

ไพโรไลซิสในเฟสของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 20 ลิตรสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพ  
จากไม้กระถินยักษ์

นายนพภูฏ คุดาคุมลภ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

LIQUID PHASE PYROLYSIS IN 20-LITER REACTOR FOR BIO-OIL PRODUCTION FROM  
GIANT LEUCAENA WOOD

Mr. Noppadon Khuhaudomlap

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ไฟโรไลซิสในเฟสของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 20 ลิตร  
สำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์

โดย

นายนพปฎล คุณาอุดมลาก

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พฤษชาติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คุณชลาธารา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิปสามารถ)

นพปฎล คูหาอุดมลาภ : ไพโรไลซิสในเฟสของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 20 ลิตรสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์. (LIQUID PHASE PYROLYSIS IN 20-LITER REACTOR FOR BIO-OIL PRODUCTION FROM GIANT LEUCAENA WOOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, 110 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 20 ลิตร โดยทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพและปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพและศึกษาภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตน้ำมันชีวภาพ. ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ผลของอุณหภูมิ (325 375 400 องศาเซลเซียส) ผลของระยะเวลาในการให้ความร้อน (0 20 40 60 นาที) ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (5 20 30 บาร์) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (10 20 30 ร้อยละโดยน้ำหนัก) ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, spent-FCC, MgO) โดยทำการศึกษาภายใต้การใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย. ปริมาณออกซิเจนและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพวิเคราะห์โดยเทคนิค CHN และ GC-MS ตามลำดับผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพและองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพได้รับอิทธิพลจากตัวแปรอุณหภูมิ ระยะเวลาในการให้ความร้อน เฮกเซนและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมโดยปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลดลงเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน พบน้ำมันชีวภาพมีร้อยละผลได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาที แต่อย่างไรก็ตามปริมาณออกซิเจนน้อยที่สุดพบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาทีผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS และ CHN แสดงให้เห็นว่าผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมร้อยละ 20 โดยน้ำหนักความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 20 บาร์ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการให้ความร้อน 60 นาทีคือ ภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตน้ำมันชีวภาพโดยได้ปริมาณออกซิเจนต่ำที่สุด (9.09 ร้อยละโดยน้ำหนัก) และร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุด (8.67 ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิติ.....  
 สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....

## 5471998823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : LIQUID PHASE PYROLYSIS / UPGRADING BIO-OIL / DEOXYGENATION /  
BIO-OIL / GIANT LEUCAENA

NOPPADON KHUHAUDOMLAP : LIQUID PHASE PYROLYSIS IN 20-LITER  
REACTOR FOR BIO-OIL PRODUCTION FROM GIANT LEUCAENA WOOD .  
ADVISOR : ASST.PROF.PRASERTREUBROYCHAROEN, Ph.D., 110 pp.

In this study, pyrolysis of Giant Leucaena wood in liquid phase experiments were carried out in 20 liter reactor for studying the influence of parameters to affect on bio-oil yield and oxygen content and finding the optimum condition for bio-oil production. The influence of temperatures (325, 375, 400°C), residence times (0, 20, 40, 60 minutes), initial pressures of hydrogen (5, 20, 30 bar), catalyst dosages (10, 20, 30 wt%), type of catalysts (NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, spent-FCC, MgO) were studied and using a hexane as a solvent. The oxygen content in bio-oil and bio-oil composition were analyzed by CHN analyzer and gas chromatography mass spectrometry (GC-MS), respectively. The results showed that bio-oil yield and bio-oil composition was affected by effect of temperature, holding time, the use of heaxane and NiMo catalyst. The oxygen content in oil product was decreased with an increase in temperature and holding time. The maximum bio-oil yield was obtained at a reaction temperature of 375°C and holding time of 0 minutes. The result from GC-MS and CHN analysis showed that NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amount 20 wt%, initial hydrogen pressure 20 bar at reaction temperature of 375°C and holding time of 60 minutes, was the optimum condition to produce bio-oil with lowest oxygen content, 9.09 wt% and the oil yield was 8.67 wt%.

Department : Chemical Technology..... Student's Signature .....

Field of Study : Chemical Technology..... Advisor's Signature .....

Academic Year : .....2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ยิ่ง รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยเรื่อง “ไฟโรไลซิสในเฟสของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 20 ลิตรสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้กระถินยักษ์” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ทุนวิจัยจากบริษัท ปตท. จำกัดมหาชน และทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์ชาติ ภาควิชาธรณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา ภาควิชาธรณีวิทยา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชดารา กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป สามารถ กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

หน้า	
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1    บทนำ.....	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3. ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2    ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1. แนวคิดและทฤษฎี.....	6
2.2. ชีวมวล.....	7
2.3. องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล.....	14
2.4. แนวทางการใช้พลังงานจากชีวมวลในประเทศไทย.....	20
2.5. กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง.....	23
2.6. กระบวนการไพโรไลซิส.....	29
2.7. กระบวนการลิกวิแฟคชัน.....	35
2.8. น้ำมันชีวภาพ.....	35
2.9. ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	38
2.10. กระบวนการขจัดสารประกอบออกซิเจนในการผลิตน้ำมันชีวภาพ.....	41
2.11. การนำน้ำมันชีวภาพไปประยุกต์ใช้.....	44

บทที่	หน้า
2.12. ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์.....	45
2.13. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	50
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	54
3.1. สารตั้งต้นและสารเคมี.....	54
3.2. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	54
3.3. ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	60
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	64
4.1. องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล.....	65
4.2. พฤติกรรมการสลายตัวของชีวมวล.....	67
4.3. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิส ในเฟสของเหลว.....	68
4.4. ผลของการไม่ใช้ตัวทำละลาย, ใช้เฮกเซนและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว..	73
4.5. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมในกระบวนการไพโรไลซิส ในเฟสของเหลว.....	79
4.6. ผลของปริมาณความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น.....	80
4.7. ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	83
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1. สรุปผลการวิจัย.....	91
5.2. ข้อเสนอแนะ.....	93
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก.....	98
ภาคผนวก ข.....	101
ภาคผนวก ค.....	105
ภาคผนวก ง.....	106



บทที่	หน้า
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	110

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ข้อแตกต่างซีวมวลกับเชื้อเพลิงฟอสซิล.....	10
2.2	การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.....	13
2.3	ส่วนประกอบลิกโนเซลลูโลสของพืชพลังงาน.....	17
2.4	รูปแบบของปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบต่างๆ.....	24
2.5	สมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้และน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก.....	37
2.6	ลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ .....	49
3.1	ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (gas chromatography-mass spectrometry).....	59
4.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของไม้กระถินยักษ์.....	66
4.2	สมบัติของน้ำมันดิบจากกระถินยักษ์ (450 องศาเซลเซียส) ที่ยังไม่ผ่านการปรับปรุง คุณภาพ.....	66
4.3	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ.....	70
4.4	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ แบบประมาณ และค่าความร้อนของของแข็งส่วนเหลือ	72
4.5	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่า pH ของเฟสของเหลวที่ได้.....	73
4.6	สารประกอบในน้ำมันชีวภาพจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคGC-MS(1).....	77
4.7	สารประกอบในน้ำมันชีวภาพจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคGC-MS (2).....	87
4.8	เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้ในแต่ละกระบวนการ.....	89
๑ 1	ตารางบันทึกผลการทดลอง	108

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	วัฏจักรชีวมวล .....	8
2.2	โครงสร้างของเซลลูโลส.....	14
2.3	หน่วยย่อยของเฮมิเซลลูโลส.....	15
2.4	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส.....	15
2.5	โครงสร้างของลิกนิน.....	16
2.6	องค์ประกอบของชีวมวล (biomass composition) .....	19
2.7	แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล.....	21
2.8	แปลงปลูกต้นกระถินยักษ์.....	22
2.9	กระบวนการผลิตและการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล.....	23
2.10	สารประกอบออกซิเจนที่ได้จากการไพโรไลซิส เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน..	26
2.11	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน.....	27
2.12	การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิดในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ ต่างๆ.....	32
2.13	กระบวนการของปฏิกิริยา Deoxygenation ของ Guaiacol.....	42
2.14	กระบวนการของปฏิกิริยา Hydrodeoxygenation ของ Guaiacol.....	43
2.15	เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบฟองอากาศ.....	45
2.16	เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน.....	46
2.17	เครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ.....	47
2.18	เครื่องปฏิกรณ์แบบแอบราทีฟ.....	48
2.19	เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน.....	48
2.20	ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์และความสนใจใช้ในอุตสาหกรรม.....	49
3.1	เครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 20 ลิตร (AmAr reactor).....	55
3.2	แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 20 ลิตร.....	56
3.3	การแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำและน้ำมัน โดยใช้เทคนิคสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย.....	57
3.4	น้ำมันชีวภาพส่วนหนักที่ได้จากการแยก.....	57

รูปที่		หน้า
3.5	เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer).....	58
3.6	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatography-mass spectrometry).....	59
3.7	ผลิตภัณฑ์ที่สามารถควบคุมได้ทั้งหมด.....	61
4.1	พฤติกรรมของการสลายตัวทางความร้อนของกระดิ่งยักษ์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA.....	67
4.2	ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว.....	69
4.3	ผลของระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว.....	69
4.4	แสดงการเปรียบเทียบการไม่ใช้ตัวทำละลาย ใช้ตัวทำละลาย และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ต่อร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพ.....	75
4.5	โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวที่ไม่ใช้ตัวทำละลาย ใช้ตัวทำละลาย และใช้ตัวทำละลายร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	76
4.6	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว.....	79
4.7	ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว.....	80
4.8	กลไกการกำจัดออกซิเจนของสารประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ.....	81
4.9	ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อของแข็งส่วนเหลือ ร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพ จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว.....	82
4.10	โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวที่ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่แตกต่างกัน.....	83
4.11	ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว.....	84

รูปที่	หน้า
4.12 โครมาโตแกรมของน้ำมันซีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน.....	85
4.13 แผนภาพแสดงกลไกการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ Guaiacol ผ่านการเร่งปฏิกิริยา ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล.....	90
ข 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี.....	104
ง 1 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา.....	106
ง 2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 550 องศา เซลเซียส.....	106
ง 3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	106

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันกระบวนการผลิตพลังงานทางเลือกเพื่อใช้ทดแทนพลังงานสิ้นเปลือง กำลังเป็นที่ คำนึงถึงและวิจัยอย่างกว้างขวาง เพราะเป็นพลังงานประเภทหมุนเวียนและส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม มากกว่าการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลโดยกระบวนการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวลถือเป็น แนวทางหนึ่งที่เหมาะสมต่อประเทศเกษตรกรรมอย่างประเทศไทย เพราะว่ามีชีวมวลทางการเกษตร เหลือใช้อยู่เป็นจำนวนมากในงานวิจัยนี้เลือกใช้ชีวมวลที่เป็นไม้กระถินยักษ์เนื่องจากมีปริมาณที่มาก หาได้ง่ายในประเทศไทยสามารถทำการปลูกทดแทนขึ้นมาใหม่ได้ รวมทั้งยังเป็นพืชพลังงานที่โตเร็ว และไม่ส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจทางการเกษตรกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลโดยอาศัย กระบวนการทางความร้อนเพื่อผลิตเป็นสารเชื้อเพลิง สามารถทำได้โดยกระบวนการต่างๆ ดังนี้ แกซิฟิเคชัน (Gasification) ไพโรไลซิส (Pyrolysis) และลิกวิแฟกชัน (Liquefaction) โดยทั้ง 3 กระบวนการมี ลักษณะคล้ายกัน คือ การที่ให้ความร้อนแก่ชีวมวลเพื่อให้พันธะของสารโมเลกุลขนาดใหญ่ภายในชีวมวลเกิดการแตกตัวสลายโมเลกุลให้มีขนาดเล็กลง แกซิฟิเคชันให้แก๊สสังเคราะห์ (ไฮโดรเจนรวมกับ คาร์บอนมอนอกไซด์) เป็นผลิตภัณฑ์หลัก ไพโรไลซิสให้น้ำมันชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์หลัก แต่มีข้อเสีย ในด้านร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่ต่ำ ส่วนลิกวิแฟกชันจะให้น้ำมันชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์หลัก เช่นเดียวกับไพโรไลซิส มีข้อแตกต่าง คือมีการเติมตัวทำละลาย เพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มร้อยละ ผลได้ของน้ำมันชีวภาพให้สูงขึ้น หลักการของกระบวนการดังกล่าว คือ สารโมเลกุลขนาดใหญ่ภายใน ชีวมวลจะเกิดการแตกตัวผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Solvolysis) ของตัวทำละลายที่อุณหภูมิสูงและ อัตราการให้ความร้อนที่ต่ำทำให้ได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลว ข้อเสียของกระบวนการ ดังกล่าว คือการใช้ น้ำหรือแอลกอฮอล์เป็นตัวทำละลาย จะทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบของ สารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจน (oxygenated hydrocarbon compound) สูงซึ่งการทำลิกวิแฟกชัน สามารถแบ่งออกได้เป็นสองวิธี คือ ทางตรงและทางอ้อม การทำลิกวิแฟกชันทางตรงจะเกี่ยวข้องกับ การทำการไพโรไลซิสอย่างฉับพลันเพื่อที่จะผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวหรือไอของสารอินทรีย์ที่สามารถ เกิดการควบแน่นได้ ส่วนการทำลิกวิแฟกชันทางอ้อมจะเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำการ

เปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่ไม่สามารถเกิดการควบแน่นได้จากการทำไพโรไลซิสให้เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งปรับปรุงการไพโรไลซิสเพื่อให้ร้อยละผลได้สูงขึ้น โดยจะศึกษาการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวโดยตัวทำละลายที่ใช้จะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับชีวมวล เพียงช่วยส่งเสริมการแตกสลายพันธะของสารโมเลกุลใหญ่ เพื่อให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้นและมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวโดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้ว (spent FCC) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และนิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการทำให้สายโซ่ของโครงสร้างโมเลกุลของสารในชีวมวล เกิดการแตกพันธะทำให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลงผ่านการเกิดปฏิกิริยา เช่น ดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ไฮโดรจีโนไลซิส (Hydrogenolysis) และไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation) ซึ่งเป็นการปลดปล่อยออกซิเจนออกจากโมเลกุลของชีวมวลในรูปของโมเลกุลของน้ำ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่จากไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาวิธีการผลิตน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่จากไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

1.2.2 ศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อการเพิ่มร้อยละผลได้และการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านการทำไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

1.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชีวมวลได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุ

1.3.3 ศึกษาคุณสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเทคนิค Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer

1.3.4 เตรียมน้ำมันชีวภาพให้ได้ร้อยละผลได้ในปริมาณและคุณภาพสูงโดยการศึกษาตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการให้ความร้อน ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น

1.3.5 วิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ ค่าความร้อนปริมาณธาตุ ปริมาณน้ำค่าความเป็นกรดและองค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพ

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการทำไพโรไลซิสในเฟสของเหลวโดยชีวมวลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ต้นกระถินยักษ์

1.4.2 เตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.2.1 เตรียมไม้กระถินยักษ์โดยนำไปผ่านการบดละเอียดให้มีขนาดเล็กกว่า 2 มิลลิเมตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพทุกครั้ง

1.4.2.2 ตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองมีสมบัติที่ไม่มีขั้ว คือ เฮกเซน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดผงที่ใช้ในการทดลองคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้ว (spent FCC) นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> commercial grade) และแมกนีเซียออกไซด์ (MgO)

1.4.3 ศึกษาการใช้เครื่องปฏิกรณ์สำหรับการวิจัย

1.4.4 วิเคราะห์ชีวมวล

1.4.4.1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชีวมวล

- การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเถ้า
- การวิเคราะห์แยกธาตุ (Ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจนด้วยเครื่อง CHN Elemental Analyzer



1.4.4.2 ศึกษาคุณสมบัติการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเครื่อง Thermogravimetric/Differential Thermal Analyzer (TG/DTA) โดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

#### 1.4.5 วิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

- วิเคราะห์วัดพื้นที่ผิวและขนาดอนุภาครูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบีอีที (BET)
- วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างของโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD)

#### 1.4.6 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อการทำไพโรไลซิสในเฟสของเหลวด้วยเครื่องปฏิกรณ์

- อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) : 325-400
- ระยะเวลาในการให้ความร้อน (ชั่วโมง) : 0.5-2
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนักเทียบกับชีวมวล) : 10-20
- ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์) : 5 – 20
- ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้ว นิกเกิล โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาและแมกนีเซียมออกไซด์

#### 1.4.7 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำไพโรไลซิสในเฟสของเหลวของชีวมวลในด้าน

- ร้อยละผลได้ (Yield)
- ค่าความร้อน (Heating value) ของน้ำมันชีวภาพ
- ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง CHN Elemental Analyzer
- องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโทรเมทรี (GC-MS)
- ปริมาณน้ำด้วยเครื่อง Karl Fischer
- ปริมาณค่าความเป็นกรดด้วยเครื่อง Total acid number (TAN)

#### 1.4.8 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบภาวะที่เหมาะสมเพื่อใช้ผลิตน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่จากไฟโรไลซิสในเฟสของเหลวของกระถินยักษ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

จากวิกฤตการณ์ทางด้านราคาน้ำมันในปัจจุบัน ทำให้เกิดผลกระทบต่อผู้บริโภคในทุกภาคที่เกี่ยวข้องเป็นที่คาดการณ์ว่าในปี พ.ศ. 2583 ราคาน้ำมันจะถีบตัวสูงขึ้นจนผู้บริโภคไม่มีกำลังซื้อ หากอัตราการผลิตน้ำมันยังคงเป็นอยู่อย่างเช่นในปัจจุบัน คือ 24 ล้านบาร์เรล/ปี เราต้องเผชิญกับภาวะการขาดแคลนน้ำมันในปี 2583 อย่างแน่นอน ดังเหตุการณ์วิกฤตการณ์น้ำมันในช่วงศตวรรษที่ 1970 (ช่วงปี พ.ศ.2513) เมื่อราคาน้ำมันสูงขึ้นอย่างน่าตกใจ เป็นเหตุให้เกิดการตื่นตัวในการหาทางออกเกี่ยวกับเชื้อเพลิงอื่นๆ เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงจากพลังงานฟอสซิลที่กำลังจะหมดไป โดยประเทศไทยนั้นเป็นประเทศทางเกษตรกรรม ส่งผลทำให้การนำเอาชีวมวลมาแปรรูปเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือก ถือเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจมากในอนาคตเพราะเป็นเชื้อเพลิงที่หาง่าย ราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยเชื้อเพลิงจากชีวมวลสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของเชื้อเพลิงเหลวที่เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ (bio oil)

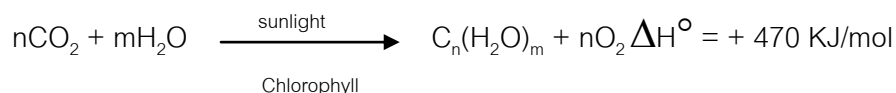
การผลิตน้ำมันชีวภาพทำได้โดยการนำเอาชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ที่อุณหภูมิสูงในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในสถานะของเหลว สีดำ มีความหนืดสูง มีกลิ่นที่เหม็น สามารถนำไปใช้งานได้กับเครื่องยนต์รอบต่ำโดยน้ำมันชีวภาพมีข้อดีคือ มีปริมาณซัลเฟอร์ ไนโตรเจนและกำมะถันต่ำ ทำให้การเผาไหม้น้ำมันชีวภาพมีการปล่อยแก๊ส  $SO_2$ ,  $NO_x$  และเขม่าน้อยกว่าเชื้อเพลิงจากฟอสซิลมาก อีกทั้งยังถือว่าไม่มีการปล่อยแก๊ส  $CO_2$  (carbon dioxide neutral) จึงนับได้ว่าน้ำมันชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด แต่กระนั้นน้ำมันชีวภาพหรือน้ำมันชีวภาพนั้นที่ได้นั้นยังไม่เหมาะสมที่จะใช้งานในภาคขนส่ง เนื่องจากมีองค์ประกอบที่ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ เช่น การที่ค่าพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ต่ำและการเกิดปัญหาการสึกกร่อนเนื่องจากความเป็นกรดสูง ดังนั้น น้ำมันชีวภาพจึงต้องมีกระบวนการปรับเพิ่มคุณสมบัติ (upgrading) โดยอาศัยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบเคมีของน้ำมันชีวภาพ โดยจุดประสงค์หลักของกระบวนการปรับเพิ่มคุณสมบัติ คือ การเพิ่มค่าพลังงานความ

ร้อนจากการเผาไหม้ลดความเป็นกรด ลดปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเบนซิน (gasoline) และน้ำมันดีเซล (diesel) ในภาคขนส่ง

ดังนั้นการนำเอาชีวมวลมาแปรรูปเพื่อให้มีคุณค่าเพิ่มมากหรือการใช้พลังงานจากชีวมวลนั้น นับว่ามีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก

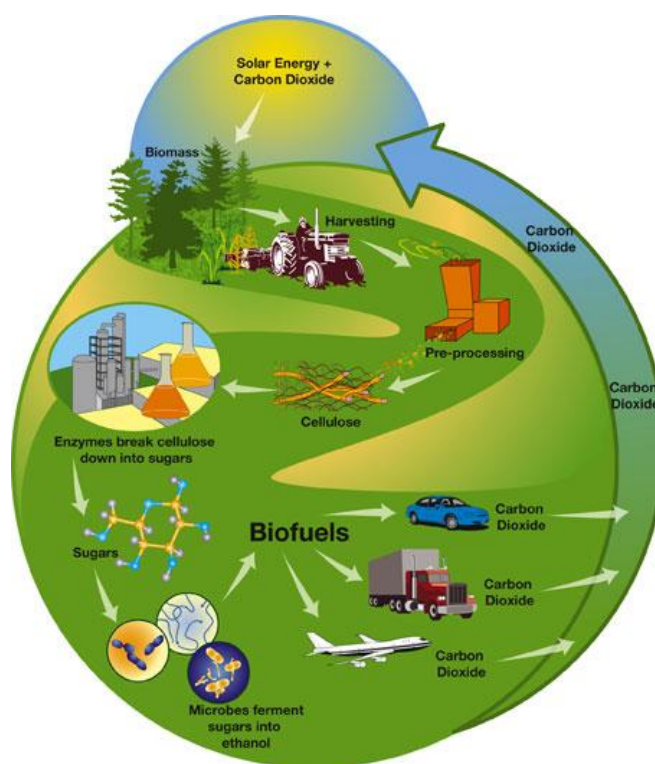
## 2.2 ชีวมวล (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

ชีวมวล มวลคือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงานได้เช่นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรม การเกษตรเช่นแกลบชานอ้อยซังข้าวโพดเป็นต้นชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานประเภทหนึ่งคือพลังงานทางเคมีที่เกี่ยวข้องกับอะตอมของคาร์บอนและไฮโดรเจนที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ถูกออกซิไดซ์ได้สะสมอยู่ในแหล่งกำเนิดของคาร์บอนและไฮโดรเจนมาจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำการสังเคราะห์แสงของพืชจะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำไปเป็นสารอินทรีย์ต่างๆที่สามารถเผาไหม้ได้องค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับกระบวนการนี้คือคลอโรฟิลล์และแสงอาทิตย์โดยคลอโรฟิลล์ที่มีอยู่ในพืชสีเขียวจะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อทำให้เกิดการสังเคราะห์แสงขึ้น ปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆที่เกี่ยวข้องแสดงได้ดังสมการด้านล่าง (Probstein and Hicks, 1982)



$\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$  แสดงถึงสารประกอบอินทรีย์จำพวกคาร์โบไฮเดรตและสารอื่นๆที่สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาคาร์โบไฮเดรตประมาณหนึ่งในสี่จากการสังเคราะห์แสงจะถูกออกซิไดซ์ต่อด้วยกระบวนการผันกลับได้ของการหายใจในพืชเพื่อให้พลังงานสำหรับการเจริญเติบโตโดยส่วนที่เหลือจะสะสมไว้ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้เพราะขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืชนั้นพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำโดยเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บส่วนต่างๆของพืชดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็ได้พลังงานออกมาโดยชีวมวลอาจจะเรียกว่าเป็นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบ ชานอ้อย เศษไม้ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง

ซึ่งข้าวโพดทาบและกะลามะพร้าว เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงพืชในกลุ่มของไม้โตเร็วที่ปลูกเพื่อใช้เป็นแหล่งผลิตพลังงานโดยตรง เช่น กระจินยักษ์ กระจินณรงค์ กระจินเทพา กระจินลูกผสมและยูคาลิปตัส เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้นพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เป็นแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืชการนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงจึงได้พลังงานดังกล่าวออกมาและปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่บรรยากาศวนเวียนเป็นวัฏจักร (Apecthai, 2555)



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของชีวมวล (biomass cycle)(biorefinery, 2556)

## 2.2.1 แหล่งกำเนิดชีวมวล

เชื้อเพลิงชีวมวลสามารถแยกออกได้ 4 ประเภท ตามแหล่งที่มาดังนี้

2.2.1.1. พืชผลทางการเกษตร (Agriculture crops) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ที่เป็นแหล่งพลังงานของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆที่สามารถนำมาเป็นพลังงานได้

2.2.1.2. วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (Agriculture residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามัน ลำปะหลัง รวมถึงพืชที่แพร่ระบาดในการเกษตรกรรม เช่น หญ้าคา ผักตบชวา

2.2.1.3. ไม้และเศษไม้ (Wood and Wood residues) ไม้โตเร็วเช่น ยูคาลิปตัส กระจินณรงค์ กระจินเทพา เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือนและโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

2.2.1.4. ของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน (Waste stream) เช่นกากน้ำตาลและขาน้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ชี้เลี้ยง เส้นใยปาล์มและกะลาปาล์ม

## 2.2.2 ข้อแตกต่างระหว่างชีวมวลและเชื้อเพลิงฟอสซิล

- ไม่มีปริมาณสำรอง ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นปีต่อปี จึงยากที่จะคาดการณ์ปริมาณที่เกิดขึ้นในระยะยาวได้ ซึ่งแตกต่างกับถ่านหินและแก๊สธรรมชาติเพราะมีปริมาณสำรองที่เห็นชัดเจน

- อุปทานไม่แน่นอน ชีวมวลจะเกิดขึ้นตามฤดูกาลเช่นเดียวกับผลผลิตทางการเกษตร ดังนั้นช่วงฤดูเก็บเกี่ยวจะมีปริมาณมาก นอกฤดูเก็บเกี่ยวจะมีปริมาณน้อยลงทำให้ราคาสูงขึ้น และมีลักษณะเป็นวงจรเช่นนี้ทุกปี นอกจากนี้สภาพแห้งแล้ง หรือฝนตกไม่ตรงตามฤดูกาลมีส่วนทำให้ปริมาณชีวมวลในปีนั้นๆ เปลี่ยนแปลงไปด้วย และยังขึ้นกับราคาของผลผลิตในปีที่แล้ว เช่น ถ้าราคาหัวมันสำปะหลังมีราคาตกต่ำ ชาวไร่ส่วนหนึ่งจะเปลี่ยนไปปลูกข้าวโพดแทนในปีหน้า ดังนั้นปริมาณชังข้าวโพดในปีหน้าจะเพิ่มขึ้นแต่เหง้ามันสำปะหลังจะลดลง

- อุปสงค์ของอุตสาหกรรมอื่นๆ (Demand) ถ้ามีอุตสาหกรรมอื่นๆ ร่วมบริโภคด้วย แต่อุปทานคงที่ มีผลทำให้ชีวมวลมีราคาสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่บริโภคชีวมวลคือ

ด้านเกษตรกรรม เช่น การนำแกลบปูลูใต้โรงเลี้ยงไก่ การเพาะเห็ดจากชี้เลี้ยง ฟางข้างและทะลายปาล์ม ซึ่งหลังจากใช้แล้วชีวมวลเหล่านี้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นได้อีก เช่น การทำปุ๋ย

โรงงานอุตสาหกรรม ปัจจุบันโรงงานที่ใช้ความร้อนในกระบวนการผลิตนิยมใช้ชีวมวลทดแทนน้ำมันเตามากขึ้น เช่น โรงงานผลิตถุงมือยาง โรงงานน้ำมันพืช และโรงงานแปรงมัน เป็นต้น เพราะน้ำมันเตามีราคาแพงกว่าชีวมวลหลายเท่าตัว

อุตสาหกรรมเผาอิฐมอญ เป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ทำกันภายในครอบครัวเมื่อหลายร้อยปีมาแล้ว ใช้แกลบหรือเศษไม้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาอิฐ ปัจจุบันนี้มีผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เกิดขึ้นมาทดแทนหลายชนิด เช่น อิฐบล็อก อิฐมวลเบา และผนังสำเร็จรูป ซึ่งไม่ต้องใช้พลังงานความร้อนในกระบวนการผลิต และใช้แรงงานน้อยในการติดตั้งเมื่อเทียบกับอิฐมอญ

อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงหลัก และเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้นำชีวมวลมาทดแทนส่วนหนึ่ง เช่น แกลบ กะลาปาล์ม และขี้เลื่อย เนื่องจากมีราคาถูกกว่า อย่างไรก็ตามชีวมวลในปัจจุบันมีราคาสูงขึ้นมาก ซึ่งถ้ามีราคาสูงเท่ากับถ่านหินแล้ว คาดว่าโรงงานผลิตปูนซีเมนต์คงลดปริมาณการบริโภคลง หรืออาจจะยกเลิกการใช้ชีวมวลซึ่งขึ้นกับนโยบายผู้บริหาร

- วิธีการซื้อขาย ส่วนใหญ่ใช้เงินสดเช่นเดียวกับการซื้อสินค้าเกษตร ไม่มีวงเงินเครดิตเหมือนสินค้าอุตสาหกรรมทั่วไป

- การขนส่ง เนื่องจากชีวมวลจะมีน้ำหนักเบา ค่าใช้จ่ายในการขนส่งแต่ละครั้งสูงกว่าเชื้อเพลิงอื่นๆ เช่น การขนส่งน้ำมันเตา 12,000 ลิตร 10,000 บาท/เที่ยว คิดเป็นค่าใช้จ่าย 20 บาท/กิกะจูล แต่การขนส่งแกลบ 10 ตัน เสียค่าใช้จ่ายถึง 74 บาท/กิกะจูล เป็นต้น หรือในกรณีการขนส่งแก๊สธรรมชาติทางท่อ เสียค่าใช้จ่ายเพียง 20 บาท/ล้านบีทียูหรือ 20 บาท/กิกะจูล

**ตารางที่ 2.1** ข้อแตกต่างชีวมวลกับเชื้อเพลิงฟอสซิล (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, 2549)

	เชื้อเพลิงฟอสซิล	ชีวมวล
1. ปริมาณสำรอง	มี	ไม่มี
2. อุปทาน	สม่ำเสมอ	แปรผันตามฤดูกาล
3. การผันแปรของราคา	คาดการณ์ไม่ได้	คาดการณ์ได้
4. เครดิตการซื้อขาย	มี	ไม่มี
5. ต้นทุนขนส่ง	ต่ำ-ปานกลาง	สูง

### 2.2.3 ประโยชน์ของชีวมวล

มนุษย์นำชีวมวลมาใช้เป็นพลังงานตั้งแต่สมัยโบราณแล้วจนต่อมาโลกได้มีการพัฒนาเจริญมากขึ้นและใช้พลังงานเพิ่มขึ้นจึงได้นำเชื้อเพลิงจากฟอสซิลเช่นน้ำมันดิบถ่านหินและแก๊สธรรมชาติมาทดแทนทำให้พลังงานจากชีวมวลมีบทบาทน้อยลงมากในปัจจุบัน

การนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมีข้อดีหลายประการคือ

- การเผาไหม้สารทุกชนิดผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศและปกคลุมโลกไว้เมื่อแสงอาทิตย์ส่องลงมายังโลกทำให้รังสีบางส่วนไม่สามารถสะท้อนกลับออกไปได้จึงเกิดภาวะโลกร้อนหรือภาวะเรือนกระจกจึงเรียกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ว่า “แก๊สเรือนกระจก” แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาชีวมวลจะถูกหมุนเวียนกลับไปใช้ด้วยพืชอีกครั้งด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงดังนั้นการเผาชีวมวลจึงไม่ถือว่าเป็นการก่อให้เกิดแก๊สเรือนกระจก
- การปล่อยให้ชีวมวลถูกย่อยสลายตามธรรมชาติเช่นมูลสัตว์จะก่อให้เกิดแก๊สมีเทนซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่งและมีอันตรายมากกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า
- ชีวมวลมีกำมะถันไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องฝนกรด (น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันประมาณร้อยละ 0.3-3.8 ขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหิน)
- ขี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นต่างดังนั้นเหมาะสมที่จะนำไปเพาะปลูกหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรดแต่ขี้เถ้าจากการเผาถ่านหินมีสารโลหะหนักปะปนอยู่ดังนั้นต้องนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธี เช่นมีฝ้ายารองรับด้านล่างเป็นต้น
- ช่วยลดภาระในการกำจัดเช่นการนำไปฝังกลบและเผาทิ้งเป็นต้น

### 2.2.4 ศักยภาพของพลังงานชีวมวล

- วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร  
วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้แก่แกลบและฟางข้าวชานอ้อยกากและกะลาปาล์มกะลามะพร้าวเป็นต้นจากการประเมินศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจากพืช 10 ชนิดที่มีศักยภาพสูงได้แก่อ้อยข้าวน้ำมันปาล์มมะพร้าวมันสำปะหลัง



ข้าวโพดถั่วลิสงฝ้ายถั่วเหลืองและข้าวฟ่างในปี พ.ศ.2543 แสดงดังตารางที่ 2.2 พบว่ามีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรประมาณ 63 ล้านตันโดยถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นๆ ประมาณ 16 ล้านตันเท่ากับว่ามีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนที่ยังไม่ได้ใช้เท่ากับ 42 ล้านตันซึ่งเทียบเท่ากับพลังงาน 604.82 เพตาจูล ( $6.04 \times 10^{17}$  จูล)

- มูลสัตว์

มูลสัตว์ 6 ชนิด คือ มูลจากโคกระบือสุกรไก่เบ็ดและช้างในปี พ.ศ. 2543 มีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ 560 ล้านลูกบาศก์เมตรคิดเป็นพลังงานประมาณ 11.75 เพตาจูล

- ขยะ

ในปี พ.ศ. 2543 กรมควบคุมมลพิษรายงานปริมาณขยะที่จัดเก็บได้ประมาณ 13.9 ล้านตันซึ่งมีปริมาณขยะรวมทั้งในกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเขตเทศบาลเมืองพัทยาและนอกเขตเทศบาลทั่วประเทศถ้านำขยะร้อยละ 85 ของขยะทั้งหมดมาฝังกลบจะได้แก๊สชีวภาพจากการฝังกลบ 1,184.22 ล้านลูกบาศก์เมตรหรือเทียบเท่ากับพลังงาน 23.09 เพตาจูล

- น้ำเสีย

ในปี พ.ศ.2543 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงในการนำมาผลิตแก๊สชีวภาพจำนวน 11 ประเภทอุตสาหกรรมเช่นโรงฆ่าสัตว์โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มเป็นต้นมีศักยภาพที่จะผลิตแก๊สชีวภาพได้ 435.33 ล้านลูกบาศก์เมตรซึ่งเทียบเท่ากับพลังงาน 10.45 เพตาจูล

ตารางที่ 2.2 การประเมินศักยภาพพลังงานจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร (กระทรวงพลังงาน, 2543)

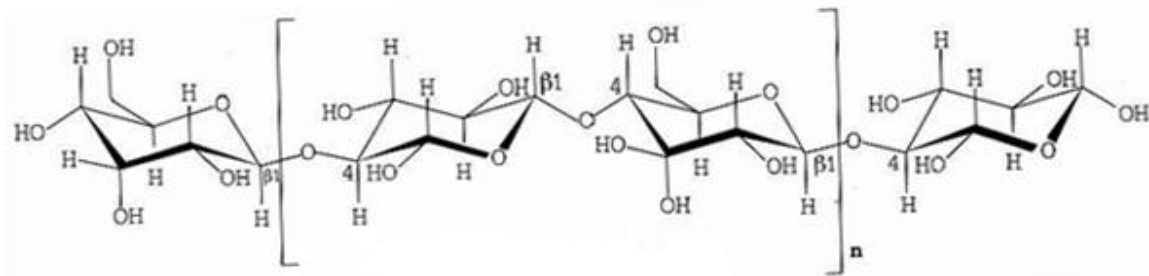
ชนิด	ผลผลิตต่อปี (10 <sup>6</sup> กก.)	วัสดุเหลือใช้	วัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้น (10 <sup>6</sup> กก.)	ปริมาณวัสดุเหลือใช้ที่ยังไม่มีการใช้ (10 <sup>6</sup> กก.)	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กก.)	พลังงาน (เทราจูล)	
1. อ้อย	53,494	ชานอ้อย	15,567	3,222	14.4	46,401	
		ส่วนยอดและใบ	16,155	15,929	17.39	277,006	
2. ข้าว	24,172	แกลบ	5,560	2,741	14.27	39,112	
		ฟาง(ส่วนบน)	10,805	7,391	10.24	75,679	
3. ปาล์มน้ำมัน	3,256	ทะลายปาล์ม	1,394	814	17.86	14,535	
		เปล้า					
		เส้นใยปาล์ม	479	64	17.62	1,130	
		กะลาปาล์ม	160	6	18.46	109	
		ก้าน	8,479	8,479	9.83	83,345	
		ทะลายตัวผู้	759	759	16.33	12,389	
4. มะพร้าว	1,400	เปลือก	507	302	16.23	4,894	
		กะลามะพร้าว	224	85	17.93	1,518	
		ทะลายมะพร้าว	69	58	15.4	891	
		ทางมะพร้าว	315	255	16	4,077	
5. มันสำปะหลัง	19,064	ลำต้น	1,678	683	18.42	12,577	
6. ข้าวโพด	4,286	ชังข้าวโพด	1,170	784	18.04	14,142	
7. ถั่วลิสง	138	เปลือก	45	45	12.66	564	
8. ฝ้าย	36	ลำต้น	116	116	14.49	1,686	
9. ถั่วเหลือง	319	ลำต้น, ใบ,	849	646	19.44	12,551	
		เปลือก					
10. ข้าวฟ่าง	142	ใบ, ต้น	178	115	19.23	2,215	

## 2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

ชีวมวลส่วนใหญ่มาจากของเสียทางการเกษตร เช่น ฟางข้าวและเปลือกข้าว ของเสียจากป่าไม้ เช่น ขี้เลื่อยและกากไม้ ตลอดจนจันท์และสารอินทรีย์ของจุลชีพ องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลคือ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides)

### 2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืชและเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติมากที่สุดประมาณร้อยละ 40-50% โดยน้ำหนักแห้ง ประกอบด้วยน้ำตาลดีกลูโคส (D-glucose) ในรูปของเบต้า-ดีกลูโคไพราโนส (-D-glucopyranose) หลายโมเลกุลต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายลูกโซ่เซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 240-350 องศาเซลเซียส โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.2

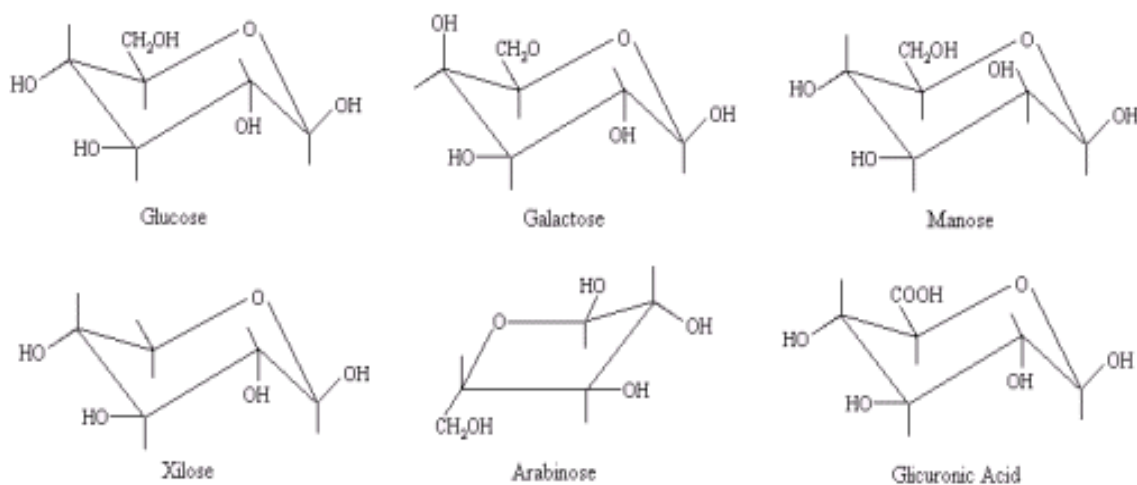


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส (นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

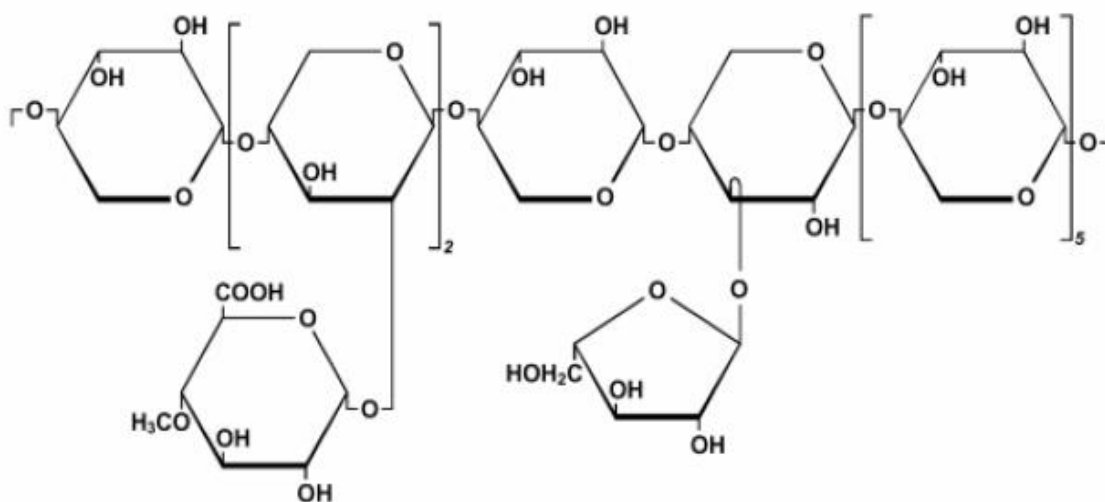
### 2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่มีมวลโมเลกุลน้อยกว่าเซลลูโลส จะพบเฮมิเซลลูโลสประมาณ 25-35 % โดยน้ำหนักแห้ง เฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200-260 องศาเซลเซียส โดยจะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหยมาก น้ำมันทาร์และ

ถ่านชาร์น้อยกว่าเซลลูโลส สายโซ่พอลิเมอร์มีลักษณะเป็นพอลิแซคคาไรด์หลายชนิดปนกันแสดงดังรูปที่ 2.3 แต่อยู่ในรูปออสัณฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลสคือสายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเฮเทอโรจีนัส (heterogenous) ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์หลายชนิดปนกันดังแสดงในรูปที่ 2.3 และ 2.4 คือ เพนโตแซน (pentosan) เฮกโซแซน (hexosan) และพอลิยูโรไนด์ (polyuronides) และเฮมิเซลลูโลส



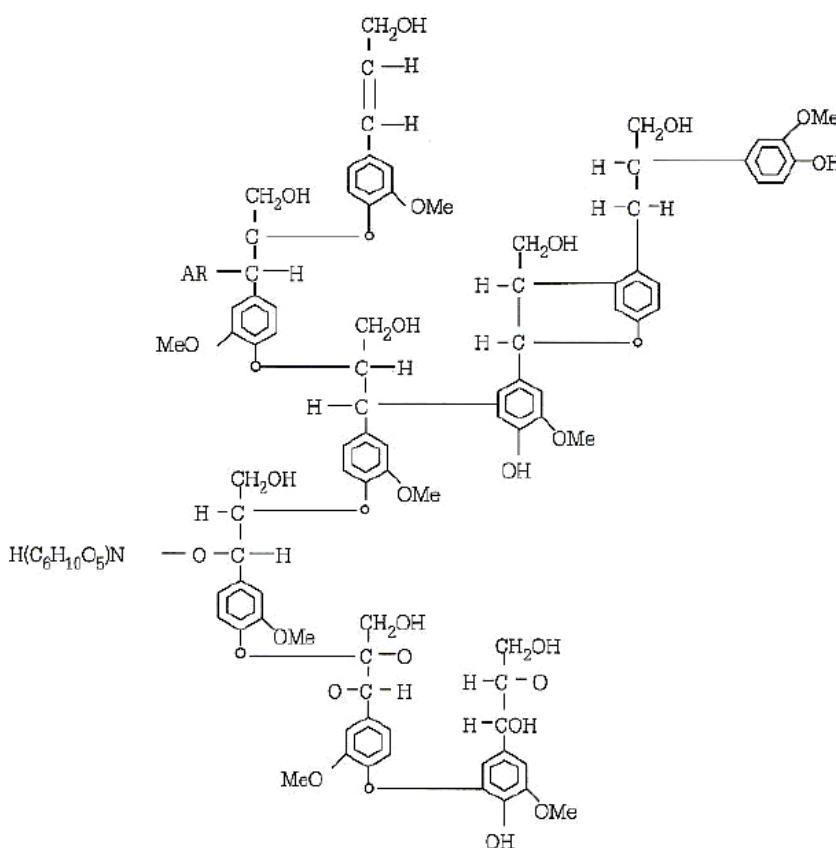
รูปที่ 2.3 หน่วยย่อยของเฮมิเซลลูโลส (Engin.umich, 2012)



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (Knabner et al., 2002)

### 2.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นองค์ประกอบที่มีการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยโครงสร้างแอโรแมติกของหน่วยฟีนิลโพรเพนที่เชื่อมต่อกันด้วยคาร์บอนสายตรง (Aliphatic chain) ทำหน้าที่ประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงของเนื้อไม้ โดยลิกนินจึงมีลักษณะที่เหมาะสมในการเป็นผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่เป็นเสมือนกาวยึดและเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์พืช ลิกนินจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 280-500 องศาเซลเซียส ลิกนินจะสลายตัวได้ยากกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เมื่อสลายตัวแล้วจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีฟีนอลเป็นองค์ประกอบมาก และเหลือถ่านชาร์มากกว่าการไพโรไลซิสเซลลูโลส โครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน (นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

เป็นที่น่าสนใจว่าในมวลเนื้อไม้จะพบสารประกอบไฮโดรเซลลูโลสที่เป็นกลุ่มอะลิฟาติกที่มีอะตอมออกซิเจนร่วมเป็นส่วนใหญ่ แต่ไม่พบสารประกอบอะโรมาติกเลย ไฮโดรเซลลูโลสเหล่านี้มีกลุ่มฟังก์ชันนัล (functional group) ที่สำคัญ คือ ไฮดรอกซิล (-OH) และเมทานอล (-CH<sub>2</sub>OH) แต่ในลิกนินกลับพบกลุ่มของวงแหวนเบนซีนอยู่ โดยสารประกอบอะโรมาติกเหล่านี้พบว่าเกิดเป็นหน่วยเดี่ยวไม่ได้รวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่เหมือนกับในเชื้อเพลิงฟอสซิล กลุ่มฟังก์ชันนัลหลักในลิกนิน คือ เมทอกซี (-OCH<sub>3</sub>) โดยมีกลุ่มไฮดรอกซิลและเมทานอลอยู่บ้างเล็กน้อย ลิกนินนั้นค่อนข้างจะป็นสารที่มีขั้วและเป็นสารอะโรมาติกโดยธรรมชาติสำหรับส่วนที่เป็นสารสกัดจะมีโครงสร้างของอะลิฟาติกและอะโรมาติกที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับธาตุอื่นๆ เช่น ไนโตรเจน

เศษวัสดุการเกษตร จะมีส่วนประกอบแตกต่างจากไม้ วัสดุเหล่านี้มีไฮโดรเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ และมีลิกนินน้อยหรือไม่มีเลย และมีส่วนที่เป็นโปรตีนสูง ส่วนจำพวกกลุ่มอะโรมาติก ในเศษวัสดุการเกษตรที่ไม่ใช่ไม้มีปริมาณน้อยกว่าในไม้ โดยส่วนประกอบในตัวอย่างของพืชพลังงาน แสดงตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบลิกนินเซลลูโลสของพืชพลังงาน (dry basis) (นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

ชนิดของชีวมวล	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	อื่นๆ (%)
ฟางข้าว	38	36	16	10
ซังข้าวโพด	32	44	13	11
ชานอ้อย	35	25	20	20
ไม้โตเร็ว	50	23	22	5
กระดาศ	76	13	11	0
ไม้ไผ่	41	26	27	7

#### 2.3.4 ค่าความร้อน

ค่าความร้อน (heating value) คือ พลังงานความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักที่ถูกปล่อยออกมา จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีจุดเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง ค่าความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

คือ ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ ขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนต่ำ คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะไอ ส่วนค่าความร้อนสูง คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว โดยค่าความร้อนสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำดังนี้

$$\text{HHV (MJ/kg)} = \text{LHV (MJ/kg)} + 0.02395(9\text{H} + \text{MC}_t)$$

ในการหาค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองโดยใช้บอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น ( $\text{MC}_t$ ) และเศษเถ้า หรือได้จากการใช้สูตรอย่างง่ายคำนวณ เช่น สูตรของดูลอง (Dulong formula) และสูตรของเดเมียบาส (Demirbas, 1997) ดังสมการต่อไปนี้

สูตรของดูลอง (Dulong formula)

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.585\text{C} + 141.924\text{H} + 12.908\text{S} - 15.327\text{O} - 3.538\text{O}^2$$

สูตรของเดเมียบาส (Demirbas, 1997)

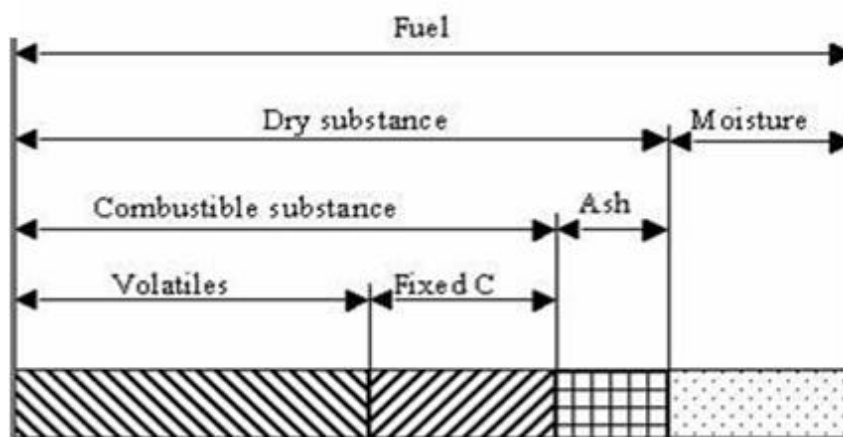
$$\text{HHV (MJ/kg)} = 33.5\text{C} + 142.3\text{H} - 15.4\text{O} - 24.5\text{N}$$

$$\text{HHV (MJ/kg)} = 31.2\text{FC} + 15.34\text{VM}$$

### 2.3.5 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

ในการแสดงคุณลักษณะเชื้อเพลิงแข็งมักจะใช้การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) การวิเคราะห์แบบประมาณจะระบุปริมาณความชื้น

ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณเศษเถ้า ตามสภาพของเชื้อเพลิงดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุจะระบุถึงปริมาณธาตุต่างๆ ในเชื้อเพลิง ซึ่งปกติจะเป็นคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของชีวมวล (biomass composition) (นคร ทิพย์วงศ์, 2552)

2.3.5.1 ความชื้น (moisture) หมายถึง ปริมาณน้ำที่สะสมอยู่ในชีวมวลโดยส่วนใหญ่แล้วชีวมวลก็มีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

2.3.5.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (combustible substance) จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (volatiles matter) และคาร์บอนคงที่ (fixed carbon) โดยสารระเหย คือ ส่วนที่เผาไหม้ง่าย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงที่นั้น เป็นคาร์บอนที่อยู่ในรูปของแข็ง

2.3.5.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือขี้เถ้า (ash) เมื่อชีวมวลถูกเผาไหม้อย่างสมบูรณ์แล้วจะมีเนื้อสารบางส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้นั้น คือขี้เถ้า โดยชีวมวลแต่ละประเภทนั้นจะมีสัดส่วนของปริมาณขี้เถ้าในชีวมวลแตกต่างกัน



## 2.4 แนวทางการใช้พลังงานจากชีวมวลในประเทศไทย

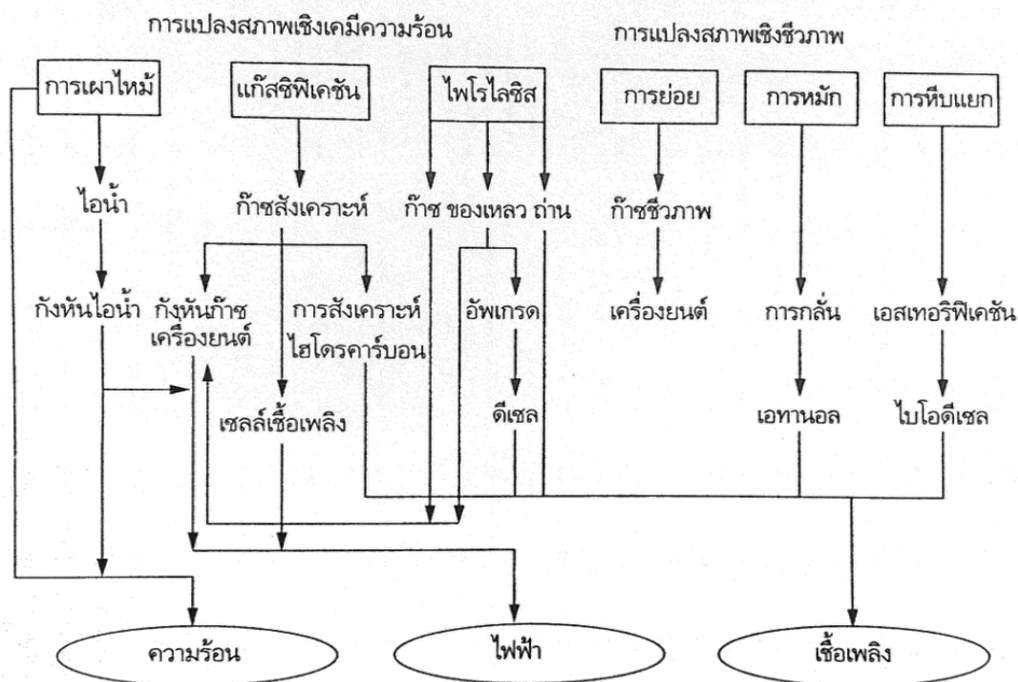
ตามแผนพัฒนาพลังงานทดแทนระยะ 15 ปี (ปี 2552-2565) ได้กำหนดเป้าหมายที่ประเทศไทยจะต้องเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็น 20% ของการใช้พลังงานทั้งหมด เมื่อสิ้นสุดแผนในปี 2565 พลังงานทดแทนที่มีการส่งเสริมให้มีการนำมาใช้สูงสุด คือ พลังงานชีวมวลที่ตั้งเป้าให้มีการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงดังกล่าวที่ 3,700 เมกะวัตต์ ซึ่งปัจจุบันพลังงานชีวมวลส่วนใหญ่ได้มาจากเศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร อาทิ แกลบ กากอ้อย กะลาปาล์ม แต่เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้มีไม่เพียงพอต่อความต้องการ ส่งผลให้การเสนอขายไฟฟ้าจากชีวมวลขยายตัวไม่มาก เพียง 1,644 เมกะวัตต์ เท่านั้นเมื่อเทียบกับไฟฟ้าพลังงานลมและแสงอาทิตย์ที่เสนอขายเกินเป้าไปแล้วการสนับสนุนให้มีการปลูกไม้โตเร็ว เช่น กระจินยักษ์ กระจินเทพา ยูคาลิปตัสมาเป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากเป็นพันธุ์ไม้ที่มีการเจริญเติบโตเร็ว ปลูกง่ายทนต่อสภาพแห้งแล้งสามารถขึ้นได้ในพื้นที่ที่มีสภาพดินเสื่อมโทรมที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำและเนื้อไม้ให้ค่าความร้อนสูงสามารถเพิ่มโอกาสให้แก่เกษตรกรและเพิ่มพื้นที่ป่าไม้ช่วยลดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนให้เป็นไปตามเป้าหมายได้อีกด้วย

ปัจจุบันประเทศไทยมีการปลูกป่าไม้โตเร็วเป็นจำนวนมากเนื่องจากเป็นไม้ใช้สอยและไม้เพื่ออุตสาหกรรม เช่น กระจิน เฟิร์นเจอร์ มีเพียง 10% เท่านั้นที่ถูกนำมาใช้เป็นพลังงานขณะที่ความต้องการเชื้อเพลิงไม้มีสูงขึ้นทำให้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรมและโรงไฟฟ้าชีวมวลกระทรวงพลังงานจึงได้ให้การสนับสนุนให้มีการหาแนวทางขยายพื้นที่ปลูกไม้โตเร็วเพื่อนำมาเป็นพลังงานซึ่งเป็นเรื่องสำคัญเร่งด่วนที่จะสามารถผลักดันให้ยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศบรรลุเป้าหมายเพื่อเป็นการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืนและต่อเนื่องต่อไป

นอกจากนี้ยังพบปัญหาบุกรุกตัดไม้ในพื้นที่ป่าในบางพื้นที่เพื่อนำมาขายให้โรงงานไฟฟ้าชีวมวล เมื่อเห็นปัญหาดังกล่าว สำนักงานนโยบายและแผนกระทรวงพลังงาน (สนพ.) จึงมอบให้มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (มทส.) จัดทำโครงการนำร่องศึกษาความเป็นไปได้ปลูกไม้โตเร็วเป็นพลังงานชีวมวล โดยสนับสนุนให้ปลูกพันธุ์ไม้ประเภทกระจินยักษ์ กระจินเทพา ยูคาลิปตัส และกระจินณรงค์ ซึ่งเป็นไม้ที่ปลูกง่ายแม้เป็นพื้นที่สภาพดินเสื่อมโทรม เติบโตเร็ว ทนต่อสภาพแห้งแล้ง ที่สำคัญเนื้อไม้ให้ค่าความร้อนสูง

ทั้งนี้โครงการนำร่อง 4 องค์กร ได้แก่ 1. โครงการธรรมรักษนิเวศน์ 2 ของวัดพระบาทน้ำพุ อ.หนองม่วง จ.ลพบุรี ปลูกต้นกระถินยักษ์ 1,000 ไร่ เพื่อป้อนโรงไฟฟ้าชีวมวลที่อยู่ระหว่างก่อสร้าง 2. โรงไฟฟ้าน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ อ.ด่านช้าง จ.สุพรรณบุรี ปลูกกระถินยักษ์ 3,277 ไร่ ป้อนโรงไฟฟ้าน้ำเขื่อนป่าสักชลสิทธิ์ 3. บริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด (มหาชน) อ.แก่งคอย จ.สระบุรี ปลูกกระถินยักษ์ 200 ไร่ ป้อนโรงผลิตปูนซีเมนต์ที่ทีพีไอ และ 4. สนับสนุนต้นกล้ายูคาลิปตัส กระถินเทพา และกระถินยักษ์ จำนวน 2.4 แสนต้น พื้นที่ 300 ไร่ป้อนโรงไฟฟ้าชีวมวล (ศรัณญา ทองทับ, 2553)

เป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือพลังงานในรูปแบบต่างๆ ไม่เป็นการเพิ่มปริมาณสุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในกรณีที่มีการผลิตชีวมวลขึ้นมาทดแทนชีวมวลที่ใช้ไป อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายความว่า การใช้ชีวมวลจะช่วยลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกได้ทางหนึ่งด้วย อีกทั้งปัจจุบันก็เป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้นๆ ของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย โดยในรูปที่ 2.7 แสดงถึงแนวทางการใช้พลังงานจากชีวมวล



รูปที่ 2.7 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล (นคร ทิพย์าวงศ์, 2552)

### 2.4.1 กระถินยักษ์

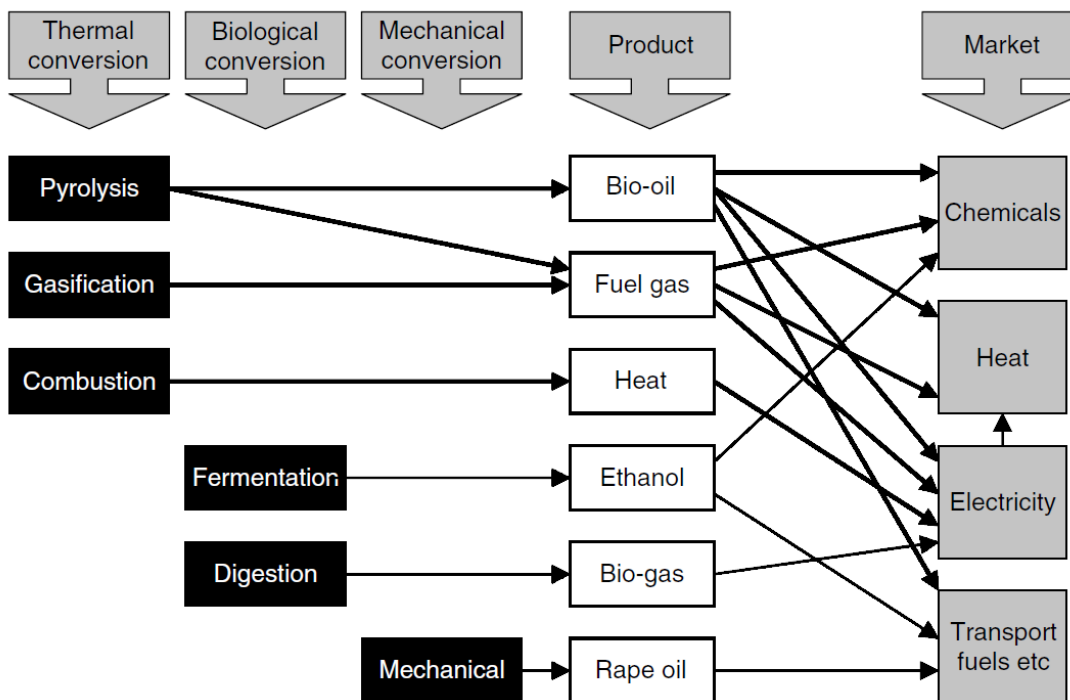
กระถินยักษ์ *leucaena leucocephala* (lam.) de wit เป็นไม้ขนาดกลางไม่ผลัดใบลำต้นเรียบ สีน้ำตาลแดงกระพี้สีเหลืองอ่อนเกือบขาวแก่นมีสีน้ำตาลแดง เปลือกบางเนื้อไม้เป็นเส้นตรงเลี้ยวได้ ตบแต่งได้ง่ายเนื้อไม้ใช้ในการก่อสร้างได้ดีมีรอบตัดพินสั้น อายุ 5 - 6 ปีก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดีในการทำเสา รั้วพิน ถ่าน จนถึงการทำเยื่อกระดาษจากการทดลองในต่างประเทศพบว่า ถ่านที่ทำจากไม้กระถินยักษ์ให้ความร้อนสูงประมาณ 7,000 แคลอรีต่อกิโลกรัมเทียบเท่าประมาณ 70 % ของน้ำมันเตาถ้าพิจารณาในแง่ของการปลูกป่าเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้วจะเห็นได้ว่าการปลูกป่ากระถินยักษ์จะช่วยแก้ปัญหาพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงที่กำลังขาดแคลนในอนาคตได้เป็นอย่างดีนอกจากนี้ใบกระถินยักษ์สามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้อีกด้วยเนื่องจากมีคุณค่าทางอาหารสูงแต่หากให้เป็นอาหารสัตว์ติดต่อกันเป็นเวลานานจะทำให้สัตว์ขนร่วงและหยุดเจริญเติบโตได้เนื่องจากมีสาร mimosine นอกจากนี้กระถินยักษ์เป็นพืชตระกูลถั่วจึงสามารถปลูกเพื่อบำรุงดินได้ในต่างประเทศมีรายงานว่า แบคทีเรียปมรากสามารถตรึงไนโตรเจนได้มากกว่า 5,000 กิโลกรัมต่อพื้นที่ 1 เฮกแตร์ดังนั้นการปลูกป่ากระถินยักษ์จะช่วยปรับปรุงป่าที่เสื่อมโทรมให้กลับเป็นสภาพป่าที่อุดมสมบูรณ์ได้เพราะกระถินยักษ์เติบโตเร็วมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมและช่วยในการปรับปรุงดินและในแง่ของเกษตรกรรมการปลูกพืชระหว่างต้นกระถินยักษ์ก็จะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีอีกด้วย



รูปที่ 2.8 แปลงปลูกต้นกระถินยักษ์ (Greencoun, 2012)

## 2.5 กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง

ชีวมวลและของเสียทางการเกษตรสามารถแปรรูปไปเป็นพลังงานได้โดยผ่านกระบวนการเชิงความร้อนเชิงกลหรือเชิงกายภาพดังแสดงโดยสรุปในรูปที่ 2.9 กระบวนการเชิงความร้อนในปัจจุบันนี้เป็นที่นิยมในยุโรปและแคนาดาขณะที่การผลิตเอทานอลนิยมในสหรัฐอเมริกาแกซีพีเคชันปัจจุบันนี้ยังอยู่ในขั้นพัฒนาและจากการทดลอง (RD & D) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้การไพโรไลซิสแบบเร็วยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาแต่การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงเหลวต้องมีสมบัติในการจัดเก็บและการขนส่งที่ดีการใช้งานของเชื้อเพลิงเหลวใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าจะให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้งานกับโรงงานขนาดเล็กกระบวนการเผาไหม้เป็นระบบที่ใช้กันอย่างกว้างขวางเหมาะกับโรงงานขนาดเล็กกระบวนการแปรรูปเชิงชีวภาพ (การหมักและการย่อย) กระบวนการเชิงกลเช่นน้ำมันพืชเป็นกระบวนการที่ถูกละเลาะว่ามีประสิทธิภาพที่ดี (Bridgwater, 2006)



รูปที่ 2.9 กระบวนการผลิตและการประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวล

(Bridgwater, 2006)

## 2.5.1 การแปรรูปเชิงความร้อน

การแปรรูปเชิงความร้อนเป็นการแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานโดยการใช้ความร้อนจนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเช่นการเผาไหม้โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือไพโรไลซิสแกซิฟิเคชันและการเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนหรือการสันดาป

### 2.5.1.1 ไพโรไลซิส (Bridgwater และ Peacocke, 2000)

ไพโรไลซิสหรือการเผาโดยไม่ใช้ออกซิเจนเป็นการสลายวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนโดยใช้อุณหภูมิสูงระหว่าง 127-527 องศาเซลเซียสโดยไม่เกิดการออกซิไดซ์ซึ่งชีวมวลที่ใช้ในกระบวนการนี้คือพืชที่มีเซลลูโลสหรือไม้ยืนต้นต่างๆเศษไม้ฟางฯลฯวิธีในการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานเริ่มจากการลำเลียงและการอบแห้งชีวมวลเมื่อชีวมวลแห้งดีแล้วจึงนำไปหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นนำไปใส่ในส่วนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปแยกส่วนที่เป็นของแข็งและเถ้าออกจากของเหลวจากนั้นจึงนำส่วนที่เป็นของเหลวไปเก็บไว้ในถังเก็บซึ่งความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยาไพโรไลซิสเป็นความร้อนแบบทางตรงและทางอ้อมความร้อนทางอ้อมหมายถึงการให้ความร้อนภายนอกได้แก่การเผาด้วยแก๊สส่วนความร้อนทางตรงคือการใช้ลมร้อนจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะเป็นของผสมระหว่างแก๊สของเหลวและถ่านซึ่งสัดส่วนของแก๊สของเหลวและถ่านขึ้นอยู่กับวิธีและรูปแบบของปฏิกิริยาไพโรไลซิสและปัจจัยต่างๆดังแสดงในตารางที่ 2.4

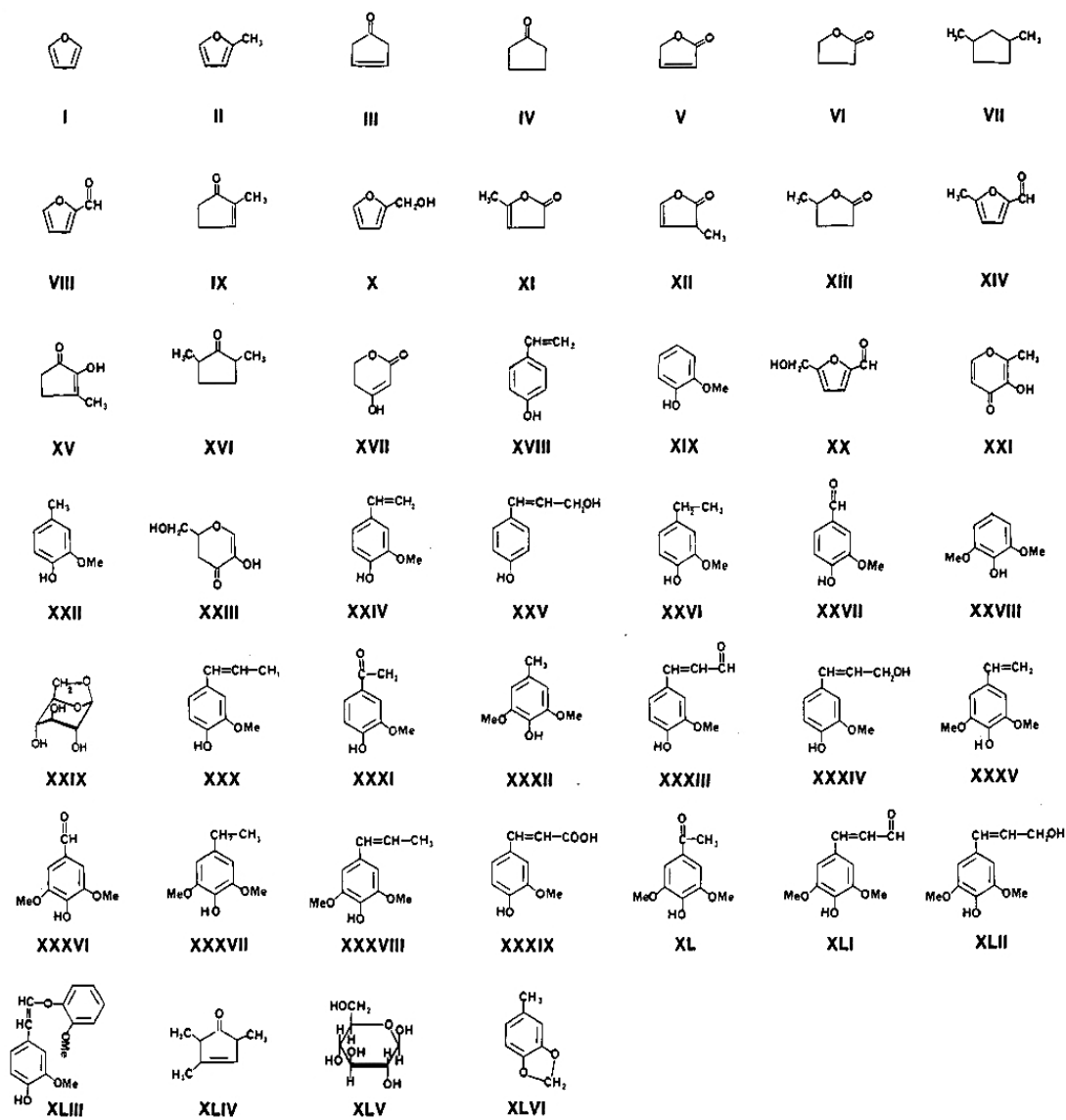
ตารางที่ 2.4 รูปแบบของปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบต่างๆ (Bridgwater, Meier และ Radlein, 1999)

รูปแบบของปฏิกิริยาไพโรไลซิส	เวลา	ความร้อนที่ให้	สภาพในการทำปฏิกิริยา	ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์
การทำถ่าน	ชม./วัน	ต่ำมาก	สิ่งที่ได้จากการเผา	1	127	ของแข็ง
แบบเดิม	5-30 นาที	ต่ำ	สิ่งที่ได้จากผลิตภัณฑ์ป้อนภูมิและทุติยภูมิ	1	327	แก๊สของเหลวของแข็ง
แบบเร็ว	< 1 วินาที	สูง	สิ่งที่ได้จากผลิตภัณฑ์ป้อนภูมิ	1	<327	ของเหลว
แบบเร็ว	< 1 วินาที	สูง	สิ่งที่ได้จากผลิตภัณฑ์ป้อนภูมิ	1	>427	แก๊ส

แต่เดิมปฏิกิริยาไพโรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆและใช้อุณหภูมิต่ำเพื่อให้ได้ผลผลิตถ่านออกมามากที่สุดต่อมาได้ปรับปรุงโดยเพิ่มอัตราการให้ความร้อนและใช้อุณหภูมิปานกลางอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดแก๊สแล้วแก๊สนั้นถูกควบแน่นต่อไปและมีการสลายตัวของสารโมเลกุลใหญ่เพื่อให้ได้ปริมาณแก๊สที่มากขึ้นเชื้อเพลิงเหลวซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสจะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าต่างๆเช่นความหนาแน่นความหนืดแรงตึงผิวและค่าความร้อน

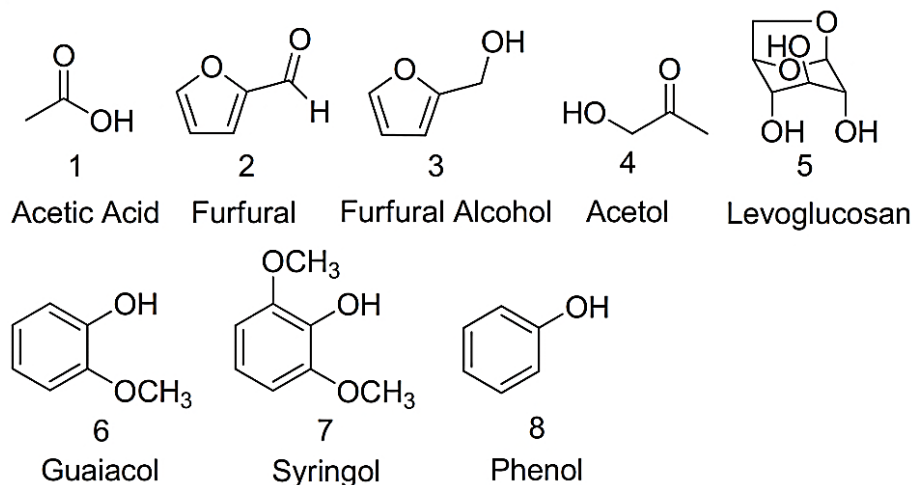
Bridgwater และคณะ (1999) และ Qiang และคณะ (2009) ศึกษาภาพรวมของการไพโรไลซิสและสมบัติของเชื้อเพลิงพบว่าชีวมวลมีองค์ประกอบหลักคือเฮมิเซลลูโลสเซลลูโลสและลิกนินการสลายตัวของลิกนินในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าเมื่อเทียบกับเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสตัวแปรสำคัญในการสลายตัวของแต่ละองค์ประกอบคืออุณหภูมิอัตราการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์และความดันแก๊สไนโตรเจนดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ควรมีการถ่ายเทความร้อนที่ดีการเตรียมชีวมวลถือว่ามีความสำคัญเช่นกันเพราะนอกจากชีวมวลต้องมีขนาดเล็กเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ดีแล้วชีวมวลยังต้องมีความชื้นที่ต่ำกว่าร้อยละ 10 ซึ่งในไพโรไลซิสครั้งหนึ่งได้น้ำออกมาไม่ต่ำกว่าร้อยละ 15 และไม่สามารถแยกได้โดยวิธีปกติเช่นการกลั่นดังนั้นการที่มีน้ำในน้ำมันชีวภาพทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพค่าความร้อนความหนืดความเป็นกรดการกัดกร่อนเป็นต้นและควรให้ไอระเหยวนเวียนอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้เวลาน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการแตกตัวครั้งที่ 2 (secondary cracking) ถ้าไม่มีการป้องกันจะทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มีปริมาณลดลงเมื่อพิจารณาถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสไม้ (wood) พบว่ามีออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 37.1 ค่าความร้อน 17 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (ปกติน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมมีค่าความร้อน 41-43 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องลดปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ

สารประกอบออกซิเจนที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลที่มีองค์ประกอบหลักคือเฮมิเซลลูโลสเซลลูโลสและลิกนินแสดงในรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11 พบว่าสารประกอบออกซิเจนที่ได้จากการไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของกลูโคสซึ่งเป็นหน่วยย่อยของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเช่นโครงสร้างที่ I ถึง XVII และสารประกอบออกซิเจนที่ได้จากการไพโรไลซิสลิกนินมีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับโครงสร้างของฟีนอลซึ่งเป็นองค์ประกอบของลิกนินเช่นโครงสร้างที่ XVIII ถึง XLIII



รูปที่ 2.10 สารประกอบออกซิเจนที่ได้จากการไฟโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสเซลลูโลสและลิกนิน

(Robert และ Thomas, 1987)



รูปที่ 2.11 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลส (1-5) และลิกนิน (6-8)

(David และคณะ, 2011)

#### 2.5.1.2 แกซิฟิเคชัน (Krzysztof, Mark และ Anke, 2007)

แกซิฟิเคชันเป็นการสลายชีวมวลด้วยการให้ความร้อนกับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล โดยใช้กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (partial oxidation) โดยใช้ตัวออกซิไดซ์ได้แก่อากาศออกซิเจน หรือไอน้ำจนกระทั่งเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) แก๊สไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) แก๊สไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) (ในกรณีที่ใช้อากาศเป็นตัวออกซิไดซ์) และแก๊สที่มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนเกิดขึ้นเล็กน้อยเช่นแก๊สอีเทนแก๊สอีพีนตลอดจนน้ำเข้ามาแล้ว และน้ำมันดินการให้ความร้อนกับชีวมวลโดยไม่เกิดการออกซิไดซ์จะเรียกว่าไพโรไลซิสแต่เมื่อนำผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสไปทำปฏิกิริยากับตัวออกซิไดซ์ (ปกติเป็นอากาศ) จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คาร์บอนมอนอกไซด์แก๊สไฮโดรเจนและอื่นๆการเกิดแกซิฟิเคชันซาร์เป็นการรวมตัวกันของปฏิกิริยาระหว่างแก๊สและของแข็งและปฏิกิริยาระหว่างแก๊สและแก๊สหลายๆปฏิกิริยารวมกัน เพื่อที่จะเปลี่ยนถ่านไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์คาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนโดยผ่านปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (water gas shift reaction) ซึ่งเป็นการออกซิไดซ์เพื่อเปลี่ยนจากแก๊สไปเป็นของแข็งโดยปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่สุดและเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแกซิฟิเคชันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะเป็นแก๊สผสมตามสัดส่วนของแก๊สแต่ละชนิดซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัตถุดิบปริมาณน้ำอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาและระยะเวลาในการออกซิไดซ์



### 2.5.1.3 การเผาไหม้ (Yang และคณะ, 2008)

การเผาไหม้หรือการสันดาปเป็นวิธีการเก่าแก่และง่ายที่สุดในการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงาน การเผาไหม้ส่วนใหญ่จะใช้วัตถุดิบที่เป็นไม้หรือเปลือกไม้ชนิดต่างๆในรูปของฟืนพลังงานที่ได้มีค่าประสิทธิภาพความร้อนประมาณ 35-40% ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานน้อยที่สุดซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับการเผาไหม้โดยการเพิ่มความดันในการเผาไหม้และการจำกัดออกซิเจนในเตาเผา นอกจากการเผาไหม้แล้วยังมีการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการให้พลังงานโดยเริ่มจากการนำชีวมวลชนิดต่างๆที่มีอยู่ในธรรมชาติเช่น แกลบ ฟาง ข้าว กาบมะพร้าว ใยมะพร้าว ขานอ้อย และขี้ข้าวโพดรวมทั้งขี้เลื่อยมาทำให้แห้งก่อนแล้วจึงนำชีวมวลนั้นมาเผาซึ่งเป็นการให้ความร้อนโดยตรงแต่เนื่องจากชีวมวลเหล่านั้นมีความชื้นมากและมีความหนาแน่นน้อยทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพความร้อนต่ำจึงไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรงและทำให้เกิดความไม่สะดวกในด้านต่างๆ เช่น การขนส่ง และการจัดเก็บซึ่งต้องใช้พื้นที่มาก

### 2.5.2 การแปรรูปเชิงชีวภาพ (Choorit และ Wisarnwan, 2008)

การแปรรูปเชิงชีวภาพเป็นการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยอาศัยปฏิกิริยาทางชีวเคมีซึ่งต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ เช่น แบคทีเรีย และ รา โดยนำชีวมวลไปหมักจนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารอินทรีย์ที่นำไปใช้เป็นพลังงานได้ในรูปของเอทานอลและแก๊สมีเทน (CH<sub>4</sub>)

#### 2.5.2.1 การหมัก (fermentation)

การหมักชีวมวลเพื่อผลิตเอทานอลเป็นการแก้ปัญหาเรื่องน้ำมันแพงและช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับชีวมวลเอทานอลที่ได้นี้เป็นพลังงานสะอาดและไม่ก่อให้เกิดแก๊สพิษสามารถไปใช้ในเครื่องยนต์ได้ การหมักเพื่อให้ได้เอทานอลสามารถใช้วัตถุดิบได้หลายชนิดเช่น อ้อย มันสำปะหลัง และพืชที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส การผลิตเอทานอลจากพืชที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสจะต้องมีการย่อย 2 วิธีด้วยกัน คือการย่อยด้วยกรด (acid hydrolysis) ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีกับไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง ในขณะที่อีกวิธีหนึ่งคือการย่อยด้วยเอนไซม์ (enzymatic hydrolysis) จะให้ผลดีกับไม้เนื้อแข็งและพืชสมุนไพร การใช้เอนไซม์มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้กรดและให้ผลผลิตสูงกว่าการหมักในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้การย่อยด้วยกรดมากกว่าการใช้เอนไซม์เพราะการใช้เอนไซม์จะต้องมีการ

บ่มก่อนจึงจะให้ผลผลิตที่สูงแต่การบ่มจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายสูงเช่นกันหลังจากผ่านการย่อยแล้วผลิตภัณฑ์ที่ได้คือคาร์โบไฮเดรตซึ่งจะถูกนำไปหมักต่อด้วยจุลินทรีย์เช่นแบคทีเรียยีสต์และราต่อไปโดยจุลินทรีย์เหล่านี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตไปเป็นเอทานอลภายใต้ภาวะที่ไม่มีออกซิเจน

#### 2.5.2.2 การย่อย (digestion)

การหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้ภาวะที่ปราศจากออกซิเจน(anaerobic digestion) เพื่อให้ได้แก๊สมีเทนสามารถนำชีวมวลรูปแบบต่างๆมาหมักได้เช่นมูลสัตว์และขยะสดเช่นการผลิตแก๊สมีเทนจากการหมักเศษเหลือทิ้งจากปาล์มน้ำมันซึ่งน้ำมันที่มีอยู่ในปาล์มจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันโดยจุลินทรีย์จากนั้นกรดไขมันจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สมีเทนเศษเหลือทิ้งที่มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันสายยาวเช่นปาล์มมิติกโอเลต (palmitic oleate) จะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียและการเกิดแก๊สมีเทน

#### 2.5.3 การแปรรูปเชิงกล

การแปรรูปเชิงกลเป็นการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการหีบน้ำมันจากพืชและทาปฏิกิริยาเคมีเช่นการผลิตไบโอดีเซล (Hossain และคณะ, 2008) เป็นต้น

### 2.6 กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิส คือ กระบวนการที่ให้ความร้อนแก่สารใดสารหนึ่งเพื่อย่อยสลายโมเลกุลของสารนั้นให้มีขนาดเล็กลงภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีออกซิเจนหรืออากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้มีทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และ โดยส่วนที่เป็นของแข็งเรียกว่า ถ่านชาร์ ซึ่งมีส่วนประกอบของวัสดุถ่านเป็นหลักและมีเถ้าอินทรีย์ผสมอยู่ด้วย ส่วนของเหลวที่ควบแน่นได้ที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า ของเหลวไพโรลิกเนียส หรือน้ำมันไพโรไลซิส ลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลดำคล้ายน้ำมันดิบ บางครั้งเรียกว่า น้ำมันดิบชีวภาพ (bio-crude oil) กระบวนการไพโรไลซิสสามารถควบคุมให้เกิดผลิตภัณฑ์สถานะใดสถานะหนึ่งมากที่สุดได้ โดยการควบคุมปัจจัยที่สำคัญต่างๆของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิในการไพโรไลซิสอัตราการให้ความร้อน เป็นต้น

## 2.6.1 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการไพโรไลซิส

### 2.6.1.1 องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลเป็นวัสดุซับซ้อนไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งจะมีโครงสร้างและองค์ประกอบแตกต่างกันไปตามส่วนต่างๆ และชนิดของพืชนั้น สารเหล่านี้แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางความร้อนและก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างกันไป โดยในองค์ประกอบหลัก ซึ่งได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เมื่อได้รับความร้อน องค์ประกอบเหล่านี้ของไม้จะถูกย่อยสลายทางความร้อนในวิถีที่แตกต่างกันออกไป (Demirbas, 2000; Yang et al., 2007) และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่หลากหลายเพื่อให้เข้าใจกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ เราจำเป็นต้องพิจารณาพฤติกรรมของกระบวนการไพโรไลซิสของแต่ละองค์ประกอบหลักของไม้ก่อน

#### - การไพโรไลซิสเซลลูโลส

ที่ผ่านมาการศึกษาไพโรไลซิสของเซลลูโลสอย่างกว้างขวาง ปฏิริยาไพโรไลซิสของเซลลูโลสเป็นแบบดูดความร้อน และพบว่าเมื่อเซลลูโลสได้รับความร้อนถึงที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะเกิดการลดลงของระดับความเป็นพอลิเมอร์ กระบวนการไพโรไลซิสเกิดขึ้นช้าๆ และได้ น้ำคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ และเศษกากถ่านออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส เซลลูโลสจะเริ่มย่อยสลายทางความร้อนเร็วขึ้น ได้เป็นน้ำมันดินที่ควบแน่นได้ และต่างๆออกมา เหลือแต่กากถ่านไว้ เซลลูโลสเกิดการแตกตัวทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 240 ถึง 350 องศาเซลเซียสได้แอนไฮโดรเซลลูโลส (anhydrocellulose) และเลโวกลูโคแซน (levoglucosan) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส กระบวนการไพโรไลซิสของเซลลูโลสจะเกิดขึ้นรวดเร็วมากขึ้นไปอีก และที่มากกว่า 500 องศาเซลเซียส สารระเหยที่ปล่อยออกมาจะเริ่มถูกย่อยสลายทางความร้อนได้เป็นสถานะแก๊ส

#### - การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลส

เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลส ปฏิริยาไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสเป็นแบบคายความร้อน การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสเริ่มเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 260 องศาเซลเซียส และสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่ามาก และได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีถ่านชาร์และ

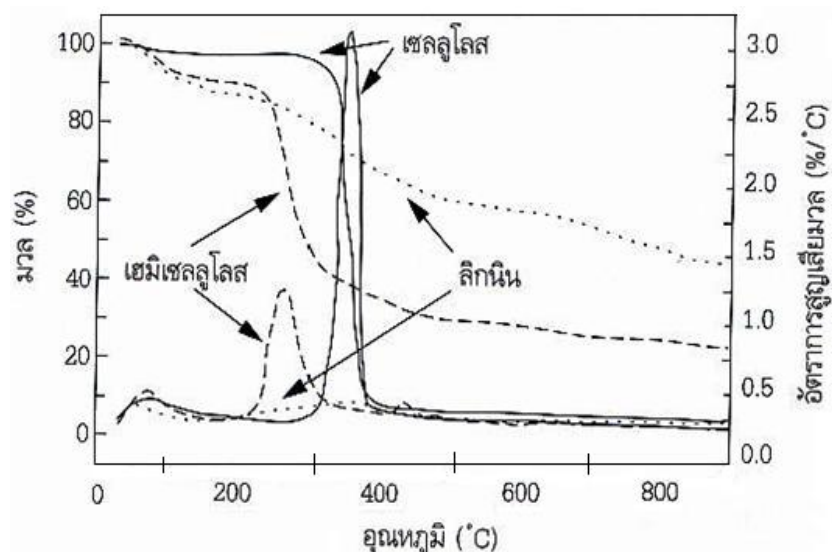
น้ำมันดินน้อยกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะไม่แตกตัวออกเป็นกลุ่มเลโวกลูโคแซนมาก กรดแอซิดิกที่ออกมาช่วงไพโรไลซิสของชีวมวลจะมีส่วนในการช่วยลดกลุ่มอะเซทิล (deacetylation) ของเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้อแข็งจะมีไซแลนมากและกลูโคแมนแนน (glucomannan) น้อย ในขณะที่เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้ออ่อนจะมีไซแลนน้อยและกาแลคโตกลูโคแมนแนนมาก

#### - การไพโรไลซิสลิกนิน

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลิกนินขึ้นอยู่กับวิธีการแยกเอาลิกนินออกมา ซึ่งอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเริ่มแตกตัวไปบางส่วนได้ การแตกตัวทางความร้อนของลิกนินอิสระ จึงอาจจะแตกต่างจากลิกนินที่อยู่ในเนื้อชีวมวล แต่อย่างไรก็ตาม ลักษณะพฤติกรรมควรจะบ่งชี้ไปในแนวทางที่คล้ายกันได้ ลิกนินถือว่าเป็นองค์ประกอบที่เสถียรที่สุดของชีวมวล แตกตัวได้ยากกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และมีช่วงอุณหภูมิที่แตกตัวกว้าง (160-900 องศาเซลเซียส) ปฏิกริยาไพโรไลซิสของลิกนินเป็นแบบคายความร้อน ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส อัตราการย่อยสลายตัวทางความร้อนของลิกนินจะช้ามาก การแตกตัวของลิกนินจะเกิดขึ้นชัดเจนที่อุณหภูมิระหว่าง 280 และ 500 องศาเซลเซียส โดยอัตราสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 350 ถึง 450 องศาเซลเซียส การแตกตัวของลิกนินจะได้กลุ่มฟีนอลออกมา และจะเกิดปริมาณถ่านชาร์มากกว่าเซลลูโลส ที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะมีถ่านชาร์จากลิกนินเกิดขึ้นเกิด 50% โดยน้ำหนักตั้งต้น

#### - การไพโรไลซิสชีวมวล

พฤติกรรมของชีวมวลระหว่างที่เกิดการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับพฤติกรรมขององค์ประกอบหลักของชีวมวล จากรูปที่ 2.12 แสดงถึงการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง thermogravimetry analyzer (TGA) ขององค์ประกอบของชีวมวล ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสของชีวมวลมาจากการรวมกันแบบเชิงเส้นของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสแต่ละองค์ประกอบแยกกัน โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นแหล่งหลักของการเกิดสารระเหยและน้ำมันดิน ในขณะที่ลิกนินเป็นแหล่งหลักของการเกิดถ่านชาร์ ชีวมวลจะสลายตัวออกเป็นผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาต่างๆพร้อมกัน ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจาก การแตกตัวในปฏิกิริยาปฏิกิริยาและจากปฏิกิริยาขั้นสอง



**รูปที่ 2.12** การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิดในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ  
(นคร ทิพย์วงศ์, 2552)

### 2.6.1.2 อุณหภูมิในการไพโรไลซิส

ช่วงอุณหภูมิของการไพโรไลซิสจะมีผลกระทบต่อทั้งปริมาณ และองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้ โดยการไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 ชั้น คือ ชั้นแรก ที่อุณหภูมิระหว่าง 200 – 300 องศาเซลเซียส จะมีการปลดปล่อยสารระเหยเล็กน้อย และแก๊สจะประกอบด้วยออกไซด์ของคาร์บอน และน้ำเป็นส่วนใหญ่ ชั้นที่สอง ที่อุณหภูมิระหว่าง 300 – 500 องศาเซลเซียส จะมีการสลายตัวปล่อยสารระเหยออกมาประมาณสามในสี่ของสารระเหยทั้งหมด ชั้นที่สาม ที่อุณหภูมิระหว่าง 500 – 800 องศาเซลเซียส จะมีการไล่แก๊สออกอีกเป็นครั้งที่สอง พร้อมกับมีการเปลี่ยนแปลงของชาร์รวมไปถึงการปลดปล่อยแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกไฮโดรเจน

### 2.6.1.3 อัตราการให้ความร้อน

ผลกระทบของอัตราการให้ความร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิส แต่เดิมสภาวะในการให้ความร้อนถูกแบ่งได้ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียสต่อวินาที ซึ่งเป็นช่วงที่ทำให้เกิดการปลดปล่อยสารระเหยออกอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอัตราการให้ความร้อนต่ำจะถูกนิยามให้มีผลต่างของอุณหภูมิเท่ากับหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนด

และโดยทั่วไปอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะมีผลต่างของอุณหภูมิมากกว่า  $10^3 - 10^5$  องศาเซลเซียสต่อวินาทีการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นชาร์ ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของโอเลฟินสูงเป็นส่วนใหญ่ และได้ชาร์จำนวนน้อยมาก

## 2.6.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำและสารระเหย รวมทั้งแก๊สต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย องค์ประกอบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพและเคมี ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นผลรวมของการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มี 3 ประเภท ดังนี้

### 2.6.2.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก เรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลีน แอนทราซีน และสารประกอบไฮยาโนเจน แต่ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็ก เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ โรงงานผลิตปูนหรือซีเมนต์ เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหามลภาวะต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

### 2.6.2.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันหยาบ องค์ประกอบของน้ำมันหยาบเป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวงวงแหวนแนฟทาลีนเชื่อมด้วยหมู่เอทีลีน โมเลกุลของน้ำมันหยาบมีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5-C_6$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า 200 องศาเซลเซียส ได้แก่ เบนซิน เบนโซล ดิบ โทลูอีน เอทิลเบนซิน ไซลีน

- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ 200 – 250 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟีนอล ไพรดีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ 250 – 300 องศาเซลเซียส ได้แก่ เมทิล แนฟทาลีน
- น้ำมันแอนทราซีน (anthracence) ช่วงอุณหภูมิ 300 – 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ ฟลูออรีน พีแนฟีน
- พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส ได้แก่ น้ำมันประเภทพวกไข (wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

### 2.6.2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้เพื่อให้ความร้อน หรือ การผลิตไฟฟ้า แก๊สที่เผาไหม้ได้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนียในปริมาณเล็กน้อย

กระบวนการทางเคมีกายภาพระหว่างไพโรไลซิสเป็นดังนี้ (Demirbas, 1997)

1. การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังชีวมวล เพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างในชีวมวลให้สูงขึ้น
2. การเริ่มเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น มีการปล่อยไอสารระเหย และเกิดเป็นถ่าน
3. การไหลของสารระเหยร้อนผ่านเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน
4. การควบแน่นของไอสารระเหยโมเลกุลใหญ่บางส่วนในเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ และตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองที่สามารถเปลี่ยนสารระเหยขั้นต้นเป็นน้ำมันดิบ
5. การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองแบบเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเองไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น มีการแข่งขันแย่งสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา

6. การแตกตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้น มีปฏิริยาร่วมเกิดขึ้น เช่น ปฏิริยารีฟอร์มมิงแก๊ส ปฏิริยาเปลี่ยนโมเลกุลของแข็งเป็นแก๊สด้วยน้ำ ปฏิริยาการรวมตัวของสารอนุมูล ปฏิริยาการไล่น้ำ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และความดัน

## 2.7 กระบวนการลิกวิแฟคชัน (Liquefaction) (นคร ทิพยาวงศ์, 2552)

กระบวนการลิกวิแฟคชัน เป็นกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของชีวมวลด้วยความร้อน ร่วมกับการใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลว เพื่อวัตถุประสงค์ในการผลิตน้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยการทำลิกวิแฟคชันของสารชีวมวลจะเปลี่ยนสารชีวมวลให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนเหลวที่เสถียรโดยใช้ อุณหภูมิต่ำและอัดความดันของไฮโดรเจนสูงในระบบ ซึ่งอาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิริยาร่วมกับ กระบวนการดังกล่าวด้วย กระบวนการในการทำลิกวิแฟคชันสามารถทำได้โดยทั้งทางตรงและ ทางอ้อมสำหรับการทำลิกวิแฟคชันโดยตรงนั้นจะเกี่ยวข้องกับการทำการไพโรไลซิสอย่างฉับพลัน เพื่อที่จะสามารถผลิตทาร์ที่เป็นของเหลวและน้ำมัน หรือโอของสารอินทรีย์ที่สามารถเกิดการควบแน่น ได้ ส่วนการทำลิกวิแฟคชันทางอ้อมนั้น จะเกี่ยวข้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิริยาเพื่อทำการเปลี่ยน ผลิตภัณฑ์ในรูปของเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถเกิดการควบแน่นได้ ซึ่งมาจากการทำไพโรไลซิส (pyrolysis) หรือการทำแก๊ซิฟิเคชัน (gasification) ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของเหลว ตัวอย่างเช่น เมทานอล ไดเมทิลอีเทอร์ และน้ำมันสังเคราะห์ฟิสเซอร์โทรปซ์ เป็นต้น

## 2.8 น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil)

ลักษณะทั่วไปของน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) เป็นของเหลวอินทรีย์สีน้ำตาลดำ มีสารประกอบที่มี ออกซิเจนอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก อาจมีชื่อเรียกอื่นๆ เช่น น้ำมันไพโรไลซิส ของเหลวไพโรลิคเนี่ยส กรดไพโรลิคเนี่ยส น้ำส้มควันไม้ ของเหลวควันไม้ เป็นต้น น้ำมันไพโรไลซิสเกิดขึ้นจากการแตกตัวทาง ความร้อนและการลดระดับเชิงพอลิเมอร์อย่างรวดเร็วของเซลลูโลสเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ตามด้วยการทำให้เย็นอย่างรวดเร็วเพื่อแช่แข็งปฏิริยาชั้นกลางให้ได้สารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่างนี้ โดยไม่ให้เกิดปฏิริยาแตกตัวต่อหากมีเวลามากขึ้น น้ำมันดิบชีวภาพจึงมีสารเคมีที่มีความไวต่อการ เกิดปฏิริยาสูงเป็นองค์ประกอบมากมาย ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพขึ้นอยู่กับภาวะ ของกระบวนการไพโรไลซิส โดยทั่วไปแล้วน้ำมันดิบชีวภาพเป็นสารผสมละลายน้ำได้ มีสารอินทรีย์ที่มี



ประจุอยู่ประมาณ 75-80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีน้ำอยู่ประมาณ 20-25 เปอร์เซ็นต์นอกจากนี้ น้ำมันซีวภาพยังมีออกซิเจนสูงถึง 35-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในสารประกอบมากกว่า 300 ชนิดที่พบในน้ำมันซีวภาพ ในเชิงเคมีน้ำมันไพโรไลซิสเป็นส่วนผสมที่ซับซ้อนระหว่างน้ำ, ฟูโอาคอล (guaiacol), คาเทคอล (catecols), ไซริงกอล (syringols), วานิลลิน (vanillins), ฟุรานคาร์บอกซัลดีไฮด์ (furanocarboxaldehydes), ไอโซยูจีนอล (isoeugenol), ไพโรนส์ (pyrones), กรดแอสติก, กรดฟอร์มิก และกรดคาร์บอกซิลิกอื่นๆ สารประกอบกลุ่มหลักๆ เช่นไฮดรอกซีแอลดีไฮด์, ไฮดรอกซีคีโตน, น้ำตาล และสารประกอบฟีนอล

สมบัติของน้ำมันซีวภาพนั้นค่อนข้างแตกต่างจากน้ำมันปิโตรเลียม เนื่องจากองค์ประกอบทางกายภาพที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.5 และสามารถอธิบาย ดังนี้

### 2.8.1 ปริมาณออกซิเจน

น้ำมันซีวภาพนั้นมีปริมาณออกซิเจนร้อยละ 35-40 โดยน้ำหนัก แทรกอยู่ในรูปของสารประกอบมากมายในน้ำมันซีวภาพขึ้นกับชนิดของชีวมวลและความรุนแรงของกระบวนการผลิต (อุณหภูมิ, เวลาของปฏิกิริยาและอัตราการให้ความร้อน) ออกซิเจนที่แทรกตัวอยู่ในสารประกอบต่างๆ ของน้ำมันซีวภาพนั้น เป็นเหตุผลเบื้องต้นที่ทำให้สมบัติของน้ำมันซีวภาพแตกต่างจากน้ำมันปิโตรเลียม ปริมาณออกซิเจนที่สูงนั้นส่งผลให้ค่าความร้อนของน้ำมันลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 ของน้ำมันเชื้อเพลิงทางการค้า และไม่สามารถนำมาผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไปได้

ตารางที่ 2.5 สมบัติของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้และน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก (Bridgwater et al., 2004)

สมบัติทางกายภาพ	น้ำมันชีวภาพ	น้ำมันเชื้อเพลิงหนัก
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	15-30	0.1
ค่าความเป็นกรด	2.5	-
ค่าความถ่วงจำเพาะ	1.2	0.94
องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
คาร์บอน	54-58	85
ไฮโดรเจน	5.5-7.0	11
ออกซิเจน	35-40	1.0
ไนโตรเจน	0-0.2	0.3
เถ้า	0-0.2	0.1
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	16-19	40
ค่าความหนืดที่ 50 องศาเซลเซียส (เซนติพอยซ์)	40-100	180
ของแข็ง(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.2-1	1
กากที่เหลือจากการกลั่น(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	มากกว่า 50	1

## 2.8.2 ปริมาณน้ำ

น้ำในน้ำมันชีวภาพมาจากชีวมวลที่ป้อนเข้าไปและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออก ระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นปริมาณน้ำขึ้นกับชนิดชีวมวลและภาวะที่ใช้ ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นนั้น มีทั้งข้อดีและข้อเสียต่อสมบัติน้ำมันชีวภาพ น้ำทำให้ค่าความร้อนและคุณสมบัติในการลุกไหม้ของน้ำมันชีวภาพต่ำลง แต่มีส่วนช่วยในการเพิ่มความล่าช้าในการจุดติดไฟและบางกรณีช่วยลดอัตราการเผาไหม้เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ในทางตรงกันข้าม น้ำช่วยลด ความหนืดของน้ำมันลงซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลและทำให้ลดปริมาณการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์อีกด้วย

### 2.8.3 ความหนืดและอายุการใช้งาน

ความหนืดของน้ำมันชีวภาพอยู่ในช่วงกว้างขึ้นกับชนิดชีวมวลและภาวะการผลิต โดยเฉพาะประสิทธิภาพของสารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำภายในน้ำมันชีวภาพนั้นช่วยลดอุณหภูมิที่สูงลงได้เร็วกว่าน้ำมันปิโตรเลียม เมื่อทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลางจะสามารถสูบออกได้ง่าย แต่ข้อเสียของน้ำมันชีวภาพนั้น เมื่อเก็บไว้หรือใช้ที่อุณหภูมิสูง ค่าความหนืดจะสูงขึ้นตามเวลาเป็นผลมาจากสารประกอบของน้ำมันชีวภาพเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกันเกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศด้วย

### 2.8.4 การกัดกร่อน

น้ำมันชีวภาพประกอบด้วยกรดอินทรีย์มากมาย โดยเฉพาะกรดอะซิติกและฟอร์มิก ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ค่าความเป็นกรด 2-3 จากเหตุผลนี้ น้ำมันสามารถกัดกร่อนวัสดุภายในเครื่องยนต์ เช่น ท่อคาร์บอน และอะลูมิเนียม เป็นต้น จากข้อมูลดังกล่าวจะพบว่า น้ำมันชีวภาพมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นกับการนำไปใช้ ถ้าพิจารณาข้อเสียของน้ำมันชีวภาพนั้น ส่วนสำคัญคือปริมาณออกซิเจนที่สูงส่งผลต่อคุณภาพน้ำมันชีวภาพ ค่าความหนืดที่สูง ค่าความร้อนและความเสถียรทางเคมีต่ำ มีฤทธิ์กัดกร่อน และไม่สามารถนำมาผสมกับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนได้ ดังนั้นการกำจัดออกซิเจนออกจากน้ำมันชีวภาพนั้นจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน

## 2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่เติมลงไปในปฏิกิริยาแล้วทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้นหรือทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาด้วยหรือไม่ก็ได้ แต่เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะต้องมีปริมาณและสมบัติเหมือนเดิม การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาได้เองเนื่องจากว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา

ให้ต่ำลง จึงทำให้มีโมเลกุลที่มีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับพลังงานก่อกัมมันต์มีจำนวนมากขึ้น ปฏิริยาเคมีจึงเกิดเร็วขึ้น แต่จะไม่ทำให้พลังงานของปฏิริยาเปลี่ยนแปลงไป

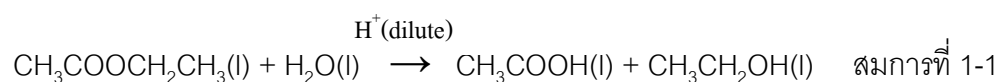
### 2.9.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิริยา

โดยการใช้ตัวเร่งปฏิริยานั้นจะช่วยให้อัตราการเกิดปฏิริยาเร็วขึ้นโดยไปช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิริยา (activation energy) โดยที่สมดุขของปฏิริยาจะไม่ถูกรบกวนและตัวเร่งปฏิริยาต้องเป็นสารเสมอ

### 2.9.2 ประเภทของตัวเร่งปฏิริยาแบ่งตามสถานะที่เข้าทำปฏิริยา

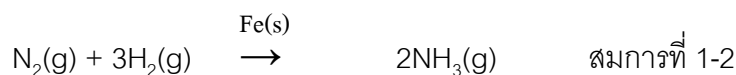
#### 2.9.2.1 ตัวเร่งปฏิริยาเนื้อเดียว (Homogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิริยาที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกัน หรือสถานะเดียวกันกับสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิริยาเช่น ปฏิริยา hydrolysis ของ ethylacetate โดยใช้กรดแก่เป็นตัวเร่งปฏิริยาดังสมการที่ 1-3.1



#### 2.9.2.2 ตัวเร่งปฏิริยาเนื้อผสม (Heterogeneous catalyst)

ตัวเร่งปฏิริยาที่มีวัฏภาคหรือสถานะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิริยา ดังเช่นสมการที่ 1-1



### 2.9.3 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 2.9.3.1 โลหะ (Metal)

เป็นส่วนที่มีหน้าที่การเร่งปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น โดยโลหะจะไปกระจายตัวอยู่บนวัสดุรองรับทำให้มีพื้นที่ผิวมากยิ่งขึ้น โดยโลหะที่นิยมใช้คือ โลหะทรานซิชันหมู่ VII B และ หมู่ VIII B เช่น Fe Co Ni Ru Pt Rd และ Rh เป็นต้น ซึ่งโลหะที่จะเลือกมาใช้ต้องเหมาะสมกับปฏิกิริยาที่ทำการศึกษา คือมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยานั้นๆ (high activity) และมีความจำเพาะเจาะจงในการเลือกผลิตภัณฑ์ (high selectivity) นอกจากนี้ยังต้องมีคุณสมบัติที่มีความเสถียรและมีอายุการใช้งานได้ยาวนาน (high stability และ long life) แต่อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเกิดการสูญเสียความว่องไว เมื่อใช้งานในระยะหนึ่ง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุดังนี้

- การเป็นพิษ (poisoning) เกิดขึ้นเนื่องจากมีสิ่งเจือปน (impurity) อยู่ในสารที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา แล้วส่งผลให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง
- การอุดตัน (fouling) เป็นปรากฏการณ์ทางด้านกายภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝุ่นผง หรือพวกคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยามาเกาะหรือไปอุดตันที่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำให้ความว่องไว หรือการเลือกจำเพาะเจาะจงของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง
- การรวมตัวเนื่องจากความร้อน (sintering) เกิดเนื่องจากการที่โลหะเกิดการหลอมเหลวเนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่สูงมากในกระบวนการผลิต ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้โลหะนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ตำแหน่งที่ว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ active site ลดลง หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแบบหนึ่ง ไปเป็นโครงสร้างอีกแบบหนึ่งซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวลดต่ำลง
- การสูญเสียสปีชีส์ที่ว่องไว (loss of active species) ซึ่งอาจเป็นการเกิดการสูญเสีย active species โดยเกิดการระเหยของสารประกอบออกไปจากตัวเร่งปฏิกิริยา

#### 2.9.3.2 วัสดุรองรับ (Support)

เป็นสารเฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำหน้าที่หลักคือ

- ทำให้เกิดการกระจายตัวของโลหะ (metal dispersion) ได้ดีขึ้น

- มีความพรุน (porosity) ที่เหมาะสมสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา
- เพิ่มความแข็งแรงกับตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวที่โครงสร้างไม่แข็งแรง
- เพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (active site)
- เพิ่มความสามารถในการต้านทานการรวมตัวเนื่องจากความร้อน (agglomeration)
- ลดการเกิดเป็นพิษ (poisoning) ของตัวเร่งปฏิกิริยา
- มีความแข็งแรงเชิงกลสูง (crush strength)
- มีความหนาแน่นรวม (bulk density) ที่เหมาะสม
- ช่วยลดราคาของตัวเร่งปฏิกิริยาลง

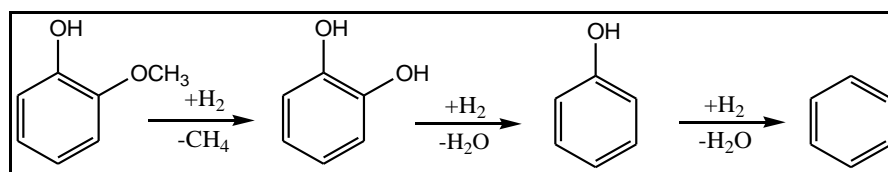
### 2.9.3.3 โพรโมเตอร์ (Promoters)

โพรโมเตอร์เป็นสารที่เติมลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อช่วยให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไว (activity) มากขึ้น เลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (selectivity) และการสร้างความเสถียรให้กับตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น (stability) ในบางกรณีโพรโมเตอร์อาจมีการเติมเข้าไปในสารตั้งต้นในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งจะช่วยให้ทำหน้าที่ในการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยา

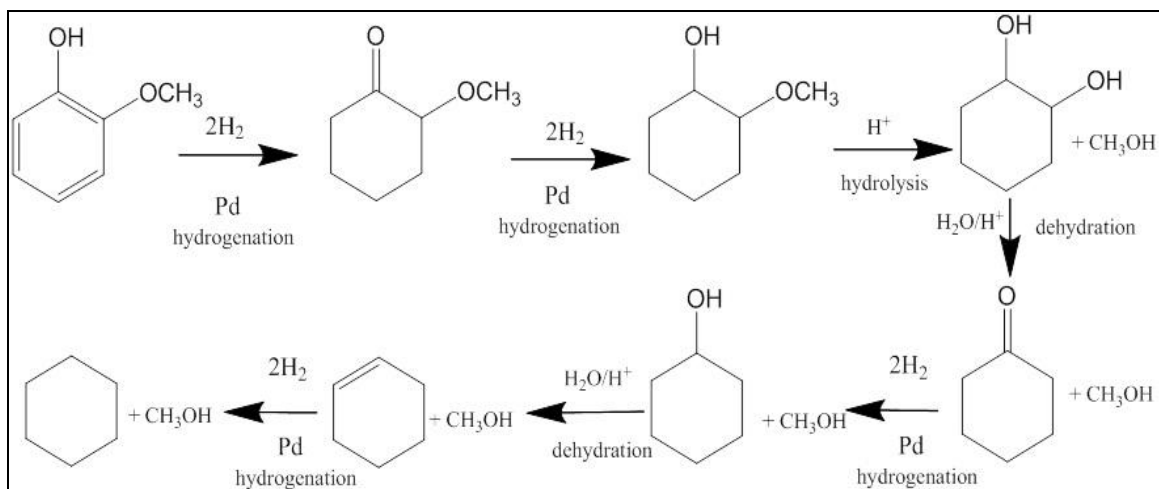
## 2.10 กระบวนการจัดสารประกอบออกซิเจนในการผลิตน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการ pyrolysis พบว่ามีปริมาณของสารประกอบออกซิเจนเนต อยู่มากซึ่งโดยมากจะอยู่ในรูปของกรดคาร์บอกซิลิกแอลกอฮอล์แอลดีไฮด์คีโตนและอนุพันธ์ของฟีนอล ที่ความยาวสายโซ่ต่างๆกันทำให้น้ำมันที่ได้มีความเป็นกรดสูงและข้นเหนียวซึ่งเป็นผลเสียโดยตรงต่อ เครื่องยนต์จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันที่ได้ให้ใกล้เคียงกับน้ำมันจากปิโตรเลียม ก่อนการใช้งานการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพทำได้หลายวิธีเช่นการเติมตัวทำละลายเพื่อลด การเกิดปฏิกิริยา Polymerisation ของสารประกอบที่ไม่เสถียรในน้ำมันชีวภาพโดยการเกิดปฏิกิริยา Esterification Acetalization และปฏิกิริยา Phenol/Formaldehyde อาจมีการเติมสาร Antioxidants เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยา Olefin polymerization และสารเติมสาร Emulsifiers เพื่อลดปัญหาการแยก น้ำมันและเพิ่มความเสถียรให้น้ำมันชีวภาพวิธี Emulsification เป็นวิธีที่ง่ายในการปรับปรุงคุณภาพ ของน้ำมันชีวภาพก่อนการใช้เป็นเชื้อเพลิงภาคขนส่งการผสมน้ำมันชีวภาพกับน้ำมันไฮโดรคาร์บอน

ดีเซลให้เป็นเนื้อเดียวกันสามารถทำได้โดยการเติมสาร Surfactant พบว่าน้ำมันชีวภาพผสมสาร emulsifier มีความเสถียรมากขึ้นค่าความหนืดของน้ำมันชีวภาพลดลงกระบวนการ Hydrotreatment เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันทั้งในเรื่องของการทำให้บริสุทธิ์และการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีกระบวนการนี้จะดำเนินปฏิกิริยาภายใต้องค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่มาใช้ผลิตน้ำมันชีวภาพโดยน้ำมันชีวภาพที่ใช้ทำให้น้ำมันชีวภาพประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่หลากหลายในรูปของ derivative of phenol , derivative of benzene , hydroxy ketone , carboxylic acid , ester , aliphatic และ aromatic alcohol ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้ทำให้น้ำมันชีวภาพมีปริมาณออกซิเจนที่สูงถึง 40-50%โดยน้ำหนักสารจำพวกกรดอินทรีย์ที่ประกอบอยู่ในน้ำมันชีวภาพเป็นส่วนสำคัญของสาเหตุที่ทำให้น้ำมันชีวภาพมีสภาพเป็นกรดด้วยเหตุนี้จึงต้องนำน้ำมันชีวภาพมาปรับเพิ่มคุณสมบัติผ่านกระบวนการ esterification โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีคุณสมบัติเป็นกรดในการเร่งปฏิกิริยาส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากกรดอินทรีย์ไปอยู่ในรูปของสารประกอบจำพวกเอสเทอร์มากกว่ากระบวนการดังกล่าวจึงเป็นกระบวนการที่ทำให้ค่า pH โดยรวมของน้ำมันชีวภาพมีค่าเพิ่มขึ้นและยังสามารถลดสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบลงได้กระบวนการ esterification จึงถูกประยุกต์ใช้กับกระบวนการกลั่น (distillation) เพื่อให้ทำให้น้ำที่ละลายอยู่ในน้ำมันชีวภาพถูกกำจัดไปด้วยโดยอาจถูกเรียกชื่อกระบวนการดังกล่าวที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพด้วยคำว่า reactive distillation ส่วนกระบวนการที่สามารถลดสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันชีวภาพให้มีปริมาณลดลงที่นิยมได้แก่กระบวนการ hydrodeoxygenation เป็นการใส่ guaiacol เพื่อเป็นตัวแทนสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ guaiacol จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่มีปริมาณออกซิเจนในโมเลกุลลดลงส่งผลทำให้คุณสมบัติที่ดีขึ้นในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนเช่นมีความเป็นกรดลดลงให้ค่าพลังงานความร้อนสูงขึ้นเมื่อเผาไหม้สามารถนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินหรือดีเซลได้ง่ายมากขึ้นเนื่องจากความมีขี้ของโมเลกุลลดลงเป็นต้น



รูปที่ 2.13 กระบวนการของปฏิกิริยา Deoxygenation ของ Guaiacol (M.Badawi, 2011)



รูปที่ 2.14 กระบวนการของปฏิกิริยา hydrodeoxygenation ของ Guaiacol (M.Badawi, 2011)

กระบวนการตัดออกซิเจนเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic deoxygenation) เป็นกระบวนการในการกำจัดออกซิเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แบ่งออกเป็น 5 ชนิด คือ

1. ไฮโดรดีออกซิเจนเนชัน (hydrodeoxygenation) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนในรูปของน้ำ ( $H_2O$ )
2. ดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนออกในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )
3. ดีคาร์บอนิลเลชัน (decarbonylation) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนออกในรูปของคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ )
4. ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนโดยชีวมวลจะถูกทำให้เกิดการแตกออกของโมเลกุลให้ได้ขนาดเล็กแล้วเกิดการจัดเรียงตัวของโมเลกุลใหม่ผ่านการเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (dehydration) และดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation)
5. ไฮโดรจีโนไลซิส (hydrogenolysis) และไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) เป็นกระบวนการกำจัดออกซิเจนโดยการเติมไฮโดรเจนในระบบ



## 2.11 การนำน้ำมันชีวภาพไปประยุกต์ใช้ (Mohan, 2006)

- การผลิตพลังงานความร้อน ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เพราะมีสารประกอบที่มีหมู่ออกซิเจนและส่วนของน้ำ ไบโอดีเซลคล้ายกับน้ำมันเบาในด้านสมบัติการเผาไหม้ถึงแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันในด้านความหนืด ความเสถียร ค่าความเป็นกรด-เบส และระบบการปลดปล่อยแก๊สพิษ เป็นต้น การควบแน่นส่วนของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลสามารถช่วยกำจัดน้ำได้และทำให้ค่าความร้อนของไบโอดีเซลเพิ่มขึ้น

- การผลิตแก๊สสังเคราะห์ชีวมวลและน้ำมันชีวภาพสามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นไฮโดรคาร์บอนสะอาดได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ชีวมวลแข็งและการใช้ ไบโอดีเซลเป็นสารป้อนสำหรับการผลิตแก๊สสังเคราะห์ พบว่าหากต้องการผลิตแก๊สสังเคราะห์ในปริมาณมากจากชีวมวลบางชนิดในรูปของของแข็งจะพบปัญหาของปริมาณเถ้าสูง แต่เมื่อนำน้ำมันชีวภาพเป็นสารป้อนซึ่งมีปริมาณเถ้าต่ำจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้และการขนส่งไบโอดีเซลก็สามารถใช้อุปกรณ์และพาหนะที่ใช้ขนส่งน้ำมันปิโตรเลียมได้ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่ากรณีการขนส่งชีวมวลในรูปของแข็ง การแก๊สซิฟิเคชันของน้ำมันชีวภาพโดยใช้ออกซิเจนร่วมทำปฏิกิริยาสามารถเพิ่มปริมาณแก๊สสังเคราะห์สำหรับกระบวนการฟิชเชอร์โทรปได้

- นอกจากนี้ น้ำมันชีวภาพยังศักยภาพในการผลิตแก๊สสังเคราะห์หรือแก๊สเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีเมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลแข็ง โดยน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลที่อุณหภูมิต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ความดันบรรยากาศ อัตราการป้อน 4.5-5.5 กรัมต่อชั่วโมงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการไหล 30 มล./นาที่ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส สามารถแปรรูปเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ถึงร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สดังกล่าวประกอบด้วยแก๊สสังเคราะห์ร้อยละ 16-36 โดยโมล มีเทนร้อยละ 19-27 โดยโมล และอีเทนร้อยละ 21-31 โดยโมล และมีค่าความร้อนรวมเท่ากับ 1300-1700 บีทียูต่อลูกบาศก์ฟุตซึ่งมีค่าสูงกว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากการใช้ชีวมวลแข็งโดยตรง

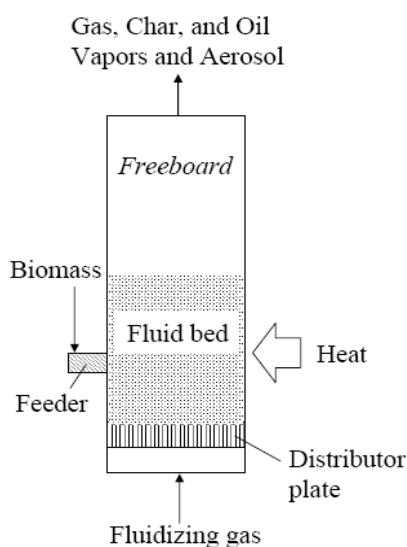
- การผลิตกระแสไฟฟ้าน้ำมันชีวภาพมีข้อจำกัดในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์โดยตรงเพราะน้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดสูงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบปั๊มและระบบหัวฉีด

ภายในเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามจากรายงานที่ผ่านมาพบว่าสามารถใช้น้ำมันชีวภาพกับเครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สเชื้อเพลิงได้ ดังนั้นการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการนำไปใช้ในเครื่องยนต์ดีเซลซึ่งต้องมีการปรับแต่งเครื่องยนต์ หรือต้องปรับปรุงคุณภาพของไบโอดีเซลให้มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

## 2.12 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ (Olofsson, 2005)

เครื่องปฏิกรณ์ที่นำมาใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพมี 5 ประเภท ได้แก่

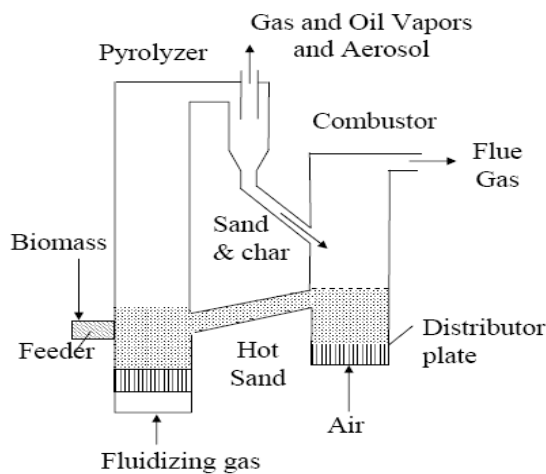
- เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ป้อนอากาศจากทางด้านล่างของเบด ความเร็วของอากาศจะช่วยดันให้เบดขยายตัวขึ้นจนกระทั่งอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ในกระแสน้ำอย่างสม่ำเสมอ แต่มีอีกส่วนหนึ่งรวมตัวกันแล้วก่อตัวกันเป็นฟองแก๊สขึ้นแล้วแทรกตัวขึ้นมาถึงบนผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด ซึ่งขณะที่ฟองแก๊สลอยขึ้นมาจะทำให้เม็ดของแข็งลอยติดตามฟองแก๊สขึ้นมาด้วยแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองอากาศ

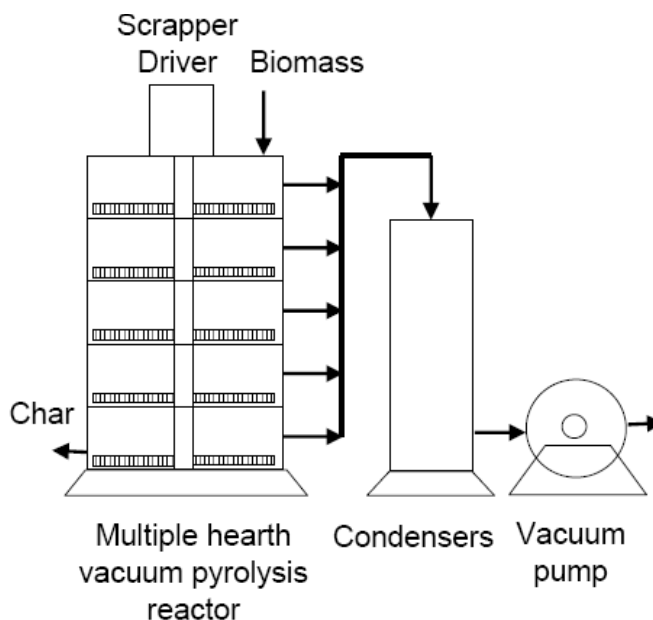
- เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคอยู่ในภาวะแขวนลอยและหมุนวนอยู่ใน

กระแสที่สูงขึ้นจนเบตบางส่วนหลุดออกไป ดังนั้นจึงต้องติดตั้งไซโคลนเพื่อนำอนุภาคกลับมาในขณะที่แก๊สไหลผ่านไซโคลนออกไปทางด้านบนและกลับมาบ่อนทางล่งเบตอีกครั้งแสดงดังรูปที่ 2.16



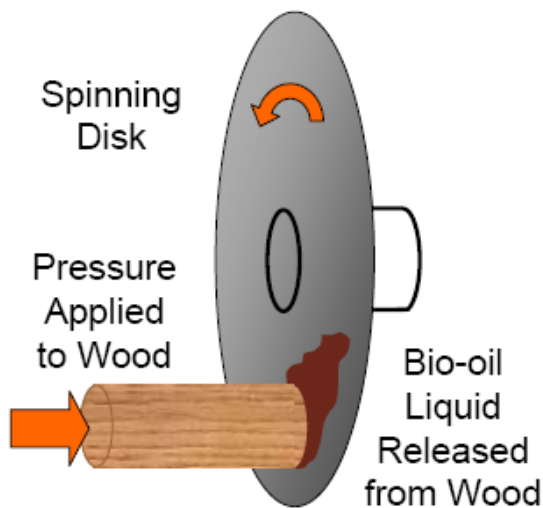
รูปที่ 2.16 เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเวียน

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีการให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการสลายตัวของชีวมวลภายใต้การลดความดันและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์นาน ซึ่งไม่เหมือนกับการไพโรไลซิสแบบเร็ว อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาสลายตัวเป็นไอกับกรณีของการไพโรไลซิสแบบเร็วแล้วจะเกิดได้เร็วเหมือนกันโดยความดันที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 15 กิโลปาสคาลแสดงดังรูปที่ 2.17



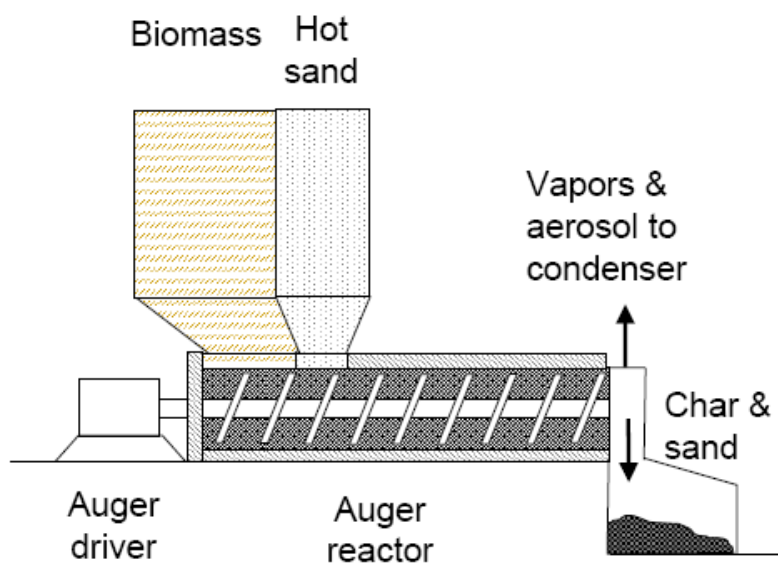
รูปที่ 2.17 เครื่องปฏิกรณ์แบบสุญญากาศ

- เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่อนุภาคชีวมวลกระทบหรือเคลื่อนที่ไปชนกับของแข็งซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อน แอบลาทีฟไพโรไลซิสแตกต่างกับการไพโรไลซิสแบบเร็วด้วยวิธีอื่น ๆ โดยมีการจำกัดอัตราการถ่ายโอนความร้อนของการเกิดปฏิกิริยาซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่มีขนาดเล็ก วิธีการเกิดปฏิกิริยาของแอบลาทีฟไพโรไลซิสคล้ายกับการหลอมเหลวเหนยในกระทะ โดยการเคลื่อนที่ของเหนยบนพื้นผิวของกระทะที่ร้อนสามารถเพิ่มอัตราการหลอมเหลวของเหนยได้ การถ่ายโอนความร้อนอย่างรวดเร็วนี้เกี่ยวข้องกับการสัมผัสกับพื้นผิวที่ให้ความร้อน ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการถ่ายโอนความร้อน โดยจุดเด่นของกระบวนการแอบลาทีฟไพโรไลซิส คือ การให้ความดันสูงในการป้อนอนุภาคชีวมวลบนผนังเครื่องปฏิกรณ์ที่ร้อนซึ่งจะทำให้เกิดแรงหมุนเหวี่ยงหรือแรงเหวี่ยงกล อนุภาคชีวมวลจะเคลื่อนที่ชนกับผนังเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสจึงเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 เครื่องปฏิกรณ์แบบแฉลบลาทีฟ

- เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน (Auger reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่ใช้แก๊สตัวพาและใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียสทำงานแบบต่อเนื่องผลิตภัณฑ์ไอที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบแน่นกลายเป็นไบโอดีเซลแสดงดังรูปที่ 2.19

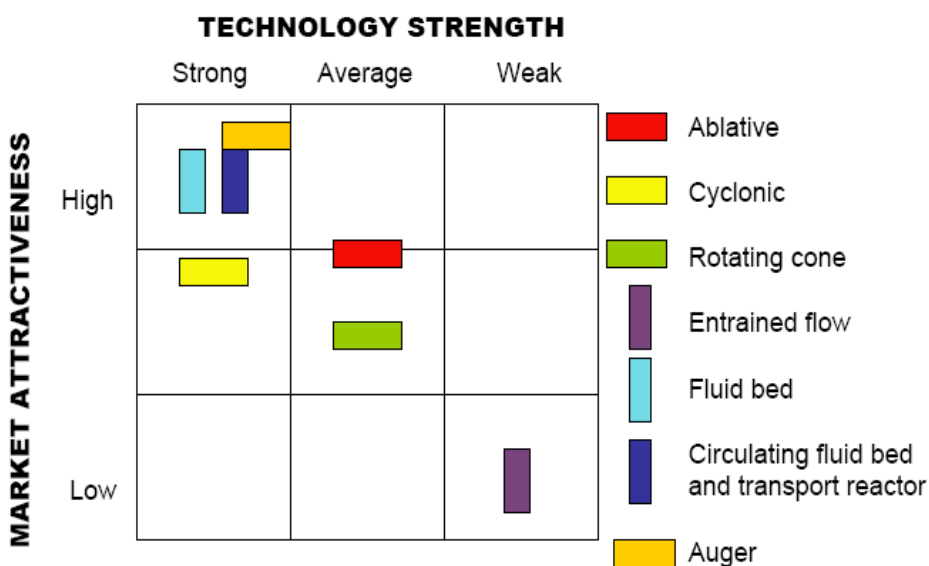


รูปที่ 2.19 เครื่องปฏิกรณ์แบบสว่าน

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีหลายแบบหลายขนาดและมีตัวแปรเงื่อนไขในการใช้ที่ไม่เหมือนกัน เช่น ขนาดอนุภาค ลักษณะเฉพาะตัวเครื่อง หรือเทคโนโลยีที่ใช้ทำงานง่าย ราคาที่แตกต่างกันสรุปได้ดังตารางที่ 2.6 และรูปที่ 2.20

ตารางที่ 2.6 ลักษณะเฉพาะของเครื่องปฏิกรณ์แบบต่างๆ

Property	Status	Bio-oil wt%	Complexity	Feed size	Inert gas need	Specific size	Scale up
Fluid bed	Demo	75	Medium	Small	High	Medium	Easy
CFB	Pilot	75	High	Medium	High	Large	Easy
Entrained	None	65	High	Small	High	Large	Easy
Rotating cone	Pilot	65	High	V small	Low	Small	Hard
Ablative	Lab	75	High	Large	Low	Small	Hard
Auger	Lab	65	Low	Small	Low	Medium	Easy
Vacuum	Demo	60	High	Large	Low	Large	Hard
The darker the cell color, the less desirable the process.				Lab: 1 – 20 kg h <sup>-1</sup> Pilot: 20 – 200 kg h <sup>-1</sup> Demo: 200 – 2000 kg h <sup>-1</sup>			



รูปที่ 2.20 ประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์และความสนใจใช้ในอุตสาหกรรม

## 2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Zhang และคณะ (2010) และ Qiang และคณะ(2009) ศึกษาภาพรวมของกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล และสมบัติของเชื้อเพลิงจากชีวมวล พบว่าชีวมวลมีองค์ประกอบหลัก 3 องค์ประกอบ คือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสและลิกนิน สัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล โดยสามารถแบ่งชนิดของชีวมวลตามสัดส่วนของลิกนินได้ดังนี้ ชีวมวลที่มีลิกนิน ปริมาณสูง ชีวมวลที่มีลิกนินปริมาณปานกลางและชีวมวลที่มีลิกนินปริมาณต่ำ เมื่อนำชีวมวลมาศึกษาการสลายตัวทางความร้อนพบว่า ลิกนินใช้ช่วงอุณหภูมิที่กว้างกว่าเมื่อเทียบกับเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส ทำให้ทราบว่าหากใช้ชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูงต้องทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิและใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนสูงกว่าหากเทียบกับชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินต่ำ จึงสรุปตัวแปรที่สำคัญในการสลายตัวของชีวมวลคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการให้ความร้อน และสัดส่วนของลิกนินภายในองค์ประกอบของชีวมวล ต่อมาศึกษาผลของการเตรียมชีวมวลพบว่ามีความสำคัญต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพดังนี้ ชีวมวลต้องมีแนวโน้มอนุภาคขนาดเล็กเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ดีทำให้ได้น้ำมันชีวภาพในปริมาณมาก ชีวมวลยังต้องมีความชื้นที่ต่ำกว่าร้อยละ 10 เพราะหากมีปริมาณน้ำอยู่มากจะสะสมอยู่ในน้ำมันชีวภาพส่วนเบา ส่งผลทำให้เกิดผลกระทบต่อเสถียรภาพทางความร้อน ค่าความร้อนมีค่าต่ำลงค่าความเป็นกรดสูงขึ้น การกักความร้อนต่อวัสดุหากนำน้ำมันไปใช้งาน เป็นต้น ต่อมาศึกษาผลของเวลาที่โอระเหยของผลิตภัณฑ์ยังคงวนเวียนอยู่ภายในระบบ พบว่าหากใช้เวลานานส่งผลทำให้เกิดการแตกตัวครั้งที่ 2 (secondary cracking) ถ้าไม่มีการป้องกันจะทำให้ร้อยละผลของน้ำมันชีวภาพส่วนเบามีปริมาณลดลง โดยเมื่อพิจารณาถึงคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไพโรไลซิสไม้ (wood) ในการใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว พบว่ามีปริมาณออกซิเจนสูงถึงร้อยละ 37.1 ค่าความร้อน 17 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (ปกติน้ำมันเชื้อเพลิงปิโตรเลียมมีค่าความร้อน 41-43 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ถือว่ามีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ต่ำ ทำให้หากต้องการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้งานจะต้องผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้มีสมบัติที่ดีขึ้น

Akhtar และคณะ(2011) พบว่าตัวแปรที่สำคัญในการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการดังกล่าวและข้อสรุปผลของแต่ละตัวแปรต่อผลของร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ ได้ดังนี้ ผลของอุณหภูมิ พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 300-375 องศาเซลเซียสโดยขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล อุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้โครงสร้างสารภายในชีวมวล โดยเฉพาะเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลสจะเกิดการ

สลายตัวผ่านปฏิกิริยาดีโพลีเมอร์ไรเซชัน หากอุณหภูมิสูงกว่าช่วงดังกล่าวจะส่งผลต่อการเกิดผลผลิตที่เป็นแก๊สสูงขึ้น แต่ถ้าต่ำกว่าช่วงดังกล่าวส่งผลทำให้การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสไม่สมบูรณ์ ต่อมาศึกษาผลของตัวทำละลาย ตัวทำละลายส่งผลช่วยให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของชีวมวลผ่านการเกิดปฏิกิริยาไซโคลไลซิสเช่น ไฮโดรไลซิส และแอลกอฮอล์ไลซิส พบว่าน้ำคือตัวทำละลายที่เหมาะสมที่สุดในด้านราคาและตัวทำละลายอินทรีย์ที่เหมาะสม ได้แก่ เมทานอล เอทานอล อะซิโตน เบนซิน เป็นต้น เนื่องจากสามารถเพิ่มร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพได้สูงขึ้น ต่อมาศึกษาผลของอัตราส่วนตัวทำละลายต่อชีวมวล พบว่าหากมีค่าสูงจะทำให้ต้องให้พลังงานแก่ระบบมากขึ้น เพื่อให้ได้ความร้อนตามอุณหภูมิที่ต้องการและยังก่อให้เกิดของเสียในรูปของตัวทำละลายจำนวนมากในขั้นต่อมาศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อน ขนาดอนุภาคของชีวมวล พบว่าเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้น้อยกว่าหากเทียบกับตัวแปรก่อนหน้าจึงไม่มีข้อสรุปจากผลของตัวแปรดังกล่าว ส่วนผลของระยะเวลาและการใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา พบว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนนานจะทำให้ให้น้ำมันชีวภาพลดลงและเกิดผลผลิตในรูปของแก๊สสูงขึ้น ส่วนผลของการเพิ่มแก๊สไฮโดรเจนเข้าสู่ระบบนั้นจะทำให้องค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพได้ผลผลิตที่ต้องการมากกว่าการไม่ใช้แก๊สไฮโดรเจน กล่าวคือมีปริมาณออกซิเจนในผลผลิตลดลง

Stefanidis และคณะ (2001) ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพร่วมกับการใช้ไฮโดรไลซิส โดยพบว่าออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพถูกกำจัดโดยเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดที่ศึกษาส่งผลทำให้ปริมาณร้อยละผลได้น้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา ดีไฮเดรชัน (Dehydration) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดและเบสส่งผลทำให้ปริมาณร้อยละผลได้น้ำเพิ่มขึ้น ในรูปของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ และพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นเบสมีแนวโน้มทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลดลงมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆ เพราะสามารถดึงออกซิเจนออกจากโมเลกุลในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีออกซิเจนต่อโมเลกุลเท่ากับ 2 อะตอมต่อคาร์บอน 1 อะตอมซึ่งสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่ดึงออกซิเจนออกจากโมเลกุลในรูปของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีออกซิเจนต่อโมเลกุลเท่ากับ 1 อะตอมต่อคาร์บอน 1 อะตอม

Xu และคณะ(2009) ศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพผ่านการลดปริมาณออกซิเจน และค่าความเป็นกรดในน้ำมันชีวภาพโดยเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา



ที่ประกอบด้วยโลหะมีตระกูล (noble catalyst) มีข้อดีคือ มีความว่องไวสูง (high activity) ข้อเสียคือ มีราคาแพง ดังนั้นการใช้งานในอุตสาหกรรมจึงควรต้องลดต้นทุนในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาสูง พบว่าโลหะนิกเกิล (Ni) สามารถดูดซับแก๊สไฮโดรเจน และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันได้ดีและยังเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยาเกรดการค้าที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน เมื่อใช้งานร่วมกับโปรโมเตอร์ (promoter) เช่น โมลิบดีนัม (Mo) จะช่วยเพิ่มความคงทน (stability) ของโลหะนิกเกิล ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ ได้ช้าลงและยังเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบริเวณพื้นที่บริเวณเร่งของโลหะนิกเกิล ทำให้ลดการ เกิดสารนิกเกิลอะลูมินา ( $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ ) บนตัวรองรับอะลูมินา ในงานวิจัยดังกล่าวเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัม ( $\text{NiMo}$ ) บนตัวรองรับอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในขั้นตอนศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง โลหะนิกเกิลต่อตัวรองรับอะลูมินา โดยพบว่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสม คือ 10 ต่อ 90 ส่วน ตามลำดับ และศึกษาผลของการเติมโลหะโมลิบดีนัม พบว่าหากมีการเติมโมลิบดีนัมส่งผลทำให้ คุณณหภูมิที่ใช้ในการรีดักชันโลหะนิกเกิลลดลง จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยามาทดสอบการปรับปรุง คุณภาพของน้ำมันชีวภาพ พบว่าค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพลดลง เมื่อนำน้ำมันชีวภาพก่อน และหลังการปรับปรุงคุณภาพมาวิเคราะห์องค์ประกอบ สามารถสรุปได้ว่าสารประกอบกรดอินทรีย์ ภายในองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันได้เป็นสารประกอบเอสเทอร์ หรือ แอลกอฮอล์โดยมีน้ำเป็นผลผลิตร่วม ดังนั้นจากงานวิจัยในข้างต้นของ Stefanidis และของ Xu จึง สามารถสรุปได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ โดยการดึง ออกซิเจนออกจากโมเลกุลของชีวมวลระหว่างการผลิตน้ำมันชีวภาพได้

Jena และ Das (2011) ศึกษาผลการเปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตน้ำมันชีวภาพจาก กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน 2 กระบวนการ คือ ลิกวิแฟกชันที่อุณหภูมิ 350 กับไพโรไลซิสที่ อุณหภูมิ 350 และ 500 องศาเซลเซียสของสาหร่ายภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เมื่อพิจารณาผลของ ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเป็นหลัก พบว่าลิกวิแฟกชันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสให้ร้อยละ ผลได้สูงถึง 41 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 และ 500 องศาเซลเซียสให้ร้อยละ ผลได้เพียง 23 และ 29 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ลิกวิแฟกชันยังให้ร้อยละผลได้ของของแข็งน้อยกว่าการ ทำไพโรไลซิส 6.3 เปอร์เซ็นต์ และ 28-40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการใช้พลังงานสุทธิ ที่ใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพ (Energy consumption ratio) พบว่าลิกวิแฟกชันใช้พลังงานสุทธิต่ำกว่า การทำไพโรไลซิส เพราะไม่ต้องผ่านขั้นตอนการลดปริมาณความชื้นในชีวมวลและน้ำมันชีวภาพจาก ลิกวิแฟกชันยังมีความเหมาะสมในด้านของการผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เพราะน้ำมันชีวภาพที่ได้มี

ความเสถียรทางความร้อนสูงทดสอบโดยการศึกษาค่าผลของเวลาที่เก็บรักษา พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางองค์ประกอบหลังการเก็บรักษาที่ต่ำกว่าไพโรไลซิส ข้อดีของลิกวิกแฟกชันอีกข้อหนึ่ง คือน้ำมันชีวภาพที่ได้ยังมีค่าความร้อนของการเผาไหม้สูงกว่าน้ำมันชีวภาพจากการทำไพโรไลซิส จากงานวิจัยนี้ได้ข้อสรุปว่าการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการทำลิกวิกแฟกชันเหมาะสมกว่าผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านการทำไพโรไลซิส

Jena และ Das (2011) ศึกษาผลของภาวะที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการลิกวิกแฟกชันของสาหร่ายโดยศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 380 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 ถึง 120 นาที จากการศึกษาภาวะของการทดลองข้างต้น เมื่อนำผลผลิตในรูปของแก๊สมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC ทำให้สรุปได้ว่าหากมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงจนถึง 350 องศาเซลเซียสจะทำให้ร้อยละผลได้ของแก๊สในรูปโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการแตกตัวครั้งที่ 2 ของไฮดรอกซีในเครื่องปฏิกรณ์ผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และจากการวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพแสดงข้อมูลได้ว่า หากเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจะทำให้ น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนของการเผาไหม้สูงขึ้นและปริมาณออกซิเจนลดลง เช่นเดียวกับการเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนที่ให้แนวโน้มเดียวกับผลของอุณหภูมิ แต่หากพิจารณาร้อยละผลผลิตของน้ำมันชีวภาพเป็นหลัก พบว่าการทำลิกวิกแฟกชันที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการให้ความร้อน 60 นาที จะให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุด จากการพิจารณาค่าความร้อนของการเผาไหม้ของน้ำมันชีวภาพที่ได้ในงานวิจัยพบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 34.7-39.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัมเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันดิบที่มีค่าความร้อนของการเผาไหม้อยู่ประมาณ 42.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัมแสดงให้เห็นว่าสมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันชีวภาพที่ได้มีความใกล้เคียงกับน้ำมันดิบ จากข้อสรุปของงานวิจัยข้างต้นทำให้ได้ภาวะที่เหมาะสมดังนี้ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสนาน 60 นาทีนั้นจะทำการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านการทำลิกวิกแฟกชันของสาหร่ายให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงถึง 39.9 เปอร์เซ็นต์

### บทที่ 3

## เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่จากไพโรไลซิสในเฟสของเหลว โดยพิจารณาผลของร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพเป็นหลัก

#### 3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. กระจกนิยักร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 – 150 ไมโครเมตร
2. เฮกเซน ( $n\text{-C}_6\text{H}_{14}$ )
3. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้ว (spent FCC)
4. นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni-Mo/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  commercial grade)
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

#### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมกระจกนิยักร์

1. เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ
2. เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด
3. ตะแกรงร่อนขนาด 75 และ 150 ไมโครเมตร
4. เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve Shaker)
5. เตาอบ (oven) Memmert Celsius 2000

##### 3.2.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (AmAr reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง ผลิตโดยบริษัท Amar Equipments (รูปที่ 3.1) ปริมาตร 20 ลิตร ตัวเครื่องปฏิกรณ์ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel No.316) ประกอบด้วยส่วนให้ความร้อน (Heater) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) มาตรวัดความดัน (pressure gauge) ระบบหล่อเย็น (cooling system) และอุปกรณ์การกวนซึ่งประกอบด้วย

ไบกวนพร้อมชุดควบคุมและวัดความเร็วรอบของไบกวน โดยตัวเครื่องและอุปกรณ์ประกอบสามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดไม่เกิน 210 บาร์

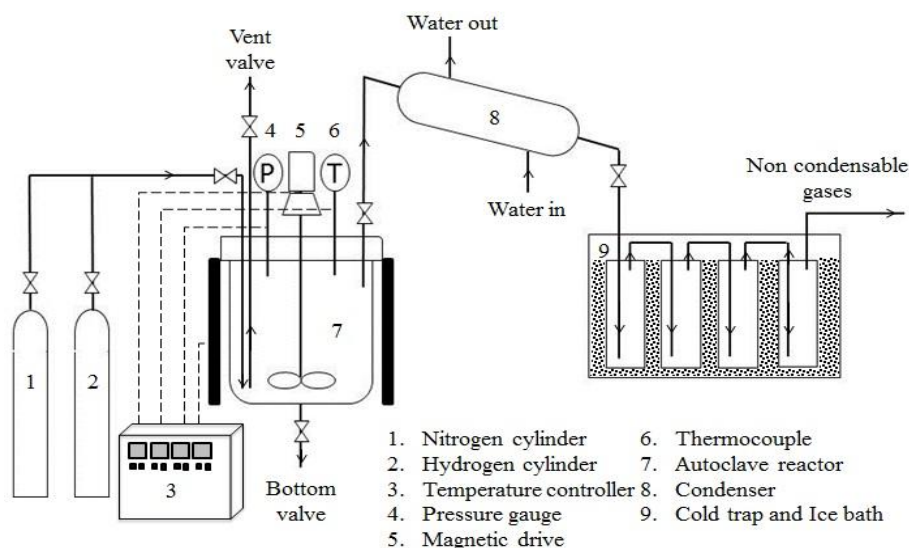


รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 20 ลิตร (AmAr reactor)

### 3.2.3 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง

ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ถังแก๊สไนโตรเจนและไฮโดรเจน 99.99% จาก บริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส (ประเทศไทย) จำกัด
2. อุปกรณ์ดักจับไอระเหยของน้ำมันชีวภาพประกอบด้วยเครื่องควบแน่น ดังตำแหน่งที่ 8 ในรูปที่ 3.2 และถังใส่น้ำแข็งที่ภายในมีขวดเก็บตัวอย่างที่ต่อท่อเชื่อมมาจากเครื่องควบแน่นเพื่อรองรับผลิตภัณฑ์ที่สามารถควบแน่นได้ทั้งหมดดังตำแหน่งที่ 9 ในรูป 3.2

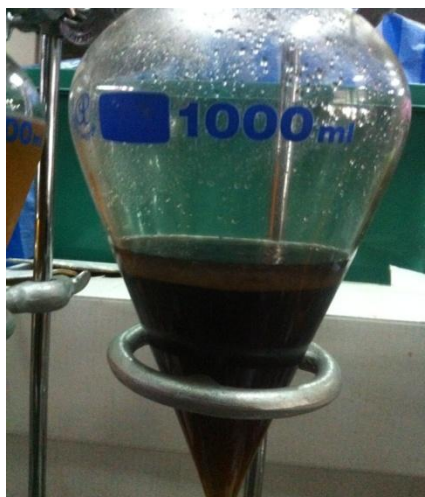


รูปที่ 3.2 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 20 ลิตร

### 3.2.4 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการแยก

1. อุปกรณ์การกรองประกอบด้วยกรวยแยก (Separating funnel)
2. ขวดเก็บสารตัวอย่าง
3. ไดคลอโรมีเทน ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ )
4. เครื่องระเหยแบบหมุน (rotary evaporator)

ขั้นตอนในการแยกมีหลักการ คือ การใช้เทคนิคสกัดแยกด้วยตัวทำละลายในการแยกส่วนที่เป็นน้ำออกจากน้ำมัน ในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ควบแน่นได้ โดยลักษณะการแยกดังกล่าวแสดงในรูปที่ 3.3 ส่วนที่เป็นน้ำจะอยู่ด้านบนและส่วนที่เป็นน้ำมันจะอยู่รวมกับตัวทำละลายที่ใช้สกัดแยกอยู่ด้านล่าง (ไดคลอโรมีเทน) จากนั้นทำการแยกตัวทำละลายทั้งหมด (ไดคลอโรมีเทนรวมกับเฮกเซน) ออกด้วยการใช้เครื่องระเหยแบบหมุนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและความดันที่ 800 มิลลิบาร์ ทำให้น้ำมันชีวภาพส่วนหนักรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 การแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำและน้ำมัน โดยใช้เทคนิคสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย



รูปที่ 3.4 น้ำมันชีวภาพส่วนหนักที่ได้จากกระบวนการแยก

### 3.2.5 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer)

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ไนโตรเจน ในตัวอย่างชีวมวลและน้ำมันชีวภาพ ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ยี่ห้อ Leco รุ่น CHN-2000 ดังแสดงในรูปที่

3.5 ซึ่งผลการวิเคราะห์คิดเป็นร้อยละธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดโดยน้ำหนักของชีวมวลหรือน้ำมัน  
ชีวภาพที่ทำการวิเคราะห์



รูปที่ 3.5 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer)

### 3.2.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (Gas chromatography-Mass spectrometry)

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสด้วย  
เฟสของเหลว ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) ยี่ห้อ Agilent ดังแสดงใน  
รูปที่ 3.6 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพแสดงดังตารางที่ 3.1



**รูปที่ 3.6** เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี  
(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)

**ตารางที่ 3.1** ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatography-mass spectrometry)

แก๊สพา (carrier gas)	แก๊สฮีเลียม (He)
ชนิดคอลัมน์	DB-5 column
อุณหภูมิการฉีด (injector temperature)	180 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (oven column temperature)	40 ถึง 200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิที่ส่งผ่าน (transfer line temperature)	200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในการผลิตไอออน (ion source temperature)	200 องศาเซลเซียส



### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่างชีวมวล (กระถินยักษ์)

นำตัวอย่างชีวมวลที่มีขนาดใหญ่มาลดขนาดด้วยเครื่องบดหยาบ และนำตัวอย่างมาบดละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียดคัดขนาดไม้กระถินยักษ์ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 ถึง 150 ไมโครเมตรด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อนขนาด 75 และ 150 ไมโครเมตร นำกระถินยักษ์ตามขนาดที่ต้องการไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมงเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการศึกษาวิจัย

#### 3.3.2 กระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

ในขั้นตอนการศึกษาการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูงขนาด 20 ลิตร พบว่าหากมีการใช้ปริมาณสารตั้งต้นอยู่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรของถังปฏิกรณ์จะทำให้ความดันรวมของระบบมีค่าสูงมาก ซึ่งเสี่ยงต่อความอันตรายที่จะเกิดขึ้น ซึ่ง ณ ตอนนั้นใช้ กระถินยักษ์ 500 กรัม ตัวทำละลาย 2000 กรัม ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนภาวะของสารตั้งต้นเริ่มต้น เพื่อให้มีความปลอดภัยในการทำาทดลองมากขึ้น ซึ่ง ลดลงมาครึ่งหนึ่งจากเดิม

1. ชั่งกระถินยักษ์ 250 กรัม ผสมกับตัวทำละลาย 1500 มิลลิลิตร(เฮกเซน)ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์ที่กำหนด (4:1) และหากในการทดลองดังกล่าวใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำการชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา (NiMo, Mgo, FCC-spent)ร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนักของกระถินยักษ์ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์พร้อมกับตัวทำละลายและกระถินยักษ์

2. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์ทำการไล่อากาศ, แก๊สที่คงค้างหรือแก๊สปนเปื้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยแก๊สไนโตรเจนปริมาณ 10 บาร์ 3 ครั้ง เพื่อให้มีปริมาณออกซิเจนภายในเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณน้อยที่สุดจากนั้นอัดความดันแก๊สไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เพื่อควบคุมให้ตัวทำละลาย ยังคงสถานะของเหลวระหว่างที่ได้รับความร้อนจนถึงภาวะอุณหภูมิที่ต้องการศึกษา (325-400 องศาเซลเซียส) ตั้งค่าความเร็วรอบของใบกวน 400 รอบต่อนาทีใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 0-60 นาที โดยเริ่มนับเวลาเมื่ออุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนด

3. เมื่อครบระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ทำการปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ผ่านทางวาล์วระบาย (vent valve) เพื่อให้ถูกควบแน่นและเย็นตัวลงที่อุปกรณ์ดักจับไอระเหย

โดยมีการใช้ไดคลอโรมีเทนชนิดไล่ที่เครื่องควบแน่น (condenser) เพื่อให้น้ำมันที่หนืดไหลไปรวมกันที่อุปกรณ์ดักจับไอรระเหย ซึ่งใช้น้ำแข็งและโซเดียมคลอไรด์ช่วยทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถควบแน่นได้ทั้งหมดจะถูกรวมกันอยู่ในอุปกรณ์ดักจับไอรระเหยดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผลิตภัณฑ์ที่สามารถควบแน่นได้ทั้งหมด

4. ผลิตภัณฑ์ของเหลวทั้งหมดจะถูกสกัดแยกต่อกันด้วยเทคนิคการสกัดแยกด้วยตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้ใช้ไดคลอโรมีเทน ทำให้สามารถแยกส่วนของน้ำ (ด้านบน) ออกจากส่วนของไดคลอโรมีเทน (ด้านล่าง) ได้ ซึ่งส่วนของไดคลอโรมีเทนจะประกอบไปด้วยน้ำมันชีวภาพ เฮกเซน และไดคลอโรมีเทน โดยเฮกเซนและไดคลอโรมีเทนจะถูกแยกออกจากส่วนของน้ำมันชีวภาพโดยการใช้เครื่องระเหยแบบหมุนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและความดันที่ 800 มิลลิบาร์

5. ทำการเก็บผลิตภัณฑ์ของแข็งส่วนเหลือในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็งส่วนเหลือ โดยผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ได้นั้นจะถูกไปวิเคราะห์แบบประมาณต่อไป

6. ชั่งน้ำหนักน้ำมันชีวภาพที่เหลือภายหลังการระเหยด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน และนำไปคำนวณหาร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ นำน้ำมันชีวภาพที่ได้ไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และองค์ประกอบของน้ำมันด้วยเครื่อง CHN analyzer และ GC-MS ตามลำดับ

การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวของกระถินยักษ์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ คือ NiMo, MgO , FCC-spent โดยขั้นตอนปรกติตามหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งมีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

ก. อุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว (325 350 375 และ 400 องศาเซลเซียส)

ทำการทดลองที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 250 กรัม เฮกเซน 1000 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์เท่ากับ 4 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 0 นาที อัตราเร็วในการให้ความอยู่ที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

ข. เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (0 20 40 และ 60 นาที)

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 250 กรัม เฮกเซน 1000 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์เท่ากับ 4 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก) อัตราเร็วในการให้ความอยู่ที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

ค. ผลของปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส เวลา 0 นาที ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 250 กรัม เฮกเซน 1000 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์เท่ากับ 4 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo ที่ปริมาณ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักเทียบกับกระถินยักษ์ อัตราเร็วในการให้ความอยู่ที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

ง. ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจน (5 10 และ 20 บาร์)

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส เวลา 0 นาที ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 250 กรัม เฮกเซน 1000 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์เท่ากับ 4 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา NiMo ที่ปริมาณ 20 โดยน้ำหนักเทียบกับกระถินยักษ์ อัตราเร็วในการให้ความอยู่ที่ 2 องศาเซลเซียสต่อนาที

๑. ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา (NiMo, MgO และ FCC-Spent)

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ กระถินยักษ์ 250 กรัม เฮกเซน 1000 กรัม (อัตราส่วนตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์เท่ากับ 4 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณ 20 โดยน้ำหนักเทียบกับกระถินยักษ์และความดันแก๊สไฮโดรเจน 20 บาร์ อัตราเร็วในการให้ความอยู่ที่ 2 องศาเซลเซียสต่ออนาที

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากการปรับปรุงการไพโรไลซิสเพื่อให้ร้อยละผลได้สูงขึ้น โดยจะศึกษากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวโดยสมมุติฐาน คือ การใช้ตัวทำละลายนั้นจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับชีวมวลเพียงช่วยส่งเสริมการแตกสลายพันธะของสารโมเลกุลใหญ่ในชีวมวล เพื่อให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้น และมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมเพื่อช่วยลดสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวโดยปัจจัยที่ทำการศึกษได้แก่ อุณหภูมิ, ระยะเวลาในการให้ความร้อน, การใช้ตัวทำละลาย ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น ที่มีผลต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากภาวะต่างๆ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN Analyzer) และเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (GC-MS) ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองได้เป็น 6 ส่วน ดังนี้

1. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกระถินยักษ์ ได้แก่ การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) และผลการวิเคราะห์พฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA)
2. ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว
3. ผลของการไม่ใช้ตัวทำละลาย, ใช้ตัวทำละลาย (เฮกเซน) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> commercial grade) ในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว
4. ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (10 – 30 ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันชีวภาพ)
5. ผลของปริมาณความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น (5 – 20 บาร์)
6. ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการศึกษาได้แก่

- ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้ว (spent FCC)
- นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา (Ni-Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> commercial grade)
- แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

#### 4.1. องค์ประกอบทางเคมีของกระถินยักษ์

ตารางที่ 4.1 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของกระถินยักษ์พบว่า กระถินยักษ์มีองค์ประกอบของสารระเหยสูงถึงร้อยละ 79.48 ขณะที่ปริมาณคาร์บอนคงตัวต่ำร้อยละ 8.78 และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบธาตุ พบว่า อัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนของกระถินยักษ์มีค่าเท่ากับ 0.86 ถือว่ามีค่ามากเมื่อเทียบกับชีวมวลโดยทั่วไป ซึ่งจะมีอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนมากกว่า 0.3 (Yang et al., 2008) ดังนั้นน้ำมันชีวภาพจากกระถินยักษ์ที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพ จึงมีปริมาณออกซิเจนสูงด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพนี้ส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) และแบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ของกระถินยักษ์

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)	
ความชื้น (Moisture)	9.68
สารระเหย (Volatile matter)	79.48
คาร์บอนคงตัว (Fixedcarbon)*	8.78
เถ้า (Ash)	2.06
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)	
คาร์บอน (C)	49.99
ไฮโดรเจน (H)	6.19
ไนโตรเจน (N)	0.81
ออกซิเจน (O)*	43.01
อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน	0.86
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	
	18.92

คาร์บอนคงตัว\* = 100-ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว

ออกซิเจน\* = 100-ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

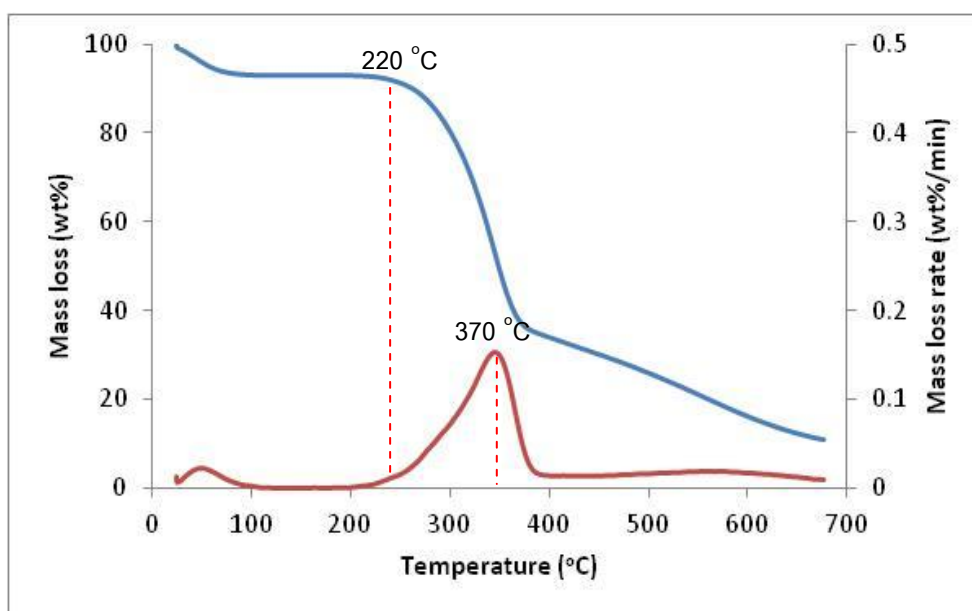
ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำมันดิบจากกระถินยักษ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว (อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาที)

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
คาร์บอน (C)	67.51
ไฮโดรเจน (H)	9.40
ไนโตรเจน (N)	0.52
ออกซิเจน (O)*	23.09

ออกซิเจน\* = 100-ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

## 4.2. พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric analyzer (TG-DTA) ภายใต้แก๊สไนโตรเจน ที่ช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า กระถินยักษ์เริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 220 องศาเซลเซียส และมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 370 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์ ทำให้ทราบช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษา โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอุณหภูมิของกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว ในช่วง 325-400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA

ในงานวิจัยนี้สนใจการผลิตน้ำมันชีวภาพพร้อมกับการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ จากผลของภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน ดังนั้นขออธิบายภาพรวมของการคำนวณและรายละเอียดของการอธิบาย ณ ที่นี้

- น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) คำนวณจากน้ำหนักของน้ำมันชีวภาพที่ได้หลังจากการระเหยตัวทำละลายออกส่วนด้วยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์เริ่มต้น

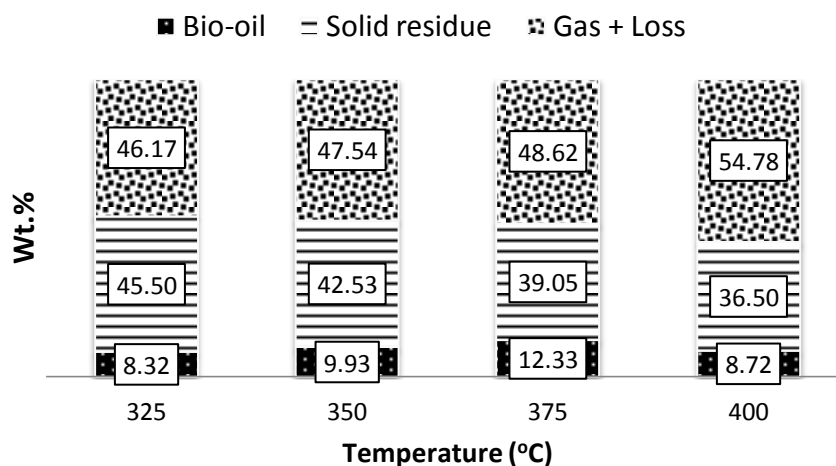


- ของแข็งส่วนเหลือ (Solid residue) คำนวณจากน้ำหนักของของแข็งส่วนเหลือที่ได้หลังจากการระเหยความชื้นส่วนด้วยน้ำหนักของไม้กระถินยักษ์เริ่มต้น
- ผลิตภัณฑ์แก๊สและส่วนที่หาย (Gas + Loss) คำนวณจาก 100 ลบออกด้วยน้ำมันชีวภาพและของแข็งส่วนเหลือ ซึ่งในส่วนนี้จะไม่ถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคใดๆ เพราะไม่ถือเป็นประเด็นหลักสำหรับงานวิจัยนี้

#### 4.3 ผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

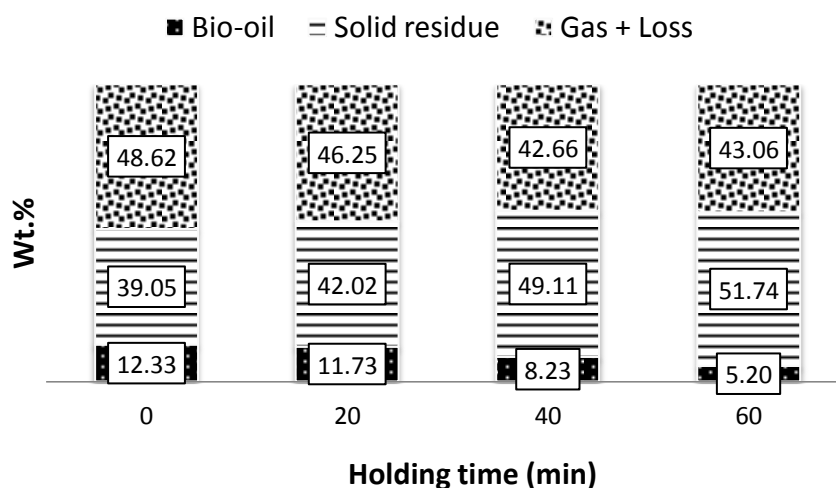
- **ภาวะการทดลอง :** ความดันแก๊สในโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์, เฮกเซน 1500 มิลลิลิตร กระถินยักษ์ 250 กรัม, ในการศึกษาผลของอุณหภูมิใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาทีและในส่วนการศึกษาผลของระยะเวลาในการให้ความร้อนใช้อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว โดยในการศึกษาผลของอุณหภูมิจำลองผลของพฤติกรรมสลายตัวทางความร้อนของกระถินยักษ์ในรูปที่ 4.1 ทำให้ได้ช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง 325–400 องศาเซลเซียสพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจาก 325 เป็น 400 องศาเซลเซียสนั้น ทำให้ปริมาณของน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 375 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดได้น้ำมันชีวภาพอยู่ที่ปริมาณร้อยละ 12.33 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเกินอุณหภูมิดังกล่าวจะทำให้ได้น้ำมันชีวภาพลดลง โดยเหลืออยู่ที่ร้อยละ 8.72 โดยน้ำหนักและยังทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (จากร้อยละ 48.62 เป็น 54.78โดยน้ำหนัก) สามารถอธิบายผลดังกล่าวได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกตัวขั้นที่สอง (secondary cracking) ของน้ำมันชีวภาพ ส่งผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามผลการทดลองของ (Hyeon et al., 2010) ที่พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดอยู่ในช่วง 375 – 400 องศาเซลเซียสสำหรับผลิตภัณฑ์ของแข็งส่วนเหลือมีแนวโน้มลดลงจากการเพิ่มอุณหภูมิจากร้อยละ 45.50 เป็น 36.50 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดการแตกตัวของของแข็งส่วนเหลือมากขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแก๊สมากขึ้นทั้งในส่วนที่สามารถควบแน่นได้ (น้ำมันชีวภาพ) และส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้ (Xu et al., 2008)



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

ผลของเวลาในการให้ความร้อนต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว แสดงในรูปที่ 4.3 เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจาก 0 เป็น 60 นาที พบว่าร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มลดลง และของแข็งส่วนเหลือมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มากขึ้นจะส่งผลให้น้ำมันชีวภาพที่ได้ เกิดการแตกตัวขึ้นที่สองกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น และบางส่วนอาจจะสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ขึ้นได้เป็นของแข็งส่วนเหลือ (Tingchen et al., 2003)



รูปที่ 4.3 ผลของระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

โดยเมื่อนำน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวมาทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนแสดงผลการทดลองได้ในตารางที่ 4.3 เนื่องจากอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน ทำให้ชีวมวลมีโอกาสเกิดปฏิกิริยาดีออกซิเจนชันได้มากขึ้นออกซิเจนจึงสามารถถูกกำจัดออกในปริมาณที่มากขึ้น (Tingchen et al., 2003) ส่งผลทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มลดลงและปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพที่ได้ในทุกภาวะของการทดลองกับสารตั้งต้น (กระถินยักษ์) ในส่วนของค่าความร้อน (ตารางที่ 4.1) พบว่ามีค่าสูงกว่าสารตั้งต้นในทุกๆ ภาวะของการทดลอง โดยค่าความร้อนสูงสุดอยู่ที่ 40.31 เมกะจูล/กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาที

**ตารางที่ 4.3** การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ

ภาวะของการทดลอง	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				ค่าความร้อน**
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน*	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					
325	58.17	8.42	0.38	33.42	25.81
350	67.51	9.40	0.52	23.09	32.22
375	70.77	10.74	0.60	18.50	36.05
400	80.07	10.41	0.79	9.53	40.31
ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)					
0	70.77	10.74	0.60	18.50	36.05
20	71.79	10.71	0.80	17.51	36.52
40	74.86	10.05	0.86	15.10	37.05
60	77.73	10.28	0.82	12.00	38.90

ออกซิเจน\* = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

ค่าความร้อน\*\* = คำนวณจากสูตรของดูลอง, ค่าความร้อน (เมกะจูล / กิโลกรัม) =  $0.338C + 1.428(H-O/8) + 0.0955$

ผลการวิเคราะห์ต่อมาเป็นการนำเอาของแข็งส่วนเหลือมาทำการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ แบบประมาณ และค่าความร้อนแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้สารระเหยในของแข็งส่วนเหลือมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด จาก 30.17 เป็น 18.64 ร้อยละโดยน้ำหนัก จึงทำให้สัดส่วนของคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 62.68 เป็น 75.10 ผลการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมินั้นทำให้องค์ประกอบของสารระเหยในกระถินยักษ์มีโอกาสเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น ซึ่งอาจสลายตัวได้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่สามารถควบแน่นได้ (Jena et al., 2011) สอดคล้องกับผลของร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ และจากผลการวิเคราะห์แบบประมาณแสดงให้เห็นว่าปริมาณออกซิเจนในของแข็งส่วนเหลือมีแนวโน้มลดลง อธิบายได้ว่าการสลายตัวของชีวมวลจะมีการผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลโดยตรงต่อการสลายตัวให้ได้องค์ประกอบของสารดังกล่าว จึงทำให้ออกซิเจนในของแข็งส่วนเหลือมีค่าลดลงจากร้อยละ 24.45 เป็น 20.77 โดยน้ำหนัก (Akalin et al., 2012) ส่วนผลของการเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนไม่เห็นความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดเมื่อนำของแข็งส่วนเหลือมาวิเคราะห์แบบแยกธาตุ แบบประมาณ และค่าความร้อน

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ แบบประมาณ และค่าความร้อนของของแข็งส่วนเหลือ

ภาวะ ของการ ทดลอง	การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				ค่าความ ร้อน***  (เมกะจูล/ กิโลกรัม)
	สาร ระเหย	เถ้า	คาร์บอน คงตัว*	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน**	
อุณหภูมิ, (องศาเซลเซียส)								
325	30.17	4.21	62.68	71.12	4.44	1.08	24.45	26.11
350	23.23	4.17	68.02	73.58	4.04	0.57	22.38	26.74
375	25.80	4.23	70.45	74.97	4.07	1.02	20.96	27.51
400	18.64	4.36	75.10	74.73	4.50	1.08	20.77	28.07
ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)								
0	21.63	70.45	4.23	74.97	4.07	1.02	20.96	27.51
20	21.39	70.96	4.17	74.71	3.85	1.11	21.44	27.02
40	21.02	71.11	4.17	75.86	3.36	0.80	20.79	26.81
60	20.22	72.09	4.06	77.09	3.04	0.72	19.88	26.94

คาร์บอนคงตัว\* = 100 - ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว

ออกซิเจน\*\* = 100 - ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

ค่าความร้อน\*\*\* = คำนวณจากสูตรของดูลอง, ค่าความร้อน (เมกะจูล / กิโลกรัม) =  $0.338C + 1.428(H-O/8) + 0.0955$

ในส่วนต่อมาเป็นการนำเอาเฟสของเหลวที่ได้จากการทดลอง หรือที่เรียกว่า aqueous co-products (ACP) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนการสกัดแยกด้วยตัวทำละลายของน้ำมันชีวภาพ โดยจะแยกเฟสที่เป็นน้ำมัน (bottom phase) ออกจากเฟสน้ำ (top phase) ซึ่ง ACP คือ ส่วนของ top phase เมื่อนำมาวิเคราะห์แบบแยกธาตุดังตารางที่ 4.5 พบ สัดส่วนขององค์ประกอบ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ไม่แสดงนัยยะสำคัญจากผลของการให้อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน และเนื่องจากเฟสดังกล่าว มีส่วนประกอบที่ได้จากการสลายโครงสร้างของชีวมวลที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่มีขั้วสูง ซึ่งอาจเป็นสารประกอบอินทรีย์จำพวกกรดคาร์บอกซิลิก แอลกอฮอล์ เป็นต้น จึงได้นำไปทำการวิเคราะห์ค่า pH พบว่าไม่ได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงอย่าง

เห็นได้ชัดจากผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อค่า pH ของ ACP ดังนั้น การวิเคราะห์ในส่วนของเฟส ACP ในเรื่ององค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค GC-MS จึงไม่ขอทำการวิเคราะห์ เพราะถือว่าเป็นส่วนที่ไม่สำคัญในงานวิจัยและไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงจากการวิเคราะห์ในเบื้องต้น

**ตารางที่ 4.5** การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่า pH ของเฟสของเหลวที่ได้ (aqueous co-products)

ภาวะของการทดลอง	การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				pH
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน*	
<b>อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)</b>					
325	6.86	10.74	0.25	82.40	6.9
350	5.21	10.14	0.12	84.65	6.7
375	4.81	10.71	0.21	84.48	6.6
400	4.85	10.90	0.22	84.25	6.3
<b>ระยะเวลาในการให้ความร้อน (นาที)</b>					
0	4.81	10.71	0.21	84.48	6.6
20	4.78	10.46	0.22	84.77	6.7
40	4.85	10.17	0.19	84.99	6.4
60	4.74	12.28	0.25	82.98	6.6

ออกซิเจน\* = 100 – ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

#### 4.4 ผลของการไม่ใช้ตัวทำละลาย, ใช้เฮกเซน และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินาในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

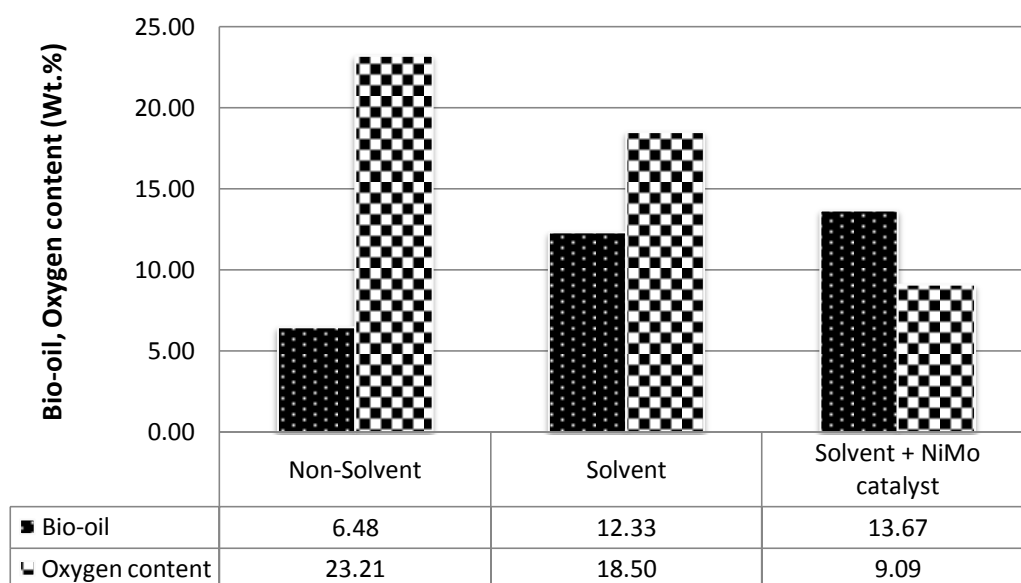
- ภาวะการทดลอง : ความดันแก๊สไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์, อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาที, เฮกเซน 1500 มิลลิลิตร กระถินยักษ์ 250 กรัม, ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม 20 ร้อยละโดยน้ำหนักต่อชีวมวล

ผลการเปรียบเทียบการไม่ใช้ตัวทำละลาย(Non-solvent) ใช้ตัวทำละลาย(Solvent) และการใช้ตัวทำละลายร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม (Solvent + NiMo) แสดงดังรูปที่ 4.4 เมื่อ

เปรียบเทียบผลการใช้ตัวทำละลายพบว่าการใช้ตัวทำละลายทำให้ร้อยละได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.48 เป็น 12.33 โดยน้ำหนัก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่ตัวทำละลายช่วยเพิ่มความสามารถในการแตกตัวของชีวมวลโดยเกิดจากการกระจายความร้อนที่ดีขึ้นผ่านการแผ่ความร้อนจากบริเวณถึงปฏิกรณ์ส่วนที่ติดกับอุปกรณ์ให้ความร้อนมายังตัวทำละลาย และอาจเกิดจากการที่ตัวทำละลายช่วยพาน้ำมันชีวภาพ (ผลิตภัณฑ์แก๊สส่วนที่สามารถควบแน่นได้) จากภายในถึงปฏิกรณ์ออกมาพร้อมกันในช่วงตอนของการแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สกับของแข็งส่วนเหลือได้ดีกว่าการไม่ใช้ตัวทำละลาย (ขั้นตอนดังกล่าวนี้อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 3.3.2) และการใช้ตัวทำละลายทำให้ปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพลดลง เป็นผลมาจากขั้นตอนการแยกตัวทำละลายออกจากน้ำมันชีวภาพนั้นต้องใช้เครื่องระเหยแบบหมุน โดยภาวะของการระเหยที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 800 มิลลิบาร์ ทำให้มีการแยกองค์ประกอบภายในน้ำมันชีวภาพที่น้ำหนักมวลโมเลกุลต่ำออกไปพร้อมกับตัวทำละลาย ซึ่งองค์ประกอบเคมิดังกล่าวส่วนใหญ่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดคาร์บอกซิลิก แอลกอฮอล์ คีโตน แสดงผลการวิเคราะห์ได้โดยตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบการไม่ใช้ตัวทำละลายกับการใช้ตัวทำละลาย พบว่าสารประกอบในกลุ่มที่น้ำหนักโมเลกุลเบาและมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบยังคงมีอยู่ในองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพอยู่มากหากไม่ได้ใช้ตัวทำละลาย โดย Cyclobutanol, Butanoic acid, 2-Pentanone ปรากฏพีคอยู่ที่ RT= 2.317 2.817 3.133 ตามลำดับ จากการทดลองในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าการมีตัวทำละลายอยู่ในปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสนั้นสามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพได้ ส่วนผลของปริมาณออกซิเจนที่ลดลงนั้นเกิดมาจากขั้นตอนการแยกเฮกเซนด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน

ต่อมาเมื่อพิจารณาผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเปรียบเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ใช้ตัวทำละลายเฮกเซนในกระบวนการทั้งคู่) พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยยะของร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ แต่เมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการนั้นจะเกิดการกำจัดออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพผ่านปฏิกิริยาแตกตัวอันเนื่องมาจากความร้อนเพียงอย่างเดียว (thermal cracking) ทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพยังเหลืออยู่มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมนั้นทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากร้อยละ 18.495 เป็น 9.09 โดยน้ำหนัก สอดคล้องผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS พิจารณาจากรูปที่ 4.5 และตารางที่ 4.4 กล่าวคือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพผ่านปฏิกิริยาดีออกซี

จีเนชั่นซึ่งสามารถดึงออกซิเจนออกจากน้ำมันชีวภาพในรูปของน้ำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ส่งผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพมีสัดส่วนขององค์ประกอบทางเคมีที่ไม่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุลมากขึ้นประกอบไปด้วย Ethylbenzene, propyl-Benzene, 1-ethyl-3-methyl-Benzene, 1-methyl-2-(2-propenyl)-Benzene, pentamethyl-Benzene, 1,3,5-triethyl-Benzene ปรากฏพีคอยู่ที่ RT = 4.232 5.15 5.633 8.127 9.824 11.118 ตามลำดับ จากการทดลองในส่วนนี้จึงสรุปได้ว่าการมีตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมอยู่ในปฏิกิริยาไพโรไลซิสนั้นสามารถช่วยลดปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลงได้ ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพ ทำให้น้ำมันชีวภาพมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงที่ดีขึ้น

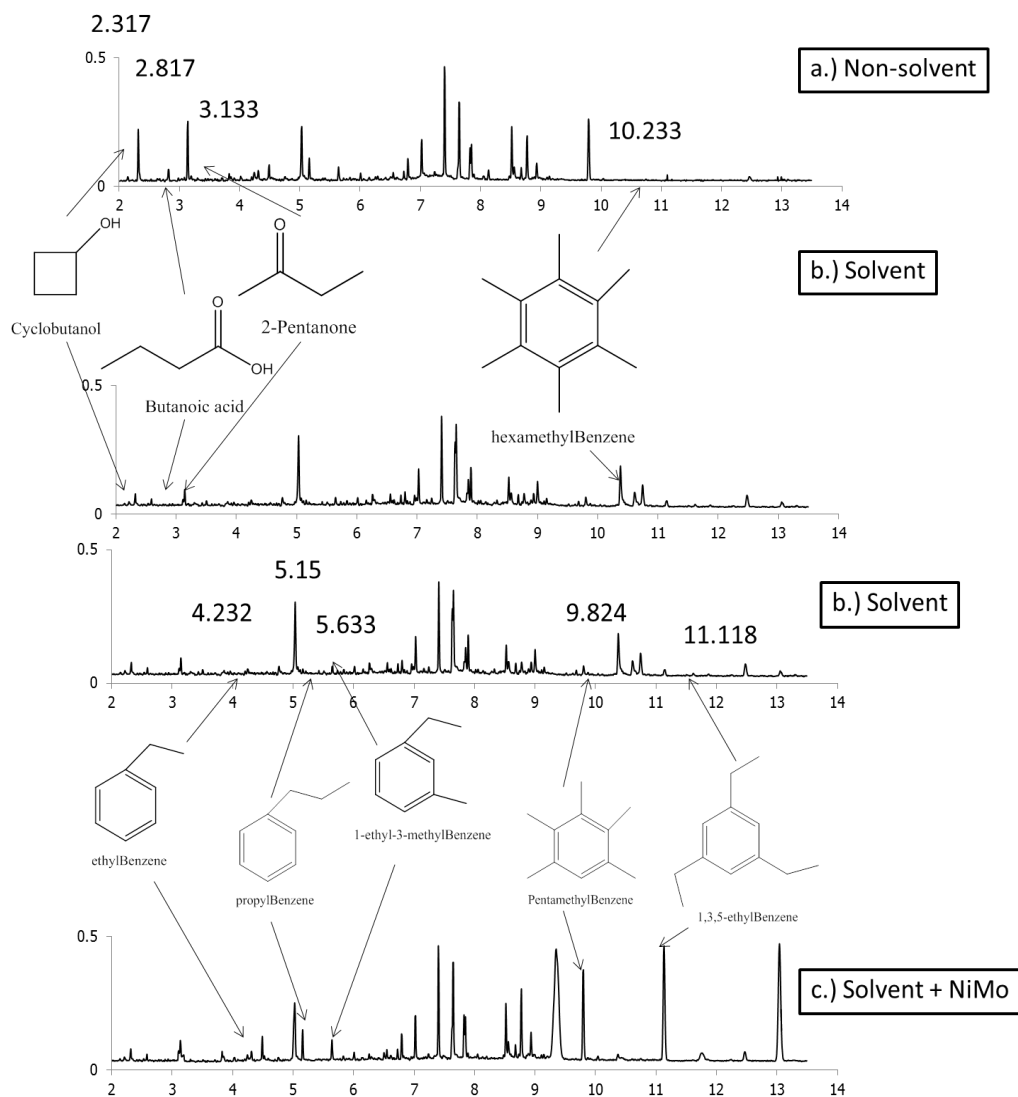


รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบการไม่ใช้ตัวทำละลาย ใช้ตัวทำละลาย และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ต่อร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพ

เมื่อพิจารณาภาพรวมจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS พบว่าได้ลักษณะโครมาโตแกรมแสดงดังรูปที่ 4.5 โดยลักษณะโครมาโตแกรมส่วนใหญ่มีความคล้ายคลึงกัน และสามารถจำแนกองค์ประกอบหลักในน้ำมันชีวภาพได้ แสดงดังตารางที่ 4.5 สารประกอบหลักในน้ำมันชีวภาพโดยรวมนั้นจะประกอบไปด้วย อนุพันธ์ของฟีนอล, อนุพันธ์ของคีโตน, อนุพันธ์ของแอลดีไฮด์ และอนุพันธ์ของเบนซีน โดยสารประกอบในกลุ่มฟีนอลถือเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันชีวภาพโดยอนุพันธ์ของฟีนอลดังกล่าว เกิดจากการสลายตัวของหน่วยฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane unit) ที่มีมากในองค์ประกอบ



ของลิกนินในชีวมวล (Yuan et al., 2007) ผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวที่อุณหภูมิสูง ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพจึงยังคงมีปริมาณมากเพราะอนุพันธ์ของฟีนอลมีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล การดึงออกซิเจนในโมเลกุลของฟีนอลออกจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อช่วยในการแตกสลายพันธะ C-O ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน



**รูปที่ 4.5** โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวที่ไม่ใช้ตัวทำละลาย ใช้ตัวทำละลาย และใช้ตัวทำละลายร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ตารางที่ 4.6 สารประกอบในน้ำมันซีราฟจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS (1)

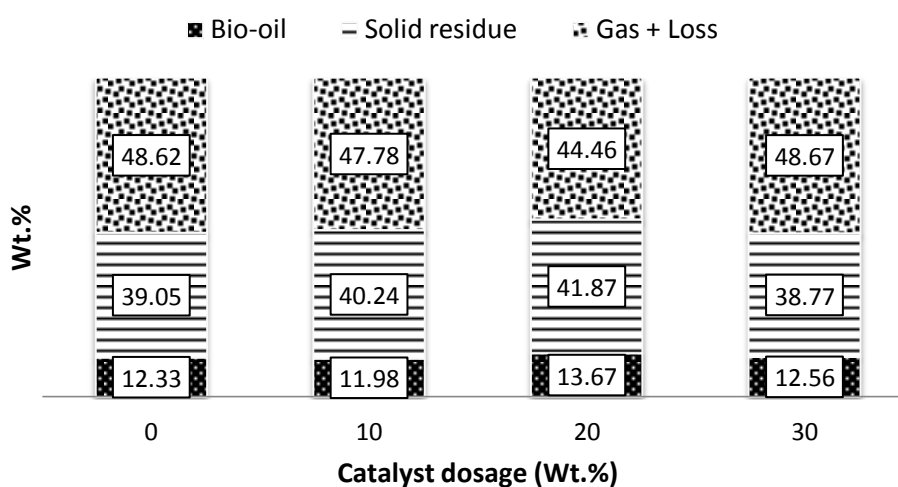
Ret.Time	Name	Mol.Form	%Area		
			Non-Solvent	Solvent	Solvent + NiMo
	Oxygenated compounds				
2.317	Cyclobutanol	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	8.28	2.55	1.53
2.817	Butanoic acid	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	2.46	-	-
3.133	2-Pentanone	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	8.28	3.09	2.16
4.566	2-methyl-2-Cyclopenten-1-one	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O	3.09	-	2.44
5.123	Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	8.74	6.87	4.96
6.792	2-methyl-Phenol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	4.00	-	2.64
6.895	3-methyl-Phenol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	3.37	-	2.48
6.95	2,3,4-trimethyl-2-Cyclopenten-1-one	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	6.82	5.74	3.96
7.649	3-phenyl-2-Propenal	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O	12.37	11.48	3.04
8.033	3-ethenyl-Cyclohexanone	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	-	4.38	-
8.508	2,3,5,6-tetramethyl-Phenol	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	8.74	8.14	4.89
8.617	4-ethyl-Phenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	-	2.45	2.08
8.767	3,4-Dimethyl-benzaldehyde	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	7.37	2.21	5.95
8.925	2,6-dimethoxy-Phenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	3.37	2.59	2.78
9.006	3,4-dimethyl-Phenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	0.00	2.43	-
9.287	4-(1-methylethyl)- Benzaldehyde	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	-	-	4.10
9.792	1-ethyl-4-methoxy-Benzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	9.83	1.57	3.63
10.008	3-methyl-1,2-Benzenediol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-
10.209	2,4,5-trimethyl-Phenol	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	-	-	0.69
10.418	4-methyl-1,2-Benzenediol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-	-	-
10.699	(2-1-methylethyl)-Benzoic acid	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	1.00	3.68	0.79

10.733	3,4-Dimethylbenzaldehyde	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	1.00	3.51	0.79
10.739	4-(2-propenyl)-Phenol	C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	-	-	0.83
11.158	3,5-Diethylphenol	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	0.91	2.57	2.25
12.44	2-(2-Methyl-2-propenyl) phenol	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	-	2.37	1.32
13.027	1-Methoxy-4-(1-methyl-2-propenyl)-benzene	C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O	-	-	8.69
Non oxygenated compounds					
2.44	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-	1.33	0.80
3.582	Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	-	-	-
4.232	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	-	-	1.92
5.15	propyl-Benzene	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub>	3.18	-	2.94
5.633	1-ethyl-3-methyl-Benzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	2.82	-	2.21
8.127	1-methyl-2-(2-propenyl)-Benzene	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub>	-	4.15	3.87
8.289	(2-methyl-1-propenyl)-Benzene	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub>	-	-	-
9.824	pentamethyl-Benzene	C <sub>11</sub> H <sub>16</sub>	-	-	7.40
10.233	hexamethyl-Benzene	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	-	6.11	0.99
10.367	1-methyl-Naphthalene	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	-	5.32	-
11.118	1,3,5-triethyl-Benzene	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	-	-	9.19
12.458	3-Ethyl-1,2,4,5-tetramethyl-benzene	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	-	-	-
12.958	1-(2-butenyl)-2,3-dimethyl-Benzene	C <sub>12</sub> H <sub>16</sub>	-	-	8.69

#### 4.5 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

- ภาวะการทดลอง : ความดันแก๊สไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์, อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาที, เฮกเซน 1500 มิลลิลิตร กระถินยักษ์ 250 กรัม

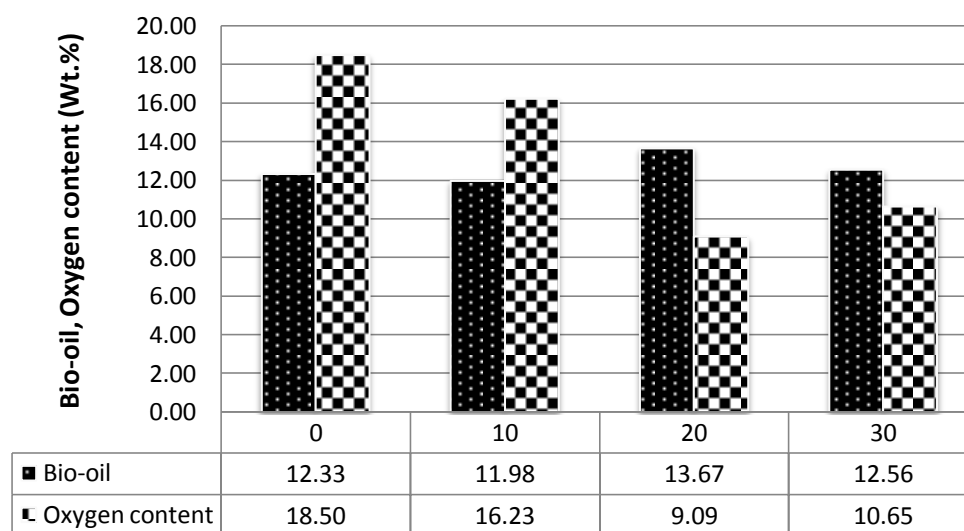
ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพแสดงดังรูปที่ 4.6 จากการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด แต่พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนั้นทำให้ได้ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดอยู่ที่ร้อยละ 44.46 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

เมื่อพิจารณาปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพโดยพิจารณาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวทำให้แนวโน้มปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลดลง จากร้อยละ 18.50 เป็น 9.09 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อทำการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ไม่ทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลง แสดงให้เห็นการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปอาจไม่ทำให้

ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลดลง ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปนั้นอาจไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาการเร่งที่เหมาะสมก็เป็นไปได้ หรืออาจเป็นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมนั้นสามารถเกิดโค้กได้ง่าย ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมประสิทธิภาพ ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาจึงลดลง ในการศึกษาในหัวข้อถัดจึงเลือกใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.7 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

#### 4.6 ผลของปริมาณความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น

- **ภาวะการทดลอง :** ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์, อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาที, อัตราส่วนระหว่างเฮกเซนต่อชีวมวล 4 ต่อ 1, ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม 20 ร้อยละโดยน้ำหนักต่อชีวมวล

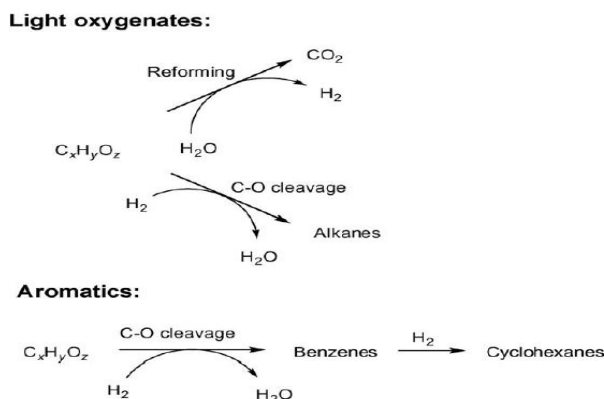
จากการศึกษาเบื้องต้นจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ไฮโดรเจนมีความสามารถในการช่วยแตกพันธะแบบใช้ไฮโดรเจนร่วมในกระบวนการ (Hydro-cracking) ซึ่งสามารถตัดสายโซ่ยาวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของชีวมวล เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediates) ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ สารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา ได้แก่ สารอนุมูลอิสระแโรมาติก (Aromatic free radical, Ar<sup>•</sup>) ที่แตกตัวจากลิกนิน จะถูกทำให้เสถียร

อย่างรวดเร็วด้วยไฮโดรเจนหรืออนุมูลอิสระไฮโดรเจน (Hydrogen free radical,  $H^\cdot$ ) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่เสถียรโดยผ่านกลไกดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 (Demirbas, 2000)



นอกจากนี้แก๊สไฮโดรเจนยังสามารถช่วยกำจัดออกซิเจนออกมาในรูปของน้ำ ผ่านทางปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 กล่าวคือ สารประกอบออกซิเจนที่ไม่เสถียรเกิดการสลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจน เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนหรืออนุมูลอิสระของไฮโดรเจนเข้าไปจับกับออกซิเจนที่หลุดออกมาในรูปของน้ำ (Courtney et al., 2009) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ไม่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น สารประกอบกลุ่มแอลเคน เบนซีน หรือสารประกอบแอมโรมาติก เป็นต้น

ในงานวิจัยมีการตั้งสมมุติฐานเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพิจารณาผลของความดันรวมของระบบที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากความดันเริ่มต้นของแก๊สไฮโดรเจนที่เปลี่ยนแปลง ในแต่ละภาวะของการทดลอง โดยการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว ถือว่าเป็นการเปลี่ยนของสถานะของสารในเฟสของแข็งและของเหลว และของเหลวภายในระบบยังถูกควบคุมโดยความดันแก๊สไฮโดรเจนที่อัดไว้ที่ 10 บาร์อีกด้วย ทำให้ความดันรวมของระบบที่เปลี่ยนแปลงไม่ส่งผลหรืออาจส่งผลเพียงเล็กน้อยต่อผลการทดลองที่จะเกิดขึ้น จึงขอที่จะไม่พิจารณาผลของความดันรวมของระบบมา ณ ที่นี้

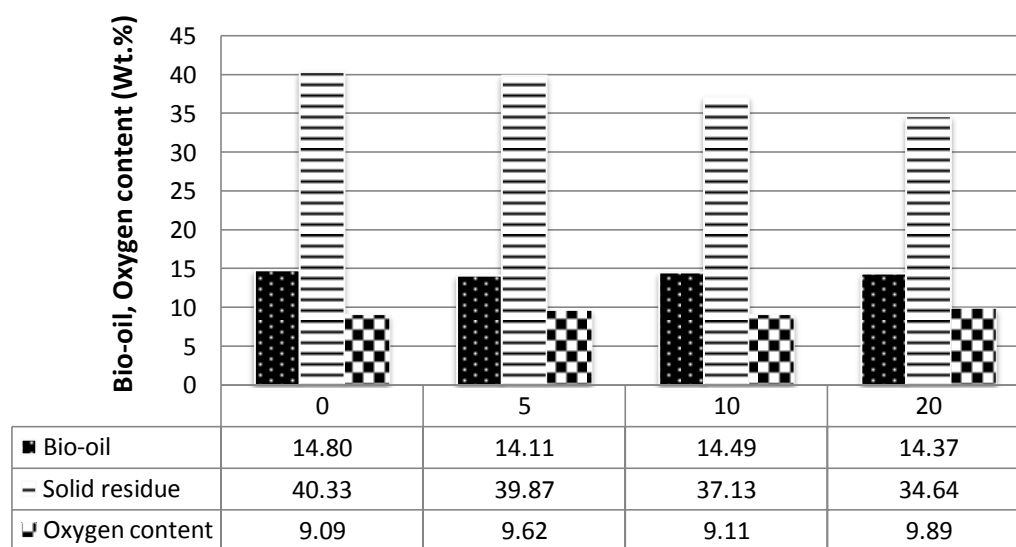


รูปที่ 4.8 กลไกการกำจัดออกซิเจนของสารประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ

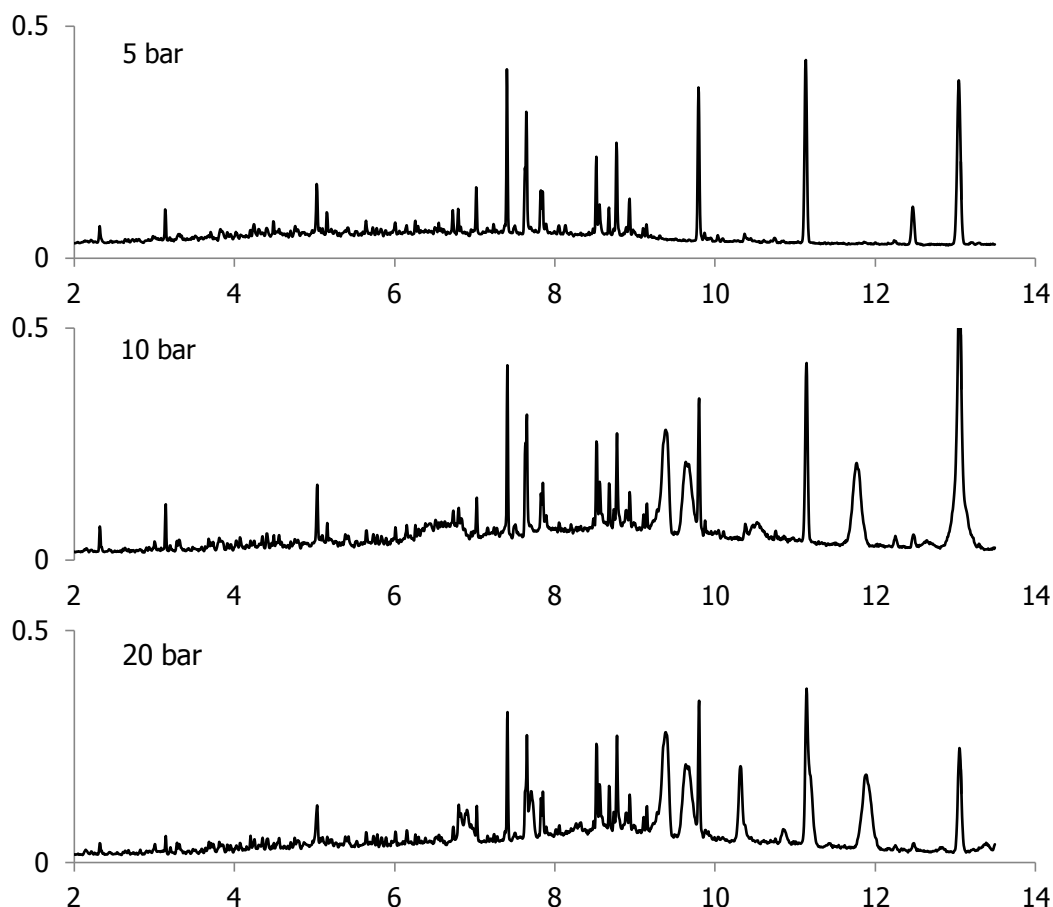
(Courtner et al., 2009)

ผลของปริมาณความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นในส่วนของร้อยละการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ และปริมาณออกซิเจนแสดงดังรูปที่ 4.8 โดยพบว่าร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ ไม่เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง อันเนื่องมาจากในภาวะของการทดลองใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่น้อยเกิน (0 นาที) จึงไม่เห็นผลของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่จะเข้าไปช่วยในปฏิกิริยาการแตกตัวที่มีไฮโดรเจนในกระบวนการ โดยเมื่อนำน้ำมันชีวภาพที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS ทำให้ได้ลักษณะโครมาโตแกรมแสดงดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพมีความคล้ายคลึงกัน ปรากฏพีคขององค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน (ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 10 20 บาร์) ทำให้ในหัวข้อการทดลองผลของตัวเร่งปฏิกิริยา (หัวข้อถัดไป) นั้นจะเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนเป็น 60 นาที เพื่อพิจารณาผลดังกล่าวเพิ่มเติมอีกครั้ง

เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของของแข็งส่วนเหลือ พบว่ามีแนวโน้มลดลงจากร้อยละ 40.33 เป็น 34.64 โดยน้ำหนักเมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นจาก 0 เป็น 20 บาร์ สามารถอธิบายได้ โดยการที่แก๊สไฮโดรเจนนั้นมีความสามารถในการเพิ่มเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดจากการสลายตัวของชีวมวล โดยเฉพาะส่วนที่เกิดจากการแตกตัวขั้นที่สองนั้นจะมีน้ำหนักโมเลกุลขนาดเล็กซึ่งเป็นลักษณะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยารีพอลิเมอร์ไซเซชันกลับไปเป็นของแข็งส่วนเหลืออีกครั้ง (Mehmetet al., 2012) ดังนั้นแก๊สไฮโดรเจนจึงทำให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งส่วนเหลือลดลง



รูปที่ 4.9 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อของแข็งส่วนเหลือ ร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพ จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว



รูปที่ 4.10 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวที่ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่แตกต่างกัน

#### 4.7 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

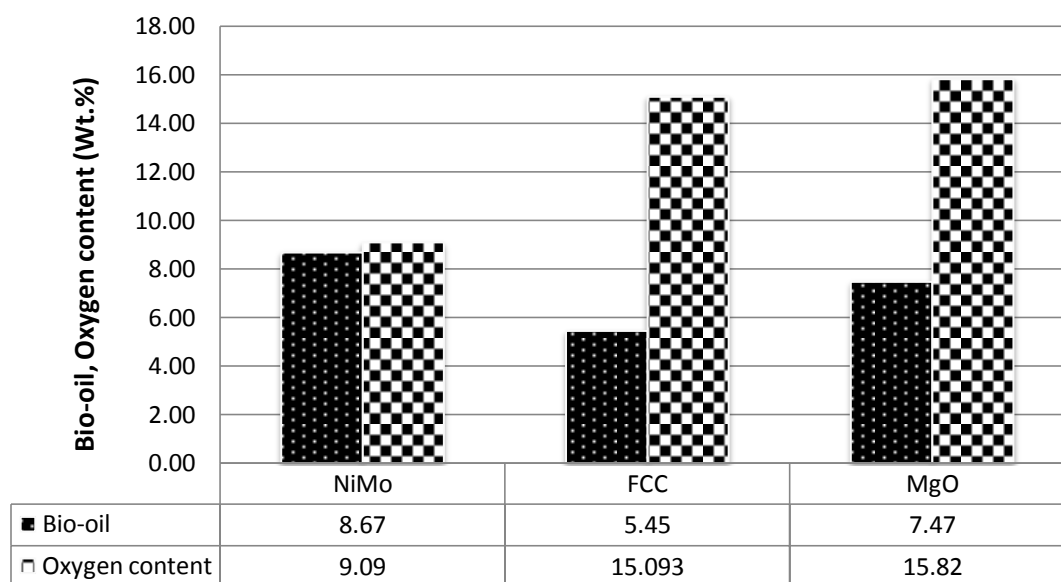
- การทดลอง : ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์, ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 20 บาร์ อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการให้ความร้อน 60 นาที, เฮกเซน 1500 มิลลิลิตร กระถินยักษ์ 250 กรัม, ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของชีวมวล

ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 4.10 จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการเปลี่ยนชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาจากนิกเกิลโมลิบดีนัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและแมกนีเซียมออกไซด์นั้น พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมนั้นจะให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงที่สุดคือร้อยละ 8.67 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา



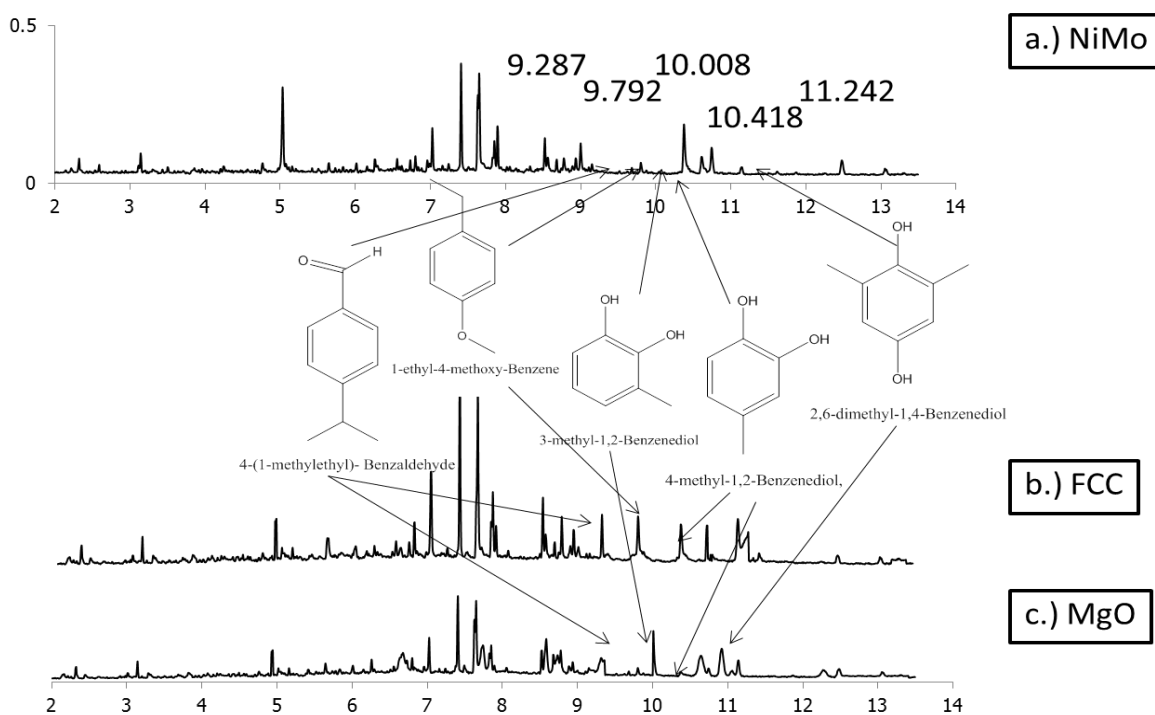
แมกนีเซียมออกไซด์อยู่ที่ร้อยละ 7.47 โดยน้ำหนักและตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วอยู่ที่ร้อยละ 5.45 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรดและเบส (เอฟซีซีใช้แล้วและแมกนีเซียมออกไซด์ตามลำดับ) นั้นจะทำให้มีโอกาสเกิดการแตกตัวของน้ำมันชีวภาพผ่านพื้นที่ผิวบริเวณที่เป็นกรดและเบสได้สูงขึ้น จึงส่งผลทำให้ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพต่ำกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และเนื่องมาจากการศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยามีการเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนจากภาวะที่ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดที่ 0 นาที เป็น 60 นาที ภาพรวมของร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจึงมีแนวโน้มลดลงจากเดิม (จากเดิมสูงสุดที่ร้อยละ 13.67 โดยน้ำหนัก)

ส่วนผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งได้แก่ นิกเกิลโมลิบดีนัม แมกนีเซียมออกไซด์ และเอฟซีซีใช้แล้วทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มลดลง หากเทียบกับการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะทำให้ได้ปริมาณออกซิเจนต่ำที่สุดอยู่ร้อยละ 9.09 โดยน้ำหนัก ส่วนแมกนีเซียมออกไซด์ปริมาณออกซิเจนอยู่ที่ร้อยละ 15.821 โดยน้ำหนัก และเอฟซีซีใช้แล้วอยู่ที่ร้อยละ 15.093 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.11 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้และปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

เมื่อพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS ของน้ำมันชีวภาพในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันในรูปที่ 4.12 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพมีความแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาแต่ละองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพในตารางที่ 4.7 ภาพรวมขององค์ประกอบทางเคมีในน้ำมันชีวภาพยังคงเป็นอนุพันธ์ของสารประกอบฟีนอล คีโตน แอลดีไฮด์ และเบนซีน ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแต่ละชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.12 โคโรมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสในเฟสของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

โดยหากพิจารณาสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนในองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลจะพบว่าไม่ปรากฏพีคของ 4-(1-methylethyl)- Benzaldehyde, 1-ethyl-4-methoxy-Benzene, 3-methyl-1,2-Benzenediol, 4-methyl-1,2-Benzenediol, 2,6-dimethyl-1,4-Benzenediol ที่ RT 9.287 9.792 10.008 10.418 11.242 ตามลำดับ ซึ่งโมเลกุลของสารประกอบดังกล่าวมีออกซิเจนในโมเลกุล 2 อะตอม เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม เป็นปฏิกิริยาที่สามารถดึงออกซิเจนออกจากสารประกอบออกซิเจนออกมา

อยู่ในรูปของน้ำและเมื่อพิจารณาสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม พบว่ามีสัดส่วนจำนวนมากกว่าหากเทียบกับใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วหรือแมกนีเซียมออกไซด์ ยกตัวอย่างเช่น Ethylbenzene ที่ RT = 4.232 เป็นต้น ต่อมาเมื่อพิจารณาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าว มีความสามารถในการดึงออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพผ่านพื้นที่ผิวที่เป็นกรด โดยผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Stefanidis et al., 2011) ทำให้ออกซิเจนถูกกำจัดในรูปของโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้อาจมีพื้นที่ผิวส่วนที่เป็นกรดต่ำและมีอาจไคเกาะอยู่บนพื้นที่ผิวบริเวณเร่ง แม้จะทำการเผาไล่ไคที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสแล้วก็ตาม จึงทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาผ่านปฏิกิริยาดังกล่าวไม่เห็นผลเท่าไร ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์นั้นมีความสามารถในการดึงออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพผ่านพื้นที่ผิวที่เป็นเบส โดยผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Stefanidis et al., 2011) ทำให้ออกซิเจนถูกกำจัดในรูปของโมเลกุลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้ดีในภาวะที่มีการใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ เพราะน้ำจะสามารถแตกตัวกลายเป็นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH<sup>-</sup>) ได้ส่งผลให้การเร่งปฏิกิริยาผ่านพื้นที่ผิวที่เป็นเบสมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้เฮกเซนจึงทำให้ประสิทธิภาพดังกล่าวถูกลดลงไป ซึ่งเมื่อพิจารณาผลขององค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ในส่วนของสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบจะพบว่ามีสัดส่วนดังกล่าวมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ จึงทำให้ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมีค่าต่ำกว่า

ผลการทดลองดังกล่าวจึงชี้ให้เห็นว่าหากมีการใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพ คือ นิกเกิลโมลิบดีนัม

ตารางที่ 4.7 สารประกอบในน้ำมันซีวภาพจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS (2)

Ret.Time	Name	Mol.Form	%Area		
			NiMo	FCC	MgO
Oxygenated compounds					
2.317	Cyclobutanol	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	2.61	2.84	2.48
3.133	2-Pentanone	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	3.17	2.60	3.41
5.123	Phenol	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> O	10.28	2.86	1.66
6.555	2,3-dimethyl-2-Cyclopenten-1-one	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> O	-	3.73	2.54
6.792	2-methyl-Phenol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	2.46	-	3.57
6.895	3-methyl-Phenol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	1.95	-	-
6.95	2,3,4-trimethyl-2-Cyclopenten-1-one	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	2.44	-	7.31
7.649	3-phenyl-2-Propenal	C <sub>9</sub> H <sub>8</sub> O	12.84	-	5.40
8.033	3-ethenyl-Cyclohexanone	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> O	6.05	2.47	6.08
8.508	2,3,5,6-tetramethyl-Phenol	C <sub>10</sub> H <sub>14</sub> O	3.77	7.58	5.23
8.617	4-ethyl-Phenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	2.52	3.58	6.36
8.767	3,4-Dimethyl-benzaldehyde	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	-	6.91	5.23
8.925	2,6-dimethoxy-Phenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	2.65	5.20	3.27
9.006	3,4-dimethyl-Phenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O	4.27	-	1.89
9.287	4-(1-methylethyl)- Benzaldehyde	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O	-	7.22	3.97
9.792	1-ethyl-4-methoxy-Benzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	-	6.28	2.30
10.008	3-methyl-1,2-Benzenediol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-	-	8.32
10.209	2,4,5-trimethyl-Phenol	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O	6.26	-	-
10.418	4-methyl-1,2-Benzenediol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	-	5.92	1.92
10.699	(2-1-methylethyl)-Benzoic acid	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	3.78	-	4.35
10.733	3,4-Dimethylbenzaldehyde	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> O	3.60	5.77	2.24

10.739	4-(2-propenyl)-Phenol	$C_{11}H_{12}O_2$	3.52	5.77	2.10
11.158	3,5-Diethylphenol	$C_{10}H_{14}O$	-	-	3.58
11.242	2,6-dimethyl-1,4-Benzenediol	$C_8H_{10}O_2$	-	-	2.87
12.44	2-(2-Methyl-2-propenyl) phenol	$C_{10}H_{12}O$	2.43	-	2.15
13.027	1-Methoxy-4-(1-methyl-2-propenyl)-benzene	$C_{11}H_{14}O$	1.55	1.62	1.64
Non oxygenated compounds					
2.38	2-methyl-Pentane	$C_6H_{14}$	1.95	1.52	-
2.44	n-Hexane	$C_6H_{14}$	1.58	-	-
4.232	Ethylbenzene	$C_8H_{10}$	1.80	-	-
5.15	propyl-Benzene	$C_8H_{12}$	1.78	2.86	2.26
5.633	1-ethyl-3-methyl-Benzene	$C_9H_{12}$	2.14	4.10	-
9.824	pentamethyl-Benzene	$C_{11}H_{16}$	2.65	6.96	2.07
10.367	1-methyl-Naphthalene	$C_{11}H_{10}$	6.26	5.74	2.24
11.118	1,3,5-triethyl-Benzene	$C_{12}H_{18}$	1.70	6.65	3.58
12.458	3-Ethyl-1,2,4,5-tetramethyl-benzene	$C_{12}H_{18}$	2.43	1.84	-
12.958	1-(2-butenyl)-2,3-dimethyl-Benzene	$C_{12}H_{16}$	1.55	-	-

ตารางที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้ในแต่ละกระบวนการ โดยพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมภายใต้ภาวะความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์, ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 20 บาร์อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการให้ความร้อน 60 นาที, อัตราส่วนระหว่างเฮกเซนต่อชีวมวล 4 ต่อ 1, ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 ร้อยละโดยน้ำหนักต่อชีวมวล จะทำให้น้ำมันชีวภาพมีปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจนสูงสุด และมีปริมาณออกซิเจนต่ำที่สุด ส่งผลทำให้ค่าความร้อนมีค่าสูงถึง 40.40 เมกะจูล/กิโลกรัม โดยเมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดและปริมาณน้ำของแต่ละกระบวนการ นิกเกิลโมลิบดีนัม สามารถปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพได้ดี

ที่สุด กล่าวคือ มีค่าความเป็นกรดต่ำที่สุดอยู่ที่ 7.963 mgKOH/g และมีปริมาณน้ำต่ำที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 0.23 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้ในแต่ละกระบวนการ

คุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพ	คุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้ใน		
	แต่ละกระบวนการ		
	Ni-Mo*	MgO*	FCC*
คาร์บอน(Wt.%)	80.07	75.00	76.24
ไฮโดรเจน(Wt.%)	10.41	7.991	7.61
ไนโตรเจน (Wt.%)	0.43	1.186	1.05
ออกซิเจน(Wt.%)	9.09	15.821	15.903
ค่าความร้อน (MJ/KG)	40.40	34.03	34.04
ค่าความเป็นกรด(mgKOH/g)	7.963	15.32	14.62
ปริมาณน้ำ (Wt.%)	0.23	0.44	0.58

\*ใช้ภาวะความดันแก๊สไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์, ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 20 บาร์อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการให้ความร้อน 60 นาที, เฮกเซน 1500 มิลลิลิตรกระถินยักษ์ 250 กรัม, ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 ร้อยละโดยน้ำหนักต่อชีวมวล

โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ที่ทำการศึกษการปรับปรุงคุณภาพของ Guaiacol(M.V. Bykova et al) สามารถอธิบายกลไกของการเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ Guaiacol ได้ดังรูปที่ 4.13 โดยลักษณะโครงสร้างทางเคมีของ Guaiacol ประกอบไปด้วยหมู่เมทอกซีและไฮดรอกซีเกาะอยู่บนวงเบนซีนี หมู่ทั้งสองถือเป็นหมู่ที่มีอยู่มากในสารประกอบอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพ ดังนั้นจึงนำเอา Guaiacol มาศึกษาผ่านการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โดยสามารถเสนอกลไกการเกิดปฏิกิริยาในการลดปริมาณออกซิเจนดังกล่าวได้ดังนี้ จากกลไกนี้เป็นการช่วยยืนยันผลการทดลองก่อนหน้านี้ที่อธิบายการใช้นิกเกิลโมลิบดีนัมในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพทำให้มีปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลดลง



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากาโรไลนีสในเฟสของเหลวโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายโดยศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการกาโรไลนีสในเฟสของเหลวได้แก่ อุณหภูมิ 325–400 องศาเซลเซียส, ระยะเวลาในการให้ความร้อน 0–60 นาที, การใช้ตัวทำละลาย ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 – 30 โดยน้ำหนัก, ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัม เฮกซีซีไอ แมกนีเซียมออกไซด์, ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 - 20 บาร์, ที่มีต่อร้อยละผลได้และ องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

##### 5.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกาโรไลนีสในเฟสของเหลวจาก 325 เป็น 375 องศาเซลเซียส ร้อยละ ผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ให้ค่าร้อยละผลได้ของ น้ำมันชีวภาพสูงสุด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการกาโรไลนีสในเฟสของเหลวจาก 375 เป็น 400 องศา เซลเซียส ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มลดลง และปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มลดลง เช่นเดียวกัน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพที่ทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้สูง คือ 375 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพที่ทำให้ได้ปริมาณออกซิเจนต่ำ คือ 400 องศาเซลเซียส

ส่วนการเพิ่มระยะเวลาในการให้ความร้อนจาก 0 เป็น 60 นาที ทำให้อัตราผลได้ของน้ำมัน ชีวภาพมีแนวโน้มลดลงและยังทำให้ปริมาณออกซิเจนมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นระยะเวลาที่ เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้สูง คือ 0 นาที ส่วนระยะเวลาที่เหมาะสมใน การผลิตน้ำมันชีวภาพเพื่อให้ได้ปริมาณออกซิเจนต่ำ คือ 60 นาที

หากพิจารณาความต้องการจากค่าความร้อนที่สูงที่สุด อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 400 องศา เซลเซียสและระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาที



โดยในขั้นตอนการทดลองดังกล่าวต้องการภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตน้ำมันชีวภาพเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้สูงที่สุดจึงเลือกภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการให้ความร้อน 0 นาทีในการศึกษาต่อไป

### 5.1.2 ผลของการไม่ใช้ตัวทำละลาย, ใช้ตัวทำละลายในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของเหลว

การใช้ตัวทำละลายช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายความร้อนเป็นการเพิ่มความสามารถในการแตกตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่ภายในชีวมวล ส่งผลทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้น และยังช่วยลดปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลงซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนการแยกตัวทำละลาย ส่วนการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนสำคัญในการช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพโดยพบว่าปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัด

### 5.1.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำให้น้ำมันชีวภาพมีร้อยละผลได้สูงที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ทำให้น้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มลดลงและที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 20 โดยน้ำหนักนั้นยังทำให้น้ำมันชีวภาพมีปริมาณออกซิเจนต่ำที่สุด

### 5.1.4 ผลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม, เอฟซีซีใช้แล้ว และแมกนีเซียมออกไซด์ ไม่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพแต่ในขณะที่ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มลดลงโดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม จะให้ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุด และให้น้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำสุด ดังนั้นการใช้นิกเกิลโมลิบดีนัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสในเฟสของ สามารถช่วยลดปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ และยังทำให้น้ำมันชีวภาพมีคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงดีขึ้น โดยมีปริมาณน้ำและค่าความเป็นกรดต่ำที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.21 ศึกษาการใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติมโดยเฉพาะในกลุ่มของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวที่มีความเป็นกรด และเป็นเบส อื่นๆ
- 5.22 ศึกษาการใช้ตัวทำละลายที่เป็นตัวทำละลายเหลือใช้ ราคาถูก หลีกเลี่ยงการใช้ตัวทำละลายที่มีราคาแพง เช่น กลีเซอรอล จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล หรืออาจใช้น้ำมันเตามาเป็นตัวทำละลายแทน
- 5.23 อธิบายผลการทดลองทางด้านกลไกการเกิดปฏิกิริยา โดยอาศัย Model compound เพิ่มเติมในภาวะการทดลองที่สนใจศึกษา

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

โครงการประเทศสีเขียว. กระถินยักษ์. [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.greencoun.com> [30 มีนาคม 2555]

นคร ทิพยาวงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2552.

มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. ชีวมวล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.apecthai.org> [2555, มีนาคม 28].

ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. ชีวมวล. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ คิว พรินท์ แมเนจเม้นท์, 2549.

ศรัญญา ทองทับ. รัฐหนุนเอกชนปลูกไม้โตเร็วผลิตเชื้อเพลิงป้อนโรงไฟฟ้า. กรุงเทพฯธุรกิจ, 2553.

### ภาษาอังกฤษ

Akhtar, J. Aishah, N., and Amin, S. A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass Renewable and Sustainable Energy Reviews 15(2011) : 1615-1624.

Akhtar, J., Kuang, S. K., and Amin, N. S. Liquefaction of empty palm fruit bunch ( EPFB ) in alkaline hot compressed water. Renewable Energy 35 (2010) : 1220–1227.

Babich, I.V., Hulst, M. V. D., Lefferts, L., Moulijn, J.A., O'Connor, P., and Seshan, K. Catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality liquid bio-fuels. Biomass and bioenergy 35 (2011) : 3199-3207.

Bonn, G., Concini, R., and Bobleter, O. Hydrothermolysis - a new Process for the Utilization of Biomass. Wood Sci. Technol 17(1983):195-202.

Bykova, M.V. Ni-based sol-gel catalysts as promising systems for crude bio-oil upgrading: Guaiacol hydrodeoxygenation study. Applied Catalysis B: Environmental 113 (2012) : 296–307

Courtney, A.F. Bio-oil upgrading over platinum catalysts using in situ generated hydrogen. Applied Catalysis A General 358 (2009) : 150–156.

- Courtney, A.F., Tonya, M., Yaying, J., Mark, C., Czarena, C., and Sam, A.L. Bio-oil upgrading over platinum catalysts using in situ generated hydrogen. Applied Catalyst A: General 358 (2009): 150-156
- Czernik, S., and Bridgwater, A.V. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. Energy & Fuels 18 (2004): 590-598.
- Demirbas, A. Calculation of higher heating value of biomass fuels. Fuel 76 (1997): 431-434.
- Edward, F. Review catalytic hydrodeoxygenation. Applied Catalyst A: General 199 (2000): 147-190.
- Encyclopedia of earth Carbon cycle [Online]. 2012. Available from : <http://www.eoearth.org> [2012, March 28].
- Jena, U., and Das, K.C. Comparative evaluation of thermochemical liquefaction and pyrolysis for bio-oil production from microalgae. Energy Fuels 25(2011): 5472-5482.
- Jena, U., and Das, K.C., Effect of operating conditions of thermochemical liquefaction on biocrude production from *Spirulina plantensis*. Bioresource Technology 102(2011): 6221-6229.
- Liu, A., Park, Y.K., Huang, Z., Wang, B., Ankumah, R.O., and Biswas, P.K. Product identification and distribution from hydrothermal conversion of walnut shells. Energy & Fuels 30 (2006) : 446-54
- Mehmet, K.A. Hydrothermal liquefaction of cornelian cherry stones for bio-oil production. Bioresource Technology 110(2012): 682-687.
- Ping, Z. S., Jie, Y. Y., Zhengwei, R., and Tingchen, L. Study of Hydrodeoxygenation of Bio-Oil from the Fast Pyrolysis of Biomass. Energy Sources 25(2003):57-65.
- Qiang, L. Wen-zhi, L., and Xi-feng, Z. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils Energy conversion and management 50 (2009) : 1376-1383.
- Qi, Z., Jie, C., Tiejun, W., and Ying, X. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. Energy Conversion and Management 48 (2007): 87-92.

- Robert, H. Williams. Eric, D., and Larson, A. Comparison of direct and indirect liquefaction technologies for making fluid fuels from coal. Energy for Sustainable Development. 7(December 2003): 103-129.
- Stefanidis, S.D. Kalogiannis, K.G. Lliopoulou, E.F. Lappas, A.A., and Pilavachi, P.A. In-situ upgrading of biomass pyrolysis vapors: Catalyst screening on a fixed bed reactor Bioresource Technology 102(2001): 8261-8267.
- Toor, S. S., Rosendahl, L., and Rudolf, A. Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. Energy 36 (2011): 2328-2342.
- Xu, Y. Wang, T. Ma, L. Zhang, Q., and Wang, L. Upgrading of liquid fuel from the vacuum pyrolysis of biomass over the Mo-No/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst Biomass and Bioenergy 33(2009): 1030-1036.
- Xu, Y. Wang, Y. Ma, L. Zhang, Q., and Liang, W. Upgrading of the liquid fuel from fast pyrolysis of biomass over MoNi/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts Applied Energy 87(2010) : 2886-2891
- Yang, Y., Gilbert, A., and Xu, C. Hydrodeoxygenation of bio crude in supercritical hexane with sulfide CoMo and CoMoP catalysts supported on MgO: A model compound study using phenol. Applied Catalyst A: General 360 (2009): 242-249.
- Zhang, L. Xu, C., and Champagne, P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass Energy Conversion and Management 51(2010) : 969-982.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**  
**วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล**

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

- 1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (drying oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (desicator) ที่ไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
- 2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่างแกลบ
- 3) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
- 4) นำถาดอลูมิเนียมออกมาที่ไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

สูตรการคำนวณ

$$M = 100(W_1 - W_2) / W$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

$W_1$  = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.2 ถ้ำ (Ash): ASTM D3174

### วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบลพร้อมฝานในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ซึ่งนำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาน
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบล ประมาณ 1 กรัม
- 3) นำไปเผาบนตะเกียงบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่ครุชชีเบลพร้อมฝานในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
- 5) นำครุชชีเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ซึ่งนำหนักพร้อมบันทึกผล

### สูตรการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

- เมื่อ A = ร้อยละของถ้ำ
- $W_3$  = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝานที่มีถ้ำ (กรัม)
- $W_4$  = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาน (กรัม)
- W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

## 1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

### วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบลพร้อมฝานในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝาน บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย



- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชชีเบิ้ลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 5) หย่อนครุชชีเบิ้ลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
- 6) นำครุชชีเบิ้ลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้นประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W]$$

เมื่อ V	=	ร้อยละของสารระเหย
$W_5$	=	น้ำหนักของครุชชีเบิ้ลพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
$W_6$	=	น้ำหนักของครุชชีเบิ้ลพร้อมฝาพร้อมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
M	=	ร้อยละของความชื้น

#### 1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่การคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - \text{ร้อยละความชื้น} - \text{ร้อยละเถ้า} - \text{ร้อยละสารระเหย}$$

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันชีวภาพ

#### 1.1 การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS)

GC-MS เป็นเทคนิคที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารได้อย่างค่อนข้างแม่นยำโดยอาศัยการเปรียบเทียบ fingerprint ของเลขมวล (mass number) ของสารตัวอย่างนั้นๆกับข้อมูลที่มีอยู่นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังมีความสามารถในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (qualitative analysis) ได้อย่างถูกต้อง Mass Spectrometer เป็น detector ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างโดยอาศัยกลไกคือโมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยเครื่อง GC นั้นจะถูกไอออไนซ์ในสภาวะที่เป็นสุญญากาศแล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (mass number) เทียบกับข้อมูลอ้างอิงแล้วแปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้นๆ

ใช้สำหรับแยกสารผสมที่มีคุณสมบัติที่สามารถเป็นแก๊สได้โดยใช้เฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊สเช่นกัน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารผสมเช่นฮีเลียมจะทำหน้าที่เป็นตัวพา (Carrier) สารผสมส่วนเฟสอยู่กับที่ อาจจะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์เมื่อทั้งตัวพาและสารผสมเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นี้ เฟสอยู่กับที่ในคอลัมน์จะดึงดูดด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตตามความเป็นขั้วของสารกับโมเลกุลในสารผสมทำให้องค์ประกอบในสารผสมถูกพาไปด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันสารผสมก็จะแยกออกจากกันเทคนิคโครมาโตกราฟีแบบแก๊สนี้มักใช้ในการวิเคราะห์ทั้งคุณภาพและปริมาณในหลายด้านอาทิเช่นทางด้านอาหารยารายาฆ่าแมลงน้ำมันหอมระเหยทางการแพทย์ปิโตรเลียมและทางสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

ข้อดีของเครื่อง GC-MS คือ

- สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบทั่วไปและแบบเฉพาะเจาะจง
- ให้ sensitivity ที่สูง
- สามารถบ่งชี้ถึงชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้
- สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

ข้อเสียของเครื่อง GC-MS คือ

- ราคาแพง

- ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องสูง

หลักการการทำงานของเครื่อง GC-MS นั้นเริ่มจากนำตัวอย่างชนิดเข้าเครื่อง GC จากนั้นสารก็จะถูกแยกออกเป็นองค์ประกอบต่างๆเมื่อผ่านเข้าสู่ column ที่อยู่ใน oven จากนั้นองค์ประกอบใดที่ถูกแยกออกมาจาก column ก่อนก็จะผ่านเข้าไปในส่วนส่วนของเครื่อง MS ซึ่งมีสถานะเป็นสุญญากาศก่อนแล้วเข้าไปเจอกับ ion source ซึ่งจะทำหน้าที่ไอออไนซ์โมเลกุลที่ผ่านเข้ามาให้กลายเป็นประจุ จากนั้นประจุเหล่านี้ก็จะเดินทางผ่านเครื่องคัดเลือกและแยกแยะขนาดของประจุ (mass analyzer) เพื่อดูว่าประจุเหล่านั้นประกอบไปด้วยขนาดมวลเท่าใดบ้างก่อนที่จะเดินทางเข้าสู่เครื่องตรวจวัดเพื่อทำการตรวจหาปริมาณของประจุแล้วแปลผลออกมาเป็นปริมาณขององค์ประกอบแต่ละตัวที่มีอยู่ในสารตัวอย่างเพราะปริมาณออกซิเจนส่งผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพมากที่สุดโครงการพิเศษนี้จึงมุ่งเน้นปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพเพื่อพัฒนาความเสถียรของน้ำมันชีวภาพด้วยวิธี Hydrotreatment ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาให้น้ำมันมีปริมาณออกซิเจนน้อยลงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิหพันธ์ที่มีการเติมโปรโมเตอร์ภายใต้ความดันและอุณหภูมิสูงตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะทรานซิชันที่กระจายบนตัวรองรับและมีการศึกษาอิทธิพลที่แตกต่างกันของโปรโมเตอร์สองชนิด

### 1.1.1 แมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนผสมในตัวอย่าง และเพื่อการพิสูจน์เอกลักษณ์สาร ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยรูปแบบของการแตกไอออน (fragmentation pattern) อันเนื่องมาจากการเกิด ionization ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะแสดงความแตกต่างของค่ามวลต่อประจุออกมา (m/z) กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง ion abundance และ m/z ของ fragment ion ต่างๆ ที่เกิดขึ้นถูกเรียกว่า mass spectrum ซึ่งให้ข้อมูลทางโครงสร้างเพื่อใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลจากเทคนิคอื่นๆร่วมด้วย

### 1.1.2 หลักการของแมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry)

โมเลกุลถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนภายในบริเวณ ionization chamber ซึ่งถูกเรียกว่าแหล่งไอออน (Ion Source) ไอออนจะถูกดึงและโฟกัสด้วยชุดของเลนส์และถูกแยกโดยหน่วยวิเคราะห์มวล

(Mass Analyzer) จากนั้นไอออนจะถูกกำหนดให้ไปตกกระทบที่เครื่องตรวจวัดไอออน (Ion Detector) ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของไอออนในตัวอย่าง กระแสไอออนจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป digital signal และถูกบันทึกใน data system ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณนี้อยู่ในรูปที่เรียกว่าแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) และสามารถนำไปใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างต่อไป

### 1.1.3 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC/MS) แสดงได้ดังรูปที่ ข 1

1.1.3.1 ส่วนการป้อนสารอัตโนมัติ (Auto sampler)

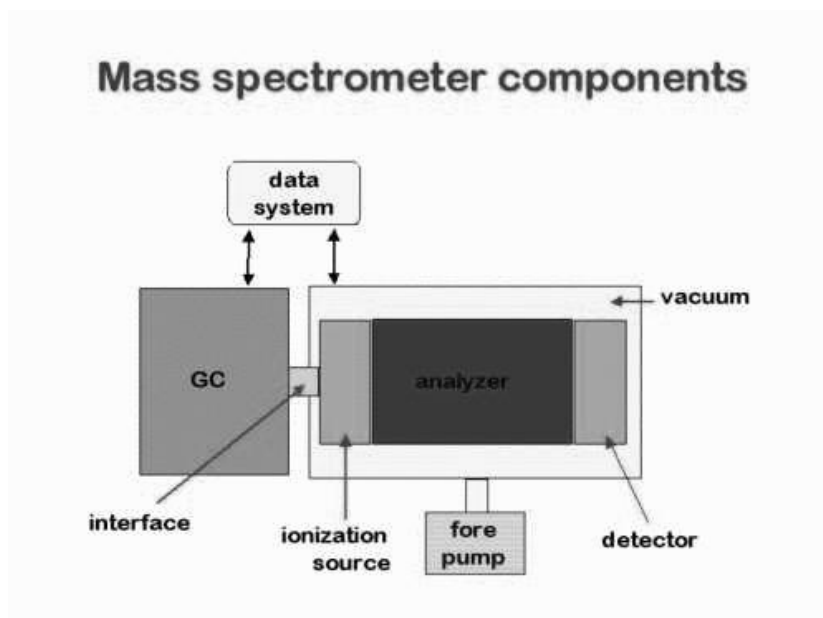
1.1.3.2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

- Injector
- Oven column

1.1.3.3 ส่วนการเชื่อมต่อ (Interface)

1.1.3.4 แมสสเปกโตรเมตรี (MS)

- Ionization เป็นชนิด EI ใช้ศักย์ไฟฟ้า 70 eV
- Mass analysis เป็นแบบ Quadrupole Mass Filters โดยการให้ความถี่ชนิด DC และชนิด AC ไปที่ mass analyzer ซึ่งประกอบด้วยแท่งรูปทรง hyperbolic จำนวน 4 แท่ง การเพิ่มของความถี่ชนิด DC และชนิด AC ทำให้ไอออนที่มีค่า  $m/z$  ต่ำไปสู่สูง สามารถ oscillate ไปถึง detector ได้ตามลำดับ
- Ion detection



รูปที่ ข 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (GC/MS) (KMITL, 2012)

**ภาคผนวก ค**  
**การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์**

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ

$$\text{ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ} = 100 [W_{\text{bio-oil}}/W_{\text{db}}]$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของของแข็งส่วนเหลือ

$$\text{ร้อยละผลได้ของของแข็งส่วนเหลือ} = 100 [W_{\text{SR}}/W_{\text{db}}]$$

3. การคำนวณร้อยละผลได้แก๊สผลิตภัณฑ์และส่วนหาย

$$\text{ร้อยละผลได้แก๊สผลิตภัณฑ์และส่วนหาย} = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของของน้ำมันชีวภาพ} - \text{ร้อยละผลได้ของของแข็งส่วนเหลือ}$$

โดย

$$W_{\text{db}} = \text{น้ำหนักกระถินยักษ์ที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{\text{SR}} = \text{น้ำหนักกากที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{\text{bio-oil}} = \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลว}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง; อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลา 0 นาที อัตราส่วนของตัวทำละลายต่อกระถินยักษ์เท่ากับ 4 ต่อ 1 ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยา

**การคำนวณ**

$$\text{น้ำหนักกระถินยักษ์(Dry basis)} = 255.80 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำหนักผลได้ของเหลว} = 25.40 \text{ กรัม}$$

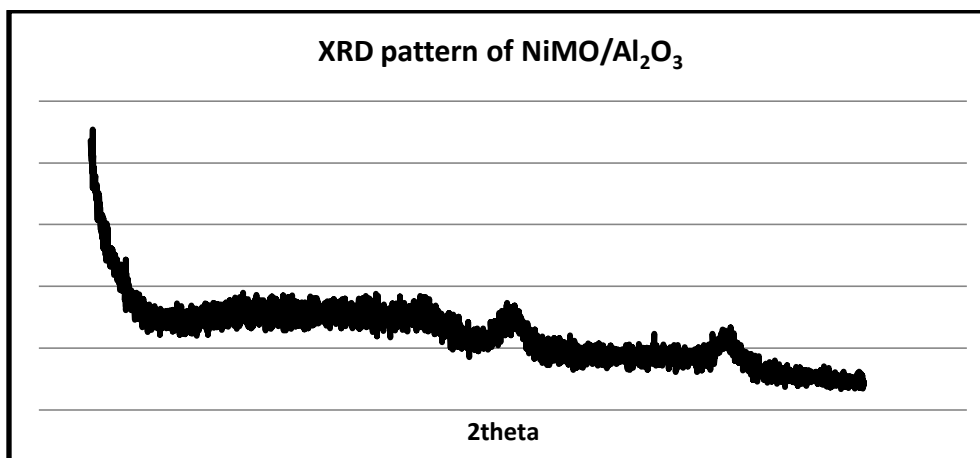
$$\text{น้ำหนักกากของแข็ง (Dry basis)} = 108.80 \text{ กรัม}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว} = 100 \times (25.40/255.80) = 9.93$$

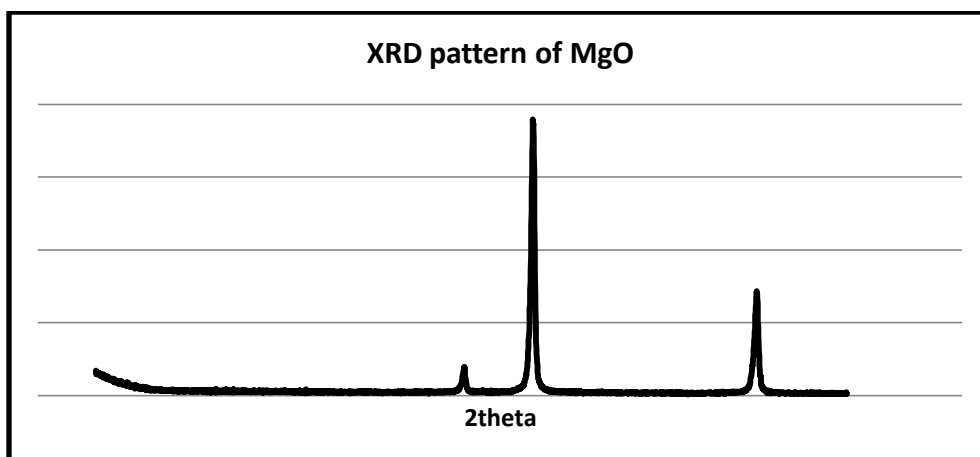
$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง} = 100 \times (108.80/255.80) = 42.53$$

$$\text{ร้อยละผลได้แก๊สและส่วนหาย} = 100 - 9.93 - 42.53 = 47.54$$

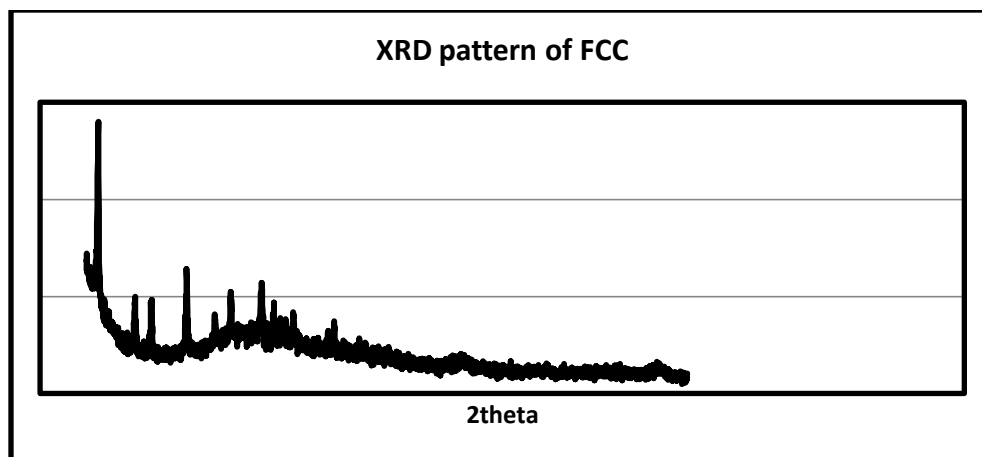
ภาคผนวก ง  
การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ ค2 แสดง XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอะลูมินา



รูปที่ ค2 แสดง XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส



รูปที่ ค3 แสดง XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส



**ภาคผนวก จ**  
**ตารางบันทึกผลการทดลอง**

**ตารางที่ จ 1** บันทึกผลการทดลองจากการทำไพโรไลซิสในเฟสของเหลวในทุกตัวแปรที่ทำการศึกษาโดยผลการทดลองที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย

Influence of	Condition								Yield (avg)			Ultimate analysis of Bio-oil (avg)				HHV (MJ/kg)
	Temp (°C)	holding time (min)	Type of cat	catalyst dosage (%wt.)	initial N <sub>2</sub> (bar)	initial H <sub>2</sub> (bar)	Heat rate (°C/min)	B:SV	Bio-oil	Solid residue	Gas + Loss	C	H	N	O	
Temp	325	0	-	-	10	-	2	1 ; 4	8.32	45.50	46.17	58.17	8.42	0.38	33.42	25.82
	350	0	-	-	10	-	2	1 ; 4	9.93	42.53	47.54	67.51	9.40	0.52	23.09	32.22
	375	0	-	-	10	-	2	1 ; 4	12.33	39.05	48.62	70.77	10.74	0.60	18.50	36.05
	400	0	-	-	10	-	2	1 ; 4	8.72	36.50	54.78	80.07	10.41	0.79	9.53	40.32
Holding time	375	20	-	-	10	-	2	1 ; 4	11.73	42.02	46.25	71.79	10.71	0.80	17.51	36.52
	375	40	-	-	10	-	2	1 ; 4	8.23	49.11	42.66	74.86	10.05	0.86	15.10	37.05
	375	60	-	-	10	-	2	1 ; 4	5.20	51.74	43.06	77.73	10.28	0.82	12.00	38.90
non SV, SV and NiMo	375	0	-	-	10	-	2	1 ; 4	6.48	43.15	50.36	69.23	7.03	0.53	23.21	29.39
	375	0	-	-	10	-	2	1 ; 4	12.33	39.05	48.62	70.77	10.74	0.60	18.50	36.05
	375	0	NiMo	20	10	-	2	1 ; 4	13.67	38.98	47.35	80.91	9.26	0.74	9.09	39.04

	375	0	NiMo	0	10	-	2	1 ; 4	12.33	39.05	48.62	72.87	7.97	0.66	18.50	32.81
Catalyst	375	0	NiMo	10	10	-	2	1 ; 4	11.98	40.24	47.78	75.23	7.62	0.92	16.23	33.51
dosage	375	0	NiMo	20	10	-	2	1 ; 4	13.67	41.87	44.46	79.65	10.25	1.01	9.09	40.03
	375	0	NiMo	30	10	-	2	1 ; 4	12.56	38.77	48.67	80.11	8.50	0.74	10.65	37.41
Initial	375	0	NiMo	20	10	0	2	1 ; 4	14.80	40.33	44.87	76.45	14.08	0.38	9.09	44.42
hydrogen	375	0	NiMo	20	10	5	2	1 ; 4	14.11	39.87	46.02	77.35	12.70	0.33	9.62	42.66
pressure	375	0	NiMo	20	10	10	2	1 ; 4	14.49	37.13	48.38	78.98	11.07	0.84	9.11	40.97
	375	0	NiMo	20	10	20	2	1 ; 4	14.37	34.64	50.99	76.91	12.51	0.69	9.89	42.19
Type of	375	0	NiMo	20	10	20	2	1 ; 4	13.67	41.87	44.46	79.39	10.10	0.36	10.15	39.55
catalyst	375	0	FCC	20	10	20	2	1 ; 4	9.48	37.18	53.34	72.17	11.44	0.23	16.16	37.95
	375	0	MgO	20	10	20	2	1 ; 4	10.19	42.71	47.10	73.45	9.08	0.46	17.01	34.85
Type of	375	60	NiMo	20	10	20	2	1 ; 4	8.67	8.67	8.67	80.07	10.41	0.43	9.09	40.40
catalyst	375	60	FCC	20	10	20	2	1 ; 4	5.45	5.45	5.45	76.64	7.61	1.05	15.09	34.17
	375	60	MgO	20	10	20	2	1 ; 4	7.47	7.47	7.47	75.00	7.99	1.19	15.82	34.03

\*SV=solvent, avg = average

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนพปฎล คุณาอุดมลาภ เกิดวันที่ 16 มกราคม 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 โดยสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2555 และได้เข้าร่วมการประชุมวิชาการนานาชาติ The 25th International Symposium on Chemical Engineering (ISCE) ในวันที่ 14-15 ธันวาคม 2555 ที่ Okinawa Convention Center, Okinawa ประเทศญี่ปุ่น