การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุ

นางสาววรัญญา จิตสนธิ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOCRUDE OIL PRODUCTION FROM HYDROTHERMAL LIQUEFACTION OF DEMINERALIZED SUGARCANE LEAVES

Miss Waranya Chitsonthi

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 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุ
โดย	นางสาววรัญญา จิตสนธิ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

.....กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศศิธร สรรพ่อค้า)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วรัญญา จิตสนธิ : การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุ (BIOCRUDE OIL PRODUCTION FROM HYDROTHERMAL LIQUEFACTION OF DEMINERALIZED SUGARCANE LEAVES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ประพันธ์ คูชลธารา, 90 หน้า.

ไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันเป็นการเปลี่ยนชีวมวลไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวชีวภาพที่เรียกว่าน้ำมันดิบชีวภาพ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือศึกษาผลการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและน้ำร้อน รวมถึงผลของตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอลในไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อย โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีดังนี้ อุณหภูมิ 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส, ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 0-100 โดยปริมาตร ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง จากผลการทดลองพบว่าหลังผ่านการขจัดแร่ธาตุ ปริมาณเถ้าลดลงจากร้อยละ 10.05 เป็น 8.30 โดยน้ำหนัก เมื่อทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล ทำการทดลองเป็นเวลา 60 นาที การใช้ใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 45.92 โดยน้ำหนัก ขณะที่การขจัดแร่ธาตุด้วยน้ำร้อนให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพร้อยละ 42.44 โดยน้ำหนัก ในกรณีที่ใช้ตัวทำละลายเอทานอล ส่วนการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที ทำการทดลองเป็นเวลา 60 นาที พบว่าใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 32.56 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเท่ากับร้อยละ 21.97 โดยน้ำหนักเมื่อขจัดแร่ธาตุด้วยน้ำร้อน ในตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล ซึ่งแสดงถึงการเกิดผลเสริมกันระหว่างน้ำและเอทานอลในกระบวนการแบบกึ่งต่อเนื่อง จากผลของ GC-MS พบว่าองค์ประกอบของน้ำมันดิบชีวภาพก่อนขจัดแร่ธาตุมีสารประกอบประเภทฟีโนลิก (phenolic compounds) และสารที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (other oxygenates) อยู่ปริมาณมาก แต่หลังจากการขจัดแร่ธาตุพบว่าน้ำมันมีองค์ประกอบของสารประกอบจำพวกน้ำตาล (anhydrosugars) เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะลีโวกลูโคซาน (levoglucosan)

ภาควิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เคมีเทคนิค ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

5772137223 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY
KEYWORDS: BIOMASS, HYDROTHERMAL LIQUEFACTION, MINERAL MATTER, DEMINERALIZATION

WARANYA CHITSONTHI: BIOCRUDE OIL PRODUCTION FROM HYDROTHERMAL LIQUEFACTION OF DEMINERALIZED SUGARCANE LEAVES. ADVISOR: ASSOC. PROF. PRAPAN KUCHONTHARA, Ph.D., 90 pp.

Hydrothermal liquefaction (HTL) is a promising process to convert biomass into liquid fuels, so called biocrude. The objective of this work was to investigate an effect of demineralization using nitric acid and hot water on the liquefaction of sugarcane leaves. Besides, the biocrude production from that process was comprehensively explored in ratio of ethanol/water co-solvent. The operating conditions, temperatures (300, 325, and 350 °C) and ethanol concentration (0 to 100 vol.%), were varied. HTL was performed in a batch reactor and a semi-continuous reactor. Demineralization treatment with nitric acid and hot water was found the effectively reducing the ash content of sugarcane leaves from 10.05 to 8.30 wt.%. The experiments were conducted in a 250 mL autoclave reactor at 300°C, with an initial pressure of 2 MPa and reaction time of 60 minutes. The results indicated that the demineralization by nitric acid at 5wt.% in pure ethanol gave the highest bio-crude yield of 45.92 wt.% while the yield of biocrude by hot water was 42.44 wt.%. The another experiments were carried out in a semi-continuous reactor at the solvent flow rate of 1.0 mL/min at 300°C for 60 minutes. The co-solvent system was found to give higher bio-crude of 32.56 wt.% by nitric acid at 5wt.% while the yield of biocrude was 21.97 wt.%. by using hot water. This indicated a synergistic effect when using ethanol-water mixture in semi-continuous reactor. The GC-MS results found that, before demineralized the biocrude contains mostly phenolic compounds and other oxygenates compounds and after demineralized the biocrude contains anhydrosugars such as Levoglucosan.

Department: Chemical Technology Student's Signature .....
Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature .....
Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพันธ์ คูชลธารา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้ความรู้ คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิจัย และยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.ศศิธร สรรพ่อค้า กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัย ประจำปีงบประมาณ 2558 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (กบง./2558-104)

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติงานและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่านซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้กำลังใจ และการสนับสนุนด้านต่างๆ ให้ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญรูป ..... ฎ
สารบัญตาราง ..... ฑ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย 2
1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี 4
2.2 ชีวมวล 5
2.2.1 แหล่งกำเนิดของชีวมวล 6
2.2.2 ประโยชน์ของชีวมวล 7
2.2.3 ศักยภาพของชีวมวล 9
2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล 12
2.3.1 เซลลูโลส (cellulose) 12
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) 12
2.3.3 ลิกนิน (lignin) 13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.3.4 ค่าความร้อน (heating value) 14
2.3.5 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ 15
2.4 แนวทางการใช้ชีวมวลในประเทศไทย 16
2.4.1 อ้อย 17
2.5 กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง 21
2.5.1 กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี (biochemical process) 22
2.5.2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน (thermochemical process) 22
2.6 น้ำมันดิบชีวภาพ (Biocrude) 28
2.6.1 สมบัติทางกายภาพ 29
2.6.2 สมบัติทางเคมี 30
2.7 กระบวนการอัพเกรดน้ำมันดิบชีวภาพ (upgrading process) 32
2.7.1 กระบวนการแยก (separation) 32
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 35
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง 38
3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี 38
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 38
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมใบอ้อย 38
3.2.2 เทคนิคที่ใช้เพื่อลดปริมาณและองค์ประกอบของแร่ธาตุหรือเถ้าในชีวมวล (demineralization) 38
3.2.3 เครื่องปฏิกรณ์ 38
3.2.4 แบบจำลองอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง 40
3.2.5 อุปกรณ์การกรอง 42
3.2.6 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการระเหยตัวทำละลาย 42

หน้า

3.2.7 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer) 43
3.2.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (gas chromatograph) 43
3.2.9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph-mass spectrometry) 44
3.2.10 เครื่องหาปริมาณน้ำคาร์ล ฟิสเชอร์ (Karl-Fischer Titration) 45
3.2.11 เครื่องหาปริมาณกรดในน้ำมันดิบชีวภาพ (Total Acid Number Titration) 45
3.3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย 47
3.3.1 การเตรียมใบอ้อย 47
3.3.2 การขจัดแร่ธาตุ 47
3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของใบอ้อย 47
3.3.4 การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพด้วยไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน 47
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 53
4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของใบอ้อย 53
4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ 53
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ (chemical composition) 55
4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ 56
4.1.4 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของใบอ้อย 57
4.2 ผลของแร่ธาตุในใบอ้อยต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ 58
4.3 ผลของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยก่อนและหลังทำการขจัดแร่ธาตุ 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.4 การวิเคราะห์น้ำมันดิบชีวภาพ 63
4.5 ผลของการวิเคราะห์หาองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph – mass spectrometry) 65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 72
5.1 สรุปผลการวิจัย 72
5.1.1 ผลของการขจัดแร่ธาตุ 72
5.1.2 ผลของแร่ธาตุในใบอ้อยต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน 72
5.1.3 ผลของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch reactor) และเครื่องปฏิกรณ์แบบ กึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous reactor) ต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยก่อนและหลังทำการขจัดแร่ธาตุ 73
5.1.4 ผลของการวิเคราะห์หาองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี 73
5.2 ข้อเสนอแนะ 73
รายการอ้างอิง 74
ภาคผนวก 77
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชีวมวล 78
ภาคผนวก ข การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ 81
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่สูญหายและอื่นๆ 83
ภาคผนวก ง ข้อมูลดิบ 86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 วัฏจักรชีวมวล 6

รูปที่ 2.2 แหล่งที่มาของชีวมวล 7

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส 12

รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส 13

รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน 14

รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของชีวมวล 16

รูปที่ 2.7 ส่วนต่างๆ ของใบและกาบใบ 18

รูปที่ 2.8 อ้อยปลูกอายุประมาณ 3-4 สัปดาห์ 19

รูปที่ 2.9 ปลูกถั่วแซมระหว่างแถวอ้อย 20

รูปที่ 2.10 อ้อยอายุประมาณ 8 เดือน 21

รูปที่ 2.11 เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวล 21

รูปที่ 2.12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลจากชีวมวล 26

รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาที่เกิดในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง 27

รูปที่ 2.14 แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันเบื้องต้น] 27

รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง 39

รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง 40

รูปที่ 3.3 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกิกรณ์แรงดันสูง 41

รูปที่ 3.4 ชุดทดลองไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันแบบกึ่งต่อเนื่อง 41

รูปที่ 3.5 เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator) 42

รูปที่ 3.6 ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการระเหยตัวทำละลาย 43

รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer) 43

รูปที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (gas chromatograph)..... 44

รูปที่ 3.9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph-mass spectrometry)..... 45

รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันดิบชีวภาพ (Karl-Fischer Titration)..... 46

รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณกรดในน้ำมันดิบชีวภาพ (Total Acid Number Titration).. 46

รูปที่ 3.12 แผนผังขั้นตอนการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ 51

รูปที่ 3.13 แผนผังขั้นตอนการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง 52

รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของใบอ้อยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA 57

รูปที่ 4.2 ร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 58

รูปที่ 4.3 ร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส 60

รูปที่ 4.4 ร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส 60

รูปที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง 62

รูปที่ 4.6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพก่อนทำการขจัดแร่ธาตุจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ในตัวทำละลายเอทานอล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์..... 65

รูปที่ 4.7 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่ธาตุจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ในตัวทำละลายเอทานอล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ 66

รูปที่ 4.8 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่ธาตุจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ในตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 50 โดยปริมาตร ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง... 66

รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของน้ำมันดิบชีวภาพที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ในตัวทำละลายต่างๆ..... 70

รูปที่ ค.1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน 83

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2. 1 การประเมินศักยภาพผลผลิตทางการเกษตร 11

ตารางที่ 2.2 ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล 23

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของแกซิฟิเคชัน 25

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของน้ำมันที่ได้จากลิควิแฟกชัน 28

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวลชนิดต่างๆ 29

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน 31

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อสมบัติของน้ำมันดีเซล 32

ตารางที่ 2.8 แสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันที่ผลิตได้จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวลชนิดต่างๆ โดยไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการสกัดแยกผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพโดยใช้ตัวทำละลายประเภทต่างๆ..... 34

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (gas chromatograph)..... 44

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph-mass spectrometry)..... 45

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ 54

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ (chemical composition)..... 56

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ 57

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์น้ำมันดิบชีวภาพ..... 64

ตารางที่ 4.5 ผลของการวิเคราะห์หาองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph – mass spectrometry)..... 67

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่สูญหายและอื่นๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph – mass spectrometry)..... 84
ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch reactor)..... 86
ตารางที่ ง.2 ข้อมูลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch reactor) (ต่อ)..... 87
ตารางที่ ง.3 ข้อมูลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous reactor)..... 88
ตารางที่ ง.4 ข้อมูลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous reactor) (ต่อ)..... 89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยและประเทศอื่นๆ ทั่วโลกกำลังประสบกับปัญหาการขาดแคลนพลังงาน ปัญหาสภาวะโลกร้อน ปัญหาเศรษฐกิจ ปัญหาการพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันดิบ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ล้วนมีพื้นฐานมาจากความต้องการเชื้อเพลิงฟอสซิลเพื่อการผลิตพลังงานซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้พลังงานฟอสซิลเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป การพึ่งพาพลังงานฟอสซิลจึงเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างไม่ยั่งยืน ปัญหาการใช้พลังงานฟอสซิลนี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่หมุนเวียนได้ เช่น ชีวมวล เพื่อทดแทดพลังงานฟอสซิล ชีวมวลที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงควรเป็นชีวมวลที่มีปริมาณเหลือทิ้งมากและไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อื่นเพื่อสร้างมูลค่าให้แก่ชีวมวลนั้น ดังนั้นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จึงได้รับการพิจารณาว่าเป็นแหล่งทรัพยากรที่เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ

กระบวนการแปรรูปชีวมวลทางความร้อนสามารถทำได้หลายวิธี งานวิจัยนี้สนใจการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน (hydrothermal liquefaction : HTL) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงชีวมวลไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่เรียกว่าน้ำมันชีวภาพหรือไบโอครูด (biocrude) โดยใช้อุณหภูมิปานกลางและความดันสูง โดยชีวมวลตั้งต้นไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้แห้ง จึงเหมาะกับชีวมวลหรือเศษวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณความชื้นสูง แม้ว่าน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันจะมีศักยภาพที่น่าสนใจ แต่ร้อยละผลได้ (yield) ของเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรยังมีค่าไม่สูงมากนัก ทั้งนี้เหตุผลหนึ่งที่ทำให้ร้อยละผลได้มีค่าไม่สูงนักเนื่องจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีองค์ประกอบหนึ่งที่เรียกว่า แร่ธาตุ (mineral) เช่น โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) ที่อยู่ในรูปของออกไซด์ คาร์บอเนต ไนเตรต หรือซัลเฟต ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้ก็คือปริมาณเถ้าที่อยู่ในชีวมวลนั่นเอง ในระหว่างการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน แร่ธาตุเหล่านี้จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาให้เชื้อเพลิงเหลวแตกตัวกลายเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของแร่ธาตุที่มีต่อร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว แร่ธาตุเหล่านี้ควรถูกกำจัดออก (demineralization) ก่อนไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของการลดปริมาณแร่ธาตุออกจากชีวมวลที่มีผลต่อร้อยละผลได้และสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อย นอกจากนี้มีการศึกษา

ผลของปัจจัยการดำเนินการได้แก่ อุณหภูมิและอัตราส่วนโดยปริมาตรเอทานอลต่อน้ำ ต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อย

1.2.2 ศึกษาผลของแร่ธาตุในใบอ้อยต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของชีวมวล โดยการวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุ

1.3.2 ศึกษาการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพและผลของแร่ธาตุในชีวมวลที่มีต่อร้อยละผลได้และคุณภาพจากการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ

1.4.2 เตรียมวัตถุดิบ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1.4.2.1 เตรียมใบอ้อยโดยนำไปตากแดดให้แห้ง และนำไปบดให้มีขนาด 150-250 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น

1.4.2.2 สารเคมีและตัวทำละลายที่ใช้ในงานวิจัยคือ เอทานอล กรดไนตริก และอะซิโตน

1.4.3 วิเคราะห์สมบัติของใบอ้อย

1.4.3.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ได้แก่ ความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า

1.4.3.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ด้วยเครื่อง CHN element analyzer

1.4.3.3 ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง thermogravimetric / differential thermal analyzer (TG/DTA) โดยวัดการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

1.4.3.4 ศึกษาปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

1.4.4 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อย ได้แก่

1.4.4.1 อุณหภูมิ (300, 325, 350 องศาเซลเซียส)

1.4.4.2 อัตราส่วนระหว่างเอทานอลและน้ำ (1:0, 0.5:0.5, 0:1)

1.4.4.3 ใบอ้อยที่ผ่านการล้างแร่ธาตุด้วยกรดไนตริกและน้ำร้อน

1.4.4.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และแบบกึ่งต่อเนื่อง

1.4.5 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล

1.4.5.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ultimate analysis) ได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ด้วยเครื่อง CHN element analyzer

1.4.5.2 คำนวณค่าความร้อนของน้ำมัน

1.4.5.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography mass spectrometry, GC/MS)

1.4.5.4 วิเคราะห์ปริมาณน้ำด้วยเครื่อง Karl Fischer

1.4.5.5 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดด้วยเครื่อง Compact titrator

1.4.5.6 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 แนวทางการเพิ่มร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวจากใบอ้อยด้วยไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น โดยนำไปใช้ในรูปแบบของกิจกรรมเพื่อพัฒนาและสร้างความเจริญทางด้านเศรษฐกิจของประเทศต่างๆทั่วโลก พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันเป็นพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น น้ำมัน แก๊สธรรมชาติและถ่านหิน เป็นที่ทราบกันดีว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนได้ ทำให้การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีปริมาณไม่เพียงพอ เมื่อปีที่ผ่านมาพลังงานทางเลือก (renewable energy) ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมากเนื่องจากปริมาณน้ำมันและการสำรองแก๊สธรรมชาติที่จำกัด รวมถึงความกังวลเกี่ยวกับความมั่นคงทางด้านพลังงาน [1] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหาพลังงานทางเลือก (alternative energy) ชนิดใหม่มาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่เดิม พลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลมีหลายชนิด เช่น พลังงานจากชีวมวล (biomass) ซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากสารอินทรีย์ของพืชและสัตว์ต่างๆ ได้แก่ พืชเกษตรกรรม วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและอุตสาหกรรม เศษไม้ ขยะมูลฝอย เป็นต้น โดยใช้กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การเผาไหม้โดยตรง การผลิตแก๊ส และการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช นอกจากพลังงานจากชีวมวลแล้ว ยังมีพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานนิวเคลียร์ โดยคุณสมบัติที่สำคัญของพลังงานทางเลือกคือ เป็นพลังงานสะอาด มีการปลดปล่อยแก๊สพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล และสามารถสร้างทดแทนได้ตลอดเวลา พลังงานจากชีวมวลมีความน่าสนใจและได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นพลังงานที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมัน อีกทั้งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก จึงส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวลมีราคาไม่สูงมากนัก นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลยังสามารถช่วยรักษาสภาพแวดล้อมได้ เนื่องจากการใช้พลังงานจากชีวมวลจะไม่ก่อให้เกิดแก๊สที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมเหมือนกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล [2] ชีวมวลที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงควรเป็นชีวมวลที่มีปริมาณเหลือทิ้งมากและไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อื่นเพื่อสร้างมูลค่าให้แก่ชีวมวลนั้น ดังนั้นเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร จึงได้รับการพิจารณาว่าเป็นแหล่งทรัพยากรที่เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยเชื้อเพลิงจากชีวมวลสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของพลังงานเชื้อเพลงเหลวที่เรียกว่าน้ำมันดิบชีวภาพ (biocrude) ได้

การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพทำได้โดยการนำชีวมวลไปผ่านไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน (hydrothermal liquefaction : HTL) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิปานกลางและความดันสูง โดยชีวมวลตั้งต้นไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้แห้ง จึงเหมาะกับชีวมวลหรือเศษวัสดุเหลือทิ้งที่มีปริมาณความชื้นสูง โดยน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จะมีปริมาณน้ำ ซัลเฟอร์ และออกซิเจนเป็นองค์ประกอบต่ำกว่าน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิส แม้ว่าน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันจะมีศักยภาพที่น่าสนใจ แต่ร้อยละผลได้ (yield) ของเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรยังมีค่าไม่สูงมากนัก ทั้งนี้เหตุผลหนึ่งที่ทำให้ร้อยละผลได้มีค่าไม่สูงนักเนื่องจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีองค์ประกอบหนึ่งที่เรียกว่า แร่ธาตุ (mineral) ซึ่งแร่ธาตุเหล่านี้ก็คือปริมาณเถ้าที่อยู่ในชีวมวลนั่นเอง ในระหว่างกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน แร่ธาตุเหล่านี่จะทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาให้เชื้อเพลิงเหลวแตกตัวกลายเป็นแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาผลกระทบของแร่ธาตุที่มีต่อร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว แร่ธาตุเหล่านี้ควรถูกกำจัดออก (demineralization) ก่อนไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน [3]

2.2 ชีวมวล

ชีวมวล คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้จากการเก็บเกี่ยวผลผลิตทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการแปรรูปสินค้าทางการเกษตร เช่น แกลบจากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยจากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้จากการแปรรูปไม้ยางพารา กากปาล์มจากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลังจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซังข้าวโพดจากการสีข้าวโพดนำเมล็ดออก กาบและกะลามะพร้าวจากการปอกเปลือกเป็นต้น

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนการเจริญเติบโตของพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยสามารถเปลี่ยนเป็นแป้งและน้ำตาลแล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็จะได้พลังงานและคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศหมุนเวียนเป็นวัฏจักรต่อไป [4] ดังแสดในรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 วัฏจักรชีวมวล [4]

ในอดีตชีวมวลส่วนใหญ่จะถูกทิ้งซากให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์หรือถูกกำจัดโดยการเผาทำลายซึ่งเป็นการสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม แต่ที่จริงแล้วชีวมวลเหล่านี้มีสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงอย่างดีและให้ค่าพลังงานความร้อนในระดับที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และเนื่องจากภาวะถดถอยของแหล่งพลังงานจึงได้มีการแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนที่มีปริมาณและศักยภาพที่เพียงพอ ชีวมวลจึงเป็นเป้าหมายที่ถูกพิจารณาเพื่อเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานใหม่ [5]

การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน ไอน้ำหรือกระแสไฟฟ้า ดังนั้นการนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนในท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสมจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการใช้ชีวมวลเป็นพลังงานจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ เพราะการเกิดชีวมวลใหม่จะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับปริมาณที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ชีวมวล [4]

2.2.1 แหล่งกำเนิดของชีวมวล

ชีวมวล [2] (Biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้งานชีวมวลเพื่อทำให้ได้พลังงานอาจจะทำโดยนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิลซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเหล่านี้มีแหล่งที่มาต่างๆ ดังนี้

2.2.1.1 พืชเกษตรกรรม (agricultural crop) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาลสามารถปลูกเป็นพืชที่ให้พลังงานและผลิตเป็นน้ำมันพืช (vegetable oil) ได้นอกจากนี้ยังมีพืชที่ปลูกเพื่อนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงโดยเฉพาะ เช่น ปาล์มน้ำมัน และสบู่ดำ

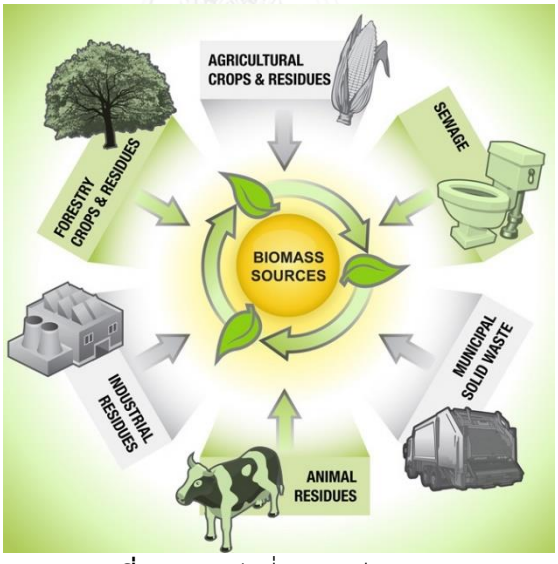
2.2.1.2 วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues) เช่น ฟางข้าว ราก มันสำปะหลัง ซังข้าวโพด กากถั่วเหลือง

2.2.1.3 เนื้อไม้และเศษเหลือทิ้งของเนื้อไม้ (wood and wood residues) เช่น ไม้โตเร็วและไม้ยืนต้นทั่วไป เศษเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตไม้ รวมทั้งเศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ เป็นต้น

2.2.1.4 เศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม (waste streams) เช่น แกลบจากโรงสีข้าว กากน้ำตาลและชานอ้อยจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล และเศษเหลือทิ้งจากการสกัดปาล์มน้ำมัน

2.2.1.5 ขยะมูลฝอยและมูลสัตว์ เช่น ขยะที่เป็นของสดและมูลสัตว์ต่างๆ

2.2.1.6 สิ่งมีชีวิตบางชนิด เช่น สาหร่ายนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ ได้แก่ การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ไบโอดีเซลจากสาหร่ายและการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจน



รูปที่ 2.2 แหล่งที่มาของชีวมวล [6]

2.2.2 ประโยชน์ของชีวมวล

แม้ว่าพลังงานจากชีวมวลจะไม่ได้มีราคาที่สูงเท่ากับเชื้อเพลิงฟอสซิล ภายใต้เทคโนโลยีในปัจจุบันการผลิตสารชีวมวลเพื่อเป็นพลังงานมีข้อดีหลายประการ เช่น การลดการปล่อย

แก๊สเรือนกระจกจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล สร้างงานและรายได้จากการพัฒนาอุตสาหกรรมให้คนในท้องถิ่น รวมไปถึงการใช้วัตถุดิบในท้องถิ่น ลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ แต่ประโยชน์เหล่านี้อาจเทียบไม่ได้กับราคาการผลิตสารชีวมวล การคำนึงถึงประโยชน์จะทำให้เข้าใจภาพรวมการแข่งขันของการผลิตพลังงานชีวมวล เพื่อการปรับปรุงนโยบายของการพัฒนาการผลิตสารชีวมวลต่อไป [7]

2.2.2.1 การลดลงของปริมาณน้ำมัน

ทรัพยากรป่าไม้และถ่านหินเคยอุดมสมบูรณ์และพอเพียงต่อความต้องการพลังงาน แต่มนุษย์ได้ใช้เกินกว่าที่จำเป็นเพื่อผลิตพลังงานและเทคโนโลยี ปริมาณน้ำมันสำรองของโลกมีค่าประมาณ 2000 พันล้านบาร์เรล ความต้องการบริโภคน้ำมันของโลกต่อวันเท่ากับ 71.7 ล้านบาร์เรล ซึ่งประมาณได้ว่า 1000 ล้านบาร์เรลนั้นกำลังถูกใช้ไป เมื่อราคาของปิโตรเลียมได้เพิ่มสูงขึ้นอาจจะทำให้เศรษฐกิจทรุดลงถ้าผู้คนไม่เปลี่ยนไปใช้พลังงานอย่างอื่นแทน ดังนั้นการใช้พลังงานจากชีวมวลจะทำให้ยืดอายุของปริมาณน้ำมันสำรอง

2.2.2.2 ภาวะโลกร้อน

เมื่อทั่วโลกมีอัตราการปล่อยแก๊สเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศของโลก จากการประมาณในปี 2000 มีการคาดการณ์ว่าในทุกๆปี จะมีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศมากกว่า 20 ล้านเมตริกตัน ถ้าแนวโน้มเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ อาจเกิดภัยธรรมชาติอันร้ายแรง เช่น ปริมาณน้ำฝนมากผิดปกติ ซึ่งทำให้เกิดน้ำท่วม และความแห้งแล้งผิดสมดุลทั่วไป พลังงานชีวมวลนั้นเป็นทรัพยากรที่มีภาวะคาร์บอนสมดุลในวัฏจักรของมันและในการผลิตแก๊สเรือนกระจก พลังงานชีวมวลเป็นทรัพยากรในการผลิตพลังงานที่มีปริมาณเป็นอันดับที่สี่ของโลกรองจากถ่านหิน ปิโตรเลียม และแก๊สธรรมชาติซึ่งสามารถให้พลังงานเท่ากับร้อยละ 14 ของความต้องการพลังงานขั้นต้นของโลก ดังนั้นสารชีวมวลจึงถือเป็นแหล่งทรัพยากรพลังงานที่สำคัญของโลก [8] เพื่อที่จะลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการใช้พลังงาน นโยบายต่างๆ ได้ถูกนำออกมาใช้ เช่น ภาษีการปล่อยแก๊ส ใบอนุญาตในการปล่อยแก๊สเป็นต้น

2.2.2.3 การยกระดับคุณภาพชีวิต

เมื่อการเกษตรมีบทบาทสำคัญในระบบเศรษฐกิจ ดังนั้นการเกษตรที่ยั่งยืนจึงจำเป็นต่อการยกระดับคุณภาพชีวิตของเกษตรกรรวมถึงรายได้และการศึกษาเป็นเรื่องสำคัญ เมื่อความรู้ของผู้คนในชนบทนั้นไม่สูงมาก จึงจำเป็นที่จะต้องให้ข้อมูลและเทคโนโลยีที่เหมาะสมแก่เกษตรกรเพื่อให้เข้าใจในการใช้ชีวมวลที่มีอยู่อย่างจำกัดให้มีประสิทธิภาพและเกิดผลสูงสุด

2.2.2.4 เพิ่มรายได้แก่เกษตรกร

แนวทางที่จะช่วยเกษตรกร หนึ่งคือช่วยเหลือทางด้านพลังงาน ในประเทศไทยมีการผลิตไบโอมีเทนเพื่อใช้ในครัวเรือนของเกษตรกรแทนที่จะต้องซื้อโพรเพน นับว่าเป็นการช่วยเกษตรที่ยั่งยืนเนื่องจากลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล สองคือช่วยเหลือทางด้านการเงิน เมื่อเกษตรกรมีการปลูกพืชเพื่อผลิตเป็นเอทานอลขาย เกษตรกรก็จะมีรายได้เพิ่มขึ้นและจะนำเงินส่วนนี้ไปใช้จ่ายหมุนเวียนในท้องถิ่น เช่นค่าจ้างแรงงานในการเก็บชีวมวล และคนเหล่านี้จะนำเงินไปใช้จ่ายต่ออีกทอดหนึ่ง เป็นอย่างนี้ไปเรื่อยๆ ระบบนี้ถือเป็นการกระจายรายได้ให้แก่ชุมชน

2.2.2.5 ความมั่นคงทางพลังงาน

ในระบบเศรษฐกิจของทุกประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศที่พัฒนาแล้วบางประเทศขึ้นกับปริมาณความมั่นคงของพลังงาน ความมั่งคงทางพลังงานหมายถึงความสอดคล้องกันของพลังงานที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆ ที่สามารถซื้อได้ ซึ่งเงื่อนไขเหล่านี้ต้องทนทานในระยะยาวเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน การให้ความสนใจในความมั่นคงของพลังงานนั้นเป็นเรื่องสำคัญเพราะโลกต้องพึ่งพาทรัพยากรน้ำมันซึ่งกระจายตัวในจุดต่างๆไม่เท่ากัน แหล่งพลังงานของโลกกำลังอยู่ในความเสี่ยงเนื่องจากความต้องการน้ำมันที่เพิ่มมากขึ้น

2.2.2.6 สกุลเงินต่างชาติ

นับเป็นโอกาสที่ดีในการพัฒนาประเทศเพื่อส่งออกพลังงานชีวมวล ในกรณีของการผลิตมันสำปะหลังในประเทศไทยนั้น อัตราการผลิตเพื่อเป็นอาหารและเอทานอลนั้นสมดุลกันในเวลานี้ แต่ในอนาคตปริมาณการผลิตมันสำปะหลังนั้นอาจมีปริมาณมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานชีวมวลมักจะขัดแย้งกับการผลิตเพื่อเป็นอาหาร เช่น ความต้องการเอทานอลของโลกอาจถูกคุกคามโดยความมั่นคงของปริมาณอาหารภายในประเทศ

2.2.3 ศักยภาพของชีวมวล

การประเมินศักยภาพของชีวมวลสำหรับผลิตพลังงานไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการจัดหาชีวมวลจากแหล่งสะสมชีวมวลในพื้นที่ต่างๆ ตลอดจนความเป็นไปได้ทางด้านเทคโนโลยีและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการแปรสภาพชีวมวลต่อพลังงานที่ผลิตได้ ได้แสดงให้เห็นศักยภาพของชีวมวลในการเปลี่ยนเป็นรูปพลังงานด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม ซึ่งศักยภาพของชีวมวลที่นำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้ [9]

2.2.3.1 ศักยภาพของชีวมวลประเภทวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร

ประเทศไทยนับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย กาก ใย และทะลายปาล์ม เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และจากการศึกษาพบว่ามีพืชเกษตรกรรมอยู่ 4 ชนิด ที่มีปริมาณเพียงพอสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานชีวภาพได้ คือ อ้อย ข้าว มันสำปะหลัง และปาล์ม โดยอ้อยมีการผลิตสูงถึง 70 ล้านตันต่อปี ซึ่งมีปริมาณมากกว่าข้าว มันสำปะหลัง และปาล์ม และพบว่าใบอ้อยส่วนใหญ่จะถูกเผาทิ้งในไร่ ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกวัตถุดิบเป็นใบอ้อย

2.2.3.2 ศักยภาพของชีวมวลประเภทของเสียจากฟาร์มปศุสัตว์

ของเสียจากฟาร์มปศุสัตว์นับได้ว่าเป็นสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานโดยได้จากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ของกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ได้แก่ แก๊สชีวภาพ วัตถุประสงค์หลักของการสร้างบ่อผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลสัตว์ เพื่อบำบัดของเสียที่ปล่อยจากฟาร์มปศุสัตว์และได้แก๊สชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้กากตะกอนที่เหลือจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพยังสามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยได้อีก จากข้อมูลของกรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ.2546 พบว่ามูลจากโคเนื้อมีศักยภาพสูงสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ แต่ระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลโคยังไม่แพร่หลาย ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนโคต่อฟาร์มต่ำ มีปัญหาในการจัดเก็บมูล อีกทั้งมูลโคมีปริมาณกากเซลลูโลสซึ่งย่อยสลายได้ช้า ทำให้ระบบผลิตแก๊สชีวภาพมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง ในทางตรงกันข้าม การเลี้ยงสุกรในประเทศไทยเป็นระบบฟาร์ม ซึ่งทำให้การจัดเก็บมูลสะดวกมากยิ่งขึ้นและมูลสุกรมีกากเซลลูโลสอยู่น้อยส่งผลให้เกษตรกรผู้เลี้ยงสุกรสามารถสร้างระบบผลิตพลังงานจากแก๊สชีวภาพที่คุ้มค่าต่อการลงทุนได้

2.2.3.3 ศักยภาพของชีวมวลประเภทน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตรสามารถนำมาผลิตแก๊สชีวภาพได้ โดยแก๊สชีวภาพที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในกระบวนการผลิต จากข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติ พ.ศ.2543 พบว่าโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมีศักยภาพสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพสูงที่สุด รองลงมาได้แก่ โรงงานผลิตน้ำตาล และโรงงานปาล์มน้ำมัน ซึ่งขณะนี้ได้มีการพัฒนาระบบต้นแบบการผลิตแก๊สชีวภาพในโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังและปาล์มน้ำมัน

2.2.3.4 ศักยภาพของชีวมวลประเภทขยะชุมชน

ขยะชุมชนนั้นสามารถนำมาเปลี่ยนรูปโดยใช้กระบวนการทางความร้อน-เคมี (thermal-chemical process) หรือ กระบวนการทางชีวเคมี (bio-chemical process) ซึ่งการผลิต

ขยะชุมชนนั้นอาจยังไม่ประสบผลสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากยังมีปัญหาด้านการจัดการขยะและการปลดปล่อยมลพิษรูปแบบต่างๆ ทั้งจากกระบวนการทางชีวเคมีและกระบวนการทางเคมี จากข้อมูลของสำนักงานสถิติแห่งชาติ พ.ศ.2543 พบว่าศักยภาพของการผลิตพลังงานทดแทนจากขยะชุมชนของภูมิภาคต่างๆ มีปริมาณพลังงานที่ได้ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของจำนวนประชากรในพื้นที่อีกด้วย

ตารางที่ 2. 1 การประเมินศักยภาพผลผลิตทางการเกษตร [10]

ชนิด	ผลผลิต (ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวลเหลือใช้ (ตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ใบ	170,383.17	19.44	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ทะลายเปล่า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		ใย	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
		กะลา	38,959.04	18.46	719.18	17.02
		ก้าน	2,203,740	9.83	21,824.24	516.62
มันสำปะหลัง	30,088,025	ลำต้น	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628990.82	15.40	9686.46	229.30
		กาบ	464250.95	16.23	7534.79	178.36
		กะลา	128936.58	17.93	2311.83	54.73
ไม้ยางพารา	3,090,280	กิ่ง/ก้าน	312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
รวม	145,853,073		59,539,905.20		504,339.40	11,938.67

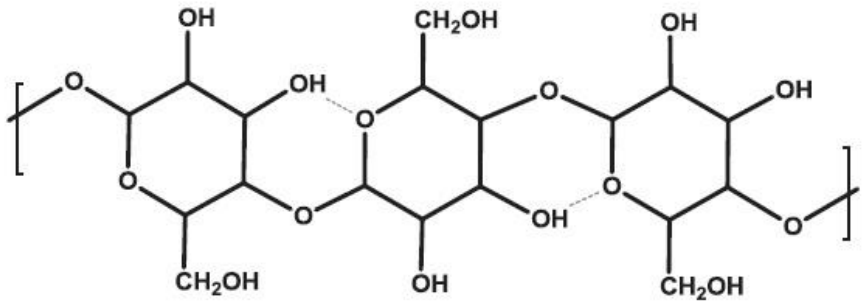
ที่มา : ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552

2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล

ลิกโนเซลลูโลส หมายถึง ชีวมวลอินทรีย์ที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบมากในผนังเซลล์ของพืชได้แก่ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากไม้ เศษวัสดุทางการเกษตร เช่น ซังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ และฟางข้าว ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหารและจากบ้านเรือน รวมถึงมูลสัตว์ต่างๆ

2.3.1 เซลลูโลส (cellulose)

เซลลูโลสเป็นพวกพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากในผนังเซลล์ของพืช ซึ่งเป็นสารพอลิเมอร์ที่เกิดจาก ดี-กลูโคสต่อกันเป็นสายยาวดังแสดงในรูปที่ 2.3 มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง และค่าเฉลี่ยน้ำหนักของโมเลกุลคือ 300,000-500,000 โมเลกุล [11] ช่วยทำให้ผนังเซลล์ของพืชแข็งแรงป้องกันการแตกของเซลล์ ถึงแม้ว่าเซลลูโลสจะประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสเหมือนกับแป้ง แต่เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา (β-1,4 – glycosidic bones) เอนไซม์อะไมเลสจึงไม่สามารถย่อยได้ เซลลูโลสไม่สามารถละลายน้ำได้ และไม่สามารถย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหารหรือลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมยกเว้นสัตว์กินพืชเท่านั้นที่สามารถใช้เซลลูโลสเป็นพลังงาน เพราะสัตว์กลุ่มนี้มีจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนซึ่งมีเอนไซม์เซลลูเลสอยู่ในกระเพาะสำหรับย่อยเซลลูโลสให้เป็นกลูโคสได้ [12]

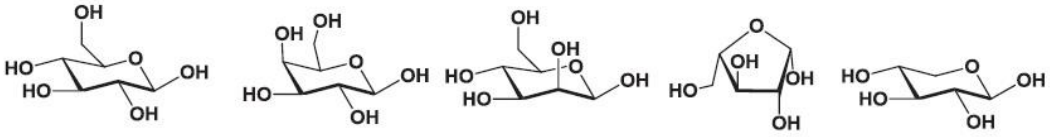


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส [13]

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ซับซ้อน เกิดขึ้นจากการเชื่อมโยงกับเซลลูโลสในผนังเซลล์ มีสูตรทั่วไปคือ $(C_5H_8O_4)_n$ เมื่อ n คือ จำนวนหน่วยกลูโคสทั้งหมดที่ประกอบกันเป็นโครงสร้าง เฮมิเซลลูโลสมีปริมาณการเกิดพอลิเมอร์ 50-200 หน่วย สามารถย่อยสลายได้ในด่าง เฮมิ

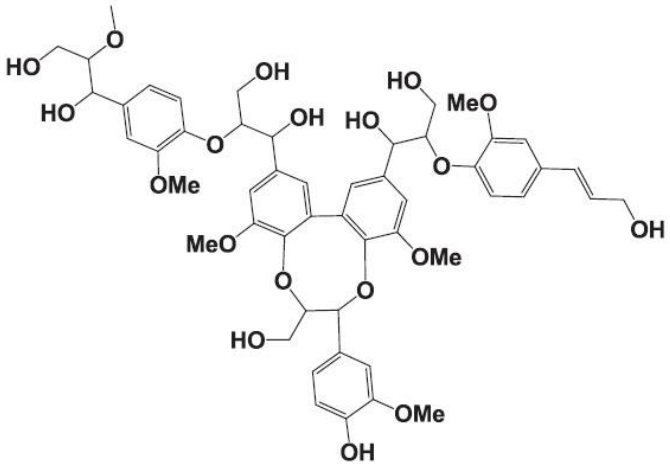
เซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม น้ำตาลที่อุดมสมบูรณ์มากที่สุดในเฮมิเซลลูโลสคือไซแลน โดยจะอยู่ในไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งได้ถึงประมาณร้อยละ 10 และร้อยละ 30 ของน้ำหนักแห้ง [11] แม้ว่าโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสที่แตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับชีวมวล แต่แหล่งที่มาของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่ประกอบด้วย ดี-กลูโคไพราโนส (D-glucopyranose),ดี-กาแลกโตไพราโนส (D-galactopyranose) และโมโนเมอร์อื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างที่เสถียรน้อยกว่าเซลลูโลส ดังนั้นเฮมิเซลลูโลสจึงสลายตัวได้ง่ายกว่าเมื่อถูกให้ความร้อน [13]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [13]

2.3.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติพบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างกับเซลลูโลสและพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีหน่วยของฟีนิลโพรเพนเชื่อมกับกลุ่มของไฮดรอกซิลและเมทิลผ่านพันธะของอีเทอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ลิกนินเป็นตัวประสานส่วนประกอบพื้นฐานของเส้นใยในพืช ลิกนินมีสมบัติที่สำคัญคือการละลายในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง ขณะที่บางส่วนในกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน (alkaline lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวกไดออกเซน (dioxane) ไพริดีน (pyridine) และสารละลายด่างเจือจางได้ โครงสร้างของลิกนินมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากไฮโดรเทอร์ทัล โดยพบว่าสารประกอบฟีนอลกับกลุ่มของเอทิลและเมทิลเป็นสารประกอบหลักที่ได้จากการย่อยสลายของลิกนิน [13]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน [13]

2.3.4 ค่าความร้อน (heating value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการประเมินผลในกระบวนการการทำให้เป็นของเหลว ค่าความร้อนเป็นค่าเชิงปริมาณของปริมาณพลังงานน้ำมันดิบชีวภาพซึ่งสามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการเปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นเชื้อเพลิง ค่าความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ค่าความร้อนสูง (higher heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (lower heating value, LHV) ค่าความร้อนสูงจะคำนึงถึงความร้อนของการกลายเป็นไอของน้ำในช่วงการเผาไหม้ ในขณะที่ค่าความร้อนต่ำไม่ต้องคำนึงถึงความร้อนนั้น

ในน้ำมันเชื้อเพลิงค่าความร้อนสูงมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และการวิเคราะห์แบบประมาณ ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้ถูกนำมาใช้สำหรับน้ำมันดิบชีวภาพที่ผลิตได้จากการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน การหาค่าความร้อนของชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) ออกซิเจน (O) และซัลเฟอร์ (S) หรืออยู่ในรูปสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (MC) และเศษเถ้า สมการที่นิยมใช้ในการหาค่าความร้อนคือ [14]

$$HHV = 0.3536FC + 0.1559VM - 0.0078ASH \ (MJ/kg)$$

โดยค่าความร้อนที่วัดได้จากสมการข้างต้นจะมีค่าความผิดพลาด (bias error) เพียงร้อยละ 0.12 ซึ่งถือว่าเป็นที่ยอมรับได้ และนอกจากนี้ค่าความร้อนสามารถคำนวณได้จากสูตรอย่างง่าย เช่นสูตรของดูลอง (Dulong formular) และสูตรของเดเมียบาส (Demirba, 1997) ดังสมการดังต่อไปนี้

สูตรของดูลอง (Dulong formular)

$$HHV\ (MJ/kg) = 0.3386\times C + 1.444\times(H-O/8)$$

สูตรของเดเมียบาส (Demirba, 1997)

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

$$HHV\ (MJ/kg) = 32.1FC + 15.34VM$$

2.3.5 การวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุ

การแสดงคุณลักษณะของเชื้อเพลิงแข็งจะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ ได้แก่ ความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว และเถ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และแบบแยกธาตุจะแสดงปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และเถ้า [3]

2.3.5.1 ความชื้น (moisture)

ความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในชีวมวล โดยทั่วไปชีวมวลมีความชื้นค่อนข้างสูง ชีวมวลที่เหมาะสมนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50 ปริมาณความชื้นในชีวมวลวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่หายไปหลังการอบชีวมวลให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 – 110 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปจะทำการอบชีวมวลในเตาอบไฟฟ้าจนกว่าชีวมวลจะแห้ง หรือน้ำหนักของชีวมวลคงที่ น้ำหรือความชื้นจะระเหยออกมาจากชีวมวลในระหว่างที่ทำการอบแห้ง

2.3.5.2 ปริมาณเถ้า (ash)

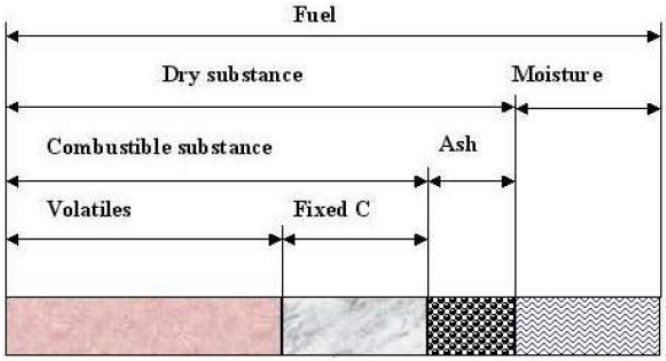
ปริมาณเถ้า คือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีขี้เถ้าประมาณร้อยละ 1 ถึง 3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าว จะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10 ถึง 20 ปริมาณเถ้าในชีวมวลวิเคราะห์ได้จากน้ำหนักที่เหลืออยู่จากการเผาไหม้ชีวมวลภายใต้บรรยากาศอากาศที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง และเผาต่อที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง ส่วนประกอบอินทรีย์ในชีวมวลจะถูกเผาไหม้สมบูรณ์กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในขณะที่ส่วนประกอบที่เป็นสารอนินทรีย์ในชีวมวลจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นสารประกอบออกไซด์เรียกว่าเถ้า

2.3.5.3 ปริมาณไอระเหย (volatiles matter)

ปริมาณไอระเหย คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ง่ายภายใต้สภาวะที่กำหนด คือ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที หรือจนกว่าน้ำหนักจะคงที่ โดยไม่ให้ชีวมวลสัมผัสกับอากาศ ชีวมวลที่มีค่าปริมาณไอระเหยสูงแสดงว่าสามารถติดไฟได้ง่าย

2.3.5.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

เป็นสารประกอบของคาร์บอนและเป็นค่าที่ใช้วัดปริมาณสารที่สามารถเผาไหม้ได้ที่หลงเหลืออยู่ และเป็นค่าหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพในการเผาไหม้



รูปที่ 2.6 องค์ประกอบของชีวมวล [4]

2.4 แนวทางการใช้ชีวมวลในประเทศไทย

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และมีผลผลิตทางการเกษตรและผลผลิตเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีศักยภาพสูง สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์มน้ำมัน ข้าว ข้าวโพด เป็นต้น โดยการแปรรูป ชานอ้อย กะลาปาล์ม แกลบ และซังข้าวโพด เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าและพลังงานความร้อนสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม ส่วนกากน้ำตาล น้ำอ้อย และมันสำปะหลังใช้ผลิตเอทานอล เป็นต้น กระทรวงพลังงานจึงมียุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานทดแทนจากพืชพลังงานเหล่านี้ เพื่อจะได้เป็นตลาดทางเลือกสำหรับผลิตผลการเกษตรไทย ซึ่งจะสามารถช่วยดูดซับผลผลิตทางการเกษตรและช่วยทำให้ราคาผลผลิตการเกษตรมีเสถียรภาพ และภาครัฐไม่ต้องจัดสรรงบประมาณมาประกันราคาพืชผลผลิตดังกล่าว ประกอบกับเทคโนโลยีพลังงานทดแทนจากพืชพลังงานเป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและมีความคุ้มทุนทางเศรษฐกิจ

กระทรวงพลังงาน (พน.) ได้กำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี โดยมอบหมายให้กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ซึ่งเป็นหน่วยงานหลักประสานงานกับส่วนผู้เกี่ยว

ข้องอื่นๆ ให้ดำเนินการจัดทำแผนปฏิบัติการตามกรอบแผนพัฒนาพลังงานทดแทน เพื่อให้สามารถดำเนินการพัฒนาพลังงานทดแทนด้านต่างๆ ให้สามารถผลิตไฟฟ้ารวมสะสมถึงปี 2565 จำนวน 5,604 เมกะวัตต์ นอกจากนั้นยังให้มีการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวภาพ ได้แก่ เอทานอลและไบโอดีเซล รวมทั้งพลังงานความร้อนและแก๊ส NGV ซึ่งก่อให้เกิดสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนได้ร้อยละ 20 ของปริมาณการใช้บริโภคของประเทศในปี 2565

การตั้งเป้าหมายสู่ความสำเร็จของการผลิตพลังงานทดแทนให้ได้ปริมาณดังกล่าว จำเป็นต้องสร้างแนวทางแผนพัฒนาในแต่ละเทคโนโลยีโดยเฉพาะกับภาคเอกชน ซึ่งเป็นแนวทางหลักที่สำคัญในการขับเคลื่อนสู่ความสำเร็จได้ ต้องมีความเด่นชัดในนโยบายเพื่อให้ปรากฏต่อการลงทุนจากภาคเอกชนและสร้างผลประโยชน์ต่อการดำเนินการ [5]

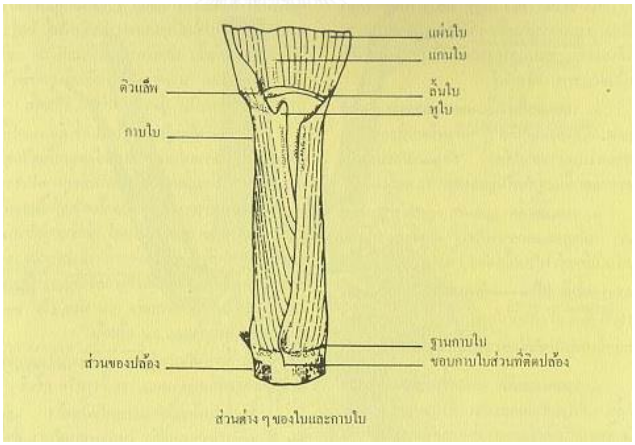
2.4.1 อ้อย

อ้อย [15] คือพืชพวกหญ้าชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญต่อมนุษย์มากในแง่ของการใช้เป็นอาหาร อ้อยนับเป็นพืชสำคัญอันดับ 4 ของโลก เมื่อพิจารณาในแง่ของผลผลิต คิดเป็นน้ำหนักแห้งที่เก็บเกี่ยวได้ต่อเนื้อที่ต่อปี อ้อยมาเป็นอันดับแรก ทั้งนี้ เพราะอ้อยสามารถใช้ปัจจัยสำหรับการเจริญเติบโต เช่น แสงแดด น้ำ อากาศ และธาตุอาหารได้มีประสิทธิภาพมากกว่านั่นเอง นอกจากนี้อ้อยยังเป็นพืชที่ปลูกง่าย และเมื่อปลูกครั้งหนึ่งแล้วสามารถเก็บเกี่ยวได้หลายครั้ง อ้อยชอบอากาศร้อนและชุ่มชื้น ดังนั้นประเทศที่ปลูกอ้อยซึ่งมีประมาณ 70 ประเทศจึงอยู่ในแถบร้อนและชุ่มชื้น ประเทศที่ผลิตน้ำตาลจากอ้อยได้มากที่สุด คือ บราซิล ผลิตได้ 7.5 ล้านเมตริกตัน รองลงมาได้แก่ อินเดีย คิวบา ออสเตรเลีย เม็กซิโก ฟิลิปปินส์ จีน และไทย ผลิตได้ 6.0, 5.8, 3.4, 2.69, 2.67, 2.60, 2.26 ล้านเมตริกตัน ตามลำดับ ประเทศนอกเหนือจากที่กล่าวนี้ ล้วนผลิตน้ำตาลได้น้อยกว่าประเทศไทยทั้งสิ้น

2.4.1.1 ลักษณะทั่วๆ ไป และลักษณะทางพฤกษศาสตร์

อ้อยมีระบบรากฝอย (fibrous root system) แผ่กระจายออกโดยรอบลำต้นในรัศมีประมาณ 50-100 เซนติเมตร ลึก 100-150 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม อ้อยไม่มีรากแก้วนอกจากเมื่อปลูกด้วยเมล็ด ปกติอ้อยขยายพันธุ์โดยใช้ลำต้นตัดเป็นท่อนๆ ละ 2-3 ตา อ้อยได้ชื่อว่า "หญ้ายักษ์" (giant grass) ทั้งนี้เพราะมีลำต้นสูงใหญ่ อ้อยที่เก็บเกี่ยวเมื่ออายุ 12 เดือน อาจมีลำต้นสูงประมาณ 2-3 เมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-5.0 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ สภาพแวดล้อมและการปฏิบัติรักษาของชาวไร่ ลำต้นประกอบด้วยข้อและปล้องจำนวนมาก อ้อยที่ตัดเมื่ออายุ 12 เดือน จะมีปล้อง 20-30 ปล้อง แต่ละปล้องเมื่อโตเต็มที่จะยาวประมาณ 10-15 เซนติเมตร ความยาวของปล้องขึ้นอยู่กับพันธุ์และสภาพแวดล้อม สีของลำต้นแตกต่างกันตามพันธุ์

และสภาพแวดล้อม โดยทั่วไปมีสีแตกต่างกันตั้งแต่สีเขียวอ่อนจนถึงสีม่วงแก่เกือบดำ ใบอ้อยมีลักษณะคล้ายใบข้าว แต่มีขนาดใหญ่และยาวมากกว่า ใบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ กาบใบและแผ่นใบ กาบใบ คือ ส่วนที่ติดและโอบรอบลำต้นทางด้านที่มีตา ฐานกาบใบกว้างที่สุดแล้วเรียวลงสู่ปลายแผ่นใบ ได้แก่ ส่วนที่อยู่ต่อจากกาบใบขึ้นไป ทั้งสองส่วนแยกจากกันตรงรอยต่อ (blade joint) ด้านในของรอยต่อนี้จะมีส่วนยื่นเป็นเยื่อบางๆ รูปร่างคล้ายกระจับเรียกว่า ลิ้นใบ (ligule) ที่ส่วนปลายของกาบใบ จะมีความกว้างมากกว่าฐานของแผ่นใบ จึงทำให้มีส่วนเกินซึ่งมักจะยื่นขึ้นไปข้างบน เรียกว่า หูใบ (auricle) ซึ่งอาจจะมีทั้งสองข้าง ข้างเดียว หรือไม่มีเลยก็ได้ ลักษณะและรูปร่างของลิ้นใบและหูใบแตกต่างกันตามพันธุ์ กาบใบส่วนมากมักมีสีแตกต่างจากตัวใบ เช่น สีเขียวอ่อน หรือเขียวอมม่วง เป็นต้น ที่หลังกาบใบอาจมีขนและมีไขเกาะ เหล่านี้ล้วนเป็นลักษณะประจำพันธุ์ทั้งสิ้น ถัดจากกาบใบขึ้นไปเป็นแผ่นใบ ซึ่งมีแกนใบหรือแกนกลางใบแข็งทำให้แผ่นใบตั้งอยู่ได้ ความยาวของแผ่นใบแตกต่างกันตามพันธุ์ บางพันธุ์อาจยาวมากกว่า 2 เมตร แผ่นใบมีฐานแคบแล้วกว้างออก จนถึงกว้างที่สุดแล้วเรียวลงสู่ปลายใบซึ่งแหลม ขอบใบมีลักษณะเป็นฟันเลื่อยคม ที่ฐานของแผ่นใบด้านหลังจะพบพื้นที่ลักษณะคล้ายสามเหลี่ยม 2 รูป ชนกันที่แกนกลางใบเรียกว่า ดิวแล็พ (dewlap) ขอบของดิวแล็พมีลักษณะเป็นคลื่นยืดหยุ่นได้ ซึ่งช่วยลดการฉีกขาดของใบเมื่อถูกลม รูปร่างลักษณะและสีของดิวแล็พแตกต่างกันตามพันธุ์



รูปที่ 2.7 ส่วนต่างๆ ของใบและกาบใบ [15]

2.4.1.2 การเจริญเติบโตของอ้อย

อ้อยมีการเจริญเติบโตตามลำดับ ซึ่งพอจะแบ่งออกได้เป็น 4 ระยะ คือ

2.4.1.2.1.ระยะงอก (germination phase) ระยะนี้เริ่มตั้งแต่ปลูกจนกระทั่งหน่อโผล่พ้นดิน ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2-3 สัปดาห์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น พันธุ์ การ

ปฏิบัติต่อท่อนพันธุ์ และความหนาของดินที่กลบท่อนพันธุ์ เป็นต้น หน่อที่เกิดจากตาของท่อนพันธุ์เรียกว่า หน่อแรก (primary shoot) หรือหน่อแม่ (mother shoot) จำนวนท่อนพันธุ์ที่งอกต่อไร่จะเป็นตัวกำหนดจำนวนกออ้อยในพื้นที่นั้น

รูปที่ 2.8 อ้อยปลูกอายุประมาณ 3-4 สัปดาห์ [15]

2.4.1.2.2.ระยะแตกกอ (tillering phase) ในระยะงอกนั้นอ้อยแต่ละตาจะงอกขึ้นมาเพียงต้นเดียวเท่านั้น และเมื่อเติบโตพอสมควรจึงจะมีการแตกกอ การแตกกอเป็นลักษณะสำคัญของพืชตระกูลหญ้ารวมทั้งอ้อย เกิดขึ้นเนื่องจากตาที่อยู่ส่วนโคนของลำต้นใต้ดินของหน่อแรกเจริญออกมาเป็นหน่อชุดที่สอง และจากหน่อชุดที่สองก็เจริญเป็นหน่อชุดที่สาม หรืออาจจะมีหน่อชุดต่อไปอีก ทำให้มีจำนวนหน่อหรือลำต้นเพิ่มขึ้น ในระยะนี้อิทธิพลของยอดมีน้อยมาก จึงไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของตาที่อยู่ส่วนโคนได้ ระยะแตกกอเป็นระยะต่อเนื่องกับระยะงอก การแตกกอจะเริ่มเมื่ออายุประมาณ 1.5 เดือนเป็นต้นไป แต่ระยะที่มีการแตกกอมากที่สุดอยู่ระหว่าง 2.5-4 เดือน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างตามที่กล่าวแล้ว หน่อที่แตกออกมาทั้งหมดในระยะแตกกอนี้ จะเหลือเพียงประมาณครึ่งหนึ่ง เมื่อถึงเวลาเก็บเกี่ยวหน่อที่อ่อนแอกว่าจะตายไป เพราะการแข่งขันกันเพื่อปัจจัยในการเจริญเติบโต เช่น แสงแดด น้ำ และธาตุอาหาร เป็นต้น จำนวนลำต้นต่อกอขณะเก็บเกี่ยวขึ้นอยู่กับจำนวนหน่อในระยะแตกกอนี้

รูปที่ 2.9 ปลูกถั่วแซมระหว่างแถวอ้อย [15]

2.4.1.2.3.ระยะย่างปล้อง (stalk elongation phase) เป็นระยะต่อเนื่องกับการแตกกอ ระยะนี้จะมีการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของปล้องอย่างรวดเร็ว ทำให้อ้อยทั้งลำต้นเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วด้วย ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่อายุประมาณ 3-4 เดือน จนถึงอายุประมาณ 7-8 เดือน หลังจากนั้นการเจริญเติบโตจะมีน้อยลง และจะเริ่มมีการสะสมน้ำตาลเพิ่มขึ้น ขนาดและความยาวของแต่ละต้นในระยะนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักของแต่ละลำต้น และน้ำหนักแต่ละลำต้นมีผลโดยตรงต่อผลผลิตน้ำหนักของอ้อยทั้งไร่เมื่อเก็บเกี่ยว

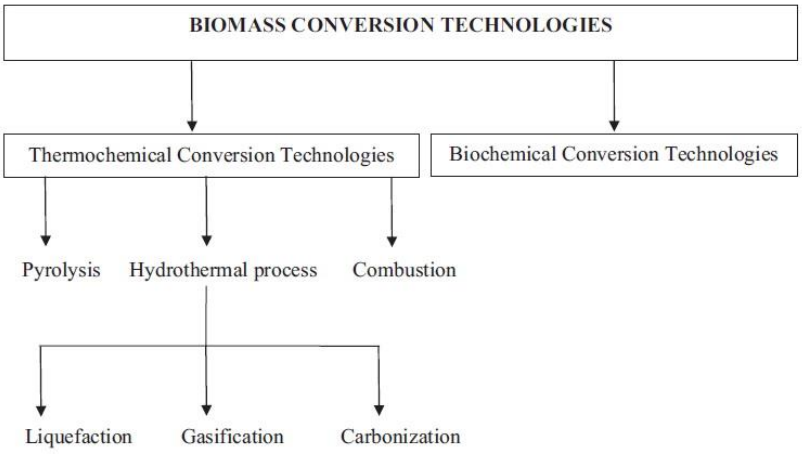
2.4.1.2.4.ระยะแก่และสุก (maturity and ripening phase) ระยะแก่คือระยะที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้าลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับระยะต่างๆ ตามที่ได้กล่าวแล้ว เมื่อการเจริญเติบโตเริ่มช้าลง น้ำตาลที่ใบสร้างขึ้นจากการสังเคราะห์แสงก็จะถูกใช้น้อยลง และมีเหลือเก็บสะสมในลำต้นมากขึ้น ซึ่งเป็นการเริ่มต้นของระยะสุกนั่นเอง การสะสมน้ำตาลจะเริ่มจากส่วนโคนไปหาปลาย ดังนั้นส่วนโคนจึงหวานก่อนและมีความหวานมากกว่าส่วนปลาย การสะสมน้ำตาลจะมีมากขึ้นโดยลำดับ จนกระทั่งส่วนโคน ส่วนกลาง และส่วนปลาย มีความหวานใกล้เคียงกัน เรียกว่า สุก

รูปที่ 2.10 อ้อยอายุประมาณ 8 เดือน [15]

2.5 กระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิง

เทคโนโลยีที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงชีวมวลไปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกระบวนการ คือกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน สำหรับกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี (biochemical process) ชีวมวลจะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์และจุลินทรีย์ ส่วนกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน (thermochemical process) ชีวมวลจะถูกย่อยสลายด้วยความร้อน กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นเทคโนโลยีการแปลงชีวมวลด้วยความร้อนไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว แก๊ส และของแข็ง [13]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.11 เทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวล [13]

2.5.1 กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี (biochemical process)

การย่อยสลายของสารชีวมวลโดยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ เช่น การหมักและการย่อยสลายโดยเอนไซม์ แบคทีเรียและจุลินทรีย์จนเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารอินทรีย์ที่นำไปใช้เป็นพลังงานได้ในรูปของเอทานอลและมีเทน (CH_4)

2.5.2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน (thermochemical process)

กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน [7] เป็นการแปรรูปชีวมวลโดยการย่อยสลายชีวมวลไปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพหรือสารเคมีที่มีค่าด้วยความร้อน กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อนแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการย่อย คือ การเผาไหม้โดยใช้ออกซิเจนหรือการสันดาป (combustion) การเผาไหม้โดยไม่ใช้ออกซิเจนหรือไพโรลิซิส (pyrolysis) การทำให้เกิดแก๊สหรือแกซิฟิเคชัน (gasification) และลิควิแฟกชัน (liquefaction)

2.5.2.1 การเผาไหม้ (combustion)

การเผาไหม้ [7] เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนร่วมกับการเกิดความร้อนสูงและแสง เป็นปรากฏการณ์ที่ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเมื่อใช้สารชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่มีความร้อนเกิดขึ้นโดยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ซัลเฟอร์ที่เผาไหม้ได้ และไนโตรเจนซึ่งอยู่ในสารชีวมวลทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเรียกว่าการเผาไหม้ กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาในเฟสแก๊ส ปฏิกิริยาบนพื้นที่ผิว หรือทั้งคู่ตามด้วยกระบวนการหลอมเหลว การระเหยและไพโรไลซิส ในปฏิกิริยาการเผาไหม้จริงเกิดปรากฏการณ์หลายอย่างที่ซับซ้อนเช่น การระเหย การแพร่ การผสม การนำความร้อน การพาความร้อน การแผ่รังสี และการเกิดเปลวไฟที่อุณหภูมิสูง เชื้อเพลิงเผาโดยตรงในเฟสแก๊ส ในการเผาไหม้เป็นแบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน (premix combustion) และการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงแพร่กระจาย (diffusion combustion) เชื้อเพลิงของเหลวจะถูกเผาเหมือนเป็นแก๊สเผาไหม้ได้ในเฟสแก๊ส หลังจากการระเหยที่พื้นผิวซึ่งเรียกว่าการเผาแบบระเหย น้ำมันจะถูกเผาในการเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงระเหย (evaporation combustion) แต่การเผาไหม้แบบเชื้อเพลิงสลายตัว (decomposition combustion) ยังดำเนินต่อไปซึ่งจะสลายเชื้อเพลิงบางส่วนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา ชนิดของการเผาไหม้มีหลายรูปแบบดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชนิดของการเผาไหม้และรูปแบบของสารชีวมวล [7]

วิธีการเผาไหม้	ชนิดของการเผาไหม้	ลักษณะสำคัญ
การเผาไหม้ แบบ fixed bed	ตะกรับวางแนวนอน/เอียง ตะกรับที่มีน้ำหล่อเย็น ตะกรับที่มีการทิ้งขี้เถ้า	ตะกรับเป็นชั้นหรือเป็นแบบเอียงชัน การเผาไหม้ของสารชีวมวลเป็นการเผาไหม้พื้นผิว ใช้ในเตาเผาแบบ batch ขนาดเล็ก สำหรับสารชีวมวลที่มีขี้เถ้าน้อย
การเผาไหม้ แบบ Moving bed	ตะกรับวางแนวนอน/เอียง ตะกรับที่มีน้ำหล่อเย็น ตะกรับที่มีการทิ้งขี้เถ้า	ตะกรับจะค่อยๆเคลื่อนที่ และถูกแบ่งเป็นโซนเผาไหม้และโซนหลังจากเผาไหม้ เนื่องจากมีการปล่อยขี้เถ้าอย่างต่อเนื่อง ทำให้ตะกรับมีขนาดใหญ่ เพื่อลดการกีดขวางของขี้เถ้าในการเผา สามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้ตั้งแต่เป็นเศษเล็กๆจนถึงเป็นขนาดบล็อค
การเผาไหม้ แบบ Fluidized bed	ตะกรับวางแนวนอน/เอียง ตะกรับที่มีน้ำหล่อเย็น ตะกรับที่มีการทิ้งขี้เถ้า	ใช้ทรายเป็นเบด โดยให้ทรายและเชื้อเพลิงที่อยู่ในเตาหลอมนั้นอยู่ในสภาวะเดือดที่มีความดันของอากาศในการเผาไหม้สูงและเกิดการเผาไหม้ผ่านความร้อนที่กักเก็บในทรายและผลการส่งผ่านความร้อนของทรายเหมาะสำหรับเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงและมีคุณภาพต่ำ
การเผาไหม้ แบบBurner	เครื่องพ่นไฟ (burner)	เผาผงไม้หรือผงขนาดละเอียดเช่น เนื้อเยื่อที่อยู่ส่วนกลางของลำต้นอ้อยด้วย burner เหมือนกับที่เผาเชื้อเพลิงเหลว

ความร้อนของการเผาไหม้นั้นถูกนำไปใช้สำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าและการผลิตความร้อน โดยกู้ความร้อนคืนผ่านการถ่ายเทความร้อนของตัวกลาง เช่นไอน้ำและน้ำร้อนโดยใช้บอยเลอร์และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.5.2.2 ไพโรลิซิส (pyrolysis)

ไพโรไลซิส [7] เป็นกระบวนเคมีความร้อน เมื่อชีวมวลมีการสัมผัสกับสภาพแวดล้อมที่ร้อนจะเกิดการสลายตัว และแปลงสภาพเป็นแก๊สติดไฟและเถ้าถ่าน โดยกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการแตกตัวของสารที่มีมวลโมเลกุลสูงด้วยกระบวนการทางความร้อน ภายใต้ภาวะปราศจากอากาศ โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 450 – 600 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภณัฑ์ คือ แก๊ส ของแข็ง และของเหลว โดยแก๊สที่ได้ประกอบด้วย มีเทน (CH_4) จนถึงโพรเพน (C_4H_{10}) ส่วนของเหลวที่ได้มีคุณลักษณะทั่วไปคล้ายน้ำมันเรียกว่าไบโอออยล์ (bio oil) ซึ่งส่วนของของเหลวนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความต้องการจากกระบวนการมากที่สุด สำหรับของแข็งที่ได้จากกระบวนการ คือ ถ่าน (char) ซึ่งเป็นผงของคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กที่เกิดจากปฏิกิริยาแตกตัว โดยอัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน อัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการและชนิดของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการผลิต

2.5.2.3 แกซิฟิเคชัน (gasification)

แกซิฟิเคชัน [7] กระบวนการในการเปลี่ยนวัตถุดิบชีวมวลของแข็งเป็นแก๊สเชื้อเพลิงหรือแก๊สวัตถุดิบตั้งต้นทางเคมี (syngas) วิธีแกซิฟิเคชันถูกแบ่งออกตามส่วนประกอบของปัจจัยเงื่อนไขที่แสดงในตารางที่ 2.3

แกซิฟิเคชันเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานในรูปแก๊สเชื้อเพลิง (fuel gases) โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาวะจำกัดอากาศเพื่อให้เกิดสภาวะที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนในสัดส่วนที่ต่ำกว่าปริมาณที่ทำให้เกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ทำให้ชีวมวลเกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ในรูปของแข็งและแก๊ส ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ไฮโดรเจน (H_2) มีเทน (CH_4) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ไนโตรเจน (N_2) และแก๊สอื่นๆ เรียกว่า โปรดิวเซอร์แก๊ส (producer gas) กระบวนการแกซิฟิเคชันจากชีวมวลเป็นกระบวนการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ ดังนั้นปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นจะมีความซับซ้อนและสามารถเกิดผลิตภัณฑ์หรือแก๊สได้หลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดของ ชีวมวลและปัจจัยต่างๆ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้มีทั้งแก๊สเชื้อเพลิง ของแข็งและสิ่งเจือปนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้หมด ได้แก่ ถ่านชาร์ (char) เถ้า (ash) น้ามันดิน (tar) และไอน้ำ เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 การแบ่งประเภทของแกซิฟิเคชัน [7]

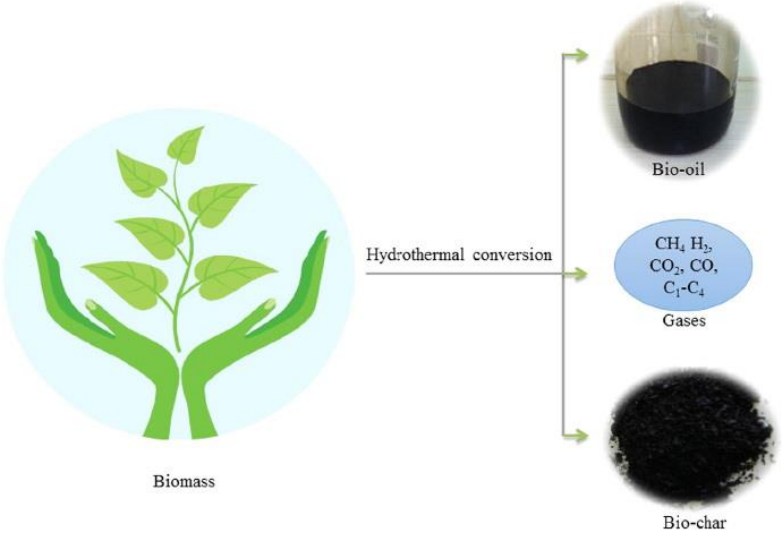
การแบ่งประเภท	ปัจจัยเงื่อนไข
ความดันแกซิฟิเคชัน	ความดันปกติ (0.1-0.12 เมกะพาสคัล) ความดันสูง (0.5-2.5 เมกะพาสคัล)
อุณหภูมิแกซิฟิเคชัน	อุณหภูมิต่ำ (700 องศาเซลเซียสหรือต่ำกว่า) อุณหภูมิสูง (700 องศาเซลเซียสหรือมากกว่า) อุณหภูมิสูงในการสลายตัว (จุดหลอมเหลวเถ้าและสูงกว่า)
องค์ประกอบที่ทำให้เกิดแกซิฟิเคชัน	อากาศ ออกซิเจน ไอน้ำและ สารประกอบของสารเหล่านั้น คาร์บอนไดออกไซด์
การให้ความร้อน (การเกิดโซนอุณหภูมิ)	แกซิฟิเคชันโดยตรง (ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของแกซิฟิเคชันบางส่วนของวัตถุดิบและออกซิเจน) แกซิฟิเคชันโดยอ้อม (ให้ความร้อนแก่วัตถุดิบและสารที่ทำให้เกิดแกซิฟิเคชันโดยความร้อนจากภายนอก)
ชนิดของ gasifier	ฟิกซ์เบด (fixed bed) โฟว์เบด (flow bed) โฟว์เบดแบบหมุนเวียน (circulating flow bed) เบดแบบนำพาอนุภาคให้ไหลไปตามกระแสของของเหลว (entrained bed) เบดที่มีการผสม (mixing bed) เตาเผาแบบหมุน (rotary kiln) หอคู่ (twin tower) เตาหลอมเหลว (molten furnace)

2.5.2.3 ลิควิแฟกชัน (liquefaction)

ลิควิแฟกชัน [13] คือ การทำให้เป็นของเหลวโดยผ่านการย่อยสลายโมเลกุลของชีวมวลด้วยความร้อนร่วมกับการใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลวเช่น น้ำหรือตัวทำละลายอื่นๆ เพื่อผลิตน้ำมัน การทำลิควิแฟคชันของสารชีวมวลนั้นสารชีวมวลจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวที่เสถียรโดยใช้อุณหภูมิต่ำและอัดความดันไฮโดรเจนซึ่งอาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการดังกล่าวด้วย

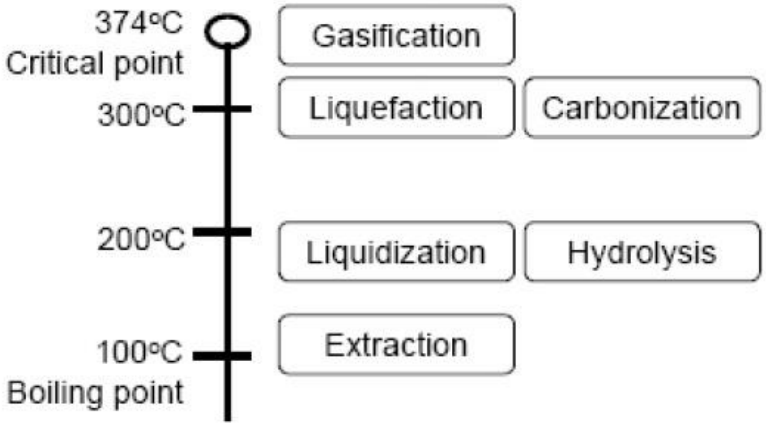
ไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันเป็นกระบวนการที่อาศัยน้ำที่อุณหภูมิ 250-374 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 4-22 เมกะพาสคัล ข้อดีที่สำคัญของไฮโดรเทอร์มัลคือสารตั้งต้นไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้แห้ง สามารถใช้กับสารตั้งต้นที่มีปริมาณความชื้นสูงได้ เช่น สารชีวมวลน้ำ ขยะ

กากอินทรีย์และอื่นๆ ในไฮโดรเทอร์มัลชีวมวลจะถูกแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่เรียกว่าถ่านชีวภาพ (bio-char) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) และผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยการเปลี่ยนตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการ เช่น อุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา และความดันเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น



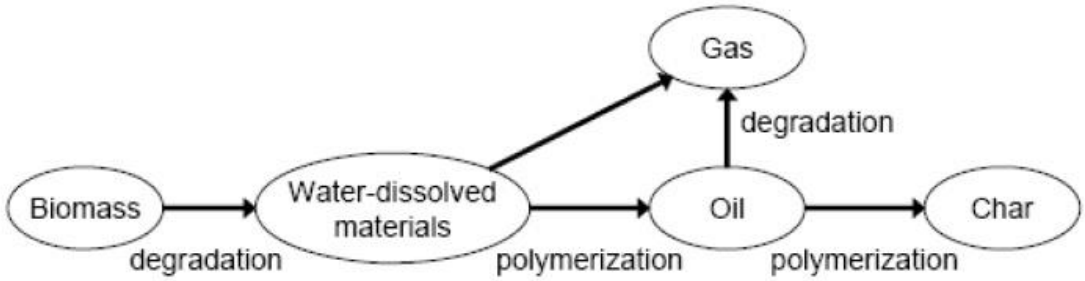
รูปที่ 2.12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรเทอร์มัลจากชีวมวล [13]

นอกจากนี้ปฏิกิริยาหลายชนิดสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิที่แตกต่างดังแสดงในรูปที่ 2.13 แสดงปฏิกิริยาซึ่งเกิดขึ้นในน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูง ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส สารที่ละลายได้จะละลายในน้ำและเหมาะกับการสกัดสาร เหนืออุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเกิดการไฮโดรไลซิสและสารชีวมวลเช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โปรตีนและอื่นๆจะถูกย่อยจากพอลิเมอร์เป็นโมโนเมอร์ และที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียสและความดัน 1 เมกะพาสคัล ของแข็งจำพวกสารชีวมวลจะถูกทำให้เป็นสารผสมในของเหลว (slurry) ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียสและความดัน 10 เมกะพาสคัล จะเกิดลิควิแฟกชันขึ้นทำให้ได้สารจำพวกน้ำมัน เมื่อเงื่อนไขของปฏิกิริยาเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น เวลาในการทำปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์หลักก็จะเปลี่ยนแปลงไป [7]



รูปที่ 2.13 ปฏิกิริยาที่เกิดในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง [7]

ไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันมีการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวและปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน แผนผังปฏิกิริยาพื้นฐานแสดงในรูปที่ 2.14 ในขั้นตอนแรกสารชีวมวลจะถูกสลายเป็นสารที่ละลายน้ำ จากนั้นสารที่ละลายน้ำจะเกิดพอลิเมอไรเซชันเปลี่ยนเป็นน้ำมัน เมื่อเกิดปฏิกิริยานานขึ้นน้ำมันที่เกิดขึ้นจะเกิดพอลิเมอไรเซชันเปลี่ยนเป็นชาร์



รูปที่ 2.14 แผนผังของปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันเบื้องต้น [7]

น้ำมันผลิตภัณฑ์จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน

สมบัติของน้ำมันที่เกิดขึ้นโดยลิควิแฟกชันถูกแสดงในตารางที่ 2.4 ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยไม่มีไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ และมีตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกแอลคาไลน์สำหรับไม้แต่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกากสิ่งปฏิกูล น้ำมันที่เกิดขึ้นมีปริมาณออกซิเจนสะสมประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ดังนั้นค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงสุดนั้นต่ำกว่าค่าของน้ำมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลหนัก

จากปิโตรเลียม นอกจากนั้นความหนืดยังมีค่าสูง น้ำมันที่ได้จากไม้จะมีปริมาณกรดมากกว่าซึ่งสามารถกัดกร่อนและเกิดพอลิเมอไรเซชันระหว่างการกักเก็บ

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของน้ำมันที่ได้จากลิควิแฟกชัน [7]

สารชีวมวล	ไม้	กากสิ่งปฏิกูล
องค์ประกอบที่เป็นธาตุ [ร้อยละโดยน้ำหนัก]		
คาร์บอน	72	71
ไฮโดรเจน	6	9
ไนโตรเจน	-	6
ออกซิเจน	22	16
ไฮโดรเจนต่อคาร์บอน	1.0	1.52
ค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้สูงสุด [เมกะจูลต่อกิโลกรัม]	29-30	33-34
ความหนืด [มิลลิพาสคัลวินาที]	$>10^6$	10^3-10^4

2.6 น้ำมันดิบชีวภาพ (Biocrude)

โดยทั่วไปของน้ำมันดิบชีวภาพเป็นของเหลวอินทรีย์สีน้ำตาลดำที่สามารถละลายน้ำได้ ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่มีประจุอยู่ประมาณร้อยละ 75-80 โดยน้ำหนัก มีน้ำอยู่ประมาณร้อยละ 20-25 และมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบที่สูงถึงร้อยละ 35-40 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน เช่นอุณหภูมิ, ตัวทำละลาย, ความหนาแน่นของตัวทำละลาย เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น แต่องค์ประกอบของวัตถุดิบตั้งต้นมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพ

การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและทางเคมี เช่น ความหนาแน่น ความหนืด อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C) และอัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C) ของน้ำมันดิบชีวภาพที่ผ่านการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวลตั้งต้นที่แตกต่างกัน [16] ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวลชนิดต่างๆ [16]

ชนิดของชีวมวล	ชีวมวล	ความหนืด (เซนติพอยซ์)	ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลิตร)	ค่าความร้อนการเผาไหม้สูงสุด (เมกะจูล/กิโลกรัม)	อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C)	อัตราส่วนออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C)
ชีวมวล	ชานอ้อย	$6.7x10^5$	-	31	1.12	0.21
	เปลือกมะพร้าว	$1.3x10^6$	-	30	1.00	0.21
	ซังข้าวโพด	$1.6x10^6$	-	30	1.01	0.21
สาหร่าย	Botryococcus braunii	64-160, 50 องศาเซลเซียส	-	48	2.42	0.02
	Spirulina platensis	189.80, 40 องศาเซลเซียส	0.97	34	1.44	0.10
เชื้อเพลิง	น้ำมันดีเซล	1.1-3.5, 40 องศาเซลเซียส	0.85	45.1	1.79	0
	ไบโอดีเซล	1.7-5.3, 40 องศาเซลเซียส	0.88	40.5	1.87	0.11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.6.1 สมบัติทางกายภาพ

2.6.1.1 ความหนืด (viscosity)

ความหนืดเป็นตัวชี้วัดพฤติกรรมการไหลของของเหลว สำหรับความหนืดของสารประกอบอินทรีย์จะเกี่ยวข้องกับโครงสร้างทางเคมี เช่น ไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงจะมีความหนืดมากกว่าไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่กิ่ง และกลุ่มของแอลกอฮอล์หรือกรดจะมีผลกับความหนืดมากกว่าเมื่อเทียบกับเอสเทอร์และคีโตน [16]

น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนืดสูงเกินไปก็ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่ดี เพราะจะทำให้เครื่องยนต์ต้องเพิ่มการทำงานโดยการสูบน้ำมันเชื้อเพลิงมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงมีปริมาณความหนืดสูงก็จะสังเกตเห็นปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มสูงตาม ในทางตรงกันข้ามความ

หนืดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต่ำมากจะนำไปสู่การหล่อลื่นที่ดีของปั๊มหัวฉีดของน้ำมันเชื้อเพลิง จะก่อให้เกิดการรั่วไหลและการสึกหรอเพิ่มขึ้น [16]

2.6.1.2 ความหนาแน่น (density)

ความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์กับปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบอกสูบ เชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะส่งพลังงานออกมามากผ่านการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงที่มีมวลมาก นอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) และคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปล่อยออกมาด้วย [16]

2.6.1.3 ค่าความร้อน (heating value)

ค่าความร้อนของเชื้อเพลิงเป็นเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการประเมินผลในกระบวนการการทำให้เป็นของเหลว ค่าความร้อนเป็นค่าเชิงปริมาณของปริมาณพลังงานน้ำมันดิบชีวภาพซึ่งสามารถนำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการเปลี่ยนวัตถุดิบไปเป็นเชื้อเพลิง ค่าความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ค่าความร้อนสูง และค่าความร้อนต่ำ [16]

2.6.2 สมบัติทางเคมี

2.6.2.1 ปริมาณออกซิเจน (oxygen content)

ปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากลิควิแฟกชันจะมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชันของสารประกอบในชีวมวล เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งสารประกอบออกซิเจนเหล่านี้จะอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ คีโตน แอลดีไฮด์ น้ำตาล ฟูแรน ฟีนอล และสารประกอบออกซิเจนอื่นๆ ในการกลั่นน้ำมันดิบนั้นออกซิเจนจะถูกกำจัดออกไปเพื่อป้องกันการเร่งปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพในกระบวนการรีฟอร์มมิ่ง [16]

2.6.2.2 ปริมาณไนโตรเจน (nitrogen content)

น้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวล จะมีปริมาณไนโตรเจนไม่เกินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก มีรายงานว่าน้ำมันดิบชีวภาพที่มีปริมาณไนโตรเจนสูงเป็นน้ำมันดิบชีวภาพที่ผลิตได้จากขยะ กากตะกอนน้ำเสีย และสาหร่าย โดยสูงถึงร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นผลมาจากปริมาณโปรตีนที่อยู่ในวัตถุดิบตั้งต้น [16]

2.6.2.3 ปริมาณกำมะถัน (sulphur content)

ปริมาณกำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิงจะถูกควบคุมเนื่องจากการเผาไหม้กำมะถันในน้ำมันเชื้อเพลิงจะทำให้เกิดอนุภาคของซัลเฟอร์ออกไซด์ วัสดุจากชีวมวลและสาหร่ายจะมีปริมาณกำมะถันน้อยมาก โดยน้ำมันดิบชีวภาพที่ผลิตได้จะมีปริมาณกำมะถันร้อยละ 0.1-1.3 โดยน้ำหนัก [16]

2.6.2.4 องค์ประกอบทางเคมี (chemical composition)

น้ำมันดีเซลส่วนใหญ่ประกอบด้วยแอลเคน แอลคีนและอะโรเมติก ในขณะที่ไบโอดีเซลประกอบด้วยสารประกอบออกซิเจน ส่วนน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่ซับซ้อนของสารเคมีอินทรีย์ที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น อะลิฟาติก น้ำตาล โอลิโกเมอร์ และสารประกอบไนโตรเจน [16] ดังแสดงในตารางที่ 2.6

องค์ประกอบทางกายภาพของน้ำมันดีเซลและน้ำมันไบโอดีเซลได้รับการศึกษามานานแล้ว ในขณะที่น้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันยังไม่ค่อยได้รับความสนใจ ตารางที่ 2.7 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ในน้ำมันดีเซลและผลกระทบที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิง โดยสารประกอบสายโซ่ยาวและกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวจะส่งผลต่อสมบัติของน้ำมันดีเซล การเพิ่มความยาวของสายโซ่จะเป็นการเพิ่มค่าซีเทน ค่าความร้อนและความหนืด ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะลดความหนืดและค่าซีเทน แต่ความหนาแน่นและค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน [16]

องค์ประกอบหลัก (Main components)	**ร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ (Area%)***
Phenolics	6%–65%
Esters	2%–44%
Aromatics and heterocyclics	6%–35%
Aldehydes	0%–18%
Carboxylic acids	2%–40%
Ketones	0%–38%
Alkanes	9%–13%

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

องค์ประกอบหลัก (Main components)	ร้อยละของพื้นที่ใต้กราฟ (Area%)*
Nitrogenates	12%–23%

* ผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatography-mass spectrometry)

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบทางเคมีที่ส่งผลต่อสมบัติของน้ำมันดีเซล [16]

Group	Ignition Quality	Heating Value	Density
n-Alkanes	Good	Low	Low
Isoalkanes	Low	Low	Low
Alkenes	Low	Low	Low
Cycloalkanes	Moderate	Moderate	Moderate
Aromatics	Poor	High	High

2.7 กระบวนการอัพเกรดน้ำมันดิบชีวภาพ (upgrading process)

เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของไพโรไลซิสและไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน จึงมีการศึกษาการอัพเกรดน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันโดยศึกษาจากการอัพเกรดน้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิส โดยการอัพเกรดน้ำมันที่ได้จากไพโรไลซิสก็มีแรงบันดาลใจมาจากเทคโนโลยีการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม

2.7.1 กระบวนการแยก (separation)

ผลิตภัณฑ์จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันประกอบไปด้วย แก๊ส น้ำมัน ส่วนของน้ำมันที่ละลายน้ำ และกากของแข็ง การศึกษาเกี่ยวกับไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันและไพโรไลซิสของชีวมวลจะใช้วิธีการแยกทางกายภาพ โดยจะแยกบางส่วนของผลิตภัณฑ์มาทำการวิเคราะห์ การกำจัดปริมาณน้ำในน้ำมันมีความสำคัญโดยเฉพาะสำหรับกระบวนการอัพเกรด เพราะน้ำอาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ทำงาน [16]

2.7.1.1 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction)

การเติมตัวทำละลายลงไปสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกและการสกัดผลิตภัณฑ์ของเหลวสามารถแยกออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นน้ำและส่วนที่เป็นน้ำมัน ผลจากการแยกน้ำมันดิบพบว่าในส่วนน้ำมันมีความชื้นประมาณร้อยละ 5

ความมีขั้วของตัวทำละลายเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการพิจารณาในการเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสม เพราะในน้ำมันดิบชีวภาพมีสารที่มีขั้วอยู่มาก จากการศึกษางานวิจัยของ Garcia-Perez และคณะ (2007) เป็นการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากการไพโรไลซิสของชานอ้อย โดยใช้ตัวทำละลายที่มีขั้วคือ เพนเทน เบนซีน ไดคลอโรมีเทน เอทิลอะซิเตทและเมทานอล พบว่าส่วนที่ถูกสกัดโดยการใช้ตัวทำละลายเป็นไดคลอโรมีเทนและเมทานอลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพมากที่สุด ส่วนงานวิจัยของ Chum และคณะ (1989) พบว่าการใช้เอทิลอะซีเตทนั้นสามารถไปแยกฟีนอลออกจากน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสได้

จากการศึกษาลิควิแฟกชันของชีวมวล พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันสามารถสกัดออกได้โดยใช้ตัวทำละลาย เช่น อะซิโตน เตตระไฮโดรฟูแรน เอทานอล คลอโรฟอร์ม หรือไดคลอโรมีเทน

น้ำมันดิบชีวภาพที่ผลิตได้จากสาหร่ายประกอบไปด้วยสารประกอบแอลเคน กล่าวคือการใช้ตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วจะให้ผลที่ดีกว่า Valdez และคณะ (2011) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันจากสาหร่ายโดยใช้ตัวทำลายไม่มีขั้ว คือ เฮกซะ-เดกเคน เดกเคน เฮกเซนและไซโคเฮกเซน และตัวทำละลายมีขั้ว คือ เมทอกซีไซโคลเพนเทน ไดคลอโรมีเทน และคลอโรฟอร์ม พบว่าการใช้ตัวทำละลายไม่มีขั้วส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพสูงขึ้น เนื่องจากมีความเหมือนกันของการไม่มีขั้วของตัวทำละลายและน้ำมันดิบชีวภาพที่เป็นคาร์บอนโซ่ยาว ในขณะที่การใช้ตัวทำละลายที่เป็นสารที่มีขั้วจะทำให้น้ำมันมีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้น ตารางที่ 2.8 แสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันที่ผลิตได้จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวลชนิดต่างๆ โดยไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการสกัดแยกผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพโดยใช้ตัวทำละลายประเภทต่างๆ [16]

ตารางที่ 2.8 แสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันที่ผลิตได้จากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวลชนิดต่างๆ โดยไม่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการสกัดแยกผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพโดยใช้ตัวทำละลายประเภทต่างๆ [16]

ชีวมวล	**ตัวทำละลาย**	**ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ (โดยน้ำหนัก)**
ชานอ้อย	อะซิโตน	59
ไม้บีช	อะซิโตน	28
สาหร่าย Botryococcus braunii	ไดคลอโรมีเทน	58
สาหร่าย Chaetomorpha linum	ไดคลอโรมีเทน	17
สาหร่าย Chlorella	ไดคลอโรมีเทน	42
สาหร่าย Cladophora coelothrix	ไดคลอโรมีเทน	20
สาหร่าย Cladophora vagabunda	ไดคลอโรมีเทน	28
กาบมะพร้าว	อะซิโตน	28
กะลามะพร้าว	อะซิโตน	34
ต้นข้าวโพด	อะซิโตน	28
ซังข้าวโพด	อะซิโตน	76
ขยะ	ไดคลอโรมีเทน	22
ฟางข้าว	อะซิโตน เตตระไฮโดรฟูแรน	23 40
เปลือกมะกอก	อะซิโตน	23
เปลือกสน	อะซิโตน	21

ตารางที่ 2.8 (ต่อ)

ชีวมวล	ตัวทำละลาย	ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ (โดยน้ำหนัก)
ใบสับปะรด	อะซิโตน	24
แกลบ	ไดเอทิลอีเทอร์ อะซิโตน	1.7 29

2.7.1.2 การกลั่น (distillation)

กระบวนการแยกที่นำมาประยุกต์คือการกลั่น การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการแยกน้ำมันดิบชีวภาพ วิธีการกลั่นน้ำมันดิบชีวภาพมีหลายวิธีการขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของสารตั้งต้น การกลั่นเป็นการแยกสารออกโดยใช้ความต่างกันของจุดเดือด การกลั่นสูญญากาศจะทำเมื่อมีการลดความดัน โมเลกุลของเหลวเมื่อรับพลังงานความร้อนจะสั่นสะเทือนและทำลายแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลสารจึงกลายเป็นไอได้ ไอที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความดันเรียกว่า “ความดันไอ” เมื่อความดันไอของเหลวเท่ากับความดันบรรยากาศเหนือของเหลวนั้นพอดีของเหลวจะเดือด ของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะกลั่นแยกตัวออกมาก่อน โดยของเหลวจะเดือดกลายเป็นไอ แล้วไอนั้นจะควบแน่นกลับมาเป็นของเหลวไหลลงไปในภาชนะอีกใบหนึ่ง

การกลั่นถูกใช้ในการศึกษาลักษณะของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไพโรไลซิส อุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 100-250 องศาเซลเซียสที่ความดันบรรยากาศ และ 80-230 องศาเซลเซียสสำหรับการกลั่นสูญญากาศ การกำจัดความชื้นเป็นผลมาจากการกลั่น โดยพบว่าการกลั่นสามารถกำจัดน้ำได้ร้อยละ 0.49 ถึง 6.46 ขั้นแรกของการกลั่นแบบสูญญากาศคือการกำจัดน้ำและไฮโดรคาร์บอนเบา จากการสังเกตพบว่าความหนืดของส่วนที่เบาจะน้อยกว่าส่วนที่เป็นน้ำมันชีวภาพ เนื่องจากสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่าจะถูกแยกออกมามากกว่า [16]

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stefanidis และคณะ [1] ศึกษาองค์ประกอบอนินทรีย์ (เถ้า) ในการไพโรไลซิสชีวมวล (ต้นโอ๊ค ต้นสน ฟางข้าว ฟางข้าวบาร์เลย์ มิสแคนทัส และยูคาลิปตัส) เพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลงเหลว โดยทำการล้างชีวมวลด้วยน้ำ สารละลายกรดไนตริกและสารละลายกรดอะซิติก โดย

การล้างชีวมวลด้วยน้ำสามารถลดองค์ประกอบอนินทรีย์ได้ร้อยละ 42 ในขณะที่การล้างชีวมวลด้วยสารละลายกรดสามารถลดองค์ประกอบอนินทรีย์ได้ร้อยละ 90 และพบว่ากรดไนตริกมีประสิทธิภาพในการล้างแร่ธาตุดีกว่ากรดอะซิติก นอกจากนี้ยังพบว่าการลดปริมาณแร่ธาตุ (demineralization) ในชีวมวลจะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สและของแข็งลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น

Feng และคณะ [17] ศึกษาผลกระทบของปริมาณเถ้าในไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของต้นสน 3 ชนิด โดยใช้ตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำ-เอทานอล ภายใต้ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2.0 เมกะพาสคัล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และทำการลดปริมาณเถ้า (deashing pre-treatment) ด้วยกรดไนตริกความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ พบว่าองค์ประกอบอนินทรีย์ (เถ้า) มีปริมาณลดลง แต่เมื่อทำการลดปริมาณเถ้าส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพลดลง

In-Yong และคณะ [18] ศึกษาผลกระทบขององค์ประกอบอนินทรีย์และร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพในการไพโรไลซิสของฟางข้าว ที่อุณหภูมิ 350 420 และ 500 องศาเซลเซียส และทำการล้างฟางข้าวด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก พบว่าเมื่อทำการลดแร่ธาตุจากฟางข้าว จะส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพ โดยพบว่าอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ฟางข้าวที่ผ่านการลดแร่ธาตุแล้วจะให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพมากกว่าฟางข้าวที่ไม่ผ่านการลดแร่ธาตุ

Chang และคณะ [19] ศึกษาผลของตัวทำละลายในการแปรรูปไม้สนให้เป็นของเหลวที่ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล ช่วงอุณหภูมิ 200-350 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวทำละลายได้แก่ เอทานอล เมทานอล และตัวทำละลายผสม ได้แก่ เอทานอล-น้ำ และเมทานอล-น้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ที่ภาวะการทดลองเดียวกัน ตัวทำละลายผสมสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้มากกว่าตัวทำละลายเดี่ยว โดยตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอล-น้ำ ที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้สูงสุดถึงร้อยละ 65 และมีร้อยละการเปลี่ยนเท่ากับ 95 นอกจากนี้ยังพบว่ามีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงโดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้น

Liu และคณะ [20] ศึกษาการแปรรูปแกลบ (rice husk) ให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายต่างๆ ได้แก่ น้ำ เอทานอล และตัวทำละลายผสมเอทานอล-น้ำ ในช่วงอุณหภูมิ 260-340 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้น 30 เมกะพาสคัล ระยะเวลา 20 นาที พบว่าได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 21.15 เมื่อใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลร้อยละ 50 อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพที่ได้มีค่าความร้อนเท่ากับ 27.04 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งใกล้เคียงกับน้ำมันดิบชีวภาพที่ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย (27.56

เมกะจูลต่อกิโลกรัม) และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง GC/MS พบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้ประกอบไปด้วยสารประกอบฟีนอล แอลเคนโซ่ตรง คีโทน และเอสเทอร์ และความเข้มข้นของสารประกอบประเภทฟีนอลในน้ำมันชีวภาพมีค่าสูงถึงร้อยละ 21.22 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เอทานอลหรือน้ำเป็นตัวทำละลายเดี่ยวๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพและผลของแร่ธาตุในชีวมวลที่มีต่อร้อยละผลได้และคุณภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล

3.1 สารตั้งต้นและสารเคมี

1) ใบอ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150-250 ไมโครเมตร
2) น้ำปราศจากไอออน
3) เอทานอล
4) อะซิโตน
5) กรดไนตริก
6) ไนโตรเจน 99.99% จาก บริษัท แพรกซ์แอร์ (ประเทศไทย) จากัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมใบอ้อย

1) เครื่องบดชีวมวลชนิดหยาบ
2) เครื่องบดชีวมวลชนิดละเอียด
3) ตะแกรงร่อนขนาด 250 และ 150 ไมโครเมตร
4) เครื่องเขย่าตะแกรงร่อน

3.2.2 เทคนิคที่ใช้เพื่อลดปริมาณและองค์ประกอบของแร่ธาตุหรือเถ้าในชีวมวล (demineralization)

1) การล้างด้วยน้ำร้อน
2) การล้างด้วยสารละลายกรดไนตริก โดยใช้ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

3.2.3 เครื่องปฏิกรณ์

1) เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง (high-pressure parr reactor)

เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง ผลิตโดยบริษัท Parr Instrument company ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ที่มีขนาดปริมาตร 250 มิลลิลิตร ตัวเครื่องทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel No. 316) ประกอบไปด้วยส่วนให้ความร้อน (heater) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) มาตรวัดความดัน (pressure gauge) ระบบหล่อเย็น (cooling system) และอุปกรณ์การกวนซึ่งประกอบด้วยใบกวนพร้อมชุดควบคุมและวัดความเร็วรอบใบกวนโดยตัวเครื่องและอุปกรณ์ประกอบสามารถทำงานที่อุณหภูมิไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดไม่เกิน 35 เมกะพาสคัล

รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง

2) เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi continuous reactor)

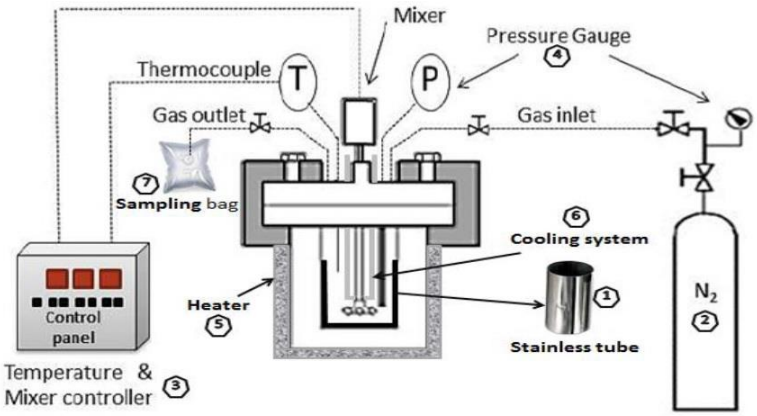
เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ประกอบด้วยเตาปฏิกรณ์สแตนเลสแบบท่อ (stainless steel tube reactor) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 มีปั๊ม (HPLC Pump) ทำหน้าที่ปั๊มตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมผ่านตัวกรอง (filter) เพื่อเข้าไปยังท่อปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์ประกอบสามารถทำงานที่อุณหภูมิไม่เกิน 350 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดไม่เกิน 25 เมกะพาสคัล

รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

3.2.4 แบบจำลองอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.4.1 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.3

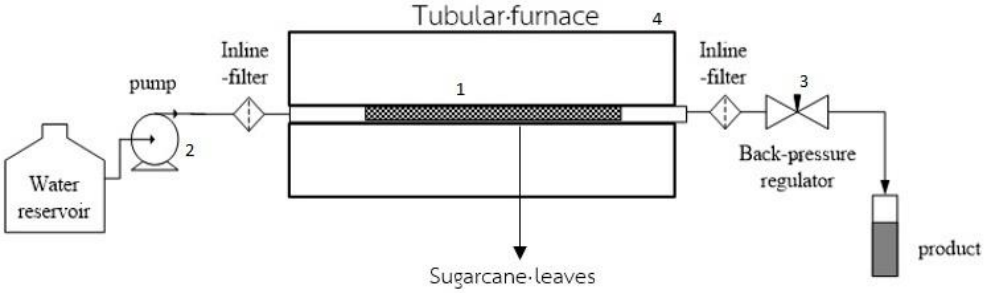
1) ถ้วย Stainless ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) ถังแก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99
3) อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature & Mixed controller)
4) มาตรวัดความดัน (Pressure gauge)
5) ระบบให้ความร้อน (Heater)
6) ระบบหล่อเย็น (Cooling system)
7) ถุงเก็บแก๊สตัวอย่าง (Sampling bag) ขนาด 2 ลิตร



รูปที่ 3.3 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ร่วมกับเครื่องปฏิกิกรณ์แรงดันสูง

3.2.4.2 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.4

1) เตาปฏิกรณ์สแตนเลสแบบท่อ เส้นผ่าน ศูนย์กลางภายใน 0.5 นิ้ว, ความยาว 29.5 นิ้ว, ความหนา 0.083 นิ้ว
2) ปั๊ม รุ่น PU-2080, JUSCO Ltd.
3) เครื่องควบคุมความดันย้อนกลับ (Back-pressure regulator) BP-66, GO regulato
4) เตาเผาแบบท่อ (tubular furnace) CTF12/65/550, Carbolite Ltd



รูปที่ 3.4 ชุดทดลองไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันแบบกึ่งต่อเนื่อง

3.2.5 อุปกรณ์การกรอง

อุปกรณ์การกรองประกอบด้วยกรวยบุชเนอร์ (buchner funnel) ขวดกรอง (suction or filter flask) เครื่องดูดอากาศ (aspiration) และกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 3 ขั้นตอนในการกรอง คือ นำส่วนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ (ของแข็งและของเหลว) มาทำการกรองด้วยชุดกรอง ส่วนที่เป็นของแข็งที่อยู่ด้านบนทำการชะล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตนเพื่อนำส่วนของน้ำมันออกให้หมด จากนั้นนำส่วนของแข็งที่ได้จากการกรองไปทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนัก

3.2.6 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการระเหยตัวทำละลาย

1) เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator)
2) ขวดเก็บสารตัวอย่าง
3) อะซิโตน

ขั้นตอนในการระเหยตัวทำละลายมีหลักการ คือ การแยกส่วนที่เป็นตัวทำละลายจากน้ำมันดิบชีวภาพในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการกรองของแข็งออก จากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายออกโดยการใช้เครื่องระเหยแบบหมุนแสดงในรูปที่ 3.5 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความดัน -80 กิโลพาสคัล ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้แสดงในรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.5 เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator)

รูปที่ 3.6 ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการระเหยตัวทำละลาย

3.2.7 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer)

การวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ในตัวอย่างชีวมวลและน้ำมันดิบชีวภาพ ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN 628 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์คิดเป็นร้อยละธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดโดยน้ำหนักของชีวมวลหรือน้ำมันดิบชีวภาพที่ทำการวิเคราะห์

รูปที่ 3.7 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analyzer)

3.2.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (gas chromatograph)

การวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟยี่ห้อ Shimadsu รุ่น GC 2014 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สแสดงในตารางที่ 3.1

รูปที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (gas chromatograph)

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (gas chromatograph)

แก๊สพา (Carrier gas)	แก๊สอาร์กอน (Ar)
ชนิดคอลัมน์	Unibeads C packed column
อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	120 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (Oven column temperature)	50 ถึง 180 องศาเซลเซียส
ระบบตรวจวัด (Detector)	ระบบวัดสภาพการนำความร้อน (TCD)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph-mass spectrometry)

การวิเคราะห์องค์น้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph-mass spectrometry) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น QP-2010 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันดิบชีวภาพแสดงในตารางที่ 3.2

รูปที่ 3.9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี
(gas chromatograph-mass spectrometry)

ตารางที่ 3.2 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph-mass spectrometry)

แก๊สพา (Carrier gas)	แก๊สฮีเลียม (He)
ชนิดคอลัมน์	DB-5 column
อุณหภูมิการฉีด (Injector temperature)	200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์ (Oven column temperature)	40 ถึง 280 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิท่อส่งผ่าน (Transfer line temperature	220 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในการผลิตไอออน (Ion source temperature	220 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.2.10 เครื่องหาปริมาณน้ำคาร์ล ฟิสเชอร์ (Karl-Fischer Titration)

สามารถหาปริมาณน้ำในน้ำมันดิบชีวภาพโดยใช้วิธีการไตเตรต คาร์ล ฟิสเชอร์ ด้วยเครื่อง METTLER TOLEDO รุ่น V20 Volumetric KT Titrator แสดงดังในรูปที่ 3.10

3.2.11 เครื่องหาปริมาณกรดในน้ำมันดิบชีวภาพ (Total Acid Number Titration)

ปริมาณกรดในน้ำมันดิบชีวภาพสามารถหาได้โดยการไตเตรตด้วยเครื่อง METTLER TOLEDO รุ่น G20 compact titrator แสดงดังในรูปที่ 3.11 โดยนำตัวอย่างปริมาณ 0.02 กรัมใส่ลงในแก้วสำหรับใส่สาร จากนั้นผสมกับตัวทำละลายร่วมระหว่างเอทานอลและไดเอทิลอีเทอร์ (50/50 โดยปริมาตร) ปริมาณ 50 มิลลิลิตร จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์

รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณน้ำในน้ำมันดิบชีวภาพ (Karl-Fischer Titration)

รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์หาปริมาณกรดในน้ำมันดิบชีวภาพ (Total Acid Number Titration)

3.3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมใบอ้อย

นำใบอ้อยที่ตากแดดแล้วมาบดและคัดขนาดให้อยู่ในช่วง 150 ถึง 250 ไมโครเมตร ด้วยเครื่องเขย่าตะแกรงร่อน จากนั้นนำใบอ้อยที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้นออกจากชีวมวล เป็นเวลา 24 ชั่วโมงก่อนใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัย

3.3.2 การขจัดแร่ธาตุ

3.3.2.1 การขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริก

นำใบอ้อยจากข้อที่ 3.3.1 มาแช่ด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำการปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนเป็นกลาง นำใบอ้อยที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.2.2 การขจัดแร่ธาตุด้วยน้ำร้อน

นำใบอ้อยจากข้อที่ 3.3.1 มาผ่านน้ำร้อนด้วยเครื่องชงกาแฟ จากนั้นนำใบอ้อยที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของใบอ้อย

การวิเคราะห์แบบประมาณ ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย และปริมาณคาร์บอนคงตัว โดยวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM E871-82 ส่วนการหาปริมาณเถ้าวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D1102-84

3.3.4 การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพด้วยไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน

3.3.4.1 ไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูง

1) ชั่งใบอ้อยปริมาณ 10 กรัม ผสมกับตัวทำละลาย (น้ำหรือ/และเอทานอล) โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของใบอ้อย 1 กรัมต่อตัวทำละลาย 10 มิลลิลิตร และความเข้มข้นโดยปริมาตรของน้ำต่อเอทานอลในอัตราส่วน 1:0 1:1 และ 0:1 จากนั้นนำไปใส่ในเครื่องปฏิกรณ์

2) ทำการประกอบเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นไล่อากาศที่ค้างหรือแก๊สปนเปื้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยการอัดแก๊สไนโตรเจน 1 เมกะพาสคัล จำนวน 3 ครั้งต่อมาทำการอัดความดันแก๊สไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล จากนั้นให้ความ

ร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์จนถึงอุณหภูมิที่กำหนดระหว่าง 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส กำหนดค่าความเร็วรอบใบกวน 300 รอบต่อนาที และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60 นาที โดยเริ่มนับเวลาที่อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าอุณหภูมิที่กำหนด

3) ทำการลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จนถึงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เมื่อครบเวลาในการทำปฏิกิริยา

4) เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยถุงเก็บแก๊สตัวอย่างขนาด 2 ลิตร และนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (gas chromatograph)

5) นำส่วนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ (ของแข็งและของเหลว) มาทำการกรองด้วยชุดกรองโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 3 นำส่วนที่เป็นของแข็งด้านบนชะล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตนเพื่อเอาส่วนของน้ำมันออกให้หมด จากนั้นนำส่วนของแข็งที่ได้จากการกรองไปทำการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของกากของแข็งที่ได้

6) นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการระเหยตัวทำละลายออกได้แก่ เอทานอล น้ำ และอะซิโตน โดยการใช้เครื่องระเหยแบบหมุนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความดัน -80 กิโลพาสคัล สุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวสีดำน้ำตาลเรียกว่า น้ำมันดิบชีวภาพ (biocrude)

7) ชั่งน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้ และนำไปคำนวณหาร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพ และนำไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุ หาองค์ประกอบของน้ำมันด้วยเครื่อง CHN analyzer และ GC-MS ตามลำดับ

3.3.4.2 กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

1) นำใบอ้อย 5 กรัม ผสมกับหินควอตซ์ จากนั้นบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสแบบท่อ ประกอบเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องต่อ จากนั้นปั๊ม HPLC จะทำหน้าที่ปั๊มตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายผสม (ร้อยละ 0 50 และ 100 โดยปริมาตรของความเข้มข้นเอทานอล) ผ่านตัวกรองเพื่อเข้าไปยังท่อปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที หลังจากที่ตัวทำละลายไหล

ออกมา ทำการเปิดเครื่องควบคุมความดันย้อนกลับเพื่อปรับความดันในระบบให้มีค่ามากกว่าความดันไอ

2) จากนั้นเปิดเตาเผาให้ได้ตามอุณหภูมิที่ต้องการ (300 องศาเซลเซียส) ทำการทดลองเป็นเวลา 60 นาที จึงสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ที่ออกมาในรูปของเหลวได้ที่ปลายท่อต่อจากเครื่องควบคุมความดันย้อนกลับ

3) หลังทำการทดลองเป็นเวลา 60 นาที สามารถแยกผลิตภัณฑ์ได้เป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่เป็นของแข็ง

4) นำส่วนที่เป็นของเหลวไปกรองเพื่อแยกเศษของแข็งที่ปนเปื้อนอยู่ภายในออกด้วยชุดกรองโดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 3 จากนั้นนำส่วนของเหลวที่ได้หลังจากการกรองไประเหยภายใต้ภาวะสูญญากาศ เพื่อแยกตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์ จะได้ส่วนผลิตภัณฑ์ 2 ส่วน คือ น้ำมันดิบชีวภาพ 1 (biocrude 1) และชั้นน้ำ

5) ชั่งน้ำมันดิบชีวภาพ 1 ที่ได้และนำไปคำนวณหาร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพ และนำไปวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และองค์ประกอบของน้ำมันด้วยเครื่อง CHN analyzer และ GC-MS ตามลำดับ

6) ส่วนของแข็งจะนำไปล้างด้วยอะซีโตน จากนั้นนำไประเหยโดยการใช้เครื่องระเหยแบบหมุนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และความดัน -80 กิโลพาสคัลเพื่อนำอะซีโตนออก จะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เรียกว่า น้ำมันดิบชีวภาพ 2 (biocrude 2) ส่วนที่ไม่ละลายในอะซีโตนนำไปอบแห้งในตู้อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่ออบเสร็จจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่า กากของแข็ง และนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณร้อยละผลได้โดยน้ำหนักของกากของแข็งที่ได้

การศึกษาการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอลมีตัวแปรที่ศึกษา ดังนี้

ก. ชีวมวลที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ใบอ้อย 10 กรัม (ใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุ และผ่านการขจัดแร่ธาตุ) ในตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนใบอ้อยต่อตัวทำละลาย 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร) ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล ที่อุณหภูมิ 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบใบกวน 300 รอบต่อนาที เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ใช้น้ำและเอทานอลเป็นตัวทำละลาย

ข. ความเข้มข้นของเอทานอล (0 50 และ 100 โดยปริมาตร)

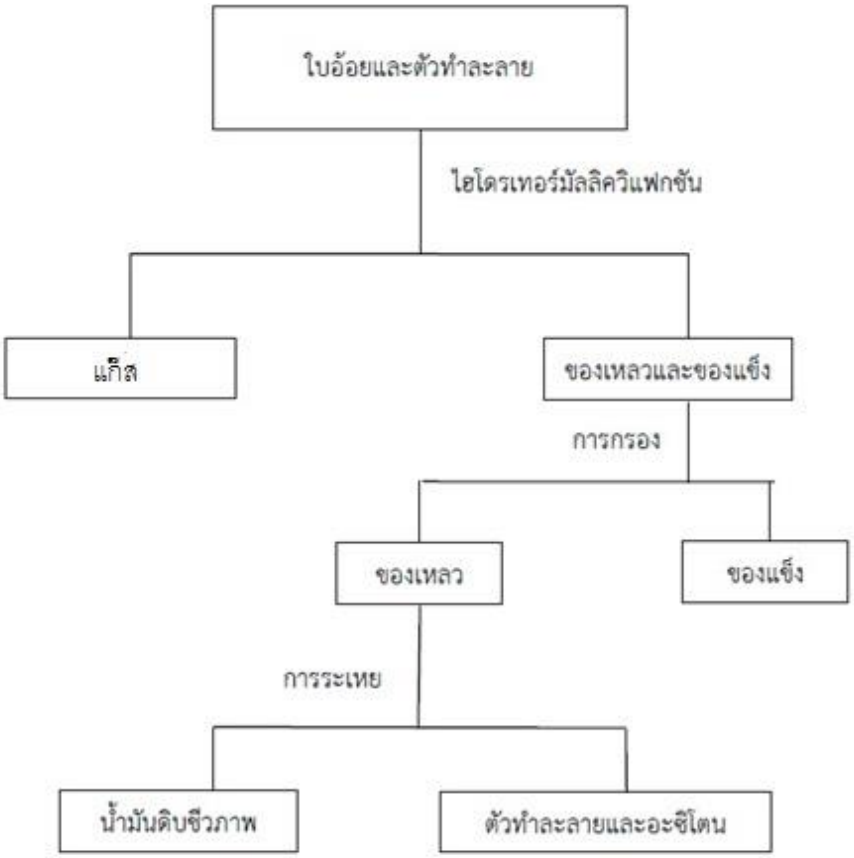
ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส โดยชั่งใบอ้อย 10 กรัม ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล ปริมาตรของตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนใบอ้อยต่อตัวทำละลาย 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร และอัตราส่วนตัวทำละลายผสมระหว่างน้ำและเอทานอล 0 50 และ 100 โดยปริมาตร) ความเร็วรอบใบกวน 300 รอบต่อนาที และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

ค. เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ใบอ้อย 10 กรัม โดยใช้ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล ปริมาตรของตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนใบอ้อยต่อตัวทำละลาย 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบใบกวน 300 รอบต่อนาที เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ใช้น้ำและเอทานอลเป็นตัวทำละลาย ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

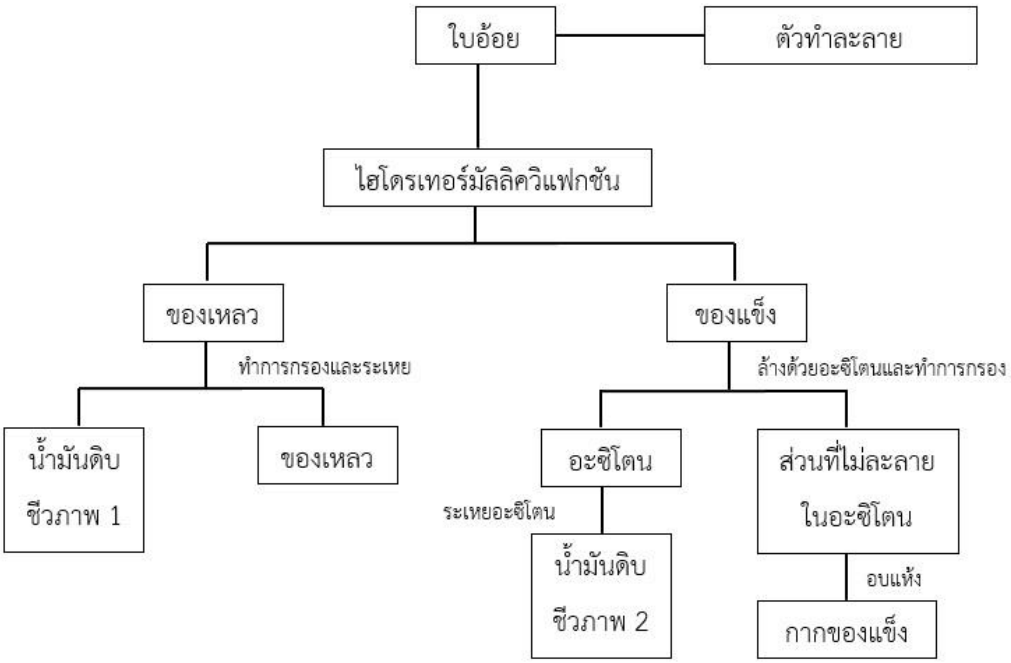
ชั่งใบอ้อย 5 กรัม ผสมกับหินควอตซ์ จากนั้นบรรจุลงในเครื่องปฏิกรณ์สแตนเลสแบบท่อประกอบเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องต่อ จากนั้นปั๊มตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายผสม (ร้อยละ 0 50 และ 100 โดยปริมาตรของความเข้มข้นเอทานอล) ผ่านตัวกรองเพื่อเข้าไปยังท่อปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาทีที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ทำการทดลองเป็นเวลา 60 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.12 แผนผังขั้นตอนการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.13 แผนผังขั้นตอนการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยและศึกษาผลของแร่ธาตุในใบอ้อยต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล โดยนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีโดยเทคนิคการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN analysis) และแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (GC-MS) ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สสามารถวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (GC) ซึ่งสามารถแบ่งผลการทดลองออกได้ดังนี้

- การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ค่าความร้อน การวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ รวมถึงการวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยก่อนและหลังทำการขจัดแร่ธาตุ
- ผลของแร่ธาตุในใบอ้อยต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล
- ผลของเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์กับเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ ในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของใบอ้อย

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ ในส่วนของการวิเคราะห์แบบประมาณพบว่า ใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุมีปริมาณเถ้า (ash) ร้อยละ 10.05 โดยน้ำหนัก หลังจากทำการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและทำการขจัดแร่ธาตุในน้ำร้อนส่งผลให้ปริมาณเถ้ามีแนวโน้มลดลงเหลือร้อยละ 8.30 และ 9.86 โดยน้ำหนักตามลำดับ หลังทำการขจัดแร่ธาตุพบว่าความชื้น (moisture) มีปริมาณลดลง จากการศึกษาพบว่าเถ้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของลิกนินเพื่อทำให้เกิดชาร์ (char) และน้ำ ดังนั้นเมื่อปริมาณเถ้าลดลงทำให้การสลายตัวของลิกนินเพื่อ

เกิดเป็นชาร์และน้ำลดลง จึงทำให้ความชื้นหลังทำการขจัดแร่ธาตุมีปริมาณลดลงด้วย [21] นอกจากนี้ยังพบว่าคาร์บอนคงตัวและสารระเหยมีปริมาณเพิ่มขึ้นหลังจากทำการขจัดแร่ธาตุ ซึ่งบ่งชี้ว่าการขจัดแร่ธาตุเป็นการปรับปรุงสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น การปรับปรุงสมบัติของค่าความร้อน นอกจากนี้การกำจัดเถ้ายังป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการรวมตัว และการสะสมของความร้อนในกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน (thermochemical process) [22, 23]

ในส่วนการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ พบว่าองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวลจะมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยมวลโมเลกุลของคาร์บอนจะหนักกว่าไฮโดรเจน ดังนั้นอัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H ratio) จะสะท้อนให้เห็นความแปรปรวนของไฮโดรคาร์บอน การกำจัดไฮโดรคาร์บอนบางส่วนออกไปในขั้นตอนของการขจัดแร่ธาตุ (demineralization) จะทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจนลดลงอยู่ในช่วงร้อยละ 4.5 ถึง 5.5 โดยน้ำหนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าสมบัติขององค์ประกอบสารอินทรีย์ที่ทำการขจัดแร่ธาตุมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อมีการกำจัดส่วนของสารประกอบอินทรีย์ออก [22, 23]

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ

การวิเคราะห์	ใบอ้อย ที่ไม่ได้ล้าง	ใบอ้อยที่ล้าง ด้วยกรดไนตริก	ใบอ้อยที่ล้าง ด้วยน้ำร้อน
การวิเคราะห์แบบประมาณ [a] (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
ความชื้น (moisture)	10.03	3.95	1.30
สารระเหย (volatile matter) [b]	72.44	72.64	71.76
คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)	7.48	15.11	17.08
เถ้า (ash)	10.05	8.30	9.86
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ [c] (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
คาร์บอน (carbon)	51.80	47.93	46.34
ไฮโดรเจน (hydrogen)	9.30	10.46	8.73
ออกซิเจน (oxygen) [d]	38.00	41.58	44.39
ไนโตรเจน (nitrogen)	0.90	0.03	0.54

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

การวิเคราะห์	ใบอ้อยที่ไม่ได้ล้าง	ใบอ้อยที่ล้างด้วยกรดไนตริก	ใบอ้อยที่ล้างด้วยน้ำร้อน
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไฮโดรเจน (C/H)	5.57	4.58	5.31
ค่าความร้อน [e] (เมกะจูล/กิโลกรัม)	13.86	16.60	17.15

a = ร้อยละโดยน้ำหนักที่ได้จากการวิเคราะห์โดยตรง

b = 100 – ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว

c =ร้อยละโดยน้ำหนักที่ไม่รวมความชื้นและเถ้า

d =100 – ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

e = คำนวณจากสมการ ค่าความร้อน = 0.3536 (คาร์บอนคงตัว) + 0.1559 (สารระเหย) – 0.0078 (เถ้า)

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ (chemical composition)

ตารางที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อย โดยการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุและทำการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและทำการขจัดแร่ธาตุในน้ำร้อนนั้นมีความแตกต่างกัน องค์ประกอบทางเคมี (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และอื่นๆ) ในใบอ้อยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีของ Goering และ Van Soest, 1970 พบว่าหลังทำการขจัดแร่ธาตุปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลดลง แต่สัดส่วนความเป็นลิกนินเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาพบว่า ในขั้นตอนการขจัดแร่ธาตุนั้นโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสสามารถสลายตัวได้ง่ายกว่า ในขณะที่ลิกนินสามารถทนต่อการสลายตัวได้มากกว่า [24] จากแนวโน้นดังกล่าวอาจส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ลดลง [17, 25]

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ (chemical composition)

การวิเคราะห์	ใบอ้อย ที่ไม่ได้ล้าง	ใบอ้อยที่ล้างด้วย กรดไนตริก	ใบอ้อยที่ล้างด้วย น้ำร้อน
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)			
เซลลูโลส (cellulose)	54.13	45.68	46.06
เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)	32.91	27.75	29.30
ลิกนิน (lignin)	3.13	7.11	12.61
อื่นๆ (other) [a]	9.83	19.46	12.03

a = 100 – ผลรวมขององค์ประกอบทางเคมี

4.1.3 การวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ

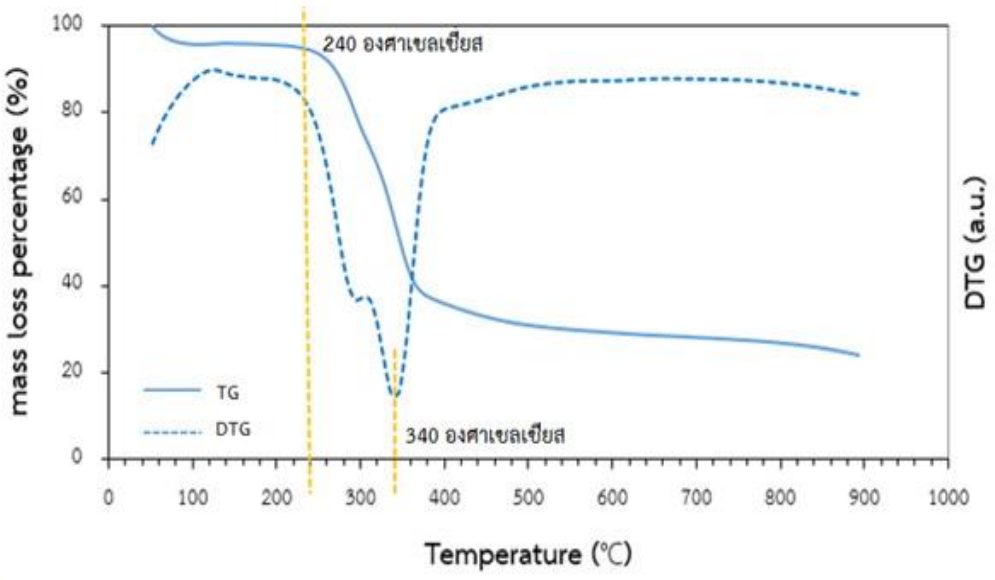
ปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุมีปริมาณโพแทสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) มากที่สุด ตามด้วยแมกนีเซียม (Mg) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และฟอสฟอรัส (P) หลังจากทำการขจัดแร่ธาตุพบว่าปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยมีปริมาณลดลงเป็นผลมาจากในขั้นตอนการขจัดแร่ธาตุมีการสลายโครงสร้างของชีวมวล เช่น เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยสารอนินทรีย์ เช่น โลหะแอลคาไล (alkaline metal) และ โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ (alkaline earth) หลุดออกมาจากภายในรูพรุนของชีวมวลและละลายอยู่ในน้ำ เมื่อปริมาณโลหะแอลคาไลและโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธลดลงทำให้ปริมาณเถ้าลดลงด้วย เพราะเถ้าคือแร่ธาตุที่อยู่ในชีวมวลนั่นเอง [3, 24] จากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการขจัดแร่ธาตุออกจากชีวมวลด้วยการล้างน้ำร้อน แร่ธาตุต่างๆ ที่อยู่ในชีวมวล เช่น โลหะต่างๆ เกิดการแพร่ออกจากผิวของชีวมวลไปละลายอยู่น้ำ ซึ่งสังเกตได้จากสีของน้ำที่เปลี่ยนไป โดยวิธีการล้างด้วยน้ำเป็นวิธีพื้นฐานที่ง่ายที่สุดและได้ผลดี ส่วนการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริก โลหะต่างๆ จะหลุดออกมาจากภายในรูพรุนของชีวมวลและละลายอยู่ในน้ำเช่นเดียวกัน แต่การขจัดแร่ธาตุด้วยกรดสามารถลดปริมาณโลหะหรือแร่ธาตุต่างๆ ได้มากกว่า เป็นผลมาจากส่วนที่เป็นกรดเข้าไปสลายโครงสร้างของชีวมวล เช่น เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ได้ดีกว่าพร้อมทั้งการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดมีการปั่นกวนร่วมด้วย ซึ่งการปั่นกวนชีวมวลระหว่างการแช่นั้นทำให้แร่ธาตุหลุดออกมาง่ายขึ้น [3]

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ

ชนิดของใบอ้อย	แร่ธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	แคลเซียม Ca	โพแทสเซียม K	เหล็ก Fe	แมกนีเซียม Mg	ฟอสฟอรัส P	อะลูมิเนียม Al
ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุ	0.41	0.53	0.07	0.15	0.05	0.09
กรดไนตริก	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
น้ำร้อน	0.37	0.12	0.06	0.11	0.03	0.08

4.1.4 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของใบอ้อย

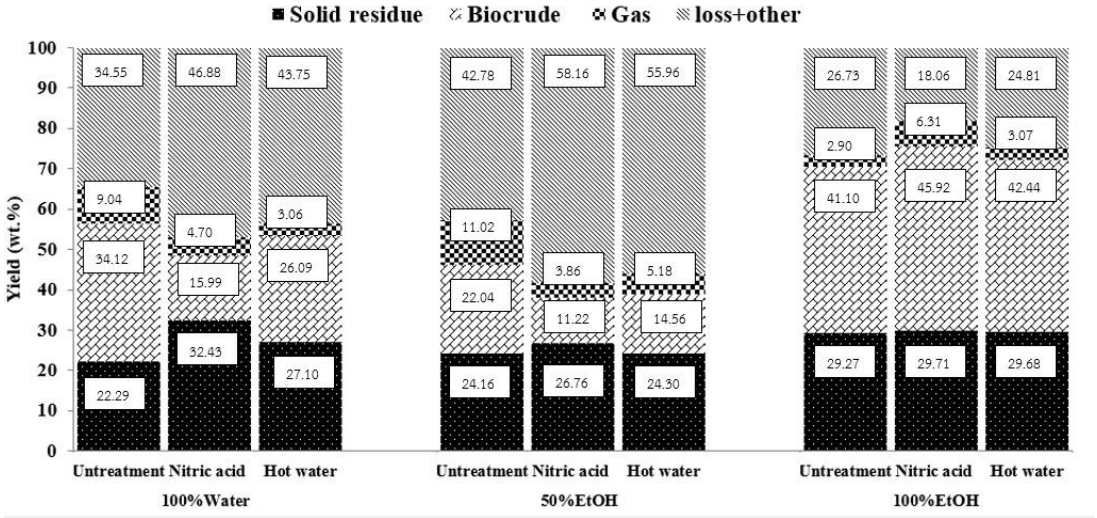
รูปที่ 4.1 แสดงพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของใบอ้อย โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TG-TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 900 องศาเซลเซียส และอัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าการสลายตัวของใบอ้อยเริ่มมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของใบอ้อยทำให้ทราบช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการศึกษา โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่อุณหภูมิ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนของใบอ้อยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TG-DTA

4.2 ผลของแร่ธาตุในใบอ้อยต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

ไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุและผ่านการขจัดแร่ธาตุในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอลในอัตราส่วน 1:0 1:1 และ 0:1 ดำเนินการที่อุณหภูมิ 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล ความเร็วรอบใบกวน 300 รอบต่อนาที เวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาคือ 60 นาที



รูปที่ 4.2 ร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.2 แสดงร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ของใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุ และผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและน้ำร้อน พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพที่ใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำ และตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอลมีแนวโน้มลดลงหลังจากทำการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพ ลดลงจากร้อยละ 34.12 เป็น 15.99 โดยน้ำหนัก ส่วนการขจัดแร่ธาตุโดยน้ำร้อนในตัวทำละลายที่เป็นน้ำ ทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพลดลงจากร้อยละ 34.12 เป็น 26.09 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้ตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอล ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพหลังจากทำการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ลดลงจากร้อยละ 22.04 เป็น 11.22 โดยน้ำหนัก ส่วนการขจัดแร่ธาตุโดยน้ำร้อนทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพลดลงจากร้อยละ 22.04 เป็น 14.56

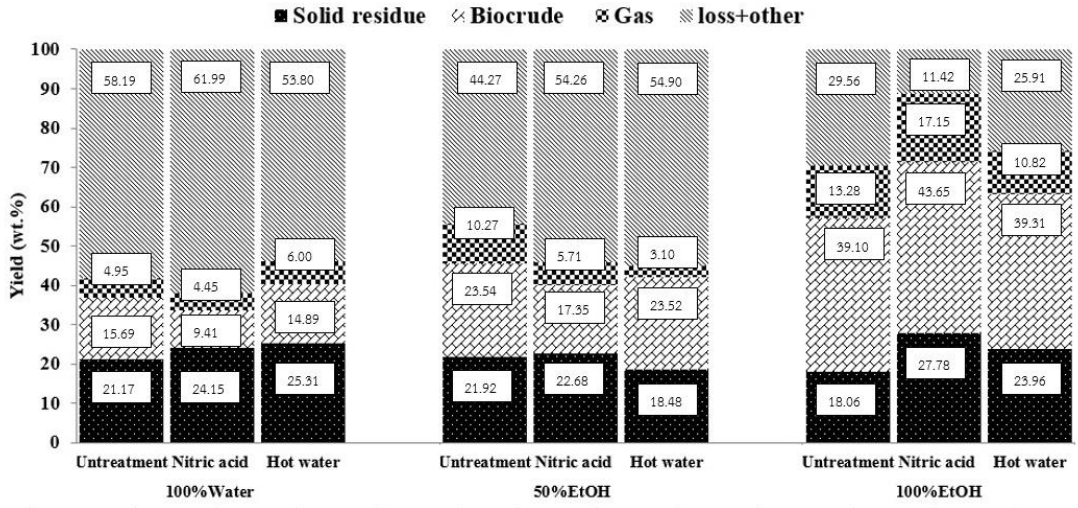
โดยน้ำหนัก การลดลงของน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากการใช้ใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุนั้น เนื่องจากปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่ลดลงในระหว่างกระบวนการขจัดแร่ธาตุ ในขณะที่ลิกนินมีการสลายตัวยากขึ้นในภาวะที่แร่ธาตุในเถ้าลดลง [17]

แต่ในทางกลับกันพบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพที่มีการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้ตัวทำละลายเอทานอล ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงถึงร้อยละ 45.92 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าในกรณีที่ไม่ได้ขจัดแร่ธาตุ เนื่องจากผลของเอทานอลที่มีประสิทธิภาพในการละลายสารประกอบในน้ำมันดิบชีวภาพที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่ได้มาจากลิกโนเซลลูโลสิก (lignocellulosic) ในระหว่างไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อย นอกจากนี้เอทานอลยังสามารถช่วยลดค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและแรงตึงผิวของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน และเอทานอลจะทำหน้าที่ให้ไฮโดรเจนแก่อนุมูลอิสระ ทำให้อนุมูลอิสระเกิดความเสถียร ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมากกว่าปริมาณลิกนินที่เพิ่มขึ้นหลังจากทำการขจัดแร่ธาตุแล้ว จึงทำให้ในกรณีของตัวทำละลายเอทานอลในใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุส่งผลดีต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ [19]

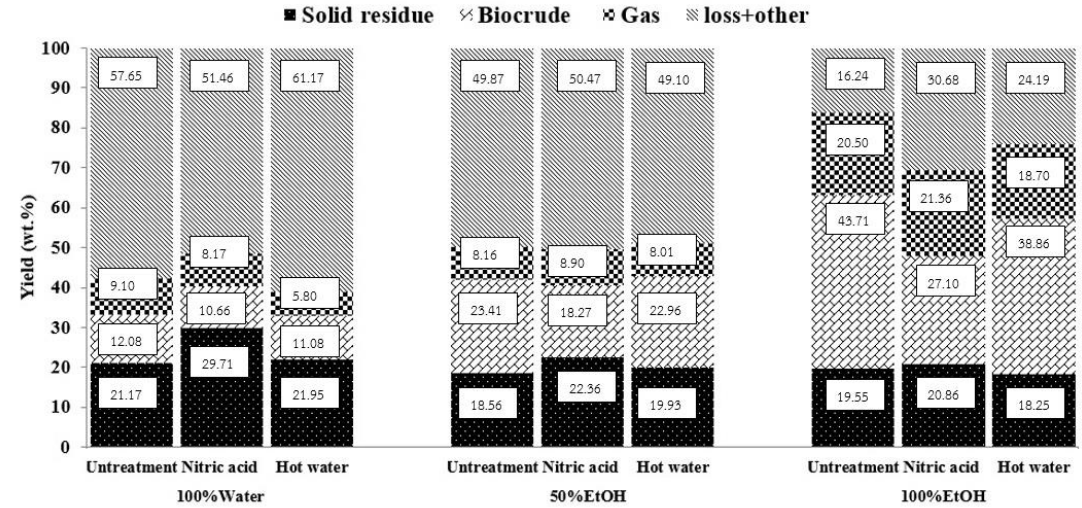
รูปที่ 4.3 แสดงร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ของใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุ และผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและน้ำร้อน พบว่าที่อุณหภูมิ 300 และ 325 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียสให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพลดลง

รูปที่ 4.4 แสดงร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ของใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุ และผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและน้ำร้อน ในตัวทำละลายเอทานอล พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่ธาตุลดลงเป็นผลมาจากการที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน (thermal cracking) ของน้ำมันดิบชีวภาพและกากของแข็งกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น [19, 26] และยังพบว่าร้อยละผลได้ของกากของแข็งหลังทำการขจัดแร่ธาตุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส ลิกนินสลายตัวเป็นอนุมูลอิสระฟีนอกซิล (free phenoxyl radicals) ซึ่งอนุมูลอิสระเหล่านั้นจะทำปฏิกิริยาการควบแน่นหรือรีพอลิเมอไรเซชัน (repolymerization) กลายเป็นกากของแข็ง (solid residue) ดังนั้นกากของแข็งหลังการทำไฮโดรเมอร์มัลลิควิแฟกชันส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยการควบแน่นจากอนุพันธ์ของลิกนินและเซลลูโลส [17]

ดังนั้นการทำไฮโดรเมอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริก ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในตัวทำลายเอทานอล เป็นภาวะที่เหมาะสมในการทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์



รูปที่ 4.3 ร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส

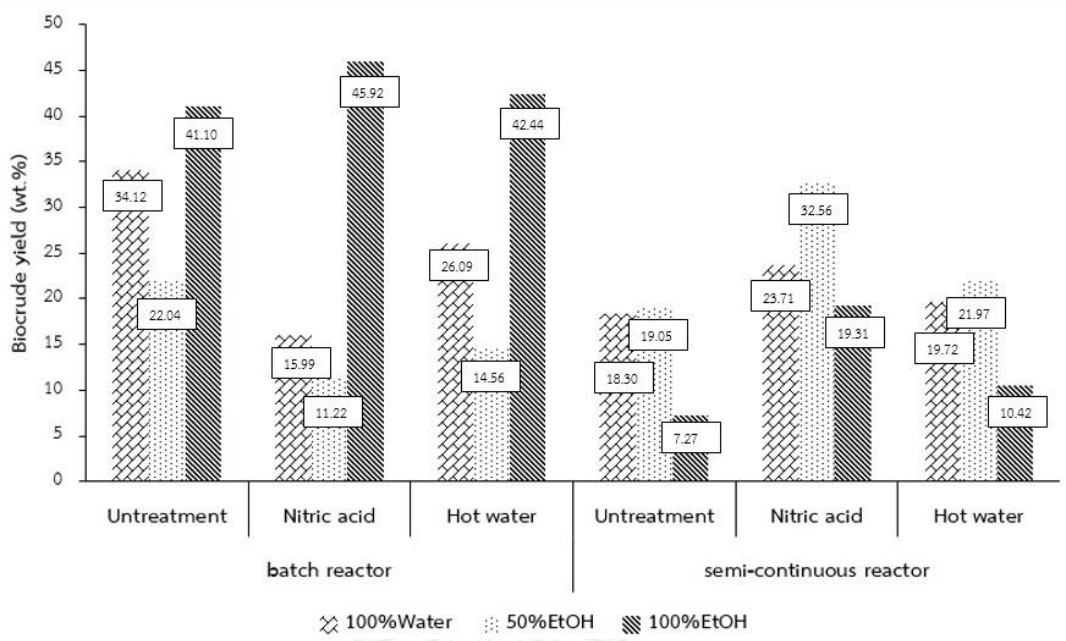


รูปที่ 4.4 ร้อยละผลได้ของกากของแข็ง น้ำมันดิบชีวภาพ แก๊สและอื่นๆ ในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

4.3 ผลของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยก่อนและหลังทำการขจัดแร่ธาตุ

การศึกษาในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาผลของเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch reactor) กับเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous reactor) ในไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ ในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าในการทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์และเครื่องปฏิกรณ์กึ่งต่อเนื่องในตัวทำละลายเอทานอล ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยพบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่ธาตุในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ให้ร้อยละผลได้มากกว่าการทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง โดยร้อยละผลได้ของน้ำดิบชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์หลังทำการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและน้ำร้อนเท่ากับร้อยละ 45.92 และ 42.44 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ส่วนร้อยละผลได้ของน้ำดิบชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องหลังทำการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพเท่ากับร้อยละ 19.31 โดยน้ำหนัก และการขจัดแร่ธาตุด้วยน้ำร้อนให้ร้อยละผลได้เท่ากับร้อยละ 10.42 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (residence time) ของทั้งสองเครื่องปฏิกรณ์ต่างกัน โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานกว่า ชีวมวลและตัวทำละลายจะเกิดไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันได้นานกว่า อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่เสถียรเกิดการรีพอลีเมอไรเซชัน (repolymerization) และแตกตัว (cracking) เป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวมากกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง



รูปที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยในตัวทำละลายต่างๆ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

การศึกษาไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่าร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่ธาตุเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอล อาจเนื่องมาจากการขจัดแร่ธาตุในชีวมวลเป็นการลดการเกิดปฏิกิริยาขั้นที่สอง (secondary reaction) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ชาร์และแก๊สลดลง ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพจึงเพิ่มขึ้น [24, 27] โดยร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพหลังการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักสูงสุดเท่ากับร้อยละ 32.56 โดยน้ำหนักในตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอลเกิดจากการทำงานเสริมกันระหว่างน้ำและเอทานอล (synergetic effect) โดยน้ำจะทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เพื่อลดขนาดโมเลกุลของชีวมวล จากนั้นเอทานอลจะให้ไฮโดรเจนเพื่อทำให้อนุมูลอิสระซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเสถียรขึ้น จึงสามารถลดการเกิดการรวมตัวกันใหม่ของโมเลกุลเล็กๆ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังช่วยให้ตัวทำละลายแพร่เข้าสู่ชั้นของลิกนินที่อยู่ภายในชีวมวลเพื่อละลายผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจากการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวลได้อีกด้วย [19] และรวมไปถึงการทำงานเสริมกันระหว่างน้ำและเอทานอลนั้นเกิดได้ดีในเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (residence time) ที่เหมาะสม

ซึ่งในกรณีนี้อาจสรุปได้เบื้องต้นว่าเมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากขึ้น อาจส่งผลยับยั้งการทำงานของตัวทำละลายร่วมได้ ผลของการทำงานเสริมกันของตัวทำละลายร่วมจึงไม่ถูกแสดงให้เห็นชัดในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

4.4 การวิเคราะห์น้ำมันดิบชีวภาพ

ตารางที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์น้ำมันดิบชีวภาพจากการไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล

จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของน้ำมันดิบชีวภาพดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณคาร์บอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของน้ำในตัวทำละลายลดลง สวนทางกับปริมาณออกซิเจนในน้ำมันดิบชีวภาพที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีน้ำในตัวทำละลายมากขึ้น จากการศึกษาพบว่าออกซิเจนที่อยู่ในน้ำที่เป็นตัวทำละลายจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของชีวมวลทำให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว แต่เมื่อปริมาณเอทานอลในตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนในน้ำมันดิบชีวภาพจะลดลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจน (deoxygenation) [28, 29] นั่นเอง และเมื่อพิจารณาค่าความร้อนพบว่า เมื่อทำการขจัดแร่ธาตุน้ำมันดิบชีวภาพจะให้ค่าความร้อนลดลง เมื่อทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์โดยใช้ตัวทำลายเอทานอลจะให้ค่าความร้อนจาก 31.81 เป็น 29.15 เมกะจูล/กิโลกรัม และเมื่อทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องของใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุโดยใช้ตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอล. จะให้ค่าความร้อนเท่ากับ16.33 เมกะจูล/กิโลกรัมตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการขจัดแร่ธาตุในใบอ้อยส่งผลให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพเพิ่มขึ้น แต่ไม่ส่งผลดีนักต่อคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพ ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลด้วย [17]

จากนั้นทำการศึกษาค่าความเป็นกรดของน้ำมันดิบชีวภาพพบว่า ค่าความเป็นกรดของน้ำมันดิบชีวภาพจากการทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ให้ค่าความเป็นกรดมากที่สุดเมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอล โดยก่อนทำการขจัดแร่ธาตุมีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 17.88 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม และหลังทำการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 20.42 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม และเมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลร้อยละ 50 โดยปริมาตร หลังทำการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องใช้ใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 10.39 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์น้ำมันดิบชีวภาพ

การวิเคราะห์	ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์		
	เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch reactor)		เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous reactor)
	การขจัดแร่ธาตุ		
	ใบอ้อยธรรมดา	กรดไนตริก	กรดไนตริก
	ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	100	100	50
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ			
คาร์บอน (C)	69.45	64.76	46.76
ไฮโดรเจน (H)	8.43	8.30	6.15
ออกซิเจน (O)[a]	21.47	26.37	46.46
ไนโตรเจน (N)	0.65	0.57	0.63
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)[b]	31.81	29.15	16.33
ความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/กรัม)	17.88	20.42	10.39
ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.32	2.72	3.80

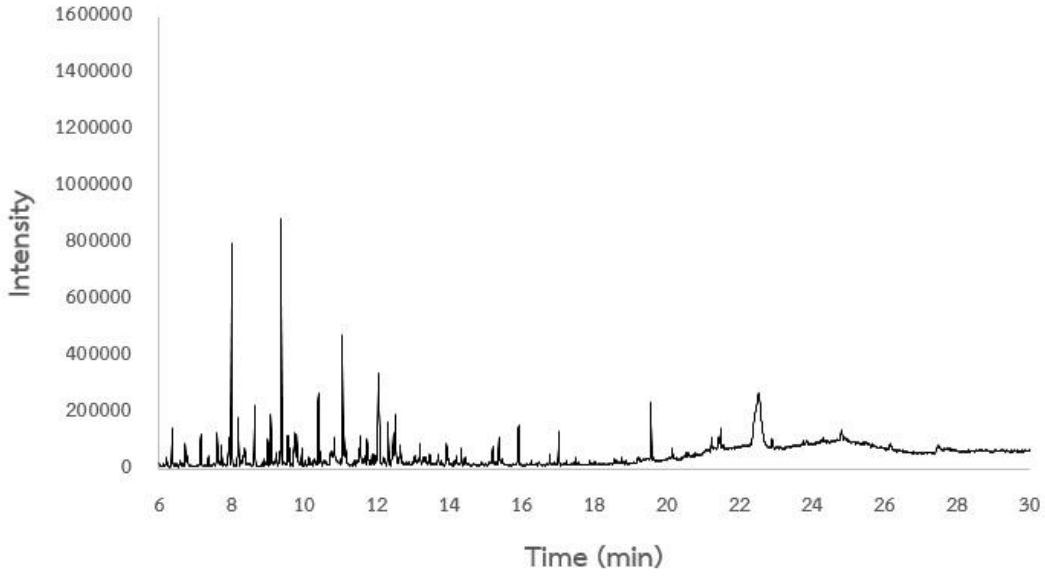
a = 100 – ผลรวมของปริมาณธาตุแต่ละชนิด

b =ดูลอง (Dulong formular) ; ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)= $0.3386 \times C + 1.444 \times (H - O/8)$

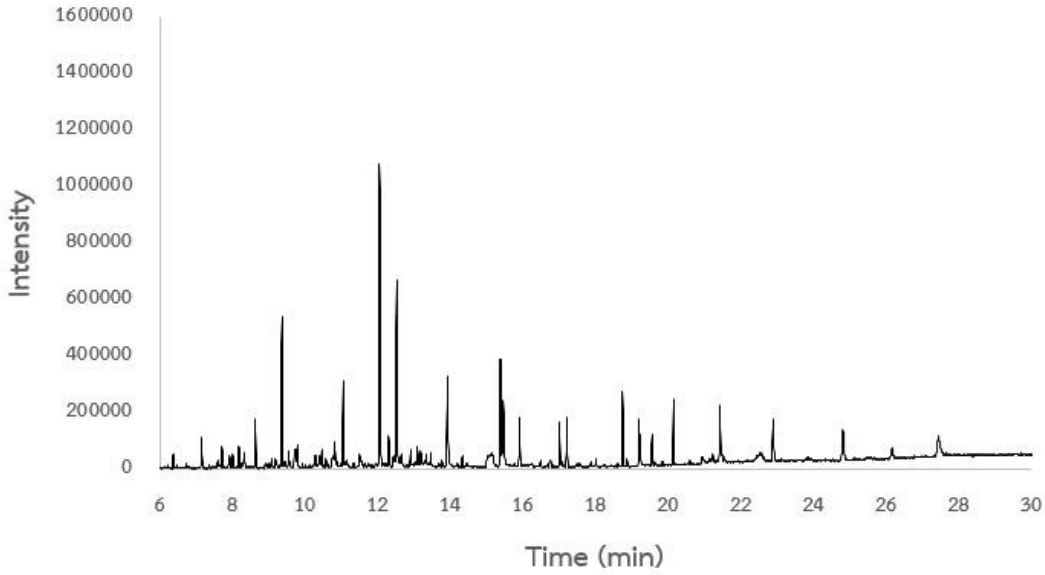
เมื่อปริมาณน้ำที่ใช้เป็นตัวทำละลายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณน้ำในน้ำมันดิบชีวภาพเพิ่มขึ้นด้วย โดยพบว่าเมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลจะทำให้น้ำมันดิบชีวภาพมีปริมาณน้ำเท่ากับ 2.32 และ 2.72 ร้อยละโดยน้ำหนักในใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่เมื่อใช้ตัวทำละลายเป็นเอทานอลร้อยละ 50 โดยปริมาตรจะทำให้น้ำมันดิบชีวภาพมีปริมาณน้ำเท่ากับร้อยละ 3.80 โดยน้ำหนักในใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณออกซิเจนในน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากการทดลอง รวมถึงปริมาณความชื้นที่อยู่ในชีวมวลด้วย

4.5 ผลของการวิเคราะห์หาองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph – mass spectrometry)

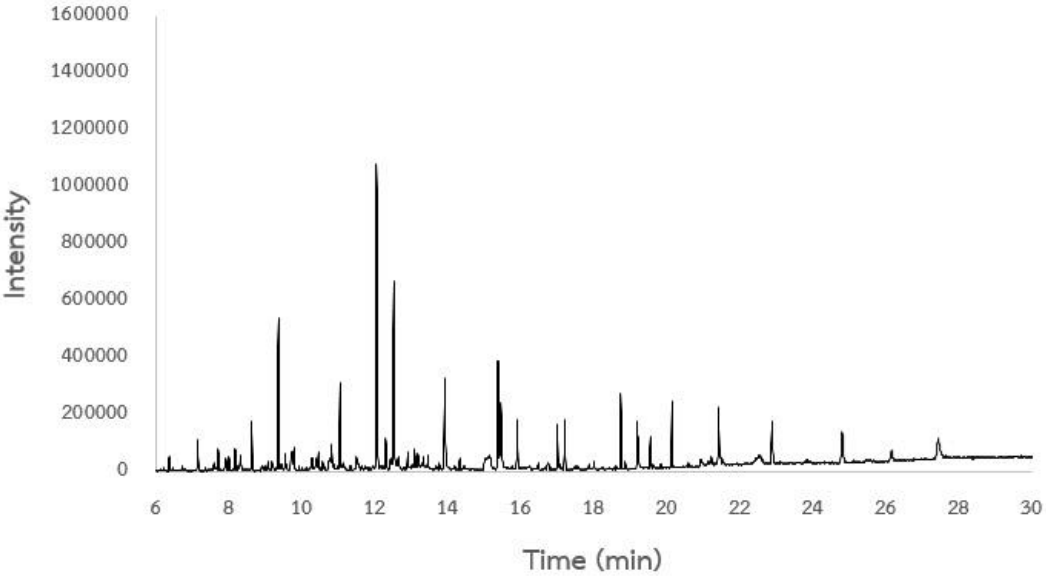
รูปที่ 4.6 ถึง 4.8 แสดงกราฟโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพในการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุและผ่านการขจัดแร่ธาตุในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอล ดำเนินการที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพก่อนทำการขจัดแร่ธาตุจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ในตัวทำละลายเอทานอล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์



รูปที่ 4.7 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่ธาตุจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ในตัวทำละลายเอทานอล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์



รูปที่ 4.8 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่ธาตุจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ในตัวทำละลายเอทานอลร้อยละ 50 โดยปริมาตร ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.5 ผลของการวิเคราะห์หาองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph – mass spectrometry)

No	Retention time (min)	Compound	Type of reactor		
			Batch reactor		Semi-Continuous reactor
			Ethanol concentration (v/v)		
			100	100	50
			% Area		
			Treatment		
			Untreatment	HNO_3 (5wt.%)	HNO_3 (5wt.%)
1	4.303	4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanone	-	-	0.6
2	4.460	2-Furanmethanol	-	-	0.48
3	6.350-6.371	Phenol	1.39	0.8	0.51
4	7.140-7.154	2-Hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one hydrate	1.27	1.77	1.30
5	7.712-7.718	4-Oxo-pentanoic acid ethyl ester	1.27	1.6	0.97
6	7.915-7.924	4-Methylphenol	1.93	1.59	0.47
7	7.999	Isobutyric anhydride	8.62	-	-
8	8.001	3,5-Dimethylcyclohexanol	-	1.17	-
9	8.179-8.187	2-Methoxy phenol	2.41	1.23	0.80-
10	8.324-8.329	Cyclopropylcarbinol	-	0.63	0.89
11	8.358	2-Methyldecane	1.67	-	-
12	8.625-8.633	3-Ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	2.35	2.39	1.85
13	9.357-9.365	4-Ethylphenol	9.82	7.17	6.08
14	9.546-9.550	Diethyl succinate	1.76	1.14	0.77
15	9.732-9.733	1,2-Benzenediol	2.07	2.14	-
16	9.790-9.800	2-Methoxy-4-methylphenol	1.25	1.46	1.45
17	9.932	Dimethyl pentanedioate	1.00	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

No	Retention time (min)	Compound	Type of reactor		
			Batch reactor		Semi-Continuous reactor
			Ethanol concentration (v/v)		
			100	100	50
			% Area		
			Treatment		
			Untreatment	HNO_3 (5wt.%)	HNO_3 (5wt.%)
18	10.389	2-Ethyl-2-hexenal	3.02	-	-
19	10.450	1-Ethyl-4-methoxybenzene	0.74	-	-
20	10.717	2,3-Dihydroxytoluene	1.18	-	-
21	10.820	Butanoic anhydride	0.98	-	-
22	10.822-10.824	Propyl butanoate	-	2.07	0.95
23	11.050-11.054	4-Ethyl-2-methoxyphenol	5.98	4.63	3.59
24	11.142	4-Methylcatechol	0.58	-	-
25	11.500	Thymyl acetate	0.63	-	-
26	11.867	4-ethylresorcinol	1.24	-	-
27	12.041-12.052	Beta-Methyl-D-ribopyranoside	5.88	17.72	14.64
28	12.307-12.310	4-Propylguaiacol	1.84	1.49	1.27
29	13.461	2-Methoxy-4-propenylphenol	-	0.54	0.95
30	12.525	Butanoic acid	-	-	8.26
31	12.655	Lactone	-	-	0.77
32	12.909	2,3,4,5-Tetrahydroxypentanal	-	-	0.71
33	13.461-13.464	2-Methoxy-4-propenylphenol	-	0.54	0.95
34	13.927	levoglucosan	-	-	4.84
35	15.156	Diethyl Phthalate	-	-	3.45
36	15.382-15.388	Methyl-D-glucopyranoside	-	7.18	6.12

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

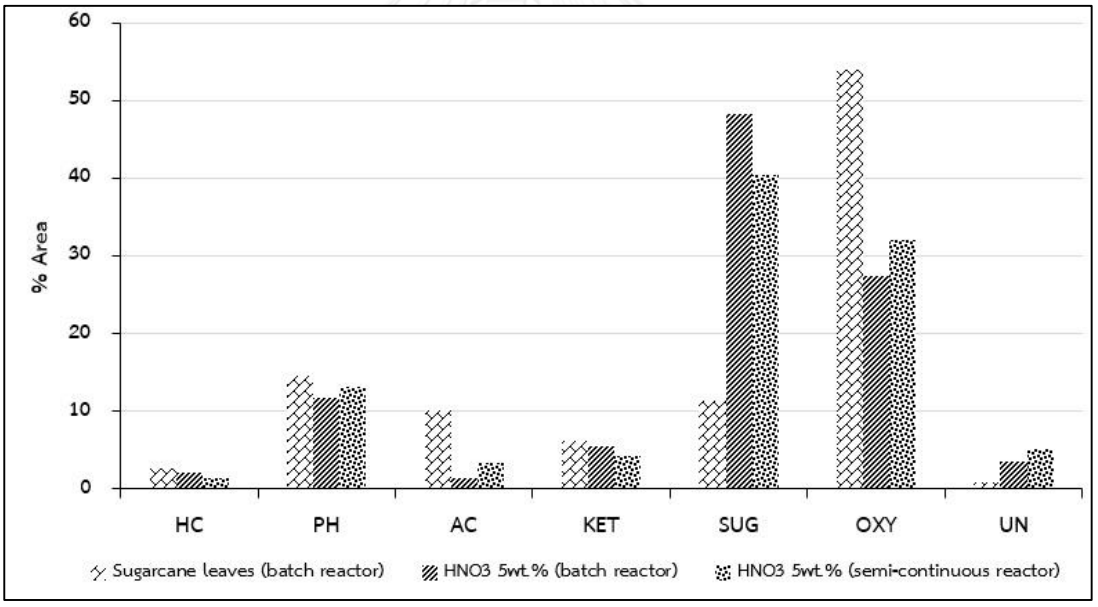
No	Retention time (min)	Compound	Type of reactor		
			Batch reactor		Semi-Continuous reactor
			Ethanol concentration (v/v)		
			100	100	50
			% Area		
			Treatment		
			Untreatment	HNO_3 (5wt.%)	HNO_3 (5wt.%)
37	15.465	Methyl-D-galactopyranoside	-	-	4.10
38	16.759	7-Methyl-6-tridecene	-	-	0.49
39	16.764	3,7-Dimethyl-1-octanol	0.36	-	
40	19.195	n-Hexadecanoic acid	-		2.97
41	19.557	Ethyl heptadecanoate	2.23	-	
42	19.559	Palmitic acid ethyl ester	-	-	1.17
43	21.229	Ethyl-9-hexadecenoate	0.77	-	-
44	21.407	Butyl palmitate	-	0.66	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph – mass spectrometry) พบว่าองค์ประกอบของน้ำมันดิบชีวภาพที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุมีสารประกอบประเภทฟีโนลิก (phenolic compounds) สารประกอบที่เป็นกรด (acids compounds) และสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (other oxygenates) เช่น แอลกอฮอล์และเอสเทอร์เป็นองค์ประกอบหลัก และหลังจากทำการขจัดแร่ธาตุมีองค์ประกอบประเภทฟีโนลิก สารประกอบประเภทกรด และสารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบลดลง ในขณะที่สารประกอบจำพวกน้ำตาล (anhydrosugars) เพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.9 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันดิบชีวภาพก่อนและหลังขจัดแร่ธาตุในตัวทำละลายเอทานอลในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และองค์ประกอบของน้ำมันดิบชีวภาพหลังขจัดแร่ธาตุในตัวทำ

ละลายเอทานอลร้อยละ 50 โดยปริมาตรในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง โดย HC คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbons) PH คือ สารประกอบประเภทฟีโนลิก (phenolic compounds) AC คือ สารประกอบที่เป็นกรด (acids compounds) KET คือ สารประกอบคีโตน (ketones) SUG คือ สารประกอบจำพวกน้ำตาล (anhydrosugars) OXY คือ สารที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (other oxygenates) โดยรวมแอลดีไฮด์ (aldehydes) เอสเทอร์ (esters) และ แอลกอฮอล์ (alcohols) ด้วย และ UN คือ องค์ประกอบอื่นๆ โดยพบว่าหลังจากการขจัดแร่ธาตุจะมีองค์ประกอบของสารประกอบจำพวกน้ำตาล (anhydrosugars) เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะลีโวกลูโคซาน (levoglucosan) ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณของคีโตนที่ลดลงหลังทำการขจัดแร่ธาตุ เพราะโดยปกติแล้วโลหะที่เป็นไอออนบวก (metal cation) จะโฮโมไลซิส (homolysis) เข้าไปในโครงสร้างของเซลลูโลสทำให้เกิดพันธะคู่ระหว่างคาร์บอนกับออกซิเจนในองค์ประกอบ ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการขจัดแร่ธาตุไปแล้วก็ไม่มีโลหะที่เป็นไอออนบวก พันธะโอ-กลูโคซิดิก (O-glucosidic) ในเซลลูโลสจึงถูกตัดออก และเกิดการดีพอลิเมอไรเซชัน (depolymerization) กลายเป็นลีโวกลูโคซาน [1]



รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของน้ำมันดิบชีวภาพที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน ในตัวทำละลายต่างๆ

ส่วนองค์ประกอบฟีโนลิกมีปริมาณลดลงหลังจากทำการขจัดแร่ธาตุ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าแร่ธาตุทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของโครงสร้างลิกนินและโอลิโกเมอร์ ดังนั้นในน้ำมันดิบชีวภาพที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุก็จะมีการก่อตัวของฟีโนลิกมอนอเมอร์ (phenolic monomers) มากกว่า [19] และพบว่ากรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) ในน้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่

ธาตุมีแนวโน้นลดลง เป็นผลมาจากการขาดแคลนสารประกอบของแอลคาไล (alkali) ซึ่งพบว่าสารประกอบแอลคาไลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดกรดคาร์บอกซิลิกในไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของชีวมวล นอกจากนี้สารประกอบประเภทคาร์บอกซิลิกสามารถทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้เอสเทอร์ผ่านปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) แต่เมื่อสารประกอบประเภทคาร์บอกซิลิกหลังขจัดแร่ธาตุมีน้อยลง จึงทำให้ได้สารประกอบเอสเทอร์น้อยลงด้วย [17]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยและศึกษาผลของแร่ธาตุในใบอ้อยต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล จากการทดลองเป็นการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ไม่ผ่านการขจัดแร่ธาตุและผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและน้ำร้อน ในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอลในอัตราส่วน 1:0 1:1 และ 0:1 ดำเนินการที่อุณหภูมิ 300 325 และ 350 องศาเซลเซียส ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล ความเร็วรอบใบกวน 300 รอบต่อนาที เวลาที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยาคือ 60 นาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ และการทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและน้ำร้อน ในตัวทำละลายเดี่ยวและตัวทำละลายร่วมระหว่างน้ำและเอทานอลในอัตราส่วน 1:0 1:1 และ 0:1 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 60 นาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลของการขจัดแร่ธาตุ

เมื่อทำการขจัดแร่ธาตุในใบอ้อยด้วยสารละลายกรดไนตริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และน้ำร้อน พบว่าปริมาณแร่ธาตุในใบอ้อยลดลง

5.1.2 ผลของแร่ธาตุในใบอ้อยต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน

จากการทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ พบว่าก่อนทำการขจัดแร่ธาตุร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพเท่ากับร้อยละ 41.10 โดยน้ำหนัก และเมื่อทำการขจัดแร่ธาตุให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพสูงขึ้นเท่ากับร้อยละ 45.92 โดยน้ำหนัก เมื่อดำเนินการที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยมีตัวทำละลายเป็นเอทานอล

5.1.3 ผลของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch reactor) และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous reactor) ต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันของใบอ้อยก่อนและหลังทำการขจัดแร่ธาตุ

ในการทดลองโดยใช้เครื่องเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์และเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องของใบอ้อยที่ไม่ผ่านและผ่านการขจัดแร่ธาตุ พบว่าผลของเครื่องปฏิกรณ์ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพ โดยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพหลังทำการขจัดแร่ธาตุเพิ่มขึ้นในตัวทำละลายเอทานอล ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพหลังการขจัดแร่ธาตุเพิ่มขึ้นทั้งในตัวทำละลายเดี่ยว และตัวทำละลายร่วมน้ำและเอทานอล

5.1.4 ผลของการวิเคราะห์หาองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี

หลังทำการขจัดแร่ธาตุพบองค์ประกอบของสารประกอบจำพวกน้ำตาลเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะลีโวกลูโคซาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของชีวมวลที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพ
- ศึกษาผลของแร่ธาตุต่อองค์ประกอบแต่ละชนิดในชีวมวล

Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. Stefanidis, S.D.; Heracleous, E.; Patiaka, TH.; Kalogiannis, G.; Michailof, M.; and Lappas, A. Optimization of bio-oil yields by demineralization of low quality biomass. Biomass & Bioenergy, **83** (2015) 105-115.
2. สำนักงานหอสมุดและศูนย์สาระสนเทศวิทยาศาสตร์และเทคโลโนยี, พลังงานจากชีวมวล (Biomass energy). 2553.
3. อดิศักดิ์ ปัตติยะ. ผลของการลดแร่ธาตุของชีวมวลที่มีต่อผลได้และคุณสมบัติของไบโอออยล์ที่ผลิตจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว (Effect of Biomass Demineralisation on Yields and Properties of Bio-oil produced from Fast Pyrolysis Process). 2555.
4. รศ.ดร.บุษบา พฤกษาพันธุ์รัตน์ และดร.บุญรอด สัจจกุลนุกิจ. โครงการแนวทางการส่งเสริมมาตรฐานเชื้อเพลิงชีวมวลแปรรูปในภาคอุตสาหกรรม Study of Biomass Transformation for Industrial Sector. 2555.
5. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 4. 2554.
6. Alliance, E. Biomass. [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.ecotechalliance.com /markets/biomass/ [2559, พฤศจิกายน 10].
7. Yokoyama, S. คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล. 2008.
8. Demirbas, A. Biofuels Securing the Planet's Future Energy Needs. 2008.
9. ศักยภาพของชีวมวล. [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http:// digi.library.tu.ac.th/thesis/en /0419/03chapter2.pdf [2559, กันยายน 4]
10. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย. [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www4.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=1 3 0 % 3 A2 0 1 0 - 0 5 - 0 7 - 0 8 - 1 0 - 5 7 &catid=5 8 &Itemid=6 8 &lang=th [2559, กันยายน 4].
11. Yaman, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. Energy Conversion and Management, **45** (2004) 651-671.
12. อรุณี ศุภสินสาธิตศุภสินสาธิต. พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง. ใน วารสารสิ่งแวดล้อม ปีที่ 16 เล่ม 2, 36-43.

13. Tekin, K.; Karagoz, s.; and Bektas, S. A review of hydrothermal biomass processing. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **40** (2014). 673-687.

14. Parikh, J., S.A.; Channiwala S.A.; and Ghosal, G.K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Fuel, **84** (2005) 487-494.

15. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. อ้อย. [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?book=5&chap=3&page=t5-3-infodetail01.html [2559, กันยายน 24].

16. Ramirez, A.; Brown, J. and Rainey, J. A Review of Hydrothermal Liquefaction Bio-Crude Properties and Prospects for Upgrading to Transportation Fuels. Energies, **8** (2015) 6765-6794.

17. Feng, S.; Yuan, Z.; Leitch, M.; and Xu, C. Hydrothermal liquefaction of barks into bio-crude – Effects of species and ash content/composition. Fuel, **116** (2014) 214-220.

18. Eom, I.Y.; Kim, J.Y.; Lee, S.M.; Cho, T.S.; Yeo, H.; and Choi, J.W. Comparison of pyrolytic products produced from inorganic-rich and demineralized rice straw (Oryza sativ*a L.)* by fluidized bed pyrolyzer for future biorefinery approach. Bioresource Technology, **128** (2013) 664-672.

19. Cheng, S.; D'cruz, I; Wang, M.; Leitch, M.; and Xu, C. Highly Efficient Liquefaction of Woody Biomass in Hot-Compressed Alcohol–Water Co-solvents. Energy Fuels, **24** (2010) 4659–4667.

20. Liu, Y.; Yuan, Z.; Huang, H.; Wang, X.; Wang, H.; and Zeng, G. Thermochemical liquefaction of rice husk for bio-oil production in mixed solvent (ethanol–water). Fuel Processing Technology, **112** *(*2013) 93-99.

21. Das, P.; Ganesh, A.; and Wangikar, P. Influence of pretreatment for deashing of sugarcane bagasse on pyrolysis products. Biomass and Bioenergy, **5** (2004) 445-457.

22. Jiang, L.; Hu, S.; Sun, L.; Su, S.; Xu, K.; He, L.; and Xiang, J. Influence of different demineralization treatments on physicochemical structure and thermal degradation of biomass. Bioresource Technology, **146** (2013) 254-260.

23. Asadieraghi, M.; and W.M.A. Wan Daud., Characterization of lignocellulosic biomass thermal degradation and physiochemical structure: Effects of

demineralization by diverse acid solutions. Energy Conversion and Management, **82** (2014) 71-82.

24. Adisak Pattiya,; Anocha Chaow-u-thai,; and Sampan Rittidech. The Influence of Pretreatment Techniques on Ash Content of Cassava Residues. Green Energy, 2013, **10** (2013) 544–552.
25. Raveendran, K., Ganesh, A.; and Khilar, K.C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics. Fuel, **74** (1995) 1812-1822.
26. Zhu, Z.; Toor, S.; Rosendahl, L.; and Chena, G. Analysis of Product Distribution and Characteristics in Hydrothermal Liquefaction of Barley Straw in Subcritical and Supercritical Water. Environmental Progress & Sustainable Energy, **33** (2014) 737-743.
27. Akhtar, J.; and Amin, N. A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **16** (2012) 5101-5109.
28. Hui, L.; Xingzhong, Y.; Guangming, Z.; Danlian, H.; Huajun, H.; Jingyi, T.; Qiao, Y.; Jiachao, Z.; and Ming, Z. The formation of bio-oil from sludge by deoxy-liquefaction in supercritical ethanol. Bioresource Technology, **101** (2010) 2860–2866.
29. Yuan, X.Z.; Li, H.; Zeng, G.M.; Tong, J.Y.; and Xie, W. Sub- and supercritical liquefaction of rice straw in the presence of ethanol–water and 2-propanol–water mixture. Energy, **32** (2007) 2081-2088.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของชีวมวล

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate Analysis)

1.1 ความชื้น (moisture) (ASTM E871-82)

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

(1) เตาอบ (moisture over)

(2) ถ้วยพอสเลน (porcelain crucible)

(3) โถดูดความชื้น (desiccators)

ข. วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างใบอ้อยประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยพอสเลน (porcelain crucible) ที่รู้น้ำหนักที่แน่นอนแล้วไปอบในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักของใบอ้อยหลังอบ

ค. สูตรคำนวณ

คำนวณหาปริมาณความชื้นเป็นร้อยละดังนี้

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักของใบอ้อย} - \text{น้ำหนักของใบอ้อยหลังอบ})}{\text{น้ำหนักของใบอ้อย}} \times 100$$

1.2 เถ้า (ash) (ASTM D1102-84)

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

(1) เตาอบ (moisture over)

(2) ถ้วยพอสเลน (porcelain crucible)

(3) โถดูดความชื้น (desiccators)

ข. วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างใบอ้อยประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยพอสเลน (porcelain crucible) ที่รู้น้ำหนักแล้วพร้อมทั้งปิดฝา นำไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง แล้วเผาต่อที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดซิกเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักเถ้าแล้วคำนวณ

ค. สูตรคำนวณ

คำนวณหาปริมาณของเถ้าเป็นร้อยละดังนี้

$$\text{ร้อยละเถ้า} = \frac{(\text{น้ำหนักของเถ้า})}{\text{น้ำหนักของใบอ้อย}} \times 100$$

1.3 ปริมาณสารระเหย (volatile matter) (ASTM E872-82)

ก) เครื่องมือและอุปกรณ์

(1) เตาอบ (moisture over)

(2) ถ้วยพอสเลน (porcelain crucible)

(3) โถดูดความชื้น (desiccators)

ข. วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างใบอ้อยประมาณ 1 กรัม ใส่ในถ้วยพอสเลน (porcelain crucible) ที่รู้น้ำหนักแล้วพร้อมทั้งปิดฝา นำไปเผาในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 750 ±20 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 นาที ทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักที่หายไปแล้วคำนวณ

ค. สูตรคำนวณ

คำนวณหาปริมาณของสารระเหยเป็นร้อยละดังนี้

$$\text{ร้อยละสารระเหย} = \frac{(\text{น้ำหนักของใบอ้อย} - \text{น้ำหนักของใบอ้อยหลังเผา})}{\text{น้ำหนักของใบอ้อย}} \times 100$$

1.4 คาร์บอนคงตัว (fixed carbon)

ค่าผลต่างของร้อยละลบด้วยผลบวกของความชื้น เถ้า และสารระเหยที่คิดเป็นร้อยละดังนี้

ร้อยละคาร์บอนคงตัว = 100 – (ร้อยละความชื้น +ร้อยละเถ้า + ร้อยละสารระเหย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข
การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

   ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพ = $(W_{liq}/W_{daf}) \times 100$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของของแข็ง

   ร้อยละผลได้ของของแข็ง = $(W_{ash}/W_{daf}) \times 100$

3. การคำนวณร้อยละผลได้ของแก๊ส

   ร้อยละผลได้ของแก๊ส = $(W_{gas}/W_{daf}) \times 100$

4. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่สูญหายและอื่นๆ

   ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่สูญหายและอื่นๆ = 100 – (ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ + ร้อยละผลได้ของของแข็ง + ร้อยละผลได้ของแก๊ส)

โดย

W_{daf} คือ น้ำหนักของใบอ้อยที่ปราศจากความชื้นและเถ้า

W_{liq} คือ น้ำหนักของของเหลว

W_{ash} คือ น้ำหนักของกากที่ปราศจากความชื้น

W_{gas} คือ น้ำหนักของแก๊ส

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

<u>ภาวะการทดลอง</u>; นำใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริก มาทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันตามเงื่อนไขต่างๆ คือ ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปริมาตรของตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนใบอ้อยต่อตัวทำละลาย 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร, ตัวทำละลายเอทานอล) ความเร็วรอบใบกวน 300 รอบต่อนาที เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

การคำนวณ

น้ำหนักของใบอ้อย (dry basis) = 10.05 กรัม

น้ำหนักของใบอ้อย (dry ash free basis) = 8.82 กรัม

น้ำหนักผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว = 4.05 กรัม

น้ำหนักผลได้ของของแข็ง = 2.62 กรัม

น้ำหนักผลได้ของแก๊ส = 0.5564 กรัม

ร้อยละผลได้ของน้ำมันดิบชีวภาพ = (4.05/8.82) x 100 = 45.92

ร้อยละผลได้ของของแข็ง = (2.62/8.82) x 100 = 29.71

ร้อยละผลได้ของแก๊ส = (0.5564/8.82) x 100 = 6.31

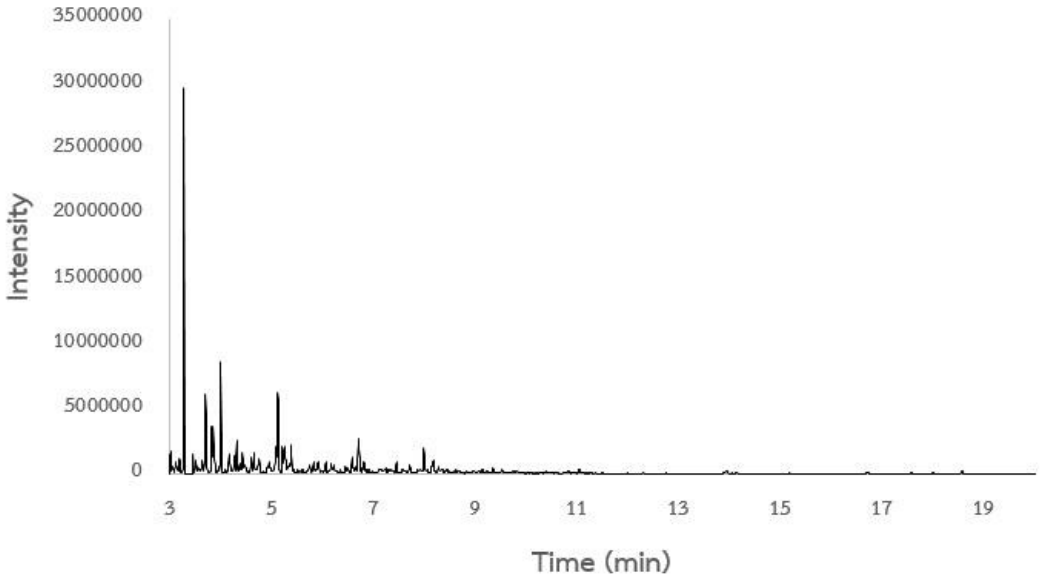
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่สูญหายและอื่นๆ = 100 – (45.92 + 29.71 + 6.31 = 18.06

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่สูญหายและอื่นๆ

หลังจากทำการระเหยตัวทำลายออกจากผลิตภัณฑ์ของเหลว ได้มีการนำสารละลายไปตรวจสอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph-mass spectrometry) เพื่อหาองค์ประกอบที่อยู่ในส่วนสารละลายนั้น ดังแสดงในรูปที่ ค.1

ภาวะการทดลอง; นำใบอ้อยที่ผ่านการขจัดแร่ธาตุด้วยกรดไนตริก มาทำไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชันตามเงื่อนไขต่างๆ คือ ความดันไนโตรเจนเริ่มต้น 2 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปริมาตรของตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนใบอ้อยต่อตัวทำละลาย 1:10 กรัมต่อมิลลิลิตร, ตัวทำละลายเอทานอล) ความเร็วรอบใบกวน 300 รอบต่อนาที เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที



รูปที่ ค.1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพจากไฮโดรเทอร์มัลลิควิแฟกชัน

ตารางที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ที่สูญหายและอื่นๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโทรเมตรี (gas chromatograph – mass spectrometry)

No	Retention time (min)	Compound	% Area
1	3.125	3,3-Dimethyl-1-butyne	0.98
2	3.194	Propanoic acid	0.94
3	3.283	2,2-Dimethoxypropane	16.98
4	3.515	2,2,3-Trimethylpentane	1.16
5	3.592	2-Hexenal	0.49
6	3.637	Cyclopentanone	0.93
7	3.701	Ethyl butyrate	5.74
8	3.826	1,1-Dimethoxypropane	3.21
9	3.858	Ethyl lactate	3.81
10	3.959	2-Ethyl-2-butenal	0.48
11	4.003	Butanoic anhydride	7.76
12	4.169	2-Cyclopenten-1-one	1.93
13	4.272	2-Methyl-1-pentanol	1.34
14	4.318	Ethyl crotonate	2.33
15	4.375	Ethyl 2-methylbutyrate	0.93
16	4.430	2-Furanmethanol	1.93
17	4.492	2-Methyl-1-penten-3-ol	1.04
18	4.604	Ethylbenzene	1.42
19	4.659	1-Hexanol	1.46
20	4.756	o-Xylene	1.91
21	4.951	Furfuryl alcohol	1.57
22	5.090	p-Xylene	2.92
23	5.128	1,1-Diethoxybutane	6.60
24	5.217	3-Pentanol	1.93
25	5.251	2-Methyl-2-cyclopenten-1-one	3.13
26	5.391	2-Ethoxy-2-methylbutane	1.81
27	5.751	Ethyl tiglate	1.14
28	5.827	Cyclooctane	1.09
29	6.225	1-Ethyl-2-methylbenzene	0.69
30	6.359	Phenol	0.50
31	6.459	Mesitylene	0.54
32	6.588	Trimethylsilane	1.64
33	6.651	Ethyl hex-3-enoate	0.51
34	6.903	2,5-Diethoxytetrahydrofuran	0.52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

No	Retention time (min)	Compound	% Area
35	7.457	1-Methylcyclohexylcarboxylic acid	0.76
36	8.000	Butanoic anhydride	2.14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง
ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch reactor)

No.	Conditions								Products		
	Treatment	Temp (°C)	Biomass (g)	Ethanol conc. (vol.%)	Initial N_2 pressure (bar)	Rotation speed (rpm)	Time (min)	Final pressure (bar)	Bio-crude (g)	Residue solid (g)	Gas (g)
1	Normal	300	10	0	20	300	60	107.0	2.74	1.79	0.73
2			10	50	20	300	60	127.7	1.77	1.94	0.89
3			10	100	20	300	60	145.5	2.7	2.14	0.25
4	Normal	325	10	0	20	300	60	128.0	1.26	1.70	0.40
5			10	50	20	300	60	179.8	1.89	1.76	0.82
6			10	100	20	300	60	192.8	3.14	1.45	1.07
7	Normal	350	10	0	20	300	60	164.0	0.97	1.70	0.73
8			10	50	20	300	60	241.0	1.88	1.49	0.66
9			10	100	20	300	60	221.7	3.51	1.57	1.65
10	HNO_3	300	10	0	20	300	60	104.2	1.41	2.86	0.41
11			10	50	20	300	60	119.9	0.99	2.36	0.34
12			10	100	20	300	60	152.0	4.05	2.62	0.56
13	HNO_3	325	10	0	20	300	60	127.0	0.83	2.13	0.39
14			10	50	20	300	60	181.9	1.53	2.00	0.50
15			10	100	20	300	60	184.2	3.85	2.35	1.51
16	HNO_3	350	10	0	20	300	60	163.8	0.94	2.62	0.72
17			10	50	20	300	60	239.4	1.61	1.97	0.78
18			10	100	20	300	60	228.4	2.39	1.84	1.88

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.1 (ต่อ)

No.	Conditions								Products		
	Treatment	Temp (°C)	Biomass (g)	Ethanol conc. (vol.%)	Initial N_2 pressure (bar)	Rotation speed (rpm)	Time (min)	Final pressure (bar)	Bio-crude (g)	Residue solid (g)	Gas (g)
19	Hot water	300	10	0	20	300	60	98.8	2.33	2.42	0.73
20			10	50	20	300	60	124.9	1.3	2.17	0.89
21			10	100	20	300	60	151.6	3.79	2.65	0.27
22	Hot water	325	10	0	20	300	60	124.8	2.26	1.33	0.40
23			10	50	20	300	60	177.3	2.10	1.65	0.27
24			10	100	20	300	60	183.0	3.51	2.14	1.18
25	Hot water	350	10	0	20	300	60	163.6	0.99	1.96	0.73
26			10	50	20	300	60	239.7	2.05	1.78	0.66
27			10	100	20	300	60	221.7	3.47	1.63	1.65

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch reactor) (ต่อ)

No	Yield (% wt.)			% Composition (Bio-crude product)				Acidity mg KOH/g	Water (% wt.)	HHV (MJ/kg)
	Bio-crude	Solid	Gas	C	H	O	N			
1	34.12	22.29	9.04	-	-	-	-	-	-	-
2	19.80	25.65	12.03	-	-	-	-	-	-	-
3	41.10	29.27	2.90	69.45	8.43	21.47	0.65	17.88	2.32	31.81
4	15.69	21.17	4.95	-	-	-	-	-	-	-
5	23.54	21.92	10.27	-	-	-	-	-	-	-
6	44.70	22.29	14.64	-	-	-	-	-	-	-
7	12.08	21.17	9.10	-	-	-	-	-	-	-
8	23.41	18.56	8.16	-	-	-	-	-	-	-
9	43.71	19.55	20.50	-	-	-	-	-	-	-
10	15.99	32.43	4.70	-	-	-	-	-	-	-
11	11.22	26.76	3.86	-	-	-	-	-	-	-
12	45.92	29.71	6.31	64.76	8.30	26.37	0.57	20.42	2.72	29.15
13	9.41	24.15	4.45	-	-	-	-	-	-	-
14	17.35	22.68	5.71	-	-	-	-	-	-	-
15	**43.65**	**27.78**	**17.15**	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง.2 (ต่อ)

No	Yield (% wt.)			% Composition (Bio-crude product)				Acidity mg KOH/g	Water (% wt.)	HHV (MJ/kg)
	Bio-crude	Solid	Gas	C	H	O	N			
16	10.66	29.71	8.17	-	-	-	-	-	-	-
17	18.27	22.36	8.90	-	-	-	-	-	-	-
18	27.10	20.86	21.36	-	-	-	-	-	-	-
19	26.09	27.10	3.06	-	-	-	-	-	-	-
20	14.56	24.30	5.18	-	-	-	-	-	-	-
21	38.30	29.68	3.07	-	-	-	-	-	-	-
22	14.89	25.31	6.00	-	-	-	-	-	-	-
23	25.08	17.25	3.81	-	-	-	-	-	-	-
24	39.31	23.96	10.82	-	-	-	-	-	-	-
25	11.08	21.95	5.80	-	-	-	-	-	-	-
26	22.96	19.93	8.01	-	-	-	-	-	-	-
27	38.86	18.25	18.70	-	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous reactor)

No.	Conditions						Products	
	Treatment	Temp (°C)	Flow rate (mL/min)	Pressure (MPa)	Ethanol conc. (vol.%)	Time (min)	Bio-crude (g)	Residue solid (g)
1	Normal	300	1	2	0	60	0.73	3.15
2					50	60	0.76	2.48
3					100	60	0.32	3.60
4	HNO_3	300	1	2	0	60	0.67	2.78
5					50	60	1.13	2.48
6					100	60	0.67	2.78
7	Hot water	300	1	2	0	60	0.70	1.59
8					50	60	0.78	2.17
9					100	60	0.37	2.63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ง.4 ข้อมูลการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous reactor) (ต่อ)

No	Yield (% wt.)		% Composition (Bio-crude product)				Acidity mg KOH/g	Water (% wt.)	HHV (MJ/kg)
	Bio-crude	Solid	C	H	O	N			
1	18.30	78.59	-	-	-	-	-	-	-
2	19.05	62.16	-	-	-	-	-	-	-
3	7.27	90.23	-	-	-	-	-	-	-
4	23.71	79.43	-	-	-	-	-	-	-
5	32.56	71.47	46.76	6.15	46.46	0.63	10.39	3.80	16.33
6	19.31	80.12	-	-	-	-	-	-	-
7	19.72	44.79	-	-	-	-	-	-	-
8	21.97	61.13	-	-	-	-	-	-	-
9	10.42	78.31	-	-	-	-	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรัญญา จิตสนธิ เกิดวันที่ 14 ตุลาคม 2534 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม แขนงปิโตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University