปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาในรูปของสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน และเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์อยู่ในสถานะเดียวกันกับสารตั้งต้นจึงมีข้อดี คือ ประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูง ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำและลดปัญหาการสลายตัวของผลผลิตเนื่องจากปฏิกิริยาอยู่ในภาวะปกติ เช่น ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้มีราคาไม่แพง แต่มีข้อเสีย คือ การแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก อีกทั้งอายุการใช้งานสั้น

2.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะต่างจากสารตั้งต้นที่นำมาทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยามักอยู่ในสถานะของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว ซึ่งเกิดปฏิกิริยากันที่ผิวของตัวปฏิกิริยา ที่สำคัญมักนิยมใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ผลิตกรดซัลฟูริก ปุ๋ย เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์มีข้อดี คือ สามารถแยกสารตั้งต้นกับสารผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย สามารถใช้ได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิหรือความดันสูงได้ มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และอาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้

2.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์คือ การเกิดปฏิกิริยาต้องอาศัยพลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อกระตุ้นให้สารเข้าสู่สภาพเปลี่ยน (transition state) พลังงานที่เพิ่มเข้าไปนี้เรียกว่า พลังงานกระตุ้น (activation energy) ซึ่งปฏิกิริยาเคมีทุกชนิดจะต้องผ่านสภาพเปลี่ยนนี้ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา การที่เอนไซม์สามารถเร่งปฏิกิริยาให้เกิดได้เร็วขึ้นเนื่องจากเอนไซม์จะปลดปล่อยพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นให้สารอยู่ในสภาพเปลี่ยน ทำให้สารที่ทำปฏิกิริยาขึ้นไปอยู่ในสภาพเปลี่ยนได้ง่ายขึ้น โอกาสที่จะได้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาจึงมีมากกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวเร่ง แต่พลังงานของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะไม่เปลี่ยนแปลง

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

2.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

โดโลไมต์ (dolomite catalyst) เป็นแร่โลหะที่มีลักษณะคล้ายกับหินปูน มีลักษณะผิวกเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนหรือเป็นเม็ด มีหลายสีแต่พบบ่อยคือสีขาวและสีเทาตังภาพประกอบ 12 โดโลไมต์มีสูตรทางเคมีคือ $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ มีส่วนประกอบของแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 30.4 แมกนีเซียม 21.7 และคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 47.9 โดยปกติโดโลไมต์มีส่วนสำคัญของ

CaCO_3 ต่อ MgCO_3 ประมาณ 1:1 ถ้ามี ferrous iron เข้ามาแทนที่แมกนีเซียมและมีปริมาณมากกว่าแมกนีเซียมแล้วจะเรียก แองเคอไรต์ (ankerite) ลักษณะเด่นและวิธีตรวจคือ ทำปฏิกิริยากับกรดเกลือ (HCl) แต่ช้ามากในอุณหภูมิธรรมดา นอกจากจะบดเนื้อแร่ให้เป็นก้อนเล็ก ๆ ละเอียด จึงละลายในกรดเป็นฟองฟู หากไม่บดต้องใช้กรด ไฮโดรคลอริกร้อน จึงจะทำปฏิกิริยาเป็นฟองฟู รูปผลึกเหลี่ยมขนมเปียกปูนมักจะโค้งและมีสีออกสีเนื้อ ๆ โดยทั่วไปมีถิ่นกำเนิดเช่นเดียวกับแคลไซต์พบในหินปูนโดโลมิติก (dolomitic limestone) หรือในหินอ่อนโดโลมิติก (dolomitic marble) โดโลไมต์ที่พบมีมวลขนาดใหญ่ นั้นเข้าใจกันว่าเป็นการกำเนิดแบบทุติยภูมิ ซึ่งเกิดจากหินปูนที่มีอยู่เดิมถูกแทนที่ด้วยธาตุแมกนีเซียม หรือพบเกิดเป็นแร่ในสาย แร่ตะกั่วหรือสังกะสีซึ่งตัดผ่านหินปูน นอกจากนี้ยังมีการวิจัยที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ปรับปรุงไบโอดีเซลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้งานช่วยปรับสภาพบ่อที่มีดินเป็นกรดให้เป็นกลางได้ หรือปรับความสกปรกให้ตกตะกอนลงสู่ก้นบ่อทำให้น้ำใสสะอาด และยังสามารถใช้เป็นหินก่อสร้างหรือหินประดับ ทำปูนซีเมนต์บางชนิด ใช้ทำแมกนีเซียซึ่งเป็นวัสดุทนไฟใช้สำหรับการบุเตาถลุงเหล็ก โดยเป็นเตาคอนเวอร์เตอร์ในการผลิตเหล็กกล้าขั้นต้น โดโลไมต์เป็นสินแร่หลักของโลหะแมกนีเซียม ใช้ในอุตสาหกรรมทำแก้วบางชนิด เช่น พวงแก้วแผ่น (special glass) เป็นต้น โดโลไมต์สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ โดยนำมาผ่านกระตุ่นด้วยอุณหภูมิสูง 900 องศาเซลเซียส ทำให้สูตรโครงสร้างเปลี่ยนไปเป็น $\text{CaMg}(\text{O})_2$ โดยโดโลไมต์มีสมบัติเร่งปฏิกิริยาในน้ำมันดินของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน



ภาพประกอบ 12 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

2.5.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์

เวอร์มิคูไลต์ (vermiculite catalyst) เป็นแร่ในกลุ่ม aluminosilicate ชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ คล้ายเกล็ดปลาซ้อนกันหลาย ๆ ชั้นดังภาพประกอบ 13 เวอร์มิคูไลต์เมื่อนำมาเผาที่อุณหภูมิ 760 องศาเซลเซียส เพื่อให้แผ่น aluminosilicate ที่ซ้อนทับกันปริขยายออก

เรียกกระบวนการนี้ว่า exfoliation แร่ที่ผ่านกระบวนการนี้แล้วมีความหนาแน่นรวมลดลงเหลือประมาณ $95 - 145 \text{ kg/m}^3$ ที่ขยายตัวเพิ่มขึ้นมาเมื่อได้รับความร้อน เมื่อขยายตัวจะมีน้ำหนักเบามาก มีปฏิกิริยาเป็นกลาง ด้านทานการเปลี่ยน pH ได้ดี ไม่ละลายน้ำ แต่ดูดน้ำได้ มีความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกสูง สามารถดูดซับธาตุอาหารแล้วค่อย ๆ ปลดปล่อยในภายหลัง เวอร์มิคูไลต์มีธาตุอาหารหลัก คือ โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม



ภาพประกอบ 13 ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์

2.5.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ซีโอไลต์ ZSM-5 (zeolite) คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (crystalline aluminosilicates) หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอมและออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) ดังภาพประกอบ 14 โครงสร้างพื้นฐานเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนทั้งสี่มุม ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง เป็นรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) นอกจากซิลิคอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม และแคลเซียม รวมถึงมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก สามารถต้มให้เดือดระเหยออกไปได้



ภาพประกอบ 14 โครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต [31]

ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปิโตรเคมีต่าง ๆ โดยใช้สมบัติความเป็นกรด เนื่องจากมีโปรตอนในโครงสร้าง เช่น ใช้ในการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาหรือการแตกตัวด้วยไฮโดรเจน (hydrocracking) การเปลี่ยนไอโซเมอร์ การเติมหมู่อัลคิล เป็นต้น การนำซีโอไลต์มาใช้อุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี เช่น กระบวนการไฮโดรแครกกิงเพื่อเพิ่มค่าออกเทนให้กับน้ำมันเชื้อเพลิง โดยมีซีโอไลต์และโลหะแพลเลเดียมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนเมทานอลเป็นน้ำมันแก๊ซลีนที่มีสารประกอบอะโรมาติกสูงขึ้น อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 เป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิดหนึ่งที่มีอนุภาคหยาบมีรูปร่างต่าง ๆ เช่น เม็ดยาว เม็ดสั้นรูปทรงกระบอก และมีโครงสร้างแบบรังผึ้ง มีขนาดของโพรงขนาดกลาง (middle pore zeolite) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและนิยมใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 แสดงดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวแปรในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่าง ๆ

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบพองที่ชีวมวลแตกต่างกัน เศษไม้สน [7] ใบและยอดอ้อย [2] และต้นทิวลิป [6] โดยศึกษาอนุภาคชีวมวล 0.250-1 มิลลิเมตร ใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวลอยู่ในช่วง 49-300 กรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของไนโตรเจน 7-9 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่าได้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์ร้อยละ 40-59 ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ร้อยละ 16-33 และปริมาณผลได้ของแก๊สร้อยละ 11-42

การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิโดซ์เบดแบบหมุนวนของชีวมวลที่แตกต่างกันทั้ง ชี้อ้อย [12] หญ้าเนเปีย [11] และชี้อ้อยและหญ้ามิสแคนดัส [10] โดยศึกษาอนุภาคชีวมวล 0.075-600 มิลลิเมตร ใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวลอยู่ในช่วง 75-100 กรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของไนโตรเจน 7-9 ลิตรต่อนาที แต่งานวิจัย [10] ระบบมีขนาดที่ใหญ่อัตราการป้อนที่ใช้คือ 42 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของแก๊ส 3 เมตรต่อวินาที และใช้โบเวอร์ 19 เฮิร์ตซ์ ผลการทดลองพบว่าได้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์ร้อยละ 36-67 ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ร้อยละ 14-20 และปริมาณผลได้ของแก๊สร้อยละ 15-29

การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบเสียดลละลายของชีวมวลแตกต่างกันทั้ง เศษไม้และแท่งไม้ [16] ชี้อ้อย [15] โดยศึกษาอนุภาคชีวมวล 0.200-1.5 มิลลิเมตร ใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-600 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวลอยู่ในช่วง 600 กรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.8-30 ลิตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่าได้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์ร้อยละ 59-62 ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ร้อยละ 16-18 และปริมาณผลได้ของแก๊สร้อยละ 12-25

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูที่ชีวมวลแตกต่างกันทั้ง เหน้้ำมันสำปะหลัง [17] และไม้เนื้อแข็ง ไม้เนื้ออ่อนและเปลือกไม้เนื้ออ่อน [18] มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตไบโอออยล์ปริมาณสูงที่สุด มีเงื่อนไขการทดลองคือ ใช้ขนาดอนุภาคชีวมวล 0.250-2 มิลลิเมตร อัตราการป้อนชีวมวล 2-4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 4-10 ลิตรต่อนาที แต่งานวิจัยของ [18] ใช้พัดลมดูดอากาศ 2415 rpm และใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400-600 ผลการทดลองพบว่าปริมาณผลได้ไบโอออยล์ร้อยละ 50-53 ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ร้อยละ 21-23 และปริมาณผลได้ของแก๊สร้อยละ 26-27

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระที่ใช้ชีวมวลที่แตกต่างกันทั้ง ไม้ไผ่คี่แดง [19] ใบและยอดอ้อย ก้านมันสำปะหลังและเหง้ามันสำปะหลัง [20] เหน้้ำมันสำปะหลัง [21] และฟางข้าว [22] เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไบโอออยล์ โดยใช้ขนาดอนุภาคชีวมวล

0.200-0.600 มิลลิเมตร อัตราการป้อนชีวมวล 100 กรัมต่อชั่วโมง และ 1-2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 1-5 ลิตรต่อนาที และใช้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 350-700 ผลการทดลองพบว่า ปริมาณผลได้ไบโอเอทิลร้อยละ 40-46 ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ร้อยละ 16-36 และปริมาณผลได้ของแก๊สร้อยละ 24-50

2.6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ โดยศึกษาการใช้ชีวมวลที่แตกต่างกันทั้งต้นทิวลิป [6] ใบอ้อย [32] และแกลบ [33] โดยศึกษาอุณหภูมิในช่วง 400–650 องศาเซลเซียส ในการทดลองใช้เครื่องฟลูอิดไซ์เบดแบบพอง ปริมาณผลได้ของไบโอเอทิลมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณร้อยละ 30–45. โดยมีการศึกษาการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเผาของต้นทิวลิปที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และต้นอ้อยเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง การใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาใส่รวมกับชีวมวลและทรายซิลิกา ผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบปริมาณผลได้ลดลงประมาณร้อยละ 28.77–43.16 ส่งผลให้ค่าความร้อนเพิ่มประมาณ 10–24 (MJ/kg) เป็น 28–29 (MJ/kg) และปริมาณออกซิเจนลดลงจากประมาณร้อยละ 24–36 เป็นร้อยละ 25–29

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 โดยศึกษาการใช้ชีวมวลที่แตกต่างกันทั้งขี้เลื่อย [34] และสาหร่ายคมบุ [35] อุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง 400–500 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดแบบพองในการทดลองและใส่ตัวเร่งปฏิกิริยารวมกับทรายในเครื่องปฏิกรณ์ โดยกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการเผา ขี้เลื่อยเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมงและขนาดชีวมวล 3 ไมโครเมตร และ สาหร่ายคมบุเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 100 กรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 4 ลิตรต่อนาทีและขนาดชีวมวล 180–250 ไมโครเมตร เนื่องจากว่าสาหร่ายคมบุมีสารประกอบอินทรีย์จำนวนมากที่ทำให้เกิดปัญหาในกระบวนการไพโรไลซิส ดังนั้นการนำชีวมวลไปล้างด้วยกรดไนตริก (HNO_3) เพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ เช่น Na Ca K และ Mg ผลการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การใช้ตัวเร่งของขี้เลื่อยให้ปริมาณผลได้ลดลงจากร้อยละ 63 เป็น 46.5 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของสาหร่ายคมบุให้ปริมาณผลได้ลดลงจากร้อยละ 39–45 ที่อุณหภูมิ 400–500 องศาเซลเซียส เป็นร้อยละ 35.37–39.05 ส่งผลให้ค่าความร้อนลดลงเล็กน้อยจาก 28 (MJ/kg) เป็น 27 (MJ/kg) และออกซิเจนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 25 เป็นร้อยละ 25

งานวิจัยของ Abu Bakar, M.S. และ J.O. Titiloye [36] ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ที่มีผลต่อปริมาณสูงที่สุดและสมบัติของไบโอเอทิล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ใช้เครื่องปฏิกรณ์เบตนิ่ง อุณหภูมิในการทดลอง 450 องศาเซลเซียส ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยา

กระตุ้นด้วยการเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้แก๊สฮีเลียมในการพาโดยใช้
อยู่ที่ 30 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ขนาดชีวมวล 355-849 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ให้ปริมาณผลได้ลดลงเล็กน้อยจากร้อยละ 39 เป็นร้อยละ 38 ค่าพีเอชลดลง
จากร้อยละ 3 เป็นร้อยละ 2.74 ส่วนออกซิเจนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 54 เป็นร้อยละ 68 ปริมาณน้ำเพิ่ม
จากร้อยละ 52.6 เป็นร้อยละ 55 และค่าความสูงฐานแห้งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 16 เป็นร้อยละ 30

งานวิจัยของ Hasan Merdun, และ İsmail Veli Sezgin [37] ศึกษาการไพโรไลซิสแบบ
เร่งปฏิกิริยาชีวมวลจากผักที่เหลือในเรือนกระจก ได้แก่ มะเขือเทศ พริกไทย มะเขือ น้ำเต้า และ
แตงกวา โดยนำมาผสมกับถ่านหินและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ แคลไซต์ โดโลไมต์ และ ZSM-5
ในเครื่องปฏิกรณ์ชนิด drop-tube ที่อุณหภูมิ 450 500 และ 550 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สไนโตรเจน
1.45 ลิตร/นาที และใช้ชีวมวลขนาด 0.3-0.5 0.5-1.0 และ 1.0-1.5 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่า
ชีวมวลที่ไม่ผสมกับถ่านหินและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ร้อยละ 40.05 30.79
และ 29.16 ส่วนปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ร้อยละ 41.67 29.55 และ 28.79 ปริมาณผลได้ของแก๊ส
ร้อยละ 38.96 30.88 และ 30.16 เมื่อนำชีวมวลมาผสมกับถ่านหินและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า
ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์, 54.16 22.93 และ 22.92 ส่วนปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ร้อยละ 55.93
21.73 และ 22.34 ปริมาณผลได้ของแก๊สร้อยละ 53.87 23.24 และ 22.90 ในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่า
ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ไม่ส่งผลต่อปริมาณผลได้ต่าง ๆ และองค์ประกอบทางเคมี

2.6.3 สรุป

เห็นได้ว่าการผลิตไบโอออยล์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง
มากมาย ได้แก่ ขนาดอนุภาคชีวมวล อุณหภูมิไพโรไลซิส ชนิดและอัตราการไหลของแก๊สพา เวลาคง
อยู่ของของแข็งและไอไพโรไลซิส และอัตราการป้อนชีวมวล เป็นต้น ตัวแปรเหล่านี้มีการศึกษามาก
มากในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดต่าง ๆ แล้ว แต่ยังไม่มีการศึกษาตัวแปรเหล่านี้ใน
เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้น

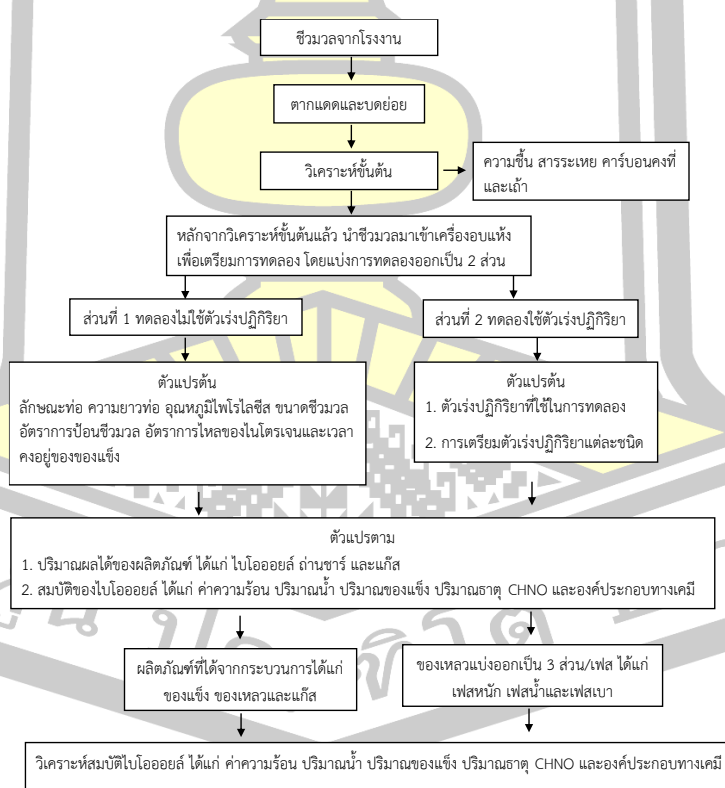
ถึงแม้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 เป็นตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดแต่ด้วยราคาที่
ค่อนข้างสูงหากนำมาใช้เพียงชนิดเดียวต้องใช้ต้นทุนที่สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้หาตัวเร่งปฏิกิริยา
ธรรมชาติที่สามารถหาได้ในประเทศมาเทียบกับ ZSM-5 ได้แก่ โดโลไมต์และเวอร์มิคูไลท์ นำมาใช้ใน
กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น
อีกทั้งตัวเร่งปฏิกิริยายังใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่แยกออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเพื่อป้องกันการ
เสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 16 เริ่มต้นโดยนำชีวมวลที่ได้จากโรงงานมาตากแดดเพื่อลดความชื้น จากนั้นนำชีวมวลที่แห้งมาลดขนาดลงโดยการบดย่อยและคัดขนาดตามที่กำหนดไว้ แล้วนำชีวมวลที่บดแล้วส่วนหนึ่งมาวิเคราะห์ขั้นต้น เพื่อปริมาณน้ำหรือความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงที่ และเถ้า ส่วนหนึ่งนำมาหาค่าความร้อน ต่อบำชีวมวลมาอบโดยใช้เตาอบเพื่อลดความชื้นอีกครั้ง การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องนำมากะตุ้นก่อนเตรียมก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาได้กำหนดไว้ในวัตถุประสงค์ จากนั้นเริ่มทำการทดลองและเก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองทั้ง 2 ส่วนและนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ



ภาพประกอบ 16 ภาพรวมของการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเตรียมชีวมวล

ในงานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบชีวมวลคือ ไม้กระถินยักษ์จากโรงงานไฟฟ้าชีวมวล บริษัท กมลลาไสย ไบโอ เพาเวอร์ 2010 จำกัด ตำบลกมลลาไสย อำเภอกมลลาไสย จังหวัดกาฬสินธุ์ ซึ่งรับซื้อมาจากเกษตรกร แต่มีลักษณะเป็นท่อนที่ใหญ่เกินไปที่จะนำไปใช้ในการทดลอง จึงให้โรงงานนำชีวมวลไปบดในเครื่องบดใหญ่เพื่อมีขนาดลดลงดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 17 ชีวมวลจากโรงงาน (ซ้าย) ก่อนเข้าเครื่องบด และ (ขวา) หลังบดจากเครื่องบด

อย่างไรก็ตามชีวมวลที่บดจากโรงงานยังมีขนาดที่ใหญ่และมีความชื้นสูง ดังนั้นก่อนนำไปใช้ในการทดลองต้องนำไปผ่านการเตรียมก่อน เพื่อลดขนาดชีวมวลให้เหมาะสมกับเครื่องปฏิกรณ์ โดยเริ่มจากนำวัตถุดิบไปตากแดดเพื่อลดความชื้นดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 การตากชีวมวลจากโรงงาน

เมื่อตากชีวมวลแห้งแล้วนำมาบดโดยใช้เครื่องบดหยาบและเครื่องบดละเอียดดัง
ภาพประกอบ 19 (ก) และ (ข) เพื่อให้ได้ขนาดที่ลดลงและละเอียดขึ้นต่อด้วยเข้าเครื่องคัดขนาด
อนุภาคเพื่อคัดขนาดชีวมวล (ค) นำไปอบด้วยเตาอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (ง) เมื่อเสร็จแล้วเก็บใส่ภาชนะปิดเพื่อป้องกันความชื้นและเครื่องชั่งดิจิทัลแสดง
ดัง (จ) เพื่อชั่งชีวมวลที่ใช้ในการทดลองและชั่งชุดควบแน่นด้วยน้ำ ชุดดักจับไฟฟ้าสถิตและชุด
ควบแน่นแอสไทอน



ภาพประกอบ 19 อุปกรณ์เตรียมชีวมวล

3.3 การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

สมบัติของชีวมวลมีความสำคัญต่อการออกแบบอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ
ที่ใช้ ชีวมวล เช่น การจัดเก็บ การขนส่ง การแปลงสภาพเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ และความร้อน สมบัติ
ชีวมวลแบ่งได้เป็น การวิเคราะห์ขั้นต้น (proximate analysis) การวิเคราะห์ขั้นสูง (ultimate
analysis) ค่าความร้อน (heating value) และความหนาแน่น (density) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ

เป็นการวิเคราะห์ชีวมวลเพื่อหาปริมาณ ความชื้น (moisture) สารระเหย (volatile
matter) เถ้า (ash) และคาร์บอนคงที่ (fixed carbon) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1.1 การหาปริมาณความชื้นตามมาตรฐาน ASTM 871-82 เริ่มจากการเตรียม
ชีวมวลไปเข้าเครื่องบด นำไปร่อนในตะแกรงร่อนให้มีขนาดในช่วง 0.212-0.600 มิลลิเมตร และนำ
ชีวมวลตัวอย่าง 1 กรัม บรรจุลงในถ้วยกระเบื้องแล้วนำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักเริ่มต้น จากนั้นนำเข้า
เตาอบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักที่หายไปคือปริมาณ
ความชื้น

3.3.1.2 การหาปริมาณสารระเหยตามมาตรฐาน ASTM E 872-82 โดยการนำชีวมวลที่
มี น้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในถ้วยกระเบื้องแล้วนำเข้าเตาเผาแล้วเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 20 องศาเซลเซียส

เป็นเวลา 7 นาที นำถ้วยกระเบื้องตัวอย่างเข้าโถดูดความชื้นเพื่อรอให้ตัวอย่างเย็นแล้วนำมาชั่งหาน้ำหนักของของแข็งหลังจากการเผา ซึ่งน้ำหนักที่หายไปคือสารระเหย

3.3.1.3 การหาปริมาณเถ้าในชีวมวลทำได้ตามมาตรฐาน ASTM E 1755-01 โดยการนำถ้วยกระเบื้องจากขั้นตอนการหาสารระเหยใส่เข้าไปในเตาเผาที่อุณหภูมิ 575 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำเข้าโถดูดความชื้นเพื่อรอให้ตัวอย่างเย็นแล้วนำมาชั่งหาน้ำหนักของของแข็งหลังการเผาและเผาตัวอย่างเป็นเวลาทุก ๆ 1 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งให้น้ำหนักเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ± 0.3 มิลลิกรัม จากน้ำหนักก่อนเผาครั้งก่อน โดยทุกครั้งที่ชั่งน้ำหนักต้องนำเข้าโถดูดความชื้นเพื่อรอให้ตัวอย่างเย็นตัวลงก่อน

3.3.1.4 การหาปริมาณคาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) สามารถหาได้โดยใช้ผลต่างของปริมาณเถ้าปริมาณสารระเหย และปริมาณน้ำ สามารถคำนวณปริมาณคาร์บอนคงที่ได้ดังสมการที่ 1

$$\text{คาร์บอนคงที่} = 100 - \text{ความชื้น (\%)} - \text{ปริมาณสารระเหย (\%)} - \text{ปริมาณเถ้า (\%)} \quad (1)$$

3.3.2 การวิเคราะห์ขั้นสูง

การวิเคราะห์ขั้นสูงหรือการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์แร่พื้นฐาน Truspec CHN/CHNS จากศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี โดยหลักการการทำงานของเครื่องมือหาปริมาณของธาตุด้วยการเผาไหม้อย่างรวดเร็ว (flash combustion) เพื่อเปลี่ยนธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในตัวอย่างเปลี่ยนเป็นแก๊สที่สัมพันธ์กับธาตุนั้น ๆ ที่มีสัดส่วนแน่นอน เช่น ธาตุไนโตรเจนถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจน ธาตุคาร์บอนถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และธาตุไฮโดรเจนถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ จากนั้นแยกแก๊สผสมออกจากกันเพื่อหาปริมาณแก๊สแต่ละชนิด

3.3.3 ค่าความร้อน

ค่าพลังงานความร้อนสูงของไบโอยล์และถ่านชาร์ (higher heating value of bio-oil and char) วิเคราะห์ตามมาตรฐาน DIN 51900 โดยใช้เครื่องบอมม์ค่าโลรีมิเตอร์ รุ่น CAL3K-AP วิธีการวิเคราะห์คือ ชั่งน้ำหนักตัวอย่างไบโอยล์หรือถ่านชาร์ประมาณ 1 กรัม แล้วใส่ลงในถ้วยเผาไหม้จากนั้นวางถ้วยเผาไหม้ลงในถ้วยบอมม์ ลูกบอมม์จะอัดก๊าซออกซิเจนเข้าโดยอัตโนมัติและความดันภายในจะถูกควบคุมโดยที่แรงอัดออกซิเจนสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการโปรแกรมแรงดันออกซิเจนจะถูกบันทึกไว้ระหว่างการจุดระเบิดและเส้นกราฟความดันจะถูกควบคุมและวิเคราะห์และสามารถรู้ถึงสภาวะการสันดาปภายใน เมื่อวิเคราะห์เสร็จหน้าจอแสดงค่าความร้อนที่ได้ทันที

3.3.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นสามารถวิเคราะห์ได้ 2 แบบ ได้แก่ ความหนาแน่นรวม (bulk density) และความหนาแน่นอนุภาค (particle density) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.4.1 ความหนาแน่นรวม (bulk density) วิเคราะห์โดยใส่ตัวอย่างลงไปในการบด ตวง 60 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าเบา ๆ ห้ามอัดแน่นแล้วนำไปชั่งน้ำหนักตัวอย่าง ความหนาแน่นรวม สามารถคำนวณได้จากสมการ 2

3.3.4.2 ความหนาแน่นอนุภาค (particle density) วิเคราะห์แบบเดียวกันกับความ หนาแน่นรวม แต่เพิ่มการเติมเอทานอลเข้าไปแทนที่ช่องว่างของตัวอย่าง โดยนำเอทานอลมาตวงหา ปริมาตรก่อนจากนั้นเติมเอทานอลลงไปในการบดตวงที่มีตัวอย่างบรรจุอยู่ โดยสังเกตระดับของ เอทานอลและตัวอย่างห้ามมีปริมาตรสูงเกิน 60 มิลลิลิตร ความหนาแน่นอนุภาคสามารถคำนวณได้ จากสมการ 3

$$\text{Bulk density} = (M(g)/V_1 \text{ (ml)}) \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2)$$

$$\text{particle density} = (M(g)/V_1 - V_2 \text{ (ml)}) \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3)$$

เมื่อ M = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)
 V_1 = ปริมาตรกระบอกตวง (ml)
 V_2 = ปริมาตรของเอทานอล (ml)

ในการวิจัยนี้ได้นำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้ปรับปรุงสมบัติของไบโอเอทิลในกระบวนการ ไพโรไลซิสแบบเร็ว ได้แก่ โดโลไมต์ เวอร์มิคูไลต์ และ ZSM-5 ดังตาราง 2 โดยใช้วิธีการกระตุ้นด้วย การเผาเริ่มจากนำตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด มาทำการคัดแยกส่วนที่เป็นฝุ่นออกก่อน โดยการด้วย เครื่องร่อนมาตรฐาน จากนั้นนำตัวเร่งที่ได้มาใส่ภาชนะที่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้และนำเข้าเตาเผา ดังภาพประกอบ 20 เตาเผา

ตาราง 2 สภาวะที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	อุณหภูมิกระตุ้น (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อ้างอิง
โดโลไมต์	900	4	[6]
เวอร์มิคูไลท์	900	5	[21]
ZSM-5	550	5	[35, 38]

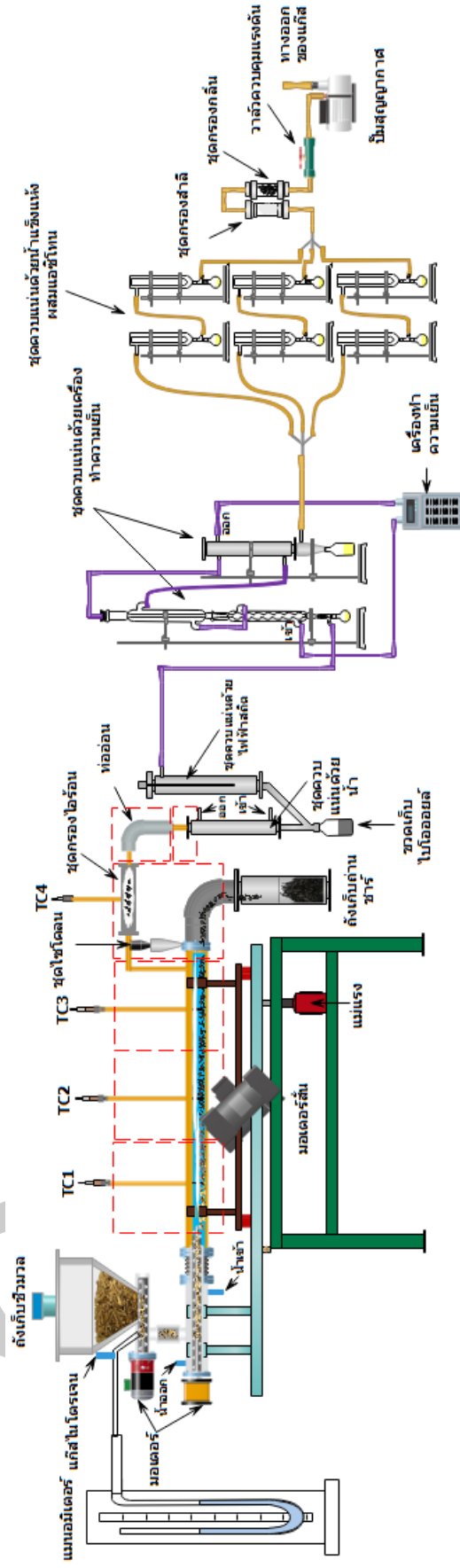


ภาพประกอบ 20 เตาเผา

3.4 อุปกรณ์และวิธีการทดลองไพโรไลซิสแบบเร็ว

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อหาปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ที่เหมาะสมโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดัง

ภาพประกอบ 21 เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ถังเก็บชีวมวล ชุดวัดความดันในระบบหรือบาร์โอมิเตอร์ ถังเก็บถ่านชาร์ มอเตอร์สกรู ท่อปฏิกรณ์หลัก ชุดกรองไอร้อน ไซโคลน ท่อเฟล็กซ์ มอเตอร์สั่น ชุดควบแน่นด้วยน้ำ ชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิต ชุดความแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นและกรณีที่ 2 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 21 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นเมื่อใช้ชุดแรงปฏิบัติการ

3.4.1 ถังเก็บชีวมวล

ถังเก็บชีวมวลเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บชีวมวลที่ผ่านการคัดขนาดและการอบแห้ง เพื่อเตรียมป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ถังเก็บชีวมวลทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304

ดัง

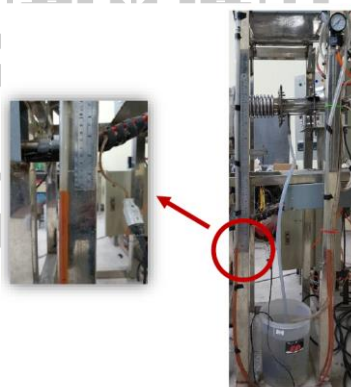
ภาพประกอบ 22 ฝาปิดด้านบนทำมาจากอะคริลิกใสที่สามารถมองเห็นชีวมวลที่อยู่ในถังเก็บ ชีวมวลได้ ส่วนด้านบนยังได้ติดตั้งมอเตอร์ใบกวนชีวมวลและด้านข้างของถังเก็บมีทางเข้าสำหรับไว้ใส่ไนโตรเจนให้กับระบบ 1 จุดและติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊สเพื่อควบคุมการไหลของแก๊สไนโตรเจนเข้าระบบ



ภาพประกอบ 22 ถังเก็บชีวมวลและเครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส

3.4.2 ชุดวัดความดันในระบบหรือแมนอมิเตอร์

ชุดวัดแรงดันในระบบแสดงดังภาพประกอบ 23 โดยใช้สายยางใสขนาดเส้นศูนย์กลางภายใน 0.9 เซนติเมตร หนา 0.1 เซนติเมตร ทำหน้าที่วัดความดันของแก๊สขาเข้าเทียบกับความดันบรรยากาศ ค่าความดันที่ออกมาเป็นค่าความดันเกจที่มีเกจวัดความดันติดอยู่ สำหรับการวัดความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบใช้ของเหลวสัมผัสโดยตรงกับอากาศในการทดลองใช้ส่วนผสมอาหารผสมกับน้ำ



ภาพประกอบ 23 ชุดวัดความดันในระบบ

3.4.3 ถังเก็บถ่านชาร์

ถังเก็บถ่านชาร์เป็นอุปกรณ์สำหรับเก็บถ่านชาร์ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ดังภาพประกอบ 24 วัสดุทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ถังเก็บถ่านชาร์มีปริมาณ 4 ลิตร ที่ตำแหน่งด้านบนของถังเก็บมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.32 เซนติเมตร หนา 0.15 เซนติเมตร



ภาพประกอบ 24 ถังเก็บถ่านชาร์

3.4.4 มอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนสกรู

มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูใช้เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนสกรูเพื่อลำเลียงชีวมวล ประกอบด้วยมอเตอร์ 2 ตัว ดังภาพประกอบ 25 โดยมอเตอร์ (ซ้าย) ติดตั้งต่อกับถังเก็บชีวมวลทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับสกรูที่อยู่ภายในถังเก็บชีวมวล เพื่อป้อนชีวมวลลงมายังมอเตอร์ที่ติดตั้งต่อกับท่อปฏิกิริยา มอเตอร์นี้ใช้เฟืองกระแสน้ำมีชุดทดกำลังและปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งมีไว้สำหรับควบคุมอัตราการป้อนของชีวมวล เนื่องจากขนาดชีวมวลที่ใช้ในการทดลองมีขนาดใหญ่ ซึ่งในระหว่างการทดลองชีวมวลอาจติดที่สกรูได้ ดังนั้นต้นกำลังควรที่จะมีแรงบิดที่สูง ส่วนมอเตอร์ (ขวา) ติดตั้งต่อกับท่อปฏิกิริยาทำหน้าที่เป็นต้นกำลังให้กับสกรูเพื่อป้อนชีวมวลเข้าไปยังท่อปฏิกิริยา มอเตอร์นี้ใช้เฟืองกระแสน้ำสามารถปรับความเร็วรอบได้และเป็นมอเตอร์ประเภทรอบเร็ว



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 25 มอเตอร์ขับเคลื่อนสกรู (ก) ลำเลียงชีวมวล และ (ข) ติดตั้งต่อกับท่อปฏิกรณ์

3.4.5 ท่อปฏิกรณ์หลัก

ท่อปฏิกรณ์แสดงดังภาพประกอบ 26 เป็นอุปกรณ์หลักทำหน้าที่ถ่ายโอนความร้อนไปยังชีวมวลที่ถูกป้อนเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาในระหว่างกระบวนการ ซึ่งความร้อนได้รับมาจากขดลวดความร้อนหรือพลังงานความร้อนรูปแบบอื่น เช่น การใช้แก๊สปิโตรเลียมเหลว ในการทดลองนี้ใช้ท่อท่อปฏิกรณ์ 2 ชนิด ได้แก่ ท่อสแตนเลสสตีลและท่อทรงกระบอก โดยท่อสแตนเลสสตีลทำมาจากเหล็กกล้า 6 เซนติเมตร ความสูง 3 เซนติเมตร หนา 0.2 เซนติเมตร และยาว 150 เซนติเมตร ส่วนท่อทรงกระบอกทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.32 เซนติเมตร หนา 0.15 เซนติเมตร และยาว 150 เซนติเมตร ที่ด้านบนของท่อปฏิกรณ์มีท่อสำหรับเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลที่เอาไว้สำหรับวัดอุณหภูมิของชีวมวลที่อยู่ภายในท่อปฏิกรณ์มีทั้งหมด 3 ตำแหน่งและส่วนท้ายของท่อปฏิกรณ์มีท่อเชื่อมกับไซโคลน ชุดกรองไอน้ำและท่อเฟล็กซ์ที่สามารถยืดหยุ่นได้เพื่อรองรับแรงสั่นสะเทือนที่ส่งถ่ายมาจากมอเตอร์สั่น



ภาพประกอบ 26 ท่อปฏิกรณ์ (ซ้าย) ท่อสวีสเปลี่ยนผืนผ้า และ (ขวา) ท่อทรงกระบอก

3.4.6 ชุดไซโคลน ชุดกรองไอร้อนและท่อเฟล็กซ์

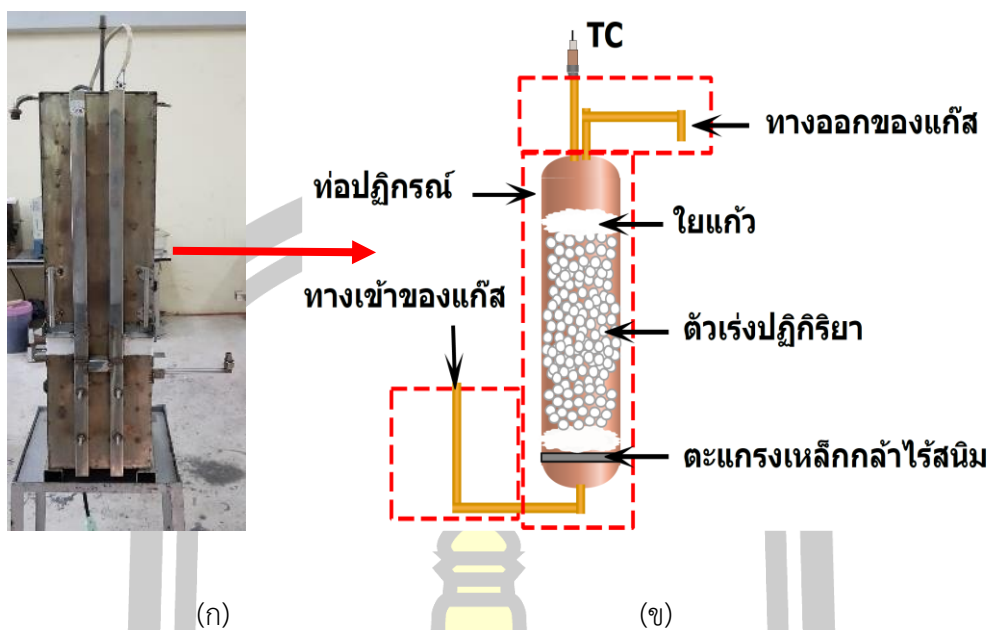
ชุดไซโคลน ชุดกรองไอร้อนและท่อเฟล็กซ์ดังภาพประกอบ 27 โดยชุดไซโคลนทำหน้าที่แยกถ่านชาร์ออกจากระบบไพโรไลซิสแบบเร็ว ใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางทำให้กระแสแก๊สหมุนวนทำให้แยกอนุภาคถ่านชาร์ออกจากแก๊สได้ ถัดจากชุดไซโคลนคือชุดกรองไอร้อนทำหน้าที่กรองอนุภาคของถ่านชาร์เล็ก ๆ ที่ไซโคลนไม่สามารถแยกออกได้ซึ่งช่วยลดการปนเปื้อนของถ่านชาร์ในไบโอออยล์ได้ ภายในบรรจุด้วยใยแก้ว (glass wool) ที่มีสมบัติทนความร้อนได้ดี โดยชุดกรองไอร้อนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.8 เซนติเมตร ยาว 20 เซนติเมตร ถัดจากชุดกรองไอร้อนคือท่อเฟล็กซ์ทำหน้าที่ลดแรงสั่นสะเทือนจากเครื่องปฏิกรณ์หลักไปยังชุดความแน่น โดยท่อเฟล็กซ์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.9 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร



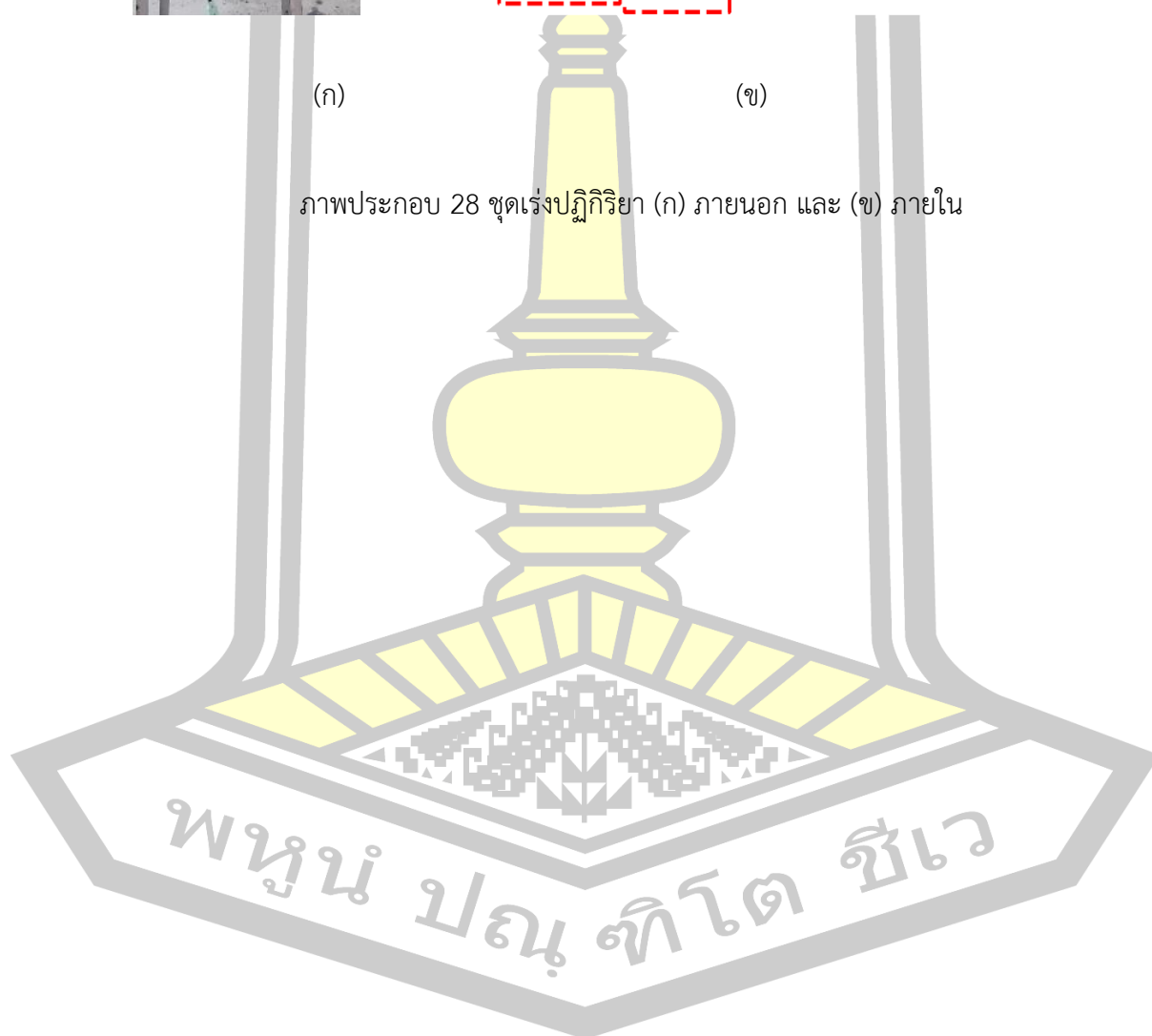
ภาพประกอบ 27 ชุดไซโคลน ชุดกรองไอร้อนและท่อเฟล็กซ์

3.4.7 ชุดเร่งปฏิกิริยา

ชุดเร่งปฏิกิริยาดังภาพประกอบ 28 ซึ่งแยกออกจากเครื่องปฏิกรณ์หลักต่อจากท่อเฟล็กซ์ดังภาพประกอบ 29 โดยมีลักษณะเป็นห้องสวีสเปลี่ยนผืนผ้าภายในมีท่อปฏิกรณ์ทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9.8 เซนติเมตร หนา 0.15 เซนติเมตร สูง 75 เซนติเมตร การให้ความร้อนให้โดยใช้ชุดลดความร้อนรอบ ๆ ท่อปฏิกรณ์ ชุดเร่งปฏิกิริยานี้มีหน้าที่ทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ทำให้เกิดการแตกตัวของแก๊ส เช่น คีโอกซิเจน (deoxygenation)



ภาพประกอบ 28 ชุดเร่งปฏิกิริยา (ก) ภายนอก และ (ข) ภายใน



3.4.8 มอเตอร์สั่น

มอเตอร์สั่น รุ่น ZW-3.5 แสดงดังภาพประกอบ 30 เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่สร้างแรงสั่นสะเทือนเพื่อส่งถ่ายกำลังไปยังท่อปฏิกรณ์ ซึ่งแรงสั่นสะเทือนนี้เมื่อส่งถ่ายไปยังท่อปฏิกรณ์แล้วจะทำให้ชีวมวลที่อยู่ภายในท่อปฏิกรณ์เกิดการเคลื่อนที่ขึ้นลงและเคลื่อนที่จากท่อปฏิกรณ์ไปยังถังเก็บถ่านชาร์ที่อยู่ปลายทางออกของท่อปฏิกรณ์



ภาพประกอบ 30 มอเตอร์สั่น

3.4.9 ชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำ ชุดดักจับไฟฟ้าสถิตและชุดควบคุมแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น

ชุดควบคุมแน่นเป็นอุปกรณ์ใช้สำหรับควบคุมแน่นแก๊สที่เกิดจากกระบวนการประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำ ชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตและชุดควบคุมแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นดังภาพประกอบ 31 ชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมประกอบด้วยท่อ 2 ชั้น ชั้นด้านในมีไว้สำหรับให้แก๊สที่เกิดจากกระบวนการไหลผ่าน และชั้นต่อมามีไว้สำหรับหล่อเย็นด้วยน้ำเพื่อลดอุณหภูมิของแก๊สที่เกิดจากกระบวนการ ชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำนี้มีทางเข้าของน้ำที่ด้านล่างและมีทางออกของน้ำที่ด้านบน ส่วนชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตเป็นอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับดักจับไอที่เกิดจากกระบวนการที่ชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำไม่สามารถดักจับได้ ส่วนชุดควบคุมแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นใช้ 2 ชุดต่อจากชุดดักจับไฟฟ้าสถิตทำหน้าที่ควบคุมแน่นไอที่อุณหภูมิ -17 ถึง -20 องศาเซลเซียส ที่ชุดดักจับไฟฟ้าสถิตไม่สามารถดักได้ใช้สารทำความเย็นเป็นเอทานอลร้อยละ 95 และส่วนสุดท้ายคือชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตนที่อุณหภูมิ -70 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ควบคุมแน่นไบโอออยล์อีกชั้นหนึ่ง



ภาพประกอบ 31 ชุดควบคุมแรงดัน ได้แก่ ชุดควบคุมแรงดันด้วยน้ำและชุดดักจับไฟฟ้าสถิต เครื่องทำความเย็น ชุดควบคุมแรงดันด้วยเครื่องทำความเย็น (ชุดคอยล์เย็น) และชุดควบคุมแรงดันน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตน

3.4.10 ปัมสุญญากาศ

ปั๊มสุญญากาศโดยปกติแล้วเป็นอุปกรณ์สำหรับดูดอากาศและความชื้นออกจากห้องปิดเพื่อทำให้เกิดเป็นสุญญากาศและยังช่วยลดความดัน โดยในงานวิจัยนี้ได้นำปั๊มสุญญากาศดังภาพประกอบ 32 มาช่วยดูดด้วยเนื่องจากถ้าไม่ใช้ปั๊มสุญญากาศจะต้องใช้แก๊สไนโตรเจนที่สูงเพื่อนำพาไอไฟโรไลซิสไปควบแน่นให้เร็ว ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตไนโตรเจน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าหากสามารถทำให้ไอไฟโรไลซิสไปควบแน่นให้เร็วแต่ใช้แก๊สพาทิน้อย อาจทำให้ปริมาณผลได้เพิ่มขึ้นและยังช่วยลดการใช้แก๊สไนโตรเจนอีกด้วย ปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในการทดลองยี่ห้อ VALUE Model VE125N ขนาด 318x124x234 มิลลิเมตร ดูดอากาศได้ 70 ลิตรต่อนาที

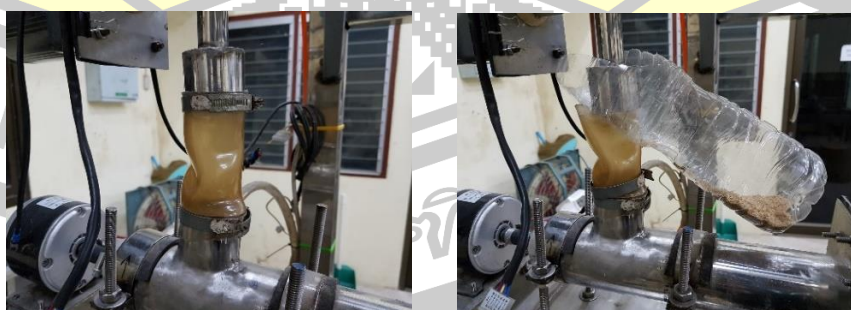


ภาพประกอบ 32 ปัมป์สุญญากาศและวาล์วปรับความดัน

3.4.11 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.4.11.1 อัตราป้อนชีวมวลสามารถหาได้จากการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูที่ติดกับถังเก็บชีวมวลเพื่อลำเลียงชีวมวลให้ตกลงมายังมอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูที่ติดกับเครื่องปฏิกรณ์ แต่ระหว่างมอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูทั้ง 2 มีท่ออย่างรัดไว้เพื่อดูชีวมวลที่ตกลงมา ท่ออย่างนี้สามารถถอดออกได้ โดยนำขวดพลาสติกมาลองรับชีวมวลที่ตกลงมาดังภาพประกอบ 33 จากนั้นเริ่มจับเวลา 1 นาที เมื่อเสร็จแล้วเอาไปชั่งน้ำหนักคุณ 60 (นาท) ได้อัตราป้อน (กรัม/นาท) ถ้าต้องการทำเป็นชั่วโมงให้คุณด้วย 60 (นาท) ก็ได้อัตราป้อน (กรัม/ชั่วโมง) แต่หากอัตราป้อนที่หาอย่างไม่ตรงตามความต้องการที่ใช้ในการทดลองให้ควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนสกรูที่ติดกับถังเก็บชีวมวลและเริ่มจับเวลาใหม่อีกครั้ง ทำแบบนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้อัตราป้อนที่ต้องการ



ภาพประกอบ 33 ท่ออย่างระหว่างมอเตอร์สกรู (ซ้าย) ยังไม่เปิดท่ออย่าง และ (ขวา) เปิดท่ออย่างและนำขวดพลาสติกมาลองรับชีวมวล

3.4.11.2 เตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ ชีวมวล ชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำ ชุดดักจับไฟฟ้าสถิต ชุดควบคุมแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นและชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งมาซึ่งน้ำหนักหาปริมาณแล้ว บันทึกค่า

3.4.11.3 นำชีวมวลที่ผ่านการอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักและใส่ลงในถังป้อนชีวมวล

3.4.11.4 ทำการเปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นตำแหน่งสกรูป้อนชีวมวลและตำแหน่งชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำ การเปิดวาล์วน้ำหล่อเย็นที่ตำแหน่งสกรูป้อนชีวมวล เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสลายตัวก่อนถึงตำแหน่งเครื่องปฏิกรณ์และที่ตำแหน่งชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำเพื่อให้ไอไฟโรไลซิสเกิดการควบแน่น

3.4.11.5 ทำการจ่ายไฟฟ้า 220 โวลต์ ให้ชุดลดความร้อนเพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์ ชุดไซโคลน ตัวกรองไอร้อน และข้อต่อหรือท่อลำเลียงต่าง ๆ มีอุณหภูมิที่ต้องการ

3.4.11.6 เปิดวาล์วแก๊สไนโตรเจนที่ตำแหน่งสกรูป้อนชีวมวลและถังเก็บถ่านชาร์ เพื่อทำการไล่แก๊สออกซิเจนออกจากระบบ แล้วทำการปรับชุดควบคุมการไหลของแก๊สไนโตรเจนทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของแก๊สในระบบอย่างต่อเนื่อง แต่การเปิดวาล์วแก๊สไนโตรเจนในระบบนั้นอาจทำให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ลดลง เพราะแก๊สไนโตรเจนจากตำแหน่งสกรูป้อนชีวมวลและถังชีวมวลนั้นไม่มีชุดอุ่นแก๊สจึงจำเป็นต้องรอให้อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์คงที่ถึงอุณหภูมิที่ต้องการก่อนทำการป้อนชีวมวล

3.4.11.7 หลังจากรอให้อุณหภูมิคงที่แล้ว ทำการเปิดชุดควบคุมแน่นด้วยไฟฟ้าสถิต ป้อนสุญญากาศและเปิดมอเตอร์สั่น เริ่มการป้อนชีวมวล ควบคุมอัตราการป้อนตามวัตถุที่กำหนดไว้และสังเกตเกจวัดความดันว่ามีความดันขึ้นมากหรือน้อย ถ้าความดันมากเกินไปก็ค่อย ๆ เปิดวาล์วเพื่อให้ป้อนอากาศร่วมแต่ถ้าต่ำเกินไปก็ค่อย ๆ ปิดวาล์วเพื่อให้ความดันคงที่

3.4.11.8 ชีวมวลถูกป้อนสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยสกรูอย่างรวดเร็ว ทำให้ชีวมวลถูกย่อยสลายภายใต้แก๊สไนโตรเจนและเคลื่อนที่ไปข้างหน้าจากการสั่นของมอเตอร์สั่นทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ไอไฟโรไลซิส ถ่านชาร์ และแก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีการเคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์ถัดไปด้วยแก๊สไนโตรเจนที่ไหลในระบบ

3.4.11.9 ถ่านชาร์ส่วนใหญ่ที่ได้ถูกเก็บในถังเก็บถ่านชาร์และชุดไซโคลนจำนวน 1 ชุด ไอไฟโรไลซิสและแก๊สที่เหลือจะเคลื่อนเข้าสู่ชุดกรองไอร้อนซึ่งภายในบรรจุใยแก้วสำหรับดักจับถ่านชาร์ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก

3.4.11.10 ไอโฟโรไลซิสส่วนใหญ่ถูกควบแน่นด้วยชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดควบแน่นไฟฟ้าสถิตย์ทำให้เกิดการควบแน่นเป็นละอองของเหลวและรวมตัวกันเป็นไบโอออยล์ ไอโฟโรไลซิสในส่วนที่เหลือถูกส่งไปยังชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสีโทน ทำให้เกิดการควบแน่นกลายเป็นไบโอออยล์อีกชั้นหนึ่ง หลังจากนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สจึงถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยผ่านชุดกรองสำลีและชุดกรองกลั่น

3.4.11.11 สังเกตถึงป้อนชีวมวลหรือไอโฟโรไลซิสว่าหมดยังมีอยู่ไหม ถ้าหมดแล้วปิดมอเตอร์สั่นแล้วให้อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ลดลงก่อน เมื่ออุณหภูมิลดลงก็นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาปริมาณผลได้ จากนั้นนำอุปกรณ์ไปล้างคราบไบโอออยล์ด้วยโซดาไฟและตากให้แห้งเพื่อพร้อมทำการทดลองต่อไป

3.5 การคำนวณปริมาณผลได้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากโฟโรไลซิสแบบเร็วแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ของเหลว (ไบโอออยล์) ของแข็ง (ถ่านชาร์) และแก๊ส (แก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้) ซึ่งผลิตภัณฑ์ทั้งหมดสามารถหาปริมาณผลได้จากการทำสมดุลมวล (mass balance) โดยการชั่งน้ำหนักชีวมวล โยแก้ว ชีวมวล ไซโคลน ชุดกรองไอร้อน ชุดควบแน่นและขวดเก็บไบโอออยล์ ก่อนและหลังการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไบโอออยล์ได้จากชุดควบแน่นที่ใช้น้ำหล่อเย็น เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (ESP) ขวดเก็บไบโอออยล์ ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งและชุดกรองสำลี

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์ได้จากถังเก็บถ่านชาร์ ไซโคลน ชุดกรองไอร้อน และปริมาณของแข็งที่อยู่ในไบโอออยล์ (ได้จากการวิเคราะห์ไบโอออยล์)

ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะคำนวณจากค่าความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ โดยการหาปริมาณผลิตภัณฑ์สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

น้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ (wt%) = (น้ำหนักชีวมวลแห้งก่อนการทดลอง - น้ำหนักชีวมวลแห้งหลังการทดลอง)

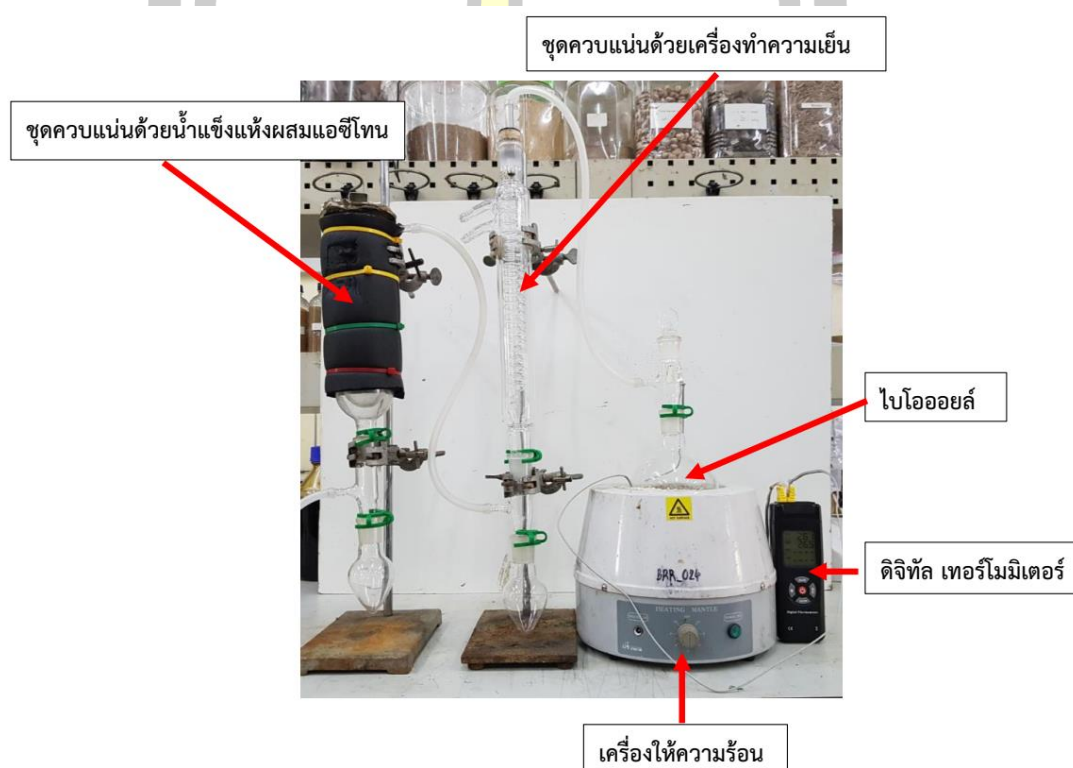
ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (wt%) = (มวลของเหลวที่ได้ - ปริมาณน้ำในชีวมวล) / น้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ $\times 100$

ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง (wt%) = (มวลของแข็งที่ได้ - ปริมาณน้ำในชีวมวล) / น้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ $\times 100$

ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส (wt%) = 100 - ร้อยละของของเหลว - ร้อยละของของแข็ง

3.6 กระบวนการกลั่นไบโอเออยล์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

กระบวนการกลั่นเป็นกระบวนการทางเคมีอย่างหนึ่งในการแยกของเหลวผสมของสาร 2 ชนิดหรือมากกว่าโดยอาศัยคุณสมบัติจุดเดือดที่แตกต่างกัน เมื่อให้ความร้อนกับของเหลวจนอุณหภูมิถึงจุดเดือดของสารชนิดหนึ่ง สารชนิดนั้นจะระเหยออกมาเป็นไอผ่านท่อที่มีการลดอุณหภูมิทำให้เกิดการควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวอีกครั้ง โดยในงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้ในการแยกไบโอเออยล์เฟสเบากฎการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากไบโอเออยล์เฟสเบามีได้มีสีเข้มที่แตกต่างกันดังนั้นหากนำมาผ่านกระบวนการกลั่นแล้วอาจเปลี่ยนเป็นสีใสหรือสีอื่นหรือไหม อุปกรณ์ที่ใช้ในการกลั่นภาพประกอบ 34



ภาพประกอบ 34 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกลั่น

พูน ปณ ทิโต ชีเว

3.7 แผนการทดลอง

3.7.1 การทดลองกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.7.1.1 ท่อทรงกระบอก

แผนการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อปริมาณผลได้ของไบโอออยล์แสดงดังตาราง 3 ซีมวลที่ใช้คือ ไม้กระถินยักษ์โดยเริ่มทดลองหาอนุภาคของซีมวลที่เหมาะสมที่ในการทดลองที่ 1 ถึง 3 โดยใช้อัตราการป้อนซีมวล 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที่ ความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ 50 เซนติเมตร เมื่อได้อนุภาคของซีมวลที่เหมาะสมแล้วทำการทดลองหาอัตราการป้อนที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 4-5 ใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 5 ลิตร/นาที่ ความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ 50 เซนติเมตร เมื่อได้อัตราป้อนที่เหมาะสมที่สุดแล้วในการทดลองที่ 6-7 เป็นการหาอัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมที่สุด และในการทดลองที่ 8-9 เป็นการทดลองหาความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสม

ตาราง 3 แผนการทดลองการหาสภาวะที่เหมาะสมในท่อทรงกระบอกที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซีมวลที่ใช้ 1.2 กิโลกรัม และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาที

ลำดับที่	อนุภาคซีมวล (mm)	อัตราการป้อน (kg/h)	อัตราการไหลไนโตรเจน (L/min)	ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ (cm)	เวลาคงอยู่ของไอ (sec)	
1	0.2-0.6	1	5	50	20	
2	0.6-1.0				20.1	
3	1.0-2.0				19.9	
4	อนุภาคซีมวลที่เหมาะสม (0.2-0.6)	0.5	10		21.7	
5		1.5			18.2	
6		อัตราป้อนที่เหมาะสม (1)			10.9	
7		1	60.0			
8		อัตราการไหลไนโตรเจนที่เหมาะสม (5 และ 10)	100	20.2		
9			150	29.3		

3.7.1.2 ท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ในงานวิจัยนี้นอกจากใช้ท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกแล้วยังใช้ท่อปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีแผนการทดลองดังตาราง 4

ตาราง 4 แผนการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้ชีวมวล 1 kg

ลำดับที่	อนุภาคชีวมวล (mm)	อัตราการป้อน (kg/h)	อัตราการไหลไนโตรเจน (L/min)	เวลาคงอยู่ของแข็ง (min)	ความยาวเครื่องปฏิกรณ์ (cm)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาคงอยู่ของไอ (Sec)
1	0.2-1	1	5	2	150	450	15.1
2		1		1	50	500	9.9
3		1		2	150		14.5
4		1		3			14.6
5		3.3		2			10.8
6		5		2			8.9
7		5	0	2			9.0
8		5	10	2			5.9
9		1	5	2	100	525	14.4
10		0.5		2		500	16.0
11		0.5		2			15.9
12		0.5	10 with 20 cm H ₂ O vacuum	3	150	500	11.3
13	0.2-0.6	0.5		2	150		8.1
14*	0.2-1	5	5	2			16.5

* ท่อปฏิกรณ์ที่ใช้คือ ทรงกระบอกเพื่อเปรียบเทียบกับกรทดลองที่ 6

3.7.2 การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถผลิตไบโอเอทิลได้ปริมาณมากที่สุดแล้วจึงทำการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังตาราง 5 ซึ่งเป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเตรียม

ตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วมาใช้งานในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกนำมาบรรจุภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่แยกออกจากเครื่องปฏิกรณ์หลัก อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยาที่เครื่องปฏิกรณ์ 500 องศาเซลเซียส WHSV 0.3 h⁻¹ เวลาคงอยู่ของของ 2 นาที และ ความยาวท่อปฏิกรณ์ 150 เซนติเมตร

ตาราง 5 แผนการทดลองใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

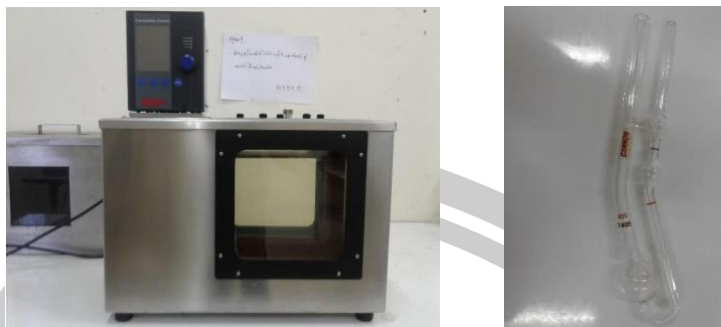
ลำดับที่	อนุภาคชีวมวล (mm)	อัตราการป้อน (kg/h)	ตัวเร่งปฏิกิริยา		N ₂ (L/min)	แวกคัมปั้ม (cmH ₂ O)	เวลาคงอยู่ของไอ (Sec)
			ชนิด	อัตราส่วน			
1	0.2-1.0	1	โดโลไมต์	2:1	5	0	18.4
2	0.2-0.6	0.6		6:1	10	20	12.7
3		0.6	เวอร์มิคูไลต์	2:1			12.8
4		0.3		2:1			7.8
5		0.6	ZSM-5	2:1			7.8

3.8 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

เมื่อได้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาสมบัติของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความหนืด (viscosity) ปริมาณน้ำ (water content) ปริมาณของแข็ง (solids content) ปริมาณเถ้า (ash content) ค่าพีเอช (pH) จุดวาบไฟ (flash point) จุดไหลเท (pour point) ค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ (CHNO) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (GC/MS) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.8.1 วิเคราะห์ค่าความหนืด

การวิเคราะห์หาค่าความหนืดของไบโอออยล์ตามมาตรฐาน ASTM D445 ด้วย Cannon-Fenske Opaque Viscometer โดยใส่ไบโอออยล์ 10 มิลลิลิตร ลงในหลอดแก้วที่มีอุณหภูมิประมาณ 40 องศาเซลเซียส โดยนับเวลาการไหลของไบโอออยล์จากจุดที่ 1 ไปจนถึงจุดที่ 2 ของหลอดแก้ว นำเวลาที่ได้ไปคูณด้วยแฟกเตอร์ของหลอดแก้ว ซึ่งเป็นค่าแฟกเตอร์ของการนำมาเปรียบเทียบกับของเหลวมาตรฐาน ดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 (ขวา) เครื่องวัดความชื้น และ (ซ้าย) หลอดแก้วใส่ไบโอออยล์

3.8.2 วิเคราะห์ปริมาณน้ำ

ปริมาณน้ำในไบโอออยล์วัดโดยใช้วิธีการไทเทรตของคาลฟีเชอร์ (Karl Fisher Titration) ซึ่งดำเนินการโดยใช้เครื่องมือมาตรฐานยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น V20 ซึ่งใช้หลักการตรวจวัดด้วยสาร Hydranal Composite 5 เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Hydranal Medium K ตามมาตรฐาน ASTM E203 ดังภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 36 เครื่องวัดปริมาณน้ำ

3.8.3 วิเคราะห์ปริมาณของแข็ง

วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D7579 โดยกระดาศกรองที่นำมาใช้นั้นต้องนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนการทดลองเริ่มจากนำไบโอออยล์ 1-2 กรัม ผสมด้วยเอทานอล 100-200 กรัม เขย่าให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทผ่านกระดาศกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 6 ไมโครเมตร เติมน้ำสุญญากาศดูดของเหลวให้หมด นำ

กระดาษกรองไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำมาชั่งน้ำหนัก ผลของน้ำหนักที่ชั่งไปคำนวณหาปริมาณของแข็ง ดังภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 ชุดวิเคราะห์ปริมาณของแข็งในไบโอดีเซล

3.8.4 วิเคราะห์ปริมาณเถ้า

วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D482-03 โดยเริ่มจากชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมฝาปิด จากนั้นหยดไบโอดีเซลลงในถ้วยกระเบื้องประมาณ 2-3 กรัม แล้วชั่งน้ำหนักถ้วยกระเบื้องพร้อมไบโอดีเซล จากนั้นนำเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำถ้วยกระเบื้องออกมาชั่งน้ำหนักหลังเผา ความแตกต่างของน้ำหนักถ้วยกระเบื้องก็คือปริมาณเถ้าในไบโอดีเซล

3.8.5 วิเคราะห์ค่าพีเอช

ค่าพีเอชสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่อง HI 2211 pH/ORP Meter ก่อนการวัดไบโอดีเซลควรทำการวัดจากสารมาตรฐานก่อน เพื่อทดสอบความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องมือได้ โดยทำการวัดค่าพีเอชกับของเหลวมาตรฐานที่มีค่ามาตรฐาน 4 และ 7 เมื่อวัดค่าพีเอชกับของเหลวมาตรฐานมีค่าถูกต้องแล้ว จึงทดสอบกับไบโอดีเซลตัวอย่าง ดังภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 38 เครื่องวิเคราะห์ค่าพีเอช

3.8.6 วิเคราะห์จุดวาบไฟ

จุดวาบไฟหาได้จากนำไปโอออยล์ใส่ในถ้วยตัวอย่างแล้วจุ่มเทอร์มอคัปเปิลลงในถ้วยตัวอย่างและให้ความร้อนอย่างต่อเนื่อง ใช้เปลวไฟเคลื่อนที่ผ่านถ้วยตัวอย่างทุกครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2-3 องศาเซลเซียส เมื่อเกิดไฟวาบขึ้นที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวหน้าของตัวอย่างอ่านอุณหภูมิแล้วบันทึกค่า ดังภาพประกอบ 39



ภาพประกอบ 39 เครื่องวิเคราะห์ค่าพีเอช

3.8.7 วิเคราะห์ค่าจุดไหลเท

เป็นการหาค่าอุณหภูมิต่ำสุดของไบโอออยล์ที่สามารถไหลได้ ดำเนินการโดยใช้สายเทอร์มอคัปเปิลจุ่มลงในไบโอออยล์และขอบผิวด้านนอกเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิที่ได้จากดิจิตอลเทอร์มิเตอร์ จากนั้นนำไบโอออยล์ไปแช่ในตู้แช่แข็งที่ -20 องศาเซลเซียส สังเกตอุณหภูมิทุก ๆ -2 องศาเซลเซียส เพื่อดูว่าไบโอออยล์แข็งตัวหรือยังไหลอีกหรือไหม จากนั้นบันทึกค่าและนำไปเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานของไบโอออยล์

3.8.8 วิเคราะห์ค่าความร้อนสูง

ค่าพลังงานความร้อนสูงของไบโอออยล์และถ่านชาร์ (higher heating value of bio-oil and char) วิเคราะห์เหมือนกันกับหัวข้อที่ 3.3.3

3.8.9 วิเคราะห์ความหนาแน่น

เป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักของไบโอออยล์กับปริมาตรกระบอกตวง สามารถวิเคราะห์ทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.3.4

3.8.10 วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ธาตุพื้นฐาน Truspec CHN/CHNS วิเคราะห์ทำนองเดียวกันกับหัวข้อที่ 3.3.2

3.8.11 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

ไบโอเอทิลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่อง gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) รุ่น SHIMADZU QP-2010 โดยไบโอเอทิลถูกนำมาเจือจางด้วยเอทานอลความเข้มข้น 99.99% ใช้อัตราส่วนเอทานอล 95 μl ต่อไบโอเอทิล 5 μl จากนั้นทำการกรองด้วยตัวกรองไนลอนขนาดรูพรุน 0.2 μm แล้วทำการฉีดเข้าเครื่องวิเคราะห์ เครื่องวิเคราะห์ GC/MS ใช้ column ขนาด 60 m $\times$ 0.25 mm id (DB-1, Agilent) ความหนาของฟิล์ม 0.1 μm การตั้งค่าเครื่อง GC ดำเนินการโปรแกรมอุณหภูมิเริ่มแรกที่ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 165 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วคงที่อุณหภูมิเป็นเวลา 5 นาที ด้วย split ratio 50 แก๊สพาในระบบใช้แก๊สฮีเลียมที่อัตราการไหล 1.44 mL/min การตั้งค่าเครื่อง MS ใช้โหมด electron impact (EI) ที่ใช้ ionisation energy 70 eV โดยมีอุณหภูมิ ion source และ interface ที่ 280 องศาเซลเซียส และ 250 องศาเซลเซียส การคำนวณและแสดงผลข้อมูลใช้ซอฟต์แวร์ SHIMADZU LabSolutions โดยใช้ฐานข้อมูล NIST ในการระบุพีคของโครมาโทแกรม การวิเคราะห์ GC/MS ที่ศูนย์เครื่องมือกลางมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ดังภาพประกอบ 40



ภาพประกอบ 40 องค์ประกอบทางเคมี

พญนุ ปณฺ ทิโต ชีเว

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษาผลของการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติของชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติคือไม้กระถินยักษ์ โดยผ่านกระบวนการบดหยาบและบดละเอียดแล้วนำมาคัดขนาด 0.2-0.6 และ 0.2-1 มิลลิเมตร นำไปบดไล่ความชื้นแล้วนำชีวมวลมาวิเคราะห์แบบประมาณ วิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ ค่าความร้อนและความหนาแน่น สมบัติของชีวมวลแสดงดังตาราง 6

ตาราง 6 สมบัติของชีวมวล

การวิเคราะห์	งานวิจัยนี้		[39]	[40]	
อนุภาคชีวมวล (มิลลิเมตร)	0.2-0.6	0.2-1	0.212-0.60	0.297	0.5-1.0
ความชื้น (Moisture)	8.6	7.2	3.7	10.5	3.7
การวิเคราะห์แบบประมาณ (wt%, dry basis)					
สารระเหย (Volatile matter)	80.6	-	85.1	78.8	77.0
คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon)	17.6	-	13.2	18.7	16.1
เถ้า (Ash)	1.8	-	1.7	2.5	3.2
การวิเคราะห์แบบขั้นสูง (wt%, dry basis)					
คาร์บอน	51.4	-	47.4	46.7	46.2
ไฮโดรเจน	6.3	-	6.6	6.6	5.8
ไนโตรเจน	0.2	-	0.3	7.2	0.7
ออกซิเจน	42.1	-	44.1	37	47.3
ค่าความร้อน (MJ/kg)					
ค่าความร้อนสูง (HHV)	20.5	-	19.5	19.3	18.1
ค่าความร้อนต่ำ (LHV)	19.1	-	18.1	17.6	16.8
ความหนาแน่น (kg/m³)					
ความหนาแน่นรวม	261.6	309.7	197.7	-	-
ความหนาแน่นอนุภาค	786.2	870.5	682	-	-

4.2 การไพโรไลซิสแบบเร็วชนิดไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและสมบัติของไบโอออยล์

การทดลองกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้ออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ โดยไบโอออยล์ที่ผลิตได้แบ่งออกเป็น 3 เฟส ได้แก่ ไบโอออยล์เฟสหนัก (heavy phase) ไบโอออยล์เฟสน้ำ (aqueous phase) และ ไบโอออยล์เฟสเบา (oily phase) ดังภาพประกอบ 41 ไบโอออยล์เฟสหนักได้จากการควบแน่นด้วยชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับไฟฟ้าสถิตมีลักษณะเป็นของเหลวหนืดสีน้ำตาลเข้มถึงสีดำไบโอออยล์เฟสน้ำได้จากการควบแน่นด้วยชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นมีลักษณะเป็นของเหลวใสถึงสีน้ำตาลอ่อนและมีตะกอนเล็กน้อย ไบโอออยล์เฟสเบาได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอสซิโตนมีลักษณะเป็นของเหลวใสมีสีเหลืองถึงสีน้ำตาลอ่อนไม่รวมตัวกับไบโอออยล์เฟสน้ำแต่ลอยตัวอยู่ด้านบนของไบโอออยล์เฟสน้ำ และเมื่อทำการแยกออกจากเฟสน้ำ มีกลิ่นฉุนมากทำให้แสบตาได้



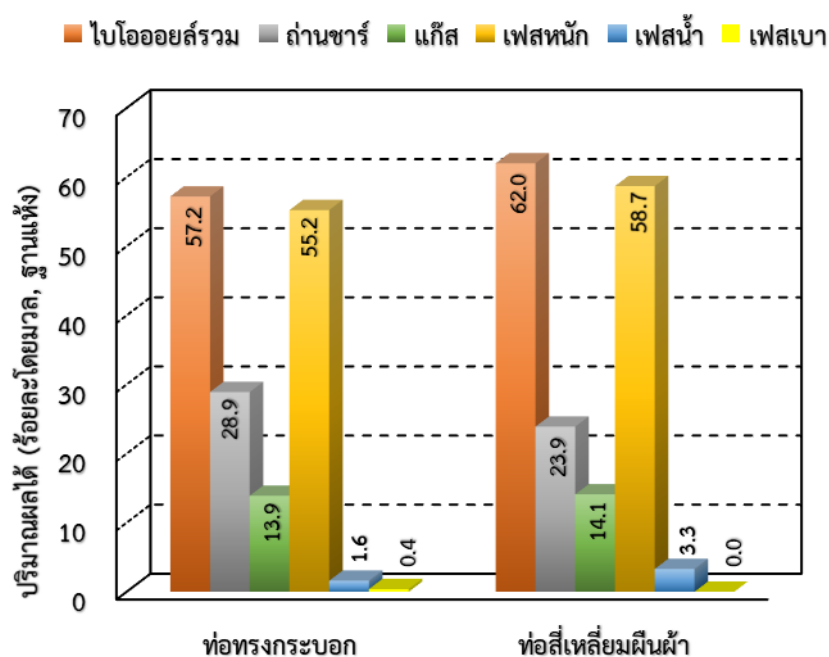
ภาพประกอบ 41 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

การผลิตไบโอเอทิลจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาสภาวะที่แตกต่างกันได้แก่ ผลของลักษณะของท่อปฏิกรณ์ ผลของความยาวท่อปฏิกรณ์ ผลของเวลาคงอยู่ของของแข็ง ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจน ผลของขนาดอนุภาคชีวมวลและผลของอัตราป้อนชีวมวล โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของลักษณะท่อปฏิกรณ์

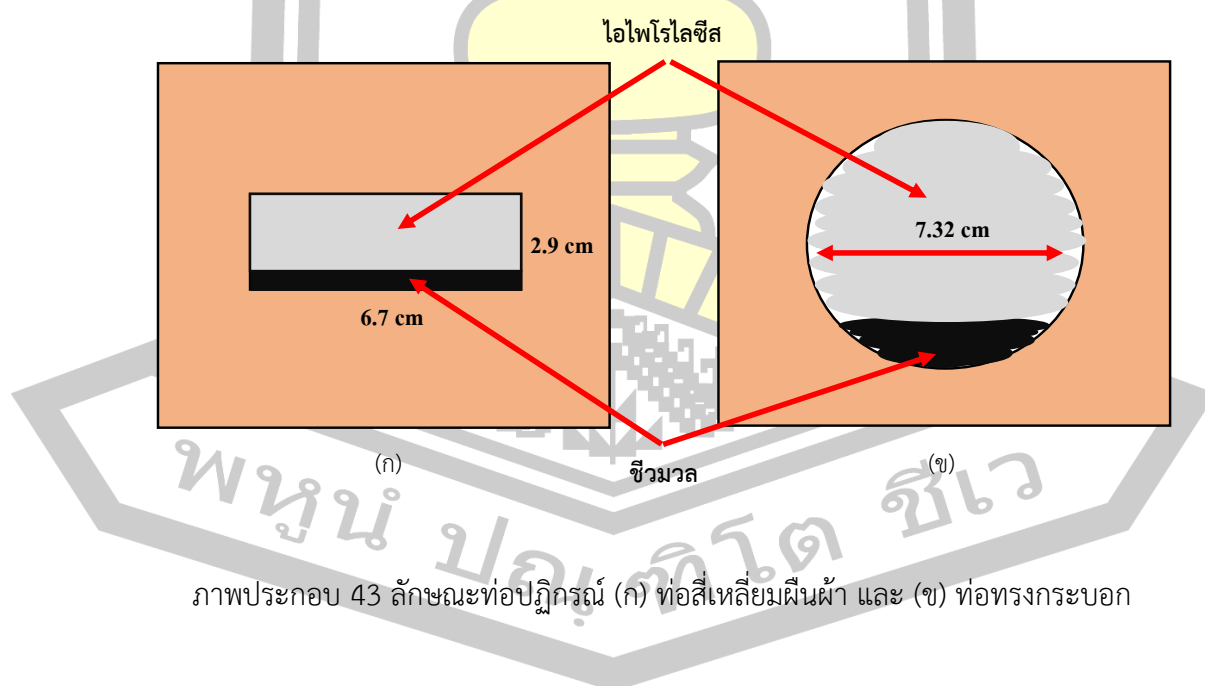
การทดลองกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่น ได้ทำการทดลองหาลักษณะของท่อปฏิกรณ์ที่เหมาะสมต่อปริมาณผลได้ของไบโอเอทิลที่ดีที่สุด ในการทดลองใช้ท่อปฏิกรณ์ 2 ชนิด ได้แก่ ท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกและท่อปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีเงื่อนไขการทดลองเหมือนกันคือ อนุภาคชีวมวล 0.2-1 มิลลิเมตร อัตราการป้อน 5 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที่ เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 นาที่ ความยาวท่อปฏิกรณ์ 165 เซนติเมตร และอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส ปริมาณผลได้ของไบโอเอทิลดังภาพประกอบ

42



ภาพประกอบ 42 ผลของท่อปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิดต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

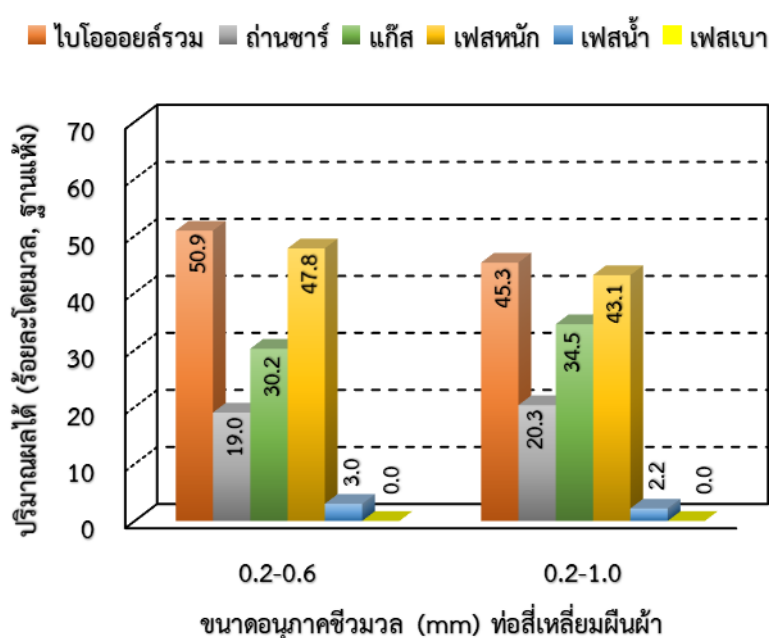
ไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากท่อปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด พบว่าท่อปฏิกรณ์แบบสื่เปลี่ยนผืนผ้าสามารถผลิตไบโอออยล์ที่ปริมาณผลได้สูงถึงร้อยละ 62.0 โดยน้ำหนัก ส่วนท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกสามารถผลิตไบโอออยล์ที่ปริมาณผลได้ร้อยละ 57.2 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อชีวมวลถูกป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ในท่อทั้ง 2 ชนิด ในท่อสื่เปลี่ยนผืนผ้าชีวมวลสามารถกระจายตัวภายในท่อได้ดีกว่าท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอก ส่งผลให้การทับซ้อนของชีวมวลความหนาแน่นลดลงจาก 9.2 เป็น 5.0 มิลลิเมตร ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ที่ได้จึงน้อยกว่าท่อทรงกระบอกจากร้อยละ 28.9 เป็นร้อยละ 23.9 โดยน้ำหนัก ทำให้การสลายตัวกลายเป็นไอไพโรไลซิสได้มากจึงมีปริมาณผลได้ไบโอออยล์เฟสหนักร้อยละ 58.7 โดยน้ำหนัก อีกทั้งท่อสื่เปลี่ยนผืนผ้ายังมีปริมาตรภายในน้อยกว่าท่อทรงกระบอก ส่งผลให้เวลาคงอยู่ของไอไพโรไลซิสลดลงและพาไอไพโรไลซิสไปควบแน่นได้เร็วขึ้น ส่วนท่อทรงกระบอกเมื่อชีวมวลป้อนเข้าสู่ท่อชีวมวลจะมารวมกันที่ตรงกลางมีผลให้การทับซ้อนของชีวมวลหนาขึ้นดังภาพประกอบ 43 การถ่ายโอนความร้อนสู่ชีวมวลทำได้น้อยลงส่งผลให้ถ่านชาร์เพิ่มขึ้นจาก 23.9 เป็นร้อยละ 28.9 โดยน้ำหนัก และเกิดการสลายตัวกลายเป็นไอไพโรไลซิสได้น้อยอีกทั้งเวลาคงอยู่ของไอไพโรไลซิสก็ยาวนานขึ้นจาก 9.0 เป็น 16.5 วินาที ทำให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์เฟสหนักน้อยกว่าเล็กน้อยร้อยละ 55.23 โดยน้ำหนัก ดังนั้นท่อปฏิกรณ์แบบสื่เปลี่ยนผืนผ้าจึงเหมาะสมต่อการผลิตไบโอออยล์มากที่สุด



ภาพประกอบ 43 ลักษณะท่อปฏิกรณ์ (ก) ท่อสื่เปลี่ยนผืนผ้า และ (ข) ท่อทรงกระบอก

4.2.2 ผลของขนาดอนุภาคชีวมวล

การทดลองหาขนาดชีวมวลที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอออยล์จากไม้กระถินยักษ์ในท่อปฏิกรณ์แบบสไลล์เยนผิวผ้า ดำเนินการโดยใช้เงื่อนไขอัตราป้อน 500 กรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที่ เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 นาที ความยาวท่อปฏิกรณ์ 165 เซนติเมตร และอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส ผลของอนุภาคชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ดังภาพประกอบ 44

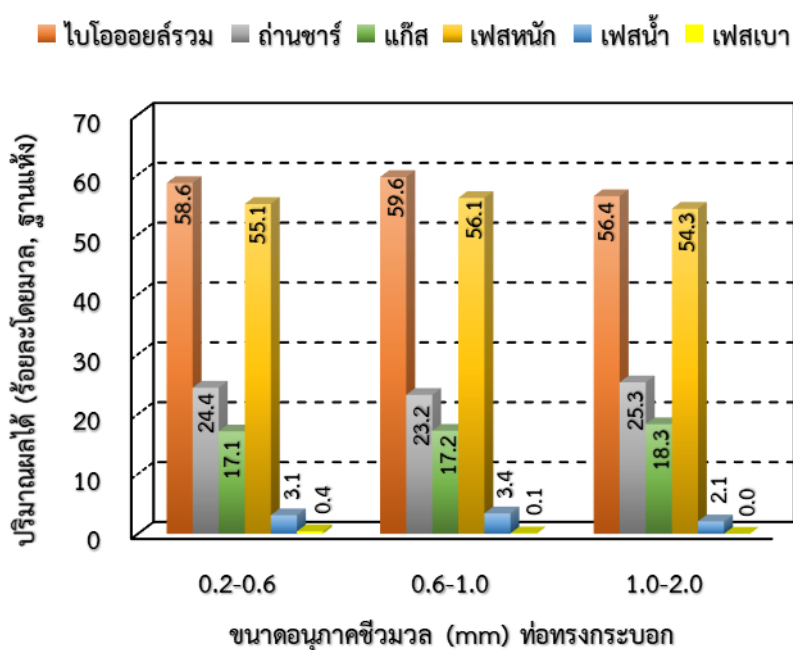


ภาพประกอบ 44 ผลของขนาดอนุภาคชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ท่อสไลล์เยนผิวผ้า

พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากขนาดอนุภาค 0.2-0.6 และ 0.2-1.0 มิลลิเมตร สามารถผลิตไบโอออยล์รวมร้อยละ 50.9 และ 45.3 ตามลำดับ เนื่องจากขนาดอนุภาค 0.2-1.0 มิลลิเมตร มีขนาดที่ใหญ่กว่าทำให้กลายสลายตัวเป็นไอไพโรไลซิสได้น้อย ความหนาของชีวมวลทั้ง 2 ชนิด อยู่ที่ 0.5 มิลลิเมตร ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากร้อยละ 19.0 เป็นร้อยละ 20.3 โดยน้ำหนัก อีกทั้งการใช้อัตราป้อนที่น้อยทำให้การสลายเป็นไอไพโรไลซิสได้ดีก็จริง แต่เวลาคงอยู่ของไอไพโรไลซิสในท่อปฏิกรณ์นานที่ 15.9 และ 16.0 วินาที ทำให้เกิดการแตกตัวขึ้นที่สองส่งผลให้ปริมาณผลได้ของแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ของขนาดอนุภาคชีวมวล

0.2-1.0 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นร้อยละ 30.2 เป็นร้อยละ 34.5 และปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนัก จึงได้น้อยตามไปด้วยจากร้อยละ 47.8 เป็นร้อยละ 43.1 โดยน้ำหนัก

การทดลองหาขนาดชีวมวลที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอออยล์จากไม้กระถินยักษ์ในท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอก ดำเนินการโดยใช้เงื่อนไขอัตราป้อน 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหล ไนโตรเจน 5 ลิตร/นาทิต เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาทิต อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส และความยาวท่อปฏิกรณ์ 55 เซนติเมตร ผลของอนุภาคชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ดัง ภาพประกอบ 45



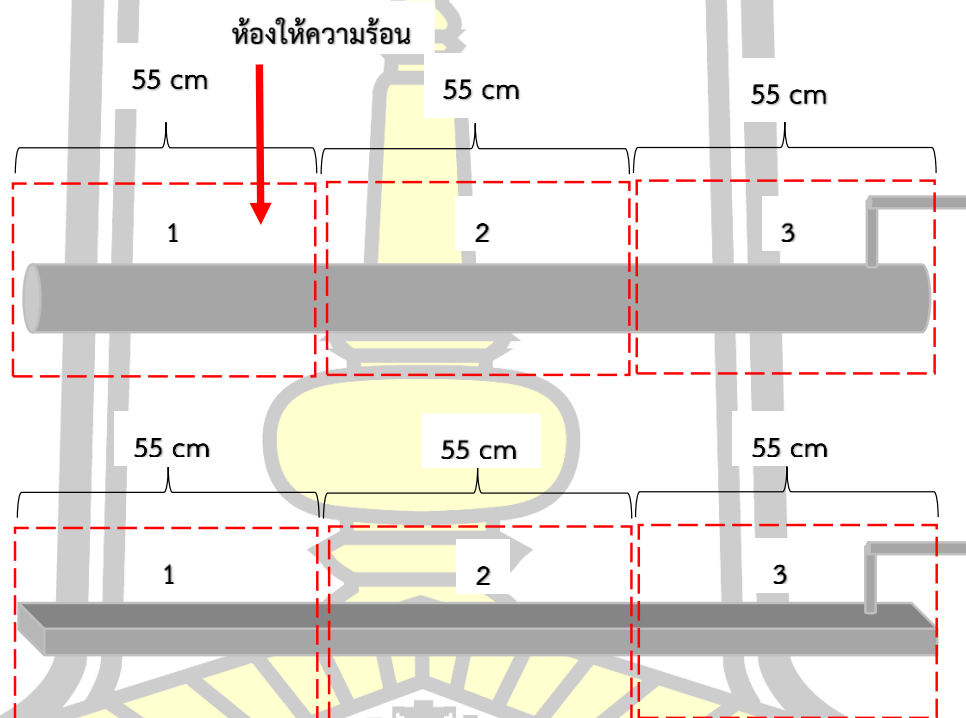
ภาพประกอบ 45 ผลของขนาดอนุภาคชีวมวลในท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ผลิตจากขนาดอนุภาค 0.2-0.6 0.6-1.0 และ 1.0-2.0 มิลลิเมตร สามารถผลิตไบโอออยล์รวมได้ร้อยละ 58.6 59.6 และ 56.4 ตามลำดับ โดยที่ความหนาของชีวมวลทั้ง 3 ชนิด อยู่ที่ 0.9 มิลลิเมตร เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค 0.2-1.0 มิลลิเมตร เห็นได้ว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนักลดลงเพราะขนาดอนุภาคของชีวมวลขนาดใหญ่ทำให้เกิดการสลายตัวกลายเป็นไอไพโรไลซิสได้น้อย เมื่อเทียบกับขนาดอนุภาค 0.2-0.6 0.2-1.0 มิลลิเมตร ที่การสลายตัวของชีวมวลกลายเป็นไอไพโรไลซิสเพียงพอ ถึงแม้ว่าท่อปฏิกรณ์มีขนาดที่ใหญ่เวลาของไอไพโรไลซิสก็ยาวนานขึ้นที่ 20.0 และ 20.1 วินาที แต่ด้วยเข้มข้นของไอไพโรไลซิสที่มีมากจึงทำให้มี

ปริมาณผลได้ของไบโอเอทิลเพิ่มขึ้น เมื่อมองในแง่ปริมาณผลได้ของไบโอเอทิลขนาดอนุภาคชีวมวล 0.2-0.6 และ 0.2-1.0 มิลลิเมตร ไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นขนาดอนุภาค 2 ชนิดนี้จึงเหมาะสมนำมาใช้ในท่อปฏิกรณ์แบบสั่นสลับผิวและแบบทรงกระบอก

4.2.3 ผลของความยาวท่อปฏิกรณ์

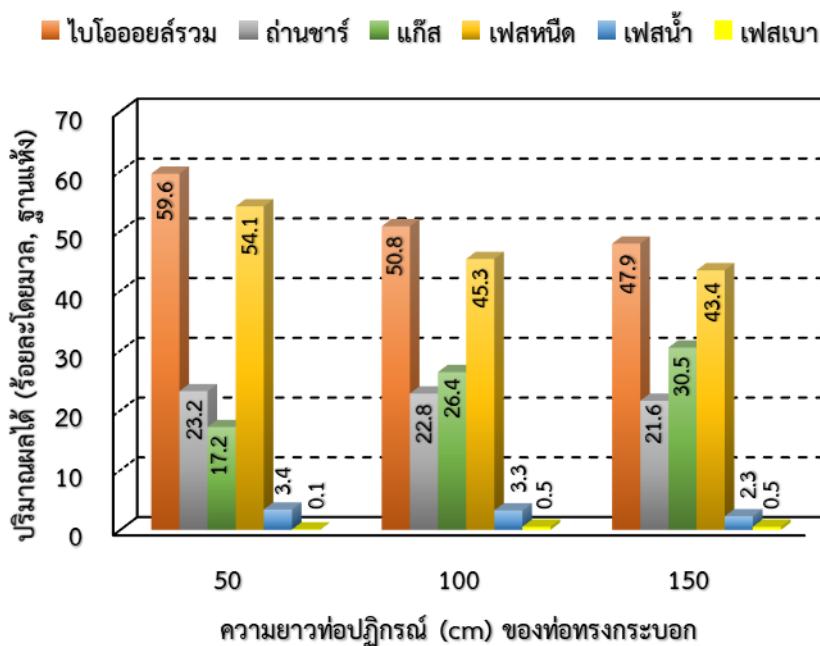
ผลการทดลองหาความยาวท่อปฏิกรณ์ที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอเอทิลจากไม้กระถินยักษ์ในท่อปฏิกรณ์แบบสั่นสลับผิวและท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกโดยมีความยาวของท่อ 55 110 และ 165 เซนติเมตร แบ่งโซนให้ความร้อนออกเป็น 3 ห้อง ดังภาพประกอบ 46



ภาพประกอบ 46 ความยาวท่อปฏิกรณ์ (ด้านบนทรงกระบอก) และ (ด้านล่างสั่นสลับผิว)

เริ่มต้นการทดลองใช้ท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกดำเนินการโดยใช้เงื่อนไขอัตราป้อน 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาที อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส และเริ่มต้นใช้ห้องให้ความร้อน 165 110 และ 55 เซนติเมตรตามลำดับ ผลของความยาวท่อปฏิกรณ์ต่อปริมาณผลได้ของไบโอเอทิลดังภาพประกอบ 47 พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอเอทิลรวมที่ใช้ห้องให้ความร้อน 165 เซนติเมตร สามารถผลิตไบโอเอทิลได้ปริมาณร้อยละ 47.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ปริมาณผลได้ไบโอเอทิลน้อยที่สุดเนื่องจากท่อ

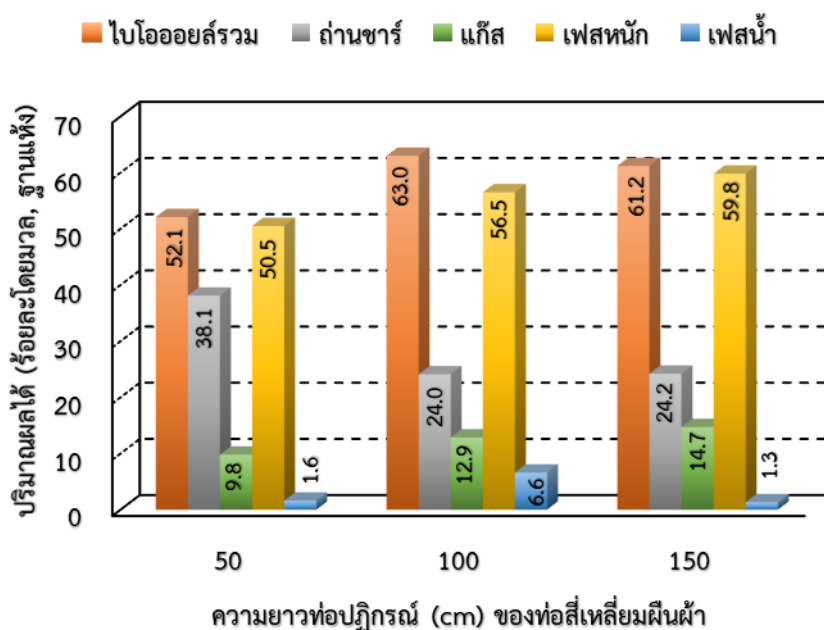
ปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกที่มีปริมาตรภายในต่อมาก ทำให้ไอไฟโรไลซิสอยู่ในระบบเป็นเวลานานที่ 29.3 วินาที มีโอกาสที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขั้นที่สองตามบริเวณร้อนต่าง ๆ ในระบบได้ ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ลดลงและมีผลทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นร้อยละ 30.5 เมื่อลดห้องให้ความร้อนจาก 165 เป็น 110 เซนติเมตร พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อยร้อยละ 47.9 เป็นร้อยละ 50.8 โดยน้ำหนัก เนื่องจากไอไฟโรไลซิสยังอยู่ในระบบเป็นเวลานานที่ 24.2 วินาที ดังนั้นเมื่อลดการใช้งานห้องให้ความร้อนเหลือเพียงแค่ 50 เซนติเมตร พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เพิ่มขึ้นร้อยละ 50.8 เป็นร้อยละ 59.6 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเวลาของไอไฟโรไลซิสอยู่ในระบบน้อยลงเหลือเพียง 20.1 วินาที กล่าวคือเมื่อเกิดการสลายตัวกลายเป็นไอไฟโรไลซิสแล้วสามารถนำไอไฟโรไลซิสไปความแน่นได้ทันที ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เพิ่มขึ้น



ภาพประกอบ 47 ผลของความยาวท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

ผลการทดลองหาความยาวท่อปฏิกรณ์ที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอออยล์ในท่อปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าใช้ความยาวห้องให้ความร้อน 165 เซนติเมตร เทียบกับท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกดังภาพประกอบ 48 ใช้เงื่อนไขการทดลองคือ อัตราป้อน 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที่ เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 นาที และอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมจากการใช้ความยาวห้องให้ความร้อน

150 เซนติเมตร สูงกว่าใช้ท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกร้อยละ 47.9 เป็นร้อยละ 61.2 เนื่องจากเวลาของไอไพโรไลซิสที่อยู่ในระบบน้อยกว่าที่เวลา 14.5 วินาที ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของท่อปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีปริมาตรน้อยกว่าท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอก ทำให้พาไอไพโรไลซิสไปควบแน่นเร็วจึงได้ปริมาณไบโอออยล์เพิ่มแต่ก็ทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สร้อยละ 14.7 อาจเป็นเพราะยังเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวรอบที่สองตามบริเวณร้อนต่าง ๆ ในระบบก็เป็นได้ จากนั้นเมื่อลดการใช้ความยาวท่อให้ความร้อนจาก 165 เป็น 110 เซนติเมตร แต่ใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกันคือ อัตราป้อน 500 กรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 นาที และอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงขึ้นเล็กน้อยร้อยละ 61.2 เป็นร้อยละ 63.0 เนื่องจากอัตราป้อนน้อยลงเกิดการสลายตัวกลายเป็นไอไพโรไลซิสดีขึ้นและเวลาคงอยู่ของไอก็ลดลงเหลือเพียง 11.3 ทำให้มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ใกล้เคียงกับการใช้ความยาวท่อให้ความร้อน 150 เซนติเมตร และปริมาณผลได้ของแก๊สลดลงร้อยละ 15.2 เป็นร้อยละ 12.9



ภาพประกอบ 48 ผลของความยาวท่อปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากนั้นเมื่อลดความยาวท่อให้ความร้อนเหลือแค่ 55 เซนติเมตร ใช้เงื่อนไขในการทดลองที่แตกต่างกันคือ อัตราป้อน 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที เวลาคงอยู่ของของแข็ง 20 วินาที และอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลงร้อยละ 63.0 เป็นร้อยละ 52.1 เพราะว่าความยาวท่อให้ความร้อนแค่

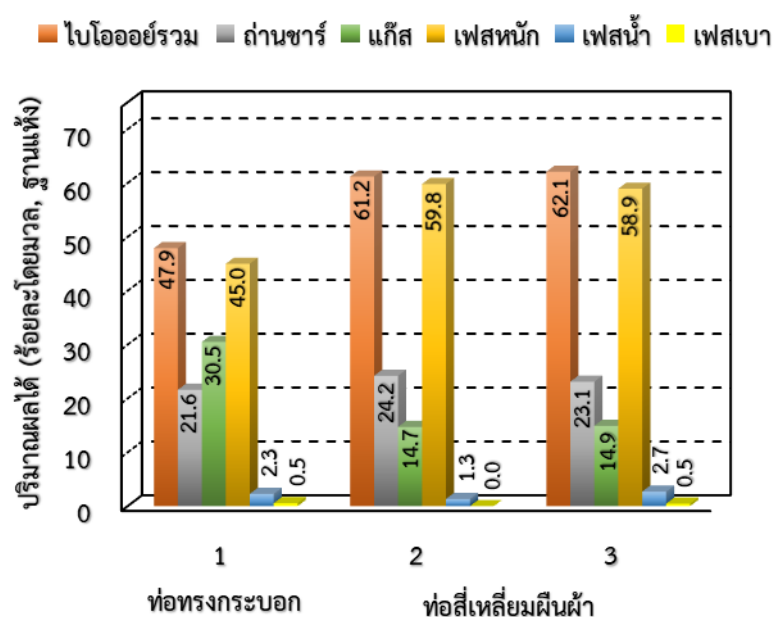
55 เซนติเมตร ทำให้เวลาคงอยู่ของไออยู่แค่ 9.9 วินาที ส่งผลให้การสลายตัวกลายเป็นไอไฟโรไลซิสไม่เพียงพอเพราะเวลาคงอยู่ของของแข็งแค่ 20 วินาที ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์จึงลดลงส่งผลให้ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์เพิ่มขึ้นร้อยละ 24.0 เป็นร้อยละ 38.1 หากต้องการปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เทียบเท่าหรือมากกว่าทอปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกควรใช้เวลาคงอยู่ของของแข็งเท่ากันคือ 2 นาที

จากที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อนำทอปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิดมาเปรียบเทียบกันแสดงให้เห็นว่าทอปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีข้อดีในแง่ของปริมาตรภายในทอที่น้อยกว่า ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์มากกว่าทอปฏิกรณ์แบบทรงกระบอก

4.2.4 ผลของเวลาคงอยู่ของของแข็ง

ผลการทดลองหาเวลาคงอยู่ของของแข็งที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอออยล์ในทอปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าและทอปฏิกรณ์แบบทรงกระบอก ใช้เงื่อนไขการทดลองอัตราป้อน 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที ใช้ห้องความร้อน 165 เซนติเมตร และอุณหภูมิไฟโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส เวลาคงอยู่ของของแข็งเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งในการผลิตไบโอออยล์ดังภาพประกอบ 49 แสดงผลการหาเวลาคงอยู่ของของแข็ง พบว่าในทอปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกเวลาคงอยู่ของของแข็งในทอปฏิกรณ์ 1 นาที ให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมร้อยละ 47.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีความชื้นมวลอยู่ที่ 0.91 มิลลิเมตร แต่ปริมาณผลได้น้อยกว่าทอปฏิกรณ์แบบทอสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพราะเวลาในการสลายตัวของชีวมวลไม่เพียงพอทำให้กลายเป็นไอไฟโรไลซิสได้น้อยลง อีกทั้งทอปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกมีปริมาตรภายในทอมากส่งผลไอไฟโรไลซิสอยู่ในระบบเป็นเวลานานที่ 29.3 วินาที ส่งผลให้ปริมาณของแก๊สร้อยละ 30.5 โดยน้ำหนัก ปริมาณผลได้ไบโอออยล์ที่ได้จึงลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทอปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าพบว่าที่เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 และ 3 นาที ให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมที่มากกว่าทอแบบทรงกระบอกร้อยละ 47.9 เป็นร้อยละ 61.2 และ 62.1 โดยน้ำหนัก เพราะเวลาในการสลายตัวของชีวมวลเพียงพอกลายเป็นไอไฟโรไลซิสได้มาก ปริมาตรของทอสี่เหลี่ยมผืนผ้าก็น้อยกว่าเวลาของไอไฟโรไลซิสก็น้อยลงจาก 29.3 เป็น 14.5 และ 14.6 วินาที ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เพิ่มขึ้นและปริมาณผลได้ของแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ลดลงร้อยละ 33.5 เป็นร้อยละ 14.7 และ 14.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gable, P. และ R.C. Brown [41] ทำการศึกษาผลของเวลาให้ความร้อนของชีวมวลในเครื่องปฏิกรณ์ตกอิสระที่เวลา 1.4 6.4 11.4 22.4 และ 42.2 วินาที ผลการทดลองพบว่าที่เวลา 1.4 วินาที ให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมร้อยละ 27 ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์สูงถึงร้อยละ 58 เนื่องจากเวลาให้ความร้อนของชีวมวลน้อยเกินไป จากนั้นเมื่อเพิ่มเวลาให้ความร้อนสูงขึ้นจนถึงเวลา 42.2 วินาที พบว่าปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมสูงขึ้นจากร้อยละ 27 เป็นร้อยละ 63

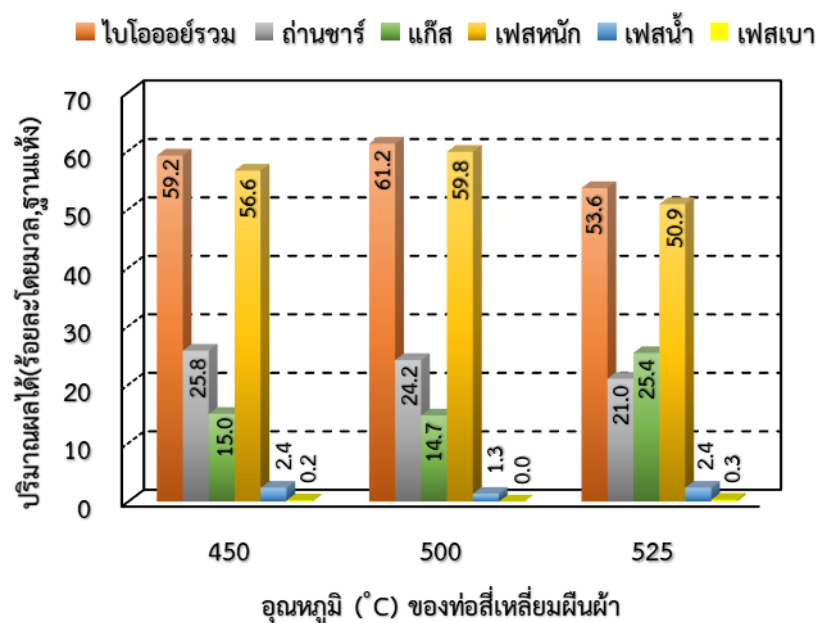
เนื่องจากเวลาให้ความร้อนสูงทำให้ชีวมวลสลายตัวเพียงพอ ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ลดลงจากร้อยละ 58 เหลือเพียงร้อยละ 22 จากที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่าเวลาคงอยู่ของของแข็งมีผลต่อการผลิตไบโอออยล์อย่างมาก



ภาพประกอบ 49 ผลของเวลาคงอยู่ของของแข็ง (นาท) ต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.2.5 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิส

การทดลองหาอุณหภูมิไพโรไลซิสที่เหมาะสมในการผลิตไบโอออยล์ในท่อปฏิกรณ์แบบสไลด์เปลี่ยนแผ่นดำเนินการโดยใช้อัตราการการป้อนชีวมวล 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 ลิตร/นาท และเวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 นาท ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ดังภาพประกอบ 50 พบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมสูงที่สุดที่ร้อยละ 61.2 โดยน้ำหนัก คืออุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เนื่องจากการสลายตัวของชีวมวลของชีวมวลเกิดขึ้นได้ง่าย เมื่อลดอุณหภูมิไพโรไลซิสลงเป็น 400 องศาเซลเซียสพบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลงร้อยละ 61.2 เป็นร้อยละ 59.2 โดยน้ำหนัก เพราะการสลายตัวของชีวมวลไม่เพียงพอซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลได้ของถ่านชาร์เพิ่มขึ้นร้อยละ 24.2 เป็นร้อยละ 25.8 โดยน้ำหนัก

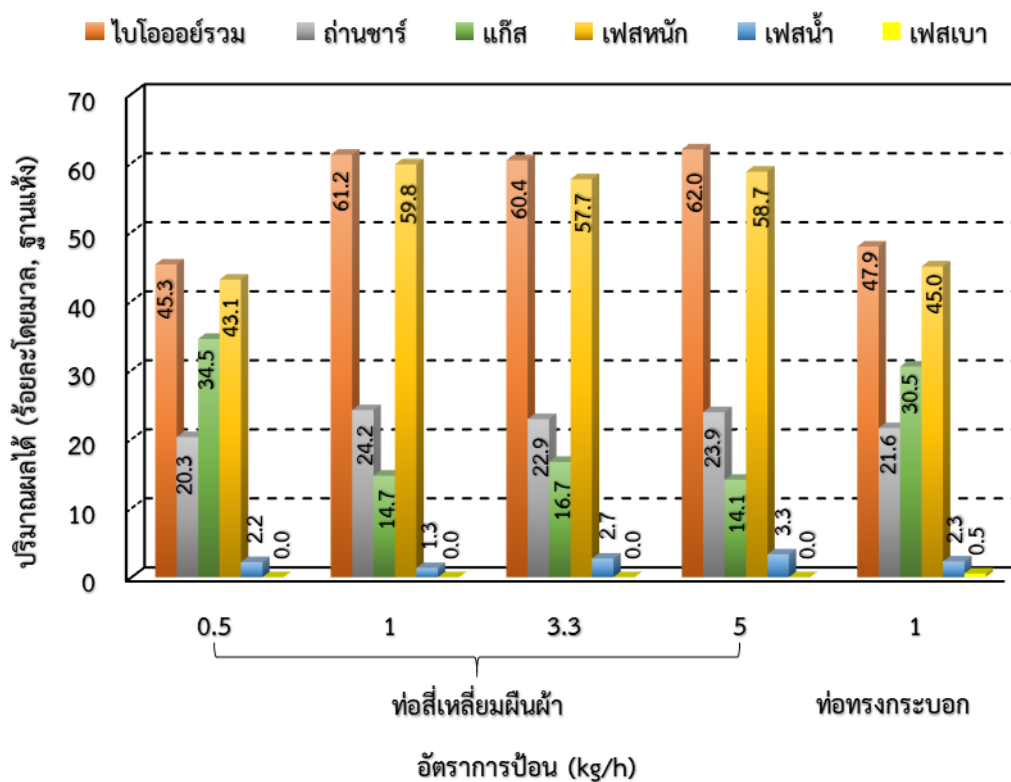


ภาพประกอบ 50 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 525 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณผลได้ของใบโอดอยล์รวม ลดลงร้อยละ 61.2 เป็นร้อยละ 53.6 โดยน้ำหนัก เพราะอุณหภูมิสูงมีโอกาที่ไฮโดรไลซิส เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขึ้นที่สองได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลได้ของถ่านชาร์ที่ลดลงร้อยละ 24.72 เป็นร้อยละ 21.0 โดยน้ำหนัก เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวขึ้นที่สอง โดยปฏิกิริยาขึ้นที่สอง ของทั้งไฮโดรไลซิสและถ่านชาร์ต่างทำให้ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.7 เป็น ร้อยละ 25.4 โดยน้ำหนัก ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อปริมาณผลได้ของใบโอดอยล์คืออุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

4.2.6 ผลของอัตราการป้อนชีวมวล

การทดลองหาอัตราการป้อนชีวมวลที่เหมาะสมต่อการผลิตใบโอดอยล์ในในท่อ ปฏิกรณ์แบบสเลียมผิวผ้า ดำเนินการโดยใช้ชีวมวลขนาด 0.2-1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของ ไนโตรเจน 5 ลิตร/นาทื เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 นาทื ใช้ความยาวห้องให้ความร้อน 165 เซนติเมตร และอุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนชีวมวลเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งใน กระบวนการผลิตใบโอดอยล์ ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ดัง ภาพประกอบ 51 และปริมาณผลได้ของใบโอดอยล์เฟสต่าง ๆ



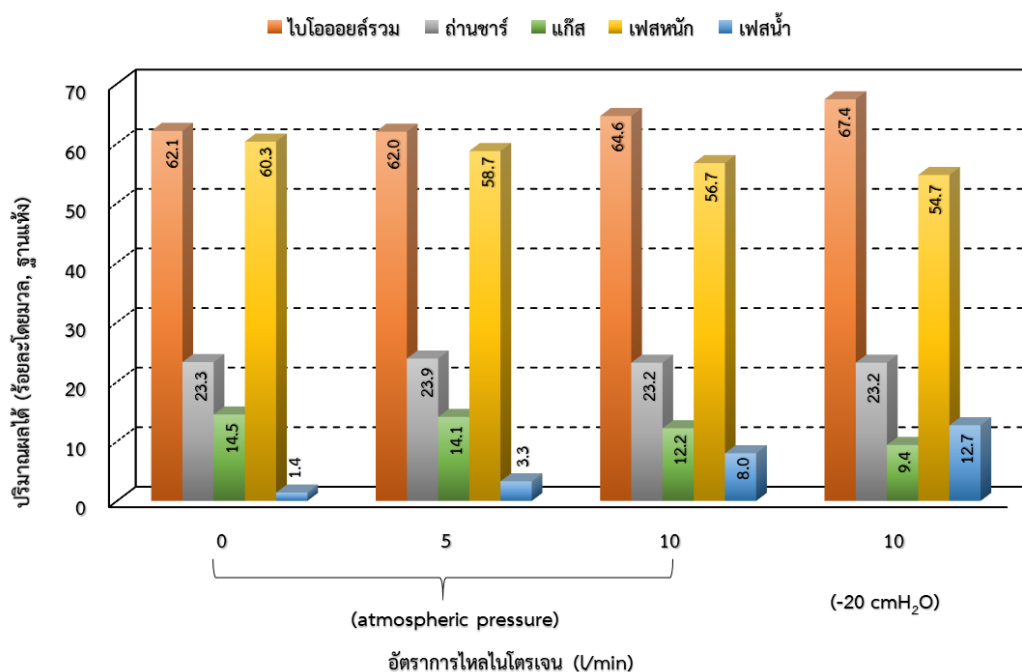
ภาพประกอบ 51 ผลของอัตราป้อนชีวมวลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

พบว่าอัตราการป้อนชีวมวล 0.5 กิโลกรัม/ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอออยล์รวมได้ปริมาณร้อยละ 45.3 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ลดลงเนื่องจากไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์มีน้อยเมื่อผสมกับแก๊สพาทำให้อัตราส่วนระหว่างไฮโดรไลซิสและแก๊สพาในระบบมีค่าต่ำ สัมพันธ์กับความยาวห้องให้ความร้อนที่ใช้และเวลาของไฮโดรไลซิสอยู่ยาวนานขึ้นที่เวลา 16.0 วินาที ส่งผลให้โอกาสในการควบแน่นมีน้อยลง ไฮโดรไลซิสส่วนหนึ่งที่ไม่สามารถควบแน่นได้จึงกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนเพิ่มขึ้นเป็น 1 3.3 และ 5 กิโลกรัม/ชั่วโมง พบว่าสามารถผลิตไบโอออยล์รวมได้ปริมาณที่ใกล้เคียงกันร้อยละ 61.2 60.4 และ 62.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากอัตราการป้อนชีวมวลสูงทำให้ชีวมวลที่เคลื่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณมาก ซึ่งส่งผลให้ปริมาณไฮโดรไลซิสมีมากขึ้น อัตราส่วนของไฮโดรไลซิสต่อแก๊สพาในระบบที่พอเหมาะจึงทำให้ไฮโดรไลซิสเกิดการควบแน่นได้ดี อีกทั้งเวลาคงอยู่ของไอก็อยู่น้อยลงที่เวลา 14.5 10.8 และ 8.9 วินาที ตามลำดับ เห็นได้เวลาคงอยู่ของไอลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากอัตราป้อนที่สูงทำให้ความหนาของชีวมวลหนาขึ้นที่ 1.0 3.3 และ 5.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาตรในท่อปฏิกรณ์ลดลงเช่นกันและอัตราการป้อนชีวมวลที่สูงยัง

ส่งผลให้ปริมาณผลได้ไบโอเออยล์เฟสน้ำมีแนวโน้มสูงร้อยละ 1.3 2.7 และ 3.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อเทียบกับผลการทดลองโดยใช้ท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกดำเนินการโดยใช้ชีวมวลขนาด 0.2-0.1 มิลลิเมตร อัตราการไหลของไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที่ เวลาคงอยู่ของของแข็ง 1 พบว่าอัตราการป้อนชีวมวล 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง สามารถผลิตไบโอเออยล์รวมได้ปริมาณร้อยละ 47.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกับอัตราป้อน 500 กรัม/ชั่วโมง ของท่อสี่เหลี่ยมผืนผ้า เนื่องจากอัตราป้อนที่สูงทำให้เกิดการสลายกลายเป็นไอไพโรไลซิสมีปริมาณมากก็จริง แต่ท่อปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกมีปริมาตรภายในท่อที่มากกว่า สัมพันธ์กับเวลาของไอไพโรไลซิสอยู่นานขึ้นที่เวลา 29.3 วินาที ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์ลดลง

4.2.7 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจน

การทดลองหาอัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอเออยล์จากท่อปฏิกรณ์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้ชีวมวลขนาด 0.2-1 มิลลิเมตร อัตราการป้อนชีวมวล 5 กิโลกรัม/ชั่วโมง ห้องให้ความร้อน 165 เซนติเมตร เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 นาที อุณหภูมิไพโรไลซิส 500 องศาเซลเซียส และใช้ปั๊มสุญญากาศช่วยดูดไอไพโรไลซิส ผลการทดลองดังภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 52 ผลอัตราการไหลของไนโตรเจนของท่อแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าต่อปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์

จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 5 ลิตร/นาที่ สามารถผลิตปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมร้อยละ 62.0 โดยน้ำหนัก เมื่อลดอัตราการไหลของไนโตรเจนลงเป็น 0 ลิตร/นาที่ พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมร้อยละ 62.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้อัตราการไหลไนโตรเจน 5 ลิตร/นาที่ เนื่องจากในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่ใช้แก๊สไนโตรเจนนำพาไอไพโรไลซิสไปควบแน่นแล้ว ยังใช้ปั๊มสุญญากาศในการช่วยดูดไอไพโรไลซิสด้วย ส่งผลให้เวลาไอไพโรไลซิสในระบบอยู่น้อย ทำให้สามารถนำมาควบแน่นได้ดีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เพิ่มขึ้น อีกทั้งเวลาคงอยู่ของไอของอัตราการไหลไนโตรเจน 0 และ 5 ลิตร/นาที่ มีค่าใกล้เคียงกันที่เวลา 7.7 และ 7.6 วินาที จากนั้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไนโตรเจนเป็น 10 ลิตร/นาที่ พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมเพิ่มร้อยละ 62.0 เป็นร้อยละ 64.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้เวลาคงอยู่ของไอลดลงอยู่ที่ 5.1 วินาที และสอดคล้องกับปริมาณผลได้ของแก๊สที่มีแนวโน้มลดลงร้อยละ 14.1 เป็นร้อยละ 12.2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลไนโตรเจน ส่งผลให้ปริมาณไบโอออยล์เพิ่มขึ้นแต่หากใช้อัตราการไหลสูงกว่านี้อาจทำให้ไอไพโรไลซิสเจือจางลงก็เป็นได้ ดังนั้นหากใช้ปั๊มสุญญากาศให้ดูดแรงกว่าเดิม กล่าวคือดูดให้น้ำที่ในสายยาง -20 เซนติเมตรน้ำ โดยวัดที่ไนโตรเจนเข้าถังป้อนชีวมวล จากเดิมที่เป็นความดันบรรยากาศแต่มีเงื่อนไขในการทดลองที่แตกต่างกันคือ อัตราป้อน 500 กรัม/ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงขึ้นร้อยละ 64.4 เป็นร้อยละ 67.4 โดยน้ำหนัก เวลาไอไพโรไลซิสในระบบอยู่ที่เวลา 7.9 วินาที เห็นได้ว่าเวลาคงอยู่ของไอสูงกว่าเพราะอัตราป้อนที่น้อยส่งผลให้ความหนาของชีวมวลน้อยลงทำให้มีปริมาตรในท่อย่อยขึ้น แต่เพราะมีปั๊มสุญญากาศช่วยดูดและนำไอไพโรไลซิสมาควบแน่นได้เร็วส่งผลให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและปริมาณผลได้ของแก๊สก็ลดลงร้อยละ 12.2 เป็นร้อยละ 9.4 โดยน้ำหนัก อีกทั้งการใช้ไนโตรเจนที่สูงและปั๊มดูดแรงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของเฟสน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นร้อยละ 8.0 เป็นร้อยละ 12.7 ดังนั้นอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 10 ลิตร/นาที่ และใช้ปั๊มสุญญากาศดูด -20 เซนติเมตรน้ำ จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไบโอออยล์

4.2.8 สมบัติของไบโอออยล์เฟสน้ำหนักและเฟสเบา

ผลการวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์แสดงดังตาราง 7 จากการทดลองอุณหภูมิไพโรไลซิสแบบเร็วที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณน้ำของไบโอออยล์ที่ได้อ้อยละ 45 ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน ASTM-D7544-12 ที่ต้องน้อยกว่าร้อยละ 30 เพราะว่าชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับด้วยไฟฟ้าสถิตมีประสิทธิภาพดักจับไอไพโรไลซิสและน้ำได้มากจึงทำให้ปริมาณน้ำผสมในไบโอออยล์เพิ่มขึ้นอีกทั้งยังส่งผลให้มีค่าความร้อนที่ต่ำกว่ามาตรฐานที่ 14.3 MJ/kg ปริมาณของ

ของแข็งอยู่ในช่วงมาตรฐานร้อยละ 1.3 ส่วนค่าความหนืดที่ได้ 154.8 ก็เกินมาตรฐานเพราะว่าในไบโอออยล์มีปริมาณน้ำที่สูงส่งผลให้จุดไหลเทนั้นก็เกินมาตรฐานเช่นกันที่ -16.4 องศาเซลเซียส จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าปัญหาหลักอยู่ที่ปริมาณน้ำสูงเกินไปควรที่จะลดปริมาณน้ำลง ดังนั้นวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ไขได้คือ นำไบโอออยล์เฟสหนักไปผ่านกระบวนการกลั่น ผู้วิจัยได้นำไบโอออยล์เฟสหนักที่ให้ปริมาณผลได้สูงสุคนำมากลั่น โดยใช้ไบโอออยล์ 280 กรัม ใช้เวลาทดลอง 1 ชั่วโมง และใช้ชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น 1 ชุด จากนั้นจึงนำไบโอออยล์ที่ผ่านการกลั่นไปวิเคราะห์สมบัติเพื่อเทียบกับมาตรฐานดังกล่าว ผลการวิเคราะห์สมบัติไบโอออยล์เฟสหนักดังตาราง 7

ตาราง 7 สมบัติไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาเทียบกับมาตรฐาน (ASTM D7544-12) [28]

สมบัติ	งานวิจัยนี้		มาตรฐานไบโอออยล์เฟสหนัก		
	ไบโอออยล์เฟสหนัก		เฟสเบา	เกรด G	เกรด D
	ตั้งต้น	กลั่น			
ค่าความร้อน (MJ/kg)	14.3	18.2	26.6	>15	>15
ปริมาณน้ำ (wt%)	45.0	21.5	1.6	<30	<30
ปริมาณของของแข็ง (wt%)	1.3	1.3	0.0	2.5	0.25
ค่าความหนืด ที่ 40 °C (cSt)	164.8	120.1	-	<125	<125
ค่าความหนาแน่น ที่ 20 °C (kg/m ³)	1.1	1.2	-	1.1-1.3	1.1-1.3
ปริมาณเถ้า (wt%)	0.2	0.2	-	0.25	0.15
ค่าพีเอช	2.6	2.5	-	Report	Report
จุดวาบไฟ °C	102.2	89.3	-	>45	>45
จุดไหลเท °C	-14.4	-8.2	-	-9.0	-9.0

เมื่อนำไบโอออยล์เฟสหนักที่ผ่านการกลั่นแล้วพบว่าไบโอออยล์ที่เหลือจากการกลั่น 210.48 กรัม และสามารถควบแน่นน้ำได้ถึง 67.52 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 24.1 ทำให้ปริมาณน้ำลดลงจากร้อยละ 45.0 เป็นร้อยละ 21.5 ส่งผลให้ค่าสมบัติต่าง ๆ ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมดโดยเฉพาะค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 14.3 เป็นร้อยละ 18.2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำในไบโอออยล์ส่งผลกับค่าสมบัติต่าง ๆ อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นหากไบโอออยล์มีปริมาณน้ำที่สูงควรนำมาผ่านการกลั่นก่อน

นำไปใช้งาน นอกจากการนำไบโอออยล์เฟสหนักมาเปรียบเทียบแล้วยังนำมาเปรียบเทียบปริมาณ
ผลได้และสมบัติของไบโอออยล์กับงานวิจัยที่ผ่านมา ดังตาราง 8

ตาราง 8 ผลการเปรียบเทียบปริมาณผลได้และสมบัติต่าง ๆ กับงานวิจัยที่ผ่านมา

ผลิตภัณฑ์	ชนิดเครื่องปฏิกรณ์	
	งานวิจัยนี้	[39]
	แบบสั่น	ฟลูอิดซ์เบดแบบฟอง
เฟสหนัก	54.7	30.3
เฟสน้ำ	12.7	38.5
<i>*รวม</i>	<i>67.4</i>	<i>68.8</i>
ถ่านชาร์	23.2	13.3
แก๊ส	9.4	17.9
สมบัติของไบโอออยล์เฟสหนัก		
ปริมาณน้ำ (wt%)	45	23.4
ปริมาณของของแข็ง (wt%)	1.3	0.1
ค่าความหนืด ที่ 40 C (cSt)	164.8	-
ค่าความหนาแน่น ที่ 20 C (kg/m ³)	1.1	1.1
ปริมาณเถ้า (wt%)	0.2	<0.1
ค่าพีเอช	2.5	3.6
จุดวาบไฟ C	102.2	-
จุดไหลเท C	-16.4	-
องค์ประกอบธาตุ (wt%)		
คาร์บอน	30.0	53.4
ไฮโดรเจน	8.6	6.4
ไนโตรเจน	0.4	0.6
ออกซิเจน	59.8	39.7
ค่าความร้อน (MJ/kg)		
ค่าความร้อนสูง	14.3	22.2
ค่าความร้อนต่ำ	12.5	20.7
ปริมาณผลได้เชิงพลังงาน (%)	38.2	34.3

ผลการเปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์ต่อปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์และสมบัติต่าง ๆ พบว่าเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ให้ปริมาณผลได้รวมไบโอเออยล์ที่ใกล้เคียงกันร้อยละ 67.4 และร้อยละ 68.8 แต่ไบโอเออยล์เฟสต่าง ๆ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ มีค่าแตกต่างกันมากโดยที่ไบโอเออยล์เฟสหนักของเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นมากกว่าร้อยละ 24.4 แต่เมื่อมองในไบโอเออยล์เฟสน้ำกับพบว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพองให้ปริมาณผลได้เฟสน้ำมากกว่าร้อยละ 25.8 เนื่องจากชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำและไฟฟ้าสถิตในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าจึงสามารถดักจับไบโอเออยล์และน้ำได้มากกว่า ถ่านชาร์ที่ได้ก็แตกต่างกันร้อยละ 23.2 และ 13.3 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบพองมีตัวกลางถ่ายโอนความร้อนคือ ทRAY ที่สามารถทำให้ชีวมวลสลายตัวเพียงพอแต่กับเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นไม่มีตัวกลางถ่ายโอนความร้อนส่งผลให้มีถ่านชาร์เพิ่มขึ้น ส่วนแก๊สที่ได้พบว่าเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ใช้อัตราการไหลไนโตรเจนเท่ากันคือ 10 ลิตรต่อนาที แต่เครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นใช้ปั๊มสุญญากาศมาช่วยดูดส่งผลให้มีปริมาณผลได้ของแก๊สน้อยกว่าร้อยละ 17.9 เป็นร้อยละ 9.4 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นที่กำลังผลิตสูงก็มีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบพอง

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติไบโอเออยล์เฟสหนักของเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด พบว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นมีปริมาณน้ำร้อยละ 45 สูงกว่าในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดซ์เบดแบบพองร้อยละ 23.4 เนื่องจากที่เติกลำไปข้างต้นแล้วว่าชุดควบคุมแน่นด้วยน้ำและไฟฟ้าสถิตในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นมีประสิทธิภาพที่สูงกว่าจึงสามารถดักจับไบโอเออยล์และน้ำได้มากกว่า ส่งผลให้ค่าความร้อนน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดร้อยละ 22.2 เป็นร้อยละ 14.3 อีกทั้งเมื่อนำไบโอเออยล์ไปวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุพบว่าคาร์บอนก็น้อยกว่าร้อยละ 53.4 เป็นร้อยละ 30.0 ส่งผลให้ออกซิเจนนั้นสูงขึ้นจากร้อยละ 39.7 เป็นร้อยละ 59.8 ทำให้ค่าความร้อนที่ได้ก็น้อยตามไปด้วย ส่วนปริมาณผลได้เชิงพลังงานของไบโอเออยล์เฟสหนักในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นมีค่ามากกว่าฟลูอิดซ์เบดแบบพองร้อยละ 34.3 เป็นร้อยละ 38.2 เนื่องจากปริมาณผลได้ไบโอเออยล์เฟสหนักในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นสูงกว่าเมื่อนำมาคำนวณแล้วจึงได้ค่าที่สูง

ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี GC/MS ดังตาราง 9 การวิเคราะห์ที่ไบโอเออยล์เฟสหนักและเฟสเบา พบว่าองค์ประกอบของสารเคมีในไบโอเออยล์เฟสหนักส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม Oxygenate ร้อยละ 47.68 ประกอบไปด้วย Phenol 1,2-Benzenediol และ 2(5H)-Furanone ส่วนไบโอเออยล์เฟสเบาองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม Oxygenate ร้อยละ 22.21 และอยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 16.26 ประกอบไปด้วย Benzene p-Xylene และ Toluene

ตาราง 9 สารเคมีในไบโอดีเซลเฟสหนักและเฟสเบา

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)	
			Heavy	light
Monocyclic aromatic hydrocarbons				
2.34	Benzene	C ₆ H ₆	0.00	2.29
2.49	Cyclohexene	C6H10	0.00	0.41
3.56	Toluene	C ₇ H ₈	0.00	6.06
3.90	1-Octene	C8H16	0.00	0.87
5.39	Ethylbenzene	C8H10	0.00	0.83
5.57	p-Xylene	C9H20	0.00	2.03
6.03	1-Nonene	C9H20	0.00	0.44
6.10	Styrene	C8H8	0.00	0.93
6.23	Nonane	C9H20	0.00	0.32
7.72	Benzene, propyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.21
7.94	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C9H12	0.00	0.52
8.45	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C9H12	0.00	0.22
8.70	1-Decene	C10H20	0.00	0.51
9.82	D-Limonene	C10H16	0.00	0.13
11.60	1-Undecene	C11H22	0.00	0.35
14.49	Cyclopropane, octyl-	C11H22	0.00	0.15
28.58	2,4-Diphenyl-4-methyl-1-pentene	C18H20	0.54	0.00
	sum		0.54	16.26
Polycyclic aromatic hydrocarbons				
7.52	Indane	C9H8	0.00	0.27
10.33	Indene	C9H8	0.00	0.40
	sum		0.00	0.67
Oxygenates				
2.03	Acetic acid	CH3COOH	5.71	0.00
2.25	2-Butenal	C4H6O	0.00	3.20
2.36	2-Propanone, 1-hydroxy-	C3H6O2	3.54	0.00
2.38	2-Propanone, 1-hydroxy-	C3H6O2	0.00	0.79
2.43	3-Penten-2-one, (E)-	C5H8O	0.00	1.91
2.56	2-Pentanone	C5H10O	0.00	2.19

2.63	Ethanol	C ₂ H ₅ OH	1.15	0.00
2.66	3-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	0.00	2.28
2.75	Furan, 2,5-dimethyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.00	0.99
2.75	Propanoic acid	C ₃ H ₆ O ₂	0.82	0.00
2.82	2-Butanone, 3-hydroxy-	C ₄ H ₈ O ₂	0.79	0.00
2.97	Vinylfuran	C ₆ H ₆ O	0.00	1.08
3.03	Ethane, 1,1-diethoxy-	C ₆ H ₁₄ O ₂	0.81	0.98
3.24	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂	0.00	0.61
3.65	3-Hydroxypropanal	C ₃ H ₆ O ₂	1.33	0.00
3.84	Butanedial	C ₅ H ₈ O ₂	0.67	0.00
3.98	Cyclopentanone	C ₇ H ₁₂ O	0.27	0.59
4.05	Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂	0.69	0.00
4.12	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.00	0.58
4.86	Furfural	C ₅ H ₄ O ₂	0.00	0.69
4.95	Cyclopentanone, 2-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.00	0.67
5.37	2-Butanone	C ₄ H ₈ O	0.49	0.00
5.61	2-Propanone, 1-(acetyloxy)-	C ₅ H ₈ O ₃	0.57	0.00
6.53	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.34	0.00
6.70	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.14	0.00
6.76	Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂	0.25	0.00
6.86	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂	0.53	0.00
7.13	2(3H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂	0.28	0.00
7.50	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂	0.19	0.00
7.57	3-Cyclohexene-1-carboxaldehyde	C ₇ H ₁₀ O	0.00	0.21
8.14	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.48	0.00
8.60	2(5H)-Furanone, 3-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂	0.19	0.00
8.91	Phenol	C ₆ H ₆ O	0.37	0.00
8.98	Benzofuran	C ₈ H ₆ O	0.00	0.43
9.39	5-Norbornene-2-carboxaldehyde	C ₈ H ₁₀ O	0.00	1.93
9.70	3-Cyclohexene-1-carboxaldehyde, 4-methyl-	C ₈ H ₁₂ O	0.00	0.74
9.89	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.98	0.00
10.52	4-Methyl-5H-furan-2-one	C ₅ H ₆ O ₂	0.27	0.00
10.90	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O	0.45	0.00
11.15	Bicyclo[3.3.0]oct-2-en-8-one, 3-methyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.00	1.35
11.56	Phenol, 4-methyl-	C ₇ H ₈ O	0.46	0.00

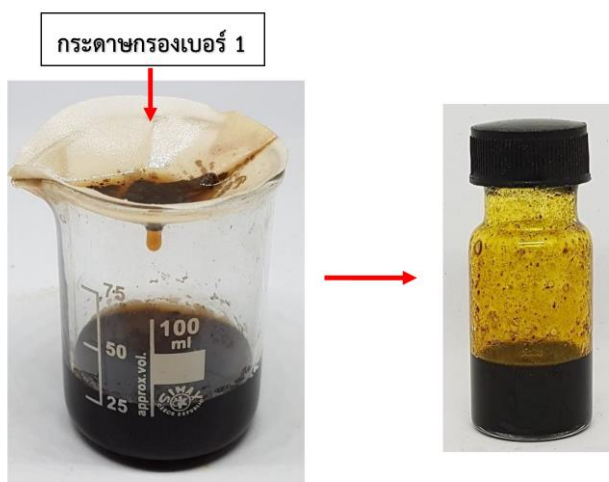
11.71	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O	0.82	0.00
11.72	2-Acetyl-5-norbornene	C ₉ H ₁₂ O	0.00	1.02
12.46	Maltol	C ₆ H ₆ O ₃	0.28	0.00
13.61	Phenol, 2,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.61	0.00
14.29	Phenol, 2-methoxy-3-methyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂	0.28	0.00
14.70	Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂	0.58	0.00
15.22	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	C ₆ H ₆ O ₄	0.69	0.00
15.54	1,2-Benzenediol	C ₆ H ₆ O ₂	0.38	0.00
16.11	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.38	0.00
16.80	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	C ₇ H ₈ O ₃	0.31	0.00
17.11	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂	0.57	0.00
18.02	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	C ₇ H ₈ O ₃	1.89	0.00
19.11	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃	0.58	0.00
19.23	Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O	0.65	0.00
20.45	Vanillin	C ₈ H ₈ O ₃	0.97	0.00
21.56	1,2,3-Trimethoxybenzene	C ₉ H ₁₂ O ₃	0.61	0.00
21.64	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (E)-	C ₁₂ H ₁₄ O ₃	0.83	0.00
22.99	1,6-Anhydro-.beta.-D-glucopyranose (levoglucosan)	C ₆ H ₁₀ O ₃	11.72	0.00
23.50	5-tert-Butylpyrogallol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃	0.74	0.00
23.68	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	0.62	0.00
24.49	3',5'-Dimethoxyacetophenone	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	0.31	0.00
26.60	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	C ₉ H ₁₀ O ₄	0.96	0.00
27.23	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	0.36	0.00
27.82	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₄	0.27	0.00
28.37	Desaspidinol	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	0.48	0.00
	sum		47.68	22.21
	total sum		48.22	39.14

4.3 การไฟโรไลซิสแบบเร็วชนิดใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและสมบัติของไบโอออยล์

4.3.1 ผลกระทบที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

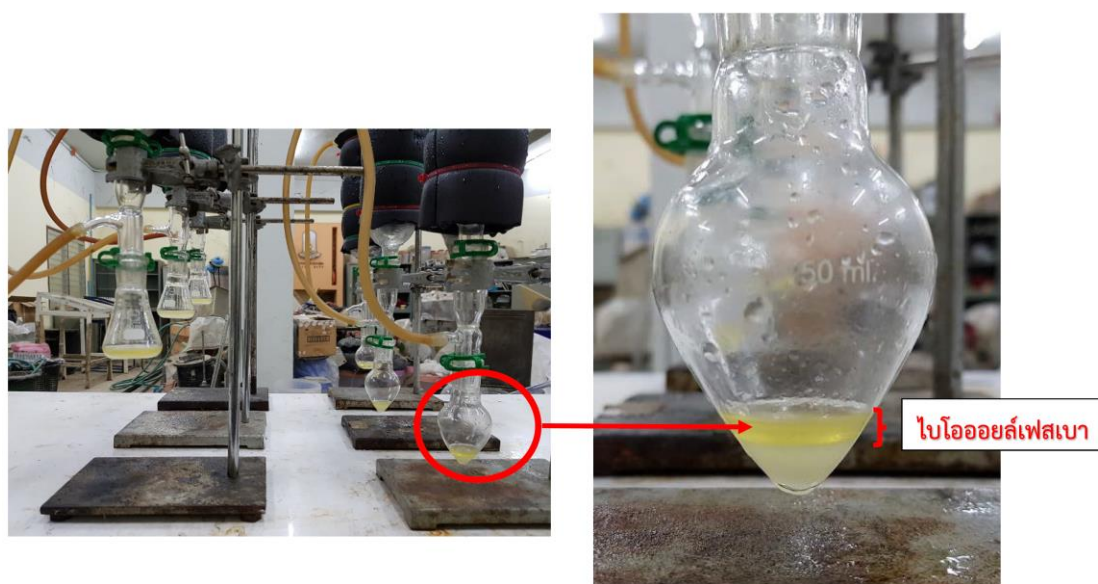
ไบโอออยล์จากกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์เฟสหนัก เฟสน้ำและเฟสเบา ไบโอออยล์เฟสหนักได้จากชุดควบแน่นด้วยน้ำและชุดดักจับไฟฟ้าสถิตมีลักษณะสีน้ำตาลเข้มเกือบดำและหนืดข้น ก่อนนำไบโอออยล์เฟสหนักไปวิเคราะห์ควรทำการแยกออกจากน้ำก่อน ทำได้โดยการใช้กระดาษกรองเบอร์ 1 มาพับให้เป็นทรงกรวยนำไป

วางไว้บนบีกเกอร์แล้วจึงเทไบโอออยล์ที่รวมกับน้ำลงไป จากนั้นรอให้น้ำซึมผ่านกระดาษจนหมดแล้ว จึงเก็บไบโอออยล์เฟสหนักและซังน้ำหนักกระดาษกรองด้วยดังภาพประกอบ 53



ภาพประกอบ 53 การแยกไบโอออยล์เฟสหนัก

เมื่อสังเกตไบโอออยล์เฟสน้ำและไบโอออยล์เฟสเบาดังภาพประกอบ 54 ของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดพบว่าไบโอออยล์เฟสเบาแยกชั้นกับไบโอออยล์เฟสน้ำกันอย่างชัดเจน



ภาพประกอบ 54 ไบโอออยล์เฟสเบาจากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมเอซีโตน

ไบโอดีเซลเฟสน้ำได้จากชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นมีลักษณะเป็นสีเหลืองใสถึงสีน้ำตาลขุ่นและมีตะกอนเล็กน้อยดังภาพประกอบ 55



ภาพประกอบ 55 ไบโอดีเซลเฟสน้ำได้จากชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น

ส่วนไบโอดีเซลเฟสเบาได้จากชุดเครื่องแก้วที่ควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมแอซีโตนมีลักษณะเป็นสีเหลืองใสมีกลิ่นฉุนดังภาพประกอบ 56

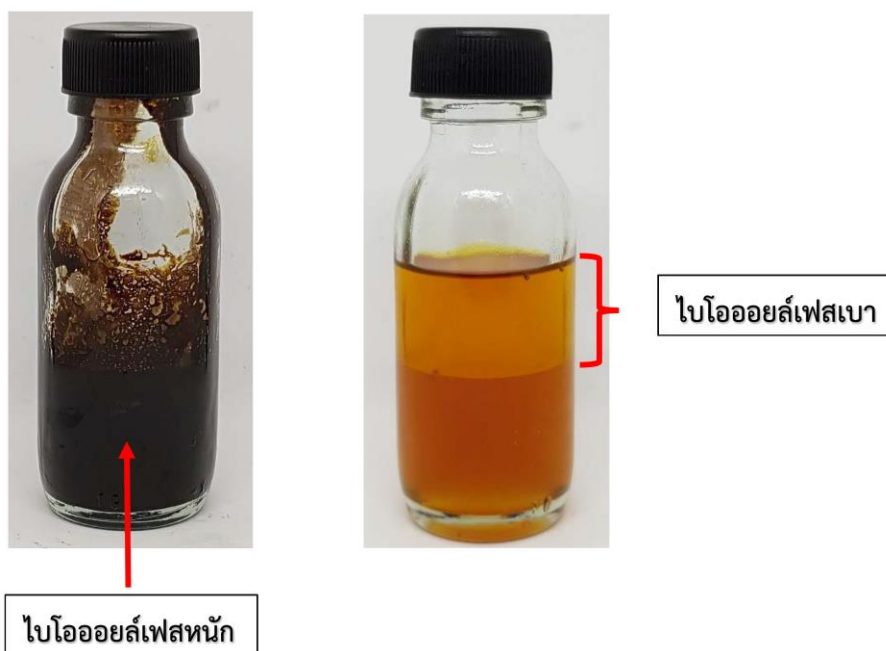


ไบโอดีเซลเฟสหนัก

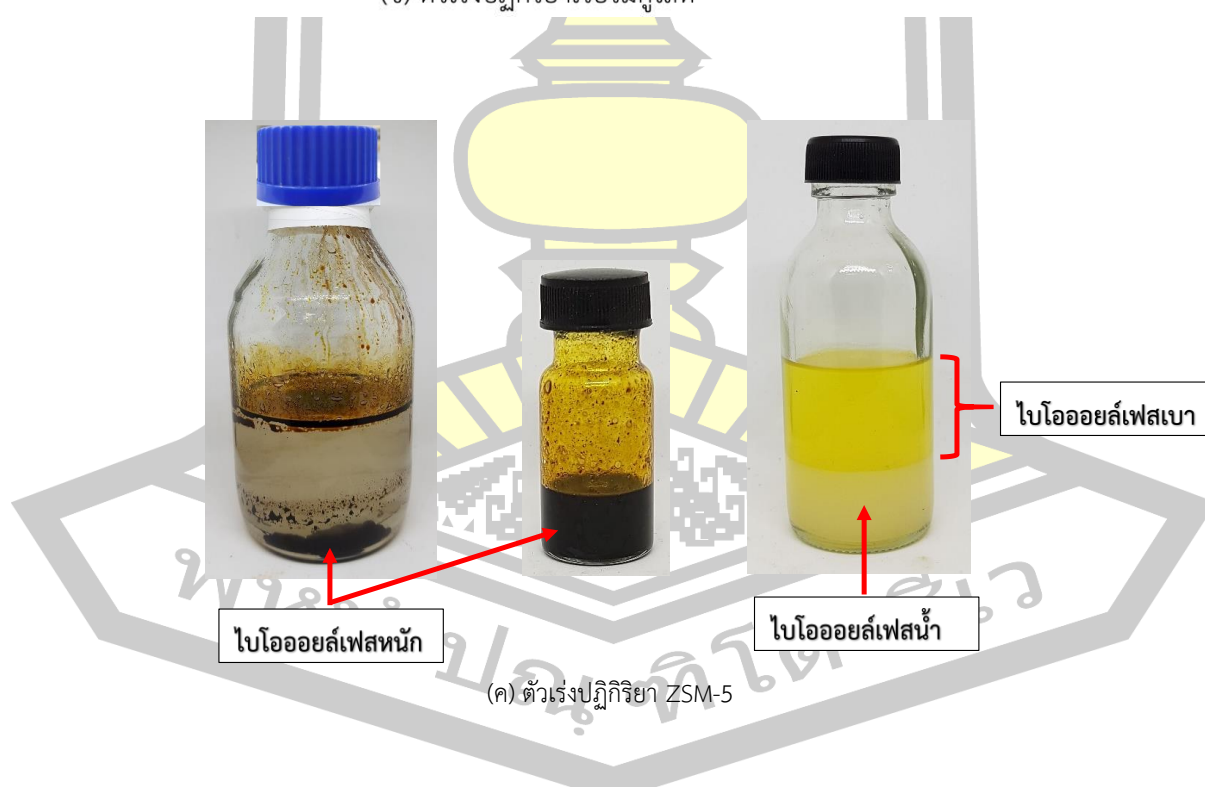
ไบโอดีเซลเฟสน้ำ

ไบโอดีเซลเฟสเบา

(ก) ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์



(ข) ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลท์



ภาพประกอบ 56 ลักษณะของไบโอออยล์จากการการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด

4.3.2 ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

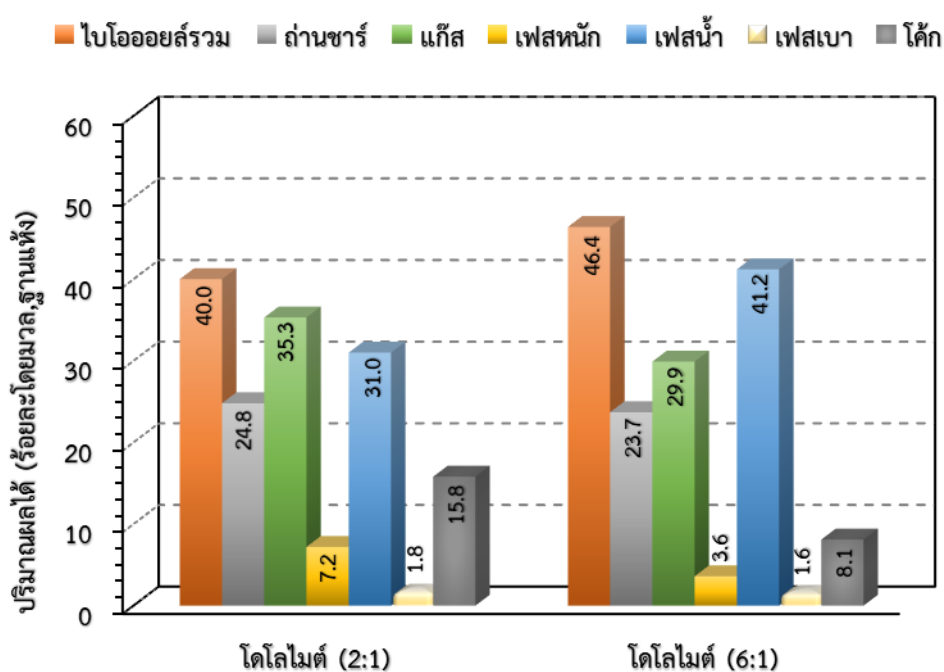
ในการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วแบบได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดได้แก่ โดโลไมต์ เวอร์มิคูไลต์ และ ZSM-5 ก่อนนำมาใช้งานได้ผ่านกระบวนการเตรียมก่อน เพราะว่าการเผาทำให้โครงสร้างหรือพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการขยายตัวทางความร้อนทำให้เปิดตัวของรูพรุน (active side) ให้มีผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยามากขึ้น โดยการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิแตกต่างกันเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์เผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส และ ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดก่อนกระบวนการเตรียมมีลักษณะทางกายภาพปกติแต่เมื่อผ่านกระบวนการเตรียมเสร็จแล้วมีลักษณะที่เปลี่ยนไปเช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลบางส่วนและตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มดังภาพประกอบ 57



ภาพประกอบ 57 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการเผาและหลังใช้งาน

4.3.3 ผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์ดำเนินการโดยตัวเร่งปฏิกิริยา โดโลไมต์ ใช้อัตราป้อนชีวมวล 1 กิโลกรัม/ชั่วโมง ขนาดอนุภาคชีวมวล 0.2-1.0 มิลลิเมตร ระยะห้อง ความร้อน 165 เซนติเมตร เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 นาที อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่ชุดเครื่องเร่ง ปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส WHSV 0.3 ชั่วโมง⁻¹ และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวลเป็น 2:1 ผลการทดลองดังภาพประกอบ 58

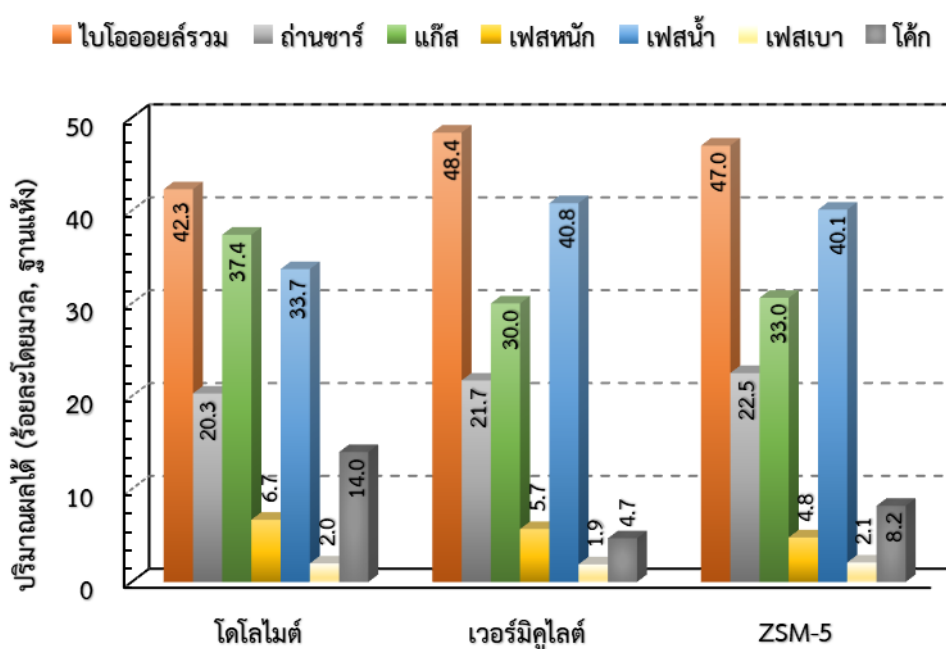


ภาพประกอบ 58 ปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่อัตราส่วนแตกต่างกัน

จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่อัตราส่วน 2:1 ให้ปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์รวมร้อยละ 40.0 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่อัตราส่วน 6:1 ให้ปริมาณผลได้ของไบโอเออยล์รวมเพิ่มขึ้นร้อยละ 40.0 เป็นร้อยละ 46.4 โดยน้ำหนัก เนื่องจากในการทดลองได้ใช้อัตราการไหลในโตรเจนที่ 5 ลิตร/นาที เท่ากันและใช้ปั๊มสุญญากาศช่วยดูดที่ 0 เซนติเมตรน้ำ แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ที่อัตราส่วน 6:1 ใช้ปั๊มสุญญากาศดูดแรงกว่าที่ -20 เซนติเมตรน้ำ ส่งผลให้ปริมาณผลได้ไบโอเออยล์เฟสน้ำเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 31.0 เป็นร้อยละ 41.2 โดยน้ำหนัก เพราะว่าแรงดูดของปั๊มสุญญากาศที่แรงนำพาไอไฟโรไลซิสมาทำปฏิกิริยากับตัวเร่งได้เร็วขึ้น

ทำให้ปริมาณผลได้ของแก๊สลดลงตามไปด้วยร้อยละ 35.3 เป็นร้อยละ 29.9 โดยน้ำหนัก แต่ก็ทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนักลดลงร้อยละ 7.2 เป็นร้อยละ 3.6 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการใช้ปั๊มสุญญากาศให้ดูดแรงเกินไปอาจทำให้ไอพโรไลซิสมาทำปฏิกิริยากับตัวเร่งไม่เพียงพอส่งผลให้ปริมาณผลได้เฟสหนักน้อยลง ส่วนไบโอออยล์เฟสเบาที่ได้แตกต่างกันเล็กน้อยร้อยละ 1.8 และ 1.6 โดยน้ำหนัก

ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ เวอร์มิคูไลต์ และ ZSM-5 ต่อปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ดำเนินการโดยเริ่มต้นใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์ใช้อัตราป้อน 300 กรัม/ชั่วโมง ขนาดอนุภาคชีวมวล 0.2-0.6 มิลลิเมตร ระยะห้องความร้อน 165 เซนติเมตร เวลาคงอยู่ 2 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่ชุดเครื่องเร่งปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไนโตรเจน 10 ลิตร/นาที่ และใช้ปั๊มสุญญากาศช่วยดูด WHSV 0.3 ชั่วโมง¹ และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวลเป็น 2:1 ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ และ ZSM-5 ใช้เงื่อนไขเหมือนกันกับตัวเร่งเวอร์มิคูไลต์แต่แตกต่างกันที่อัตราป้อนที่ใช้คือ 600 กรัม/ชั่วโมง ผลการทดลองดังภาพประกอบ 59



ภาพประกอบ 59 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ใช้เร่งปฏิกิริยา

ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา โดโลไมต์ เวอร์มิคูไลต์ และ ZSM-5 ให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมร้อยละ 42.3-48.4 โดยน้ำหนัก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ [6, 21] ที่ร้อยละ 38-40.49 โดยน้ำหนัก และงานวิจัยของ

Hasan Merdun, และ i.V.S. [37] ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ และ ZSM-5 เหมือนกันให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์รวมน้อยกว่าร้อยละ 42.3 และ 47.0 เป็นร้อยละ 30.8-29.2 โดยน้ำหนัก และเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นชนิด drop tube หรือเทียบเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระแต่ในงานวิจัยนี้ใช้การกระตุ้นตัวเร่งที่อุณหภูมิที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสภาวะนี้อาจยังไม่ทำให้ตัวเร่งถูกกระตุ้นมากพอเลยทำให้ได้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมลดลง ปริมาณผลได้ไบโอออยล์เฟสหนักร้อยละ 4.8-6.7 โดยน้ำหนัก ปริมาณผลได้ของถ่านชาร์มีค่าใกล้เคียงกันร้อยละ 20.3-22.5 โดยน้ำหนัก ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสน้ำมีค่าใกล้เคียงกันร้อยละ 33.7-40.1 [6] โดยน้ำหนัก ปริมาณผลได้ของแก๊สมีค่าไม่แตกต่างกันมากร้อยละ 33.0-37.4 โดยน้ำหนัก และปริมาณผลได้ไบโอออยล์เฟสเบา มีค่าใกล้เคียงกันร้อยละ 1.9 และ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [6, 21] ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ เวอร์มิคูไลต์ และ ZSM-5 ได้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสเบาร้อยละ 1.6 โดยน้ำหนัก โคโลไมต์ร้อยละ 1.1 และ ZSM-5 ร้อยละ 2.9 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์และเวอร์มิคูไลต์มีค่ามากกว่าเล็กน้อยแต่ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ยังมีค่าน้อยกว่าอาจเป็นเพราะยังควบคุมตัวแปรบางตัวยังไม่เหมาะสม ดังนั้นควรศึกษาตัวแปรในเชิงลึกเพื่อที่สามารถผลิตไบโอออยล์เฟสเบาให้ได้มากขึ้น

4.3.4 สมบัติของไบโอออยล์เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและถ่านชาร์

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาของตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 แสดงดังตาราง 10 พบว่ามีปริมาณของคาร์บอนร้อยละ 87.2 เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Mante, O.D. และ F.A. Agblevor [42] ร้อยละ 80.2 และ Fischer, A., et al 76.2 [43] ปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 7.6 6.9 [42] และ 2.5 [43] ส่วนปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.2 0.6 [42] และ ร้อยละ 2.9 [43] และปริมาณออกซิเจนมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 16.3 [42] และ 18.8 [43] เป็นร้อยละ 4.8 ปริมาณออกซิเจนที่ได้มากอาจเป็นเพราะว่าในกระบวนการใช้อุณหภูมิต่ำที่ 470 องศาเซลเซียส หรือใช้อุณหภูมิสูงที่ 589 องศาเซลเซียส ส่วนไบโอออยล์เฟสเบาได้ปริมาณคาร์บอนร้อยละ 84.0 ได้น้อยกว่างานวิจัยของ นันทปรีชา [39] ที่ใช้ไม้กระถินยักษ์เหมือนกันร้อยละ 89.4 เนื่องจากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ที่ใหม่กว่าแต่งงานวิจัยนี้ใช้ตัวเร่งที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 6-7 ครั้ง อาจเป็นผลทำให้ได้ปริมาณน้อยกว่า ส่วนไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน ในงานวิจัยมีค่ามากกว่าเล็กน้อย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในไบโอออยล์เฟสหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 66.2 เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Charusiri, W. และ T. Vitidsant [32] ที่ใช้ฟางอ้อยได้ร้อยละ 54.7 และงานวิจัยของ Ly, H.V., et al [6] ที่ใช้ต้นทิวลิปได้ร้อยละ 61.3 ปริมาณไฮโดรเจนในงานวิจัยนี้ร้อยละ 8.4 ซึ่งใกล้เคียงกับงานของ [6] ที่ได้ร้อยละ 7.2 แต่งานวิจัยของ [32] ได้ปริมาณที่สูงมาร้อยละ 18.9 อาจเป็นเพราะใช้อุณหภูมิในกระบวนการน้อยเกินไปที่ 450 องศา

เซลเซียส ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนที่ได้น้อยลง 0.2 ซึ่งน้อยกว่าปริมาณไนโตรเจนในงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น ๆ ร้อยละ 0.9 ส่วนปริมาณออกซิเจนในงานวิจัยนี้ได้มากกว่างานวิจัยที่ผ่านมาร้อยละ 26.2 และ 30.6 เป็นร้อยละ 23.8 อาจเป็นเพราะงานวิจัยที่ผ่านมาเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 800-900 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 6-3 ชั่วโมง แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ 900 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง จึงทำให้ได้ค่าที่ต่างกัน ส่วนไบโอออยล์เฟสหนักของเวอร์มิคูไลท์ที่มีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 31.3 เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นซึ่งได้น้อยมาก อาจเป็นเพราะความผิดพลาดตอนวิเคราะห์ ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 56.9 ปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 10.2 และปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.7

ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ในไบโอออยล์เฟสหนักมีค่าความร้อนสูง 38.9 MJ/kg เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดและแบบเบดนิ่งมีค่าความร้อน 34.8 และ 27.6 MJ/kg ปริมาณผลได้เชิงพลังงานที่ได้น้อยลง 8.5 ส่วนไบโอออยล์เฟสเบาพบว่ามีความร้อนสูงเท่ากัน 41.3 และ 41.5 MJ/kg และปริมาณผลได้เชิงพลังงานมีค่าใกล้เคียงกันร้อยละ 4.1 และ 5.9 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ในไบโอออยล์เฟสหนักพบว่ามีความร้อนสูง 30.4 MJ/kg เมื่อเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่นแล้วมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก 26.7 และ 29.2 MJ/kg และปริมาณผลได้เชิงพลังงานเฟสหนักและเฟสเบาร้อยละ 9.0 และ 3.1 ตามลำดับ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เวอร์มิคูไลท์ให้ค่าความร้อนสูงเฟสหนักแค่ 15.9 MJ/kg ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวเร่งชนิดอื่น เพราะว่ามีปริมาณออกซิเจนที่มากถึงร้อยละ 57.8 ส่วนไบโอออยล์เฟสเบามีความร้อนสูง 29.9 MJ/kg มีค่าน้อยกว่าตัวเร่งชนิดอื่นเช่นกันและปริมาณผลได้เชิงพลังงานเฟสหนักและเฟสเบาร้อยละ 4.0 และ 2.6 ตามลำดับ

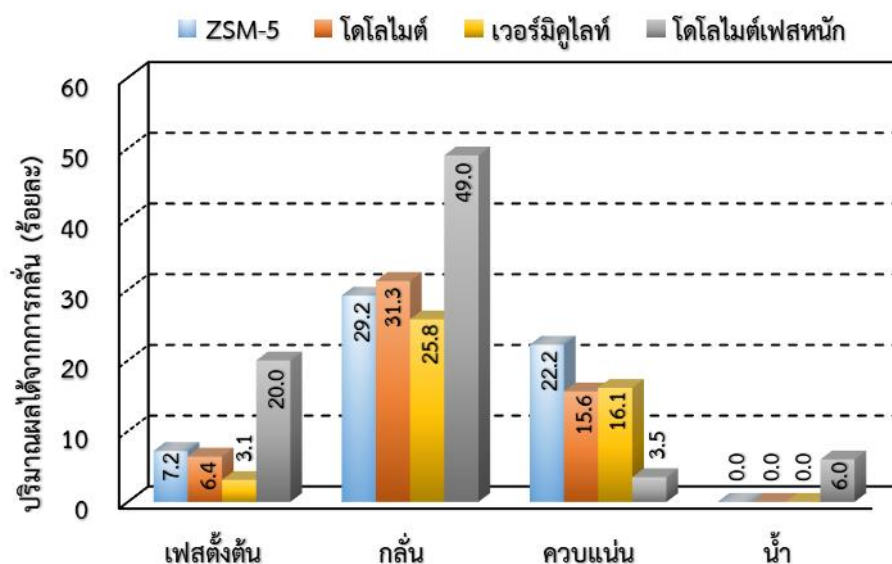
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุและค่าความร้อนของถ่านชาร์พบว่าในเครื่องปฏิกรณ์สั่นให้ปริมาณคาร์บอนสูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบฟองร้อยละ 45.9 เป็นร้อยละ 79.6 ซึ่งต่างกันถึงร้อยละ 33.7 เนื่องจากเครื่องฟลูอิดไชน์เบดแบบฟองใช้ตัวกลางถ่ายโอน เช่น ทราย ที่ทำให้ชีวมวลสลายได้ดีขึ้นแต่ผลเสียของการใช้ทรายคือ ทรายผสมกับถ่านชาร์ส่งผลให้เมื่อนำไปวิเคราะห์จึงได้คาร์บอนน้อยลง ค่าความร้อนสูงก็น้อยตามไปด้วยถึง 13.3 MJ/kg อีกทั้งการนำถ่านชาร์ไปผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ก็เป็นไปได้ยาก ซึ่งต่างจากเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นที่ไม่ใช้ตัวกลางถ่ายโอนความร้อนเลย เพียงแค่ใช้การนำความร้อนจากผิวท่ถ่ายโอนไปยังชีวมวล ทำให้ได้ถ่านชาร์ที่มีคาร์บอนสูงและค่าความร้อนสูง 30.6 MJ/kg สามารถนำไปต่อยอดเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้ และปริมาณผลได้เชิงพลังงานร้อยละ 32.8

ตาราง 10 สมบัติไปโอออยล์เฟสหนัก เฟสเบาและถ่านชาร์

วิเคราะห์	ZSM-5						โตโลไมต์				เวอร์มิคูไลต์		ถ่านชาร์	
	ชนิดเครื่องปฏิกรณ์						ชนิดเครื่องปฏิกรณ์						ชนิดเครื่องปฏิกรณ์	
	แบบสั้น	ฟลูอิดซ์เบด	ฟลูอิดซ์เบด	แบบเบดมิ่ง	แบบสั้น	ฟลูอิดซ์เบด	ฟลูอิดซ์เบด	ฟลูอิดซ์เบด	ฟลูอิดซ์เบด	ฟลูอิดซ์เบด	ฟลูอิดซ์เบด	ฟลูอิดซ์เบด	ฟลูอิดซ์เบด	
	งานวิจัยนี้	[39]	[43]	[42]	งานวิจัยนี้	[32]	[6]	งานวิจัยนี้	งานวิจัยนี้	งานวิจัยนี้	งานวิจัยนี้	งานวิจัยนี้	งานวิจัยนี้	
	เฟสหนัก	เฟสเบา	เฟสหนัก	เฟสเบา	เฟสหนัก	เฟสหนัก	เฟสหนัก	เฟสหนัก	เฟสหนัก	เฟสหนัก	เฟสหนัก	เฟสหนัก	เฟสหนัก	
ปริมาณธาตุ (wt%)														
คาร์บอน	87.2	84.0	-	89.4	80.2	76.2	66.2	66.6	61.3	31.3	61.5	79.6	45.9	
ไฮโดรเจน	7.6	11.9	-	8.9	6.9	2.5	8.4	9.8	7.2	10.2	9.6	4.1	2.2	
ไนโตรเจน	0.2	0.2	-	0.1	0.6	2.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.9	0.3	0.7	
ออกซิเจน	4.8	3.7	-	1.6	12.3	18.8	24.5	22.7	30.6	57.8	28.0	9.5	39	
ค่าความร้อน (MJ/kg)														
ความร้อนสูง	38.9	41.3	-	41.5	34.8	27.6	30.4	32.4	26.7	15.9	29.9	30.6	13.3	
ความร้อนต่ำ	37.3	38.7	-	39.6	33.3	27.1	28.6	30.3	-	13.7	27.8	29.7	12.8	
energy yield (wt%)	8.5	4.1	-	5.9	-	-	9.0	3.1	-	4.0	2.6	32.8	8.2	

4.4 ผลลัพธ์จากกระบวนการกลั่นไบโอออยล์เฟสเบาของตัวเร่งปฏิกิริยาต่าง ๆ

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์เฟสเบาตั้งต้น ไบโอออยล์เฟสเบาจากการให้ความร้อนหรือต้ม และไบโอออยล์เฟสเบาจากการควบแน่นด้วยชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น ไบโอออยล์ที่นำมาใช้ในการกลั่นใช้เพียง 2 ใน 3 ของเฟสเบาตั้งต้น เนื่องจากไบโอออยล์เฟสเบาตั้งต้นมีไม่มากนักจึงแบ่งไว้เพื่อนำไปวิเคราะห์หาอย่างอื่น โดยปริมาณที่ใช้ในการให้ความร้อนของไบโอออยล์เฟสเบาตั้งต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 คือ 7.2 กรัม ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ 6.4 กรัม ไบโอออยล์เฟสหนักโดโลไมต์ 20 กรัม และ ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์ 3.1 กรัม ผลการทดลองดังภาพประกอบ 60 หลังจากผ่านกระบวนการกลั่นแล้วจึงได้นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี GC/MS



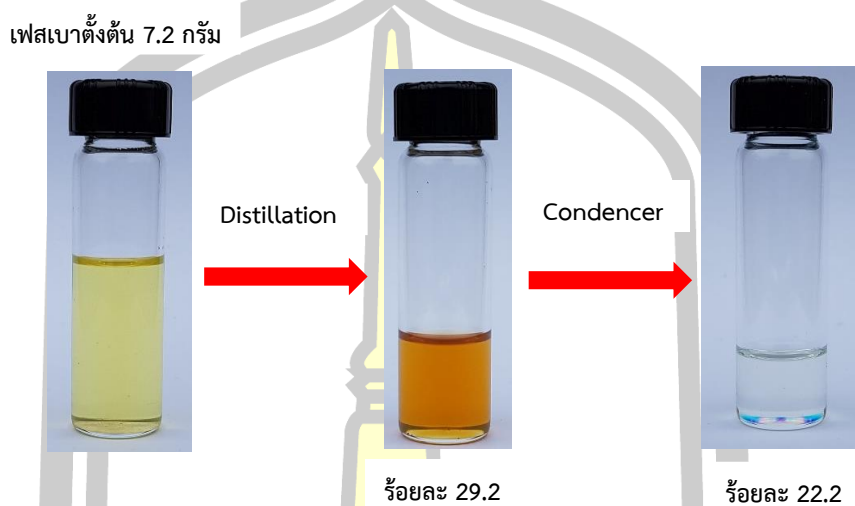
ภาพประกอบ 60 ปริมาณได้จากกระบวนการกลั่นของเฟสต่าง ๆ

ไบโอออยล์ที่ผ่านกระบวนการกลั่นของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป โดยมีรายละเอียดของไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5

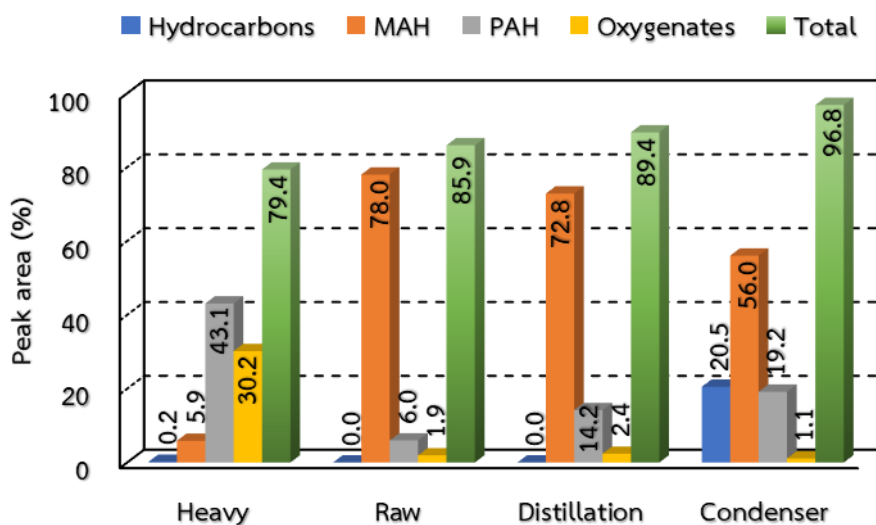
ไบโอออยล์เฟสเบาตั้งต้นของ ZSM-5 ได้มาจากการควบแน่นไพรอซีสแบบเร็วมีลักษณะสีเหลืองใสมีกลิ่นฉุน หลังจากนำไปผ่านกระบวนการกลั่นโดยการให้ความร้อนกับเฟสเบาได้ปริมาณที่เหลือน้อยละ 29.2 มีลักษณะสีที่เข้มข้นกว่าน้ำมันตั้งต้น ส่วนไอระเหยที่ผ่านชุดกลั่นนำไป

ควบแน่นที่ชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นได้ปริมาณที่ได้ร้อยละ 22.2 กรัม มีลักษณะเป็นสีใสมีกลิ่นฉุนดังภาพประกอบ 61



ภาพประกอบ 61 ไบโอดีเอสเฟสต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการกลั่นจาก ZSM-5

การวิเคราะห์ไบโอดีเอสหนักและเฟสเบา ดังตาราง 11 จากเครื่อง GC/MS พบว่าองค์ประกอบของสารเคมีในไบโอดีเอสหนักส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม PAH ร้อยละ 43.1 เช่น Naphthalene และ Phenanthrene ส่วนกลุ่ม Oxygenates ร้อยละ 30.2 เช่น Phenol และ Benzofuran ส่วนไบโอดีเอสเบาที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ไบโอดีเอสเบาดั้งเดิมพบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 78.0 เช่น Benzene Hexane Heptane p-Xylene และ Toluene ส่วนที่ 2 ไบโอดีเอสเบาที่ผ่านการกลั่น (distillation) พบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 72.8 เช่น Benzene Hexane Heptane p-Xylene และ Toluene ส่วนกลุ่ม PAH ร้อยละ 14.2 เช่น Indane 1H-Indene และ Naphthalene ส่วนที่ 3 ไบโอดีเอสเบาที่ได้จากการควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น พบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 56.0 เช่น Benzene p-Xylene และ Toluene ตามด้วยกลุ่ม Hydrocarbons ร้อยละ 20.5 เช่น 1,3,5-Cycloheptatriene และ 1,3-Cyclohexadiene ดังภาพประกอบ 62



ภาพประกอบ 62 พื้นที่ใต้กราฟไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากการใช้ ZSM-5

ตาราง 11 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
Hydrocarbons						
2.17	1,3-Cyclohexadiene	C ₆ H ₈	0.00	0.00	0.00	0.11
3.55	1,3,5-Cycloheptatriene	C ₇ H ₈	0.00	0.00	0.00	20.42
26.95	Chamazulene	C ₁₄ H ₁₆	0.20	0.00	0.00	0.00
	sum		0.20	0.00	0.00	20.42
Monocyclic aromatic hydrocarbons						
2.07	Cyclopentane, methyl-	C ₆ H ₁₂	0.00	5.24	1.43	0.17
2.24	Cyclohexene	C ₆ H ₁₀	0.00	0.92	0.36	0.00
2.25	Ethylidenecyclobutane	C ₆ H ₁₀	0.00	0.00	0.00	0.09
2.33	Benzene	C ₆ H ₆	0.12	0.00	4.59	10.33
2.35	Pentane, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₆	0.00	10.61	0.00	0.00
2.40	Hexane, 3-methyl-	C ₇ H ₁₆	0.00	3.19	1.82	0.00
2.52	Pentane, 2,2,4-trimethyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	5.13	0.00	9.93
2.52	Hexane, 2,2-dimethyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.00	3.33	0.00
2.63	Heptane	C ₇ H ₁₆	0.00	2.12	1.53	0.08
2.87	Pentane, 2,2,4-trimethyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.00	0.11	0.00

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
2.93	Cyclohexane, methyl-	C ₇ H ₁₄	0.00	1.88	1.55	0.10
3.02	Heptane, 3-methyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.71	0.69	0.00
3.25	Hexane, 3,3,4-trimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	1.03	1.11	0.00
3.47	Heptane, 2-methyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.85	0.97	0.00
3.55	Toluene	C ₇ H ₈	0.89	18.49	15.46	20.15
3.74	Heptane, 2,2-dimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	0.44	0.36	0.00
3.94	1-Octene	C ₈ H ₁₆	0.00	0.12	0.18	0.00
4.05	Octane	C ₁₈ H ₁₈	0.00	0.46	0.65	0.00
4.39	Hexane, 2,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	0.00	0.10	0.00
5.39	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	0.12	0.91	1.87	1.18
5.56	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	0.77	11.85	15.03	0.00
6.11	Styrene	C ₈ H ₈	0.00	0.00	9.52	0.00
6.15	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	0.00	0.00	0.00	7.55
6.23	Nonane	C ₉ H ₂₀	0.00	6.74	0.02	0.00
6.60	o-Xylene	C ₈ H ₁₀	0.00	0.00	0.00	0.06
6.86	Heptane, 2,3,4-trimethyl-	C ₁₀ H ₂₂	0.00	0.00	0.02	0.00
6.94	Benzene, (1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.04	0.11	0.01
7.73	Benzene, propyl-	C ₉ H ₁₂	0.01	0.08	0.19	0.04
7.95	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	1.04	2.09	0.82
7.95	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.27	0.00	0.00	0.00
8.14	Benzene, 1,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.00	0.00	0.38
8.46	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.00	0.00	0.13
8.83	Benzene, 1,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	1.37	4.13	0.00	0.00
8.84	Benzene, 1,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.00	7.39	0.00
8.94	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.12	0.37	0.00	0.20
9.25	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.22	0.00	3.60
9.81	Benzene, 1-ethenyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₀	0.05	0.00	0.00	0.00
10.60	Benzene, 1,2-diethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.07	0.00	0.00	0.00
10.70	Benzene, 1-ethyl-3,5-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.00	0.08	0.00
10.71	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.02	0.26	0.00	0.02

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
10.72	Benzene, 1-methyl-3-propyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.06	0.00	0.01	0.00
10.80	Benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.04	0.00	0.03	0.02
11.31	Benzene, tert-butyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.00	0.02	0.00
11.39	Benzene, 1-methyl-2-(2-propenyl)-	C ₁₀ H ₁₂	0.23	0.25	0.00	0.18
11.46	Benzene, 1-ethenyl-3-ethyl-	C ₁₀ H ₁₂	0.00	0.00	0.51	0.23
11.54	Benzene, 1-ethenyl-4-ethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.38	0.68	0.19
12.11	Benzene, 2-ethyl-1,3-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.00	0.18	0.00
12.38	Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.23	0.00	0.26	0.00
12.41	Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.14	0.14	0.22	0.04
12.45	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.13	0.00	0.03
22.81	Benzene, hexamethyl-	C ₁₂ H ₁₈	0.16	0.00	0.00	0.00
25.26	1-Isopropenylnaphthalene	C ₁₃ H ₁₂	0.42	0.00	0.00	0.00
27.19	9H-Fluorene, 9-methyl-	C ₁₄ H ₁₂	0.32	0.00	0.00	0.00
28.02	9H-Fluorene, 2-methyl-	C ₁₄ H ₁₂	0.42	0.00	0.00	0.00
28.59	2,4-Diphenyl-4-methyl-1-pentene	C ₁₈ H ₂₀	0.00	0.05	0.03	0.17
34.02	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	0.08	0.00	0.00	0.00
35.12	Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	0.00	0.00	0.06	0.00
35.55	1-Octadecene	C ₁₈ H ₃₆	0.00	0.21	0.00	0.00
35.70	Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	0.00	0.00	0.00	0.23
36.19	Tetracosane	C ₂₄ H ₅₀	0.00	0.00	0.07	0.00
37.45	Pentacosane	C ₂₅ H ₅₂	0.00	0.00	0.11	0.00
38.95	Hexadecane	C ₁₆ H ₃₆	0.00	0.00	0.00	0.12
38.99	Eicosane	C ₂₀ H ₄₂	0.00	0.00	0.12	0.00
sum			5.89	78.00	72.84	56.04
<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i>						
10.05	Indane	C ₉ H ₈	0.61	1.37	2.75	2.32
10.33	Indene	C ₉ H ₈	0.52	1.47	3.86	6.70
13.06	1H-Indene, 2,3-dihydro-5-methyl-	C ₁₀ H ₁₂	1.18	0.00	0.00	0.00
13.08	1H-Indene, 2,3-dihydro-5-methyl-	C ₁₀ H ₁₂	0.00	0.48	0.93	0.44
13.40	1H-Indene, 1-methyl-	C ₁₀ H ₁₀	0.00	0.42	0.91	0.87
13.57	2-Methylindene	C ₁₀ H ₁₀	1.00	0.25	0.45	0.59

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
13.75	Naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-	C ₁₄ H ₁₆	0.23	0.00	0.14	0.06
13.83	1,4-Dihydronaphthalene	C ₁₀ H ₁₀	0.42	0.00	0.12	0.16
14.33	1H-Indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₄	0.00	0.00	0.06	0.00
14.39	Azulene	C ₁₀ H ₈	3.80	0.00	0.00	0.00
14.41	Naphthalene	C ₁₀ H ₈	0.00	1.36	3.75	5.93
15.52	1H-Indene, 2,3-dihydro-4,7-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₄	0.35	0.00	0.01	0.00
16.49	1H-Indene, 1,3-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.80	0.00	0.03	0.03
17.54	Naphthalene, 1-methyl-	C ₁₁ H ₁₀	7.16	0.53	0.84	1.22
17.95	1H-Indene, 2,3-dihydro-4,5,7-trimethyl-	C ₁₂ H ₁₆	1.20	0.00	0.00	0.00
17.98	Naphthalene, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₀	0.00	0.00	0.26	0.56
19.63	1,2,3-Trimethylindene	C ₁₂ H ₁₄	0.29	0.00	0.00	0.00
19.63	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-	C ₁₂ H ₁₄	0.34	0.00	0.00	0.00
19.79	Acenaphthene	C ₁₄ H ₁₀	0.00	0.00	0.00	0.01
20.14	Naphthalene, 2-ethyl-	C ₁₂ H ₁₂	1.49	0.00	0.00	0.00
20.45	Naphthalene, 2,6-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	5.80	0.00	0.00	0.00
20.46	Naphthalene, 1,4-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	0.68	0.00	0.03	0.01
20.52	Naphthalene, 1,4,6-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	0.00	0.00	0.00	0.08
20.55	Naphthalene, 1,8-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	0.00	0.10	0.00	0.04
20.61	Naphthalene, 1,6-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	1.27	0.00	0.08	0.08
21.09	Naphthalene, 2-ethenyl-	C ₁₂ H ₁₂	1.36	0.00	0.00	0.00
21.13	Naphthalene, 2,3,6-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	0.00	0.00	0.00	0.01
21.46	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	0.92	0.00	0.00	0.01
22.47	Acenaphthene	C ₁₄ H ₁₀	0.19	0.00	0.00	0.00
22.53	Naphthalene, 1-propyl-	C ₁₃ H ₁₄	0.41	0.00	0.00	0.00
22.73	Naphthalene, 2-(1-methylethyl)-	C ₁₃ H ₁₄	0.24	0.00	0.00	0.00
22.92	Naphthalene, 1,4,6-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	1.37	0.00	0.00	0.00
24.36	Naphthalene, 2,3,6-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	0.36	0.00	0.00	0.00
24.85	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	0.20	0.00	0.00	0.00
25.14	Naphthalene, 1-(2-propenyl)-	C ₁₃ H ₁₂	0.55	0.00	0.00	0.00
25.44	1,1'-Biphenyl, 2-methyl-	C ₁₃ H ₁₂	0.51	0.00	0.00	0.00
25.99	9H-Xanthene	C ₁₃ H ₁₀ O	2.14	0.00	0.00	0.00

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
26.66	Naphthalene, 1,2,3,4-tetramethyl-	C ₁₄ H ₁₆	0.36	0.00	0.00	0.00
26.82	Anthracene, 9,10-dihydro-	C ₁₄ H ₁₂	0.44	0.00	0.00	0.00
26.83	(E)-Stilbene	C ₁₄ H ₁₂	0.40	0.00	0.00	0.00
28.52	Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	0.46	0.00	0.00	0.00
28.67	Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	0.75	0.00	0.00	0.00
30.63	Phenanthrene, 3-methyl-	C ₁₅ H ₁₂	1.07	0.00	0.00	0.00
30.66	Anthracene, 2-methyl-	C ₁₅ H ₁₂	0.00	0.00	0.00	0.04
30.83	Anthracene, 9-methyl-	C ₁₅ H ₁₂	0.81	0.00	0.00	0.00
31.58	Naphthalene, 2-phenyl-	C ₁₆ H ₁₂	0.21	0.00	0.00	0.00
31.82	Phenanthrene, 4,5-dimethyl-	C ₁₆ H ₁₄	0.14	0.00	0.00	0.00
32.07	Phenanthrene, 2,5-dimethyl-	C ₁₆ H ₁₄	0.12	0.00	0.00	0.00
32.20	Phenanthrene, 9,10-dimethyl-	C ₁₆ H ₁₄	0.29	0.00	0.00	0.00
32.38	Phenanthrene, 1,7-dimethyl-	C ₁₆ H ₁₄	0.44	0.00	0.00	0.00
32.71	Pyrene, 4,5,9,10-tetrahydro-	C ₁₆ H ₁₄	0.25	0.00	0.00	0.00
32.99	Phenanthrene, 2,7-dimethyl-	C ₁₆ H ₁₄	0.15	0.00	0.00	0.00
33.54	Pyrene	C ₁₆ H ₁₀	0.38	0.00	0.00	0.00
33.96	Phenanthrene, 2,3,5-trimethyl-	C ₁₇ H ₁₆	0.18	0.00	0.00	0.00
35.17	Pyrene, 2-methyl-	C ₁₇ H ₁₂	0.16	0.00	0.00	0.00
35.26	Pyrene, 1-methyl-	C ₁₇ H ₁₂	0.20	0.00	0.00	0.00
35.74	Naphthacene, 5,12-dihydro-	C ₁₈ H ₁₄	0.10	0.00	0.00	0.00
36.21	Pyrene, 1,3-dimethyl-	C ₁₈ H ₁₄	0.22	0.00	0.00	0.00
36.58	o-Terphenyl	C ₁₈ H ₁₄	0.19	0.00	0.00	0.00
37.53	Triphenylene	C ₁₈ H ₁₂	0.10	0.00	0.00	0.00
39.53	Chrysene, 1-methyl-	C ₉ H ₁₄	0.00	0.00	0.00	0.00
20.37	Naphthalene, 1,5-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	0.29	0.00	0.00	0.03
	sum		43.07	5.99	14.20	19.17
Oxygenates						
2.64	Ethanol	C ₂ H ₅ OH	0.10	0.00	0.00	0.26
2.70	Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₁ ClO	0.24	0.00	0.00	0.00
2.77	Cyclopentanone, 3-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.00	0.26	0.17	0.00
3.04	Ethane, 1,1-diethoxy-	C ₆ H ₁₄ O ₂	0.11	0.00	0.00	0.23

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
3.34	Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₁ ClO	0.00	1.39	1.58	0.02
3.36	Furan, 2-ethyl-	C ₆ H ₈ O	0.00	0.00	0.00	0.14
4.27	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.00	0.00	0.16	0.00
8.75	Phenol	C ₆ H ₆ O	1.24	0.00	0.00	0.00
8.98	Benzofuran	C ₈ H ₆ O	0.76	0.01	0.06	0.41
9.41	5-Norbornane-2-carboxaldehyde	C ₈ H ₁₀ O	0.00	0.03	0.05	0.00
10.25	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O	0.06	0.00	0.00	0.00
10.81	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O	2.40	0.00	0.00	0.00
11.46	Phenol, 4-methyl-	C ₇ H ₈ O	5.10	0.00	0.00	0.00
11.73	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O	5.10	0.00	0.00	0.00
11.74	2-Acetyl-5-norbornene	C ₉ H ₁₂ O	0.00	0.11	0.15	0.00
11.93	Benzofuran, 2-methyl-	C ₉ H ₈ O	0.00	0.14	0.19	0.03
12.05	Benzofuran, 7-methyl-	C ₉ H ₈ O	0.10	0.00	0.00	0.00
12.23	Phenol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.74	0.00	0.00	0.00
13.27	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.18	0.00	0.00	0.00
14.17	Phenol, 2,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.94	0.00	0.00	0.00
14.71	Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂	0.03	0.00	0.00	0.00
14.88	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.66	0.00	0.00	0.00
15.21	Benzofuran, 4,7-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₀ O	0.42	0.00	0.01	0.00
16.89	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.41	0.00	0.00	0.00
17.01	Acetophenone, 4'-hydroxy-	C ₈ H ₈ O ₂	0.23	0.00	0.00	0.00
18.10	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₂	0.33	0.00	0.00	0.00
18.34	Phenol, 4-(2-propenyl)-	C ₉ H ₁₀ O ₂	0.37	0.00	0.00	0.00
19.83	6-Methoxy-3-methylbenzofuran	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	0.21	0.00	0.00	0.00
21.00	5-tert-Butylpyrogallol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃	1.21	0.00	0.00	0.00
21.57	1,2,3-Trimethoxybenzene	C ₉ H ₁₂ O ₃	0.17	0.00	0.00	0.00
23.26	Dibenzofuran	C ₁₂ H ₈ O	0.30	0.00	0.00	0.00
23.38	1-Naphthalenol	C ₁₀ H ₈ O	0.47	0.00	0.00	0.00
23.51	Benzene, 1,2,3-trimethoxy-5-methyl-	C ₁₀ H ₁₄ O	0.60	0.00	0.00	0.00
23.58	2-Naphthalenol	C ₁₀ H ₈ O	2.79	0.00	0.00	0.00
25.74	1-Naphthalenol, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₁ O	1.68	0.00	0.00	0.00

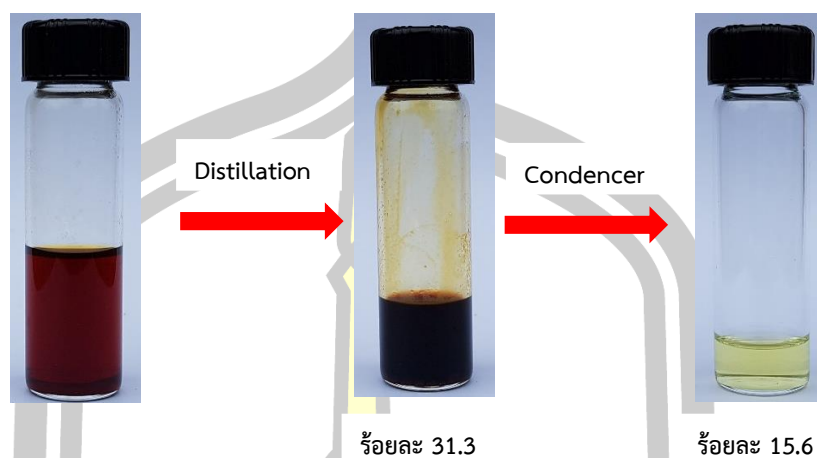
RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
27.23	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₈ H ₁₀ O	0.30	0.00	0.00	0.00
27.72	1-Naphthol, 6,7-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂ O	0.63	0.00	0.00	0.00
28.38	Desaspidinol	C ₁₂ H ₈ O	0.36	0.00	0.00	0.00
29.16	1-Naphthol, 2,5,8-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄ O	0.55	0.00	0.00	0.00
31.16	[1,1'-Biphenyl]-4-carboxaldehyde	C ₁₃ H ₁₀ O	0.20	0.00	0.00	0.00
31.18	n-Hexadecanoic acid	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	0.27	0.00	0.00	0.00
33.75	Octadecanoic acid	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	0.25	0.00	0.00	0.00
34.26	Benzo[b]naphtho[2,3-d]furan	C ₁₆ H ₁₀ O	0.15	0.00	0.00	0.00
34.84	11H-Benzo[b]fluorene	C ₁₇ H ₁₀ O	0.13	0.00	0.00	0.00
35.52	2H-Phenanthro[9,10-b]pyran	C ₂₈ H ₂₀ O	0.43	0.00	0.00	0.00
	sum		30.19	1.94	2.38	1.09
	Total sum		79.35	85.94	89.43	96.83

4.4.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์

ไบโอออยล์เฟสเบาดังต้นของไดโลไมต์มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มมีกลิ่นฉุนดังภาพประกอบ 63 หลังจากนำไปผ่านกระบวนการกลั่นโดยการให้ความร้อนกับเฟสเบาให้ปริมาณที่เหลือร้อยละ 31.3 เฟสเบาที่ได้มีลักษณะสีน้ำตาลถึงสีดำที่เข้มข้นกว่าน้ำมันตั้งต้นอาจเป็นเพราะสารเคมีบางตัวที่ระเหยไปจึงทำให้มีลักษณะเข้มข้น ไอระเหยที่ผ่านชุดกลั่นนำไปควบแน่นที่ชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นให้ปริมาณที่ได้ร้อยละ 15.6 มีลักษณะเป็นสีขาวใสมีกลิ่นฉุนดังภาพประกอบ 63



เฟสเบต้งต้น 6.4 กรัม

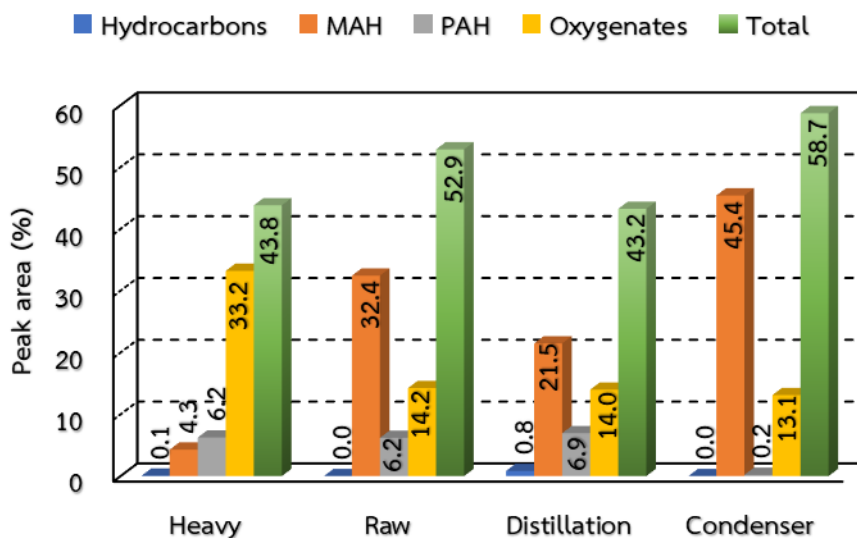


ภาพประกอบ 63 ไบโอดีออยล์เฟสต่าง ๆ ที่ผ่านกระบวนการกลั่นจากโตโลไมด์

การวิเคราะห์ไบโอดีออยล์เฟสหนักและเฟสเบา ดังตาราง 12 จากเครื่อง GC/MS โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโตโลไมด์มีองค์ประกอบของสารเคมีในไบโอดีออยล์เฟสส่วนหนักใหญ่อยู่กลุ่ม PAH ร้อยละ 6.2 เช่น Naphthalene และกลุ่ม Oxygenates ร้อยละ 33.2 เช่น Phenol และ Benzofuran ส่วนไบโอดีออยล์เฟสเบาที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ไบโอดีออยล์เฟสเบาดั้งเดิมพบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 32.4 เช่น Benzene p-Xylene และ Toluene ส่วนกลุ่ม PAH ร้อยละ 6.2 เช่น Indane และ 1H-Indene ส่วนที่ 2 ไบโอดีออยล์เฟสเบาที่ผ่านการกลั่น (distillation) พบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 21.5 เช่น Benzene p-Xylene และ Toluene ส่วนกลุ่ม PAH ร้อยละ 6.9 เช่น Indane และ 1H-Indene ส่วนที่ 3 ไบโอดีออยล์เฟสเบาที่ได้จากการควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น พบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 45.4 เช่น Benzene p-Xylene และ Toluene ดัง

ภาพประกอบ 64

พูน ปณ จิต ชเว



ภาพประกอบ 64 พื้นที่ใต้กราฟไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากการใช้โดโลไมต์

ตาราง 12 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)				
			Heavy	light phase			
				Raw	Distillation	Condenser	
Hydrocarbons							
2.17	1,3-Cyclohexadiene	C ₆ H ₈	0.00	0.00	0.14	0.00	
4.19	1,3,5-Cycloheptatriene	C ₇ H ₈	0.00	0.00	0.71	0.00	
6.12	1,3,5,7-Cyclooctatetraene	C ₈ H ₈	0.07	0.00	0.00	0.00	
	sum		0.07	0.00	0.84	0.00	
Monocyclic aromatic hydrocarbons							
2.16	Ethylidenecyclobutane	C ₆ H ₁₀	0.00	0.35	0.00	1.21	
2.24	Cyclohexene	C ₆ H ₁₀	0.00	0.00	0.00	1.91	
2.34	Benzene	C ₆ H ₆	0.12	4.97	1.26	10.52	
2.52	Pentane, 2,2,4-trimethyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.74	0.00	2.35	
2.63	Heptane	C ₇ H ₁₆	0.00	0.00	0.00	1.83	
2.93	Cyclohexane, methyl-	C ₇ H ₁₄	0.00	0.53	0.00	1.42	
3.47	Pyrrole	C ₄ H ₅ N	0.00	0.64	0.54	0.00	

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
3.47	Heptane, 2-methyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.00	0.00	0.72
3.56	Toluene	C ₇ H ₈	0.37	12.29	4.54	20.03
3.74	Hexane, 2,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	0.00	0.00	1.32
3.74	Heptane, 2,2-dimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	0.00	0.00	0.09
3.85	Heptane	C ₇ H ₁₆	0.00	0.00	0.16	0.00
3.90	1-Octene	C ₈ H ₁₆	0.00	0.00	0.00	0.79
4.05	Octane	C ₁₈ H ₁₈	0.00	0.10	0.00	0.79
5.39	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	0.06	0.60	0.70	0.45
5.57	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	0.37	4.03	3.66	1.54
6.03	Cyclopropane, octyl-	C ₁₁ H ₂₂	0.00	0.14	0.00	0.00
6.11	Styrene	C ₈ H ₈	0.00	1.92	1.98	0.00
6.93	Benzene, (1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.43	0.24	0.00
7.94	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.75	0.42	0.00
7.97	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.06	1.01	0.45	0.05
8.12	Benzene, 1,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	1.00	0.32	0.47	0.00
8.45	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.32	0.35	0.00
8.71	1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	0.00	0.27	0.28	0.00
8.83	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	1.37	1.96	0.13
9.80	Benzene, 1-ethenyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.12	0.00	0.00	0.00
10.49	Benzene, 1-methyl-3-propyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.00	0.16	0.00
10.70	Benzene, 1-ethyl-3,5-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.41	0.35	0.00
11.53	Benzene, 1-ethenyl-4-ethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.00	2.78	0.00
11.60	1-Undecene	C ₁₁ H ₂₂	0.00	0.31	0.28	0.00
12.51	Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.41	0.37	0.00
14.49	3-Tetradecene, (Z)-	C ₁₄ H ₂₈	0.00	0.00	0.41	0.00
14.49	1-Dodecene	C ₁₂ H ₂₄	0.00	0.31	0.00	0.00
17.28	1-Tridecene	C ₁₃ H ₂₆	0.79	0.00	0.00	0.00
19.94	Cyclopropane, octyl-	C ₁₁ H ₂₂	0.00	0.00	0.11	0.00
22.79	Benzene, hexamethyl-	C ₁₂ H ₁₈	0.37	0.00	0.00	0.00
27.19	9H-Fluorene, 9-methyl-	C ₁₄ H ₁₂	0.45	0.00	0.00	0.00
27.32	9H-Fluorene, 2-methyl-	C ₁₄ H ₁₂	0.30	0.00	0.00	0.00

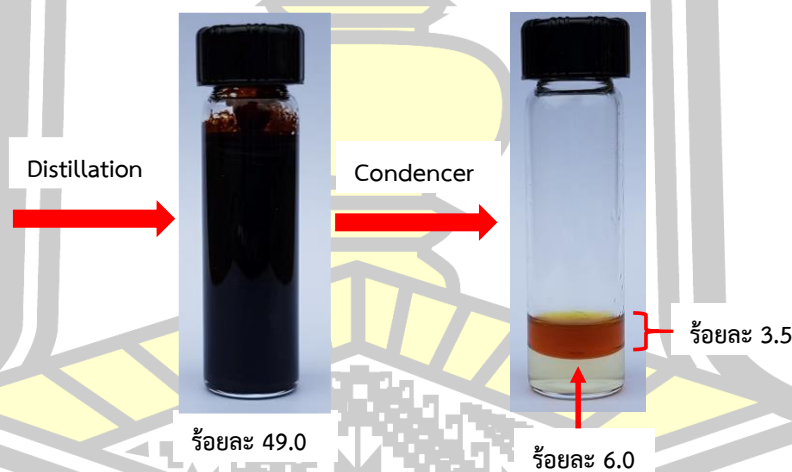
RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
28.45	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	0.28	0.00	0.00	0.00
28.58	2,4-Diphenyl-4-methyl-1-pentene	C ₁₈ H ₂₀	0.00	0.22	0.00	0.24
	sum		4.29	32.43	21.46	45.40
<i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i>						
10.05	Indane	C ₉ H ₈	0.11	0.74	1.29	0.20
10.33	Indene	C ₉ H ₈	0.22	1.06	1.32	0.00
11.42	1H-Indene, 1-methyl-	C ₁₀ H ₁₀	0.00	1.74	0.00	0.00
13.07	1H-Indene, 2,3-dihydro-5-methyl-	C ₁₀ H ₁₂	0.11	0.18	0.25	0.00
13.38	2-Methylindene	C ₁₀ H ₁₀	0.45	0.56	0.86	0.00
13.39	1H-Indene, 3-methyl-	C ₁₀ H ₁₀	0.00	0.78	0.00	0.00
13.81	1,4-Dihydronaphthalene	C ₁₀ H ₁₀	0.00	0.00	0.51	0.00
14.40	Naphthalene	C ₁₀ H ₈	0.52	0.90	0.00	0.00
14.41	Azulene	C ₁₀ H ₈	0.00	0.00	1.33	0.00
16.38	1H-Indene, 4,7-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.00	0.00	0.23	0.00
16.54	1H-Indene, 1,3-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.19	0.09	0.17	0.00
17.75	Naphthalene, 1-methyl-	C ₁₁ H ₁₀	0.47	0.00	0.71	0.00
17.81	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-	C ₁₂ H ₁₄	0.34	0.00	0.00	0.00
17.99	Naphthalene, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₀	0.00	0.14	0.19	0.00
20.47	Naphthalene, 1,6-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	0.00	0.00	0.08	0.00
20.81	Naphthalene, 1,3-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	0.40	0.00	0.00	0.00
23.56	Naphthalene, 2,3,6-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	0.56	0.00	0.00	0.00
23.57	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	0.37	0.00	0.00	0.00
24.85	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	0.37	0.00	0.00	0.00
28.69	Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	0.34	0.00	0.00	0.00
30.49	Anthracene, 9-methyl-	C ₁₅ H ₁₂	0.21	0.00	0.00	0.00
32.84	Fluoranthene	C ₁₆ H ₁₀	0.35	0.00	0.00	0.00
33.14	Phenanthrene, 2,5-dimethyl-	C ₁₆ H ₁₄	0.68	0.00	0.00	0.00
33.54	Pyrene	C ₁₆ H ₁₀	0.56	0.00	0.00	0.00
	sum		6.24	6.19	6.94	0.20
<i>Oxygenates</i>						
2.03	Ethanol	C ₂ H ₅ OH	0.14	0.00	0.00	0.00

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
2.27	2-Butenal	C ₄ H ₆ O	0.00	1.16	0.61	0.00
2.43	3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O	0.00	1.02	0.83	3.19
2.45	3-Penten-2-one	C ₅ H ₈ O	0.11	0.00	0.00	0.00
2.56	2-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	0.25	2.07	1.40	1.94
2.66	3-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	0.16	1.97	0.99	2.09
2.75	Furan, 2,5-dimethyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.16	1.19	0.43	2.30
2.82	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.00	0.00	0.17	0.00
2.97	Vinylfuran	C ₆ H ₆ O	0.00	0.38	0.47	0.59
3.04	Ethane, 1,1-diethoxy-	C ₆ H ₁₄ O ₂	0.18	0.35	0.23	1.24
3.23	2-Butenal, 2-methyl-	C ₅ H ₈ O	0.00	0.00	1.24	0.00
3.25	3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O	0.14	0.00	0.00	0.00
3.94	2-Hexanone	C ₆ H ₁₂ O	0.00	0.37	0.47	0.00
4.13	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.00	0.00	0.00	0.96
4.20	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.00	0.04	0.00	0.00
4.39	Furan, 2,3,5-trimethyl-	C ₇ H ₁₀ O	0.00	0.06	0.27	0.07
4.83	2-Cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O	0.35	0.00	0.00	0.00
4.94	Cyclopentanone, 2-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.42	0.60	0.97	0.05
5.04	2-Butanone	C ₄ H ₈ O	0.00	0.08	0.00	0.00
5.31	Acetone	C ₃ H ₆ O	0.04	0.00	0.00	0.00
5.61	Furan, 2-ethyl-	C ₆ H ₈ O	0.30	0.00	0.00	0.00
6.28	Cyclopentanone, 2,4-dimethyl-	C ₇ H ₁₂ O	0.11	0.00	0.00	0.00
6.50	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.85	0.00	0.00	0.00
6.53	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.00	0.87	0.78	0.00
6.71	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.13	0.00	0.00	0.00
6.77	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	C ₆ H ₆ O ₂	0.17	0.00	0.00	0.00
6.79	Benzene, methoxy-	C ₇ H ₈ O	0.00	0.31	0.37	0.00
7.99	Benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	0.07	0.00	0.00	0.00
8.08	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.96	0.00	0.00	0.00
8.81	Phenol	C ₆ H ₆ O	1.87	0.00	0.00	0.00
8.97	Benzofuran	C ₈ H ₆ O	0.68	0.77	1.33	0.00
9.39	5-Norbornane-2-carboxaldehyde	C ₈ H ₁₀ O	0.00	1.49	1.79	0.45

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
9.63	Benzene, 1-methoxy-4-methyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.26	0.00	0.00	0.00
9.91	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.32	0.00	0.00	0.00
10.18	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O	0.76	0.00	0.00	0.00
10.85	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O	1.62	0.00	0.00	0.00
11.03	Acetophenone	C ₈ H ₈ O	0.51	0.45	0.00	0.00
11.48	Phenol, 3-methyl-	C ₇ H ₈ O	2.67	0.00	0.00	0.00
11.50	Phenol, 4-methyl-	C ₇ H ₈ O	2.49	0.00	0.00	0.00
11.70	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O	1.26	0.00	0.00	0.00
11.71	2-Acetyl-5-norbornene	C ₉ H ₁₂ O	0.00	1.07	1.63	0.24
11.91	Benzofuran, 2-methyl-	C ₉ H ₈ O	0.29	0.00	0.00	0.00
12.25	Phenol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.86	0.00	0.00	0.00
13.28	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.31	0.00	0.00	0.00
13.56	Phenol, 2,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	2.30	0.00	0.00	0.00
13.82	Acetophenone, 4'-hydroxy-	C ₈ H ₈ O	0.16	0.00	0.00	0.00
14.18	Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	1.92	0.00	0.00	0.00
14.70	Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂	0.56	0.00	0.00	0.00
14.91	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.52	0.00	0.00	0.00
15.04	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.60	0.00	0.00	0.00
15.83	Phenol, 2,3,6-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.54	0.00	0.00	0.00
17.11	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂	0.91	0.00	0.00	0.00
17.86	1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro-3-methyl-	C ₁₀ H ₁₀ O	0.30	0.00	0.00	0.00
18.10	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₂	0.50	0.00	0.00	0.00
18.27	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.69	0.00	0.00	0.00
19.48	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	0.79	0.00	0.00	0.00
21.64	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (E)-	C ₁₂ H ₁₄ O ₃	0.94	0.00	0.00	0.00
23.26	Dibenzofuran	C ₁₂ H ₈ O	0.45	0.00	0.00	0.00
23.40	1-Naphthalenol	C ₁₀ H ₈ O	0.25	0.00	0.00	0.00
23.50	5-tert-Butylpyrogallol	C ₁₀ H ₁₄ O ₃	0.40	0.00	0.00	0.00
25.83	1-Naphthalenol, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₀ O	1.06	0.00	0.00	0.00
26.00	9H-Xanthene	C ₁₃ H ₁₀ O	0.73	0.00	0.00	0.00
27.71	1-Naphthol, 6,7-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂ O	1.13	0.00	0.00	0.00

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
	sum		33.21	14.24	13.99	13.11
	Total sum		43.81	52.86	43.24	58.71

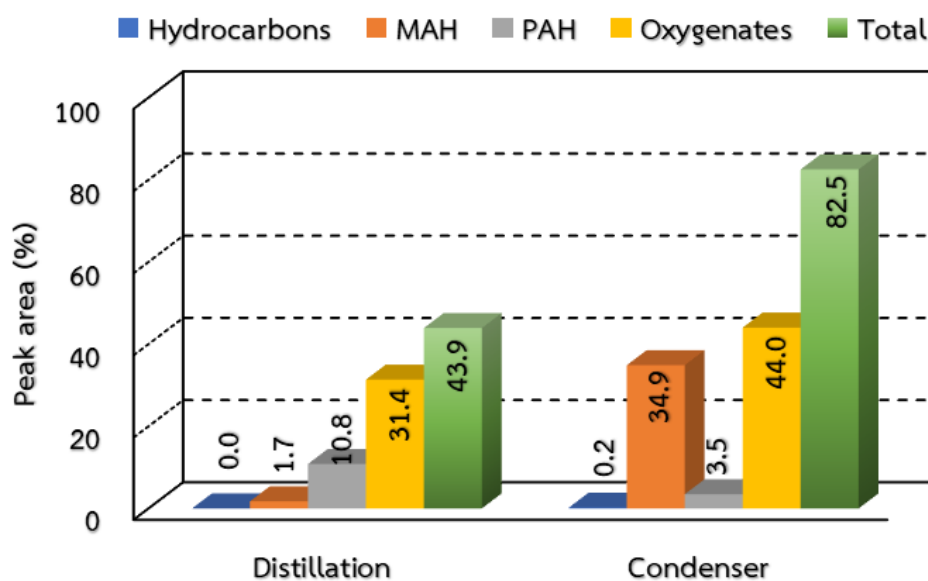
นอกจากใช้ไบโอออยล์เฟสเบาของตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์มาผ่านกระบวนการกลั่นแล้ว ยังใช้ไบโอออยล์เฟสหนักมาผ่านกระบวนการกลั่นอีกด้วย โดยไบโอออยล์เริ่มต้นมีลักษณะสีน้ำตาลถึงดำและหนืดขุ่นมีน้ำผสมอยู่เล็กน้อย หลังนำมาผ่านกระบวนการกลั่นแล้วพบว่าให้ปริมาณที่เหลือร้อยละ 49.0 มีลักษณะสีน้ำตาลถึงสีดำเหมือนเดิมแต่มีความหนืดมากขึ้น เนื่องจากการให้ความร้อนทำให้น้ำที่ผสมอยู่ระเหยออกไปจนหมด ส่วนไอที่ระเหยไปควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นให้ปริมาณที่ได้ร้อยละ 3.5 และน้ำร้อยละ 6.0 โดยพบว่าไบโอออยล์เฟสเบาลอยตัวอยู่บนเฟสน้ำอย่างเห็นได้ชัด ดังภาพประกอบ 65



ภาพประกอบ 65 เฟสหนักจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้ไดโลไมต์และนำมากลั่น

การวิเคราะห์ไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาจากเครื่อง GC/MS ดังตาราง 13 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาจากตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์พบว่าองค์ประกอบสารเคมีในไบโอออยล์เฟสหนักที่กลั่นแล้วส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มของ Oxygenates ร้อยละ 31.4 เช่น Phenol และอยู่ในกลุ่ม PAH ร้อยละ 10.8 เช่น Naphthalene

ส่วนไบโอออยล์ได้จากการควบแน่นพบว่ามี 2 เฟส ได้แก่ เฟสเบาและเฟสน้ำ โดยเฟสเบาจะลอยตัวอยู่บนเฟสน้ำ และพบว่าองค์ประกอบสารเคมีของเฟสเบาอยู่ในกลุ่มของ MAH ร้อยละ 34.9 เช่น Benzene p-Xylene และ Toluene ส่วนในกลุ่ม PAH ร้อยละ เช่น Naphthalene และส่วนที่อยู่ในกลุ่ม Oxygenates ร้อยละ 44.0 เช่น Phenol ดังภาพประกอบ 66



ภาพประกอบ 66 พื้นที่ใต้กราฟไบโอออยล์เฟสหนักจากการใช้โดโลไมต์

ตาราง 13 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาจากตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)	
			Distillation	light
Hydrocarbons				
2.16	1,3-Cyclohexadiene	C ₇ H ₈	0.00	0.19
	sum		0.00	0.19
Monocyclic aromatic hydrocarbons				
2.07	Cyclopentane, methyl-	C ₆ H ₁₂	0.00	1.95
2.25	Cyclohexene	C ₆ H ₁₀	0.00	0.35
2.34	Benzene	C ₆ H ₆	0.17	4.80
2.40	Hexane, 3-methyl-	C ₇ H ₁₆	0.09	1.64
2.51	Pentane, 2,2,4-trimethyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	1.62

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)	
			Distillation	light
2.63	Heptane	C ₇ H ₁₆	0.00	1.22
2.93	Cyclohexane, methyl-	C ₇ H ₁₄	0.00	0.73
3.01	Heptane, 3-methyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.29
3.13	1-Octene	C ₈ H ₁₆	0.00	0.19
3.33	Nonane	C ₉ H ₂₀	0.00	0.87
3.47	Heptane, 2-methyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.32
3.57	Toluene	C ₇ H ₈	0.52	5.99
3.73	Hexane, 2,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	0.54
3.74	Heptane, 2,2-dimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	0.53
5.38	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	0.00	0.71
5.56	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	0.00	3.90
6.09	Styrene	C ₈ H ₈	0.00	0.48
7.71	Benzene, propyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.23
7.93	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.73
8.11	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.96
8.44	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.36
8.52	Benzene, 1-ethenyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.17
8.70	1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	0.00	0.22
8.82	Benzene, 1,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	2.57
10.48	Benzene, 1-methyl-3-propyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.12
10.61	Benzene, 1,2-diethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.23
10.69	Benzene, 1-ethyl-3,5-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.24
11.24	Benzene, 2-ethyl-1,4-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.21
11.59	1-Undecene	C ₁₁ H ₂₂	0.00	1.98
12.67	Benzene, 1-methyl-2-(2-propenyl)-	C ₁₀ H ₁₂	0.00	0.17
17.28	1-Tridecene	C ₁₃ H ₂₆	0.00	0.25
19.93	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	0.00	0.12
19.95	3-Tetradecene, (Z)-	C ₁₄ H ₂₈	0.00	0.16
26.87	1-Hexadecene	C ₁₆ H ₃₂	0.19	0.00
27.19	9H-Fluorene, 9-methyl-	C ₁₄ H ₁₂	0.52	0.00
28.45	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	0.24	0.00
	sum		1.73	34.86

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)	
			Distillation	light
Polycyclic aromatic hydrocarbons				
10.31	Indene	C ₉ H ₈	0.00	0.76
11.41	1H-Indene, 1-methyl-	C ₁₀ H ₁₀	0.00	0.14
13.06	1H-Indene, 2,3-dihydro-5-methyl-	C ₁₀ H ₁₂	0.00	0.22
13.37	1H-Indene, 1-methyl-	C ₁₀ H ₁₀	0.33	0.00
13.55	2-Methylindene	C ₁₀ H ₁₀	2.71	0.69
14.41	Naphthalene	C ₁₀ H ₈	0.61	0.48
16.53	1H-Indene, 1,3-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.12	0.00
16.80	1H-Indene, 1,3-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.00	0.24
17.36	1H-Indene, 4,7-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.97	0.00
17.96	Naphthalene, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₀	0.51	0.31
17.97	Naphthalene, 1-methyl-	C ₁₁ H ₁₀	0.57	0.42
19.63	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-	C ₁₂ H ₁₄	0.52	0.00
20.42	Naphthalene, 1,5-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	0.47	0.09
20.80	Naphthalene, 1,3-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	0.38	0.10
21.71	Naphthalene, 1,4-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂	0.35	0.00
23.57	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	0.46	0.00
24.41	1H-Phenalene	C ₁₃ H ₁₀	0.84	0.00
24.85	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	0.48	0.00
28.53	Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	0.64	0.00
28.68	Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	0.33	0.00
30.38	Phenanthrene, 3-methyl-	C ₁₅ H ₁₂	0.22	0.00
30.63	Anthracene, 9-methyl-	C ₁₅ H ₁₂	0.33	0.00
	sum		10.82	3.45
Oxygenates				
2.32	2,3-Butanedione	C ₄ H ₆ O ₂	0.00	4.56
2.55	2-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	0.00	1.98
2.63	Ethanol	C ₂ H ₅ OH	0.41	0.00
2.65	3-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	0.00	1.72
2.75	Furan, 2,5-dimethyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.00	0.44
2.97	Vinylfuran	C ₆ H ₆ O	0.00	0.33
3.04	Ethane, 1,1-diethoxy-	C ₆ H ₁₄ O ₂	0.31	0.00

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)	
			Distillation	light
3.17	3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O	0.00	1.16
3.23	2-Butenal, 2-methyl-	C ₅ H ₈ O	0.00	0.59
3.93	2-Hexanone	C ₆ H ₁₂ O	0.00	0.51
4.01	Cyclopentanone	C ₇ H ₁₂ O	0.09	2.11
4.10	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	C ₅ H ₆ O ₂	0.00	0.43
4.12	Butanoic acid	C ₄ H ₈ O ₂	0.24	0.00
4.38	Furan, 2,3,5-trimethyl-	C ₇ H ₁₀ O	0.00	0.16
4.43	Furfural	C ₅ H ₄ O ₂	0.00	0.17
4.81	3-Furaldehyde	C ₅ H ₄ O ₂	0.00	1.33
4.86	2-Cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O	0.18	0.00
4.95	Cyclopentanone, 2-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.15	2.10
5.09	Cyclopentanone, 3-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.05	0.74
5.49	2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂	0.07	0.00
5.79	Furan, 2-ethyl-	C ₆ H ₈ O	0.00	0.06
5.88	Cyclopentanone, 2,5-dimethyl-	C ₇ H ₁₂ O	0.00	0.10
6.19	Cyclohexanone	C ₆ H ₁₀ O	0.05	0.00
6.50	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.56	1.90
6.71	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.07	0.44
6.75	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	C ₆ H ₆ O ₂	0.00	0.39
6.78	Butyrolactone	C ₄ H ₆ O ₂	0.25	0.00
7.31	Cyclopentanone, 2-ethyl-	C ₇ H ₁₂ O	0.00	1.28
7.56	Cyclohexanone, 2-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.00	0.58
7.63	Cyclohexanone, 3-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.00	0.13
7.84	3-Ethylcyclopentanone	C ₇ H ₁₂ O	0.07	0.00
8.08	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.76	0.93
8.80	Phenol	C ₆ H ₆ O	2.02	2.62
8.95	Benzofuran	C ₈ H ₆ O	0.00	1.73
9.16	Cyclopentanone, 2,5-dimethyl-	C ₇ H ₁₂ O	0.20	0.00
9.61	Benzene, 1-methoxy-3-methyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.00	0.64
9.91	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.25	0.00
10.17	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O	0.95	0.57
10.84	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O	1.83	1.75
11.02	Acetophenone	C ₈ H ₈ O	0.45	0.67

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)	
			Distillation	light
11.48	Phenol, 4-methyl-	C ₇ H ₈ O	2.97	1.98
11.69	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O	1.27	1.07
11.90	Benzofuran, 2-methyl-	C ₈ H ₆ O	0.30	0.00
12.05	Benzofuran, 7-methyl-	C ₉ H ₈ O	0.00	0.67
12.20	Benzofuran, 2-methyl-	C ₈ H ₆ O	0.00	1.31
12.24	Phenol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.82	0.00
13.27	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.37	0.21
13.53	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	2.68	0.00
13.57	Phenol, 2,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.00	1.87
13.84	Acetophenone, 4'-hydroxy-	C ₈ H ₈ O	0.00	0.21
14.16	Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	2.30	0.00
14.19	Phenol, 3-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.00	0.79
14.21	Phenol, 3,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.00	1.17
14.48	Phenol, 2,4,6-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.47	0.00
14.69	Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂	0.44	0.34
15.03	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.66	0.54
15.29	Benzofuran, 4,7-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₀ O	0.26	0.42
15.64	Phenol, 2-propyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.11	0.00
15.81	Phenol, 2,3,6-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.52	0.00
15.83	Phenol, 2,4,6-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.00	0.33
16.10	Phenol, 2,3,6-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.00	0.79
16.88	Phenol, 2,4,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.37	0.00
17.10	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂	0.63	0.00
17.87	1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro-3-methyl-	C ₁₀ H ₁₀ O	0.30	0.00
19.29	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₉ H ₁₀ O ₃	0.51	0.00
19.48	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	1.03	0.00
21.66	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (E)-	C ₁₂ H ₁₄ O ₃	0.74	0.15
23.25	Dibenzofuran	C ₁₂ H ₈ O	0.49	0.07
23.66	1-Naphthalenol	C ₁₀ H ₈ O	1.15	0.00
23.68	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	0.82	0.00
25.82	1-Naphthalenol, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₀ O	1.02	0.00
26.20	9H-Xanthene	C ₁₃ H ₁₀ O	0.27	0.00
26.42	[1,1'-Biphenyl]-4-carboxaldehyde	C ₁₃ H ₁₀ O	1.33	0.00

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)	
			Distillation	light
27.70	1-Naphthol, 6,7-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₂ O	0.55	0.00
	sum		31.35	44.02
	Total sum		43.91	82.52

4.4.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์

ไบโอออยล์เฟสเบาดั้งเดิมของเวอร์มิคูไลต์มีลักษณะสีน้ำตาลอ่อนมึนกลืนดู หลังจากนำไปผ่านกระบวนการกลั่นโดยการให้ความร้อนให้ปริมาณที่ที่เหลือร้อยละ 25.8 มีลักษณะสีน้ำตาลถึงสีดำ ซึ่งเข้มข้นกว่าเฟสเบาดั้งเดิมอาจเป็นเพราะสารเคมีบางตัวที่ระเหยไปจึงทำให้มีลักษณะเข้มข้น ไอระเหยที่ผ่านชุดกลั่นนำไปควบแน่นที่ชุดควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็นให้ปริมาณที่ได้ร้อยละ 16.1 มีลักษณะเป็นสีเหลืองใสมึนกลืนดู ดังภาพประกอบ 67

เฟสเบาดั้งเดิม 3.1 กรัม



Distillation



Condenser



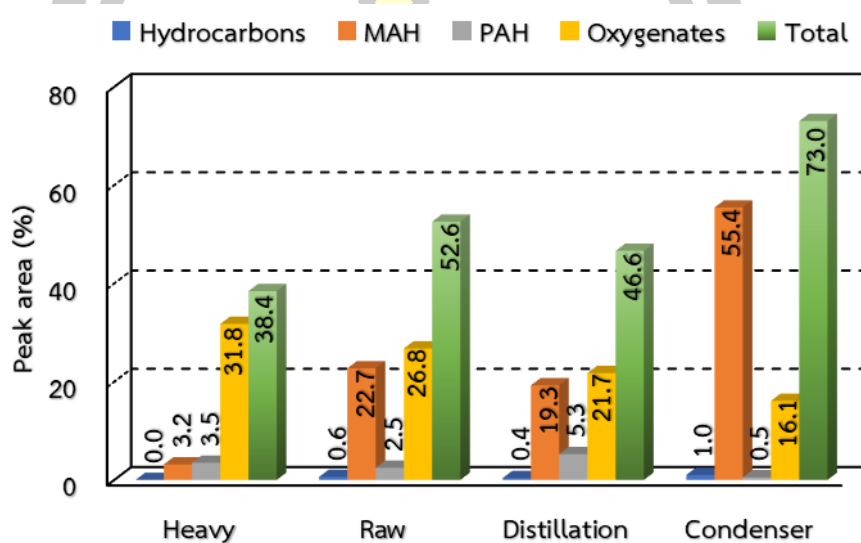
ร้อยละ 25.8

ร้อยละ 16.1

ภาพประกอบ 67 เฟสเบาที่ผ่านกระบวนการกลั่นจากเวอร์มิคูไลต์

การวิเคราะห์ไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสเบาจากเครื่อง GC/MS ดังตาราง 14 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอออยล์เฟสต่าง ๆ จากตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์มีองค์ประกอบของสารเคมีไบโอออยล์เฟสหนักส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม Oxygenates ร้อยละ 31.8 เช่น Phenol ในกลุ่ม PAH ร้อยละ 3.5 เช่น Naphthalene และ Indane ส่วนไบโอออยล์เฟสเบาที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ไบโอออยล์เฟสเบาดั้งเดิมพบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 22.7 เช่น Benzene p-Xylene

และ Toluene ส่วนในกลุ่ม Oxygenates ร้อยละ 26.8 ส่วนที่ 2 ไบโอดีเอสเฟสเบาที่ผ่านการกลั่น (distillation) พบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 19.3 เช่น Benzene p-Xylene และ Toluene ส่วนในกลุ่ม Oxygenates ร้อยละ 21.7 ส่วนที่ 3 ไบโอดีเอสเฟสเบาที่ได้จากการควบแน่นด้วยเครื่องทำความเย็น พบว่าองค์ประกอบของสารเคมีส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม MAH ร้อยละ 55.14 เช่น Benzene p-Xylene Heptane และ Toluene ดังภาพประกอบ 68



ภาพประกอบ 68 พื้นที่ใต้กราฟไบโอดีเอสเฟสต่าง ๆ จากการใช้ออร์มิคูไลต์

ตาราง 14 องค์ประกอบสารเคมีของไบโอดีเอสเฟสต่าง ๆ จากตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
Hydrocarbons						
2.17	1,3-Cyclohexadiene	C ₆ H ₈	0.00	0.00	0.15	0.09
2.40	1,3-Cyclohexadiene	C ₆ H ₈	0.00	0.62	0.00	0.00
4.20	1,3,5-Cycloheptatriene	C ₇ H ₈	0.00	0.00	0.23	0.00
6.11	1,3,5,7-Cyclooctatetraene	C ₈ H ₈	0.00	0.00	0.00	0.93
	sum		0.00	0.62	0.38	1.02
Monocyclic aromatic hydrocarbons						
2.08	Cyclopentane, methyl-	C ₆ H ₁₂	0.00	0.00	0.00	9.20

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
2.13	Cyclohexene	C ₆ H ₁₀	0.00	0.81	0.00	0.00
2.34	Benzene	C ₆ H ₆	0.14	4.47	1.42	13.10
2.41	Hexane, 3-methyl-	C ₇ H ₁₆	0.00	0.00	0.00	2.40
2.49	Ethylidenecyclobutane	C ₆ H ₁₀	0.00	0.33	0.00	0.00
2.52	Pentane, 2,2,4-trimethyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.00	0.00	2.95
2.64	Heptane	C ₇ H ₁₆	0.00	0.00	0.00	3.16
2.93	Cyclohexane, methyl-	C ₇ H ₁₄	0.00	0.00	0.00	1.15
3.24	1-Butene, 3,3-dimethyl-	C ₆ H ₁₂	0.00	0.00	0.00	0.70
3.25	Hexane, 3,3,4-trimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	0.00	0.00	0.76
3.33	Nonane	C ₉ H ₂₀	0.00	0.00	0.00	1.61
3.46	Pyrrole	C ₄ H ₅ N	0.00	0.60	0.50	0.00
3.48	Heptane, 2-methyl-	C ₈ H ₁₈	0.00	0.00	0.00	0.54
3.57	Toluene	C ₇ H ₈	0.32	6.31	3.94	14.58
3.74	Hexane, 2,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₂₀	0.00	0.00	0.00	0.02
3.86	Heptane	C ₇ H ₁₆	0.00	0.00	0.44	0.00
3.91	1-Octene	C ₈ H ₁₆	0.00	0.79	0.00	0.00
5.39	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	0.00	0.89	0.67	0.29
5.40	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	0.07	0.00	0.00	0.00
5.58	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	0.39	2.11	2.48	2.15
6.03	Cyclopropane, octyl-	C ₁₁ H ₂₂	0.00	0.63	0.00	0.00
6.04	1-Octene	C ₈ H ₁₆	0.00	0.00	0.18	0.53
6.11	Styrene	C ₈ H ₈	0.14	1.72	1.80	0.00
6.94	Benzene, (1-methylethyl)-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.56	0.26	0.00
7.72	Benzene, propyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.34	0.25	0.26
7.94	Benzene, 1-ethyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.00	0.40	0.00
7.95	Benzene, 1-ethyl-4-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.04	0.64	0.00	0.44
8.12	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.00	0.00	0.27
8.13	Benzene, 1,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.27	0.46	0.23
8.54	Benzene, 1-ethenyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.19	0.18	0.00
8.71	1-Decene	C ₁₀ H ₂₀	0.00	0.47	0.28	0.00
8.83	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.00	1.78	0.00

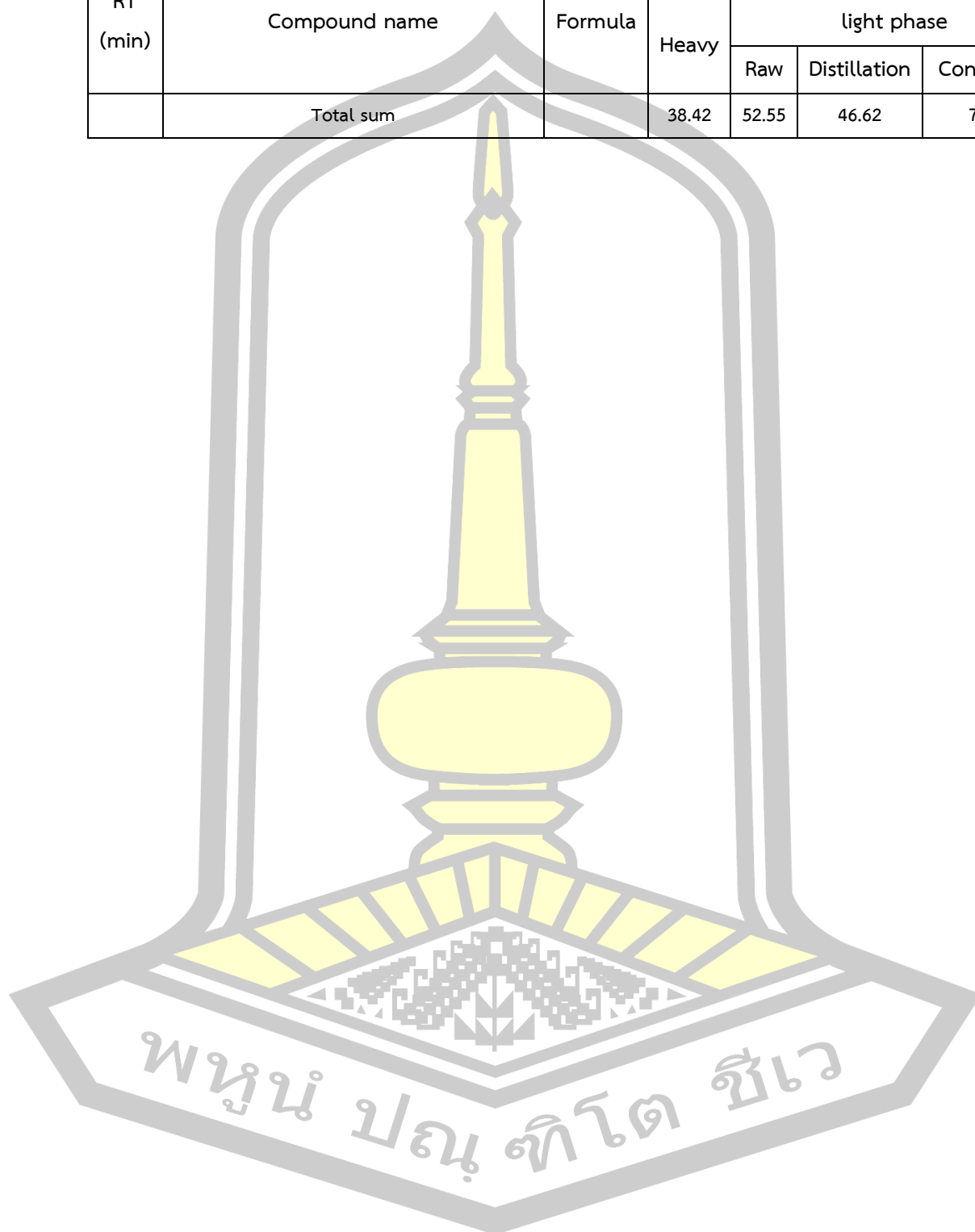
RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
8.94	Decane	C ₁₀ H ₂₂	0.00	0.94	0.00	0.00
9.27	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.48	0.34	0.33
9.81	Benzene, 1-ethenyl-3-methyl-	C ₉ H ₁₂	0.14	0.00	0.00	0.00
10.50	Benzene, 1-methyl-3-propyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.00	0.16	0.00
10.70	Benzene, 1-ethyl-2,4-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.00	0.34	0.00
11.54	Benzene, 1-ethenyl-4-ethyl-	C ₉ H ₁₂	0.00	0.00	1.88	0.00
11.60	1-Undecene	C ₁₁ H ₂₂	0.00	0.00	0.29	0.00
12.52	Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-	C ₁₀ H ₁₄	0.00	0.00	0.33	0.00
14.50	1-Dodecene	C ₁₂ H ₂₄	0.00	0.00	0.40	0.00
19.95	Cyclopropane, octyl-	C ₁₁ H ₂₂	0.32	0.00	0.15	0.00
20.06	Benzene, pentamethyl-	C ₁₁ H ₁₆	0.26	0.00	0.00	0.00
22.46	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	0.20	0.00	0.00	0.00
22.64	Pentadecane	C ₂₅ H ₅₂	0.32	0.00	0.00	0.00
22.82	Benzene, hexamethyl-	C ₁₂ H ₁₈	0.48	0.00	0.00	0.00
24.86	1-Tetradecene	C ₁₄ H ₂₈	0.00	0.00	0.00	0.06
26.87	1-Pentadecene	C ₁₅ H ₃₀	0.35	0.00	0.00	0.00
28.58	2,4-Diphenyl-4-methyl-1-pentene	C ₁₈ H ₂₀	0.00	0.17	0.25	0.21
35.12	Pentadecane	C ₂₅ H ₅₂	0.00	0.00	0.00	0.49
39.00	Pentadecane	C ₂₅ H ₅₂	0.00	0.00	0.08	0.00
	sum		3.16	22.71	19.25	55.43
Polycyclic aromatic hydrocarbons						
3.07	Isobutane	C ₄ H ₁₀	0.06	0.00	0.00	0.00
10.06	Indane	C ₉ H ₈	0.12	0.48	0.72	0.24
10.33	Indene	C ₉ H ₈	0.20	0.81	1.19	0.00
13.08	1H-Indene, 2,3-dihydro-5-methyl-	C ₁₀ H ₁₂	0.00	0.00	0.17	0.00
13.38	2-Methylindene	C ₁₀ H ₁₀	0.43	0.00	0.77	0.00
14.42	Naphthalene	C ₁₀ H ₈	0.00	0.00	1.46	0.00
14.45	Azulene	C ₁₀ H ₈	0.00	1.04	0.00	0.00
15.25	1,2,3-Trimethylindene	C ₁₂ H ₁₄	0.00	0.13	0.00	0.00
15.26	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.00	0.00	0.19	0.00
16.39	1H-Indene, 4,7-dimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.00	0.00	0.26	0.00

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
16.55	1H-Indene, 1,3-dimethyl-	C ₁₂ H ₁₄	0.13	0.00	0.00	0.00
17.51	Naphthalene, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₀	0.48	0.00	0.49	0.00
17.80	1H-Indene, 1,1,3-trimethyl-	C ₁₁ H ₁₂	0.38	0.00	0.00	0.00
23.56	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-	C ₁₃ H ₁₄	1.13	0.00	0.00	0.00
24.86	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	0.57	0.00	0.00	0.00
25.02	Tridecane	C ₁₃ H ₂₈	0.00	0.00	0.00	0.07
34.08	Undecane	C ₁₁ H ₂₄	0.00	0.00	0.00	0.22
	sum		3.50	2.46	5.25	0.53
Oxygenates						
2.03	Ethanol	C ₂ H ₅ OH	0.18	0.00	0.00	0.00
2.26	2-Butenal	C ₄ H ₆ O	0.00	1.64	0.54	1.48
2.43	2-Propanone, 1-hydroxy-	C ₃ H ₆ O ₂	0.18	0.00	0.00	0.00
2.44	3-Penten-2-one	C ₅ H ₈ O	0.00	1.31	0.00	0.00
2.44	3-Penten-2-one, (E)-	C ₅ H ₈ O	0.08	0.00	0.74	0.96
2.56	2-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	0.25	3.66	1.58	2.74
2.66	3-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	0.19	2.88	1.09	2.00
2.75	Furan, 2,5-dimethyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.16	2.07	0.51	1.28
2.82	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.00	0.60	0.17	0.00
2.97	Vinylfuran	C ₆ H ₆ O	0.00	1.25	0.51	1.65
3.03	Ethane, 1,1-diethoxy-	C ₆ H ₁₄ O ₂	0.17	0.00	0.00	0.55
3.11	3-Furaldehyde	C ₅ H ₄ O ₂	0.00	0.24	0.00	0.00
3.18	2-Hexanone	C ₆ H ₁₂ O	0.00	1.88	0.00	0.00
3.24	2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂	0.00	0.00	1.23	0.00
3.26	3-Penten-2-one	C ₅ H ₈ O	0.11	0.00	0.00	0.00
3.35	Cyclopentene, 1,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₄ O	0.00	0.00	0.00	1.45
3.93	2-Hexanone	C ₆ H ₁₂ O	0.00	0.00	0.47	0.15
3.98	Cyclopentanone	C ₅ H ₈ O	0.46	1.26	0.90	0.32
4.28	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.00	0.36	0.11	0.17
4.40	Furan, 2,3,5-trimethyl-	C ₇ H ₁₀ O	0.00	0.66	0.20	0.08
4.47	Furfural	C ₅ H ₄ O ₂	0.00	0.00	0.08	0.00
4.82	4-Methyl-5H-furan-2-one	C ₅ H ₆ O ₂	0.00	0.00	0.58	0.00

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
4.83	2-Cyclopenten-1-one	C ₅ H ₆ O	0.42	0.00	0.00	0.00
4.94	Cyclopentanone, 2-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.44	0.00	0.00	0.00
4.94	Cyclopentanone, 2-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.00	1.27	0.98	0.29
5.09	Cyclopentanone, 3-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.29	0.66	0.59	0.19
5.44	2-Furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂	0.13	0.00	0.00	0.00
5.90	Cyclopentanone, 2,5-dimethyl-	C ₇ H ₁₂ O	0.09	0.18	0.12	0.18
6.19	Cyclohexanone	C ₆ H ₁₀ O	0.14	0.00	0.00	0.00
6.28	Cyclopentanone, 2,4-dimethyl-	C ₇ H ₁₂ O	0.08	0.00	0.00	0.00
6.50	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.98	0.00	0.00	0.00
6.51	2-Cyclopenten-1-one, 2-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.00	0.00	0.87	0.00
6.73	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	C ₆ H ₆ O ₂	0.29	0.00	0.00	0.00
6.81	Benzene, methoxy-	C ₇ H ₈ O	0.00	0.31	0.33	0.00
7.57	Cyclohexanone, 2-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.22	0.00	0.00	0.00
7.65	Cyclohexanone, 3-methyl-	C ₆ H ₁₀ O	0.12	0.00	0.07	0.00
7.83	3-Ethylcyclopentanone	C ₇ H ₁₂ O	0.20	0.00	0.00	0.00
7.99	Benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	0.00	0.00	0.40	0.00
8.08	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.99	0.00	0.00	0.00
8.85	Phenol	C ₆ H ₆ O	1.18	0.00	0.00	0.00
8.98	Benzofuran	C ₈ H ₆ O	0.65	0.49	1.16	0.24
9.39	5-Norbornane-2-carboxaldehyde	C ₈ H ₁₀ O	0.00	1.88	1.82	0.69
9.63	Benzene, 1-methoxy-4-methyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.00	0.00	0.90	0.00
9.64	Benzene, 1-methoxy-3-methyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.30	0.00	0.00	0.00
9.89	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	0.35	0.00	0.00	0.00
9.97	3-Furaldehyde	C ₅ H ₄ O ₂	0.37	0.00	0.00	0.00
10.17	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	C ₇ H ₁₀ O	0.87	0.00	0.00	0.00
10.87	Phenol, 2-methyl-	C ₇ H ₈ O	1.22	0.00	0.00	0.00
11.03	Acetophenone	C ₈ H ₈ O	0.56	0.00	0.00	0.00
11.16	Bicyclo[3.3.0]oct-2-en-8-one, 3-methyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.00	2.05	2.23	0.85
11.52	Phenol, 4-methyl-	C ₇ H ₈ O	1.68	0.00	0.00	0.00
11.71	Phenol, 2-methoxy-	C ₇ H ₈ O	1.12	0.00	0.00	0.00
11.72	2-Acetyl-5-norbornene	C ₉ H ₁₂ O	0.00	2.11	2.35	0.84

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
11.91	Benzofuran, 2-methyl-	C ₈ H ₆ O	0.00	0.00	1.03	0.00
12.26	Phenol, 2,5-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.57	0.00	0.00	0.00
13.30	Phenol, 2-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.30	0.00	0.00	0.00
13.54	Phenol, 2,6-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	1.74	0.00	0.00	0.00
13.82	Acetophenone, 4'-hydroxy-	C ₈ H ₈ O	0.05	0.00	0.00	0.00
14.21	Phenol, 3-ethyl-	C ₈ H ₁₀ O	1.62	0.00	0.00	0.00
14.39	Phenol, 2,3-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.44	0.00	0.00	0.00
14.70	Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	C ₈ H ₁₀ O ₂	1.11	0.00	0.00	0.00
14.93	Phenol, 2,4-dimethyl-	C ₈ H ₁₀ O	0.47	0.00	0.00	0.00
15.05	Phenol, 2,4,6-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.53	0.00	0.00	0.00
15.30	Benzofuran, 4,7-dimethyl-	C ₁₀ H ₁₀ O	0.30	0.00	0.16	0.00
15.85	Phenol, 2,3,6-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.48	0.00	0.00	0.00
16.91	Phenol, 2,3,5-trimethyl-	C ₉ H ₁₂ O	0.37	0.00	0.00	0.00
17.12	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	C ₉ H ₁₂ O ₂	0.90	0.00	0.00	0.00
17.85	1H-Inden-1-one, 2,3-dihydro-3-methyl-	C ₁₀ H ₁₀ O	0.37	0.00	0.00	0.00
18.12	2-Methoxy-4-vinylphenol	C ₉ H ₁₀ O ₂	0.37	0.00	0.00	0.00
18.34	Phenol, 4-(2-propenyl)-	C ₉ H ₁₀ O ₂	0.72	0.00	0.00	0.00
18.83	Benzofuran, 2-methyl-	C ₈ H ₆ O	0.27	0.00	0.00	0.00
19.12	Phenol, 2,6-dimethoxy-	C ₈ H ₁₀ O ₃	0.48	0.00	0.00	0.00
19.24	Eugenol	C ₁₀ H ₁₂ O	0.41	0.00	0.00	0.00
19.30	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	C ₉ H ₁₀ O ₃	0.16	0.00	0.00	0.00
19.38	6-Methoxy-3-methylbenzofuran	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	0.34	0.00	0.00	0.00
19.47	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	C ₁₀ H ₁₄ O ₂	0.81	0.00	0.00	0.00
21.56	1,2,3-Trimethoxybenzene	C ₉ H ₁₂ O ₃	0.33	0.00	0.00	0.00
21.64	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (E)-	C ₁₂ H ₁₄ O ₃	1.53	0.00	0.00	0.00
23.43	1-Naphthalenol	C ₁₀ H ₈ O	0.32	0.00	0.00	0.00
23.52	Benzene, 1,2,3-trimethoxy-5-methyl-	C ₁₀ H ₁₄ O	0.68	0.00	0.00	0.00
25.81	1-Naphthalenol, 2-methyl-	C ₁₁ H ₁₁ O	0.99	0.00	0.00	0.00
27.24	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	C ₈ H ₁₀ O	0.59	0.00	0.00	0.00
	sum		31.75	26.75	21.74	16.10

RT (min)	Compound name	Formula	Peak area (%)			
			Heavy	light phase		
				Raw	Distillation	Condenser
	Total sum		38.42	52.55	46.62	73.09



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบสั่นเมื่อใช้ท่อปฏิกรณ์แบบสั่นที่เปลี่ยนผิวด้านต่อปริมาณผลได้และสมบัติไบโอออยล์เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อนุภาคชีวมวล 0.2-0.6 มิลลิเมตร อัตราป้อน 500 กรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลไนโตรเจน 10 ลิตร/นาที่ ป้อนสุญญากาศดูดติดลบ 10 เซนติเมตรน้ำ เวลาคงอยู่ของของแข็ง 2 นาที และความยาวท่อ 150 เซนติเมตร สามารถผลิตไบโอออยล์รวมได้สูงที่สุดร้อยละ 67.4 เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบพองที่ใช้ชีวมวลเหมือนกันพบว่ามีค่าใกล้เคียงร้อยละ 68.8

จากการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ โดโลไมต์ เวอร์มิคูไลต์ และ ZSM-5 พบว่าที่ขนาดอนุภาคชีวมวล 0.2-0.6 มิลลิเมตร ระยะห้องความร้อน 150 เซนติเมตร เวลาคงอยู่ 2 อุณหภูมิการเร่งปฏิกิริยาที่ชุดเครื่องเร่งปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไนโตรเจน 10 ลิตร/นาที่ และใช้ปั๊มสุญญากาศช่วยดูด -10 เซนติเมตรน้ำ WHSV 0.3 ชั่วโมง⁻¹ และอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวล 2:1 ให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์รวมร้อยละ 42.3 48.4 และ 47.0 ตามลำดับ และปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสเบาที่มีค่าใกล้เคียงกันร้อยละ 2.0 1.9 และ 2.1 โดยน้ำหนัก

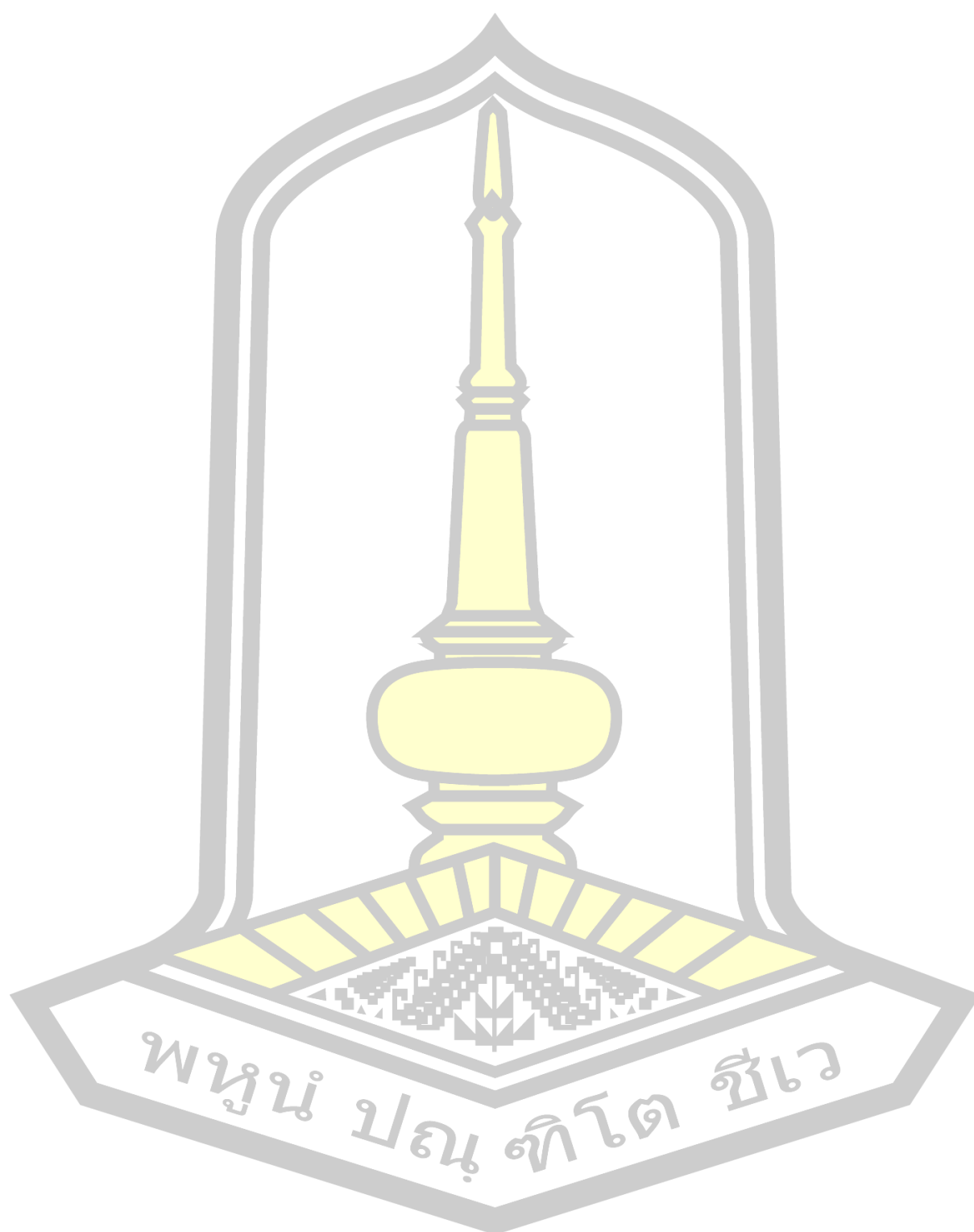
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบสารเคมีพบว่าในไบโอออยล์เฟสเบากรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบไปด้วยสาร MAH ร้อยละ 16.26 และสารประกอบ Oxygenates ร้อยละ 22.21 อีกทั้งกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด ได้แก่ ZSM-5 โดโลไมต์ และเวอร์มิคูไลต์ พบว่าองค์ประกอบสารเคมีในไบโอออยล์เฟสเบาที่ผ่านการกลั่นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ประกอบไปด้วยสาร Hydrocarbons ร้อยละ 20.5 และสารประกอบ MAH ร้อยละ 56.0 องค์ประกอบสารเคมีในไบโอออยล์เฟสเบาที่ผ่านการกลั่นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ประกอบไปด้วยสาร MAH ร้อยละ 45.4 และองค์ประกอบสารเคมีในไบโอออยล์เฟสเบาที่ผ่านการกลั่นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเวอร์มิคูไลต์ประกอบด้วยสาร MAH ร้อยละ 55.4

ข้อเสนอแนะ

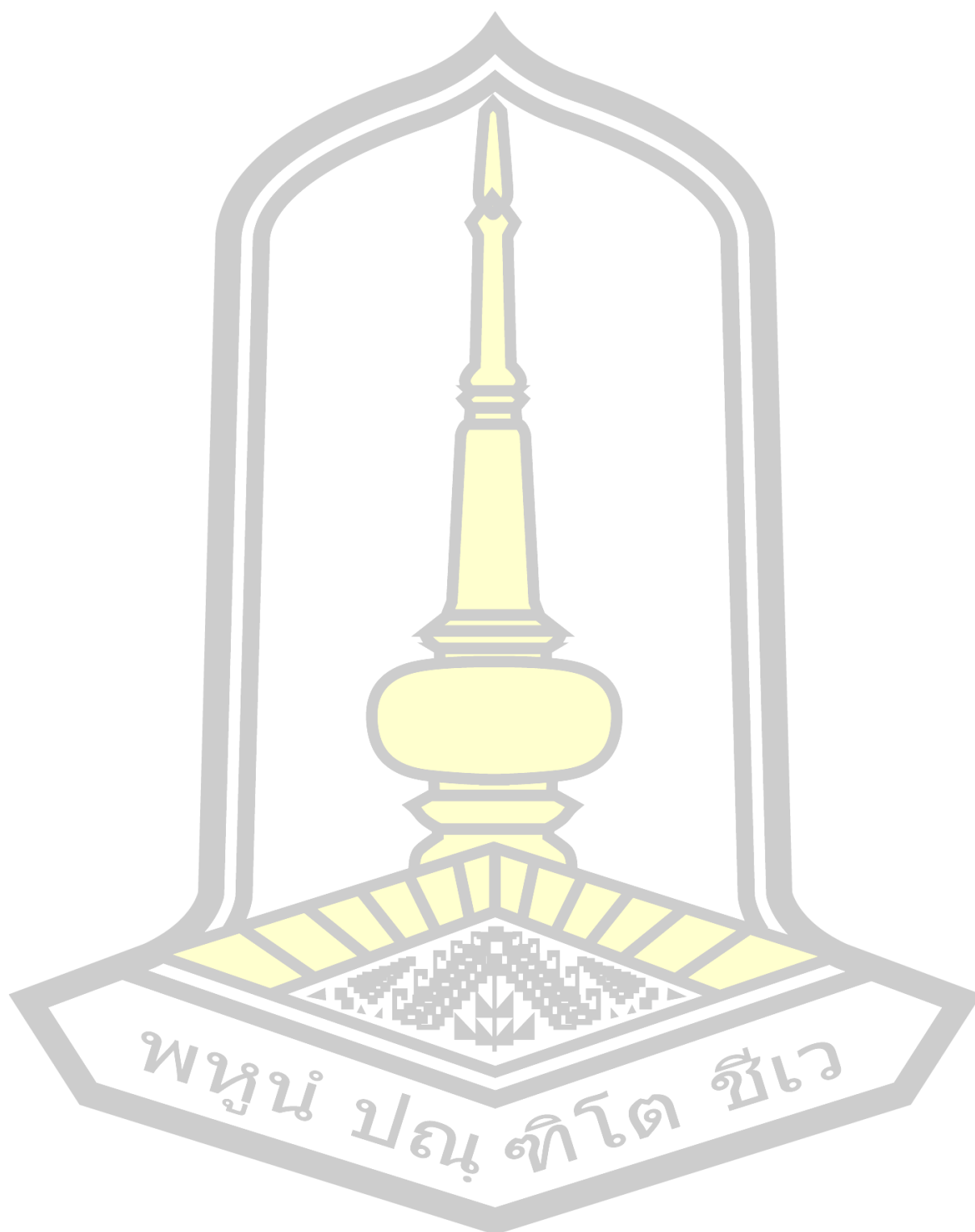
1. ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสเบาที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 ยังผลิตได้น้อยเมื่อเทียบกับเครื่องฟลูอิดซ์เบดแบบพอง เนื่องจากอาจยังไม่สามารถควบคุมตัวแปรให้มีความเหมาะสมได้ ดังนั้นควรมีการศึกษาในเชิงลึกของตัวแปรต่าง ๆ

2. การสะสมของโค้กในตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปริมาณผลได้ไบโอออยล์ลดลง ดังนั้นควรศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อลดการเกิดโค้กลง เช่น การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีรูพรุนมากขึ้นหรือการควบคุมสภาวะการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม
3. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยายังมีข้อจำกัดในแง่ของอายุการใช้งานของการเสื่อมสภาพในระหว่างการทดลอง ดังนั้นควรศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อลดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มปริมาณผลได้ของไบโอออยล์และลดปริมาณออกซิเจนลง โดยศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเบดเคลื่อนที่





บรรณานุกรม



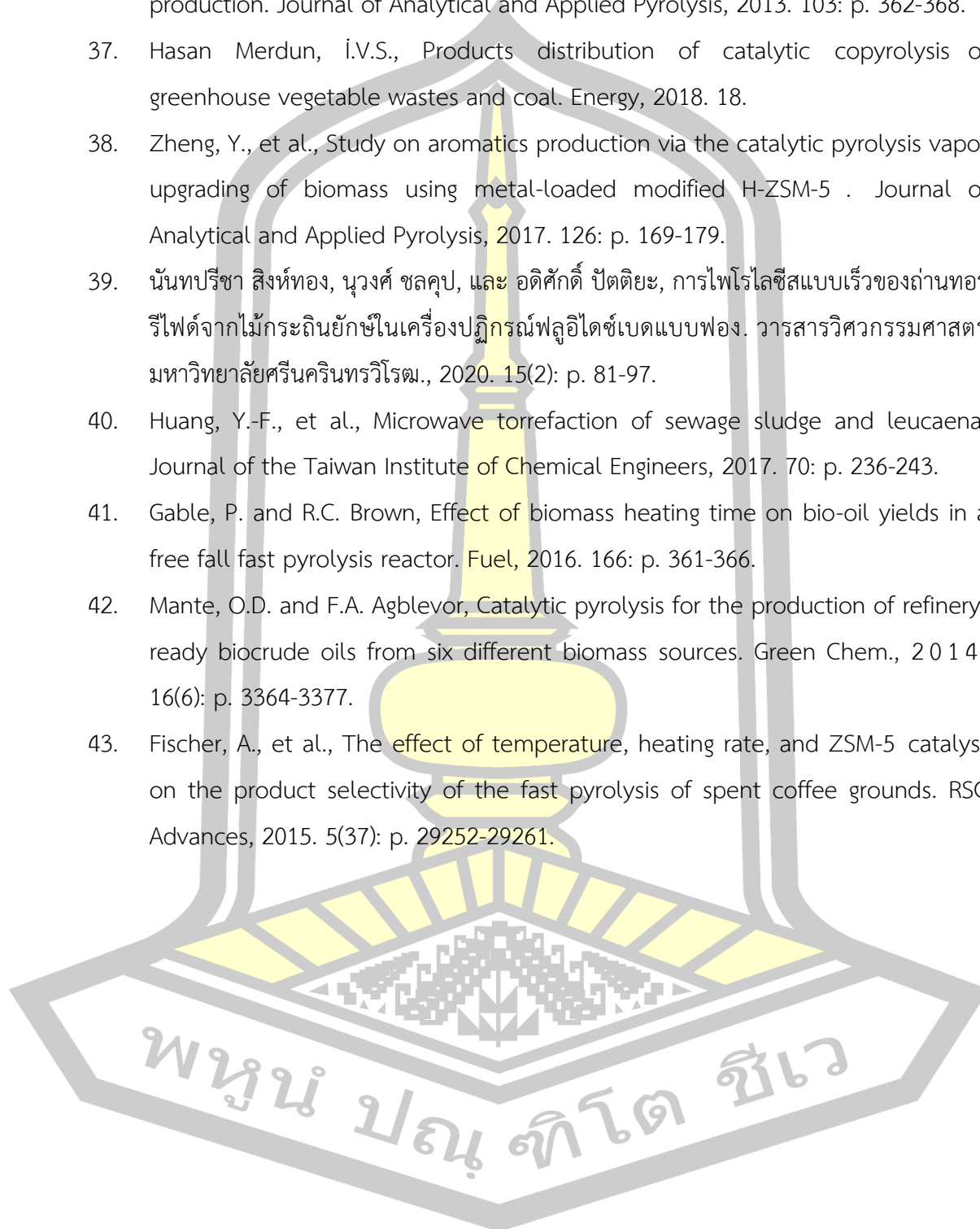
บรรณานุกรม

1. Bridgwater, A.V., Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 2012. 38: p. 68-94.
2. Pattiya, A. and S. Suttibak, Fast pyrolysis of sugarcane residues in a fluidised bed reactor with a hot vapour filter. Journal of the Energy Institute, 2017. 90(1): p. 110-119.
3. Raja, S.A., et al., Flash pyrolysis of jatropha oil cake in electrically heated fluidized bed reactor. Energy, 2010. 35(7): p. 2819-2823.
4. Pattiya, A. and S. Suttibak, Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012. 95: p. 227-235.
5. กฤษฎา ลำพองชาติ, นุวงศ์ ชลคุป, และ อติศักดิ์ ปัตติยะ, ผลของตัวทำละลายที่ใช้เตรียมเหง้ามันสำปะหลังต่อผลิตภัณฑ์ จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ววารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ., 2018. 13(2): p. 106-117.
6. Ly, H.V., et al., Catalytic pyrolysis of tulip tree (Liriodendron) in bubbling fluidized-bed reactor for upgrading bio-oil using dolomite catalyst. Energy, 2018. 162: p. 564-575.
7. Mahadevan, R., et al., Physical and Chemical Properties and Accelerated Aging Test of Bio-oil Produced from in Situ Catalytic Pyrolysis in a Bench-Scale Fluidized-Bed Reactor. Energy & Fuels, 2015. 29(2): p. 841-848.
8. ณัฐพันธ์ พรหมสาภา, นุชิตา สุวแพทย์, และ อติศักดิ์ ปัตติยะ, การผลิตไบโอออยล์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของกาก/เปลือกเมล็ดมะเขือเทศและกากเมล็ดปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบดแบบพอง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ., 2014. 9(2): p. 23-32.
9. พงศ์ธร อรรถ, สุตสาคร อินธิเดช, และ อติศักดิ์ ปัตติยะ, ผลของอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาไพโรไลซิสที่มีต่อปริมาณและสมบัติของไบโอออยล์ที่ได้จากไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้กระถินยักษ์. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2013. 32(4): p. 1686-9664.
10. Park, J.Y., et al., Production of bio-oil from fast pyrolysis of biomass using a pilot-scale circulating fluidized bed reactor and its characterization. J Environ Manage, 2019. 234: p. 138-144.

11. Suntivarakorn, R., et al., Fast pyrolysis from Napier grass for pyrolysis oil production by using circulating Fluidized Bed Reactor: Improvement of pyrolysis system and production cost. *Energy Reports*, 2018. 4: p. 565-575.
12. 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.
13. Guoxin, H., et al., Experimental studies on flow and pyrolysis of coal with solid heat carrier in a modified rotating cone reactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2008. 47(9-10): p. 1777-1785.
14. Arthur M.C. Janse , P.M.B., Wolter Prins, Wim P.M. van Swaaij, A novel interconnected fluidised bed for the combined flash pyrolysis of biomass and combustion of char. *Chemical Engineering Journal*, 2000. 76: p. 77-86.
15. Papari, S., K. Hawboldt, and R. Helleur, Pyrolysis: A Theoretical and Experimental Study on the Conversion of Softwood Sawmill Residues to Biooil. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015. 54(2): p. 605-611.
16. Luo, G., et al., Pyrolysis of whole wood chips and rods in a novel ablative reactor. *Fuel*, 2017. 194: p. 229-238.
17. Sirijanusorn, S., K. Sriprateep, and A. Pattiya, Pyrolysis of cassava rhizome in a counter-rotating twin screw reactor unit. *Bioresour Technol*, 2013. 139: p. 343-8.
18. Papari, S., K. Hawboldt, and R. Helleur, Production and Characterization of Pyrolysis Oil from Sawmill Residues in an Auger Reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017. 56(8): p. 1920-1925.
19. Ellens, C.J. and R.C. Brown, Optimization of a free-fall reactor for the production of fast pyrolysis bio-oil. *Bioresour Technol*, 2012. 103(1): p. 374-80.
20. Pattiya, A., S. Sukkasi, and V. Goodwin, Fast pyrolysis of sugarcane and cassava residues in a free-fall reactor. *Energy*, 2012. 44(1): p. 1067-1077.
21. นิกรศิลป์ บุญสมบัติ และ อติศักดิ์ ปัตติยะ, ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาธรรมชาติในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบตกอิสระ. . วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. , 2017. 12: p. 1-11.
22. Shoaib, A.M., et al., Developing a free-fall reactor for rice straw fast pyrolysis to produce bio-products. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2018. 27(4): p. 1305-1311.

23. Boateng, A.A. and C.A. Mullen, Fast pyrolysis of biomass thermally pretreated by torrefaction. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013. 100: p. 95-102.
24. สถาพร สอนสุภาพ และ อติศักดิ์ ปัตติยะ, การปรับปรุงสมบัติของไบโอยล์ด้วยกระบวนการทอรัรีแฟกชันโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อไหลต่อเนื่อง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.*, 2019. 14(1): p. 106-115.
25. Shen, J., et al., Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. *Fuel*, 2009. 88(10): p. 1810-1817.
26. Rosendahl, L., Catalytic pyrolysis products, in *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications*. 2017, Woodhead: United kingdom.
27. Fabrizio Cavani, S.A., Francesco Basile, and Alessandro Gandini, *Chemicals and Fuels from Bio-Based Building Blocks*. 1.
28. Standard Specification for Pyrolysis Liquid Biofuel. ASTM D7544 - 12, 2014.
29. Rosendahl, L., Fast pyrolysis, in *In Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications*. 2017, Woodhead: United Kingdom. p. 11.
30. Hu, C., R. Xiao, and H. Zhang, Ex-situ catalytic fast pyrolysis of biomass over HZSM-5 in a two-stage fluidized-bed/fixed-bed combination reactor. *Bioresour Technol*, 2017. 243: p. 1133-1140.
31. ศิรินุช ลอยหา, *Zeolite and Zeolite Technology*. 2013. 11: p. 56-66.
32. Charusiri, W. and T. Vitidsant, Upgrading bio-oil produced from the catalytic pyrolysis of sugarcane (*Saccharum officinarum* L) straw using calcined dolomite. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2017. 6: p. 114-123.
33. 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.
34. LI Hong-yu, Y.Y.-j., REN Zheng-wei, Online upgrading of organic vapors from the fast pyrolysis of biomass. *JOURNAL OF FUEL CHEMISTRY AND TECHNOLOGY*, 2008. 36(6): p. 666-671.
35. Ly, H.V., et al., Upgrading bio-oil by catalytic fast pyrolysis of acid-washed *Saccharina japonica* alga in a fluidized-bed reactor. *Renewable Energy*, 2019. 133: p. 11-22.

36. Abu Bakar, M.S. and J.O. Titiloye, Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013. 103: p. 362-368.
37. Hasan Merdun, İ.V.S., Products distribution of catalytic copyrolysis of greenhouse vegetable wastes and coal. *Energy*, 2018. 18.
38. Zheng, Y., et al., Study on aromatics production via the catalytic pyrolysis vapor upgrading of biomass using metal-loaded modified H-ZSM-5 . *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017. 126: p. 169-179.
39. นันทปรีชา สิงห์ทอง, นุวงศ์ ชลคุป, และ อติศักดิ์ ปัตติยะ, การไพโรไลซิสแบบเร็วของถ่านทอรรีไฟต์จากไม้กระถินยักษ์ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบพอง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.*, 2020. 15(2): p. 81-97.
40. Huang, Y.-F., et al., Microwave torrefaction of sewage sludge and leucaena. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2017. 70: p. 236-243.
41. Gable, P. and R.C. Brown, Effect of biomass heating time on bio-oil yields in a free fall fast pyrolysis reactor. *Fuel*, 2016. 166: p. 361-366.
42. Mante, O.D. and F.A. Agblevor, Catalytic pyrolysis for the production of refinery-ready biocrude oils from six different biomass sources. *Green Chem.*, 2014. 16(6): p. 3364-3377.
43. Fischer, A., et al., The effect of temperature, heating rate, and ZSM-5 catalyst on the product selectivity of the fast pyrolysis of spent coffee grounds. *RSC Advances*, 2015. 5(37): p. 29252-29261.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นาย ฟ้าใหม่ ศรีสุราษฎร์
วันเกิด	เกิดวันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2538
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 255/7 หมู่ 14 ตำบลเกิ้ง อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2553 มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนสารคามพิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ.2556 มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนสารคามพิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ.2560 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วท.บ) สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (พลังงาน) อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ.2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม
ทุนวิจัย	โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม (พวอ.) ร่วมกับโรงงานไฟฟ้าชีวมวล บริษัท กมลไสย ไปโอ เพาเวอร์ 2010 จำกัด

พูน ปณ จิตโต ชีเว