ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสชิ้นไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

ว่าที่ ร.ต.วรเวช ศรีปราโมช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF CATALYST ON BIOOIL QUALITY FROM EUCALYPTUS WOODCHIPS AND CORNCOB PYROLYSIS IN FIXED-BED REACTOR

Acting SubLt. Woraweach Sripramoch

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science
FACULTY OF SCIENCE
Chulalongkorn University
Academic Year 2019
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสชิ้นไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง
โดย	ว่าที่ ร.ต.วรเวช ศรีปราโมช
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร ชวศิริ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

.... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วรเวช ศรีปราโมช : ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสชิ้นไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง. (EFFECT OF CATALYST ON BIOOIL QUALITY FROM EUCALYPTUS WOODCHIPS AND CORNCOB PYROLYSIS IN FIXED-BED REACTOR) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลทั้งสองชนิดคือ เวลาทำปฏิกิริยาที่ 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และขนาดอนุภาคของชีวมวลระหว่าง 0.50-0.71 มิลลิเมตร ส่วนอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนสำหรับไม้ยูคาลิปตัสคือ 120 มิลลิลิตรต่อนาที และสำหรับซังข้าวโพดคือ 80 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดที่ร้อยละ 31.69 และ 22.01 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลทั้งสองชนิดให้ค่าความร้อนสูงขึ้นและใกล้เคียงกันคือ 23.14 และ 23.27 เมกะจูล/กิโลกรัม ตามลำดับ สอดคล้องกับอัตราส่วน H/C และ O/C ของน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลทั้งสองชนิดที่มีค่าต่ำกว่าในชีวมวล เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพพบว่าส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มฟีนอล รองลงมาคือสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก แอลดีไฮด์ อีเทอร์ คีโทน ไฮโดรคาร์บอน แซ็กคาไรด์ และสารที่มีปริมาณน้อยสุดคือสารในกลุ่มฟูแรน และจากการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วพบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับชีวมวลทั้งสองชนิดคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการลดออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์	ลายมือชื่อนิสิต ....
ปีการศึกษา	2562	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม ....

6172053923 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE
KEYWORD: Pyrolysis, Fixed-bed Reactor, Bio-oil, Eucalyptus, Corncob

Woraweach Sripramoch : EFFECT OF CATALYST ON BIOOIL QUALITY FROM EUCALYPTUS WOODCHIPS AND CORNCOB PYROLYSIS IN FIXED-BED REACTOR. Advisor: Assoc. Prof. PRASERT REUBROYCHAROEN, Ph.D. Co-advisor: Prof. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.

This research was focused on the optimal conditions for pyrolysis of eucalyptus woodchips and corncob in fixed-bed reactor. The study found that the optimal conditions for both biomasses included 30 mins of reaction time, 500°C for temperature, and 0.50 - 0.71 mm for biomass particle size. Besides, the optimal nitrogen flow rate was 120 ml/min for eucalyptus and 80 ml/min for corncob. These conditions provided the maximum bio-oil yield for both eucalyptus and corncob at 31.69 %wt. and 22.01 %wt., respectively. In addition, bio-oil from both biomasses had increasing heating value, the number are similar which were 23.14 MJ/kg for eucalyptus and 23.27 MJ/kg for corncob. This finding was consistent with lower H/C ratio and O/C ratio in bio-oil comparing to ratios in particle from both biomasses. According to composition analysis of bio-oil, the most composition was Phenols group, the second was carboxylic acids, aldehyde, ethers, ketones, Hydrocarbon, saccharide and the least was Furans. Moreover, studying the effect of dolomite and FCC spent catalysts on pyrolysis's product yield found that the optimal amount of each catalyst was 5 %wt. for each biomass. Besides, these catalysts had no significant impact on reducing oxygen in bio-oil.

Field of Study:	Petrochemistry and Polymer Science	Student's Signature ....
Academic Year:	2019	Advisor's Signature ....
		Co-advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ความรู้และแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษา แนวทางการวิจัย และให้โอกาสในการเรียนรู้สิ่งใหม่ ๆ จนเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บริษัท เซปโก อินดัสตรีส์ จำกัด ที่มอบทุนการศึกษาเพื่อสนับสนุนการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่และบุคลากรภายในศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ทำงานวิจัย วัตถุดิบสำหรับงานวิจัย และเครื่องมือวิเคราะห์ ร่วมไปถึงที่พักสำหรับทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคและหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา คำชี้แนะ และอำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร ชวศิริ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ดวงกมล ตุงคะสมิต กรรมการ และรองศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำ ความคิดเห็น และความกรุณาสละเวลาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุน การช่วยเหลือ และให้กำลังใจตลอดการวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วรเวช ศรีปราโมช

สารบัญ

หน้า

.... ค

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

.... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง

กิตติกรรมประกาศ .... จ

สารบัญ .... ฉ

สารบัญรูป .... ญ

สารบัญตาราง .... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 ขอบเขตการวิจัย 3

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ปิโตรเลียม 5

2.1.1 น้ำมันดิบ (Crude oil) 5

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ (Natural gas) 6

2.2 พลังงานทดแทน 6

2.2.1 พลังงานแสงอาทิตย์ 6

2.2.2 พลังงานลม 7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.3 พลังงานน้ำ 8
2.3 ชีวมวล 9
2.3.1 แหล่งที่มาของชีวมวล 10
2.3.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของชีวมวล........ 11
2.3.2.1 เซลลูโลส (Cellulose) 12
2.3.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)........ 13
2.3.2.3 ลิกนิน (Lignin)........ 14
2.4 เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวล 16
2.4.1 กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ........ 17
2.5 ไพโรไลซิส 17
2.5.1 กระบวนการเกิดไพโรไลซิส 17
2.5.2 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส 18
2.5.3 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์ 19
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา 23
2.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์........ 24
2.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี........ 24
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง........ 25
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง 29
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 29
3.2 เครื่องมือวิเคราะห์ 30
3.3 ชีวมวลและสารเคมี 33
3.4 ขั้นตอนการทดลอง 34
3.4.1 การเตรียมชีวมวลและการวิเคราะห์สมบัติชีวมวล 34
3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4.3 การออกแบบการทดลอง 34

3.4.4 การไพโรไลซิสชีวมวล 35

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 37

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 37

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด37

4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของ ไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 37

4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 38

4.1.4 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric analysis, TGA/DTA)......................... 39

4.2 ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 41

4.2.1 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ 41

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ 43

4.2.3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์... 45

4.2.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ 47

4.3 ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว และปริมาณที่เหมาะสมในช่วงร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก.. 50

4.3.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด.. 50

4.3.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 52

4.4 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและ ซังข้าวโพด 53

4.4.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพ 54

4.4.1.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อน.. 54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) 56

4.4.2 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านและแก๊ส 59

4.4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่าน 59

4.4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ (GC)..... 60

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 62

5.1 สรุปผลการทดลอง 62

5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด..... 62

5.1.2 ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด..... 62

5.1.3 ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วและปริมาณที่เหมาะสมในช่วง ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก 63

5.1.4 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด..... 63

5.2 ข้อเสนอแนะ 64

ภาคผนวก..... 63

ภาคผนวก ก การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล 64

ภาคผนวก ข ผลจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ และผลจากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 65

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพ..... 70

บรรณานุกรม..... 78

ประวัติผู้เขียน..... 82

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างชีวมวลจากซังข้าวโพดและไม้ยูคาลิปตัส 9
รูปที่ 2.2 โครงสร้างไฟเบอร์ของไม้เนื้อแข็ง (ซ้าย) และโครงสร้างของไม้เนื้ออ่อน (ขวา) 11
รูปที่ 2.3 โครงสร้างเซลลูโลส (cellulose) 13
รูปที่ 2.4 สายโซ่ของเซลลูโลสต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน 13
รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมโนเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส........ 14
รูปที่ 2.6 โครงสร้างบางส่วนของโมเลกุลลิกนินของไม้เนื้อแข็งจากบีชยุโรป (Fagus sylvatica) 16
รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของชีวมวล 18
รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor)........ 20
รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) 21
รูปที่ 2.10 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน
(Circulating fluidized beds and transported bed)........ 22
รูปที่ 2.11 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor)........ 22
รูปที่ 2.12 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกูร (Auger reactor)........ 23
รูปที่ 3.1 แผนภาพองค์ประกอบเครื่องไพโรไลซิส........ 29
รูปที่ 3.2 เครื่องไพโรไลซิสสำหรับงานวิจัยนี้........ 30
รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC-TCD)........ 30
รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC-FID) 31
รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีแมสสเปคโทรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) 31
รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH (CHN analysis) 32
รูปที่ 3.7 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) 32
รูปที่ 3.8 ไม้ยูคาลิปตัส 33
รูปที่ 3.9 ซังข้าวโพด........ 33

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.1 การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก 40

รูปที่ 4.2 การสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพดด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก........................ 40

รูปที่ 4.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด.. 41

รูปที่ 4.4 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส 42

รูปที่ 4.5 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด 42

รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส.... 44

รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด....... 44

รูปที่ 4.8 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส
ไม้ยูคาลิปตัส.. 46

รูปที่ 4.9 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส
ซังข้าวโพด... 46

รูปที่ 4.10 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์
จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส 48

รูปที่ 4.11 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์
จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด 48

รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์............................ 51

รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์............................ 51

รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ 52

รูปที่ 4.15 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ 53

รูปที่ 4.16 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส...................... 58

รูปที่ 4.17 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด......................... 58

รูปที่ ค-1 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสแบบเติม
ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก... 70

รูปที่ ค-2 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสแบบเติม
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ ค-3 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดแบบเติม
ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 74

รูปที่ ค-4 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดแบบเติม
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโดโลไมต์ 24

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 37

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 38

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 39

ตารางที่ 4.4 ผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจากภาวะที่ดีที่สุดของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส และซังข้าวโพด 49

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิส ไม้ยูคาลิปตัส 55

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิส ซังข้าวโพด 55

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 57

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านจากไพโรไลซิส ไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 59

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของแก๊สจากไพโรไลซิส ไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด 60

ตารางที่ ข-1 ผลของเวลาต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส 65

ตารางที่ ข-2 ผลของเวลาต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด 65

ตารางที่ ข-3 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส ไม้ยูคาลิปตัส 66

ตารางที่ ข-4 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด 66

ตารางที่ ข-5 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส ไม้ยูคาลิปตัส 66

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-6 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด 67

ตารางที่ ข-7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส 67

ตารางที่ ข-8 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด 67

ตารางที่ ข-9 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส 68

ตารางที่ ข-10 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด 68

ตารางที่ ข-11 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส 69

ตารางที่ ข-12 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด 69

ตารางที่ ค-1 องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว 71

ตารางที่ ค-2 องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นสวนทางกับพลังงานที่มาจากแหล่งปิโตรเลียมที่กำลังลดลง ทำให้มีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งปิโตรเลียมยังมีส่วนทำให้เกิดการปลดปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม การใช้ชีวมวล (Biomass) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยแก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีชีวมวลที่เหลือใช้เป็นจำนวนมาก ชีวมวลหรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจึงถือเป็นเชื้อพลิงทางเลือกที่มีความสำคัญมากในประเทศเกษตรกรรมอย่างไทย โดยอาจถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงหรือแปรรูปเป็นพลังงานทดแทนรูปแบบต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีโครงการและงานวิจัยต่าง ๆ มากมายที่พยายามศึกษาค้นคว้าเพื่อแปรรูปชีวมวลไปเป็นน้ำมันชีวภาพ แก๊สชีวภาพ และแก๊สสังเคราะห์ โดยหนึ่งในโครงการน่าสนใจและกำลังศึกษาอยู่ในปัจจุบันคือโครงการความร่วมมือระหว่างจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยกับองค์การความร่วมมือระหว่างประเทศแห่งญี่ปุ่น (jica) ที่ศึกษากระบวนการแกซิฟิเคชัน (Gasification) ชีวมวล 4 ชนิดคือ ไม้ยูคาลิปตัส ซังข้าวโพด ไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง เพื่อผลิตเป็นแก๊สสังเคราะห์และนำไปใช้ในการศึกษากระบวนการฟิชเชอร์-โทรปช์ (Fischer-Tropch) เพื่อผลิตเป็นแก๊สโซลีน ดีเซล ก๊าซปิโตรเลียมเหลว และเมทานอล

นอกจากนี้ชีวมวล 4 ชนิดยังสามารถต่อยอดเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสได้อีกด้วย เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสเป็นการเปลี่ยนรูปของชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าทางความร้อนสูงขึ้น ได้แก่ ถ่าน (Charcoal) น้ำมัน (Bio-oil) และก๊าซไม่กลั่นตัว (Non-condensable gas) โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลาง 400 – 800 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น สภาวะในการทำปฏิกิริยา ลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น กระบวนการไพโรไลซิส แบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis)

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400 - 600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นของเหลว 30 - 50 เปอร์เซ็นต์ และถ่านร้อยละ 25 - 35 ไพโรไลซิสแบบช้ายัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (Carbonization pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลานาน โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวันได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะก๊าซจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15 - 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้งสามสถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามเราสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีขั้วหรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันได้โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ ได้แก่ อะซิโตน คีโทน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น ส่วนกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง 400 - 650 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที) ขนาดอนุภาคของชีวมวลน้อยกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) โดยจะได้น้ำมันชีวภาพประมาณร้อยละ 60 - 75 ของแข็งร้อยละ 15 - 25 และก๊าซไม่กลั่นตัวร้อยละ 10 - 15 และมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพร้อยละ 10 - 30 ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้น้ำมันชีวภาพยังประกอบด้วยสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล ดังนั้นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบอินทรีย์

นอกจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าและแบบเร็วจะให้ผลิตภัณฑ์ในสัดส่วนที่ต่างกันแล้วยังมีตัวปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการแตกตัวของชีวมวลไปเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิส เช่น องค์ประกอบของชีวมวล อุณหภูมิในการไพโรไลซิส อัตราการให้ความร้อน ระยะเวลาของไอระเหยในเครื่องปฏิกรณ์ และขนาดอนุภาค เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณและคุณภาพที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามมีความพยายามที่จะการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวภาพโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีพื้นฐานของน้ำมันชีวภาพโดยการดึงออกซิเจนออกโดยปฏิกิริยาที่ใช้คือ ปฏิกิริยาดีออกซิจิเนชัน (Deoxygenation) เพื่อให้มีการพัฒนาการผลิตน้ำมันชีวภาพที่สามารถนำไปใช้งานได้ตามท้องตลาด [1,2]

จากที่กล่าวมาชีวมวล 4 ชนิดคือ ไม้ยูคาลิปตัส ซังข้าวโพด ไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง นอกจากจะศึกษาในกระบวนการแกซิฟิเคชันได้แล้วยังสามารถใช้ในการศึกษาในกระบวนการไพโรไลซิสได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกชีวมวลสองชนิดที่มีความแตกต่างกันคือไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดมาศึกษาเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลทั้งสองชนิดและศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลของอุณหภูมิ ผลของขนาดอนุภาค

และผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด นอกจากนี้ยังศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถหาได้ง่ายและมีปริมาณมากในศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี อีกทั้งยังมีการศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดในงานวิจัยอื่น ๆ ซึ่งพบว่ามีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล ดังนั้นจึงเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนี้ในการศึกษาผลตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง

1.2 วัตถุประสงค์

1) ศึกษาตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว
2) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งประกอบด้วย เวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ ขนาดอนุภาค และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน เพื่อให้ได้ภาวะที่เหมาะสำหรับการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วต่อผลิตภัณฑ์โดยใช้ไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัย และข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
2) จัดเตรียมเครื่องปฏิกรณ์ สารเคมี ตัวเร่งปฏิกิริยา และชีวมวล
   2.1) นำตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว มาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปเก็บไว้ที่ตู้ดูดความชื้น
   2.2) บดไม้ยูคาลิตัสและซังข้าวโพด แล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาดต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคอยู่ในช่วงที่กำหนด
3) ศึกษาสมบัติของไม้ยูคาลิตัสและซังข้าวโพด

3.1) อุณหภูมิการสลายทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/Differential thermal analysis (TG/DTA)

3.2) องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) เพื่อหาสารระเหย ความชื้น เถ้า และคาร์บอนคงตัว

3.3) องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน

3.4) ค่าความร้อน (Heating value)

3.5) วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรก

4) ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเ บด นิ่งของ ไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

4.1) เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 15, 30, 45 และ 60 นาที

4.2) อุณหภูมิที่ 400, 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส

4.3) ขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 - 0.50, 0.50 - 0.71, 0.71 - 1.00 และ 1.00 - 2.00 มิลลิเมตร

4.4) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 40, 80, 120 และ 160 มิลลิลิตรต่อนาที

5) ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วและปริมาณที่เหมาะสม ในช่วงร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

5.1) วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

5.2) วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่าน

5.3) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพและถ่าน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.4) วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปก-โตรมิเตอร์ (GC-MS) และองค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

6) วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว

2) ได้รู้ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม

ปิโตรเลียมมีรากศัพท์มาจากภาษาละตินว่าเพทรา (Petra) แปลว่าหิน และโอลิอุม (Oleum) แปลว่าน้ำมัน หากแปลตามรากศัพท์แล้วปิโตรเลียมจึงหมายถึงน้ำมันที่ได้มาจากหิน โดยไหลซึมออกมาเองในรูปของของเหลวหรือแก๊ส นับแต่อดีตถึงปัจจุบันมีการให้นิยามของคำว่า ปิโตรเลียม แตกต่างกันตามสาขาอาชีพ เช่น นักชีววิทยา นักเคมี วิศวกร นักธรณีวิทยา และนักกฎหมาย เป็นต้น แต่ความหมายที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดกล่าวว่า ปิโตรเลียมหมายถึงสารผสมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกัน โดยองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนและไฮโดรเจน พบได้ทั้งสามสถานะได้แก่ แก๊ส ของแข็ง และของเหลว โดยของเหลวมีสัดส่วนมากที่สุด รองลงมาคือแก๊ส ส่วนแก๊สธรรมชาติเหลวนั้นมีความหมายถึงแก๊สธรรมชาติในแหล่งที่อยู่ลึกลงไปใต้ดินภายใต้สภาพอุณหภูมิและความดันที่สูง เมื่อแก๊สนี้ถูกนำขึ้นมาถึงระดับผิวดินซึ่งมีอุณหภูมิและความดันลดลงแก๊สนี้จะกลายสภาพไปเป็นของเหลวจึงเรียกว่า แก๊สธรรมชาติเหลว [3]

2.1.1 น้ำมันดิบ (Crude oil)

น้ำมันดิบเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยกระจายอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของโลกทั้งใต้ทะเล ใต้ดิน และในทะเลทราย องค์ประกอบของน้ำมันดิบจากแหล่งต่าง ๆ มีความซับซ้อนและแตกต่างกัน แม้แต่น้ำมันดิบที่มาจากแหล่งที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันก็ตาม โดยทั่วไปน้ำมันดิบเป็นสารผสมของสารชนิดต่าง ๆ หลายชนิด โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันดิบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีตั้งแต่โมเลกุลขนาดเล็กมีโครงสร้างง่ายๆ จนกระทั่งถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อน นอกจากนี้ในน้ำมันดิบยังมีสารประกอบชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอีกด้วย โดยสารประกอบเหล่านี้ได้แก่ สารประกอบของไนโตรเจน สารประกอบของกำมะถัน สารประกอบของออกซิเจน สารประกอบอินทรีย์ที่มีโลหะและสารประกอบอนินทรีย์ ดังนั้นทำให้น้ำมันดิบในแต่แหล่งมีลักษณะและกลิ่นที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันดิบจากบางแหล่งมีลักษณะใสคล้ายน้ำและมีสีน้ำตาลอ่อน แต่ส่วนใหญ่น้ำมันดิบมีลักษณะที่หนืดและมีสีค่อนข้างดำ โดยน้ำมันดิบอาจมีกลิ่นเหม็นฉุน เนื่องจากมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) หรือแก๊สไข่เน่ารวมทั้งสารประกอบของกำมะถันชนิดอื่น ๆ ปะปนอยู่ [4]

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ (Natural gas)

ในปัจจุบันแก๊สธรรมชาติเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญมากอีกแหล่งหนึ่งของโลก ซึ่งนอกประโยชน์ทางด้านพลังงานแล้ว แก๊สธรรมชาติยังสามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบต่าง ๆ เพื่อเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีอีกด้วย โดยองค์ประกอบหลักของแก๊สธรรมชาติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งโดยทั่วไปในแก๊สธรรมชาติมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ร้อยละ 70 ขึ้นไป สำหรับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในแก๊สธรรมชาติ อาทิ อีเทน โพรเพน (Propane) บิวเทน (Butane) นอกจากนี้แก๊สธรรมชาติยังประกอบด้วยสารชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำ ไฮโดรเจน ซัลไฟด์ ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) เป็นต้น ด้วยเหตุที่แก๊สธรรมชาติประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ดังนั้นการนำแก๊สธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ จึงต้องมีการแยกองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนออกจากกัน เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบเหล่านั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ามากที่สุด [4]

2.2 พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทนหมายถึง พลังงานจากแหล่งอื่น ๆ ที่ไม่ใช่เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้แก่ ถ่านหิน น้ำมันเบนซิน แก๊สธรรมชาติ เพื่อต้นลดปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของเชื้อเพลิงฟอสซิลและต้องการให้มีการใช้พลังงานสะอาดที่ยั่งยืนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แหล่งพลังงานทางทดแทนได้แก่ แสงอาทิตย์ (Solar) ลม (Wind) ความร้อนใต้พิภพ (Geothermal) ไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydroelectric) ชีวมวล (Biomass) และไฮโดรเจน (Hydrogen) นอกจากนี้ยังมีแหล่งพลังงานจากมหาสมุทร (Ocean) ซึ่งมี 3 แหล่งพลังงานได้แก่ น้ำขึ้นน้ำลง (Tidal) คลื่น (Wave) และความร้อนจากมหาสมุทร (Ocean thermal) [5]

2.2.1 พลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนประเภทหมุนเวียนที่ใช้แล้วเกิดขึ้นใหม่ได้ตามธรรมชาติเป็นพลังงานที่สะอาด ปราศจากมลพิษ และเป็นพลังงานที่มีศักยภาพสูง ในการใช้พลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และการใช้พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน

1) เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ได้แก่ ระบบผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ระบบคือ

1.1) เซลล์แสงอาทิตย์แบบอิสระ (PV Standalone system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ได้รับการออกแบบสำหรับใช้งานในพื้นที่ชนบทที่ไม่มีระบบสายส่งไฟฟ้า อุปกรณ์ระบบที่สำคัญ

ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์ควบคุมการประจุแบตเตอรี่ แบตเตอรี่และอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับแบบอิสระ

1.2) เซลล์แสงอาทิตย์แบบต่อกับระบบจำหน่าย (PV Grid connected system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับผลิตไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ระบบสายส่งไฟฟ้าโดยตรงใช้ผลิตไฟฟ้าในเขตเมืองหรือพื้นที่ที่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึงอุปกรณ์ระบบที่สำคัญประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์เปลี่ยนระบบไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับชนิดต่อกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า

1.3) เซลล์แสงอาทิตย์แบบผสมผสาน (PV Hybrid system) เป็นระบบผลิตไฟฟ้าที่ถูกออกแบบสำหรับทำงานร่วมกับอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าอื่น ๆ เช่น ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลมและเครื่องยนต์ดีเซล ระบบเซลล์แสงอาทิตย์กับพลังงานลม และไฟฟ้าพลังน้ำ เป็นต้น โดยรูปแบบระบบจะขึ้นอยู่กับการออกแบบตามวัตถุประสงค์โครงการเป็นกรณีเฉพาะ

2) เทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อผลิตความร้อน ได้แก่ การผลิตน้ำร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ [6]

2.2.2 พลังงานลม

มนุษย์เราได้ใช้ประโยชน์จากพลังงานลมตั้งแต่ยุคประวัติศาสตร์ ดังจะเห็นได้จากการบันทึกของชนเผ่าอียิปต์ที่ได้ใช้พลังงานลมในการล่องเรือในแม่น้ำไนล์ ชาวเปอร์เซียได้ใช้กังหันลมในการบดธัญพืช รวมไปถึงการใช้กังหันลมขนาดใหญ่ในประเทศเนเธอร์แลนด์ที่ใช้ในการสูบน้ำออก เนื่องจากแผ่นดินที่มีระดับต่ำกว่าระดับน้ำทะเล ชาวอินเดียแดงในอดีตที่ใช้พลังงานลมในการบดข้าวสาลีรวมไปถึงการสูบน้ำสำหรับใช้ในการเกษตร เป็นต้น สำหรับประเทศไทยการใช้พลังงานลมนั้นมีขนาดเล็กกว่าและไม่แพร่หลาย โดยส่วนใหญ่จะเป็นการประยุกต์ใช้ในภาคเกษตรกรรม เช่น กังหันลมที่ทำจากเสื่อรำแพน หรือผ้าใบที่ใช้ในการสูบน้ำเข้านาเกลือในเขต จ.สมุทรสงคราม จ.สมุทรสาคร รวมไปถึงการใช้กังหันลมที่ทำจากไม้ในการสูบน้ำในนาข้าว เป็นต้น จากตัวอย่างที่กล่าวมาจะพบว่ามนุษย์เราได้มีการใช้ประโยชน์จากพลังงานลมมานานแล้ว จนถึงยุคที่มีการใช้ประโยชน์จากน้ำมัน ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำให้พลังงานลมถูกลดบทบาทและลดความสำคัญลงจนกระทั่งใน พ.ศ. 2513 โลกได้ประสบกับปัญหาราคาน้ำมัน เนื่องจากการผลิตที่ไม่พอเพียงและในปัจจุบันปัญหาเรื่องราคาน้ำมันดิบที่มีแนวโน้มว่าจะสูงขึ้น ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยในโลกปัจจุบันจึงให้ความสำคัญต่อการใช้พลังงานหมุนเวียนที่ได้จากสิ่งอื่นมากขึ้น เพื่อเป็นทางออกสำหรับปัญหาราคาน้ำมันดิบที่มีราคาสูงพลังงานลมจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่หลายประเทศให้ความสนใจ

ประเทศต่าง ๆ มีการใช้กังหันลมในการผลิตไฟฟ้าคิดเป็นกำลังไฟฟ้ารวมถึง 58,982 เมกะวัตต์ ซึ่งประเทศที่ใช้กังหันลมส่วนมากจะอยู่ในทวีปยุโรป โดยคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 69

จากกำลังการผลิตไฟฟ้ารวม (ปี พ.ศ. 2548) จากปี พ.ศ. 2542-2548 การเลือกใช้กังหันลมในการผลิตไฟฟ้าได้มีกำลังเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งมีค่าประมาณ 4 เท่า และมีการคาดหมายกันว่าในปี พ.ศ. 2563 การใช้พลังงานลมในการผลิตไฟฟ้าจะมีค่ามากถึง 160,000 เมกะวัตต์ หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 15% ต่อปี โดยประเทศที่มีการลงทุนในการติดตั้งกังหันลมเพื่อผลิตไฟฟ้า 5 อันดับแรก ได้แก่ เยอรมนี สเปน สหรัฐอเมริกา อินเดีย และเดนมาร์ก

โดยกังหันลมสามารถแบ่งตามลักษณะการจัดวางแกนของใบพัดได้ 2 แบบ คือ กังหันลมแนวตั้ง (Vertical axis turbine) ซึ่งแกนหมุนและใบพัดของกังหัดลมจะตั้งฉากการการเคลื่อนที่ของลมและกังหันแนวนอน (Horizontal axis turbine) โดยกังหันลมชนิดนี้ลักษณะของแกนหมุนจะขนานกับการเคลื่อนที่ของลม โดยใบพัดจะวางตั้งฉากกับกระแสลม [5]

2.2.3 พลังงานน้ำ

พลังงานน้ำเป็นรูปแบบหนึ่งการสร้างกำลังโดยการอาศัยพลังงานของน้ำที่เคลื่อนที่ ปัจจุบันนี้พลังงานน้ำส่วนมากจะถูกใช้เพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้พลังงานน้ำยังถูกนำไปใช้ในกรมชลประทาน การสี การทอผ้า และใช้ในโรงเลื่อย พลังงานของมวลน้ำที่เคลื่อนที่ได้ถูกมนุษย์นำมาใช้มานานแล้วนับศตวรรษโดยได้มีการสร้างกังหันน้ำ (Water wheel) เพื่อใช้ในการงานต่าง ๆ ในอินเดียและชาวโรมันก็ได้มีการประยุกต์ใช้เพื่อใช้ในการโม่แป้งจากเมล็ดพืชต่าง ๆ ส่วนผู้คนในจีนและตะวันออกไกลก็ได้มีการใช้พลังงานน้ำเพื่อสร้าง Pot Wheel เพื่อใช้ในวิดน้ำเพื่อการชลประทาน โดยในช่วงทศวรรษ 1830 ซึ่งเป็นยุคที่การสร้างคลองเฟื่องฟูถึงขีดสุดก็ได้มีการประยุกต์เอาพลังงานน้ำมาใช้เพื่อขับเคลื่อนเรือขึ้นและลงจากเขาโดยอาศัยรางรถไฟที่ลาดเอียง (Inclined plane railroad : Funicular) ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้แบบนี้อยู่ที่คลอง Tyrone ในไอร์แลนด์เหนือ อย่างไรก็ตามเนื่องจากการประยุกต์ใช้พลังงานน้ำในยุคแรกนั้นเป็นการส่งต่อพลังงานโดยตรง (Direct mechanical power transmission) ทำให้การใช้พลังงานน้ำในยุคนั้นต้องอยู่ใกล้แหล่งพลังงาน เช่น น้ำตก เป็นต้น ปัจจุบันนี้พลังงานน้ำได้ถูกใช้เพื่อการผลิตไฟฟ้าทำให้สามารถส่งต่อพลังงานไปใช้ในที่ที่ห่างจากแหล่งน้ำได้

พลังงานน้ำเกิดจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ให้ความร้อนแก่น้ำและทำให้น้ำกลายเป็นไอน้ำลอยตัวสูงขึ้น มวลน้ำที่อยู่สูงขึ้นจากจุดเดิม (พลังงานศักย์) เมื่อมวลไอน้ำกระทบความเย็นก็จะเปลี่ยนเป็นของเหลวอีกครั้งและตกลงมาเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (พลังงานจลน์) การนำเอาพลังงานน้ำมาใช้ประโยชน์ทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานจลน์ของน้ำที่ไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำให้เป็นกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนนี้คือกังหันน้ำ (Turbines) น้ำที่มีความเร็วสูงจะผ่านเข้าท่อแล้วถ่ายทอดพลังงานจลน์เข้าสู่กังหันน้ำ ซึ่งจะไปหมุนขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกทอดหนึ่ง ในปัจจุบันพลังงานที่ได้จากแหล่งน้ำที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ พลังงานน้ำตก พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานคลื่น [7]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) หรือมวลชีวภาพหมายถึง อินทรียสารใด ๆ ของสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ซึ่งรวมทั้ง มนุษย์ พืช และสัตว์ ซึ่งสิ่งมีชีวิตเหล่านี้สามารถนำมาเปลี่ยนรูปให้เกิดเป็นพลังงาน ตัวอย่างเช่น สัตว์ เมื่อเสียชีวิตไปแล้วเกิดการเน่าเปื่อยย่อยสลายเป็นปุ๋ยช่วยให้พืชเจริญเติบโต ซึ่งเปลี่ยนจากพลังงานรูปหนึ่งที่สะสมในสิ่งมีชีวิต และเน่าสลายผุพังเปลี่ยนรูปเป็นอินทรียสารที่ให้แต่พืชเติบโต โดยการเติบโตของพืชจัดว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงมาเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่งหรือตัวอย่างของไขมันสัตว์ที่สามารถนำไปสกัดเป็นน้ำมันสำหรับบริโภค รวมถึงแปรรูปเป็นแหล่งพลังงานหรือเชื้อเพลิงได้จะเห็นได้ว่าในกรณีของพืชจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลที่เป็นแหล่งใหญ่ที่สุด เนื่องจากสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ทุกส่วนตั้งแต่ราก ลำต้น กิ่งก้าน จนกระทั่งถึงใบ นอกจากนี้หากเป็นพืชที่มนุษย์ปลูกขึ้นเพื่อการเกษตร เมื่อนำเอาส่วนที่ต้องการไปใช้ประโยชน์ตามวัตถุประสงค์แล้วเศษที่เหลือหรือกากต่าง ๆ ก็สามารถนำไปเป็นแหล่งพลังงานได้เช่นกัน นอกจากนี้อาจพิจารณาได้ว่าการใช้พืชเป็นแหล่งสะสมพลังงานจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนรูปพลังงานจากการสังเคราะห์แสงเติบโต และนำพืชไปใช้ประโยชน์จึงถือได้ว่าเป็นการนำเอาแหล่งพลังงานสำรองจากแสงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างชีวมวลจากไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

นอกจากนี้ชีวมวลยังมีความหมายครอบคลุมไปถึงแก๊สและของเหลวที่เกิดจากการย่อยสลายของอินทรียวัตถุที่เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้อีกด้วย และสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานที่มีความยั่งยืน เนื่องจากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่เกิดขึ้นอย่างไม่มีวันหมด สามารถเกิดขึ้นหมุนเวียนจากปฏิกิริยาสังเคราะห์แสงของคาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ น้ำ ดิน แสงแดด สัตว์ และพืช ได้ในระยะเวลาอันสั้น [8]

2.3.1 แหล่งที่มาของชีวมวล

ชีวมวลได้มาจากสิ่งมีชีวิตทั้งพืช และสัตว์ พืชจัดว่าเป็นสิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารเองได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำมาสร้างเป็นสารประกอบอินทรีย์ แป้ง น้ำตาล และออกซิเจน มีพลังงานจากรังสีอาทิตย์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารประกอบอินทรีย์ที่สร้างขึ้น พืชจะใช้ในการดำรงชีวิตบางส่วนที่เหลือจะเก็บสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ราก ลำต้น ใบ ดอก ผล และเมล็ด เช่น มันสำปะหลังเก็บสะสมแป้งไว้ที่ราก อ้อยสะสมน้ำตาลไว้ที่ลำต้น เป็นต้น [9]
โดยแหล่งที่มาสามารถแบ่งได้ 2 แหล่งคือ [10]

1. แหล่งชีวมวลปฐมภูมิ ซึ่งเป็นแหล่งชีวมวลที่ชัดเจนได้แก่ ไม้ฟืน ซึ่งสะดวกในการหามาใช้และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในชนบทในเขตเมืองก็มีการใช้ไม้พื้นในอุตสาหกรรมและโรงงานขนาดเล็ก แหล่งที่มาของไม้ฟื้นเหล่านี้หาได้ตามป่าไม้ พื้นที่ป่ารกร้าง ป่าปลูก และต้นไม้ตามหัวไร่ปลายนาหรือในสวน ซึ่งจะเป็นส่วนลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ บางทีอาจรวมถึงโคนและรากด้วย ในพื้นที่ที่ค่อนข้างอุดมสมบูรณ์ แหล่งไม้ฟืนหาได้จากการเก็บหรือตัดฟันไม้แห้งที่ตายแล้ว ในบางพื้นที่ที่มีจำกัดหรืออาจจะได้จากการตัดโค่นไม้สด

2. แหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิได้จากชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและเศษกากจากกระบวนการในโรงงานชีวมวล จากสัตว์เลี้ยงหรือจากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแปลงสภาพมาแล้ว เศษกากวัสดุที่ผลิตภายในประเทศ จะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไปบางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้าเช่น กากมันสำปะหลัง และส่าเหล้า เพราะมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 80-90 บางชนิดต้องนำมาย่อยก่อนนำไปเผาไหม้เช่น เศษไม้ยางพารา เป็นต้น

อย่างไรก็ตามประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรอุตสาหกรรม พบว่าในแต่ละปีมีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมากและในกระบวนการเก็บเกี่ยวหรือกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านั้นจะให้เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน โดยแหล่งผลิตชีวมวลที่สำคัญของประเทศไทยมีด้วยกัน 8 แหล่งหลักคือ [10]

1) แกลบจากโรงสีข้าว

2) กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล

3) กากปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ

4) เศษไม้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารา สวนยางพารา เศษไม้ยูคาลิปตัสจากกันตัดไม้เพื่อจำหน่ายและโรงงานผลิตไม้อัด

5) ซังข้าวโพดการแยกเมล็ดข้าวโพดออกซึ่งกระจายอยู่ตามไร่ข้าวโพด

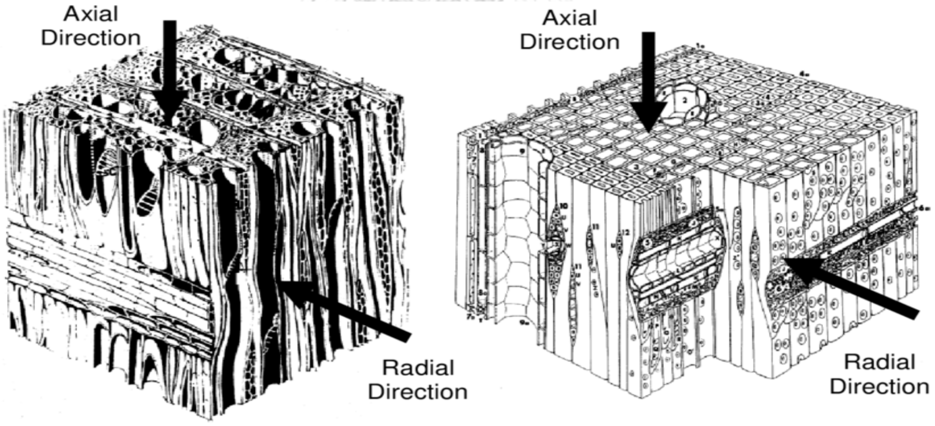
6) กาบมะพร้าวจากสวนมะพร้าว ร้านขายส่งลูกมะพร้าว และโรงงานแปรรูปเนื้อมะพร้าว

7) ส่าเหล้าจากโรงงานผลิตเอทธิลแอลกอฮอล์

8) กากมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลังจากการเกษตร

2.3.2 โครงสร้างและองค์ประกอบของชีวมวล

ในทางชีววิทยาไม้ต้นแบ่งได้เป็นไม้เนื้ออ่อน (Softwood) และไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ซึ่งเป็นแบบอนิโซทรอปิก (Anisotropic) ที่มีคุณสมบัติขึ้นกับทิศทางของเนื้อไม้ และแบบไฮโกรสโกปิก (Hygroscopic) ที่รับและสูญเสียความชื้นได้ เนื้อไม้ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นวง วงใหม่หรือชั้นเนื้อไม้เติบโตจะมีเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งโครงสร้างของไม้จะเป็นแบบมีความพรุน (Porous) เนื้อวัสดุเป็นกลุ่มเส้นใยกลวง มีส่วนประกอบหลัก ๆ คือ เส้นใยทราชีดส์ (Fiber tracheid) ลำไม้ (Wood ray) พาเรนชีมา (Parenchyma) ช่องเรซิน (Resin canal) และส่วนเปลือกด้านนอก (Bark) โดยมวลรวมต้นไม้จะประกอบด้วยระบบโค่นราก (ร้อยละ12-14) เนื้อไม้ (ร้อยละ 62-68) กิ่งก้าน (ร้อยละ7-29) ยอดใบ (ร้อยละ 3-6) และเปลือก (ร้อยละ 8-10) หลังจากการตัดมีเพียงเนื้อไม้และเปลือกที่ติดไปเท่านั้นที่ส่งเข้าโรงเลื่อย โรงทำเยื่อกระดาษ หรือเข้าสู่กระบวนการอื่น ๆ ในทางเคมี ในรูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างโครงสร้างไฟเบอร์ของไม้ [10]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างไฟเบอร์ของไม้เนื้อแข็ง (ซ้าย) และโครงสร้างของไม้เนื้ออ่อน (ขวา) [11]

ชีวมวลจากไม้และพืชอื่น ๆ เป็นวัสดุผสมที่สร้างจากโพลีเมอร์อินทรีย์ที่มีออกซิเจน ซึ่งแตกต่างอย่างมากกับน้ำมัน ถ่านหิน และหินน้ำมัน การมีออกซิเจนจำนวนมากในคาร์โบไฮเดรตของพืชส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีจากการไพโรไลซิสแตกต่างอย่างมากจากวัตถุดิบที่เป็นฟอสซิลอื่น ๆ

โดยองค์ประกอบที่สำคัญในชีวมวล ได้แก่ โฮโลเซลลูโลส (Holocellulose) ซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)และลิกนิน (Lignin) สารแทรก (Extractives) และเถ้า (Ash) เมื่อพิจารณาภายในโครงสร้างของผนังเซลล์พืชจะพบว่าเซลลูโลสยึดตรึงอยู่กับ

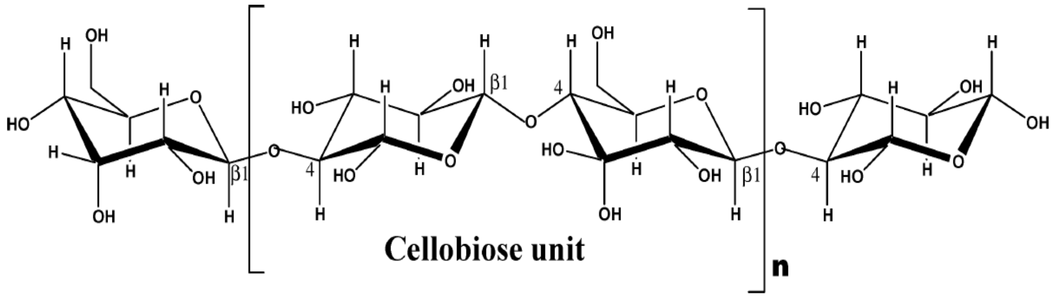
เฮมิเซลลูโลสและลิกนินด้วยพันธะไฮโดรเจน แต่สำหรับเฮมิเซลลูโลสและลิกนินจะยึดกันด้วยพันธะไฮโดรเจนและพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไปแล้วสารทั้งสามตัวนี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วไปในผนังเซลล์ของพืช นอกจากนี้ในพืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินแตกต่างกัน [12,13] โดยปกติไม้เนื้ออ่อนมีเซลลูโลสอยู่ประมาณร้อยละ 45-50 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25-35 และลิกนินร้อยละ 25-35 ขณะที่ไม้เนื้อแข็งมีเซลลูโลสร้อยละ 40-55 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 24-40 และลิกนินร้อยละ 18-25 โดยอาจจะมีสารสกัดอื่น ๆ อยู่อีกประมาณร้อยละ 1-5 ซึ่งเป็นสารประกอบธรรมชาติที่พบในไม้คล้ายกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [10]

2.3.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

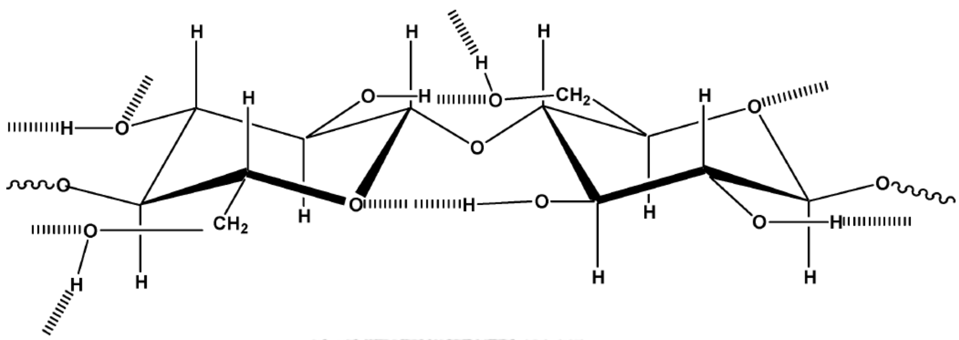
เซลลูโลสเป็นสารที่สามารถพบได้มากในพืช โดยเฉพาะที่บริเวณผนังเซลล์ของพืชและถูกจัดให้เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่รู้จักกันดีโดยทั่วไป ได้แก่ คอตตอนหรือใยฝ้ายประกอบด้วยสายโซ่ของกลูโคสที่เชื่อมกันด้วยพันธะอะซิทัล (-o-, beta-1,4-glycoside) หน่วยของกลูโคสที่เป็นวงแหวนประกอบด้วยคาร์บอนจำนวนหกอะตอมมีชื่อเรียกว่า ไพราโนส (Pyranose) สูตรเคมีทั่วไปของเซลลูโลสสามารถเขียนได้เป็น $(C_4H_{10}O_5)_n$ โดยที่ n คือ ดีกรีของพอลิเมอไรเซชัน (Degree of polymerization; DP) โดยที่เส้นใยไม้จะมีค่า n อยู่ระหว่าง 9,000 ถึง 10,000 และอาจสูงได้ถึง 15,000 ทำให้เซลลูโลสเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลกลูโคส ทำให้เซลลูโลสมีความแข็งแรงและทำให้ย่อยสลายกลูโคสได้ยากกว่ากว่าแป้ง (Starch) ซึ่งเป็นพอลิแซกคาไรด์ของกลูโคสเช่นกัน แต่จะเชื่อมต่อด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่งอัลฟ่า-1,4 (α-1,4) ทำให้เซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีพันธะไฮโดรเจนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากและมีลักษณะที่เป็นมัดเส้นใยอย่างเป็นระเบียบในขณะที่แป้งมีลักษณะเป็นเส้นโซ่เกลียว

นอกจากนี้ดีกรีของพอลิเมอไรเซชันจะส่งผลโดยตรงกับชนิดและปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส โดยถ้ามีค่าดีกรีของพอลิเมอไรเซชันสูง ปริมาณของผลิตภัณฑ์ประเภทเลโวกลูโคซาน (levoglucosan) หรือสารประเภทไพแรน (pyran) ก็จะมีปริมาณสูงขึ้นด้วย โดยการสลายพันธะของกลูโคสภายในโครงสร้างของเซลลูโลส ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นฟูแรน (Furan) ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (hydroxymethylfurfural; HMF) เฟอร์ฟูรัล และกรดอะซิติก เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2.3 โครงสร้างเซลลูโลส (Cellulose) [18]



รูปที่ 2.4 สายโซ่ของเซลลูโลสต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน [18]

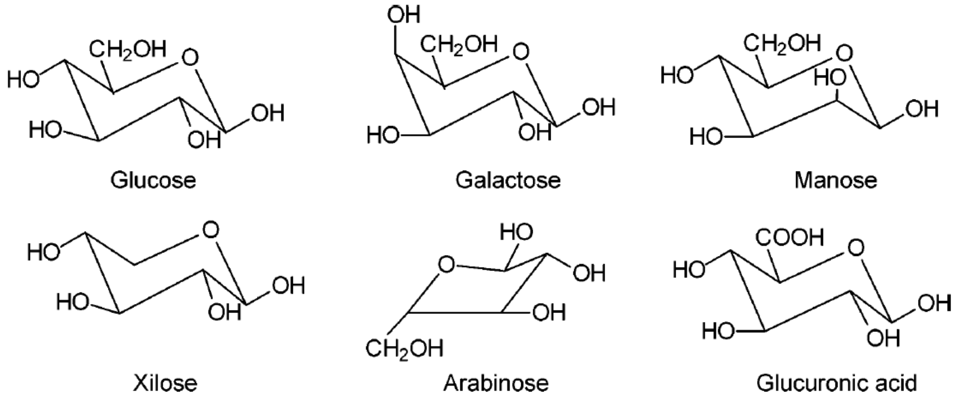
การย่อยสลายเซลลูโลสเกิดขึ้นที่ 240-350 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมิน้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส จะเป็นขั้นตอนเกิดเซลลูโลสกัมมันต์ (Active cellulose หรือ Anhydrocellulose) ก่อนที่เซลลูโลสกัมมันต์เกิดปฏิกิริยาต่อไป เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวของโซ่พอลิเมอร์โดยเฉพาะพันธะไกลโคซิดิกได้ผลิตภัณฑ์เป็นเลโวกลูโคซาน (Levoglucosan) และฟูแรน (Furan) และจากการศึกษาเมื่อเซลลูโลสถูกไพโรไลซ์ที่อัตราความร้อน 12 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศฮีเลียม ในการทดลอง DTA จะสังเกตเห็นปฏิกิริยาดูดความร้อนที่อุณหภูมิ 335 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่น้ำหนักชีวมวลลดลงสูงสุด ปฏิกิริยาจะเสร็จสมบูรณ์ที่ 360 องศาเซลเซียส [8,12,13]

2.3.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสจะถูกพบที่บริเวณโดยรอบเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเซลลูโลสและลิกนิน เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยโซ่กิ่งสายสั้นของเฮเทอร์โรพอลีแซคคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่ประกอบไปด้วยมอนอเมอร์ของโมโนแซ็กคาไรด์โพลิเมอร์หลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลคโตส แมนโนส ไซโลส อาราบิโนส และกรดกลูคูโรนิค เป็นต้น ซึ่งต่อกันโดยมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานแตกต่างจากเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นผลึก เฮมิเซลลูโลสมีดีกรีของ

พอลิเมอไรเซชันระหว่าง 50 ถึง 200 ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับดีกรีของพอลิเมอไรเซชันของเซลลูโลส การที่โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสเป็นอสัณฐานส่งผลให้ถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายโดยกรดหรือด่างรวมถึงเอนไซม์บางประเภท โดยแตกต่างจากเซลลูโลสที่มีโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งทนต่อการไฮโดรไลซิส การไพโรไลซิสของเฮมิเซลลูโลสจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคล้ายคลึงกัน แต่มีปริมาณที่แตกต่างกันโดยมีฟูแรน คีโทน และน้ำตาลแอนไฮดรัสเป็นองค์ประกอบหลัก

เฮมิเซลลูโลสสลายตัวที่อุณหภูมิ 200-260 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดสารระเหยมากขึ้น ทาร์น้อยกว่าและมีถ่านน้อยกว่าเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่ไม่ให้เลโวกลูโคซาน (Levoglucosan) ในปริมาณที่มีนัยสำคัญ กรดอะซิติกส่วนใหญ่ที่ปลดปล่อยจากไม้ในระหว่างการไพโรไลซิสเป็นผลมาจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสของไม้เนื้อแข็งประกอบด้วยไซแลน (Xylan) ปริมาณมากและมีกลูโคแมนแนน (Glucomannan) ในปริมาณเล็กน้อย เฮมิเซลลูโลสไม้เนื้ออ่อนมีไซแลนจำนวนเล็กน้อยและกาแลคโตกลูโคแมนแนนปริมาณมาก การเริ่มต้นของการสลายตัวด้วยความร้อนของเฮมิเซลลูโลสเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าเซลลูโลสซึ่งมีโครงสร้างเป็นผลึก การสูญเสียเฮมิเซลลูโลสเกิดขึ้นในไพโรไลซิสของไม้อย่างช้า ๆ ในช่วงอุณหภูมิ 130-194 องศาเซลเซียส โดยการสูญเสียนี้ส่วนใหญ่เกิดขึ้นสูงกว่า 180 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามไม่มีรายงานความเกี่ยวข้องของการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสกับเซลลูโลสในการไพโรไลซิสแบบเร็ว ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเพียงไม่กี่วินาทีด้วยอัตราการให้ความร้อนที่สูง [8,12,13]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างโมโนเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส [13]

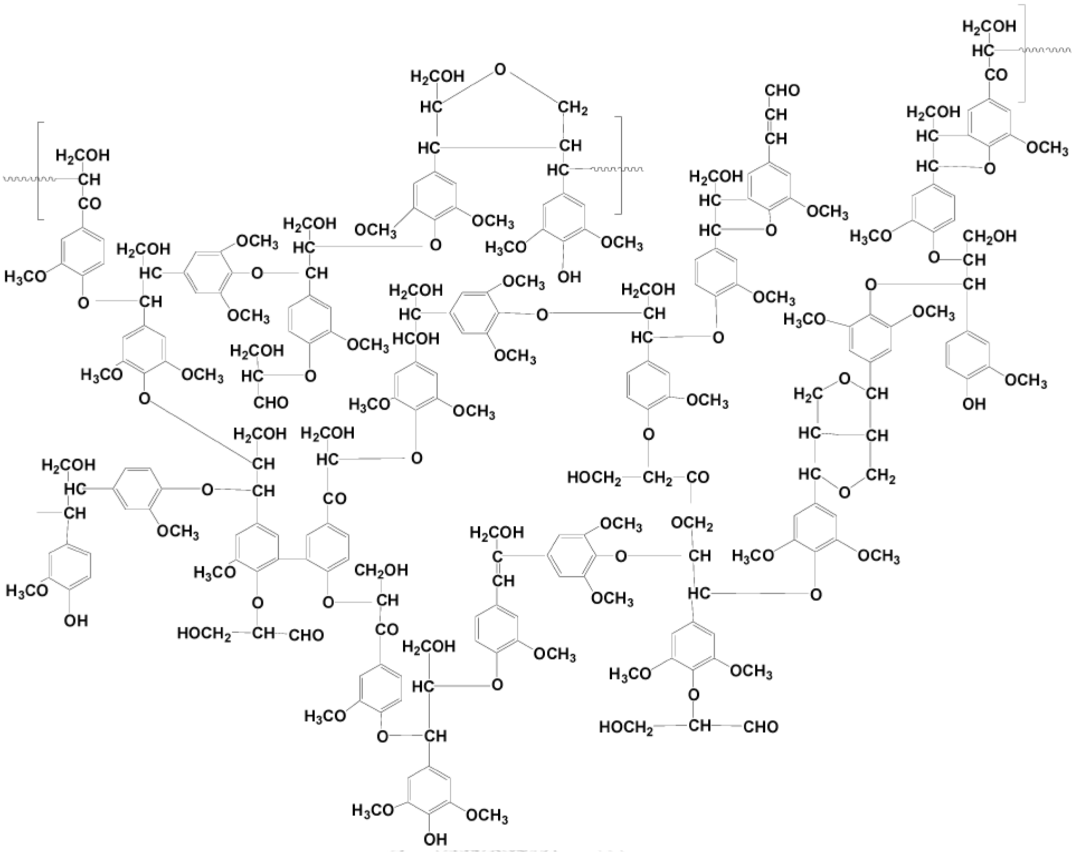
2.3.2.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินจัดเป็นสารอะโรมาติกซึ่งทำหน้าที่ในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์ของพืช โดยที่ปริมาณลิกนินจะแตกต่างกันตามชนิดของพืช เช่น ไม้เนื้ออ่อนจะประกอบไปด้วยลิกนินประมาณร้อยละ 20 ถึง 35 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ปริมาณลิกนินของไม้เนื้อแข็งอยู่ที่ประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยน้ำหนัก ลิกนินมีโครงสร้างเป็นอสัณฐานที่ประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างพื้นฐานหลักสามชนิด

ได้แก่ พาราไฮดรอกซีฟีนิล (p-hydroxyphenyl) กูเอซิล (Guaiacy) และไซรินกิล (Syringy) ซึ่งจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของไม้

ไม้เนื้ออ่อนจะมีกูเอซิลเป็นหน่วยโครงสร้างพื้นฐานเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ไม้เนื้อแข็งจะมีปริมาณไซรินกิลและกูเอซิลในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ไม้เนื้อแข็งมีปริมาณของหมู่เมทอกซิลสูงกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้การที่มีหน่วยโครงสร้างพื้นฐานในปริมาณที่แตกต่างกันจะส่งผลให้ปริมาณหมู่ฟังก์ชันเมทอกซิล ไฮดรอกซิล คาร์บอกซิล และคาร์บอนิลแตกต่างกันด้วย การที่มีหมู่ฟังก์ชันเมทอกซิลในปริมาณที่สูงของไม้เนื้อแข็ง ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของลิกนินที่น้อยกว่าไม้เนื้ออ่อน เนื่องจากการแตกตัวของหมู่เมทอกซิลจะสร้างสารอนุมูลขนาดเล็กซึ่งช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของลิกนินไปเป็นถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของเมทอกซิล เช่น ฟีนอล มีเทน และเมทานอล เป็นต้น

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของลิกนินแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีการสกัดหรือการแยกที่ใช้ เนื่องจากลิกนินอาจมีการเปลี่ยนแปลงและถูกย่อยสลายบางส่วนในระหว่างการแยกสกัด การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของลิกนินที่แยกออกจากกันจึงไม่จำเป็นต้องตรงกับพฤติกรรมการไพโรไลซิสของลิกนินในชีวมวล ลิกนินสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนที่ 280-500 องศาเซลเซียส เมื่อไพโรไลซิสลิกนินจะให้ฟีนอลผ่านการแยกของอีเธอร์และการเชื่อมโยงคาร์บอนต่อคาร์บอน ลิกนินเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ยากกว่าเซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลส ลิกนินไพโรไลซิสสร้างถ่านที่เหลืออยู่มากกว่าการไพโรไลซิสของเซลลูโลส ในการศึกษาการวิเคราะห์เชิงความร้อนที่แตกต่างกัน (DTA) ที่อัตราการให้ความร้อนช้าจะสังเกตเห็นการคายความร้อนซึ่งเกิดพีคสูงและกว้างจาก 290 องศาเซลเซียส ถึง 389 องศาเซลเซียส ตามด้วยการคายความร้อนครั้งที่สองโดยจุดสูงสุดที่ 420 องศาเซลเซียส ต่อเนื่องไปเกินอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส การสลายตัวของลิกนินในไม้จากรายงานพบว่าเริ่มต้นที่ 280 องศาเซลเซียส และต่อไปที่ 450 - 500 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการสลายตัวสูงสุดที่ 350 - 450 องศาเซลเซียส [12,13]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างบางส่วนของโมเลกุลลิกนินของไม้เนื้อแข็งจากบีชยุโรป (Fagus sylvatica) [13]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4 เทคโนโลยีในการแปรรูปชีวมวล

ชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลสประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การนำชีวมวลประเภทนี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถนำมาใช้ได้โดยตรง หากนำมาเผาไหม้ก็จะได้พลังงานความร้อน แต่หากต้องการแปลงสภาพให้เป็นเชื้อเพลิงไม่ว่าจะเป็นเชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊สเชื้อเพลิงชีวมวลต้องถูกนำมาแปรสภาพด้วยกระบวนการต่าง ๆ

โดยกระบวนการแปลงสภาพชีวมวลสามารถแบ่ง ออกเป็นสองประเภทใหญ่ ๆ คือ กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical) และกระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical) ถึงแม้ว่ากระบวนการทั้งสองนี้จะให้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันและสามารถนำไปใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลโดยการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้ สำหรับกระบวนการทางชีวเคมีนอกจากจะสามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพแล้วยังมีผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่มีประโยชน์ในการเกษตรอีกด้วย [12]

2.4.1 กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ

การผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นวิธีหนึ่งในการผลิตพลังโดยผลิตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบอับอากาศไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ของเชื้อแบคทีเรีย โดยสารอินทรีย์ที่ใช้อาจจะมาจากส่วนประกอบของขยะมูลฝอย วัสดุทางการเกษตร และมูลสัตว์ เป็นต้น การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบ่งได้ 2 ประเภทหลักๆ คือแบบแห้ง (Dry digestion) และแบบเปียก (Wet digestion) ซึ่งมีการควบคุมการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบให้ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid content) ร้อยละ 20 - 40 และน้อยกว่าร้อยละ 20 ตามลำดับ

สำหรับแก๊สชีวภาพที่ได้ออกมาที่ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (CH_4) ร้อยละ 65 - 70 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 30-40 และแก๊สอื่น เช่น ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N) และค่าความร้อนประมาณ 4.5 MJ/m^3 และความหนาแน่น 1.15 kg/m^3 [10]

2.5 ไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการแตกตัวของชีวมวลจากอิทธิพลภายใต้บรรยากาศแบบไร้ออกซิเจน เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ ระหว่างกระบวนการไพโรไลซิสเชื้อเพลิงชีวมวลเกิดการสลายตัวและเปลี่ยนสภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นต้น มีทั้งส่วนที่เสถียรและไม่เสถียร ซึ่งสามารถสลายตัวต่อเป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นถัดไปเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาหรือมีการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เป็นส่วนของแก๊ส ของเหลว และของแข็งออกมา [10]

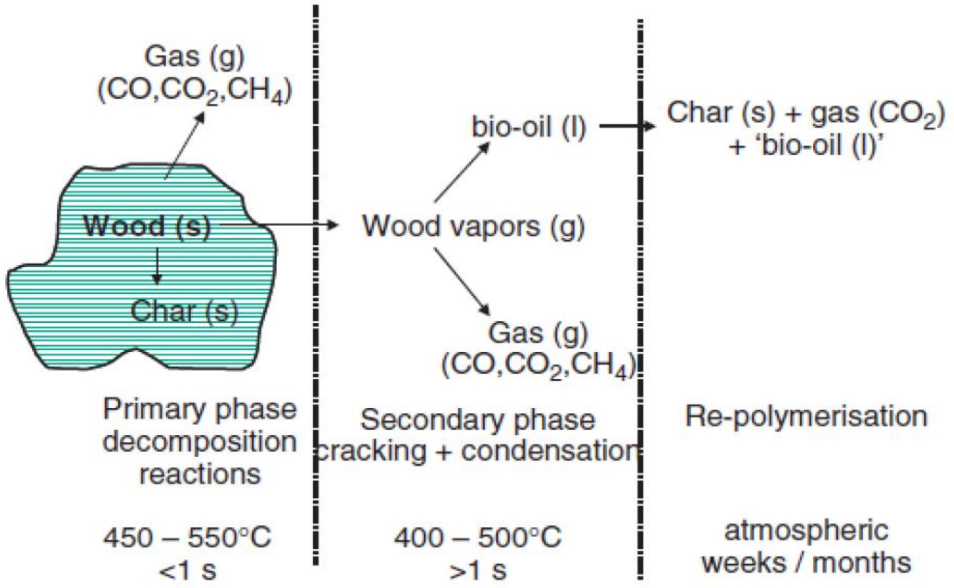
2.5.1 กระบวนการเกิดไพโรไลซิส

กระบวนการทางเคมีกายยังภาพที่เกิดมีดังนี้ [10]

1) การถ่ายเทความร้อนจากแหล่งความร้อนไปยังชีวมวล เพื่อเพิ่มอุณหภูมิข้างในชีวมวลให้สูงขึ้น
2) การเริ่มเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น มีการปล่อยไอสารระเหยและเกิดเป็นถ่าน
3) การไหลของไอสารระเหยร้อนผ่านเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างกัน
4) การควบแน่นของไอสารระเหยโมเลกุลใหญ่บางส่วนในเนื้อชีวมวลที่ยังเย็นอยู่ และตามด้วยการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองที่สามารถเปลี่ยนสารระเหยขั้นต้นเป็นน้ำมันดิน
5) การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นที่สองแบบเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเอง ไปพร้อมกับการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสขั้นต้น มีการแข่งกันแย่งสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6) การแตกตัวทางความร้อนเพิ่มขึ้นมีปฏิกิริยาร่วมเกิดขึ้น เช่น ปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งแก๊ส ปฏิกิริยาเปลี่ยนโมเลกุลของแข็งเป็นแก๊สด้วยน้ำ ปฏิกิริยาการรวมตัวของสารอนุมูล ปฏิกิริยาการไล่น้ำ เป็นต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา อุณหภูมิ และความดัน



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของชีวมวล [14]

2.5.2 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งได้หลักเป็น 2 ประเภท [1] คือ

1) ไพโรไลซิสแบบช้า

กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นกระบวนการที่มีการทำปฏิกิริยาในอุณหภูมิระหว่าง 400 - 600 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ (น้อยกว่า 10 องศาเซลเซียสต่อนาที) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีขนาดใหญ่กว่า 2 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสแบบช้ามีสัดส่วนเป็นของเหลวร้อยละ 30 - 50 และถ่านร้อยละ 25 - 35 ไพโรไลซิสแบบช้ายังสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการย่อย คือ คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิส (Carbonization pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) คาร์บอนไนเซชันไพโรไลซิสเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในระยะเวลานาน โดยใช้เวลาประมาณหนึ่งวัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในการทำอาหาร ส่วนผลิตภัณฑ์ในสถานะก๊าซจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ กระบวนการไพโรไลซิสแบบดั้งเดิมเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาให้ความร้อนน้อยกว่า คือ 15 - 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ครบทั้งสามสถานะ คือ ถ่าน น้ำมัน และก๊าซไม่กลั่นตัว เนื่องจากกระบวนการ

ไพโรไลซิสแบบช้าได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันในปริมาณน้อย ดังนั้นน้ำมันส่วนใหญ่จึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ อย่างไรก็ตามสามารถแยกสารเคมีบางชนิดออกจากส่วนมีขั้วหรือส่วนที่ละลายน้ำของน้ำมันชีวภาพได้ โดยสารเคมีที่สามารถสกัดได้จากน้ำมันในส่วนนี้ เช่น อะซิโตน คีโทน เมทานอล กรดฟอร์มิก และกรดอะซิติก เป็นต้น

2) ไพโรไลซิสแบบเร็ว

กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเป็นกระบวนการที่ได้น้ำมันเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิปานกลาง 400 - 650 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อนสูง (มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียสต่อวินาที) เส้นผ่านศูนย์กลางของวัตถุดิบมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร มีระยะเวลาของไอที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์สั้นมาก (น้อยกว่า 2 วินาที) เมื่อใช้วัตถุดิบประเภทชีวมวลจะได้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ในสถานะของเหลวเรียกว่า น้ำมันชีวภาพ ประมาณร้อยละ 60 - 75 ของแข็งร้อยละ 15 - 25 และก๊าซไม่กลั่นตัวร้อยละ 10 - 15 และมีองค์ประกอบของน้ำในน้ำมันชีวภาพร้อยละ 10 - 30 ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีในชีวมวลเริ่มต้น นอกจากนี้น้ำมันชีวภาพยังประกอบด้วยสารประกอบอื่น ๆ ซึ่งเป็นสารเคมีที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนและการทำปฏิกิริยาของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในชีวมวล ดังนั้นองค์ประกอบส่วนใหญ่ในน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบอินทรีย์ ทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วสามารถปรับปรุงคุณภาพเป็นเชื้อเพลิงและสารเคมีได้หลายประเภท

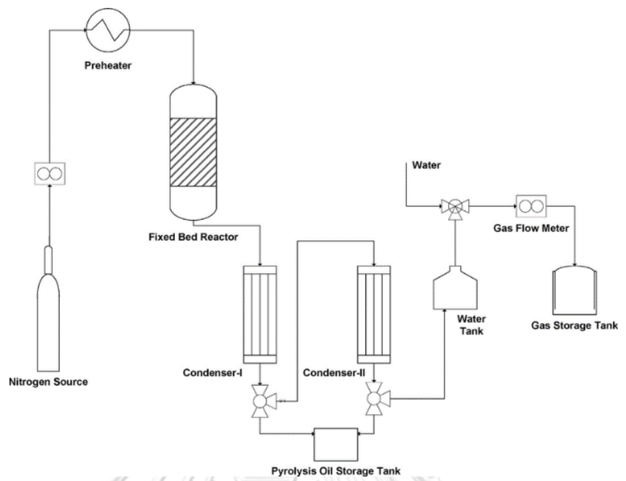
2.5.3 ประเภทเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิสเชื้อเพลิงแข็งที่สามารถแตกสลายเชิงความร้อนและเกิดการแตกตัวของสารระเหยไปเป็นผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊ส ของเหลว และของแข็ง ในอดีตเตาไพโลซิสถูกสร้างเพื่อให้ความร้อนอย่างช้า ๆ แก่ชีวมวลเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นถ่าน ปัจจุบันมีการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสในลักษณะต่าง ๆ ที่มีการให้ความร้อนโดยออกแบบให้มีอัตราการให้ความร้อน มีการควบคุมอุณหภูมิ และเวลาที่ชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะตามความต้องการนำไปใช้งาน เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานพื้นฐานได้เป็น 5 ประเภท ดังนี้ [8]

1) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor)

ปัจจุบันการพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งถูกพัฒนาสำหรับปฏิกิริยาไพโรไลซิส โดยหลักการของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งคือ ให้แก๊สตัวพาเคลื่อนที่ผ่านชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งทำหน้าที่เป็นเบดอยู่กับที่ เมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนที่เป็นเบดชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งจะเกิดการแตกสลายเชิงความร้อนได้เป็นสารระเหยในรูปแก๊สและไอของสารระเหย ซึ่งจะถูกแก๊สตัวพา

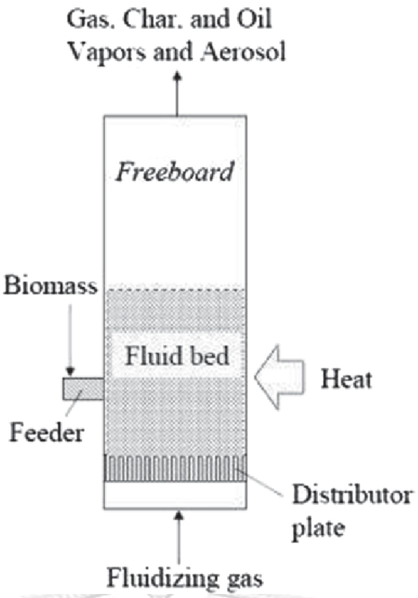
นำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ และผ่านหน่วยทำความเย็นและควบแน่นที่ทำให้แก๊สที่เกิดจากการไพโรไลซิสที่สามารถควบแน่นได้กลั่นเป็นของเหลว ในขณะที่แก๊สที่ควบแน่นไม่ได้จะถูกแยกออกไป และชีวมวลหรือเชื้อเพลิงแข็งที่สลายตัวเชิงความร้อนเป็นสารระเหย หรือสลายตัวไม่หมดก็จะคงอยู่เป็นถ่านในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2.8 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) [15]

2) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor)

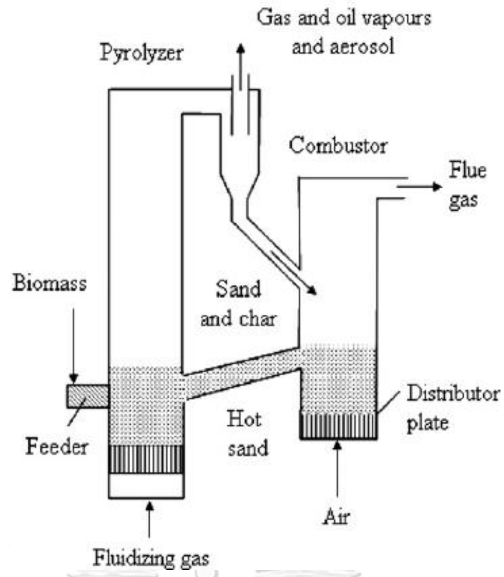
การสร้างและใช้งานฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศทำได้ง่าย โดยต้องควบคุมอุณหภูมิการสัมผัสของแข็งกับก๊าซและการถ่ายเทความร้อนให้ดี เนื่องจากมีความหนาแน่นของของแข็งสูงในเบด ทรายอุ่นถูกใช้เป็นเฟสของแข็งในเบด ซึ่งจะให้ความร้อนแก่ชีวมวลอย่างรวดเร็วในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่ออกซิเจนซึ่งจะถูกย่อยสลายเป็นถ่าน ไอแก๊ส และละอองลอย กระแสแก๊สฟลูอิไดซ์บ่งบอกถึงองค์ประกอบชีวมวลที่ย่อยสลายซึ่งผลิตจากเครื่องปฏิกรณ์ดังแสดงใน 2.9 หลังจากเกิดปฏิกิริยาไพโรไลติกถ่านจะถูกกำจัดโดยเครื่องแยกไซโคลนและเก็บไว้ จากนั้นไอที่เหลือจะถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วด้วยระบบควบแน่นไอระเหยเป็นน้ำมันชีวภาพและกักเก็บไว้ การทำไพโรไลซิสแบบฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศเป็นที่นิยมมาก เนื่องจากผลิตน้ำมันชีวภาพคุณภาพสูงและผลผลิตของเหลวประมาณร้อยละ 70 –75 ของน้ำหนักชีวมวลแบบแห้ง ถ่านไม่สะสมในฟลูอิไดซ์เบดแต่จะถูกแยกออกอย่างรวดเร็ว เวลาที่อยู่อาศัยของของแข็งและไอถูกควบคุมโดยอัตราการไหลของแก๊ส คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศคือ ต้องมีขนาดอนุภาคชีวมวลขนาดเล็ก (น้อยกว่า 2-3 มม.) เพื่อให้ได้อัตราการให้ความร้อนชีวมวลสูง [14]



รูปที่ 2.9 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ
(Bubbling fluidized-bed reactor) [14]

3) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed)

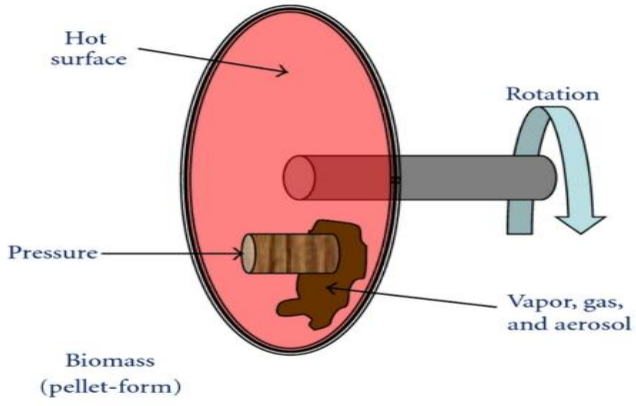
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนมีคุณสมบัติคล้ายกับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิไดซ์เบดแบบมีฟอง ยกเว้นเวลาที่อยู่อาศัยที่สั้นกว่าสำหรับถ่านและไอระเหยส่งผลให้ความเร็วของแก๊สและปริมาณถ่านในน้ำมันชีวภาพสูงกว่าในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดฟองอากาศ ข้อดีอย่างหนึ่งคือเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้เหมาะสำหรับปริมาณงานที่มาก แม้ว่าอุทกพลศาสตร์จะซับซ้อนกว่า โดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดหมุนเวียนมีสองประเภทคือ แบบหมุนเวียนเดี่ยว และแบบหมุนเวียนคู่ [14]



รูปที่ 2.10 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน
(Circulating fluidized beds and transported bed) [14]

4) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor)

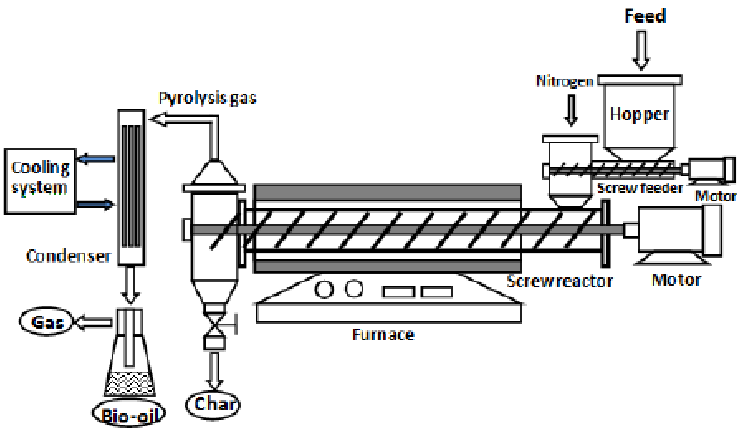
เป็นกระบวนการที่ให้เนื้อชีวมวลถูกกดเข้ากับพื้นผิวร้อน ซึ่งมีความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างกัน มีการนำความร้อนเกิดขึ้นระหว่างผิวเนื้อชีวมวลจะเกิดการหลอมที่ผิวร้อนได้เป็นแผ่นฟิล์มน้ำมันและระเหยออกมาอย่างรวดเร็ว รูปแบบเตาลักษณะนี้สามารถใช้ได้กับชิ้นชีวมวลขนาดใหญ่ โดยขนาดจะเป็นตัวกำหนดอัตราการให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ นอกจากนี้เตาปฏิกรณ์จะมีขนาดค่อนข้างกะทัดรัด แต่มีข้อเสียด้านการควบคุมพื้นผิวให้ร้อนและชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ที่อุณหภูมิสูง [10]



รูปที่ 2.11 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ
(Ablative pyrolysis reactor) [16]

5) เครื่องปฏิกรณ์แบบสกูร (Auger reactor)

ในเครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้ใช้สกูรเพื่อเคลื่อนย้ายวัตถุดิบชีวมวลผ่านท่อความร้อนทรงกระบอกที่ปราศจากออกซิเจน ทางเดินในท่อที่มีอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ต้องการตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดการถ่ายโอนความร้อนไปยังชีวมวลทำให้เกิดการแตกตัวการเป็นไอระเหย และเกิดถ่านขึ้น ส่วนไอระเหยจะควบแน่นเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยมีไอระเหยที่ไม่ควบแน่นรวมตัวเป็นแก๊สชีวภาพ [14]



รูปที่ 2.12 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกูร (Auger reactor) [17]

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา

การเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) เป็นหัวใจสำคัญของการเปลี่ยนแปลงเชิงเคมี การสังเคราะห์สารในภาคอุตสาหกรรมตลอดจนปฏิกิริยาเชิงชีวภาพต่างก็ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เพื่อใช้ในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาการเลือกจำเพาะ (Selectivity) ในการเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการรวมทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม ปฏิกิริยาเชิงเร่ง (Catalytic reaction) รู้จักกันมานานและนำมาใช้ตั้งแต่สมัยโบราณ เช่น การเปลี่ยนน้ำตาลให้กลายเป็นเอทานอล และการเปลี่ยนเอทานอลให้กลายเป็นกรดแอซิติกโดยใช้เอนไซม์ (Enzyme) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งถือได้ว่าเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ (Biocatalyst) อย่างไรก็ตามการพัฒนาทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยาได้เริ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อ 200 ปีที่แล้ว และยังคงมีความสำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมและชีวิตประจำวันจวบจนปัจจุบัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจแบ่งออกได้หลายชนิดตามโครงสร้าง องค์ประกอบ การนำไปใช้งาน หรือสถานะของการรวมกลุ่ม (State of aggregation) โดยสามารถแยกประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาตามสถานะของการรวมกลุ่มคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysts) หมายถึงตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะของแข็ง และตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (Homogeneous catalysts) นอกจากนี้ยังมีตัวเร่งปฏิกิริยาลูกผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองแบบ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ที่มี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวรองรับที่เป็นของแข็งหรือรู้จักกันในนาม “ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกตรึง (Immobilized catalysts)” สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ พบว่าสารกัมมันต์ (Active substance) ที่ทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาจะถูกนำมาวางอยู่บนตัวรองรับซึ่งเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก โดยทั่วไปแล้วมักเป็นวัสดุที่มีความพรุนในการ ผลิตเชิงอุตสาหกรรมนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์

2.6.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

โดโลไมต์เป็นแร่ที่ก่อตัวเป็นหินทั่วไป เป็นแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนตที่มีองค์ประกอบทางเคมีของ $CaMg(CO_3)_2$ เป็นองค์ประกอบหลักของหินตะกอนที่เรียกว่า โดโลสโตน (Dolostone) และหินแปรที่เรียกว่า หินอ่อนโดโลมิติก (Dolomitic marble) หินปูนที่มีโดโลไมต์บางส่วนเรียกว่า หินปูนโดโลไมต์ (Dolomitic limestone) โดยเมื่อนำโดโลไมต์มาเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องทำการเผาด้วยความร้อนสูงมากกว่า 700 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวมันเอง โดยจะทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้นส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวมากการเร่งปฏิกิริยาจึงสูงขึ้น นอกจากนี้ยังเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีเป็น MgO, $CaCO_3$ และ CaO [18,19]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโดโลไมต์ [20]

คุณสมบัติทางกายภาพของโดโลไมต์	
การจำแนกประเภททางเคมี	คาร์บอเนต (Carbonate)
สี	ไม่มีสี, ขาว, ชมพู, เขียว, เทา, น้ำตาล,ดำ
ประกาย	คล้ายแก้ว, ไข่มุก
ความโปร่ง	โปร่งใสถึงโปร่งแสง
ความแข็ง	3.5 ถึง 4
ความถ่วงจำเพาะ	2.8 ถึง 2.9
ประโยชน์	เผาเพื่อผลิตปูน แหล่งแมกนีเซียมสำหรับอุตสาหกรรมเคมี การบำบัดดินทางการเกษตร

2.6.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด อนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 60-100 ไมโครเมตร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ใน Fluid Catalytic Cracking Unit ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม มีสมบัติที่ดีต่อการทนความร้อน มีรูพรุนขนาดใหญ่ เกิดโค้กต่ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก FCC Unit ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ซึ่งเหลือใช้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียมมีลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดสีดำ [18] โดยสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 700 องศาเซลเซียส ขึ้นไป ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจน

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กันต์ธีรา คำภีระ [18] ศึกษาผลของขนาดอนุภาคในช่วง 0.3-3 มิลลิเมตร อัตราการป้อนสาร 3.2-32.8 กรัมต่อนาที อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50 - 250 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ในกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ให้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 43.04 โดยน้ำหนัก และจากผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพพบว่าทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว โดโลไมต์ และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม (แคลไซน์โดโลไมต์ : เอฟซีซีใช้แล้ว=1:1) ส่งผลให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลง ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณองค์ประกอบ Long residue hydrocarbon ลดลงแต่เพิ่มปริมาณองค์ประกอบ Kerosine เมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

ศิวัช ภู่ระหงษ์ [21] ศึกษาปัจจัยของการบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัส พบว่าขนาดที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสคือ 500 - 850 ไมโครเมตร ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงสุด การออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับสำหรับทดสอบตัวแปรอุณหภูมิที่ 450 และ 650 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 200 และ 600 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 0 และ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่า อุณหภูมิในการไพโรไลซิส อัตราการป้อนสาร และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนมีผลต่อการไพโรไลซิส การนำผลการทดลองที่ได้วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert (เวอร์ชัน 7.0.0) พบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และอัตราการป้อนสาร 200 รอบต่อนาที ได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 52.67 โดยน้ำหนัก

Demiral และคณะ [22] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดเพื่อหาผลของอุณหภูมิ อัตราความร้อนและอัตราการไหลของแก๊สต่อผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสที่ได้และองค์ประกอบทางเคมี โดยศึกษาที่อุณหภูมิในช่วง 400 - 550 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 7 - 40 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สอยู่ในช่วง 50 - 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้รับผลผลิตน้ำมันสูงสุดร้อยละ 26.44 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราความร้อน

40 องศาเซลเซียสต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊ส 100 ลูกบาศก์เซนตเมตรต่อนาที การศึกษาทางโครมาโตกราฟีและสเปกโทรสโกปีในน้ำมันชีวภาพพบว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากซังข้าวโพดสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนและวัตถุดิบทางเคมีที่มีค่าความร้อน 26.22 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

Ateş และคณะ [23] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของ *Euphorbia rigida* และก้านไม้งาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดคือ DHC-32 และ HC-1.3Q ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และศึกษาผลของอัตราส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 500 และ 750 องศาเซลเซียส โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับการทดลองที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ในชีวมวลและตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดและจากการทดลองพบว่าภาวะเหมาะสมที่สุดคือที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา DHC-32 ได้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุดคือ ร้อยละ 26.1 โดยน้ำหนัก และก้านไม้งาร้อยละ 27.5 โดยน้ำหนัก และผลของตัวเร่งปฏิกิริยา HCK 1.3Q ได้ผลผลิตน้ำมันชีวภาพสูงสุดจาก *Euphorbia rigida* คือร้อยละ 26.5 โดยน้ำหนัก และจากก้านไม้งาคือร้อยละ 28.2 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เมื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารที่มีองค์ประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพพบว่าน้ำมันชีวภาพจาก *Euphorbia rigida* มีสารที่มีองค์ประกอบออกซิเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้าง terpenoid ของ *Euphorbia rigida* แต่ในทางกลับกันการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สารที่มีองค์ประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพจากก้านไม้งาลดลง

Fermoso และคณะ [24] ได้ทำการดัดแปลง ZSM-5 ด้วย MgO และ ZnO เพื่อใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของไม้ยูคาลิปตัส โดยเมื่อศึกษาตัวเร่งที่สังเคราะห์ได้พบว่า MgO และ ZnO มีการกระจายตัวที่ดีบนตัวรองรับซีโอไลต์ ซึ่งส่งผลให้ลดคุณสมบัติของพื้นผิวลงอย่างมากเนื่องจากอนุภาคเข้าไปอุดรูพรุนของซีโอไลต์บางส่วน และเมื่อทดสอบในกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่ความดันบรรยากาศและอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เพิ่มผลผลิตแก๊ส ซึ่งเกิดจากการก่อตัวของ CO และ CO_2 ส่งผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ แต่อย่างไรก็ตามน้ำมันชีวภาพที่ได้ก็มีคุณภาพสูงเมื่อพิจารณาจากค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นและอัตราส่วน H/C และ O/C

Zhou และคณะ [25] ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสยูคาลิปตัสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากชาร์จากยางรถยนต์ ซึ่งมีองค์ประกอบของ Zn อยู่ด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพในการศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้น้ำหนักอยู่ที่ร้อยละ 0 - 80 โดยน้ำหนัก ผลการทดลองพบว่าที่ชาร์จากยางรถยนต์

ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก สามารถกำจัดออกซิเจนได้ร้อยละ 40.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในรูปของ H_2O CO_2 และ CO ในขณะเดียวกันผลผลิตน้ำมันชีวภาพดลงจากร้อยละ 33.4 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 21.1 โดยน้ำหนัก อนินทรีย์ชนิดละลายในกรดในชาร์จากยางรถยนต์จะช่วยทำให้ไฮโดรคาร์บอนหนักแตกตัว ซึ่งทำให้ผลผลิตน้ำมันดินและโค้กลดลง การเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญเนื่องจากทำให้เกิดการแตกตัวและดีออกซิจิเนชันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงของดีออกซิจิเนชันจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สปริมาณของ CO_2 มีปริมาณสูงสุดเป็นการยืนยันว่าดีคาร์บอกซิเลชันเกิดขึ้นโดยตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากยางรถยนต์ ในทางตรงกันข้ามปริมาณ CO ที่ได้จากดีคาร์บอกซิเลชันเกือบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งบ่งบอกถึงผลกระทบที่ไม่สำคัญของชาร์จากยางรถยนต์ต่อปฏิกิริยาดีออกซิเนชัน และเมื่อเทียบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาชาร์จากยางรถยนต์พบว่าให้ผลที่เทียบเท่าและดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เล็กน้อย เมื่อทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่คล้ายกัน

Xu และคณะ [26] ศึกษาการไพโรไลซิสยูคาลิปตัสโดยดัดแปลงตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ด้วยการโหลดโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับผลิตอะโรเมติกส์ ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และการตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่โหลด Zn-Fe ลงไป จะถูกวิเคราะห์ด้วย XRD, SEM, NH_3-TPD และดูดซับทางกายภาพด้วยไนโตรเจนวิธีการ PY-GC/MS และ TGA ถูกนำมาใช้ในการทำไพโรไลซิสของยูคาลิปตัส วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของยูคาลิปตัสไพโรไลซิสที่ใช้เร่งปฏิกิริยาและลักษณะการเกิดโค้กของตัวเร่งปฏิกิริยา การทดลองพบว่าผลผลิตและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัว ภายใต้การตัวเร่งปฏิกิริยา 1wt.%Zn-4wt.%Fe/HZSM-5 อัตราผลตอบแทนของเบนซีน โทลูอีน ไซลีน และแนฟทาลีนสูงกว่าร้อยละ 98.3, 80.9, 26.4 และ 49.0 สูงกว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เพียงอย่างเดียว ความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟ TG ของตัวเร่งปฏิกิริยาหลังจากไพโรไลซิสและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ใช้งานแสดงให้เห็นว่า 1wt.%Zn-4 wt.%Fe/HZSM-5 มีแนวโน้มที่จะโค้กน้อยกว่า 5 wt%Fe/HZSM-5และ 5wt.%Zn-5wt.%Fe/HZSM-5 จากการวิเคราะห์ลักษณะไพโรไลซิสทั้งหมดพบว่าการไพโรไลซิสยูคาลิปตัสโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อผลิตอะโรเมติกส์มีความเป็นไปได้และ 1wt.%Zn-4 wt. Fe/HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุดในกลุ่ม HZSM-5 ในงานวิจัยนี้

Arkom และคณะ [27] ศึกษาชีวมวลปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่ไม่มีเนื้อไม้ การไพโรไลซิสของชีวมวลปาล์มน้ำมันเพื่อผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น น้ำมันชีวภาพไบโอชาร์และแก๊สไพโรไลซิส การศึกษานี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาผลผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไพโรไลซิสที่ได้จากลำต้นปาล์มน้ำมัน (OPT), ใบปาล์มน้ำมัน (OPF) และกะลาปาล์มน้ำมัน (OPS) โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบด ชีวมวลเหล่านี้ถูกไพโรไลซิสที่อุณหภูมิไพโรไลซิส 400, 450 และ 500

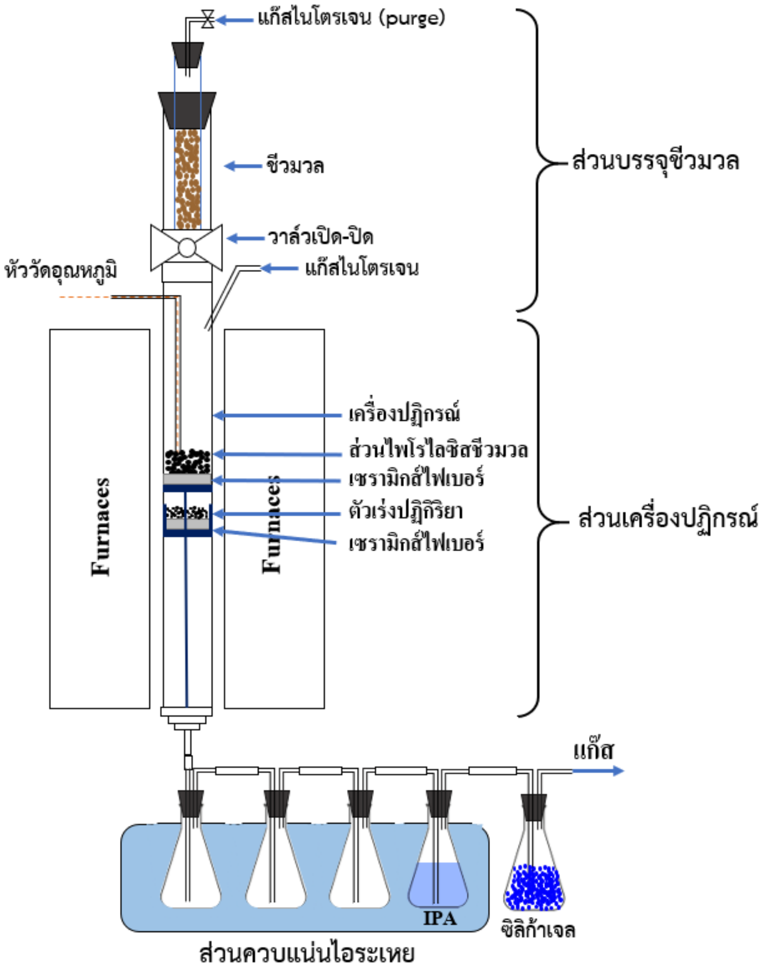
องศาเซลเซียส ในขณะที่พารามิเตอร์การทำงานอื่น ๆ คงที่ ผลการศึกษาพบว่าชีวมวลในปาล์มน้ำมันและอุณหภูมิไพโรไลซิสชนิดต่าง ๆ มีผลต่อผลผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ OPF ไพโรไลซ์ที่ 500 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิตของเหลวสูงสุด ผลิตภัณฑ์ของเหลวมีปริมาณน้ำค่อนข้างสูงโดยมีค่า pH ต่ำ ซึ่งนำไปสู่สารประกอบที่มีออกซิเจนสูงตามที่ระบุโดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี - อิเล็กตรอนไอออไนเซชัน/สเปกโทรสโกปีมวล (GC-EI/MS) ค่าความร้อนสูง(HHV) สูงขึ้นของผลิตภัณฑ์เหลวคือจาก 18.95 เป็น 22.52 MJ/kg ถ่านมี HHV ค่อนข้างสูงตั้งแต่ 25.14 ถึง 28.45 MJ/kg การสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) แสดงให้เห็นว่าถ่านมีโครงสร้างพื้นผิวที่มีรูพรุน โดยมีพื้นที่ผิว 1.15-4.43 m^2/g นอกจากนี้แก๊สไพโรไลซิสมีองค์ประกอบของแก๊สที่ติดไฟได้ต่ำทำให้ HHV ต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องบดสมุนไพร ยี่ห้อสปริงกรีนอีโวลูชั่น รุ่น PG1500
2) ตู้อบ (Oven)
3) เตาเผาความร้อนสูง (Muffle Furnace)
4) ตะแกรงร่อน (Test Sieve)
5) เครื่องปฏิกรณ์สำหรับไพโรไลซิส



รูปที่ 3.1 แผนภาพองค์ประกอบเครื่องไพโรไลซิส

รูปที่ 3.2 เครื่องไพโรไลซิสสำหรับงานวิจัยนี้

3.2 เครื่องมือวิเคราะห์

1) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7820A ดีเทคเตอร์คือ Thermal Conductivity Detector (TCD)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC-TCD)

2) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7820A ดีเทคเตอร์คือ Flame Ionization Detector (FID)

รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC-FID)

3) เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีแมสสเปคโทรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) ยี่ห้อ Agilent สำหรับเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี รุ่น GC7890 และเครื่องแมสสเปคโทรมิเตอร์ รุ่น 5975C inert XL MSD , คอลัมน์ชนิด Capillary column ยี่ห้อ J&W Scientific รุ่น HP-5MS ขนาด 30 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.250 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีแมสสเปคโทรมิเตอร์

(Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS)

4) เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH (CHN analysis) ยี่ห้อ LECO รุ่น CHN 628

รูปที่ 3.6 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH (CHN analysis)

5) เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500

รูปที่ 3.7 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)

3.3 ชีวมวลและสารเคมี

1) ไม้ยูคาลิปตัสจากร้านค้า จังหวัดสระบุรี

2) ซังข้าวโพดจากไร่ข้าวโพด จังหวัดสระบุรี

3) ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

4) ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

5) แก๊สไนโตรเจนร้อยละ 99.995

6) อะซิโตน (Acetone) เกรดวิเคราะห์ (AR)

7) ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol) เกรดการค้า (CG)

8) เซรามิคไฟเบอร์ (Ceramic Fiber)

9) กระดาษกรอง เบอร์ 40

รูปที่ 3.8 ไม้ยูคาลิปตัส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 3.9 ซังข้าวโพด

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมชีวมวลและการวิเคราะห์สมบัติชีวมวล

1) นำชีวมวลทั้งสองชนิดบดด้วยเครื่องบดสมุนไพรจนมีขนาดเล็ก
2) นำชีวมวลที่บดได้มาร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.25, 0.50, 0.71, 1.00 และ 2.00 มิลลิเมตร
3) เมื่อร่อนผ่านตะแกรงจะแบ่งขนาดอนุภาคของชีวมวลได้เป็น 4 ช่วงคือ 0.25 – 0.50, 0.50-0.71, 0.71-1.00 และ 1.00-2.00 มิลลิเมตร
4) นำชีวมวลที่ได้แต่ละช่วงของขนาดอนุภาคไปอบไล่ความชื้นออกด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5) เมื่อครบ 24 ชั่วโมง นำชีวมวลมาพักไว้ในตู้ดูดความชื้นจนเย็น
6) เก็บรักษาชีวมวลที่ผ่านการบดและแยกขนาดอนุภคแล้วไว้ในตู้ดูดความชื้นตลอดเวลา
7) นำชีวมวลที่มีขนาดต่ำกว่า 0.25 มิลลิเมตร ที่ไม่ผ่านการอบไล่ความชื้นมาวิเคราะห์หาอุณหภูมิการสลายทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/ Differential Thermal Analysis (TGA/DTA) วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (proximate analysis) เพื่อหาสารระเหย เถ้า คาร์บอนคงตัว ความชื้น วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) เพื่อหาปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจนด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH และค่าความร้อนด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์
8) นำตัวอย่างไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดที่ไม่ผ่านการอบไล่ความชื้นส่งวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีที่ภาควิชาวนศาสตร์ผลิตภัณฑ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1) นำตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วใส่ถ้วยกระเบื้องทนความร้อน (Crucible)
2) นำถ้วยที่มีแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดใส่เตาเผาความร้อนสูง (Muffle Furnace) โดยใช้อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง [18]
3) ทิ้งให้เย็นในเตาเผา จากนั้นนำมาเก็บรักษาไว้ในตู้ดูดความชื้น

3.4.3 การออกแบบการทดลอง

1) ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

1.1) ศึกษาเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 15, 30, 45 และ 60 นาที เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมโดยภาวะที่ใช้ศึกษาคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที

1.2) ศึกษาอุณหภูมิที่ 400, 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยภาวะที่ใช้ศึกษาคือ เวลาที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อ 1.1 ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที

1.3) ศึกษาขนาดอนุภาคระหว่าง 0.25 - 0.50, 0.50 - 0.71, 0.71 - 1.00 และ 1.00 - 2.00 มิลลิเมตร โดยภาวะที่ใช้ศึกษาคือ เวลาที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อ 1.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อ 1.2 ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที

1.4) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 40, 80, 120 และ 160 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยภาวะที่ใช้ศึกษาคือ เวลาที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อ 1.1 อุณหภูมิที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อ 1.2 และขนาดอนุภาคที่เหมาะสมจากการศึกษาข้อ 1.3

2) ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว และปริมาณที่เหมาะสมในช่วงร้อยละ 5, 10, 15, 20 โดยน้ำหนัก โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากหัวข้อ 1.4 ในการทดลอง

3) การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

3.1) วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ และถ่านด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์

3.2) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพและถ่านด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH

3.3) วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)

3.4) วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC)

3.4.4 การไพโรไลซิสชีวมวล

1.1) ชั่งน้ำหนักชีวมวล 7 กรัม จากนั้นเทใส่ส่วนบรรจุชีวมวลรูปที่ 3.1 ปิดจุกและไล่อากาศออกด้วยแก๊สไนโตรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2) ใส่เซรามิกส์ไฟเบอร์ลงในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อกันชีวมวลไม่ให้ร่วงไปในส่วนควบแน่นไอระเหย และในกรณีมีตัวเร่งปฏิกิริยาจะใส่ในก้านสแตนเลสสำหรับบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเฉพาะ ซึ่งจะอยู่ด้วยชั้นถัดมาจากชีวมวล ดังรูปที่ 3.1

1.3) ประกอบส่วนบรรจุชีวมวลกับส่วนเครื่องปฏิกรณ์ใส่เข้าไปในเตาเผา (furnace) จากนั้นต่อเข้าส่วนควบแน่นไอระเหย

1.4) เปิดแก๊สไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศออกจากเครื่องปฏิกรณ์และส่วนควบแน่นพร้อมทั้งเปิดเครื่องเตาเผา (furnace) โดยตั้งอุณหภูมิตามที่ต้องการศึกษา

1.5) เมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนด ให้เปิดวาวล์ในส่วนบรรจุชีวมวล เพื่อให้ชีวมวลตกลงมาในเครื่องปฏิกรณ์ และเริ่มจับเวลา

1.6) เริ่มเก็บแก๊สเมื่อเริ่มปฏิกิริยาไพโรไลซิสไปแล้ว 3 นาที

1.7) เพื่อครบเวลาทำปฏิกิริยาทิ้งให้เย็นโดยยังคงเปิดแก๊สไนโตรเจนตลอดเวลา

1.8) เก็บถ่านมาชั่งน้ำหนัก ชั่งน้ำหนักสารที่เก็บได้จากส่วนควบแน่นไอระเหย จากนั้นชะออกด้วยอะซิโตนใส่ขวดที่ชั่งน้ำหนักแล้ว และชะสารที่ติดในเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอะซิโตนใส่ขวดที่ชั่งน้ำหนักแล้ว

1.9) นำสารที่ได้จากส่วนควบแน่นไอระเหยและสารที่จากการชะในเครื่องปฏิกรณ์ไประเหยอะซิโตนออก จากนั้นนำสารทั้งสองขวดไปชั่งน้ำหนัก โดยผลต่างระหว่างน้ำหนักขวดเปล่าและน้ำหนักสารหลังระเหยอะซิโตนออกจะเป็นส่วนของผลิตภัณฑ์น้ำ

1.10) นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งสามสถานะไปวิเคราะห์ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

จากตารางที่ 4.1 เป็นการวิเคราะห์แบบประมาณของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดพบว่า ไม้ยูคาลิปตัสมีสารระเหยอยู่ร้อยละ 72.60 โดยน้ำหนัก เถ้าร้อยละ 0.53 โดยน้ำหนัก และความชื้นร้อยละ 7.52 โดยน้ำหนัก ส่วนซังข้าวโพดพบว่ามีปริมาณสารระเหยร้อยละ 74.26 โดยน้ำหนัก เถ้าร้อยละ 2.30 โดยน้ำหนัก และความชื้นร้อยละ 8.32 โดยน้ำหนัก และเมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าซังข้าวโพดมีสารระเหย เถ้า และความชื้นที่สูงกว่าไม้ยูคาลิปตัส นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณคาร์บอนคงตัวของไม้ยูคาลิปตัสสูงกว่าซังข้าวโพด โดยไม้ยูคาลิปตัสมีคาร์บอนคงตัวมีร้อยละ 19.36 โดยน้ำหนัก ส่วนซังข้าวโพดมีอยู่ร้อยละ 15.13 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์แบบประมาณของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

คุณสมบัติ	ไม้ยูคาลิปตัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ซังข้าวโพด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
สารระเหย	72.60	74.26
คาร์บอนคงตัว*	19.36	15.13
เถ้า	0.53	2.30
ความชื้น	7.52	8.32

*ผลต่างร้อยละของสารระเหย,เถ้าและความชื้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดดังตาราง 4.2 พบว่าไม้ยูคาลิปตัสมีองค์ประกอบของคาร์บอนร้อยละ 46.41 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 6.61 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.14 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 46.85 โดยน้ำหนัก ส่วนซังข้าวโพดมีคาร์บอนร้อยละ 44.79 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 6.48 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.48 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 46.85 โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทั้งสองชนิดโดยพิจารณาจากอัตราส่วนระหว่าง H/C และ O/C พบว่าไม้ยูคาลิปตัสมีอัตราส่วนระหว่าง H/C และ

O/C น้อยกว่าซังข้าวโพด จากข้อมูลนี้แสดงว่าซังข้าวโพดมีปริมาณออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมากกว่าไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งส่งผลต่อการแปลงสภาพชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงหรือน้ำมันชีวภาพที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนและไฮโดรเจนที่สูง เมื่อทำปฏิกิริยาทางความร้อนบางส่วนจะกลายเป็นน้ำส่งผลให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ลดลง และนอกจากนี้อัตราส่วนระหว่าง H/C และ O/C จะเป็นทำนายพฤติกรรมของค่าความร้อนของเชื้อเพลิงได้ โดยหากปริมาณ H/C และ O/C มีค่าน้อยค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะสูง [10] ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสที่มีค่าความร้อนสูงกว่าซังข้าวโพด

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) และค่าความร้อน (Heating value) ของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

คุณสมบัติ	ไม้ยูคาลิปตัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ซังข้าวโพด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ		
คาร์บอน	46.41	44.79
ไฮโดรเจน	6.61	6.48
ไนโตรเจน	0.14	0.48
ออกซิเจน*	46.85	48.21
H/C (โมล/โมล)	1.71	1.74
O/C (โมล/โมล)	0.76	0.81
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	17.61	17.05

*ผลต่างร้อยละของธาตุอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด โดยพบว่าไม้ยูคาลิปตัสมีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 33.25 เซลลูโลสร้อยละ 40.85 และลิกนินร้อยละ 24.47 ส่วนซังข้าวโพดมีเฮมิเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 34.88 เซลลูโลสร้อยละ 40.29 และลิกนินร้อยละ 20.66 โดยพบว่าไม้ยูคาลิปตัสมีองค์ประกอบเซลลูโลสและลิกนินสูงกว่าซังข้าวโพด แต่มีเฮมิเซลลูโลสและสารแทรกน้อยกว่าซังข้าวโพด โดยปริมาณองค์ประกอบหลักทั้งสามได้แก่ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินจะส่งผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์จากไพโรไลซิสชีวมวล เนื่องจากปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในปริมาณสูงจะส่งผลให้ผลผลิตของน้ำมันชีวภาพหรือผลิตภัณฑ์เหลวสูงขึ้น ส่วนการไพโรไลซิสชีวมวลที่มีปริมาณลิกนินสูงมักทำให้ได้ผลผลิตถ่านสูง

เนื่องจากการสลายตัวด้วยความร้อนของลิกนินทำได้ยากกว่าเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส [27] ส่วนสารแทรกของไม้ยูคาลิปตัสมีปริมาณร้อยละ 0.94 น้อยกว่าซังข้าวโพดที่มีอยู่ร้อยละ 1.60 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของสารแทรกพบว่าสารแทรกมีปริมาณน้อยจะไม่มีอิทธิพลต่อปริมาณและผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไพโรไลซิส แต่หากชีวมวลที่มีปริมาณสารแทรกมากดังเช่นซังข้าวโพดจะส่งผลต่อปริมาณน้ำมันและให้แก๊สในปริมาณสูง เนื่องจากการแตกตัวของสารแทรกอาจช่วยเร่งการสลายตัวของพันธะของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไพไรโลซิส [12]

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

องค์ประกอบทางเคมี	**ไม้ยูคาลิปตัส** (ร้อยละ*)	**ซังข้าวโพด** (ร้อยละ*)	**มาตรฐานการทดสอบ**
เฮมิเซลลูโลส**	33.25	34.88	-
เซลลูโลส	40.85	40.29	(Wise *et al.*, 1946)
ลิกนิน	24.47	20.66	(Updegraff, 1969)
สารแทรก***	0.94	1.60	-

*ฐานแห้ง

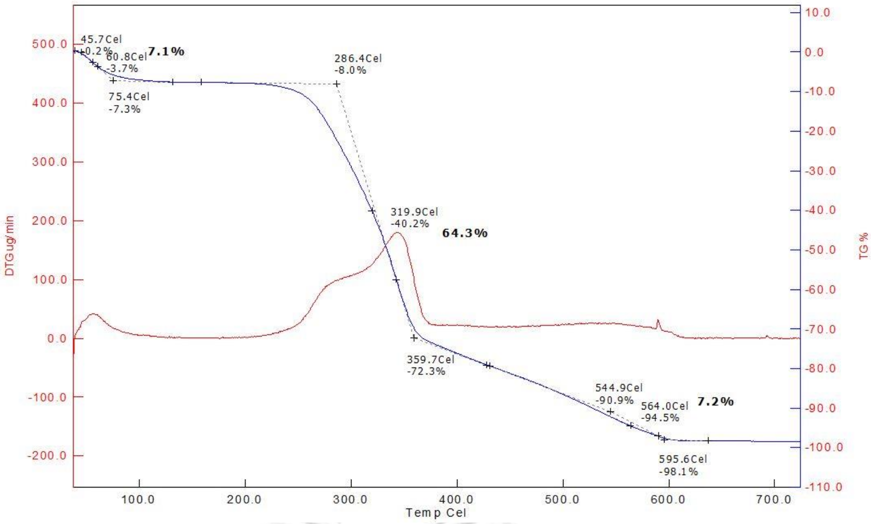
** ร้อยละผลต่างของเซลลูโลสและโฮโลเซลลูโลส (มาตรฐานการทดสอบ TAPPI T 222 om-11)

*** ในตัวทำลาลายอะซิโตน

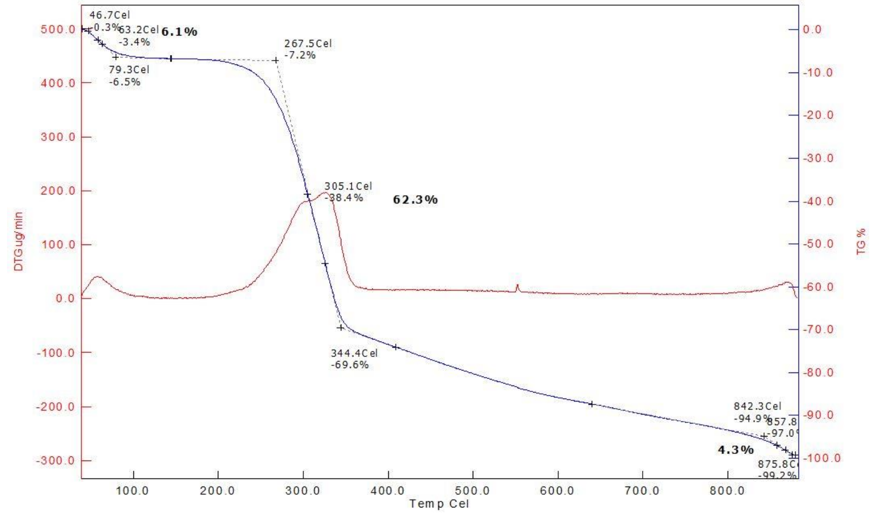
4.1.4 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermo gravimetric analysis, TGA/DTA)

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เป็นการสลายตัวทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก โดยศึกษาที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน ที่อัตราการไหลแก๊ส 50 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าทั้งไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดมีการสลายตัวทางความร้อนแบ่งเป็น 3 ช่วง [28] ช่วงแรกเป็นการระเหยของน้ำที่ผิวและภายในเซลล์ [8] ของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด อุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 - 200 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดร้อยละ 7.9 และ 7.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ การสูญเสียน้ำหนักที่สำคัญที่สุดเกิดขึ้นในช่วงที่สอง ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนินบางส่วนที่เริ่มสลายตัว [28] โดยอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 200 – 380 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักในช่วงอุณหภูมินี้ของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดร้อยละ 66.0 และ 64.7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และช่วงที่สามมีอุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป เป็นการสลายตัวของลิกนิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



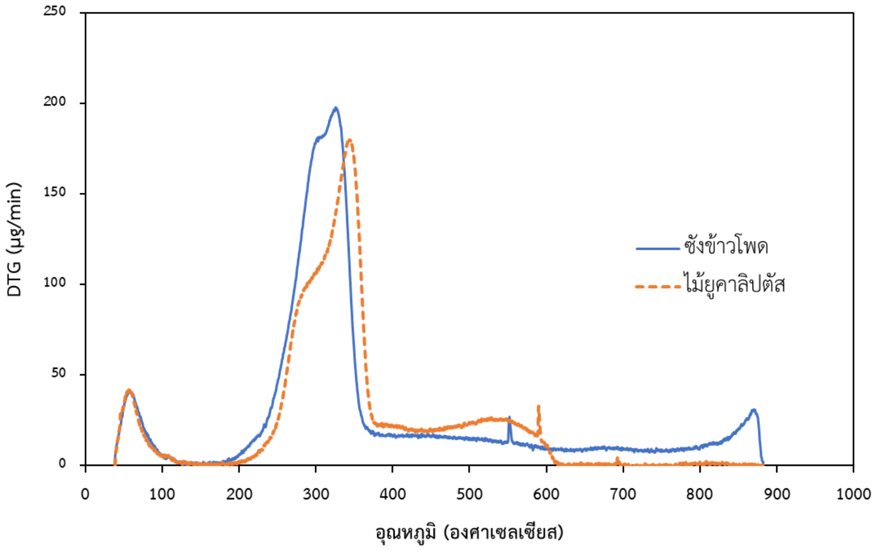
รูปที่ 4.1 การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก



รูปที่ 4.2 การสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพดด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟ DTA รูปที่ 4.3 ของทั้งสองชีวมวลพบว่ามีพีคเกิดขึ้นสองพีค โดยพีคแรกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 200 – 300 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินอย่างช้า ๆ และพีคที่สองเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 300 – 380 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการสลายตัวของเซลลูโลส [29] โดยไม้ยูคาลิปตัสสลายตัวเกือบหมดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ส่วนซังข้าวโพดสลายตัวเกือบหมดที่อุณหภูมิ 900 องศาสเซลเซียส ซึ่งทั้งสองอุณหภูมิเป็นการสลายตัวของลิกนิน

จากข้อมูลที่กล่าวมาอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลทั้งสองชนิดมีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกัน ดังนั้นอุณหภูมิที่เลือกในการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสควรมีอุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป



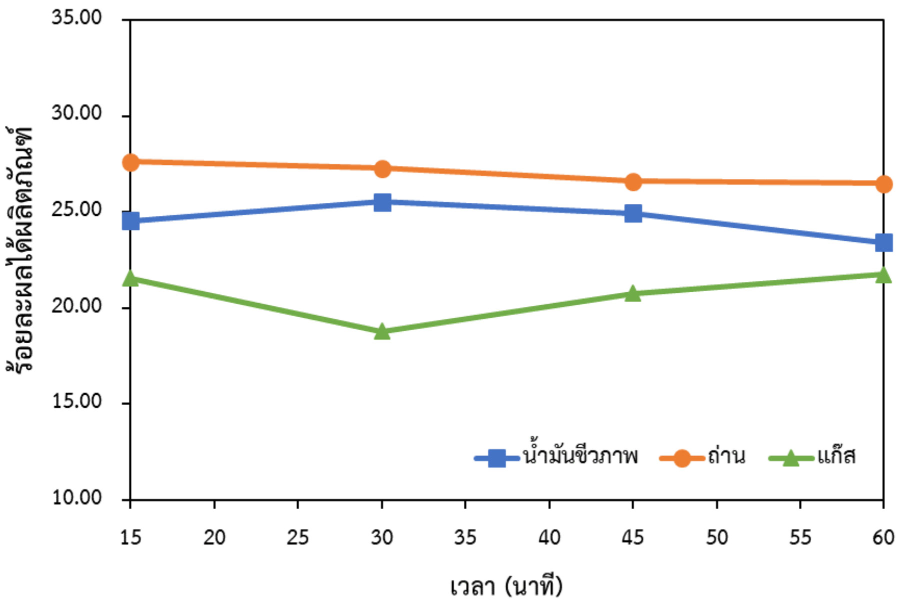
รูปที่ 4.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดที่อุณหภูมิต่าง ๆ (DTA)

4.2 ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

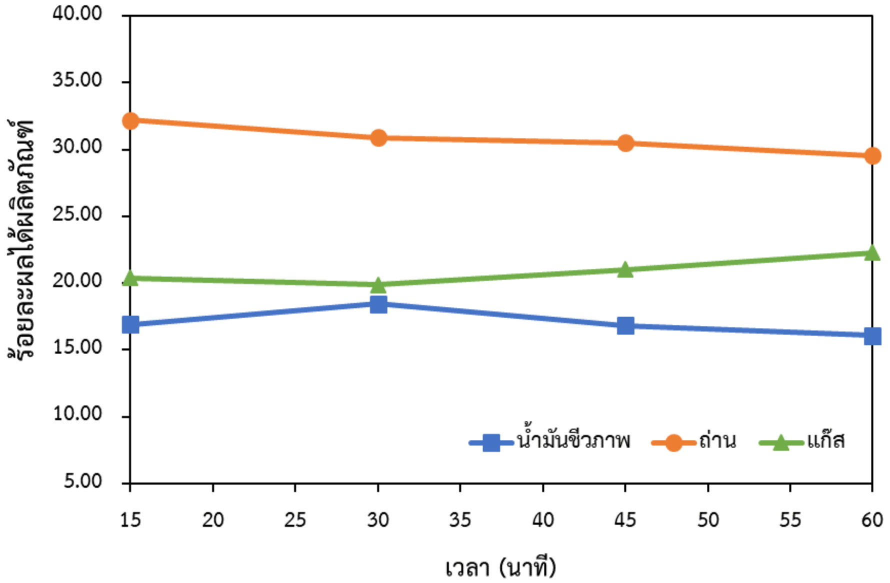
4.2.1 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาเวลาที่เหมาะในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิตัส พบว่าที่เวลา 15 นาทีของการทำปฏิกิริยาผลได้น้ำมันชีวภาพร้อยละ 24.55 โดยน้ำหนัก และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25.53 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 30 นาที ซึ่งเป็นผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุด แต่เมื่อให้เวลาเพิ่มขึ้นจนถึง 60 นาที พบว่า ผลได้น้ำมันชีวภาพลดลงเล็กน้อยและผลได้แก๊สเพิ่มเล็กน้อยดังรูปที่ 4.4 นั่นแสดงว่าที่เวลาเกิน 30 นาที อาจส่งผลให้ไอระเหยและน้ำมันชีวภาพบางส่วนที่ติดในเครื่องปฏิกรณ์เกิดการแตกทุติยภูมิ (Secondary cracking) กลายเป็นแก๊สมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลได้ถ่านพบว่ามีร้อยละผลได้ใกล้เคียงกันในทุกช่วงของเวลาที่ทำการศึกษา สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าเวลาที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการสลายตัวของชีวมวลและยังให้ผลที่คล้ายกันกับกระบวนการไพโรไลซิสของซังข้าวโพดที่ได้ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 18.44 โดยน้ำหนัก ที่เวลา 30 นาที ดังแสดงรูปที่ 4.5

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกระยะเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิตัสและซังข้าวโพดที่เวลา 30 นาที ในทุกการทดลอง



รูปที่ 4.4 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส



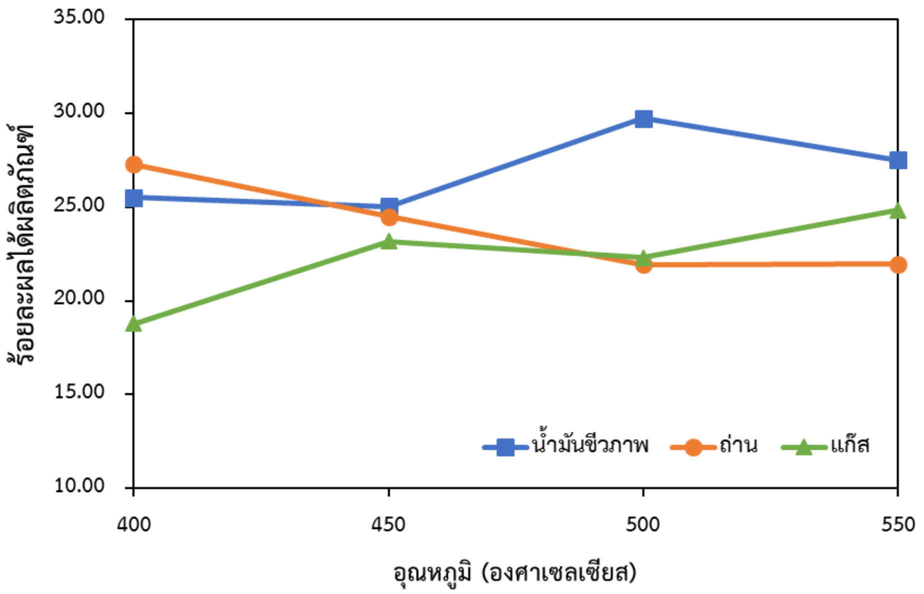
รูปที่ 4.5 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

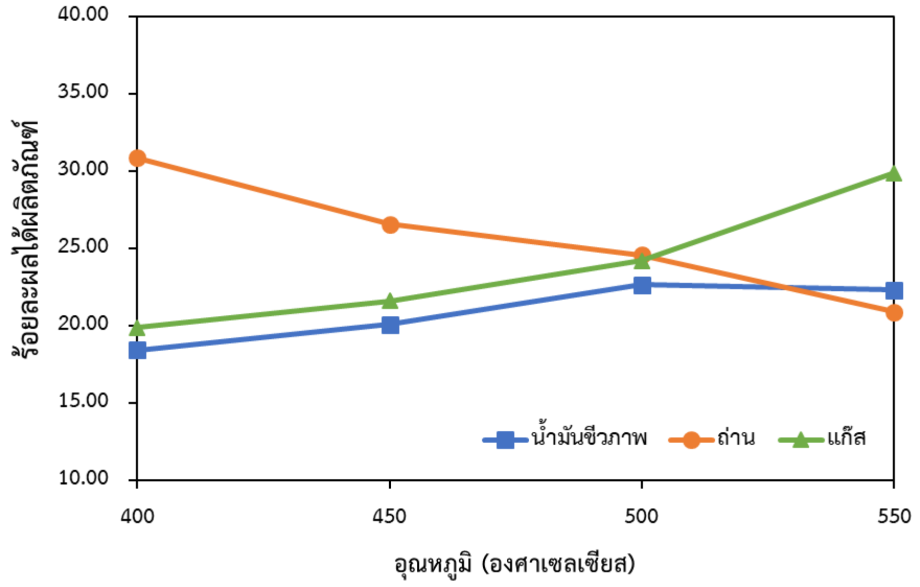
จากการศึกษาผลของอุณหภูมิโดยศึกษาการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดที่เวลา 30 นาที ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสจาก 400 องศาเซลเซียส จนถึง 500 องศาเซลเซียส ได้ ผลได้น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 25.53 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 29.75 โดยน้ำหนัก ผลได้แก๊ส เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.78 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 22.29 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ผลได้ถ่านลดลงจากร้อยละ 27.28 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 21.94 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 550 องศาเซลเซียส พบว่าผลได้น้ำมันชีวภาพมีปริมาณลดลง ผลได้แก๊สเพิ่มขึ้น และผลได้ถ่านคงที่ ดังรูปที่ 4.6 ผลจากการศึกษานี้ยังให้ผลที่ใกล้เคียงกับการไพโรไลซิสซังข้าวโพด ซึ่งพบว่าได้ผลได้น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดคือร้อยละ 22.66 โดยน้ำหนัก ผลได้แก๊สร้อยละ 24.22 โดยน้ำหนัก ผลได้ถ่านร้อยละ 24.58 โดยน้ำหนัก และผลได้น้ำมันชีวภาพลดลงอีกครั้งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 550 องศาเซลเซียส และผลได้แก๊สมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.7

จากผลการทดลองชีวมวลทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลโดยตรงกับปริมาณผลิตภัณฑ์ หากอุณหภูมิต่ำผลิตผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเป็นถ่าน และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสสองขั้นคือปฐมภูมิและทุติยภูมิ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์หลักจะเป็นน้ำมันชีวภาพ แต่ในทางกลับกันหากอุณหภูมิสูงเกินกว่า 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์แก๊สจะเพิ่มสูงขึ้นและน้ำมันชีวภาพลดลด ซึ่งเกิดจากการแตกทุติยภูมิ (Secondary cracking) ของไอระเหยและผลิตภัณฑ์ของเหลวเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส อีกทั้งยังทำให้ปริมาณน้ำในน้ำมันชีวภาพสูงขึ้น [12,29] ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดคือ 500 องศาเซลเซียส และจะใช้ในการศึกษาในตัวแปรอื่นต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส



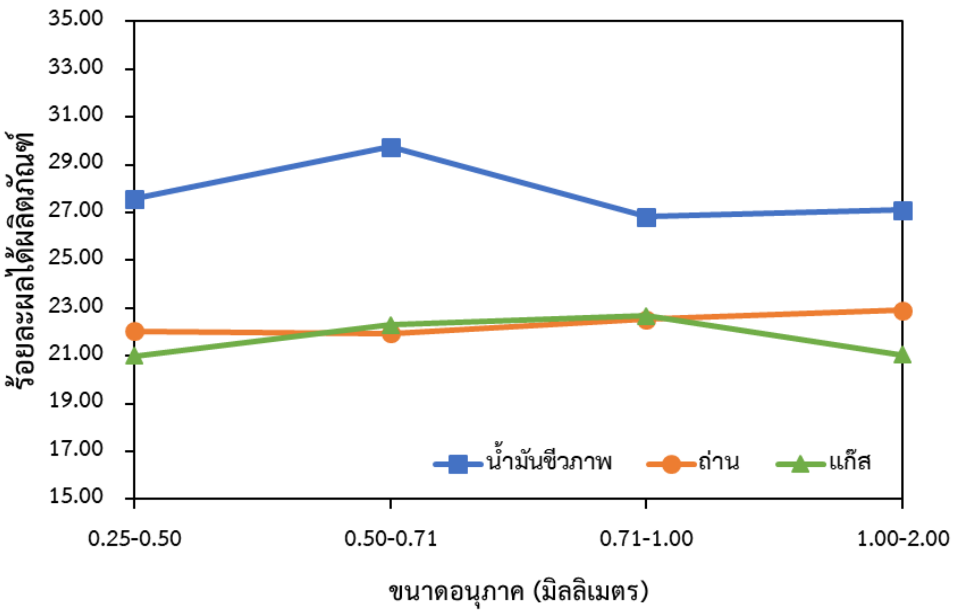
รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

4.2.3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

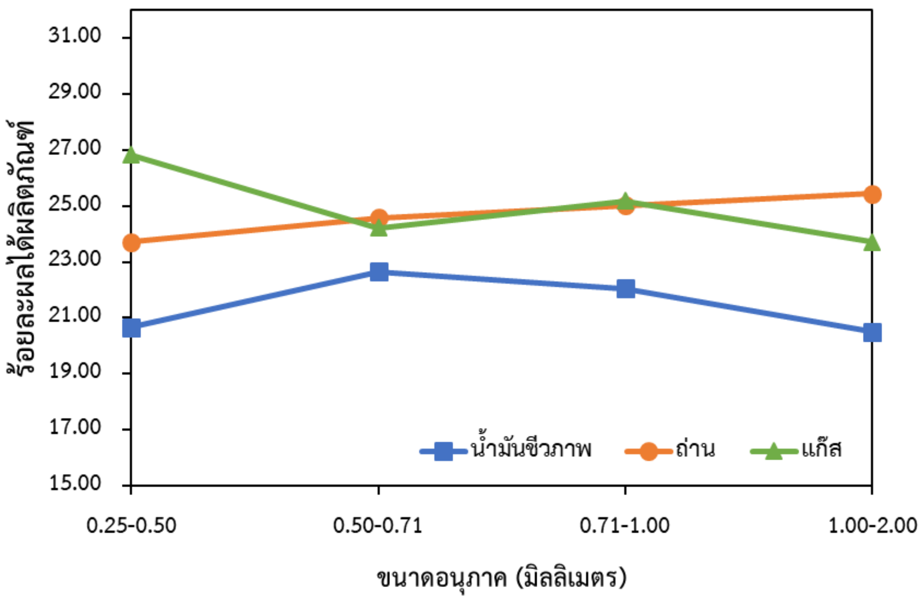
จากการศึกษาผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าผลได้น้ำมันสูงสุดของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดคือร้อยละ 29.75 และร้อยละ 22.66 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร เมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.50 มิลลิเมตร ของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส ดังรูป 4.8 พบว่าน้ำมันชีวภาพลดลง แก๊สและถ่านคงที่ ส่วนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดอนุภาคเล็กกว่า 0.50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.9 พบว่าน้ำมันชีวภาพลดลง ถ่านลดลง และแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าขนาดอนุภาคที่เล็กเกินไปจะเปลี่ยนไอระเหยกลายเป็นแก๊สได้ง่ายขึ้น ส่งผลทำให้ผลได้แก๊สเพิ่มขึ้นและน้ำมันชีวภาพลดลง เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) มากกว่าขนาดอนุภาคที่ใหญ่ [29] และเมื่อพิจารณาที่ขนาดอนุภาคใหญ่กว่า 0.71 มิลลิเมตร พบว่าทั้งการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดให้ผลที่คล้ายกันคือน้ำมันชีวภาพและแก๊สเริ่มลดลง ส่วนถ่านมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นทำให้การถ่ายเทความร้อนไปยังพื้นผิวด้านในของชีวมวลช้าลง [30] ส่งผลให้อัตราการให้ความร้อนต่ำและปฏิกิริยาการแตกตัวและพอลิเมอไรเซชันลดลง [12]

จากข้อมูลดังกล่าวขนาดอนุภาคที่ให้ผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุดของไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดคือ 0.50-0.71 มิลลิเมตร ซึ่งจะใช้ในการศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.8 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส



รูปที่ 4.9 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

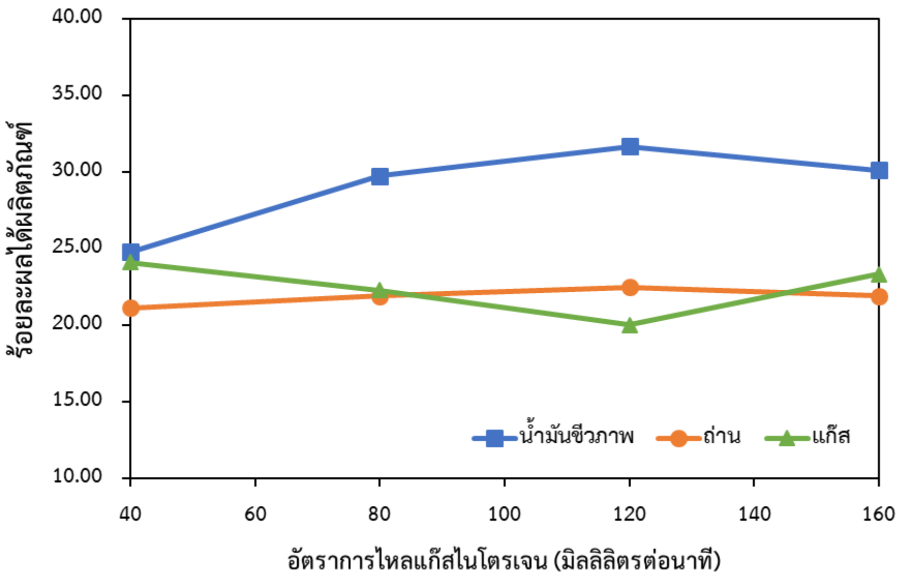
4.2.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที และขนาดอนุภาค 0.50 - 0.71 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสจาก 40 มิลลิลิตรต่อนาที เป็น 120 มิลลิลิตรต่อนาที ผลได้น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก ร้อยละ 24.78 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 31.69 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 160 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าผลได้น้ำมันชีวภาพลดลงเล็กน้อย ผลได้แก๊สเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.10 ส่วนการศึกษาในไพโรไลซิสซังข้าวโพดพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนจาก 40 มิลลิลิตรต่อนาที เป็น 80 มิลลิลิตรต่อนาที ผลได้น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 19.41 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 22.01 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเป็น 120 และ 160 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าผลได้น้ำมันชีวภาพลดลง ผลได้แก๊สเพิ่มขึ้น ดังรูป 4.11

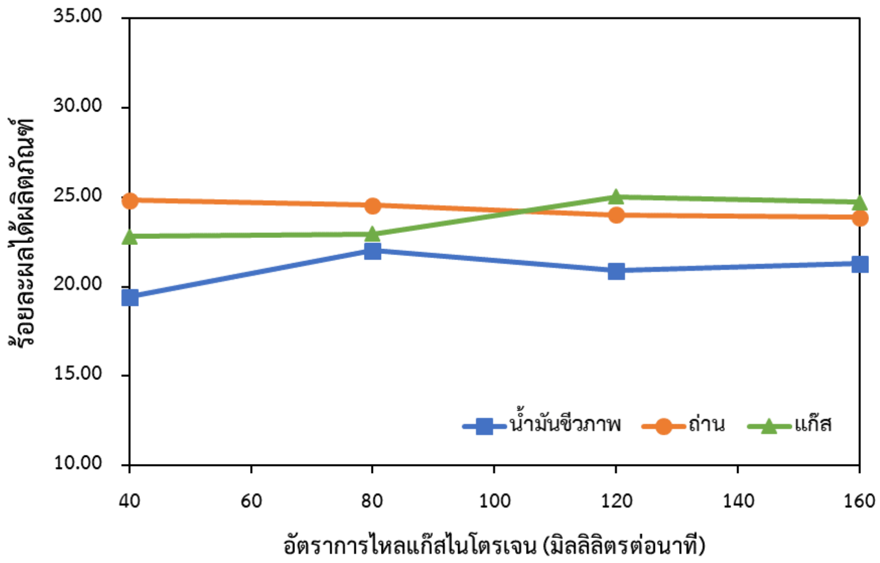
โดยผลจากการศึกษาชีวมวลทั้งสองชนิดให้ผลเช่นนี้ เนื่องจากในภาวะไพโรไลซิสไอระเหยจะไวต่อเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ เพื่อลดการสลายตัวและแตกตัวของน้ำมันดินและไอระเหยควรใช้ระยะเวลาในเครื่องปฏิกรณ์ที่เหมาะสม และจากการศึกษาก่อนหน้านี้พบว่าระยะเวลาของไอระเหยขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแก๊สตัวพาที่จะพาไอระเหยออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังชุดควบแน่น หากอัตราการไหลของไนโตรเจนน้อยเกินไปไอระเหยจะอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้นเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวทุติยภูมิของไอระเหยและน้ำมันดินส่งผลให้น้ำมันชีวภาพลดลง และหากอัตราการไหลของแก๊สที่สูงเกินไป อาจพาละอองไอระเหยออกจากเครื่องปฏิกรณ์เร็วเกินไปจนไม่เกิดปฏิกิริยาระหว่างไอระเหยกับชีวมวล ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการเกิดน้ำมันชีวภาพ [30] ดังนั้นจึงต้องหาอัตราการไหลของแก๊สที่เหมาะสมของชีวมวลแต่ละชนิดเพื่อลดผลกระทบจะปฏิกิริยาเหล่านี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

และจากการศึกษานี้พบว่าอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสคือ 120 มิลลิลิตรต่อนาที ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 31.69 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสซังข้าวโพดคือ 80 มิลลิลิตรต่อนาที ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 22.01 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.10 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส



รูปที่ 4.11 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

จากการศึกษาปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิสซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส คือเวลา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที และภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการไพโรไลซิสซังข้าวโพดคือ เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4.4 ผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจากภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ผลิตภัณฑ์	**ไม้ยูคาลิปตัส*** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	**ซังข้าวโพด**** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
น้ำมันชีวภาพ	31.69	22.01
แก๊ส	20.03	22.95
ถ่าน	22.48	24.54

*30 min, 500 °C, 0.50-0.71 mm, Flow N_2 120 ml/min

**30 min, 500 °C, 0.50-0.71 mm, Flow N_2 80 ml/min

จากตารางที่ 4.4 เป็นการเปรียบเทียบผลได้ของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด พบว่าไม้ยูคาลิปตัสให้น้ำมันชีวภาพสูงกว่าซังข้าวโพด แต่ให้ผลิตภัณฑ์แก๊สและถ่านปริมาณน้อยกว่าซังข้าวโพด โดยเป็นที่น่าสังเกตว่าปริมาณลิกนินในไม้ยูคาลิปตัสมากกว่าซังข้าวโพด แต่พบว่าให้ถ่านในปริมาณน้อยกว่าซังข้าวโพด ซึ่งอาจเกิดจากองค์ประกอบของตัวลิกนินในซังข้าวโพดที่มีความต่างกันกับไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งมีรายงานก่อนนี้ที่พบว่าหากองค์ประกอบของลิกนินมีปริมาณไซรินกิลและกูลเอซิลสูงจะส่งผลให้มีหมู่เมทอกซิลในปริมาณสูง ซึ่งหมู่เมทอกซิลจะช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของลิกนินไปเป็นถ่าน [12] อีกทั้งเมื่อพิจารณาผล TG/DTA จะเห็นว่าการสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพดช้ากว่าไม้ยูคาลิปตัส โดยซังข้าวโพดสลายตัวเกือบหมดที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส แต่ไม้ยูคาลิปตัสสลายตัวเกือบหมดที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งอุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป ส่วนใหญ่จะเป็นการสลายตัวของลิกนิน นอกจากนี้ซังข้าวโพดมียังมีปริมาณเถ้ามากกว่าไม้ยูคาลิปตัสจึงทำให้ปริมาณของถ่านมีสัดส่วนมากขึ้น

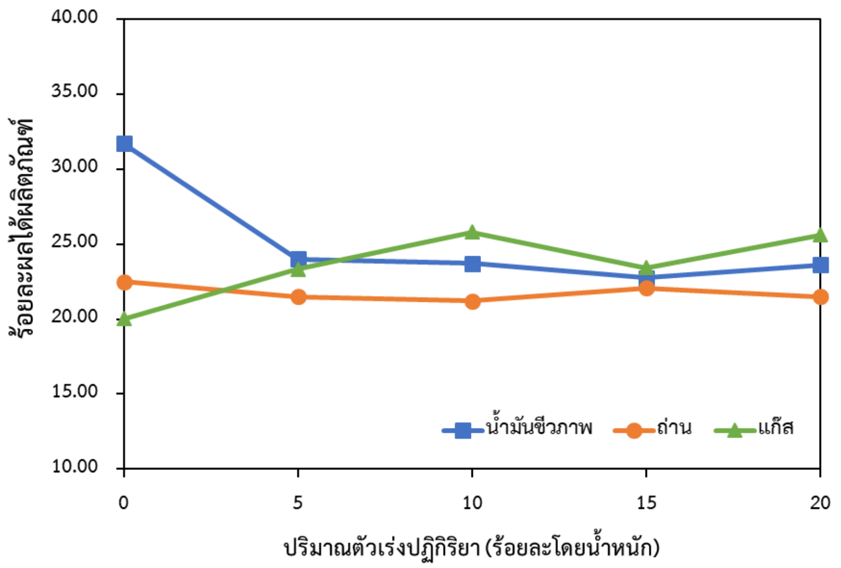
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว และปริมาณที่เหมาะสมในช่วงร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

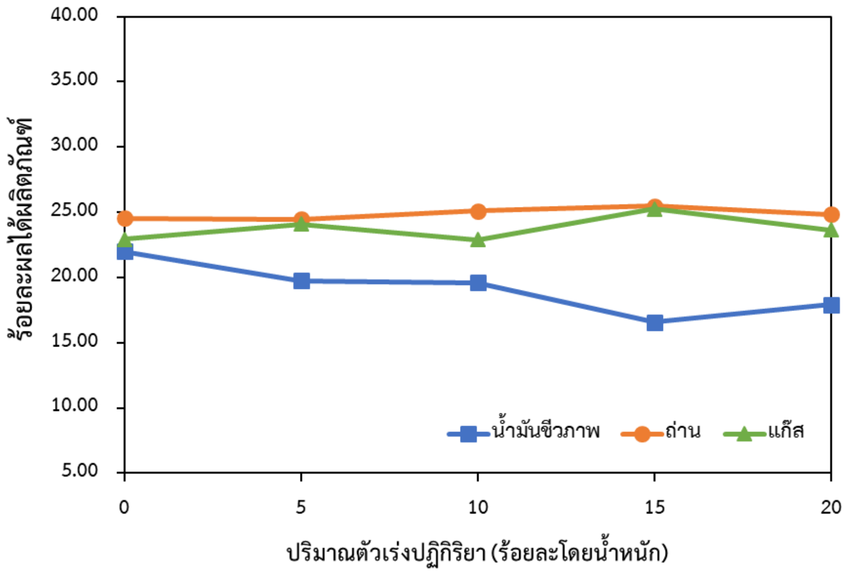
การศึกษาในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วต่อการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาก่อนหน้านี้ ซึ่งภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสนี้คือ เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที ส่วนภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสซังข้าวโพดคือเวลา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที

4.3.1 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

จากรูปที่ 4.12 เป็นการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสพบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณผลได้น้ำมันชีวภาพลดลงเหลือร้อยละ 23.99 โดยน้ำหนัก จากเดิมที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยามีร้อยละ 31.69 โดยน้ำหนัก และผลได้แก๊สเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 23.32 โดยน้ำหนัก จากเดิมที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยามีร้อยละ 20.03 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าผลได้น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นและลดลงใกล้เคียงกันในแต่ละปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา นั้นแสดงว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มากเกินพอสำหรับการเข้าทำปฏิกิริยากับไอระเหย ส่วนการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด ดังรูปที่ 4.13 ให้ผลที่คล้ายกันกับไม้ยูคาลิปตัสคือ น้ำมันชีวภาพลดลงจากร้อยละ 22.01 โดยน้ำหนัก เมื่อไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นร้อยละ 19.74 โดยน้ำหนัก เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาผลได้ของน้ำมันชีวภาพ แก๊ส และถ่านไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ



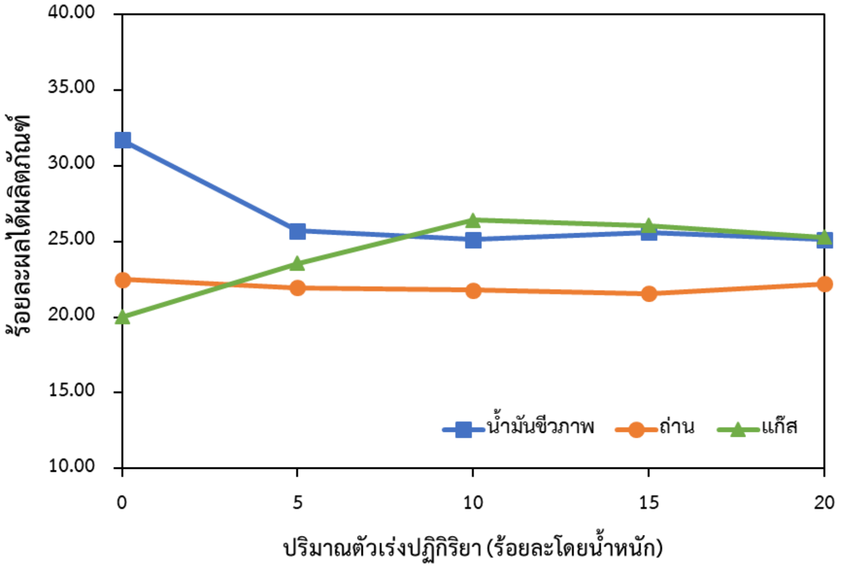
รูปที่ 4.12 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส



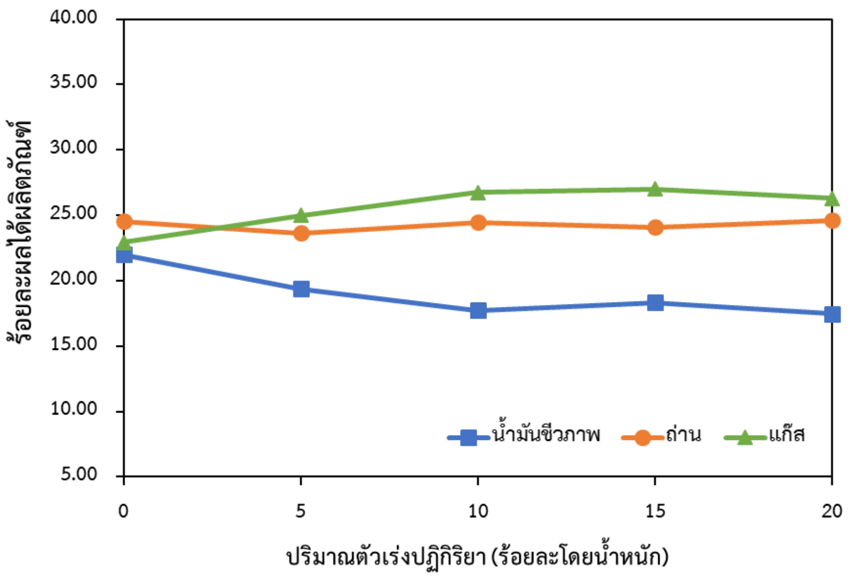
รูปที่ 4.13 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

4.3.2 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

จากรูปที่ 4.14 เป็นการศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสพบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผลได้ของน้ำมันชีวภาพลดลงเหลือร้อยละ 25.11 โดยน้ำหนัก และผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 23.53 โดยน้ำหนัก จากเดิมที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาได้น้ำมันชีวภาพร้อยละ 31.69 โดยน้ำหนัก และผลได้แก๊สร้อยละ 20.03 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณเป็นร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก ผลได้ของน้ำมันชีวภาพ ผลได้แก๊ส และผลได้ถ่านไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังให้ผลที่คล้ายกันกับกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดคือ เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลงเหลือร้อยละ 19.38 โดยน้ำหนัก และผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25.00 โดยน้ำหนัก จากเดิมที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลได้น้ำมันชีวภาพร้อยละ 22.01 โดยน้ำหนัก และผลได้แก๊สร้อยละ 22.95 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.14 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส



รูปที่ 4.15 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

จากข้อมูลข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 สรุปได้ว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วในกระบวนไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด พบว่าการตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้น้ำมันชีวภาพลดลงและปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิคือช่วยเร่งให้ไอระเหยทาร์ และแก๊สขนาดเล็กแตกตัวมากขึ้น ส่งผลให้เกิดแก๊สที่ไม่ควบแน่นเพิ่มมากขึ้น น้ำมันชีวภาพจึงมีปริมาณลดลง ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญกับปริมาณถ่าน เนื่องจากผลได้ของถ่านมีแนวโน้มคงที่ทั้งในการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเกิดจากชีวมวลและตัวเร่งปฏิกิริยาไม่สัมผัสกัน การมีเร่งปฏิกิริยาจึงไม่ส่งผลต่อการสลายตัวของชีวมวลที่เป็นของแข็ง [31]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ตัวอย่างน้ำมันชีวภาพ ถ่าน และแก๊สที่นำมาวิเคราะห์มาจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือเวลา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที และตัวอย่างจากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 5

โดยน้ำหนัก โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือเวลา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที

4.4.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวภาพ

4.4.1.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อน

จากตารางที่ 4.5 แสดงผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส โดยเปรียบเทียบระหว่างวัตถุดิบ น้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยามีอัตราส่วน H/C และ O/C ลดลงจากชีวมวล แสดงว่ามีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและออกซิเจนมีปริมาณลดลงสอดคล้องกับผลของค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากหากชีวมวลหรือน้ำมันชีวภาพมีปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างมากจะทำให้ค่าความร้อนต่ำ โดยชีวมวลมีค่าความร้อน 17.61 เมกะจูล/กิโลกรัม น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นเป็น 23.14 เมกะจูล/กิโลกรัม และเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไพโรไลซิสไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยากับเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว พบว่าอัตราส่วนของ H/C และ O/C มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้เปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ แต่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวขององค์ประกอบเดิมกลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไพโรไลซิสไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว ซึ่งได้ค่าความร้อนใกล้เคียงกันคือ 23.14, 23.41 และ 23.46 เมกะจูล/กิโลกรัม ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด โดยเปรียบเทียบระหว่างวัตถุดิบ น้ำมันชีวภาพที่ได้จากไพโรไลซิสไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกับไม้ยูคาลิปตัสคือ น้ำมันชีวภาพที่ได้จากไพโรไลซิสแบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วมีอัตราส่วนของ H/C และ O/C ลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวล นอกจากนี้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับชีวมวล และให้ค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกันระหว่างน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไพโรไลซิสไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว โดยให้ค่าความร้อนเท่ากับ 23.27, 23.83 และ 24.03 เมกะจูล/กิโลกรัม ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิส ไม้ยูคาลิปตัส

คุณสมบัติ	**ไม้ยูคาลิปตัส** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ไม้ยูคาลิปตัส	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ				
คาร์บอน (C)	46.41	56.47	57.89	55.37
ไฮโดรเจน (H)	6.61	6.84	6.98	6.78
ไนโตรเจน (N)	0.14	0.23	0.25	0.23
ออกซิเจน (O)	46.85	36.46	34.88	37.62
H/C (โมล/โมล)	1.71	1.45	1.45	1.47
O/C (โมล/โมล)	0.76	0.48	0.45	0.51
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	17.61	23.14	23.41	23.46

*ผลต่างร้อยละของธาตุอื่น

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิส ซังข้าวโพด

คุณสมบัติ	**ซังข้าวโพด** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	ซังข้าวโพด	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ				
คาร์บอน (C)	44.79	57.45	59.10	58.05
ไฮโดรเจน (H)	6.48	6.87	7.17	7.00
ไนโตรเจน (N)	0.48	0.50	0.51	0.45
ออกซิเจน* (O)	48.21	35.18	33.22	34.5
H/C (โมล/โมล)	1.74	1.43	1.45	1.45
O/C (โมล/โมล)	0.81	0.46	0.42	0.45
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	17.05	23.27	23.83	24.03

*ผลต่างร้อยละของธาตุอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)

จากตารางที่ 4.7 แสดงข้อมูลองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ ตัวอย่างน้ำมันชีวภาพนี้ได้ทำการแยกส่วนน้ำออกแล้วโดยเป็นตัวอย่างจากการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว ซึ่งสามารถจำแนกองค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพได้ 8 กลุ่ม กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids) แอลดีไฮด์ (Aldehyde) ฟูแรน (Furans) อีเทอร์ (Ethers) คีโทน (Ketones) ฟีนอล (Phenols) ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) และแซ็กคาไรด์ (Saccharide)

เมื่อพิจารณาน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสจากไม้ยูคาลิปตัสที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีองค์ประกอบหลักคือ สารในกลุ่มฟีนอลอยู่ร้อยละ 50.39 ซึ่งเกิดจากการดีโพลีเมอร์ไรเซชั่น (Depolymerisation) ของลิกนิน [29] รองลงมาคือสารในกลุ่มแซ็กคาไรด์ คีโทน และแอลดีไฮด์ ที่มีปริมาณร้อยละ 10.11, 9.41 และ 9.00 ตามลำดับ ซึ่งสารในกลุ่มแซ็กคาไรด์เกิดจากการสลายตัวของโพลีแซ็กคาไรด์ที่ประกอบกันเป็นส่วนของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในไม้ยูคาลิปตัส นอกจากนี้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในชีวมวลยังถูกย่อยสลายเป็นกลูโคปีราโนส (Glucopyranoses) และสารประกอบเฮเทอโรไซคลิก เช่น ฟูแรน (Furan) อนุพันธ์ของฟูแรน (Furan derivatives) และกรดอะซิติก ส่วนสารในกลุ่มคีโทนส่วนใหญ่เกิดจากการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสร่วมกับฟูแรน [24,27,32] นอกจากนี้ยังพบสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกอยู่ร้อยละ 4.7 ฟูแรนร้อยละ 3.03 อีเทอร์ร้อยละ 7.38 และไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 5.96

และเมื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพที่ไม่มีเติมตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว พบว่าสัดส่วนขององค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพในแต่ละกลุ่มใกล้เคียงกันในทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยา มีเพียงสารในกลุ่มฟีนอลที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิมที่มีอยู่ในน้ำมันชีวภาพที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 50.39 เพิ่มขึ้นในตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 53.87 และ 54.93 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าปริมาณฟีนอลและอัลคิลฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากการทำไพโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงและการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานำไปสู่การหลุดของออกซิเจนในโครงสร้าง ดังนั้นปริมาณฟีนอลและอัลคิลฟีนอลจึงเพิ่มขึ้นในทั้งสองกรณี [33]

ส่วนในน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดพบว่าองค์ประกอบหลักคือสารกลุ่มในฟีนอลโดยมีอยู่ร้อยละ 53.55 รองลงมาคือสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอน คีโทน และแซ็กคาไรด์ที่มีอยู่ร้อยละ 8.95, 8.21 และ 8.19 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว พบว่ามีองค์ประกอบของสารแต่ละกลุ่มใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังให้ผลที่

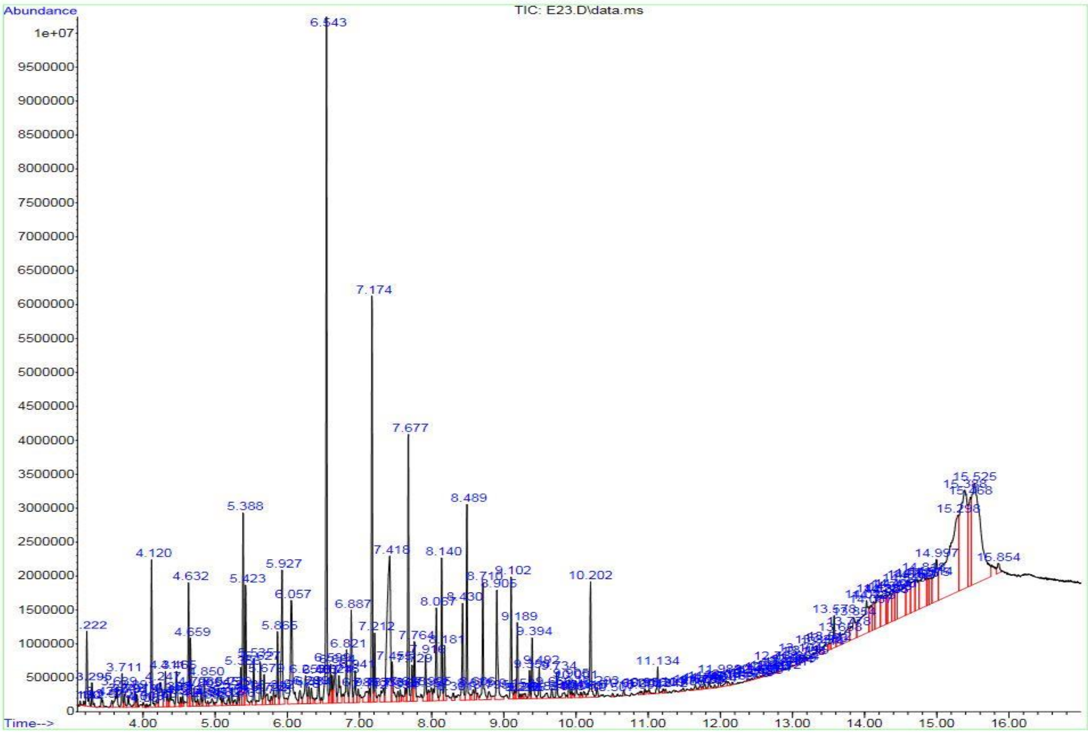
คล้ายกันกับไม้ยูคาลิปตัสคือ มีสารในกลุ่มฟีนอลเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว

จากการเปรียบเทียบองค์ประกอบระหว่างน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด พบว่าชีวมวลทั้งสองชนิดมีปริมาณสารในกลุ่มฟีนอลมากที่สุด แต่พบว่าในซังข้าวโพดจะมีปริมาณฟีนอลมากกว่าไม้ยูคาลิปตัสอยู่ร้อยละ 3.16 และยังพบว่าปริมาณสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและฟูแรนของซังข้าวโพดมากกว่าไม้ยูคาลิปตัส แสดงว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากซังข้าวโพดอาจมีค่าความเป็นกรดสูงกว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ยูคาลิปตัส นอกจากนี้การมีสารกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกและฟูแรนมากในน้ำมันชีวภาพที่ได้การไพโรไลซิสซังข้าวโพดยังสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณเถ้าในซังข้าวโพดที่มีมากกว่าไม้ยูคาลิปตัส เนื่องจากเถ้ามีองค์ประกอบเป็นโลหะอัลคาไลน์ (Alkali metals) ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่าโลหะอัลคาไลน์ (Alkali metals) ของชีวมวลมีอิทธิพลต่อสารประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยเมื่อโลหะอัลคาไลน์สัมผัสกับไอระเหยจะเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเลโวกลูโคซานเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีน้ำหนักเบาเช่น กรดอะซิติกและเฟอร์ฟูรัล [27]

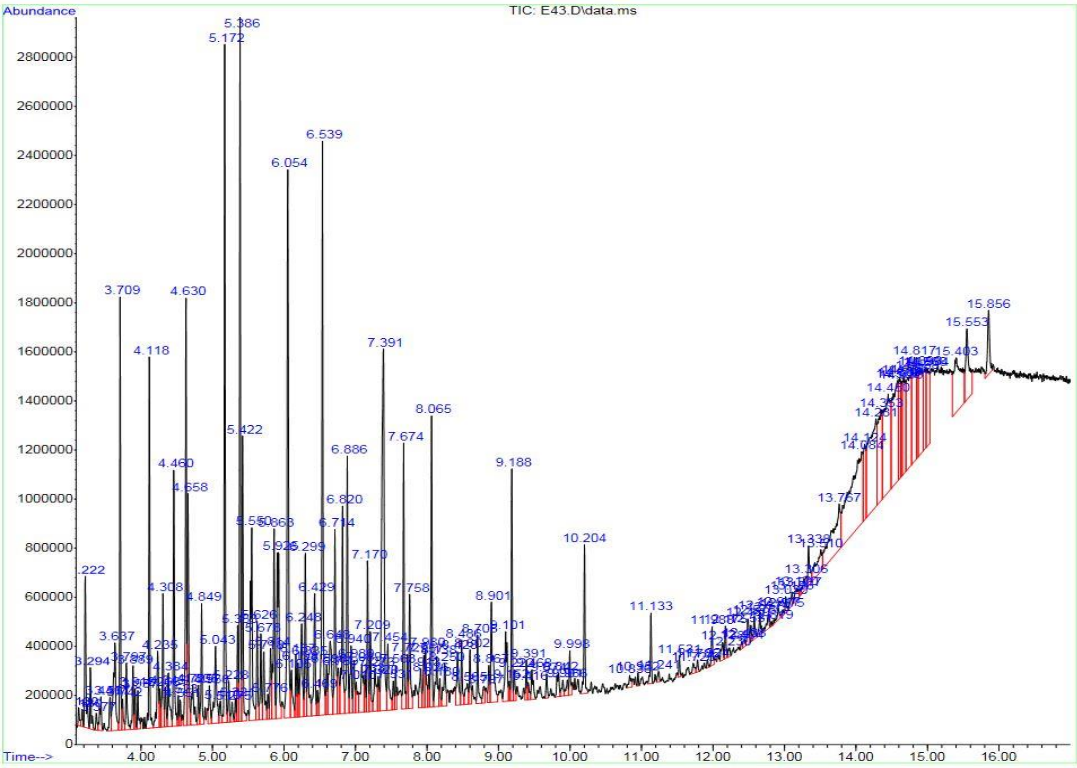
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

องค์ประกอบ	**ไม้ยูคาลิปตัส** (ร้อยละ)			**ซังข้าวโพด** (ร้อยละ)		
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว
กรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acids)	4.70	4.77	5.16	6.45	6.05	4.82
แอลดีไฮด์ (Aldehyde)	9.00	7.17	7.44	3.55	3.35	3.42
ฟูแรน (Furans)	3.03	2.52	2.68	7.48	7.46	8.45
อีเทอร์ (Ethers)	7.38	7.12	6.88	3.64	3.92	3.70
คีโทน (Ketones)	9.41	9.18	7.44	8.21	8.22	8.50
ฟีนอล (Phenols)	50.39	53.87	54.93	53.55	55.44	57.45
ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon)	5.96	6.28	4.88	8.95	8.28	7.16
แซ็กคาไรด์ (saccharide)	10.11	9.07	10.62	8.19	7.28	6.50
รวม	100	100	100	100	100	100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.16 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส



รูปที่ 4.17 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

4.4.2 การวิเคราะห์สมบัติของถ่านและแก๊ส

4.4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่าน

จากตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านจากไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดทั้งแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและออกซิเจนลดลงสอดคล้องกับค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นเป็น 30.53 เมกะจูล/กิโลกรัม ของถ่านจากไม้ยูคาลิปตัส และ 29.26 เมกะจูล/กิโลกรัม ของถ่านจากซังข้าวโพด นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าความร้อนของถ่านจากซังข้าวโพดน้อยกว่าถ่านจากไม้ยูคาลิปตัสสอดคล้องกับผลอัตราส่วนระหว่าง H/C และ O/C ของไม้ยูคาลิปตัสมีค่าน้อยกว่าซังข้าวโพด

และเมื่อพิจารณาผลที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดทั้งในการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อปริมาณคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในถ่าน เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ออกแบบให้ชีวมวลและตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่แยกกันคนละชั้น ดังนั้นจะมีเพียงไอระเหยที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนของสารเท่านั้นที่สัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านจากไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

คุณสมบัติ	**ไม้ยูคาลิปตัส** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			**ซังข้าวโพด** (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ						
คาร์บอน (C)	82.47	83.06	82.40	78.50	79.12	80.63
ไฮโดรเจน (H)	3.76	3.68	3.72	4.00	3.68	3.64
ไนโตรเจน (N)	0.46	0.47	0.47	1.00	0.61	0.66
ออกซิเจน* (O)	13.31	12.79	13.41	16.50	16.59	15.07
H/C (โมล/โมล)	0.55	0.53	0.54	0.61	0.56	0.54
O/C (โมล/โมล)	0.12	0.12	0.12	0.16	0.16	0.14
ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)	30.53	31.09	30.53	29.26	29.98	30.30

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ (GC)

จากผลการศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส ตารางที่ 4.9 พบว่าองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 46.12 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ร้อยละ 44.91 และนอกจากนี้ยังพบสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ C_1-C_3 โดยมีมากสุดคือ C_1 ซึ่งเป็นแก๊สมีเทนมีอยู่ร้อยละ 6.62 และจากการศึกษาด้วยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์พบว่าปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น และมีเทนเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดช่วยให้น้ำมันดินการแตกตัวมากขึ้น ส่งผลให้มีสารในกลุ่มแก๊สที่ติดไฟได้ (H_2, CO และ CH_4) เพิ่มมากขึ้น [34] ส่วนผลจากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วพบว่ามีคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์น้อยลงเมื่อเทียบการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ให้แก๊สในกลุ่ม C_1-C_3 เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สจากการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ (GC)

องค์ประกอบ	**ไม้ยูคาลิปตัส** (ร้อยละ)			**ซังข้าวโพด** (ร้อยละ)		
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	46.12	42.87	44.65	29.55	26.00	38.67
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	44.91	46.12	43.73	60.08	65.34	53.97
มีเทน (CH_4)	6.62	8.27	8.39	7.32	7.28	5.43
อีเทน (C_2H_6)	0.59	0.71	0.74	0.93	0.51	0.54
เอทิลีน (C_2H_4)	1.18	1.48	1.55	1.45	0.53	1.13
โพรเพน (C_3H_8)	0.11	0.11	0.16	0.14	0.08	0.05
โพรพิลีน (C_3H_6)	0.46	0.45	0.77	0.52	0.26	0.21
รวม	100	100	100	100	100	100

จากการศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดพบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 60.08 คาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 29.55 และสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ C_1-C_3 โดยมีมีเทนมากสุดคือร้อยละ 7.32 และเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์พบว่าคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ C_1-C_3 ใกล้เคียง

กับไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วพบว่าช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ และลดปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์

และเมื่อเปรียบเทียบการไพโรไลซิสทั้งสองชีวมวลจะเห็นว่าไม้ยูคาลิปตัสให้แก๊สที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ใกล้เคียงกัน แต่ซังข้าวโพดจะให้แก๊สที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ผลการศึกษาพบว่าซังข้าวโพดมีสารระเหย เถ้า และความชื้นสูงกว่าไม้ยูคาลิปตัส และอัตราส่วนระหว่าง H/C และ O/C ของซังข้าวโพดสูงกว่าไม้ยูคาลิปตัส แสดงว่าซังข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่าไม้ยูคาลิปตัส แต่มีออกซิเจนมากกว่าไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งสอดคล้องกับค่าความร้อนของไม้ยูคาลิปตัสที่มีค่าความร้อนสูงกว่าซังข้าวโพด

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด พบว่าไม้ยูคาลิปตัสมีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 33.25 เซลลูโลสร้อยละ 40.85 และลิกนินร้อยละ 24.47 ส่วนซังข้าวโพดมีเฮมิเซลลูโลสอยู่ร้อยละ 34.88 เซลลูโลสร้อยละ 40.29 และลิกนินร้อยละ 20.66 โดยพบว่าไม้ยูคาลิปตัสมีองค์ประกอบเซลลูโลสและลิกนินสูงกว่าซังข้าวโพด แต่มีเฮมิเซลลูโลสและสารแทรกน้อยกว่าซังข้าวโพด และผลการศึกษาอุณหภูมิในการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลทั้งสองชนิดพบว่ามีอุณหภูมิการสลายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกัน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสควรมีอุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป

5.1.2 ศึกษาผลของตัวแปรเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งของไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

การศึกษาตัวแปรทั้ง 4 ตัวแปรที่มีผลต่อการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด พบว่าภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสคือ ที่เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร อัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 120 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 31.69 โดยน้ำหนัก ผลได้แก๊สร้อยละ 20.03 โดยน้ำหนัก และผลได้ถ่านร้อยละ 22.48 โดยน้ำหนัก ส่วนภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสซังข้าวโพดคือ ที่เวลา 30 นาที อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ขนาดอนุภาค 0.50-0.71 มิลลิเมตร และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน 80 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดร้อยละ 22.01 โดยน้ำหนัก ผลได้แก๊สร้อยละ 22.95 โดยน้ำหนัก และผลได้ถ่านร้อยละ 24.54 โดยน้ำหนัก

5.1.3 ศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วและปริมาณที่เหมาะสมในช่วงร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วพบว่าส่งผลต่ออัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด โดยส่งผลให้น้ำมันชีวภาพลดลงและปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 10, 15 และ 20 โดยน้ำหนัก พบว่าผลได้น้ำมันชีวภาพ แก๊ส และถ่านไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.4 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

จากการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว พบว่าน้ำมันชีวภาพมีอัตราส่วน H/C และ O/C ลดลงจากชีวมวล แสดงว่ามีปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและออกซิเจนมีปริมาณลดลงสอดคล้องกับค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่สูงกว่าชีวมวล นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ช่วยลดปริมาณออกซิเจนในองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพพบว่ามีสารในกลุ่มฟีนอลมากที่สุด รองลงมาคือสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก แอลดีไฮด์ อีเทอร์ คีโทน ไฮโดรคาร์บอน แซ็กคาไรด์และมีปริมาณน้อยสุดคือสารในกลุ่มฟูแรน อีกทั้งยังพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดในการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด น้ำมันชีวภาพที่ได้มีสารในกลุ่มฟีนอลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านพบว่าปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นและออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับชีวมวล และจากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าไม่มีผลต่อปริมาณคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนในถ่าน

จากการศึกษาองค์ประกอบของแก๊สพบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์และรองลงมาคือสารในกลุ่มไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่ C_1-C_3 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลจากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ส่งเสริมให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และมีเทนมากขึ้นในการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด ส่วนเอฟซีซีใช้แล้วส่งเสริมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นในการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) จากการศึกษาครั้งนี้ไม่พบแก๊สไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบในแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส ดังนั้นเพื่อเป็นการยืนยันผลควรศึกษาหาวิธีในการเก็บแก๊สในรูปแบบอื่น เพื่อให้ได้ผลที่ชัดเจนมากขึ้น

2) จากการศึกษาองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพพบว่าซังข้าวโพดมีองค์ประกอบของสารในกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิกมากกว่าไม้ยูคาลิปตัส เพื่อเป็นการยืนยันผลควรศึกษาหาค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพเพิ่มเติม

3) ศึกษาการดัดแปลงตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้วด้วยโลหะเพิ่มเติมเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพมากขึ้น

4) ศึกษาผลของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มเติม โดยการเพิ่มระยะห่างของอัตราไหลของแก๊สเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเห็นผลของอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อกระบวนการไพโรไลซิสชัดเจนขึ้น

5) ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพดจากแหล่งวัตถุดิบอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก
การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และการคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล

1) การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

โดยการคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์เหลว ถ่าน และแก๊ส จะแสดงดังสูตรต่อไปนี้

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์เหลว (%Liquid yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลว}}{\text{น้ำหนักชีวมวล}} \times 100$$

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของถ่าน (%Solid yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักถ่าน}}{\text{น้ำหนักชีวมวล}} \times 100$$

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของน้ำ (%water yield)

$$= \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลว(ก่อนระเหย -หลังระเหย)}}{\text{น้ำหนักชีวมวล}} \times 100$$

ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (%Gas yield)

= 100 - (ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว+ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง
+ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของน้ำ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) การคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล

ร้อยละเฮมิเซลลูโลส = ร้อยละโฮโลเซลลูโลส – ร้อยละเซลลูโลส

ภาคผนวก ข
ผลจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ และผลจากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

1) ผลของเวลาต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ตารางที่ ข-1 ผลของเวลาต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส

เวลา (นาที)	ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
15	24.55	27.61	21.56	26.29
30	25.53	27.28	18.78	28.42
45	24.94	26.60	20.75	27.72
60	23.41	26.49	21.76	28.34

ตารางที่ ข-2 ผลของเวลาต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

เวลา (นาที)	ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
15	16.91	32.21	20.39	30.49
30	18.44	30.88	19.88	30.80
45	16.84	30.51	21.03	31.62
60	16.06	29.56	22.28	32.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ตารางที่ ข-3 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
400	25.53	27.28	18.78	28.42
450	25.03	24.49	23.17	27.31
500	29.75	21.94	22.29	26.03
550	27.51	21.96	24.85	25.69

ตารางที่ ข-4 ผลของอุณหภูมิต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
400	18.44	30.88	19.88	30.80
450	20.09	26.57	21.60	31.73
500	22.66	24.58	24.22	28.55
550	22.34	20.90	29.91	26.85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3) ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ตารางที่ ข-5 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส

ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
0.25-0.50	27.58	22.04	20.99	29.39
0.50-0.71	29.75	21.94	22.29	26.03
0.71-1.00	26.82	22.52	22.68	27.99
1.00-2.00	27.11	22.91	21.05	28.94

ตารางที่ ข-6 ผลของขนาดอนุภาคต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

ขนาดอนุภาค (มิลลิเมตร)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
0.25-0.50	20.67	23.71	26.83	28.79
0.50-0.71	22.66	24.58	24.22	28.55
0.71-1.00	22.04	25.01	25.17	27.79
1.00-2.00	20.50	25.44	23.71	30.35

4) ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ตารางที่ ข-7 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส

อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
40	24.78	21.15	24.11	29.97
80	29.75	21.94	22.29	26.03
120	31.69	22.48	20.03	25.80
160	30.13	21.91	23.36	24.61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-8 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ผลได้ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
40	19.41	24.84	22.80	32.96
80	22.01	24.54	22.95	30.52
120	20.88	24.00	25.02	30.11
160	21.29	23.88	24.73	30.11

5) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ตารางที่ ข-9 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส

ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
5	23.99	21.48	23.32	31.21
10	23.72	21.19	25.79	29.30
15	22.73	22.08	23.43	31.43
20	23.61	21.50	25.59	29.30

ตารางที่ ข-10 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
5	19.74	24.45	24.08	31.73
10	19.60	25.12	22.90	32.38
15	16.58	25.49	25.27	32.66
20	17.91	24.86	23.63	33.60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

6) ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสและซังข้าวโพด

ตารางที่ ข-11 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัส

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
5	25.69	21.94	23.53	2885
10	25.11	21.77	26.39	26.74
15	25.61	21.55	26.05	26.79
20	25.13	22.20	25.28	27.40

ตารางที่ ข-12 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

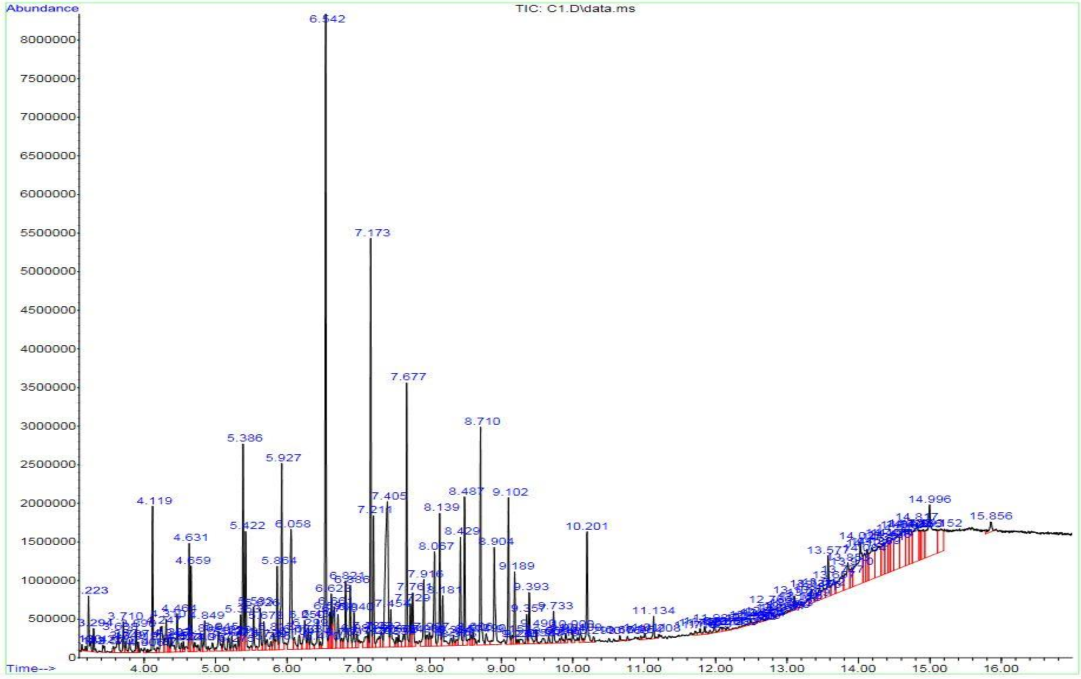
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ผลิตภัณฑ์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันชีวภาพ	ถ่าน	แก๊ส	น้ำ
5	19.38	23.64	25.00	31.98
10	17.75	24.48	26.76	31.01
15	18.34	24.08	27.01	30.58
20	17.48	24.62	26.29	31.60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค

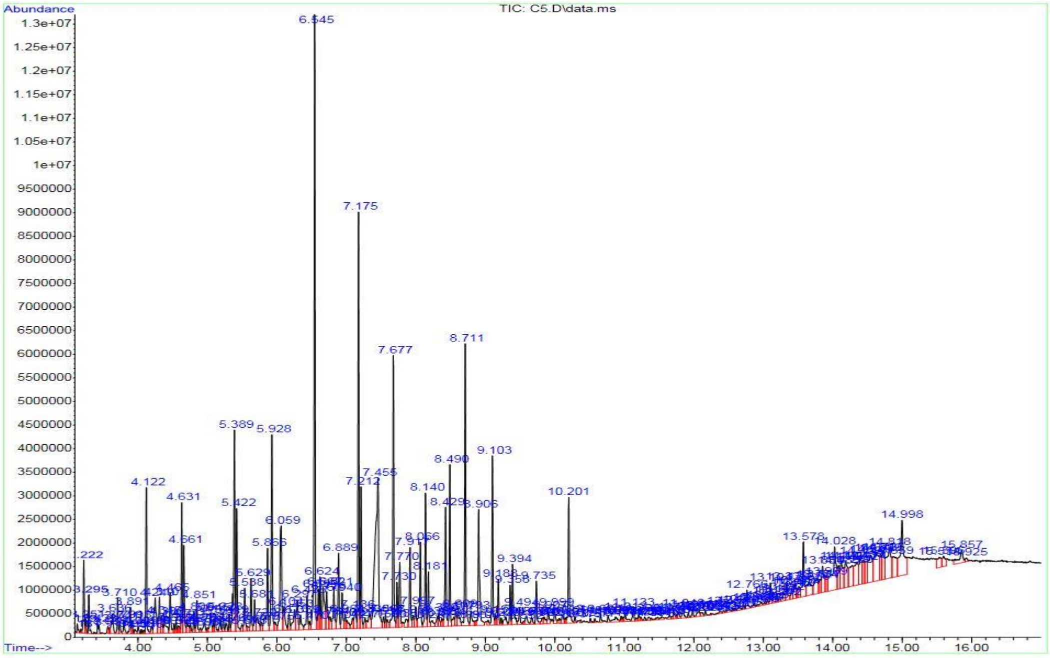
การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) ของน้ำมันชีวภาพ

1) องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ ค-1 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค-2 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ค-1 องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสไม้ยูคาลิปตัสแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว

ลำดับ	ชื่อสาร	เวลา	ไม้ยูคาลิปตัส (ร้อยละ)			
			ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	กลุ่มสาร
1	2(5H)-Furanone	3.221	1.54	1.26	1.32	F
2	2(5H)-Furanone, 5-methyl-	3.425	0.32	0.25	0.30	F
3	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	3.637	0.80	0.76	0.69	K
4	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	4.119	2.61	2.62	2.65	K
5	p-Cresol	4.465	0.96	0.97	0.98	Ph
6	Phenol, 2-methoxy-	4.630	2.13	1.83	2.04	Ph
7	Maltol	4.804	0.34	0.34	0.41	K
8	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	4.851	0.69	0.73	0.69	K

ลำดับ	ชื่อสาร	เวลา	ไม้ยูคาลิปตัส (ร้อยละ)			
			ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	กลุ่มสาร
9	2,3-Dihydroxybenzaldehyde	5.228	0.34	0.00	0.37	Al
10	5-Hydroxymethyldihydrofuran-2-one	5.354	0.80	0.74	-	K
11	Catechol	5.389	3.78	3.88	4.58	Ph
12	Creosol	5.424	2.48	2.44	2.30	Ph
13	1,4:3,6-Dianhydro-alpha-d-glucopyranose	5.536	0.99	0.94	0.96	S
14	5-Hydroxymethylfurfural	5.627	1.17	1.01	1.06	F
15	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	5.866	1.58	1.72	2.13	Ph
16	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	5.926	3.44	4.24	4.12	Ph
17	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	6.056	4.24	3.88	3.51	Ph
18	1,4-Benzenediol, 2,5-dimethyl-	6.252	1.15	1.07	0.76	Ph
19	Phenol, 2,6-dimethoxy-	6.542	12.88	12.54	11.85	Ph
20	Phenol, 3,4-dimethoxy-	6.624	0.57	1.11	1.00	Ph
21	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	6.659	1.28	1.58	1.80	Ph
22	4-Ethylcatechol	6.715	1.10	1.24	1.08	Ph
23	Tetradecane	6.819	1.35	1.58	1.06	HC
24	Benzaldehyde, 3-hydroxy-4-methoxy- (Vanillin)	6.889	2.15	1.60	1.82	Al
25	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	6.941	0.94	0.88	0.93	Ph
26	Nonanoic acid	7.114	0.78	0.67	1.08	C
27	1,2,3-Trimethoxybenzene	7.175	7.38	7.12	6.88	E
28	trans-Isoeugenol	7.214	1.38	2.39	2.43	Ph
29	D-Allose	7.418	9.12	8.13	9.66	S
30	Apocynin	7.452	1.17	1.13	-	K
31	5-tert-Butylpyrogallol	7.678	4.93	4.79	5.03	Ph

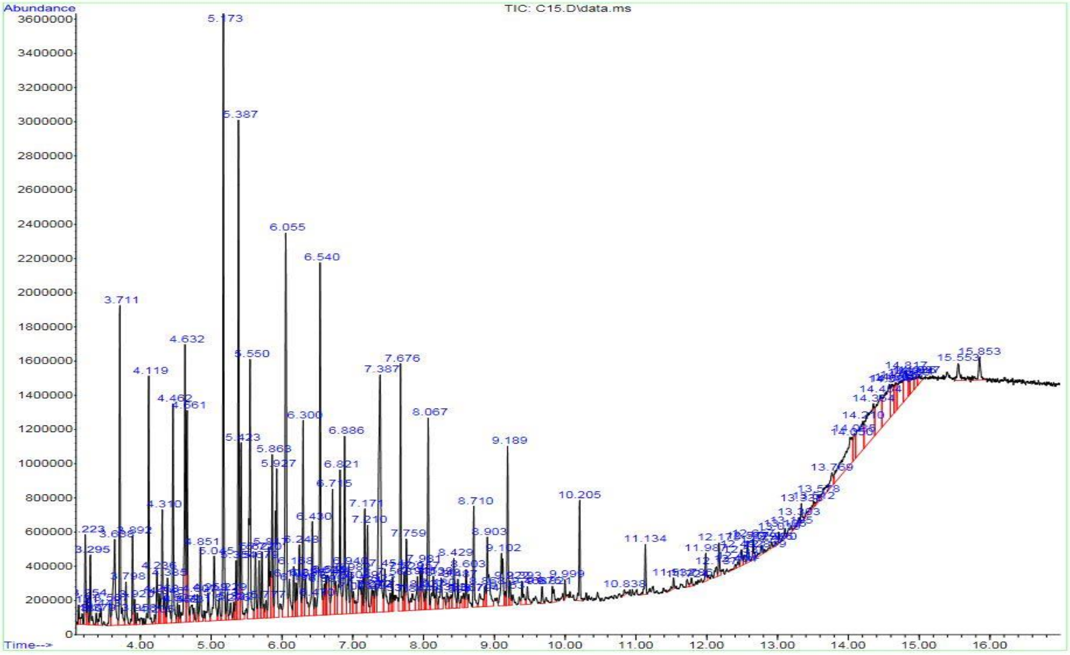
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ลำดับ	ชื่อสาร	เวลา	ไม้ยูคาลิปตัส (ร้อยละ)			
			ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	กลุ่มสาร
32	Hexadecane	8.068	2.57	2.60	2.02	HC
33	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	8.142	2.71	2.48	2.47	Ph
34	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-prope	8.428	2.20	2.44	2.60	Ph
35	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	8.489	3.78	2.88	2.67	Al
36	4-Allyl-2,6-dimethoxyphenol	8.710	2.64	4.39	5.32	Ph
37	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	8.905	3.00	2.86	3.00	K
38	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	9.104	2.43	2.84	3.17	CA
39	Octadecane	9.191	1.44	1.39	0.89	HA
40	Propanoic acid	9.395	1.49	1.26	0.91	CA
41	Naphthalene, 1-(2-propenyl)-	9.733	0.60	0.71	0.91	HC
42	3,5-Dimethoxy-4-hydroxycinnamaldehyde	10.201	2.73	2.69	2.58	Al
รวม		100	100	100	100	-

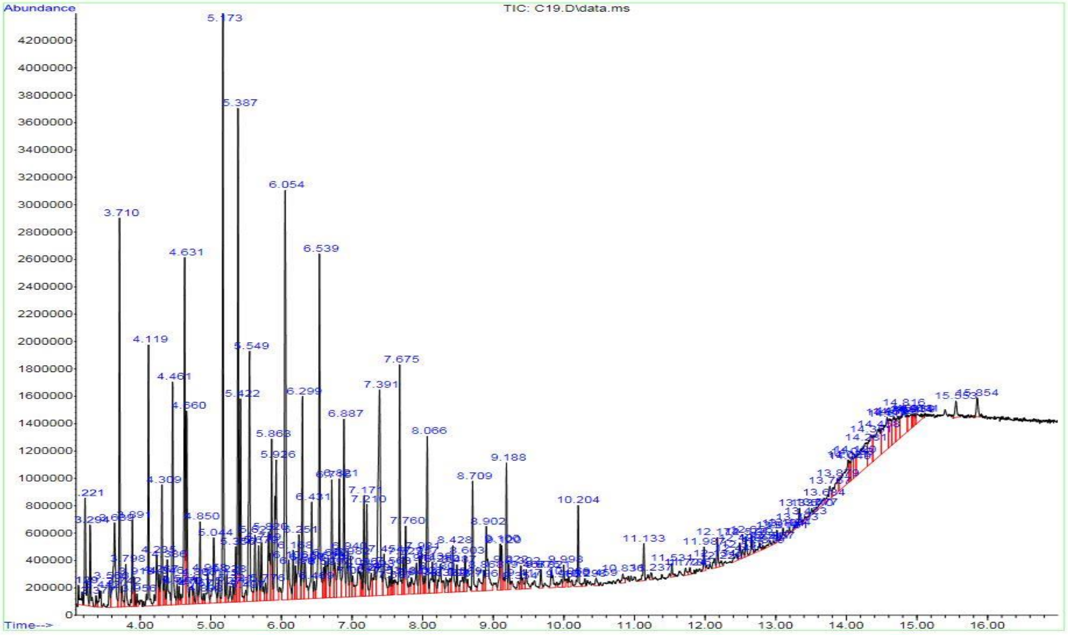
CA= กรดคาร์บอกซิลิก, Al= แอลดีไฮด์, F= ฟูแรน, E= อีเทอร์ K= คีโทน, Ph= ฟีนอล, HC= ไฮโดรคาร์บอน, S= แซ็กคาไรด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2) องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว



รูปที่ ค-3 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



รูปที่ ค-4 โครมาโตแกรมของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดแบบเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ ค-2 องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและมีตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และเอฟซีซีใช้แล้ว

ลำดับ	ชื่อสาร	เวลา	ซังข้าวโพด (ร้อยละ)			
			ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	กลุ่มสาร
1	2(5H)-Furanone	3.221	1.58	1.08	1.70	F
2	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-	3.295	0.59	0.85	0.96	K
3	2,5-Furandione, dihydro-3-methylene-	3.442	0.47	0.35	0.41	F
4	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-	3.637	1.76	2.15	2.23	K
5	Phenol	3.711	3.07	3.61	3.91	Ph
6	2(5H)-Furanone, 3-methyl-	3.741	0.33	-	0.31	F
7	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	4.119	3.01	2.65	2.86	K
8	4-Methyl-5H-furan-2-one	4.266	0.37	0.36	0.39	F
9	Phenol, 2-methyl-	4.309	1.29	1.48	1.63	Ph
10	Butanoic acid	4.383	0.78	0.85	0.85	CA
11	p-Cresol	4.461	2.44	2.72	2.98	Ph
12	Phenol, 2-methoxy-	4.630	3.87	3.64	4.27	Ph
13	2-Propanamine, 1-methoxy-	4.661	2.27	2.68	2.54	E
14	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	4.847	1.07	0.97	1.02	K
15	Phenol, 2-ethyl-	4.960	0.49	0.61	0.64	Ph
16	Phenol, 3,5-dimethyl-	5.042	1.39	1.41	1.48	Ph
17	Phenol, 4-ethyl-	5.172	5.63	6.36	6.49	Ph

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับ	ชื่อสาร	เวลา	ซังข้าวโพด (ร้อยละ)			
			ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	กลุ่มสาร
18	2,3-Dihydroxybenzaldehyde	5.228	0.43	0.38	0.39	Al
19	5-Hydroxymethyldihydrofuran-2-one	5.354	0.84	0.74	0.69	F
20	Catechol	5.385	5.55	5.48	5.47	Ph
21	Creosol	5.424	2.54	2.28	2.45	Ph
22	Benzofuran, 2,3-dihydro-	5.549	2.91	3.94	3.94	F
23	5-Hydroxymethylfurfural	5.627	0.98	0.99	1.01	F
24	2,3-Anhydro-d-mannosan	5.679	0.92	0.86	0.86	S
25	Phenol, 4-(1-methylethyl)-	5.718	0.90	0.99	0.96	Ph
26	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	5.861	2.09	1.95	1.90	Ph
27	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	5.926	2.93	3.01	2.92	Ph
28	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	6.052	6.57	6.23	6.80	Ph
29	2-Methoxy-4-vinylphenol	6.299	1.54	2.24	2.39	Ph
30	1,4-Benzenediol, 2-methyl-	6.429	1.54	1.57	1.59	Ph
31	Phenol, 2,6-dimethoxy-	6.646	5.71	5.02	5.04	Ph
32	4-Ethylcatechol	6.715	2.03	2.07	1.92	Ph
33	Tetradecane	6.820	2.34	2.15	1.92	HC
34	Vanillin	6.885	2.48	2.56	2.62	Al
35	1,2,4-Trimethoxybenzene	7.171	1.37	1.24	1.16	E
36	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	7.210	0.84	1.11	1.13	Ph
37	D-Allose	7.392	7.27	6.42	5.64	S
38	Phenol, 2,4-dimethyl-, acetate	7.674	2.23	2.84	2.69	Ph

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ลำดับ	ชื่อสาร	เวลา	ซังข้าวโพด (ร้อยละ)			
			ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	โดโลไมต์	เอฟซีซีใช้แล้ว	กลุ่มสาร
40	Hexanoic acid	7.726	1.33	1.22	0.52	CA
41	Cyclohexadien-4-one-1-propiolic acid	7.981	0.74	0.75	0.75	CA
42	Hexadecane	8.064	2.68	2.48	2.09	HC
43	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	8.137	0.90	0.82	0.79	Ph
44	Benzenepropanoic acid	8.250	0.80	0.74	0.74	CA
45	Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	8.484	0.64	0.41	0.41	Al
46	Phenylacetylformic acid	8.601	0.59	0.57	0.55	CA
47	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	8.900	1.78	1.60	1.43	K
48	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	9.100	1.29	1.38	0.72	CA
49	Octadecane	9.187	1.86	1.76	1.49	HC
50	2-Propenoic acid	9.468	0.47	0.35	0.38	CA
51	n-Hexadecanoic acid	9.997	0.45	0.19	0.31	CA
52	Eicosane	10.205	1.41	1.21	1.13	HC
53	Heptadecane	11.133	0.66	0.68	0.53	HC
รวม			100	100	100	-

CA= กรดคาร์บอกซิลิก, Al= แอลดีไฮด์, F= ฟูแรน, E= อีเทอร์ K= คีโทน, Ph= ฟีนอล, HC= ไฮโดรคาร์บอน, S= แซ็กคาไรด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บรรณานุกรม

1 ไพโรไลซิส (Pyrolysis). แหล่งที่มา: http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn241_p61-64.pdf

2 รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร โครงการศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์จากชีวมวล (Biomass to Liquid: BTL) ด้วยกระบวนการ Fast Pyrolysis. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/ewt_dl_link.php?nid=44358.

3 สุปราณี แก้วภิรมย์. <u>ปิโตรเลียมและปิโตรเคมี (Petroleum and Petrochemistry)</u>. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: แดเน็กซ์อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น, 2558.

4 ปิยนุช นาคพงษ์. <u>สารเคมีจากปิโตรเลียม</u>. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: ทริปเพิ้ลกรุ๊ป, 2555.

5 ไกรพัฒน์ จีนขจร. <u>พลังงานหมุนเวียน</u>. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2550.

6 พลังงานแสงอาทิตย์. แหล่งที่มา: http://www.energyvision.co.th/14406844/พลังงานแสงอาทิตย์.

7 พลังงานน้ำ. แหล่งที่มา: http://www.energyvision.co.th/14407249/พลังงานน้ำ.

8 วิชชากร จารุศิริ. <u>พลังงานจากชีวมวล เทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้</u>. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท โอ.เอส.พริ้นติ้งเฮ้าส์ จำกัด, 2561.

9 ภัทรอนงค์ คงช่วย. <u>พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้.</u> พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ(งานสำนักพิมพ์) มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2561.

10 นคร ทิพยาวงศ์. <u>เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล</u>. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2558.

11 Thunman H., Leckner B., Thermal conductivity of wood models for different stages of combustion. *Biomass and Bioenergy* 23.1 (2002): 47-54.

12 วิษณุ มีอยู่. <u>ไพโรไลซิสของชีวมวล</u>. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, 2561.

13 Mohan D., Pittman Jr C. U., Steele P. H. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels* 20.3 (2006): 848-889.

14 Jahirul M. I., Rasul M. G., Chowdhury A. A., AshwathN. Biofuels Production through Biomass Pyrolysis —A Technological Review. *Energies* 5 (2012): 4952-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5001.

15 Kanaujia P. K., Naik D. V., Tripathi D., Singh R., Poddar M. K., Konathala L. S. K., Sharma Y. K. Pyrolysis of Jatropha Curcas seed cake followed by optimization of liquid-liquid extraction procedure for the obtained bio-oil. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 118 (2016): 202-224.

16 Verma M., Godbout S., Brar S. K., Solomatnikova O., Lemay S. P., Larouche J. P. Biofuels Production from Biomass by Thermochemical Conversion Technologies. *Int. J. Chem. Eng* 2012 (2012).

17 Pipat P., Uthaiwan I., Panchika P., Kanin C. Effect of Temperature on Product Yield from the Pyrolysis of Soybean Cake in an Auger Reactor. (2013).

18 กันต์ธีรา ค้าภีระ. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบสต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพของไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. วิทยาพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2560

19 Sasaki K., Qiu X., Hosomomi Y., Moriyama S., Hirajima T. Effect of natural dolomite calcination temperature on sorption of borate onto calcined products. *Microporous Mesoporous Mater.* 171 (2013): 1-8.

20 Dolomite. แหล่งที่มา: https://geology.com/minerals/dolomite.shtml.

21 ศิวัช ภู่ระหงษ์, การผลิตน้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยยูคาลิปตัสโดยไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง. วิทยาพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2557

22 Demiral İ., Eryazıcı A., Şensöz S. Bio-oil production from pyrolysis of corncob (Zea mays L.). *Biomass Bioenergy* 36 (2012): 43-49.

23 Ateş F., Pütün A. E., Pütün E. Pyrolysis of two different biomass samples in a fixed-bed reactor combined with two different catalysts. *Fuel* 85.12-13 (2006): 1851-1859.

24 Fermoso J., Hernando H., Jana P., Moreno I., Přech J., Ochoa-Hernández C., Pizarro, P., Coronado J.M., Čejka Jiří., Serrano D. P. Lamellar and pillared ZSM-5zeolites modified with MgO and ZnO for catalytic fast-pyrolysis of eucalyptus woodchips. *Catal. Today* 277 (2016): 171-181.

25 Zhou Q., Zarei A., De Girolamo A., Yan Y., Zhang L. Catalytic performance of scrap tyre char for the upgrading of eucalyptus pyrolysis derived bio-oil via cracking and deoxygenation. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 139 (2019): 167-176.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

26 Xu J., Liao Y., Lin Y., Ma X., Yu Z. Study on catalytic pyrolysis of eucalyptus to produce aromatic hydrocarbons by Zn-Fe co-modified HZSM-5 catalysts. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 139 (2019): 96-103.

27 Palamanit A., Khongphakdi P., Tirawanichakul Y., Phusunti N. Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. *Biofuel Res. J.* 6 (2019): 1065-1079.

28 Zhang L., Li S., Li K., Zhu X. Two-step pyrolysis of corncob for value-added chemicals and high quality bio-oil: Effects of pyrolysis temperature and residence time. *Energy Convers. Manage.* 166 (2018): 260-267.

29 Heidari A., Stahl R., Younesi H., Rashidi A., Troeger N., Ghoreyshi A. A. Effect of process conditions on product yield and composition of fast pyrolysis of Eucalyptus grandis in fluidized bed reactor. *J. Ind. Eng. Chem.* 20.4 (2014): 2594-2602.

30 Akhtar J., Amin N. S. A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 16.7 (2012): 5101-5109.

31 Stefanidis S. D., Kalogiannis K. G., Iliopoulou E. F., Lappas A. A., Pilavachi P. A. In-situ upgrading of biomass pyrolysis vapors: Catalyst screening on a fixed bed reactor. *Bioresour. Technol.* 102 (2011): 8261-7.

32 Amutio M., Lopez G., Alvarez J., Olazar M., Bilbao J. Fast pyrolysis of eucalyptus waste in a conical spouted bed reactor. *Bioresour. Technol.* 194 (2015): 225-232.

33 Ateş F., Işıkdağ M. A. Influence of temperature and alumina catalyst on pyrolysis of corncob. *Fuel* 88.10 (2009): 1991-1997.

34 Guo F., Li X., Liu Y., Peng K., Guo C., Rao Z. Catalytic cracking of biomass pyrolysis tar over char-supported catalysts. *Energy Convers. Manage.* 167 (2018): 81-90.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรเวช ศรีปราโมช
วัน เดือน ปี เกิด	16 กรกฎาคม 2535
สถานที่เกิด	สมุทรสาคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	930/60 ถนนเอกชัย ตำบลมหาชัย อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร 74000
ผลงานตีพิมพ์	PPC & PETROMAT SYMPOSIUM 2020

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY