ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบสต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพของไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

นางสาวกันต์ธีรา คำภีระ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ACID AND BASE CATALYSTS ON BIO-
OIL PRODUCION OF CASSAVA RHIZOME PYROLYSIS IN CONTINUOUS REACTOR

Miss Kantheera Kumpeera

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2017
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบสต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพของไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
โดย	นางสาวกันต์ธีรา คำภีระ
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรินทร ชวศิริ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. นพิดา หิญชีระนันทน์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป สามารถ)

กันต์ธีรา คำภีระ : ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบสต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพของไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (EFFECTS OF ACID AND BASE CATALYSTS ON BIO-OIL PRODUCION OF CASSAVA RHIZOME PYROLYSIS IN CONTINUOUS REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 81 หน้า.

เหง้ามันสำปะหลังคือส่วนเหลือใช้จากกระบวนการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลัง โดยมีปริมาณมากถึง 6,000,000 ตันต่อปี งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผล 4 ตัวแปรดังนี้ ขนาดอนุภาคในช่วง 0.3-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 3.2-32.8 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 50-250 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ ขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยที่ภาวะนี้ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมากถึงร้อยละ 43.04 ในงานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยใช้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ (ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส), ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว (ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด) และตัวเร่งปฏิกิริยาผสม (แคลไซน์โดโลไมต์ : FCC ใช้แล้ว = 1:1) จากผลการทดลองพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพลดลง ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพน้ำมันชีวภาพโดยลดปริมาณองค์ประกอบ Long residue hydrocarbon และเพิ่มปริมาณองค์ประกอบ Kerosine ได้ โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำมันชีวภาพได้โดยเพิ่มอัตราส่วนองค์ประกอบกลุ่มแอลเคน และแอลไคน์ได้ โดยลดสัดส่วนองค์ประกอบสารประกอบที่มีหมู่ออกซิเจนได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ ลายมือชื่อนิสิต ....

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....

5872409023 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE
KEYWORDS: BIO-OIL / BIOMASS / PYROLYSIS / CATALYST / DOLOMITE / FCC CATALYST

KANTHEERA KUMPEERA: EFFECTS OF ACID AND BASE CATALYSTS ON BIO-OIL PRODUCION OF CASSAVA RHIZOME PYROLYSIS IN CONTINUOUS REACTOR. ADVISOR: PROF. DR. THARAPONG VITIDSANT, 81 pp.

Cassava rhizome is a useless part waste from cassava harvesting and there are 6,000,000 tons of cassava rhizome in each year. This research aims to study bio-oil production from cassava rhizome in continuous pyrolysis. The 4 variables that effect to the process were studied as follow particle size of cassava rhizome 0.3-3 mm, temperature 400-500 °C, raw material feed rate 3.2-32.8 g/minute, and N_2 flow rate 50-250 cm^3/minute. The result show that suitable condition were cassava rhizome particle size is in range 2-3 mm, temperature is at 500 °C, raw material feed rate is 18 g/minute and N_2 flow rate is 150 cm^3/minute. Using this condition can give liquid product yield up to 43.04%. In this research also studied effect of acid and base catalyst by using dolomite (base catalyst), FCC (acid catalyst) and Mixed (Dolomite:FCC = 1:1). The result show that effect of all catalysts are reducing liquid product yields and increase gas product yield but the catalysts can reduce long residue products an increase Kerosine in bio-oil. Spent FCC catalyst can improve bio-oil quality by increase alkane and alkene products in bio-oil then reduce oxygen containing hydrocarbon products.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study:	Petrochemistry and Polymer Science	Student's Signature	....
		Advisor's Signature	....
Academic Year:	2017		

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร ชวศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิดา หิญชีระนันทน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามรถ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากภายนอกที่กรุณาให้ความคิดเห็นรวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานชีวมวล อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี รวมถึงหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

บทที่ 1 5

บทนำ 5

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย 5

1.2 วัตถุประสงค์ 6

1.3 ขอบเขตุการวิจัย 6

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย 7

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 8

บทที่ 2 9

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 9

2.1 ปิโตรเลียม (Petroleum) 9

2.1.1 น้ำมันดิบ 9

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ 11

2.2 พลังงานทดแทน 13

2.3 ชีวมวล 15

2.3.1 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย 16

2.3.2 องค์ประกอบของชีวมวล 17

เซลลูโลส (Cellulose) 17

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) 18

หน้า

ลิกนิน (Lignin) 19
2.4 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)..20
2.5 การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน..21
2.5.1 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน 21
2.5.2 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.............................22
2.5.3 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา 25
2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts)..26
2.6.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา 26
2.7 โดโลไมต์ (Dolomite)...27
2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC...29
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 29
บทที่ 3 33
เครื่องมือและวิธีการทดลอง 33
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 33
3.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ 35
3.3 สารเคมีและสารตั้งต้น...38
3.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย..39
3.5 วิธีการทดลอง 41
3.6 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง 42
บทที่ 4 43
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง 43
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง 43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อน 43

4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) 43

4.1.3 วิเคราะห์ค่าการสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง ด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/Differential Thermal Analysis(TG/DTA) 44

4.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลัง 45

4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลังต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ....45

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ 46

4.2.3 ผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์....47

4.2.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ 47

4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ 48

4.3.2 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว 49

4.3.3 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1 50

4.4 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์....52

4.4.1 ศึกษาอัตราส่วนน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ 52

4.4.2 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ....54

4.4.3 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ของแข็งและแก๊ส 62

บทที่ 5 65

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 65

5.1 สมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง....65

5.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง....65

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

5.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ 65

5.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ 66

5.4.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ 66

5.4.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊ส 67

5.4.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติถ่านชาร์ 67

5.5 ข้อเสนอแนะ 67

รายการอ้างอิง 68

ภาคผนวก...69

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1.1	ตารางแสดงผลการสำรวจผลผลิตมันสำปะหลังในปี 2556-2560	5
2.1	ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552	16
4.1	ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ของเหง้ามันสำปะหลัง	43
4.2	ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเหง้ามันสำปะหลัง	44
4.3	เปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส	52
4.4	ปริมาณน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ	53
4.5	องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ	54
4.6	แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด และปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ	55
4.7	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบตามช่วงจุดเดือดของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ	56
4.8	ตารางแสดงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา	57
4.9	ตารางแสดงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์	59
4.10	ตารางแสดงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว	60
4.11	ตารางแสดงสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้ว ในอัตราส่วน 1:1	61
4.12	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง	62
4.13	องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊ส	63
ก-1	ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	70
ก-2	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	70
ก-3	ผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	70
ก-4	ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	71
ข-1	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	72
ข-2	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	72

ข-3	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1 ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	72
ค-1	องค์ประกอบของสารตามคาบจุดเดือด	73
ง-1	ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทเมทรี	74
ง-2	ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทเมทรี	76
ง-3	ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทเมทรี	78
ง-4	ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1 ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทเมทรี	79

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

รูปภาพ		หน้า
2.1	พาราฟินที่พบในน้ำมันดิบ	10
2.2	แนฟทีนที่พบในน้ำมันดิบ	10
2.3	แอโรมาติกที่พบในน้ำมันดิบ	11
2.4	แนฟทีโน-แอโรมาติกที่พบในน้ำมันดิบ	11
2.5	โครงสร้างของเซลลูโลส	18
2.6	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	18
2.7	หน่วยย่อยของเฮมิเซลลูโลส	18
2.8	หน่วยย่อยของลิกนิน	19
2.9	ลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลลิกนิน	19
2.10	วงจรการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	26
3.1	เครื่องคัดขนาด Endecott SHAKER EFL1 mk3	33
3.2	แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	33
3.3	เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง	34
3.4	เตาเผา	35
3.5	เครื่อง Bomb Calorimeter	35
3.6	เครื่องไตเตรท	36
3.7	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น	37
3.8	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรมิเตอร์	37
3.9	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	38
3.10	เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	38
3.11	เหง้ามันสำปะหลัง	39
4.1	ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง	44
4.2	แผนภูมิแสดงผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	45
4.3	แผนภูมิแสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	46
4.4	แผนภูมิแสดงผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	47
4.5	แผนภูมิแสดงผลซองอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.6	แผนภูมิแสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	49
4.7	แผนภูมิแสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	50
4.8	แผนภูมิแสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1 ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	51
4.9	ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลัง	53
4.10	โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	57
4.11	โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์	58
4.12	โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว	59
4.13	โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1	61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังดำเนินไปตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคม ซึ่งการดำเนินตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจนั้นมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานสำหรับขับเคลื่อน และดำเนินการให้เป็นไปตามแผน แหล่งพลังงานหลักของโลกคือปิโตรเลียม แต่ปิโตรเลียมเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่ค่อนข้างจำกัด และลดน้อยลงไปทุกวัน ทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มมีการศึกษาค้นคว้า และหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลังงานปิโตรเลียม ซึ่งพลังงานทดแทนมีหลายประเภท ได้แก่ พลังงานทดแทนที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ถ่านหิน นิวเคลียร์ หินน้ำมัน ทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานหมุนเวียน หรือ renewable energy ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานจากขยะ และ พลังงานชีวมวล

ประเทศไทย เป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นปริมาณมาก ขยายไปทั่วทุกภูมิภาคเช่น การทำนาข้าว ทำไร่ข้าวโพด ไร่อ้อย ปลูกมันสำปะหลัง เป็นต้น ทำให้มีผลพลอยได้จากการเกษตรที่สำคัญ คือ วัสดุชีวมวลเหลือใช้เป็นปริมาณมาก วัสดุชีวมวลมีองค์ประกอบที่ให้พลังงานได้ดี จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับนำวัสดุชีวมวลมาเป็นแหล่งพลังงานทางเลือก อีกทั้งประเทศไทยมีการปลูกมันสำปะหลังทั่วทุกพื้นที่ของประเทศไทย จากข้อมูลของสมาคมสมาคมการค้ามันสำปะหลังแห่งประเทศไทยมีปริมาณการปลูกมันสำปะหลังตั้งแต่ปี 2556-2560 ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงผลการสำรวจผลผลิตมันสำปะหลังในปี 2556-2560

ปี	2555/56	2556/57	2557/58	2558/59	2559/60
พื้นที่เก็บเกี่ยว (ไร่)	8,138,953	8,656,942	8,697,948	8,919,803	8,637,870
ผลผลิตหัวมันสดรวม (ตัน)	28,275,565	30,227,542	33,610,487	30,557,857	31,187,276
ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ (ตัน/ไร่)	3.474	3.492	3.864	3.426	3.611

จากข้อมูลข้างต้นเห็นได้ว่ามีผลผลิตมันสำปะหลังมากถึง 30 ล้านตันต่อปี ซึ่งส่วนที่นับเป็นผลผลิตคือส่วนที่เป็นรากซึ่งเป็นแหล่งสะสมสารอาหารนั่นเอง ทำให้ส่วนอื่นๆ ของต้นมันสำปะหลัง เช่น เหง้ามันสำปะหลัง เหลือทิ้งเป็นปริมาณมาก จากข้อมูลของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงานรายงานว่าทุกหนึ่งตันผลผลิตมันสำปะหลังจะมีเหง้ามันสำปะหลังเหลือทิ้ง 0.2 ตัน หรือมากถึงปีละ 6,000,000 ตันต่อปี ซึ่งเหง้ามันสำปะหลังจะถูกนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพียง 2.7% และเหลือทิ้งมากถึง 97.3% ทุกปี งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการเปลี่ยนเหง้ามันสำปะหลังเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยใช้กระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง โดยกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เป็นกระบวนการให้ความร้อนในภาวะอับอากาศหรือปราศจากออกซิเจน เมื่อเหง้ามันสำปะหลังได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนหรือเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จะมีสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม อีกทั้งยังมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนหรือเพื่อความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้มากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง และเนื่องจากปัจจุบันตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ร่วมกับกระบวนการไพโรไลซิสมีหลายชนิด งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังโดยแบ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ในงานวิจัยนี้ศึกษาแคลไซน์โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์

1) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเบส
2) ศึกษาสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลัง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเบส

1.3 ขอบเขตุการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง และผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว และตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ได้แก่ แคลไซน์โดโลไมต์ต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพ

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

1) ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2) วางแผนงานของการวิจัย กำหนดขั้นตอน และวิธีการทดลอง
3) จัดหาและเตรียมวัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์การทดลอง
4) วิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของเหง้ามันสำปะหลัง ดังนี้
    - วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D3173-D3175)
    - วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D3176)
    - วิเคราะห์หาค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง (ASTM D2015)
    - วิเคราะห์ค่าการสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง ด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/Differential Thermal Analysis(TG/DTA)
5) เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ และ FCC โดยเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ในตู้ดูดความชื้นจนกว่าจะใช้งาน
6) ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ และ FCC ที่เตรียมไว้ ออกแบบการทดลองโดยมีตัวแปรที่จะศึกษาดังต่อไปนี้

    6.1) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของวัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลังที่เหมาะสมในช่วง 0.3-3 มิลิเมตร โดยทำการทดลองที่ภาวะดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส, อัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และเลือกขนาดอนุภาคที่ให้ผลการทดลองดีที่สุดมาใช้ในการทดลองลำดับถัดไป

    6.2) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาในช่วง 400-500 องศาเซลเซียสโดยใช้วัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลังตามขนาดอนุภาคที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า ที่อัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

    6.3) ศึกษาผลของอัตราการป้อนสารในช่วง 3.2-32.8 กรัมต่อนาที โดยใช้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบเหง้า มันสำปะหลัง และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

    6.4) ศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนในช่วง 50-250 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที โดยใช้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง อัตราการป้อนสาร ที่ได้ตามการทดลองก่อนหน้า

6.5) ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ และ FCC รวมไปถึงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในช่วงร้อยละ 0-7 โดยน้ำหนัก โดยใช้ภาวะในการทำการทดลองที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า

7) วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ดังนี้
   - วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ (ASTM D2015)
   - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์
   - วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ และผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่อง Gas Chromatography
   - วิเคราะห์ช่วงจุดเดือด (Boiling range distribution) ของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น(Simulation distillation Gas Chromatography Analyzer)
   - วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในน้ำมันชีวภาพตาม ASTM D524-04
   - วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพ (Total acid number)

8) วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา และผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด และเบสต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพของไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

Chulalongkorn University

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม (Petroleum)

ปิโตรเลียม[2,10,23] มาจากคำในภาษาละตินคือคำว่า เพทรา (Petra) ซึ่งแปลว่า หิน และคำว่า โอลิอุม (Oleum) ซึ่งแปลว่าน้ำมัน เมื่อนำสองคำรวมกันแล้วได้คำที่มีความหมายว่าน้ำมันที่ได้จากหิน ปิโตรเลียมเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สลับซับซ้อน เกิดจากการทับถมและสลายตัวของอินทรีย์สารจากพืชและสัตว์ที่คลุกเคล้าอยู่กับ ตะกอนในชั้นกรวดทรายและโคลนตมใต้พื้นดิน เมื่อเวลาผ่านไปนับล้านปีตะกอนเหล่านี้จะจมตัวลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของผิวโลกด้วยภาวะความดันและความร้อนสูง รวมทั้งอยู่ในบริเวณที่มีปริมาณออกซิเจนจำกัด จึงสลายตัวเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติแทรกอยู่ระหว่างชั้นหินที่มีรูพรุน ปิโตรเลียมจากแหล่งต่างกันจะมีปริมาณของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน รวมทั้งปริมาณสารประกอบของกำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจนแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของซากพืชและสัตว์ที่เป็นต้นกำเนิดของปิโตรเลียมนั้นรวมถึงอิทธิพลของแรงที่ทับถมอยู่บนตะกอน ปิโตรเลียมที่เกิดอยู่ในชั้นหินจะมีการเคลื่อนตัวออกไปตามรอยแตกและรูพรุนของหินไปสู่ที่มีระดับความลึกเล็กน้อยกว่าแล้วสะสมตัวอยู่ในโครงสร้างหินที่มีรูพรุน มีโพรงหรือรอยแตกในเนื้อหินที่ สามารถให้ปิโตรเลียมสะสมตัวอยู่ได้ ด้านบนเป็นหินตะกอนหรือหินดินดานเนื้อแน่นละเอียดปิดกั้นไม่ให้ปิโตรเลียมไหลลอดออกไปได้ โครงสร้างปิดกั้นดังกล่าวนี้เรียกว่า แหล่งกักเก็บปิโตรเลียม

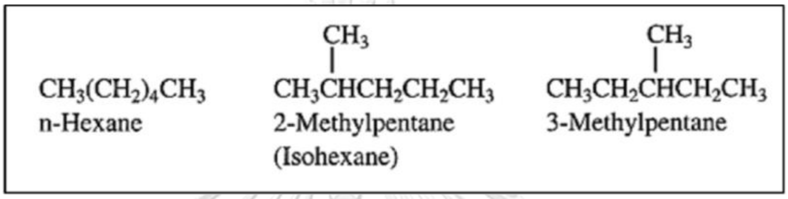
ปิโตรเลียมมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก คือ คาร์บอน และ โฮโดรเจน เมื่อนำปิโตรเลียมมากลั่นจะได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ก๊าซหุงต้ม น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา ยางมะตอย และเคมีภัณฑ์ต่างๆ เช่น พลาสติก และยางสังเคราะห์ เป็นต้น ปิโตรเลียมสามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิดได้แก่ น้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ

2.1.1 น้ำมันดิบ

น้ำมันดิบแต่ละแหล่งก็จะมีองค์ประกอบและสมบัติทางกายภาพแตกต่างกันออกไป เช่น มีลักษณะข้นเหนียวจนถึงหนืดคล้ายยางมะตอย มีสีเหลือง เขียว น้ำตาลจนถึงดำ ส่วนใหญ่มักประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดระเหยง่าย สามารถบ่างได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ พาราฟิน (paraffin) แนฟทีน (naphthenes) และแอโรแมติก (aromatics)

1. พาราฟิน (Paraffin) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) หรือ เรียกว่า แอลเคน (alkanes) ประกอบด้วย

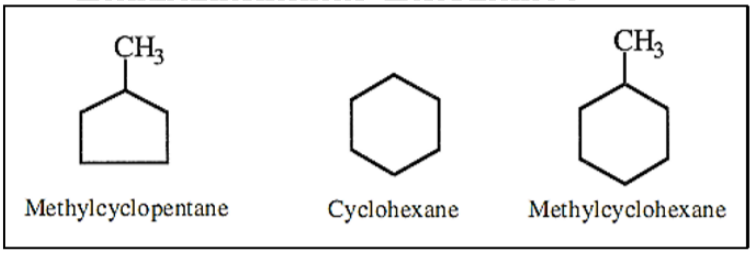
- นอร์มัลพาราฟิน (normal-paraffin) คือ พาราฟินแบบโซ่ตรง เช่น นอร์มัลเฮกเซน (n-Hexane)
- ไอโซพาราฟิน (isoparaffins) คือ พาราฟินที่มีหมู่เมทิลต่อยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 เช่น 2-เมทิลเพนเทน (2-Methylpentane) หรือ ไอโซเฮกเซน (Isohexane)
- พาราฟินแบบกิ่ง (branched paraffins) คือ พาราฟินที่มีกิ่งหรือสาขาแตกออกจากสายโซ่โมเลกุลหลักซึ่งมีหมู่แอลคิลต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งต่างๆ ที่ไม่ใช่ตำแหน่งที่ 2 และมักจะเป็นหมู่ เมทิลมากกว่าหมู่แอลคิลอื่นๆ เช่น 3-เมทิลเพนเทน (3-Methylpentane)



รูปที่ 2.1 พาราฟินที่พบในน้ำมันดิบ[2]

2. แนฟทีน (naphthenes) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหรือเรียกว่า ไซโคล แอลเคน (cycloalkanes) แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียมส่วนใหญ่เป็นวงขนาดห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.2 แนฟทีนขนาดสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมค่อนข้างไวต่อปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากความเครียดของวงจึงมักเปลี่ยนเป็นสารอื่น แนฟทีนที่เป็นวงห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยมสามารถเปลี่ยนให้เป็นสารแอโรแมติกได้ โดยการทำให้ไฮโดรเจนหลุดออกจากโมเลกุล

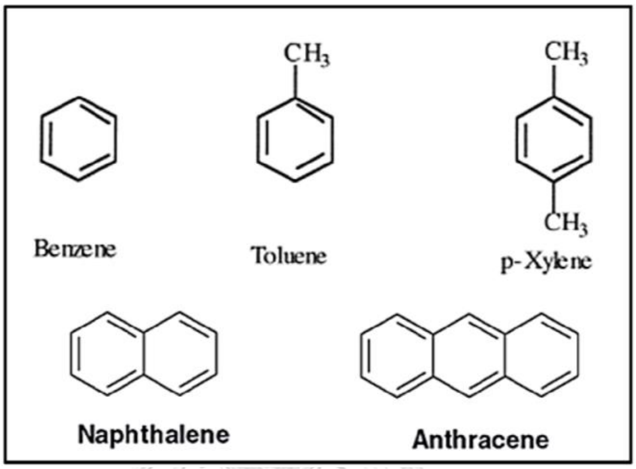
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



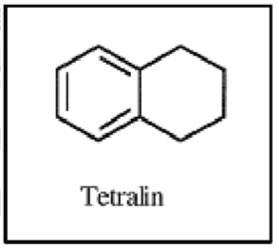
รูปที่ 2.2 แนฟทีนที่พบในน้ำมันดิบ[2]

3. แอโรแมติก (aromatic) เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวงหกเหลี่ยม มีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เช่น เบนซีน (benzene) เป็นต้น มักพบในส่วนกลั่นหนัก เช่น แก๊สออยล์ ฐ้ามันหล่อลื่นและกากการกลั่น อนุพันธ์ของเบนซีนได้แก่ โทลูอีน (toluene) และไซลีน (xylene) มัก พบ

มากที่สุดอยู่ในปิโตรเลียม สารที่มีวงแอโรแมติกหลายวงแนบต่อกัน เช่น แนฟทาลีน (naphalene) และแอนทราซีน (antracene) และสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างผสมระหว่างแนฟทีนและแอโรแมติก เรียกว่า แนฟทีโน-แอโรแมติก (naphtheno-aromatics) เช่น เตตระไฮโดรแนฟทาลีน (tetrahydronaphthalene) หรือเตตระลิน (tetralin) ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในภาพที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แอโรมาติกที่พบในน้ำมันดิบ[2]



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.4 แนฟทีโน-แอโรมาติกที่พบในน้ำมันดิบ[2]

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ

แก๊สธรรมชาติ เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มวลโมเลกุลต่ำ มีสถานะเป็นแก๊สที่ความดันและอุณหภูมิปกติ ได้แก่ มีเทน (methane) อีเทน (ethane) โพรเพน (propane) และบิวเทน (buthane) นอกจากสถานะที่เป็นแก๊สแล้ว แก๊สธรรมชาติยังมีส่วนประกอบที่มีสถานะเป็นของเหลวซึ่งประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่มเดียวกันแต่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากกว่าทำให้เมื่อแหล่งกักเก็บใต้ผิวโลกที่มีอุณหภูมิสูงจึงทำให้อยู่ในสถานะแก๊ส เมื่อนำขึ้นมาสู่ผิวดินที่ภาวะความ

ดันและอุณหภูมิปกติจึงกลับสู่สถานะของเหลว เรียกว่าแก๊สธรรมชาติเหลว เราสามารถใช้ประโยชน์จากแก๊สธรรมชาติได้ดังนี้

1. ใช้เป็นเชื้อเพลิง แก๊สธรรมชาติถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า หรือในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมสุขภัณฑ์ ฯลฯ หรือสามารถนำมาใช้ในระบบ Co-generation และใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะที่เรียกว่าแก๊สธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural Gas for Vehicles: NGV)
2. ผลิตภัณฑ์แก๊สธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการแยกแก๊สธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ดังนี้
   - แก๊สมีเทน (C_1) ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ในโรงงานอุตสาหกรรม และ นำไปอัดใส่ถังด้วยความดันสูงเรียกว่าแก๊สธรรมชาติอัด สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ รู้จักกันในชื่อว่า "แก๊สธรรมชาติสำหรับยานยนต์" (Natural Gas for Vehicles : NGV)
   - แก๊สอีเทน (C_2) ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น สามารถนำไปใช้ผลิตเม็ดพลาสติก เส้นใยพลาสติกชนิดต่างๆ เพื่อนำไปใช้แปรรูปต่อไป
   - แก๊สโพรเพน (C_3) และแก๊สบิวเทน (C_4) ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้นเช่นเดียวกัน แต่หากนำแก๊สโพรเพนและบิวเทนมาผสมกัน อัดใส่ถังเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied Petroleum Gas – LPG) หรือที่รู้จักกันในชื่อว่าแก๊สหุงต้มใช้เป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือน เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ และเชื้อเพลิงในการเชื่อมโลหะ รวมทั้งนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมบางประเภทอีกด้วย
   - ไฮโดรคาร์บอนเหลว (Heavier Hydrocarbon) อยู่ในสถานะที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ เมื่อผลิตขึ้นมาถึงปากบ่อบนแท่นผลิตสามารถแยกจากไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊สบนแท่นผลิต เรียกว่า คอนเดนเสท (condensate) สามารถลำเลียงขนส่งโดยทางเรือหรือ ทางท่อ นำไปกลั่นเป็นน้ำมันสำเร็จรูปต่อไป
   - แก๊สโซลีนธรรมชาติ เป็นไฮโดรคาร์บอนเหลวที่หลุดไปกับไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นแก๊สเมื่อผ่านกระบวนการแยกจากโรงแยกแก๊สธรรมชาติแล้วไฮโดรคาร์บอนเหลวเหล่านี้ก็จะถูกแยกออก เรียกว่า แก๊สโซลีนธรรมชาติ หรือ NGL (natural gasoline) จากนั้นจะถูกส่งเข้าสู่โรงกลั่นน้ำมัน เป็น ส่วนผสมของผลิตภัณฑ์น้ำมันสำเร็จรูปได้เช่นเดียวกับคอนเดนเสท และยังเป็นตัวทำละลายซึ่ง นำไปใช้ในอุตสาหกรรมบางประเภทได้เช่นกัน
   - แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เมื่อผ่านกระบวนการแยกแล้วจะถูกนำไปทำให้อยู่ในสภาพของแข็ง เรียกว่าน้ำแข็งแห้ง นำไปใช้ในอุตสาหกรรมถนอมอาหาร อุตสาหกรรมน้ำอัดลมและเบียร์ ใช้ในการถนอมอาหารระหว่างการขนส่ง นำไปเป็นวัตถุดิบสำคัญในการทำฝนเทียมและ

นำไปใช้สร้างควันในอุตสาหกรรมบันเทิง อาทิ การแสดงคอนเสิร์ต หรือ การถ่ายทำภาพยนตร์

2.2 พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทน[5] คือ พลังงานที่ใช้ทดแทนพลังงานจากฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม และ แก๊สธรรมชาติซึ่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์มหาศาลอันเป็นสาเหตุโลกร้อน ตัวอย่างพลังงานทดแทนที่สำคัญเช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และเชื้อเพลิงชีวภาพ เป็นต้น ในปี 2555 ประเทศไทยใช้พลังงานทดแทนเพียง 18.2% ของพลังงานทั้งหมด เพิ่มขึ้นจากปีก่อนหน้า เพียง 1.8% โดยที่พลังงานแสงอาทิตย์ และเชื้อเพลิงชีวภาพ เพิ่มขึ้น 23%

ปัจจุบันเรื่องพลังงานเป็นปัญหาใหญ่ของโลก และนับวันจะมีผลกระทบรุนแรงต่อมวลมนุษยชาติมากขึ้นทุกที การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยก็เป็นอีกหนึ่งหน่วยงานที่ให้ความสำคัญในการร่วมหาหนทางแก้ไข ทำการศึกษา ค้นคว้า สำรวจ ทดลอง ติดตามเทคโนโลยีอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการนำพลังงานทดแทนและเทคโนโลยีใหม่ๆในด้านพลังงานทดแทนเข้ามาใช้ในประเทศไทยต่อไป โดยคำนึงถึงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมซึ่งพอจะจำแนกประเภทของพลังงานทดแทนได้ดังนี้

พลังงานแสงอาทิตย์

พลังงานจากดวงอาทิตย์จัดเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญที่สุด เป็นพลังงานสะอาดไม่ทำปฏิกิริยาใดๆอันจะทำให้สิ่งแวดล้อมเป็นพิษ เซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็คทรอนิคส์ชนิดหนึ่ง ที่ถูกนำมาใช้ผลิตไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเปลี่ยนเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ส่วนใหญ่เซลล์แสงอาทิตย์ทำมาจากสารกึ่งตัวนำพวกซิลิคอน มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 44 เปอร์เซ็นต์ ประเทศไทยได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์ในเกณฑ์สูง พลังงานโดยเฉลี่ยซึ่งรับได้ทั่วประเทศประมาณ 4 ถึง 4.5 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อวันซึ่งมีปริมาณสูงกว่าบริเวณที่ห่างจากเส้นศูนย์สูตรออกไปทั้งแนวเหนือ – ใต้

พลังงานลม

พลังงานลมเป็นพลังงานธรรมชาติที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิ 2 ที่ ซึ่งสะอาดและบริสุทธิ์ใช้แล้วไม่มีวันหมดสิ้นไปจากโลก กำลังได้รับความสนใจนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในขณะเดียวกัน กังหันลมก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่สามารถนำพลังงานลมมาใช้ให้เป็นประโยชน์ได้ โดยเฉพาะในการผลิตกระแสไฟฟ้า และในการสูบน้ำ ซึ่งได้ใช้งานกันมาแล้วอย่างแพร่หลายพลังงานลมเกิดจากพลังงานจากดวงอาทิตย์ตกกระทบโลกทำให้อากาศร้อน และลอยตัวสูงขึ้น อากาศจากบริเวณอื่นซึ่งเย็นและหนาแน่นมากกว่าจึงเข้ามาแทนที่ การเคลื่อนที่ของอากาศ

เหล่านี้เป็นสาเหตุให้เกิดลม และมีอิทธิพลต่อสภาพลมฟ้าอากาศในบางพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแนวฝั่งทะเลอันดามันและด้านทะเลจีน(อ่าวไทย) มีพลังงานลมที่อาจนำมาใช้ประโยชน์ในลักษณะพลังงานกล (กังหันสูบน้ำกังหันผลิตไฟฟ้า) ศักยภาพของพลังงานลมที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้สำหรับประเทศไทย มีความเร็ว อยู่ระหว่าง 3 - 5 เมตรต่อวินาที และความเข้มพลังงานลมที่ประเมินไว้ได้อยู่ระหว่าง 20 - 50 วัตต์ต่อตารางเมตร

พลังงานความร้อนใต้พิภพ

พลังงานความร้อนใต้พิภพเป็นการนำเอาพลังงานความร้อนที่อยู่ใต้ดินขึ้นมาใช้ ความร้อนดังกล่าวอยู่ในแกนกลางของโลกเกิดขึ้นมาตั้งแต่โลกกำเนิดขึ้น อุณหภูมิอาจสูงถึง 5,000 องศาเซลเซียส ความร้อนดังกล่าวทำให้น้ำที่เก็บกักอยู่ในโพรงหิน ร้อนมีอุณหภูมิอาจสูงถึง 370 องศาเซลเซียส ความดันภายในโลก ดันน้ำขึ้นมาผิวดิน กลายเป็นไอ ลอยขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศ แล้วตกลงมาเป็นฝนหรือหิมะ แล้วไหลกลับลงไปใต้ดินนำความร้อนขึ้นมาอีก พลังงานนี้จึงถูกเรียกว่า <u>พลังงานหมุนเวียน</u> เราสูบน้ำร้อนนี้ขึ้นมาใช้ให้ความอบอุ่นแก่บ้านเรือนในประเทศหนาว ละลายหิมะตามถนนหนทาง ปรุงอาหาร ให้ความร้อนในเรือนกระจกเพื่อปลูกผักสวนครัว และที่จะกล่าวถึงมากที่สุดในหัวข้อนี้ ก็คือ การนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า

พลังงานชีวมวล

พลังงานชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงที่ได้จากสิ่งมีชีวิตเช่น ไม้ฟืน แกลบ กากอ้อย เศษไม้ เศษหญ้า เศษเหลือทิ้งจากการเกษตร <u>เหล่านี้ใช้เผาให้ความร้อนได้ เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ</u>แบบของแข็ง และความร้อนนี้แหละที่เอาไปปั่นไฟ โดยเหตุที่ประเทศไทยทำการเกษตรอย่างกว้างขวาง วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เช่น แกลบ ขี้เลื่อย ชานอ้อย กากมะพร้าว ซึ่งมีอยู่จำนวนมาก (เทียบได้น้ำมันดิบปีละไม่น้อยกว่า 6,500 ล้านลิตร) ก็ควรจะใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตไฟฟ้าในเชิงพาณิชย์ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

พลังงานน้ำ

พื้นผิวโลกถึงร้อยละ 70 ปกคลุมด้วยน้ำ ซึ่งมีความสำคัญยิ่งต่อสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย น้ำเหล่านี้มีการเปลี่ยนสถานะและหมุนเวียนอยู่ตลอดเวลา ระหว่างผิวโลกและบรรยากาศอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเรียกว่า วัฏจักรของน้ำ น้ำที่กำลังเคลื่อนที่มีพลังงานสะสมอยู่มาก และมนุษย์รู้จักนำพลังงานนี้มาใช้หลายร้อยปีแล้ว เช่น ใช้หมุนกังหันน้ำ ปัจจุบันมีการนำพลังงานน้ำไปหมุนกังหันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าพลังน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้า

พลังงานขยะ

<u>ขยะชุมชน</u>จากบ้านเรือนและกิจการต่างๆ เป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูง ขยะเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นมวลชีวภาพ เช่น กระดาษ เศษอาหาร และไม้ ซึ่งสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าที่ถูก

ออกแบบให้ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิงได้ โรงไฟฟ้าที่ใช้ขยะเป็นเชื้อเพลิง จะนำขยะมาเผาบนตะแกรง ความร้อนที่เกิดขึ้นใช้ต้มน้ำในหม้อน้ำจนกลายเป็นไอน้ำเดือด ซึ่งจะไปเพิ่มแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.3 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass)[3] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้งานชีวมวลเพื่อทำให้ได้พลังงานอาจจะทำโดยนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล (เช่น น้ำมัน) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเล่านี้มีแหล่งที่มาต่าง ๆ กัน อาทิ พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (agricultural residues) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) หรือของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน ตัวอย่างเช่น แกลบ ซังข้าวโพด กากมันสำปะหลัง และเหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น การเปลี่ยนชีวมวลเหล่านี้ให้เป็นพลังงานชีวมวลสามารถทำได้หลายแบบดังต่อไปนี้

1. **การเผาไหม้โดยตรง (combustion)** เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้ความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่าง ชีวมวลประเภทนี้ คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้
2. **การผลิตก๊าซ (gasification)** เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า แก๊สชีวภาพ (biogas) มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้กับกังหันแก๊ส (gas turbine)
3. **การหมัก (fermentation)** เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า
4. **การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช** มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้
   4.1 กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลังให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน
   4.2 กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (trans esterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล
   4.3 กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้ความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัว เกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

2.3.1 ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย

ประเทศไทย [6] นับเป็นประเทศเกษตรกรรมที่สำคัญแห่งหนึ่งของโลก ประชาชนมากกว่าร้อยละ 50 ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ผลพลอยได้ที่สำคัญนอกเหนือจากผลผลิตการเกษตรก็คือ วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กากอ้อย กาก ใย และทะลายปาล์ม เป็นต้น ปริมาณชีวมวลจากเศษ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ

สำหรับศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากผลคูณของปริมาณผลผลิตทางการ เกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ กับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นปริมาณชีวมวล ตารางข้างล่างแสดง ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2552 [7]

ชนิด	**ผลผลิต (ตัน)**	**ชีวมวล**	**ปริมาณชีวมวล (ตัน)**	**ค่าความร้อน (MJ/Kg)**	**ศักยภาพพลังงาน**	
					(TJ)	**(ktoe)**
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,646,547.96	10.24	262,625.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ใบ	170,383.17	19.44	3,312.25	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ทะลายเปล่า	1,024,868.34	17.86	18,304.15	433.29
		ใย	162,970.06	17.62	2,871.53	67.97
		กะลา	38,959.04	18.46	719.18	17.02
		ก้าน	2,203,740	9.83	21,824.24	516.62
มันสำปะหลัง	30,088,025	ลำต้น	2,439,236.19	18.42	44,930.73	1,063.60
		เหง้า	1,834,466.88	18.42	33,790.88	799.89
มะพร้าว	1,380,980	ก้าน	628,990.82	15.40	9,686.46	229.30
		กาบ	464,250.95	16.23	7,534.79	178.36
		กะลา	128,936.58	17.93	2,311.83	54.73
ไม้ยางพารา	3,090,280	กิ่ง/ก้าน	312,118.28	14.98	4,675.53	110.68
รวม	1458,53,073		59,539,905.20		504,339.40	11,938.67

2.3.2 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบชีวมวล [20] หรือสารทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ

1) ความชื้น (Moisture) หมายถึงปริมาณน้ำที่อยู่ในชีวมวล ส่วนมากจะมีความชื้นค่อนข้างสูง เพราะเป็นผลผลิตทางการเกษตร ถ้าต้องการนำชีวมวลไปเผาไหม้ ความชื้นของชีวมวลไม่ควรเกินร้อยละ 50
2) คาร์บอนคงที่ (Fixed Carbon) เป็นส่วนที่เสถียรของโครงสร้างโมเลกุลของชีวมวลส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอน ชีวมวลที่มีเปอร์เซ็นคาร์บอนคงที่ต่ำหรือน้อยจะสันดาปได้ไม่ดี มีอุณหภูมิจุดติดไฟต่ำ ความรวดเร็วในการติดไฟช้าเนื่องจากมีความชื้นมาก
3) สารระเหย (Volatile Matter) คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ได้ง่าย ดังนั้นชีวมวลใดที่มีค่าสารระเหยสูงจะติดไฟได้ง่าย
4) ขี้เถ้า (Ash) เป็นส่วนประกอบอนินทรีย์ที่มีอยู่เดิมในชีวมวลที่ถูกออกซิไดซ์สมบูรณ์ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีเถ้าร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบและฟางข้าวจะมีสัดส่วนขี้เถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งจะมีปัญหาในการเผาไหม้

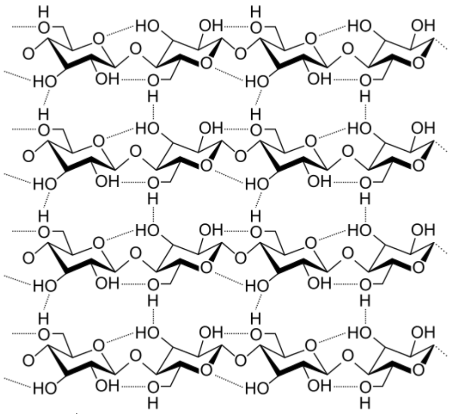
องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของชีวมวล [1] ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันออกไปขึ้นกับชนิดและภาวะการเจริญเติบโตของพืชนั้น

เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลีแซคคาไรด์ ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของดีกลูโคส (D-glucose) หลายโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายโซ่ แต่ละโมเลกุลจับกันด้วยพันธะ 1,4-ไกลโคซิดิก (1,4-glycosidic) ที่คาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 1 ของกลูโคสกับคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 4 ของกลูโคสโมเลกุลถัดไป

รูปแบบของการจัดเรียงตัวของหน่วยดีกลูโคสอยู่ในลักษณะเป็นรูปเก้าอี้ (Chair form) แต่ละโมเลกุลในหน่วยเซลลูโลสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group, -OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวนของโมเลกุลถัดไป และเชื่อมต่อระหว่างสายเซลลูโลสที่ขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลดีกลูโคสในอีกสายหนึ่ง เซลลูโลสมีสูตรเคมีทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เมื่อ n คือจำนวนโมเลกุลของดีกลูโคสที่ประกอบเป็นโครงสร้างเซลลูโลสทั้งหมด

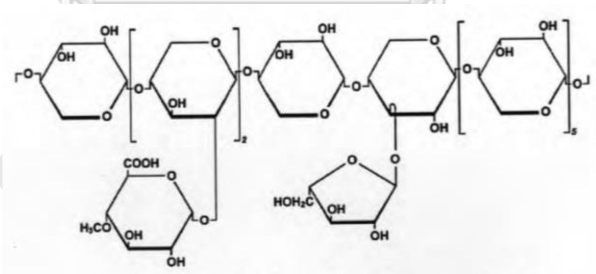
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



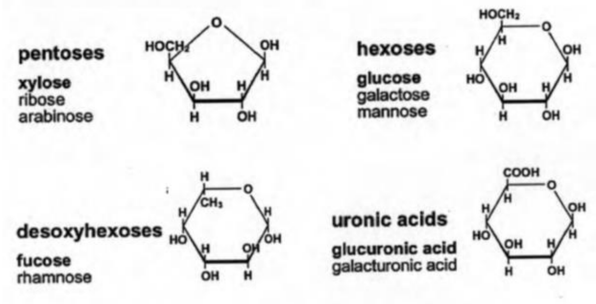
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของเซลลูโลส[9]

เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารอินทรีย์ที่พบมากเป็นอับสองในพืชรองจากเซลลูโลส มีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเพนโตส (Pentose) ซึ่งส่วนมากเป็นดีไซแลน (D-xylan) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส (Xylose) หลายๆ โมเลกุลที่ต่อกันด้วยพันธะ เบต้า-1,4-ไกลโคสิดิก สายพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเฮทเทอโรจีเนียส (Heterogeneous) ประกอบด้วยพอลิแซคคาไรด์หลายชนิดปนกัน คือ เพนโตแซน (Pentosan) เฮกโซแซน (Hexosan) และพอลิยูโรไนด์ (Polyuronides) ดังภาพ 2.6 และ 2.7 เฮมิเซลลูโลสมีความยาวประมาณ 40 หน่วยกลูโคส และมีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{12}O_5)_{2n}$



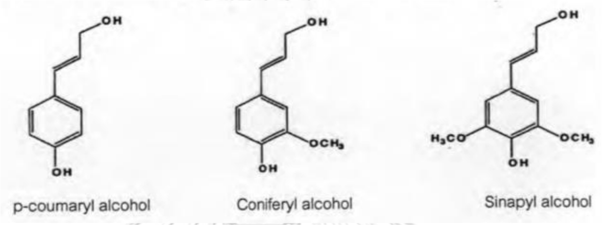
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส[10]



รูปที่ 2.7 หน่วยย่อยของเฮมิเซลลูโลส[10]

ลิกนิน (Lignin)

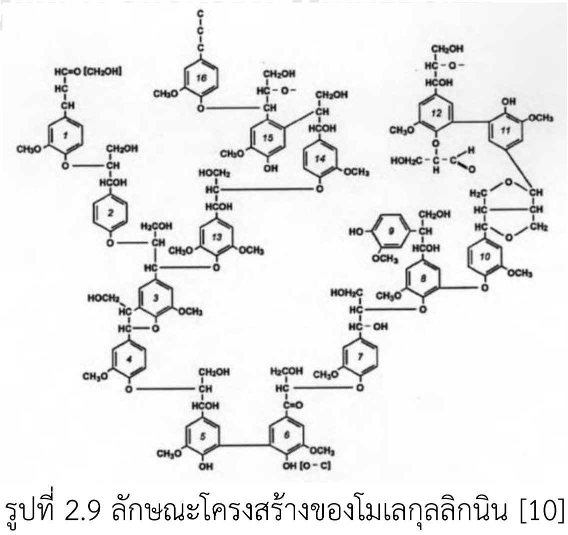
ลิกนินเป็นสารประกอบอะโรมาติกเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง พบได้ในผนังเซลล์ของพืช รองลงมาจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งทำหน้าที่เหมือนตัวเชื่อมประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงของไม้ ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด โครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_9H_{7.95}O_{2.4}(OCH_3)_{0.92}$ มีมวลโมเลกุลประมาณ 184 ต่อหนึ่งมอนอเมอร์ สามารถแบ่งหน่วยย่อยของลิกนินได้ 3 ชนิด ได้แก่ p-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol และ sinapyl alcohol ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หน่วยย่อยของลิกนิน [10]

ลิกนินจะไม่อยู่ในลักษณะเดียว แต่จะเกาะกันเป็นสายยาวดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีอยู่หลายแบบ มีส่วนสำคัญคือ โครงสร้างที่เป็นอะโรมาติกที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซิ (methoxyl group, $-OCH_3$) เป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 14 และมีหมู่ฟีนอลิค (phenolic group) เป็นส่วนประกอบด้วย ลิกนินไม่มีสมบัติยืดหยุ่นและไม่ละลายน้ำ ดังนั้นพืชที่มีองค์ประกอบเป็นลิกนินมากจะมีความแข็งแรงและทนทานมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลลิกนิน [10]

2.4 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส [25] คือ กระบวนการแตกตัวหรือสลายตัวของสารประกอบหรือวัสดุต่างๆ ด้วยความร้อนขนาดปานกลางที่อุณหภูมิประมาณ 400-800 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนหรือมีออกซิเจนในปริมาณน้อยมาก โดยทั่วไปผลผลิตที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดตามสถานะคือ แก๊ส ของเหลว (ซึ่งโดยทั่วไปมีคุณลักษณะคล้ายน้ำมัน) และของแข็ง (char) เป็นผลิตภัณฑ์ขั้นปฐมภูมิ (Primary Products) อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ เช่น อุณหภูมิ อัตราเร็วในการให้ความร้อน เป็นต้น แต่โดยตัวกระบวนการไพโรไลซิสเองแล้ว ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด คือ ของเหลวหรือน้ำมัน ส่วนแก๊สที่ได้นิยมนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการไพโรไลซิส

ปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วย ขั้นแรกการสลายตัวของสารที่ระเหยง่ายออกจากวัตถุดิบ (devolatilization) ขั้นที่สองเป็นการแตกตัวของวัตถุดิบเอง โดยที่องค์ประกอบที่สามารถแตกตัวได้ที่ภาวะที่ใช้ก็จะแตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลที่เล็กลง และเล็กลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ให้หรืออุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งเกิดการแตกตัวที่สมบูรณ์ของวัตถุดิบ โดยอุณหภูมิในแต่ละขั้นแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ แต่อย่างไรก็ตามถ้ามีการให้ความร้อนและเวลามากเกินไปสารที่ได้จากการแตกตัวของวัตถุดิบจะกลับมารวมตัวกันเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่อีกครั้งและได้ผลิตภัณฑ์ที่ด้อยคุณภาพจากกระบวนการ ดังนั้นภาวะที่ใช้ในการไพโรไลซิสจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ด้วยการมีความรู้อย่างดีเกี่ยวกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้าในกระบวนการจะทำให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพในปริมาณที่สูง และไม่ก่อให้เกิดผลผลิตที่ไม่ต้องการหรือก่อให้เกิดผลผลิตที่ทำให้ต้องหยุดการผลิตชั่วคราวเพื่อทำการซ่อมแซมอุปกรณ์

การเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสภายในเครื่องปฏิกรณ์นั้น สารผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่เป็นของเหลวและแก๊สนั้นในตอนเริ่มต้นของปฏิกิริยาจะเกิดเป็นแก๊สทั้งหมดภายในเครื่องปฏิกรณ์ แต่เมื่อมีการลดอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์ลงมาที่อุณหภูมิปกติจึงจะได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวออกมา ดังนั้นในกระบวนการไพโรไลซิสจึงต้องมีส่วนที่ลดความร้อนและควบแน่นผลิตภัณฑ์ของเหลวเพื่อใช้ในการแยกระหว่างแก๊สผลิตภัณฑ์และน้ำมันไพโรไลซิส ส่วนของแข็งที่เกิดระหว่างปฏิกิริยาจะใช้วิธีการแยกออกภายในเครื่องปฏิกรณ์จะติดออกมากับแก๊สผลิตภัณฑ์น้อยมากและภายหลังจากการกลั่น ของแข็งที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสก็จะถูกแยกออกไปอย่างสมบูรณ์ การควบแน่นแก๊สที่เกิดขึ้นนั้นมีผลิตภัณฑ์สถานะแก๊สและของเหลวผสมกันอยู่ ซึ่งจะต้องทำการแยกผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวออกจากกัน การระบายความร้อนออกจากแก๊สโดยน้ำหล่อเย็นที่ใช้อุณหภูมิอยู่ที่ 25-30 องศาเซลเซียส ถ้าแก๊สควบแน่นไม่สมบูรณ์ในแก๊สอาจจะมีส่วนประกอบของน้ำมันปนออกมาเล็กน้อย อีก ผลิตภัณฑ์

หนึ่งก็คือของเหลวซึ่งมีลักษณะคล้ายน้ำมันดิบนั้นนำไปกลั่นและปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานต่อไป

ในบางครั้งอาจมีการเติมไฮโดรเจนหรือไอน้ำเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิสด้วย ทั้งนี้เพื่อเพิ่มการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์และบางครั้งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนจะเข้าไปรบกวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยออกซิเจนที่มีอยู่ในเนื้อของวัตถุดิบ การเติมน้ำในปริมาณไม่มากเกินไปเข้าไปเป็นตัวกลางในกระบวนการไพโรไลซิสจะทำให้ไปเพิ่มความดันให้กับกระบวนการ ทำให้วัตถุดิบเกิดเป็นของไหลได้ง่ายและทำให้ถ่านที่ได้จากกระบวนการมีค่าพื้นที่ผิวสูงขึ้น (ในกรณีที่ต้องการผลิตเป็นถ่านกัมมันต์หรือถ่านดูดซับ) เป็นต้น นอกจากนี้อาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานั้นทำหน้าที่ช่วยในการแตกตัวของวัตถุดิบและช่วยให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเฉพาะเจาะจงมากยิ่งขึ้น

2.5 การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [8,19] สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดดังนี้

2.5.1 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน

การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง หากมีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ดีจะสามารถทำให้การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่ต้องการได้มากที่สุด แต่หากมีการให้ความร้อนมากเกินพอดีอาจทำให้การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากเกินไป จะได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนภาวะแก๊ส C1 - C4 ซึ่งไม่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน ส่วนที่มีแขนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) อาจทำปฏิกิริยากันเองเนื่องจากมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา

กระบวนการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบต่อเนื่องแบบลูกโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นเริ่มต้น (initiation step) เป็นขั้นตอนในการเกิดอนุมูลอิสระ เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการแตกพันธะของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้น ต่อไปดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\text{R-CH2-CH2-CH2-CH2-CH2-R} \longrightarrow \text{R-CH2-CH2-CH2-CH2-CH2}\bullet + \text{R}\bullet \qquad (2.1)$$

2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระท้า ปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง เกิดการเปลี่ยนรูปของไอโซเมอร์และมีการแตกพันธะเป็นโมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระอาจท้า ปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นอีก ท้าให้ได้เป็นโมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.2

β-scission

R-CH2-CH2-CH2-CH2-•CH2 ⟶ R-CH2- CH2-•CH2 + CH2=CH2

R-CH2- CH2-•CH2 ⟶ R-CH2-CH2=CH2 + H•

Chain transfer

R-CH2-(CH2)4-CH3 + H• ⟶ R•-CH2-(CH2)4-CH3 (2.2)

3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดียวหรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ดังแสดงในสมการที่ 2.3

R• + R• ⟶ R-R

R-CH2-•CH2 + •CH2-CH2-R ⟶ R-CH2-CH3 + CH2=CH-R (2.3)

2.5.2 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

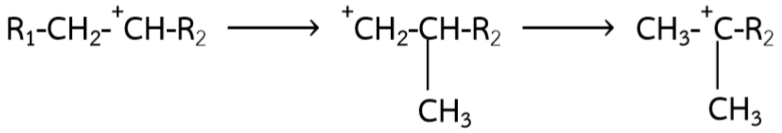
การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการสลายพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างตามที่ต้องการ กลไกของการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

1. การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอเนียมไอออน (carbonium ion) คือ การที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรด์ไอออน (hydride ion) ซึ่งมีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูง ทำให้คาร์บอเนียมไอออนมีสภาพที่เป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีความเสถียรภาพแตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างของไอออน ซึ่งโครงสร้างของไอออนแบบ tertiary ion จะมีเสถียรภาพที่มากกว่าแบบ secondary ion และแบบ primary ion ตามลำดับ ดังแสดงในสมการที่ 2.4

R1-CH2-CH2-R2 ⟶ R1-CH=CH-R2 + H2

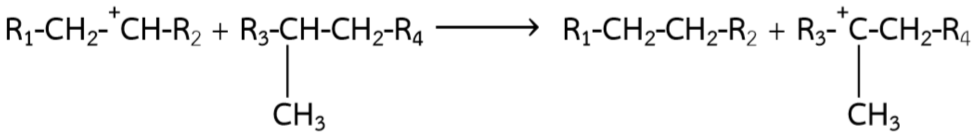
R1-CH=CH-R2 + H+ ⟶ R1-CH2-+CH-R2 (2.4)

2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์โบเนียมไอออน ซึ่งเกิดจากความเสถียรที่แตกต่างกันของโครงสร้างของคาร์โบเนียมไอออนแต่ละลักษณะ จึงการเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลเพื่อให้ได้โครงสร้างของคาร์โบเนียมไอออนที่มีความเสถียร ดังแสดงในสมการที่ 2.5



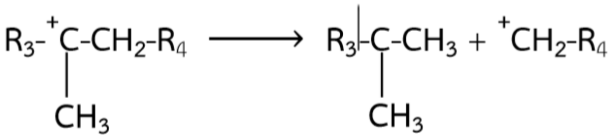
(2.5)

แล้วจึงเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (hydride transfer) ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอเนียม ไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังแสดงในสมการที่ 2.6



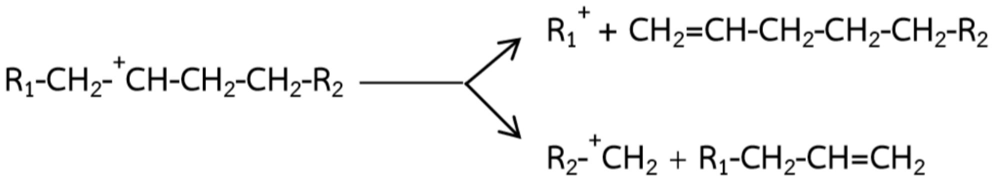
(2.6)

คาร์บอเนียมไอออนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาหรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่ง β โดยนับจากจุดที่มีประจุบวก ทำให้ได้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอเนียมไอออนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง โดยส่วนมากมักเป็น primary carbonium ion ดังแสดงในสมการที่ 2.7



(2.7)

คาร์บอเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้หลายลักษณะ เช่น ตัวอย่างของ secondary carbonium ion ดังแสดงในสมการที่ 2.8



(2.8)

หาก R1 เป็น H จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังแสดงในสมการที่ 2.9

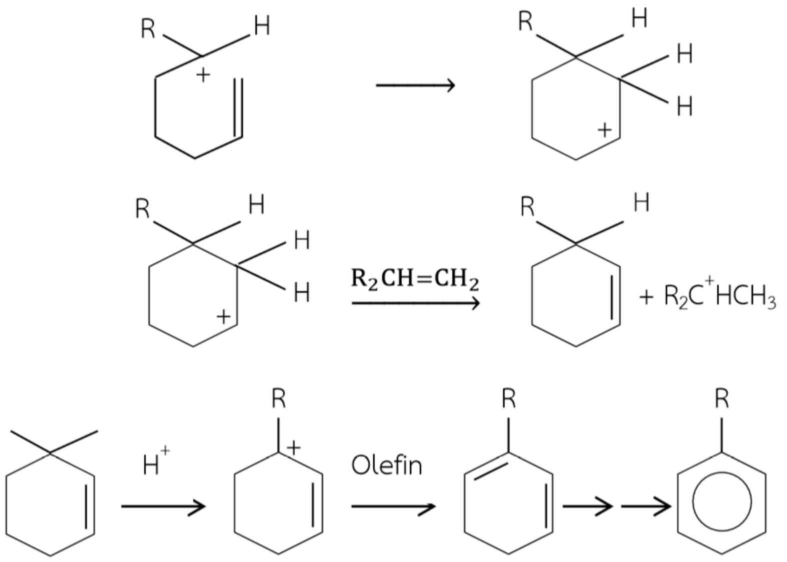
CH3-+CH-CH2-CH2-R ⟶ CH3-CH=CH2 + +R-CH2 (2.9)

ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ โพรพีน จะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอเนียมไอออนซึ่งไม่ สามารถเกิด β-scission ต่อไปได้อีก ดังแสดงในสมการที่ 2.10

CH3-CH=CH2 + +H ⟶ CH3-+CH-CH3 (2.10)

Isopropyl carbonium ion สามารถเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮไดร์ดกับโมเลกุลสารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นในระบบได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจสูญเสียโปรตอนและได้โพรพีนเป็น ผลิตภัณฑ์ สำหรับแอโรแมติกซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา dehydrocyclization โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอ เนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา β-scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion มีลักษณะเป็นวง แหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟินโดยเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ allylic carbonium ion ที่มีความเสถียรและรับโปรตรอนจาก cyclohexadine สุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก ดังแสดงในสมการที่ 2.11

R-CH2-CH2-CH2-CH2-CH2=CH2 ⟶ R-+CH-CH2-CH2-CH2-CH2=CH2



(2.11)

การแตกพันธะโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วย แก๊สที่มีโอเลฟินสูง เกิดเป็นวงเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกแอโรแมติกและโอเลฟินมาก ส่วนของกากน้ำมันและโค้ก (coke) จะเกาะอยู่บนบริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้พื้นที่ผิวและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.3 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา

กระบวนการนี้เป็นการรวมปฏิกิริยาเกี่ยวกับคาร์โบเนียมไอออนของกระบวนการการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิริยาเข้ากับปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ผลก็คือเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงมากปฏิกิริยาของพาราฟิน และแนฟทีนเริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วโอเลฟินก็จะไปทำให้เกิดคาร์โบเนียมไอออนที่บริเวณที่เป็นกรดต่อไป จากนั้นจะเกิดการแตกตัวแล้วก็จะถูกเติมไฮโดรเจนให้อิ่มตัวทันทีที่ปฏิกิริยาต่างๆเกิดขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภททำหน้าที่สองอย่างคือ ทั้งแตกตัวและเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารพวกซิลิก้า-อลูมินา สำหรับการแตกตัวพร้อมด้วยโลหะร่วมกับการเติมไฮโดรเจน โลหะที่ใช้เป็นพวก Rare Earth ที่นิยมคือ Pt, Pd, W และ Ni ปฏิกิริยาเกิดที่ตรงผิวโลหะเป็นการเติมไฮโดรเจน ซึ่งจะช่วยให้บริเวณที่มีฤทธิ์เป็นกรดสะอาดไปด้วยเพราะคอยเติมไฮโดรเจนกำจัดพวกที่จะทำให้เกิดโค้กออกไป ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเป็นซิลิกา-อะลูมินาธรรมดาที่ไม่เป็นผลึก (amorphous) หรือเป็นประเภทผลึกมีซีโอไลท์ (zeolitic) ก็ได้ แบบหลังมีความไวต่อปฏิกิริยา

มากกว่าแบบแรก แต่ yield หรือ selectivity จะตกเร็วกว่า การเลือกสารเร่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับว่าต้องการผลิตภัณฑ์แบบไหนมาก

ปฏิกิริยาที่เกิดรวมแล้วจะเป็นประเภทคายความร้อนจึงทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์การออกแบบกระบวนการจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิเพิ่มนี้อย่างดีเพราะถ้าคุมไม่อยู่อาจทำให้เกิดโค้กและตัวเร่งปฏิกิริยาเสียหรือถ้าสูงขึ้นมากทำให้ตัวเครื่องปฏิกรณ์เสียหายได้ จึงจำเป็นต้องมีการจัดส่งแก๊สย้อนกลับ การออกแบบของกระบวนการมีหลายอย่างต่างๆ กันแล้วแต่วัตถุประสงค์และขึ้นอยู่กับกระบวนการ พร้อมกับปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ความดันที่ใช้ในกระบวนการประมาณ 1000-2500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ใช้อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียสและใช้ไฮโดรเจน 2000 ลูกบาศก์ฟุตต่อบาร์เรล

2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts)

ตัวเร่งปฏิกิริยา [18,22] คือสารที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเร่งโดยไม่เกิดการสูญเสียในกระบวนการ หรือตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ในรูปวงจรเร่งปฏิกิริยาโดยตัวเร่งปฏิกิริยาดังภาพ 2.10 ที่แสดงว่าไม่มีการสูญเสียตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการ

รูปที่ 2.10 วงจรการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.6.1 ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งตามสถานะเทียบกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์มี 2 ประเภท คือ

1) **ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ (Homogeneous catalysts)** คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกันกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจมีสถานะของเหลวหรือแก๊สก็ได้ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์ และปฏิกิริยาในสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complex) หรือสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination compound) ของโลหะแทรนซิชัน ซึ่งโลหะแทรนซิชันมีแนวโน้มในการเกิดสารประกอบโคออร์ดิ เนชันได้ง่าย เนื่องจากไอออนบวกของโลหะแทรนซิชันมีออร์บิทัล d ที่ว่างอยู่ จึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากลิแกนด์ได้ ไอออนบวกมีขนาดเล็กจึงมีแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนจากลิแกนด์ได้ดี โลหะแทรนซิชันส่วนใหญ่มีเลขออกซิเดชันได้หลายค่าทำให้เกิด

สารประกอบได้หลายรูปแบบ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธุ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจนทำให้ง่ายต่อการศึกษา เนื่องจากวิเคราะห์สารในขั้นตอนต่างๆ ในรูปสารละลายทำได้สะดวกด้วยเทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และการหากฎอัตราของปฏิกิริยาก็ทำให้ง่ายเช่นกัน ปฏิกิริยาเอกพันธุ์ได้รับความสนใจมากเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยาสูงและไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่คายความร้อน แต่ก็มีข้อเสียคือมักสลายตัวหรือเสียสภาพในภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูงและการแยกสารผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกันทำได้ยาก

2) **ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts)** คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งแบบวิวิธพันธุ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายๆ อย่าง เช่น ปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ ตัวทำละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันมากใน อุตสาหกรรมเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งนั้นมีความแข็งแรงเชิงกล ทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง สามารถแยกออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นได้ง่าย ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นของเหลวสารตั้งต้นมักจะผสมอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ในภาวะที่ต้องการและการแยกผลิตภัณฑ์อาจทำได้โดยการกลั่น สำหรับสารตั้งต้นที่เป็นแก๊สนั้นสารตั้งต้นจะผ่านเข้าไปทางปลายข้างหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ (reactor) และผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งอยู่บนเบด (bed) เกิดการดูดซับบนผิวหน้าของตัวเร่งก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาบนผิวหน้าซึ่ง อาจเป็นการจับตัวกันของสารตั้งต้นบนผิวหน้า หรือมีการเปลี่ยนโครงสร้างแล้วสารผลิตภัณฑ์จะหลุดออกจากผิวหน้าผ่านออกมาจากปลายอีกด้านหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ องค์ประกอบว่องไว เพื่อช่วยทำปฏิกิริยา (active component) และตัวรองรับ (support) หรือตัวพา (carrier) มัก เป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เพื่อให้เกิดการง่ายต่อการกระจายตัวของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีเพียงสารว่องไวเพียงอย่างเดียว

2.7 โดโลไมต์ (Dolomite)

โดโลไมต์[21] หรือเรียกว่าแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Calcium Magnesium Carbonate : $CaMg(CO_3)_2$) ซึ่งจะอยู่ร่วมกับแร่แคลไซต์ ($CaCO_3$) เสมอและจัดเป็นหินคาร์บอเนต (Carbonate rock) พบโดยทั่วไปในบริเวณที่มีหินชั้นหรือหินตะกอนและหินแปรใน หินปูนโดโลมิติก (Dolomitic limestone) หรือในหินอ่อนโดโลมิติก (Dolomitic Marble) มีส่วนประกอบทางเคมี คือ $CaMg(CO_3)_2$ โดยมี CaO 30.4% MgO 21.7% และ CO2 47.9% โดยปกติโดโลไมต์จะมีสัดส่วนของ

$CaCO_3$ ต่อ $MgCO_3$ ประมาณ 1:1 มีธาตุเจือปนที่พบอยู่เสมอ คือ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) โคบอล์ท (Co) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn)

2.7.1 สมบัติของโดโลไมต์

สมบัติทางกายภาพ

1. สีขาว สีเหลือง สีชมพู สีเทาอมน้ำตาล ผิวมันใสเหมือนแก้ว
2. ความแข็งตามมาตรฐานของ Mohs' scale ประมาณ 3.5-4
3. ไม่โปร่งใสและทึบแสง
4. สีผงสีขาว
5. ความถ่วงจำเพาะ 2.82-2.95
6. ความพรุน 8.6

สมบัติทางเคมี

1. ทำปฏิกิริยาในกรดเกลือเจือจางที่อุ่นละลายได้ดีเกิดปฏิกิริยาเป็นฟองเล็กๆ
2. เป็นผงละลายน้ำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) 9.0-10.71

ลักษณะผลึก

ผลึกอยู่ในรูปผลึกหกเหลี่ยม (hexagonal) ปกติพบอยู่ในรูปขนมเปียกปูนหน้าผลึกโค้ง บางครั้งอาจจะโค้งเข้าหากันทำให้มีลักษณะคล้ายอานม้า (saddle-shaped) นอกจากนั้นอาจพบเป็นมวลเม็ดเนื้อหยาบอาจแสดงลักษณะเป็นแผ่นซ้อนกันหรืออาจพบเป็นผลึกเม็ดละเอียดอัดกันแน่น

2.7.2 แหล่งแร่

ในประเทศไทย นั้นพบอยู่ทั่วไปในทุกๆ ภาค ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคกลาง : พบที่ นครสวรรค์ สระบุรี ลพบุรี กาญจนบุรี อุทัยธานี ราชบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์

ภาคตะวันออก : พบที่ ชลบุรี จันทบุรี ระยอง ปราจีนบุรี

ภาคเหนือ : พบที่ แม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ ล้าปาง เชียงราย แพร่ ล้าพูน น่าน อุตรดิตถ์ ตาก กำแพงเพชร สุโขทัย เพชรบูรณ์

ภาคใต้ : พบที่ ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช สงขลา พัทลุง ตรัง สตูล กระบี่

2.7.3 ประโยชน์ของโดโลไมต์

ประโยชน์ของโดโลไมต์มีดังนี้

1. เป็นหินคลุก (aggregate) สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างงานคอนกรีตและปูนซีเมนต์ทนต่อการขัดสี (abrasion) ทนต่อการผุสลายตัว มี roundness สูง แต่จะต้องไม่มีสารพวกดินดินดาน และไพไรต์ ซึ่งจะเป็นตัวทำให้แร่โดโลไมต์เกิดสภาพเสื่อม

2. เป็นสารเชื้อ (flux) ในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เพื่อเป็นตัวดึงซิลิกาแมงกานีส (silica manganese) ให้กลายเป็นสารมลทิน (slag) ลอยขึ้นบนผิวของน้ำโลหะถลุง เป็นการแยกขจัดสารมลทิน
3. ใช้ในอุตสาหกรรมแก้วและกระจกชนิดพิเศษ
4. ในอุตสาหกรรมการเกษตร ใช้ปรับความเป็นกรดเป็นด่างของดินหรือการแก้ดินเปรี้ยว และยังเป็นปุ๋ยของพืชในขณะเดียวกัน โดยแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบของคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) เป็นตัวช่วยย่อยอาหารของพืช นอกจากนี้ใช้ปรับสภาพดินก้นบ่อในบ่อเลี้ยงกุ้งและในบ่อเลี้ยงปลาให้เหมาะแก่การเลี้ยงสัตว์น้ำ ป้องกันการเกิดก๊าซไข่เน่า (H2S)
5. ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น ซีโดไรต์เทียม เกลือแมกนีเซียม
6. ใช้ในอุตสาหกรรมใยเทียม ผสมเส้นใยพลาสติกและส่วนผสมทำให้เชอร์ลากันความร้อน
7. ใช้ทำหินประดับ (dimension stone) เช่น โต๊ะหินขัดแท่งสี่เหลี่ยมลูกเต๋า ทนต่อสภาพบรรยากาศโล่งแจ้ง ทนต่อการผุกร่อน (weathering) และไม่มีสารเจือปนที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยากับสภาพภายนอก ทำให้เกิดความคงทนและคงรูปของหิน บางครั้งก็ใช้เป็นหินเกล็ด ประดับสวนและตู้ปลาซึ่งจะให้สีสันเป็นที่ดึงดูดใจอีกด้วย
8. ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นวัสดุทนความร้อน (refractory)
9. ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นตัวฟอกขาวและวัสดุอุดเยื่อกระดาษ (filler)
10. ใช้เป็นสารกรองน้ำให้บริสุทธิ์ (filter)
11. ในอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล ใช้ปรับสภาพความเป็นกรดและด่างในกระบวนการผลิต
12. ผลิตโลหะแมกนีเซียม (Magnesium metal)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC

ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ชนิดกรด มีลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง 60-100 ไมโครเมตร เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ใน Fluid Catalytic Cracking Unit ในกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม มีสมบัติที่ดีต่อการทนความร้อน มีรูพรุนขนาดใหญ่ เกิดโค้กต่ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ สำหรับ Spent FCC หรือตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว คือตัวเร่งปฏิกิริยาจาก FCC Unit ที่ผ่านการใช้งานแล้ว ซึ่งเหลือใช้จากกระบวนการกลั่นปิโตรเลียม

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pattiya และคณะ [14] ได้ทำการทดลองไพโรไลซิสเหง้าของต้นมันสำปะหลังโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสและวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วย GC/MS เพื่อศึกษาผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ผลการทดลองได้สรุปได้ว่า Zeolite, copper chromite และ Biomass

derived ash มีความจำเพาะต่อการลดการเกิด oxygenate จากการสลายตัวของลิกนิน ส่วน ZSM-5, Criterion-534 และ Al-MSU-F ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบเป็น aromatic และ phenol ปริมาณมาก แต่พบว่าไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใดที่ลดปริมาณผลิตภัณฑ์ชนิด carbonyl ลงได้ และยังพบว่า Zeolite, ZSM-5 และ Al-MSU-F มีแนวโน้มที่ดีที่จะได้ผลิตภัณฑ์กลุ่ม Acetic และ Formic Acid ได้ดี

Pattiya และคณะ [13] ได้ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของเหง้ามันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค GC/MS เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ZSM-5, Al-MCM-41, Al-MSU-F และ Alumina-stabilised ceria MI-575 จากผลการทดลองที่ได้สรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์กลุ่ม Aromatic และลดการเกิด Oxygenate ที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนิน และ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลดีที่สุด ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกชนิดที่ศึกษามีแนวโน้มที่เพิ่มปริมาณ Acetic ยกเว้น MI-575

Suttibak และคณะ [17] ได้รายงานผลการทดลองไพโรไลสิสแบบเร็วของเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้ fluidized-bed reactor เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้ และวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ของน้ำมันชีวภาพ ได้แก่ ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ปริมาณเถ้า ความหนาแน่น pH ธาตุองค์ประกอบ และค่าความร้อน ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 472 องศาเซลเซียสที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมากถึง 63.23% และมีปริมาณน้ำ 18% ของแข็ง 0.8% และเถ้ามีปริมาณน้อยกว่า 0.01%

Stefanidis และคณะ [16] ได้มีการทดลองใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสวัสดุชีวมวล เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพ เปรียบเทียบกับ ZSM-5 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ให้ผลที่ดีกว่า ZSM-5 ในแง่ของการลดปริมาณออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพและลดความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพได้ แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ทำให้เกิดโค้กเพิ่มจากเดิมเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 โดยรวมแล้วตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสของวัสดุชีวมวลที่ดี

ฉัตทิตา อ้อยใจ [25] ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยพบว่าการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ที่เหมาะสม และได้พื้นที่ผิวมากที่สุดคือที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เวลา 2 ชั่วโมง สำหรับภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศา เซลเซียส ความดันแก๊ส

ไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลา 60 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.50 โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชใช้แล้ว ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 55.01 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดเป็นแนฟทาร้อยละ 42.00 กากน้ำมันร้อยละ 8.00 และเมื่อ ทดสอบค่าความเป็นกรดพบว่ามีค่าความเป็นกรด 0.50 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน

SIrijanusornและคณะ [15] ใช้เครื่อง counter rotating twin screw reactor สำหรับทำไพโรไลซิสเหง้าชีวมวลจากเหง้ามันสะหลัง และทดลองภายใต้ตัวแปรต่างๆ ต่อไปนี้ อุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส ขนาดวัตถุดิบน้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตร อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 4-10 ลิตรต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพถึง 50% ที่ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมที่สุด 0.250-0.425 มิลลิเมตร อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน 4 ลิตรต่อนาที ที่ความดัน 2 บาร์

Tursunov [11] ทดลองกระบวนกระไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลผลิตแก๊สจากขยะชุมชนที่เป็นของแข็ง โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งและมีตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ และ zeolite ซึ่งทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 200-750 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะอยู่ในช่วงร้อยละ 49-57 โดยมวล จากผลการทดลองพบว่าแคลไซน์โดโลไมต์ให้ผลการทดลองที่ดี โดยให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น และลดปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมัน และของแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับ zeolite และแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และที่อุณหภูมิสูงในช่วง 600-750 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สสูงที่สุด และเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งเป็นแก๊สสังเคราะห์ที่สำคัญอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Maoyun He และคณะ [23] ทำการทดลองผลิตแก๊สจากการทำไพโรไลซิสขยะที่เป็นของแข็งจากแหล่งชุมชนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ใช่วงอุณหภูมิสูง 750-900 องศาเซลเซียส พบว่าได้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สประมาณร้อยละ 47-67 โดยน้ำหนัก และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊ส และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่าแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และยังช่วยลดปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมัน และถ่านชาร์อีกด้วย แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการครั้งนี้ยังเหมาะสมสำหรับเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการ Fischer-Tropsch เพื่อสังเคราะห์น้ำมันเชื้อเพลิง

ภาณุพันธ์ พรหมบุตร และคณะ [24] ได้ศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงจากน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ภายใต้บรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนที่ความดัน 1บาร์เกจ โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดคือ CaO และ FCC ที่ใช้แล้ว ได้ภาวะที่

เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดแตกต่างกัน CaO ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนแก๊ส ของเหลว และของแข็งเท่ากับ 18.8%, 76.5% และ 4.7% ตามลำดับ สำหรับ FCC ที่ใช้แล้วได้ภาวะที่เหมาะสมที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นส่วนแก๊ส ของเหลว และของแข็งเท่ากับร้อยละ 19.8, 78.0 และ 2.2 ตามลำดับ

Melisa และคณะ [7] ได้ศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากขี้เลื่อยไม้สนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมากถึงร้อยละ 53.5 ส่วนที่เป็นของแข็งร้อยละ 9-14 เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้กับน้ำมันชีวภาพสังเคราะห์พบว่ามีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากกว่า และมีส่วนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบน้อยกว่า อีกทั้งหากทำการปรับคุณภาพวัตถุดิบขี้เลื่อยไม้สนผ่านความร้อนก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 25 และปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงร้อยละ 55

จากข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่ามีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งชนิดกรดและเบส ในกระบวนการไพโรไลซิส งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ที่ใช้แล้ว เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส คือ แคลไซน์โดโลไมต์ ต่อผลผลิตน้ำมันชีวภาพ ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1) เครื่องย่อยชีวมวล สำหรับบดย่อยชีวมวลให้มีขนาดเล็ก

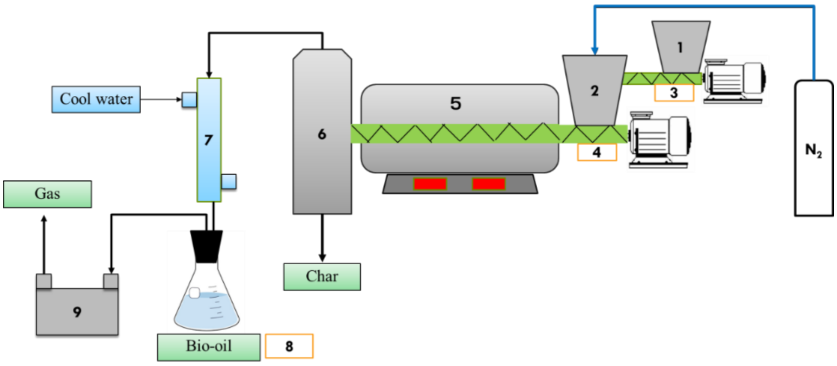
2) เตาอบ ใช้อบชีวมวลที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น

3) เครื่องคัดขนาดและตะแกรงร่อนขนาด เครื่องมือคัดขนาดและตะแกรงร่อนคัดขนาดของเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองของตะแกรง ของ Endecott SHAKER EFL1 mk3 ตะแกรงร่อนขนาด 0.3,0.6,0.85,1.4, 2 และ 3 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.1 เครื่องคัดขนาด Endecott SHAKER EFL1 mk3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 3.2 แผนภาพเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

หมายเลข 1 ตัวเก็บสารสำหรับใส่ชีวมวล

หมายเลข 2 ตัวเก็บสารระบบปิดเพื่อกันอากาศเข้าสู่ระบบ

หมายเลข 3 ชุดสกรูขนาดยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร

หมายเลข 4 ชุดสกรูขนาดยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

หมายเลข 5 เตาเผา

หมายเลข 6 ตัวแยกสารสำหรับแยกถ่านชาร์

หมายเลข 7 ตัวควบแน่นสาร

หมายเลข 8 ขวดเก็บน้ำมันชีวภาพ

หมายเลข 9 ปั้มสุญญากาศ

จากภาพ 3.2 แสดงแผนภาพเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสำหรับการไพโรไลซิสที่ใช้ในการทดลองจริง โดยประกอบไปด้วยหมายเลข 1 และ 2 ตัวเก็บสาร (Hopper 1) หมายเลข 3 ชุดสกรู (Screw feeder 1) ขนาดยาว 40 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร หมายเลข 4 ชุดสกรู (Screw feeder 2) ขนาดยาว 120 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1 เป็นชุดสกรูที่พาชีวมวลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ หมายเลข 5 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องพร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิ หมายเลข 6 ตัวแยกถ่านชาร์ (Separator) ทำหน้าที่แยกถ่านชาร์ออกและกักเก็บไว้ หมายเลข 7 ตัวควบแน่นสาร (Condenser) ทำหน้าที่ควบแน่นสารระเหย หมายเลข 8 ถังเก็บน้ำมันชีวภาพ หมายเลข 9 ปั้มสุญญากาศ (Vacumn pump) และหมายเลข 10 ถังแก๊สไนโตรเจนพร้อมโรตามิเตอร์ควบคุมอัตราการไหลของแก๊ส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

4) เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

5) นาฬิกาจับเวลา

6) เตาเผา สำหรับเผาเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

รูปที่ 3.4 เตาเผา

7) เครื่องแก้ว ประกอบด้วยขวดรูปชมพู่ กรวยแยก และขวดใส่ตัวอย่าง

3.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

1) เครื่อง Bomb Calorimeter ยี่ห้อ Leco รุ่น AC500 สำหรับใช้วิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 3.5 เครื่อง Bomb Calorimeter

2) เครื่องไตเตรท ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 848 Titrino Plus สำหรับใช้วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์

รูปที่ 3.6 เครื่องไตเตรท

3) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น(Simulation distillation Gas Chromatography Analyzer) ดังแสดงในภาพที่ 3.7 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวตามคาบจุดเดือด โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ตาม ASTM D2887 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 ยี่ห้อ Algilent ซึ่งใช้คอลัมน์ชนิด capillary รุ่น DB-1 ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งมี 100% Dimethylpolysiloxane หนา 0.25 ไมโครเมตรเป็นวัฏภาคนิ่งและซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulation distillation software)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น

4) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรมิเตอร์ (Gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) ยี่ห้อ Algilent โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890 โดยมีเครื่องแมสสเปกโทรมิเตอร์ รุ่น GCMS5975 เป็นดีเทคเตอร์ ซึ่งใช้ Capillary column รุ่น HP-5MS ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร ซึ่งมี 100% Dimethylpolysiloxane หนา 0.25 ไมโครเมตรเป็นวัฏภาคนิ่ง

รูปที่ 3.8 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทรมิเตอร์

5) เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) รุ่น 7820A ยี่ห้อ Algilent ประกอบด้วยดีเทคเตอร์ 2 ตัวคือ Flame Ionization Detector (FID) และ Thermal Conductivity Detector (TCD) สำหรับวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส

รูปที่ 3.9 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

6) เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHNO analysis) วิเคราะห์หาค่า คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และ ออกซิเจน

รูปที่ 3.10 เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

3.3 สารเคมีและสารตั้งต้น

1) เหง้ามันสำปะหลัง

รูปที่ 3.11 เหง้ามันสำปะหลัง

2) โดโลไมต์

3) ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว

4) ไนโตรเจนแก๊ส

5) อะซิโตน (Acetone) เกรดการค้า

6) เมทิลแอลกอฮล์ (Methyl alcohol)

3.4 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมและวิเคราะห์ชีวมวล

1) นำเหง้ามันสำปะหลังมาล้างทำความสะอาด ตากให้แห้ง และย่อยให้ขนาดเล็กลงด้วยเครื่องย่อยชีวมวล

2) คัดขนาดเหง้ามันสำปะหลังที่ย่อยแล้วด้วยตะแกรงร่อนให้มีขนาดอนุภาคตามช่วงดังต่อไปนี้ 0.3-0.6, 0.6-0.85, 0.85-1.4, 1.4-2 และ 2-3 มิลลิเมตร

3) อบเหง้ามันสำปะหลังเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลาตั้งแต่ 12 ชั่วโมงขึ้นไป

4) นำเหง้ามันสำปะหลังมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ดังต่อไปนี้

- วิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis, ASTM D3173-D3175)
- วิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D3176)
- วิเคราะห์หาค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง (ASTM D2015)
- วิเคราะห์ค่าการสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง ด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/Differential Thermal Analysis(TG/DTA)

3.4.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ และ FCC โดยเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ในตู้ดูดความชื้นจนกว่าจะใช้งาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.4.3 การออกแบบการทดลอง

1) ศึกษาผลของขนาดอนุภาคของวัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลังที่เหมาะสมในช่วงดังต่อไปนี้ 0.3-0.6, 0.6-0.85, 0.85-1.4, 1.4-2 และ 2-3 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองที่ภาวะดังต่อไปนี้ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส, อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที และเลือกขนาดอนุภาคที่ให้ผลการทดลองดีที่สุดมาใช้ในการทดลองลำดับถัดไป

2) ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิดังนี้ 400, 425, 450, 475 และ 500 องศาเซลเซียสโดยใช้วัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลังตามขนาดอนุภาคที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า ที่อัตราการป้อนสาร 120 รอบต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

3) ศึกษาผลของอัตราการป้อนสารที่ 3.2, 10.6, 18.0, 25.4 และ 32.8 กรัมต่อนาที โดยใช้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบเหง้า มันสำปะหลัง และอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที

4) ศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 50, 100, 150, 200 และ 250 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที โดยใช้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง อัตราการป้อนสาร ที่ได้ตามการทดลองก่อนหน้า

5) ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์, FCC และ ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ในอัตราส่วน 1:1 รวมไปถึงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่ร้อยละ 1, 3, 5 และ 7 โดยน้ำหนัก โดยใช้ภาวะในการทำการทดลองที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4.4 วิเคราะห์คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จากกระบวนไพโรไลซิส ดังนี้

- วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ (ASTM D2015)
- วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์
- วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพ และผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่อง Gas Chromatography

- วิเคราะห์ช่วงจุดเดือด (Boiling range distribution) ของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น(Simulation distillation Gas Chromatography Analyzer)
- วิเคราะห์ปริมาณเถ้าในน้ำมันชีวภาพตาม ASTM D524-04
- วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพ (Total acid number)

3.5 วิธีการทดลอง

1) ทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนที่อัตรา 200 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อทำการไล่อากาศหรือออกซิเจนออกจากระบบ

2) เปิดเครื่องปฏิกรณ์และทำการตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ตามตัวแปรที่จะศึกษาของกระบวนการโดยเริ่มต้นที่ 450 องศาเซลเซียส

3) เมื่ออุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์มีค่าตามที่กำหนดไว้ นำเอาเหง้ามันสำปะหลังปริมาณ 150 กรัม ใส่ลงในตัวเก็บสาร ตามขนาดที่กำหนดไว้ได้แก่ 0.3-0.6, 0.6-0.85, 0.85-1.4, 1.4-2 และ 2-3 มิลลิเมตรโดยทำการทดลองแบบสุ่ม โดยทำขนาดละ 2 ครั้ง

4) ปรับความเร็วของสกรูที่ใช้ในการป้อนสาร ที่อัตรา 120 รอบต่อนาที

5) เปิดเครื่องทำน้ำเย็นเข้าสู่คอนเดนเซอร์เพื่อให้สารระเหยเกิดการควบแน่นได้

6) เปิดเครื่องปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดแก๊สออกจากเครื่องปฏิกรณ์สู่ระบบควบแน่น

7) คำนวณหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และบันทึกผลการทดลอง

8) ทำซ้ำโดยการสุ่มขนาดอนุภาค และบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรของขนาดอนุภาคและหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

9) ศึกษาตัวแปรของอุณหภูมิ อัตราการป้อนสาร และอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจน ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ FCC ที่ใช้แล้ว และ ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ โดยทำตามขั้นตอน 1-7 โดยปรับค่าตัวแปรต่างๆตามกำหนดเพื่อศึกษาปัจจัยและหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

3.6 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง

- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ (% Liquid yield) $= \frac{W_{\text{น้ำมันชีวภาพ}}}{W_{\text{ชีวมวล}}} \times 100$
- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของถ่านชาร์ (% Solid yield) $= \frac{W_{\text{ถ่านชาร์}}}{W_{\text{ชีวมวล}}} \times 100$
- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (% Gas yield) = 100 -ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว - ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง

$W_{\text{น้ำมันชีวภาพ}}$ = น้ำหนักของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลอง

$W_{\text{ถ่านชาร์}}$ = น้ำหนักของถ่านชาร์ที่ได้จากการทดลอง

$W_{\text{ชีวมวล}}$ = น้ำหนักของเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง

4.1.1 การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อน

จากผลการวิเคราะห์แบบประมาณของเหง้ามันสำปะหลังตามตารางที่ 4.1 พบว่า เหง้ามันสำปะหลังประกอบด้วยขี้เถ้าซึ่งเป็นส่วนประกอบอนินทรีย์ของชีวมวลปริมาณร้อยละ 4.37, ปริมาณความชื้นร้อยละ 11.08, ปริมาณสารระเหยซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ลุกติดไฟได้ง่ายสูงถึงร้อยละ 75.63, ปริมาณคาร์บอนคงที่ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่เสถียรร้อยละ 8.92 และค่าความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังเท่ากับ 3,985 กิโลจูลต่อกรัม

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ของเหง้ามันสำปะหลัง

Proximate Analysis	%wt
Ash	4.37
Moisture	11.08
Volatile Matter	75.63
Fixed carbon	8.92
Total	100.00
Heating Value (kJ/g)	**3,985**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

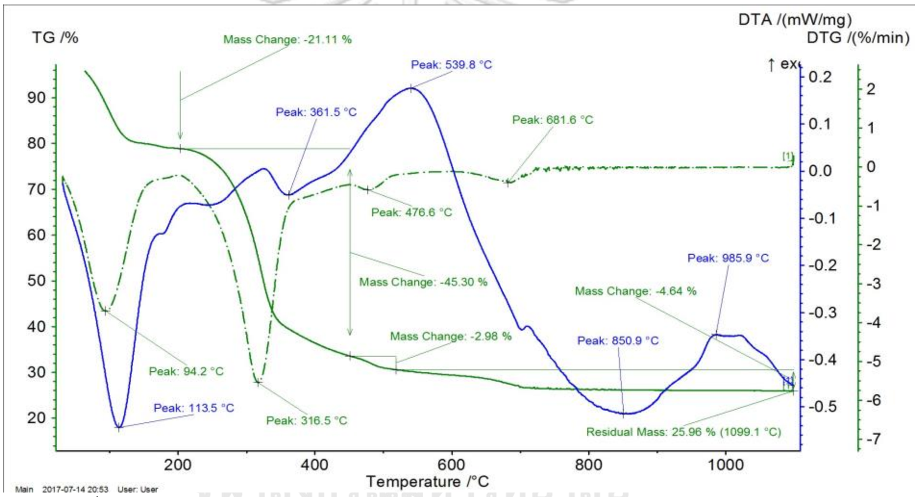
4.1.2 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเหง้ามันสำปะหลังตามตารางที่ 4.2 พบว่าเหง้ามันสำปะหลังประกอบด้วยธาตุคาร์บอนร้อยละ 38.6, ไฮโดรเจนร้อยละ 8.44, ไนโตรเจนร้อยละ 1.75, ออกซิเจนร้อยละ 49.85 และกำมะถันน้อยกว่าร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังจะไม่ก่อให้เกิดมลพิษอันเกิดจากกระบวนการเผาไหม้กำถัน เนื่องจากปริมาณกำมะถันที่น้อยมาก

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ของเหง้ามันสำปะหลัง

Ultimate Analysis	**%wt**
Carbon	38.6
Hydrogen	8.44
Nitrogen	1.75
Oxygen	49.85
Sulfur	< 0.01

4.1.3 วิเคราะห์ค่าการสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง ด้วยเทคนิค Thermo gravimetric/Differential Thermal Analysis(TG/DTA)



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลัง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากรูปที่ 4.1 คือผลการวิเคราะห์ค่าการสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังโดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิที่ อุณหภูมิห้อง-1100 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ภาวะแก๊สไนโตรเจน พบว่าในช่วงแรกอุณหภูมิประมาณ 94 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักเล็กน้อย ซึ่งที่อุณหภูมินี้เป็นการสูญเสียความชื้นของเหง้ามันสำปะหลัง ต่อมาที่อุณหภูมิประมาณ 316 องศาเซลเซียสมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงที่สุด ซึ่งเป็นส่วนที่สลายตัวทางความร้อนไปอยู่ในสถานะแก๊สและสามารถควบแน่นออกมาได้เป็นน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังได้ โดยน้ำหนักที่สูญเสียคิดเป็นร้อยละ 74 และคงเหลือมวลจากการวิเคราะห์ร้อยละ 26 คือส่วนที่เหลือเป็นถ่าน

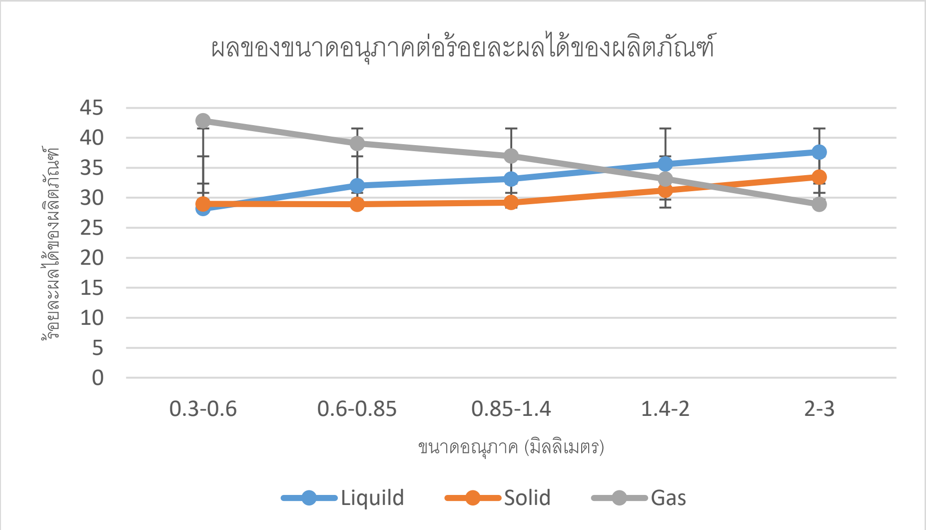
4.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลัง

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง โดยศึกษาปัจจัยดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลังต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ

จากผลการศึกษาผลของขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลังต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ พบว่าการทำการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที น้ำมันชีวภาพที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 28-38 โดยน้ำหนัก จากแผนภาพ 4.2 ที่ขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร คือขนาดอนุภาคที่ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดสำหรับการทดลองนี้ที่ร้อยละ 37.63 โดยน้ำหนัก เมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้นเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับความร้อนมากกว่า ได้รับความร้อนมากกว่าเกิดการสลายตัวได้ดีกว่าหรืออาจเกิดการสลายตัวทุติยภูมิขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง และปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงเนื่องจากเกิดการสลายตัวได้ดีกว่า

จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลังที่ 2-3 มิลลิเมตร เพื่อทำการทดลองต่อไป

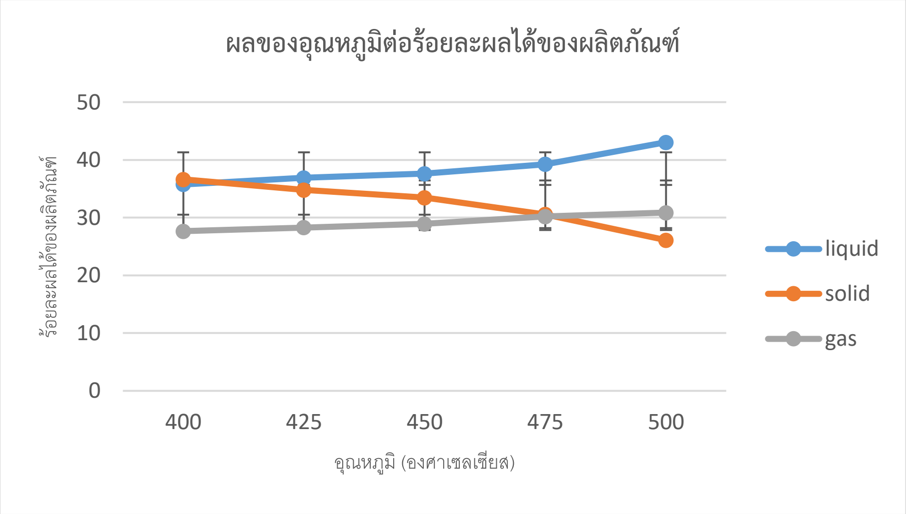


รูปที่ 4.2 แผนภูมิแสดงผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากผลการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะดังนี้ ขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที น้ำมันชีวภาพที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 35-43 โดยน้ำหนัก จากภาพ 4.3 พบว่าที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดสำหรับการทดลองนี้ โดยให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับร้อยละ 43.03 และที่ภาวะอุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์แก๊ส เป็นไปตามงานวิจัยก่อนหน้า [17] เมื่ออุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยาต่ำลงจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพลดลงและผลิตภัณฑ์ของแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนผลิตภัณฑ์ของแข็งจะลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการแตกสลายของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊สเพิ่มขึ้น และผลิตภัณฑ์ของแข็งลดลงเนื่องจากเกิดการแตกตัวมากขึ้น สอดคล้องตามผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะสามารถสลายตัวได้มากขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

จากการทดลองข้างต้นจึงเลือกอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 500 องศาเซลเซียส เพื่อทำการทดลองต่อไป

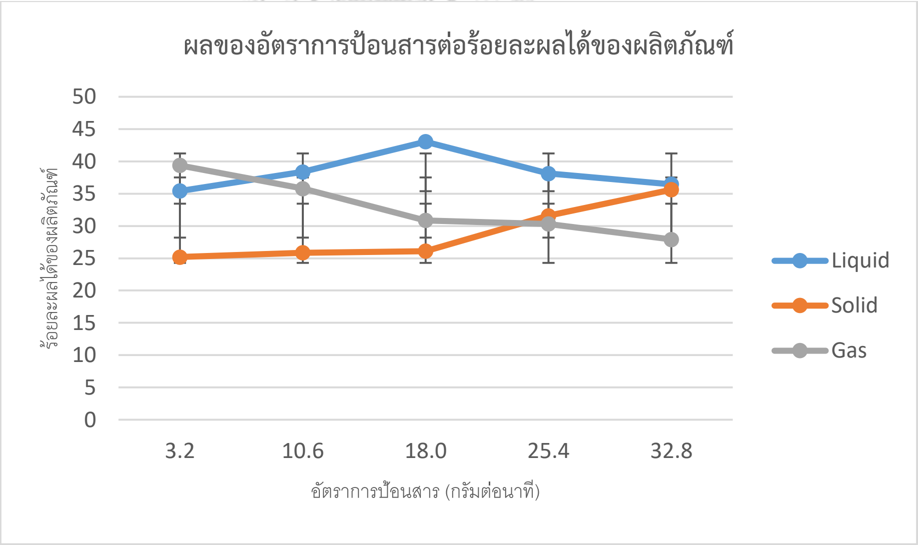


รูปที่ 4.3 แผนภูมิแสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.2.3 ผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากผลการศึกษาผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะดังนี้ ขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนของเหลวในช่วงร้อยละ 35-39 โดยน้ำหนัก และจากภาพ 4.4 พบว่าที่อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาทีได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนของเหลวมากที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือเท่ากับร้อยละ 43.04 และที่อัตราการป้อนสารต่ำลงพบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อยลงและปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการป้อนสารที่ต่ำจะทำให้สารอยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น ได้รับความร้อนมากขึ้นจึงเกิดการแตกตัวมากขึ้นด้วยเป็นผลให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งมีปริมาณน้อย หากอัตราการป้อนสารเร็วขึ้นทำให้สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์น้อย ได้รับความร้อนน้อยจึงแตกตัวได้น้อยลงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊สน้อยลง ผลิตภัณฑ์ส่วนของแข็งมากขึ้นเนื่องจากเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้น้อย

จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกอัตราการป้อนสารที่ 18 กรัมต่อนาที เพื่อทำการทดลองต่อไป

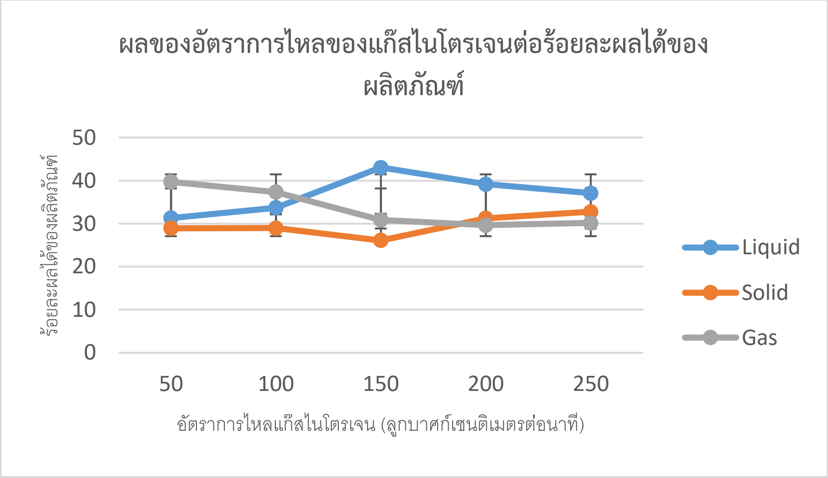


รูปที่ 4.4 แผนภูมิแสดงผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.2.4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากผลการศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะดังนี้ ขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวในช่วงร้อยละ 31-43 โดยน้ำหนัก และจากภาพ 4.5

พบว่าที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวสูงที่สุดสำหรับการทดลองนี้คือเท่ากับร้อยละ 43.04 ซึ่งแก๊สไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา นำสารระเหยออกจากเตาปฏิกรณ์เข้าสู่ส่วนควบแน่น โดยที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ต่ำเกินไปทำให้สารระเหยอยู่ภายในเตาปฏิกรณ์นาน ได้รับความร้อนสูงและเกิดการแตกตัวมาก จึงได้ผลิตภัณฑ์แก๊สมาก ผลิตภัณฑ์ของเหลวจึงน้อยลง และที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่เร็วเกินไปทำให้สารระเหยอยู่ภายในเตาปฏิกรณ์น้อย ได้รับความร้อนน้อยจึงเกิดการแตกตัวต่ำผลิตภัณฑ์แก๊สจึงน้อยลง



รูปที่ 4.5 แผนภูมิแสดงผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.3 การศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

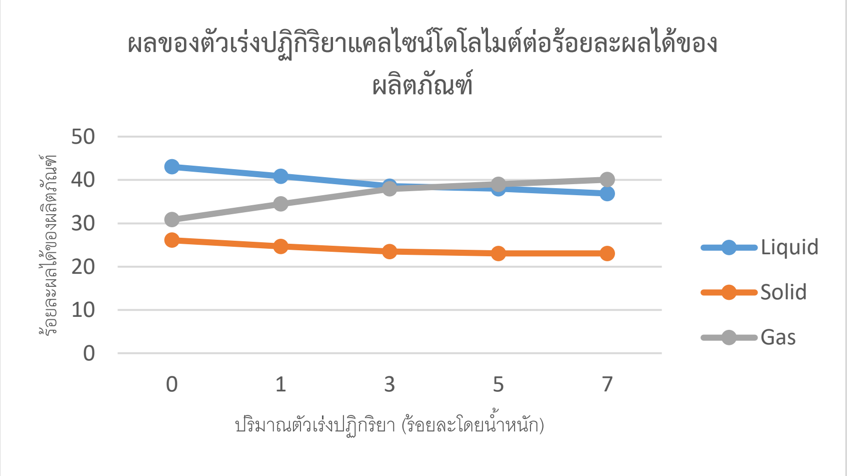
จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง สามารถสรุปได้ว่าภาวะที่จะนำไปทดลองต่อไปคือที่ ขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลัง 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และนำภาวะที่ได้ดังกล่าวไปศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป

4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์

จากผลการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่ภาวะ ขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลัง 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์

ของเหลวน้อยลงจากการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ที่ประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนิเซียมออกไซด์ (MgO) ซึ่งจากข้อมูลเอกสารอ้างอิง [12} แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนิเซียมออกไซด์ (MgO) จะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน จึงทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลงภายในเตาปฏิกรณ์มากขึ้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ที่ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดคือที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับร้อยละ 40.85

จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ต่อคุณภาพของน้ำมันต่อไป



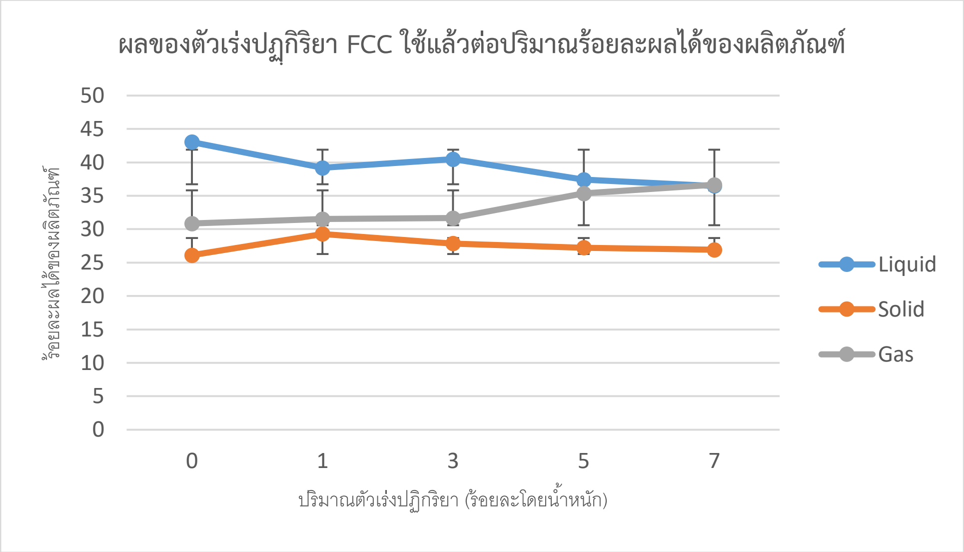
รูปที่ 4.6 แผนภูมิแสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.3.2 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว

จากผลการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่ภาวะ ขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลัง 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อยลงจากการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วช่วยเพิ่มการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนภายในเตาปฏิกรณ์มากขึ้นผ่านปฏิกิริยา cracking สอดคล้องตามงานวิจัยก่อนหน้า [13] ที่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ร่วมกับ

กระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลแล้วได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงและผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วที่ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดคือที่ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับร้อยละ 40.48 และเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสตัวเร่งเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นสอดคล้องตามปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว ต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพต่อไป



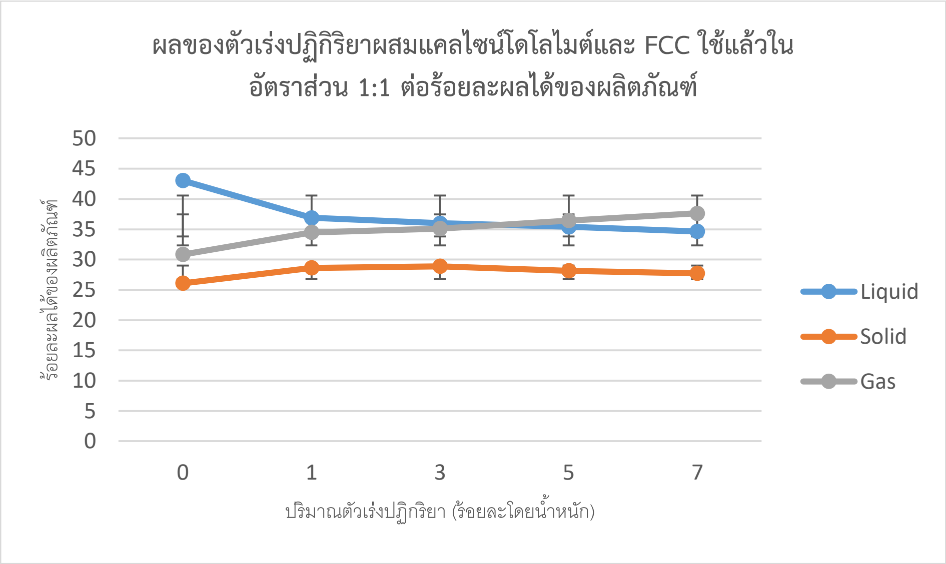
รูปที่ 4.7 แผนภูมิแสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.3.3 ผลการศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1

จากผลการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่ภาวะ ขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลัง 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิขณะทำปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวน้อยลงจากการทดลองที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ช่วยเพิ่มการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนภายในเตาปฏิกรณ์มากขึ้น และปริมาณตัวเร่ง

ปฏิกิริยาผสมฯ ที่ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดคือที่ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับร้อยละ 36.88

จากผลการทดลองข้างต้นจึงเลือกน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วต่อคุณภาพของน้ำมันชีวภาพต่อไป



รูปที่ 4.8 แผนภูมิแสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1 ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลังแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก, ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่าปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องตามรายการอ้างอิง[12] ที่กล่าวว่ากระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพน้อยกว่าแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกออก (Cracking) ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาได้และจะกลายเป็นโค้กติดกับตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ทำให้เกิดการสูญเสียร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพในส่วนนี้ไป แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนไพโรไลซิสชีวมวลนั้นเพื่อผลของการปรับปรุง

คุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งต้องทำการวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์	**กระบวนการไพโรไลซิส**			
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	**แคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก**	**ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก**	**ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก**
ของเหลว (ร้อยละ)	43.04	40.85	40.48	36.88
ของแข็ง (ร้อยละ)	26.10	24.68	27.85	28.62
แก๊ส (ร้อยละ)	30.85	34.47	31.67	34.50

4.4 การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุด จึงนำผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก, ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มาศึกษาสมบัติเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

4.4.1 ศึกษาอัตราส่วนน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

ผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลัง แบ่งออกได้เป็นสองส่วนคือ น้ำมันเบา คือส่วนที่ลอยอยู่ด้านบน และน้ำมันหนัก คือส่วนที่จมอยู่ด้านล่าง ดังภาพ 4.8 และมีอัตราส่วนระหว่างน้ำมันเบาและน้ำมันหนักดังตาราง 4.11 โดยผลิตภัณฑ์ในส่วนน้ำมันเบาไม่ให้ค่าความร้อน แตกต่างจากผลิตภัณฑ์ในส่วนน้ำมันหนักที่ให้ค่าความร้อนสูง และอัตราส่วนระหว่างน้ำมันเบาและน้ำมันหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ ประกอบด้วยน้ำมันเบาเป็นส่วนมากอยู่ในช่วงร้อยละ 65-72 โดยน้ำหนัก และประกอบด้วยน้ำมันหนักในช่วงร้อยละ 27-35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.9 ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.4 ปริมาณน้ำมันเบาและน้ำมันหนักในผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพ	ปริมาณน้ำมันชีวภาพ (%)	
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	65.47	34.53
แคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	72.26	27.74
ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก	71.65	28.35
ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	66.60	33.40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.2 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

1) การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

องค์ประกอบ (ร้อยละ)	**เหง้ามันสำปะหลัง**	**น้ำมันชีวภาพ (น้ำมันหนัก)**			
		ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	**แคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก**	**ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว ร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก**	**ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก**
คาร์บอน	38.6	70.72	19.24	48.89	40.50
ไฮโดรเจน	8.44	8.76	11.44	13.70	7.34
ไนโตรเจน	1.75	2.14	0.49	0.34	1.29
ออกซิเจน	49.85	18.37	68.84	37.07	50.87
H/C (mole/mole)	2.62	1.49	7.14	3.36	2.17
O/C (mole/mole)	0.97	0.19	2.68	0.57	0.94
ค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกรัม)	3,985	6,984	4,721	6,496	6,263

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ ส่วนน้ำมันหนัก พบว่าเมื่อเหง้ามันสำปะหลังผ่านกระบวนการไพโรไลซิสเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนแล้ว ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบคาร์บอนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลัง จึงให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าเหง้ามันสำปะหลัง โดยให้ค่าความร้อนสูงถึง 6,984 กิโลจูลต่อกรัม สำหรับน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังจะมีองค์ประกอบออกซิเจนสูงเนื่องจากวัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลังประกอบด้วยออกซิเจนปริมาณมาก จากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของเหง้ามันสำปะหลัง แต่สำหรับผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์มีองค์ประกอบคาร์บอนต่ำและมีองค์ประกอบออกซิเจนสูง เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาแตกออกของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนได้เป็นสารประกอบที่มีออกซิเจนสูง สอดคล้องตามผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ที่มีค่าความร้อนเพียง 4,721 กิโลจูลต่อกรัม

2) การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Total acid number) และปริมาณเถ้า (Ash content) ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด และปริมาณเถ้าของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

สมบัติของน้ำมันชีวภาพ	น้ำมันชีวภาพ (น้ำมันหนัก)			
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	แคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก	ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
ค่าความเป็นกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม)	51.3	96.5	51.2	52.3
ปริมาณเถ้า (ร้อยละ)	0.08	5.25	1.42	1.85

จากผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด (Total acid number) ของน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลัง พบว่าน้ำมันชีวภาพมีค่าความเป็นกรดสูง ซึ่งสอดคล้องตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง[17] ที่ว่าน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังมีค่า pH ต่ำ

สำหรับค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าไม่มีส่วนช่วยลดค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสกลุ่ม CaO และ MgO ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโดโลไมต์ มีผลให้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวภาพสูงขึ้นจาก 51.31 mgKOH/g เป็น 96.46 mgKOH/g ซึ่งอาจเกิดจากการเกิดปฏิกิริยาการแตกออกของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของเหง้ามันสำปะหลังผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ได้ผลิตภัณฑ์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความเป็นกรดสูง เช่น สารประกอบที่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าในน้ำมันชีวภาพ พบว่าปริมาณเถ้าในน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสมีปริมาณเถ้าต่ำ และสอดคล้องเมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าจากเหง้ามันสำปะหลังที่มีปริมาณไม่สูง ซึ่งสำหรับน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์มีปริมาณเถ้าสูงกว่าน้ำมันชีวภาพอื่น สาเหตุเนื่องจากมีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่ำกว่าน้ำมันชนิดอื่น จึงเกิดการเผาไหม้ได้น้อยให้ให้ค่าความร้อนที่น้อยกว่าน้ำมันชีวภาพอื่น จึงเหลือปริมาณเถ้าจากการเผาไหม้สูงกว่า สอดคล้องตามผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนและองค์ประกอบแบบแยกธาตุ

3) การวิเคราะห์ช่วงจุดเดือด (Boiling range distribution) ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบตามช่วงจุดเดือดของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

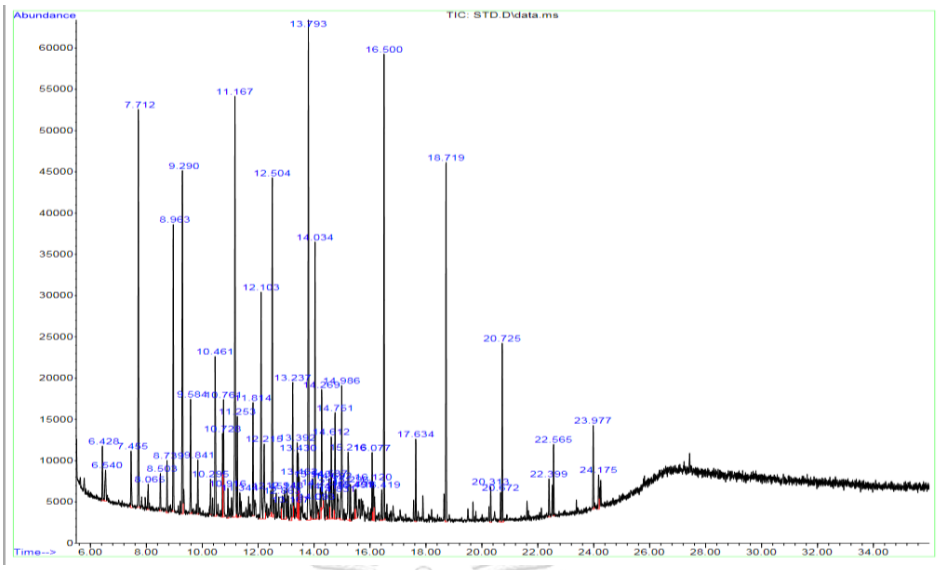
องค์ประกอบ (ร้อยละ)	ปริมาณ (%)			
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	แคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก	ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
IBP (°C)	109	109	113	109
FBP (°C)	663	662	662	662
Naphtha (%)	8	9	8	8
Kerosene (%)	16	21	22	19
Light gas oil (%)	11	14	13	11
Heavy gas oil (%)	10	9	10	9
Long residue hydrocarbon (%)	55	47	47	53

จากผลการวิเคราะห์ช่วงจุดเดือด (Boiling range distribution) ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ พบว่าน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยามีค่า IBP และ FBP ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจำแนกตามช่วงจุดเดือด มีปริมาณองค์ประกอบที่เป็น Long residue hydrocarbon ลดลง และมีปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกลุ่ม Kerosene เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ช่วยให้เกิดกระบวนการ Cracking และ Reforming ขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS)

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.10 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

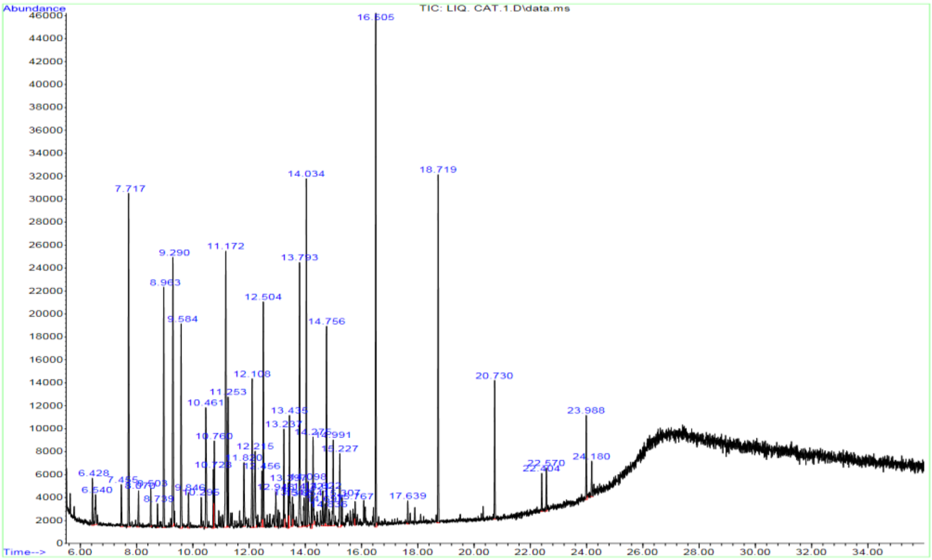
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ดังภาพ 4.10 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันชีวภาพนั้นค่อนข้างซับซ้อนและประกอบด้วยสารประกอบที่เป็นอนุพันธุ์ของสารประกอบจำพวกฟีนอล คาร์บอกซิล เอไมด์ เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ที่แสดงว่าสารประกอบอนุพันธุ์ของกลุ่มฟีนอลมีปริมาณมากที่สุดจากผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทรเมทรีนี้ สอดคล้องตามผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุที่มีองค์ประกอบออกซิเจนภายในน้ำมันชีวภาพสูง และสอดคล้องตามเอกสารอ้างอิง [12] ที่กล่าวว่าชีวมวลมีประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทั้งสามองค์ประกอบมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนปริมาณมาก โดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล จึงเป็นผลให้น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังประกอบด้วยออกซิเจนปริมาณสูง และประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นอนุพันธ์หมู่ฟีนอลสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงองค์ประสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ลำดับ	องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
1	แอลเคน, แอลคีน และแอลไคน์	21.49
2	แอลกอฮอลล์	57.21
3	เอมีน และเอไมด์	9.55
4	อื่นๆ	11.74
5	รวม	100

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์



รูปที่ 4.11 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์

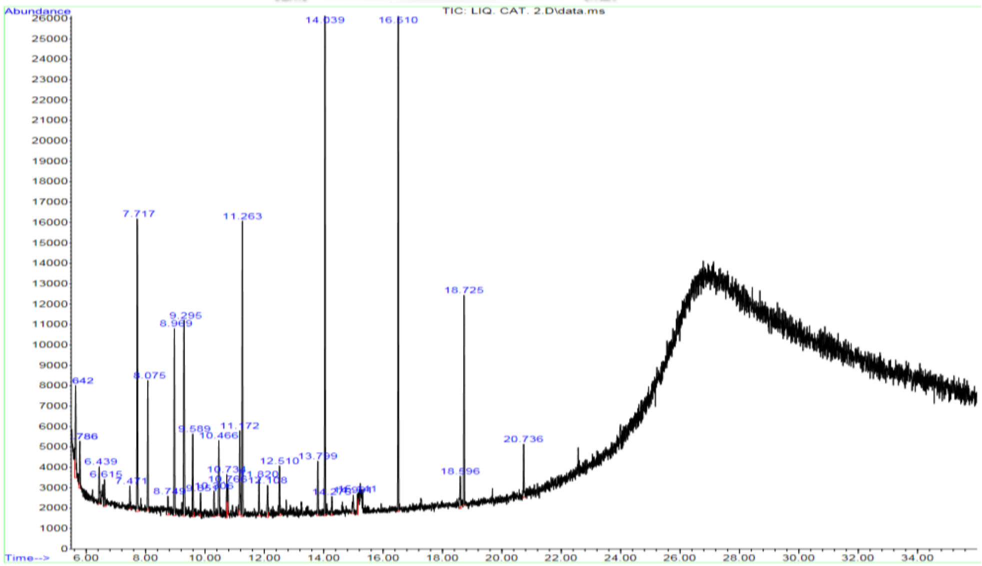
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.10 พบว่าองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารประกอบที่เป็นอนุพันธุ์ของหมู่ ฟีนอลคาร์บอกซิล เอมีน เอไมด์ เป็นต้น และมีองค์ประกอบที่เป็นออกซิเจนสูง ซึ่งสอดคล้องตามเอกสารอ้างอิง [12] ที่กล่าวน้ำมันชีวภาพที่ได้กระบวนไพโรไลซิสชีวมวลจะมีองค์ประกอบที่เป็น

ออกซิเจนสูง เนื่องจากวัตถุดิบชีวมวลประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีออกซิเจนสูงโดยเฉพาะหมู่ไฮดรอกซิล และจะสังเกตได้ว่าในองค์ประกอบจะพบสารประกอบหมู่เมทอกซี่ (Methoxy) อยู่หลายชนิด เมื่อเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างอื่น ดังภาคผนวก ง ตารางที่ ง-2 ซึ่งสารประกอบของหมู่เมทอกซี่ส่วนใหญ่ที่อยู่ในน้ำมันชีวภาพนี้จะมีสมบัติเป็นกรด ทำให้น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์มีความเป็นกรดสูงที่สุดจากผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด

ตารางที่ 4.9 ตารางแสดงองค์ประสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์

ลำดับ	องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
1	แอลเคน, แอลคีน และแอลไคน์	24.42
2	แอลกอฮอลล์	58.57
3	เอมีน และเอไมด์	6.72
4	อื่นๆ	10.29
5	รวม	100

3. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว



รูปที่ 4.12 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว

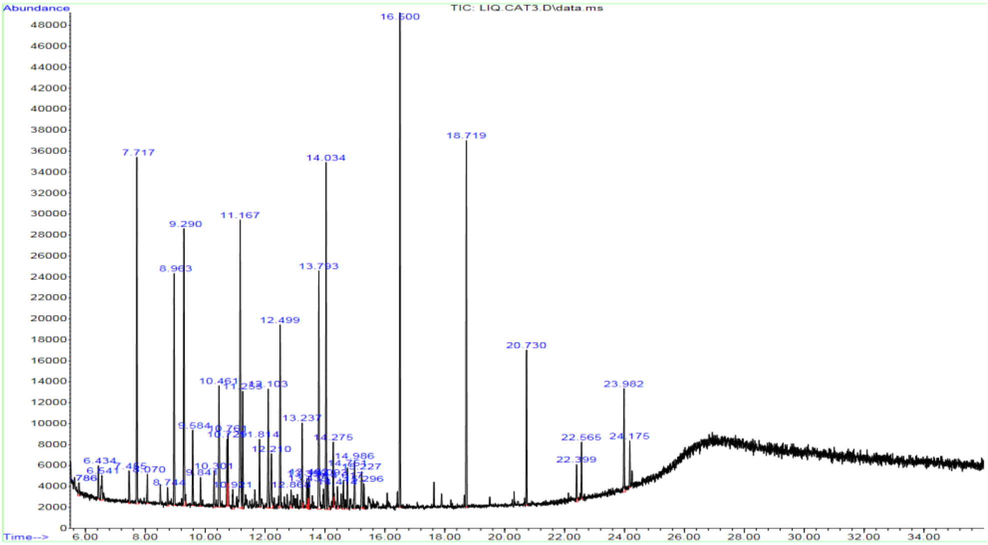
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนักพบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่คล้ายกับตัวอย่างน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ประกอบด้วยสารประกอบของอนุพันธุ์ของหมู่ ฟีนอล คาร์บอกซิล เอไมด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นผลให้น้ำมันชีวภาพดังกล่าวมีองค์ประกอบออกซิเจนสูงจากผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ อีกทั้งยังพบองค์ประกอบที่เป็นกลุ่มแอลเคนปริมาณมาก เช่น ออกเทน (Octane) และ เฮกซะดีเคน (Hexadecane) เป็นต้น

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงองค์ประสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้ว

ลำดับ	**องค์ประกอบ**	**ปริมาณ (ร้อยละ)**
1	แอลเคน, แอลคีน และแอลไคน์	51.37
2	แอลกอฮอลล์	28.71
3	เอมีน และเอไมด์	8.24
4	อื่นๆ	11.68
5	รวม	100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4. การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1



รูปที่ 4.13 โครมาโตแกรมแสดงองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.12 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ค่อนข้างซับซ้อนเช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพอื่นๆ คือประกอบด้วยสารประกอบที่เป็นอนุพันธุ์ของหมู่ฟีนอล คาร์บอกซิล เอไมด์ เป็นต้น เป็นผลให้องค์ประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพสูง ดังผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงองค์ประสัดส่วนองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้ว ในอัตราส่วน 1:1

ลำดับ	องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)
1	แอลเคน, แอลคีน และแอลไคน์	28.77
2	แอลกอฮอลล์	51.48
3	เอมีน และเอไมด์	8.88
4	อื่นๆ	10.87
5	รวม	100

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพทั้ง 4 ตัวอย่างพบว่าประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เป็นอนุพันธ์ของแอลกอฮอล์ปริมาณมาก สอดคล้องตามผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของน้ำมันชีวภาพทั้ง 4 ตัวอย่างที่ประกอบด้วยออกซิเจนปริมาณมาก และเป็นไปตามเอกสารอ้างอิง [12] ที่กล่าวว่าชีวมวลจะประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีออกซิเจนปริมาณมาก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ทั้งสามองค์ประกอบประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก เป็นผลให้น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนไพโรไลซิสชีวมวลจะประกอบด้วยออกซิเจนหรือหมู่ไฮดรอกซิลปริมาณสูง ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพเพิ่มเติม

4.4.3 วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ของแข็งและแก๊ส

1) วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง

ตารางที่ 4.12 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของแข็ง

องค์ประกอบ	เหง้ามันสำปะหลัง	ถ่านชาร์			
		ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	แคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก	ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก	ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
Carbon (%)	38.6	48.65	38.23	47.48	51.59
Hydrogen (%)	8.44	5.77	4.18	5.47	6.10
Nitrogen (%)	1.75	1.06	1.10	1.82	1.32
Oxygen (%)	49.85	44.52	56.50	45.23	40.98
H/C (mole/mole)	2.62	1.42	1.31	1.38	1.42
O/C (mole/mole)	0.97	0.69	1.11	0.71	0.60
Heating Value (kJ/g)	3,985	3,345	3,778	3,461	2,314

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) และค่าความร้อนของถ่านชาร์ตามตาราง 4.18 พบว่าถ่านชาร์มีองค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน (CHNO) ใกล้เคียงกับเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนที่มีค่าความร้อนที่ใกล้เคียงกับเหง้ามันสำปะหลังอีกด้วย

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ (GC)

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊ส

องค์ประกอบ	**ผลิตภัณฑ์แก๊ส (%)**			
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	**แคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก**	**ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก**	**ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก**
methane	71.093	71.408	72.998	71.944
ethane	11.020	6.168	8.609	8.471
ethylene	11.967	17.175	13.055	13.225
propane	2.545	0.000	1.693	1.637
Propylene	0.000	5.248	0.000	0.000
acetylene	1.465	0.000	0.857	0.806
n-butane	0.000	0.000	0.000	0.000
tran-2-butene	1.359	0.000	0.955	0.000
1-butene	0.551	0.000	0.000	0.809
iso-butylene	0.000	0.000	0.000	0.446
cis-2-butene	0.000	0.000	0.000	0.000
iso-pentane	0.000	0.000	0.000	0.396
n-pentane	0.000	0.000	1.461	1.652
methyl acetylene	0.000	0.000	0.000	0.000
1,3-butadiene	0.000	0.000	0.100	0.000
tran-2-pentene	0.000	0.000	0.271	0.614
total	100.000	100.000	100.000	100.000

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ (GS) พบว่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลังทั้งแบบไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา และแบบมีตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์

ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก, ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมฯ ร้อยละ1 โดยน้ำหนัก ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ คือ พบว่ามากกว่าร้อยละ 70 คือแก๊สมีเทน (Methane) รองลงมาคือแก๊สอีเทน (Ethane) และเอทีลีน (Ethylene)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง และเปรียบเทียบผลการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและเบส สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สมบัติของเหง้ามันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์สมบัติของวัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลังสามารถสรุปได้ว่า เหง้ามันสำปะหลังประกอบด้วยความชื้นร้อยละ 11.08 ขี้เถ้าร้อยละ 4.37 สารระเหยร้อยละ 75.63 และคาร์บอนคงที่ร้อยละ 8.92 โดยมีค่าความร้อนเท่ากับ 3,985 kJ/g เมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุพบว่าเหง้ามันสำปะหลังประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 38.6 ไฮโดรเจนร้อยละ 8.44 ไนโตรเจนร้อยละ 1.75 ออกซิเจนร้อยละ 49.85 และกำมะถันน้อยกว่าร้อยละ 0.01 และเหง้ามันสำปะหลังมีค่าการสลายตัวทางความร้อนอัตราสูงที่อุณหภูมิ 316 องศาเซลเซียส

5.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

จากการทดลองศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถสรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือที่ ขนาดอนุภาคของเหง้ามันสำปะหลัง 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิปฏิกิริยา 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที โดยให้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพสูงที่สุดที่ร้อยละ 43.04 เมื่อศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม สามารถสรุปผลได้ว่า ปริมาณที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์กับ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

5.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

จากการศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลังแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้รับผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพในปริมาณที่มากกว่ากระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น

เนื่องจากการส่งเสริมให้เกิดกระบวนการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น

5.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์

5.4.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

จากการศึกษาสมบัติของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลังทั้งแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบคาร์บอนมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเหง้ามันสำปะหลัง ทำให้น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนที่สูงกว่าเหง้ามันสำปะหลัง ยกเว้นผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซโดโลไมต์ที่มีองค์ประกอบคาร์บอนน้อยกว่า และมีค่าความร้อนสูงกว่าเหง้ามันสำปะหลังเหล็กน้อย จากผลการวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโตเมทรี (GC-MS) น้ำมันชีวภาพทุกตัวอย่างมีองค์ประกอบออกซิเจนสูงเนื่องจากประกอบด้วยสารประกอบที่มีออกซิเจนปริมาณมาก จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีส่วนช่วยลดความเป็นกรดของน้ำมัน และตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ทำให้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันสูงขึ้นจาก 51 ถึง 96 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัม เนื่องจากผลิตประกอบด้วยองค์ประกอบที่เป็นกรดมาก

ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งชนิดกรดและเบสสามารถช่วยลดองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาวของน้ำมันชีวภาพได้ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาแครกกิ้ง หรือ รีฟอร์มมิ่ง ที่มากขึ้นจากตัวเร่งปฏิกิริยา และลดสัดส่วนองค์ประกอบกลุ่มที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล และคาร์บอนิลได้ และเพิ่มสัดส่วนองค์ประกอบผลิตภัณฑ์กลุ่มแอลเคน แอลคีน และแอลไคน์ได้ โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิยา FCC ใช้แล้ว

จากผลการวิเคราะห์สมบัติน้ำมันชีวภาพทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดงานวิจัยนี้คือ FCC ใช้แล้ว ช่วยปรับปรุงสมบัติขิงน้ำมันชีวภาพอย่างเห็นได้ชัด ทั้งองค์ประกอบทางเคมีและค่าความร้อน โดยไม่ทำให้ค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้น ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส งานวิจัยนี้คือแคลไซน์โดโลไมต์ ประกอบด้วยสารประกอบ CaO และ MgO ทำให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมีค่าความเป็นกรดสูง และให้ค่าความร้อนต่ำ ไม่เหมาะสมที่จะใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง

5.4.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊ส

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สใกล้เคียงกับแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ประกอบด้วยแก๊สมีเทน (Methane) มากถึงร้อยละ 71 และแก๊สอีเทน (Ethane) รองลงมา

5.4.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติถ่านชาร์

จากผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชาร์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนคุณสมบัติของถ่านชาร์อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับสมบัติของถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 น้ำมันชีวภาพที่ได้มีความเป็นกรดสูงและมีค่าร้อยละของออกซิเจนที่สูงจึงต้องนำน้ำมันชีวภาพไปทำการปรับสภาพให้มีค่าความเป็นกรดและร้อยละของออกซิเจนลดลงก่อนที่จะนำไปเป็นพลังงานเชื้อเพลิงต่อไป

5.5.2 ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถไปขยายผลในเชิงพาณิชย์ และอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้เนื่องจากประเทศไทยมีปริมาณชีวมวลเหลือใช้มาก

5.5.3 ควรศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถอธิบายผลการทดลองได้เพิ่มขึ้น

5.5.4 ควรวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบเหง้ามันสำปะหลัง เพื่อใช้ในการอธิบายผลองค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ได้ชัดเจนมากขึ้น

5.5.5 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด และเบสกลุ่มอื่นๆ ต่อกระบวนไพโรไลซิสแบบต่อเนื่องของเหง้ามันสำปะหลัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.
การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลัง

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลังด้วยกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ ก-1, ก-2, ก-3 และ ก-4

ตารางที่ ก-1 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

Particle size (mm)	Liquid (%wt.)			Solid (%wt)			Gas (%wt)		
	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
0.3-0.6	29.47	26.91	28.19	30.36	27.61	28.98	40.17	45.49	42.83
0.6-0.85	33.41	30.64	32.02	29.75	28.06	28.91	36.84	41.30	39.07
0.85-1.4	34.93	31.35	33.14	29.31	30.52	29.92	35.75	38.13	36.94
1.4-2	35.95	35.28	35.61	30.44	32.05	31.25	33.61	32.66	33.14
2-3	37.39	37.88	37.63	33.58	33.34	33.46	29.03	28.78	28.91

ตารางที่ ก-2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

Temperature (°C)	Liquid (%wt.)			Solid (%wt)			Gas (%wt)		
	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
400	35.20	36.27	35.75	36.16	37.08	36.62	28.63	26.64	27.63
425	36.86	36.96	36.91	34.33	35.28	34.80	28.81	27.75	28.28
450	37.39	37.88	37.63	33.58	33.34	33.46	29.03	28.78	28.91
475	40.30	38.21	39.25	29.29	31.83	30.56	30.41	29.97	30.19
500	41.82	44.27	43.04	27.46	24.75	26.10	30.72	30.98	30.85

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-3 ผลของอัตราการป้อนสารต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

Feed rate (g/minute)	Liquid (%wt.)			Solid (%wt)			Gas (%wt)		
	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
3.2	36.12	34.72	35.42	25.74	24.64	25.19	38.14	40.64	39.39
10.6	37.45	39.29	38.37	25.10	26.60	25.85	37.44	34.11	35.78
18.0	41.82	44.27	43.04	27.46	24.75	26.10	30.72	30.98	30.85
25.4	38.73	37.48	38.11	28.95	34.22	31.58	32.32	28.29	30.31
32.8	37.05	35.87	36.46	34.68	36.55	35.61	28.28	27.57	27.92

ตารางที่ ก-4 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

N_2 flow rate (cm^3/minute)	Liquid (%wt.)			Solid (%wt)			Gas (%wt)		
	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
50	32.27	30.39	31.33	29.34	28.52	28.93	38.39	41.08	39.74
100	33.11	34.27	33.69	29.53	28.43	28.98	37.36	37.31	37.33
150	41.82	44.27	43.04	27.46	24.75	26.10	30.72	30.98	30.85
200	38.61	39.71	39.16	30.86	31.57	31.22	30.53	28.72	29.62
250	38.20	35.99	37.09	29.00	36.49	32.75	32.80	27.52	30.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข
การศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม

จากการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องเพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพ ที่ภาวะขนาดอนุภาค 2-3 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสาร 18 กรัมต่อนาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 150 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ได้ผลการทดลองดังตารางที่ ข-1, ข-2 และ ข-3

ตารางที่ ข-1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

Dolomite	Liquid (%wt.)			Solid (%wt)			Gas (%wt)		
(%wt)	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
0	41.82	44.27	43.04	27.46	24.75	26.10	30.72	30.98	30.85
1	40.67	41.03	40.85	23.47	25.9	24.68	35.87	33.07	34.47
3	39.14	38.02	38.58	23.21	23.74	23.48	37.65	38.24	37.94
5	38.41	37.53	37.97	23.09	22.97	23.03	38.50	39.49	39.00
7	37.13	36.65	36.89	23.01	23.05	23.03	39.85	40.30	40.08

ตารางที่ ข-2 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

Spent FCC	Liquid (%wt.)			Solid (%wt)			Gas (%wt)		
(%wt)	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
0	41.82	44.27	43.04	27.46	24.75	26.10	30.72	30.98	30.85
1	39.51	38.84	39.18	29.33	29.28	29.30	31.16	31.88	31.52
3	40.97	40.00	40.48	26.83	28.87	27.85	32.20	31.13	31.67
5	37.67	37.15	37.41	27.09	27.39	27.24	35.24	35.46	35.35
7	36.00	36.93	36.47	26.88	26.93	26.91	37.11	36.14	36.63

ตารางที่ ข-3 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1 ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

Mixed catalyst	Liquid (%wt.)			Solid (%wt)			Gas (%wt)		
(%wt)	1	2	Average	1	2	Average	1	2	Average
0	41.82	44.27	43.04	27.46	24.75	26.10	30.72	30.98	30.85
1	36.93	36.83	36.88	29.80	27.43	28.62	33.27	35.73	34.50
3	36.35	35.66	36.00	28.77	28.98	28.88	34.88	35.36	35.12
5	35.71	35.12	35.41	28.78	27.52	28.15	35.51	37.36	36.44
7	34.73	34.58	34.65	28.23	27.21	27.72	37.05	38.21	37.63

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์การกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์เหลวตามคาบจุดเดือด

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวด้วยเครื่อง Simulated distillation gas chromatography ตามมาตรฐาน ASTM D2887 เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือด และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น และวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของแต่ละสารดังแสดงใน ตาราง ค-1

ตารางที่ ค-1 องค์ประกอบของสารตามคาบจุดเดือด

จุดเดือด(องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ
IBP-180	Naphtha (%)
180-250	Kerosene (%)
250-300	Light gas oil (%)
300-350	Heavy gas oil (%)
350-FBP	Long residue hydrocarbon (%)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟ-แมสสเปกโตรเมทรี

ตารางที่ ง-1 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทเมทรี

RT (minute)	Ref	Peak Area	Name
6.428	456	0.73	Cyclobutane, Methylene-
6.540	1569	0.71	Pent-3-enylamine
7.455	2793	0.93	Spirohexan-5-one
7.712	2592	5.14	Phenol
8.065	71	0.39	Acetaldehyde
8.503	1377	0.9	4-Pentanal
8.739	1255	0.67	1,4-Pentadiene, 3-methyl-
8.963	5379	3.67	Phenol, 2-methyl-
9.290	5373	5.83	Phenol, 3-methyl-
9.584	10417	1.62	Phenol, 2-methoxy-
9.841	9563	0.68	Benzeneethanamine
10.295	9907	0.46	Phenol, 2-ethyl-
10.461	9936	2.89	Phenol, 2,4-dimethyl-
10.728	9918	1.09	Phenol, 4-ethyl-
10.761	9940	1.58	phenol, 3,5-dimethyl-
11.167	5754	7.22	Catechol
11.253	38317	1.16	Dodecane
11.344	9642	0.46	Benzeneethanamine, N-methyl-
11.814	16430	1.55	Phenol, 4-ethyl-3-methyl-
12.103	10432	3.44	1,2-benzenediol, 3-methyl-
12.215	5759	1.61	Hydroquinone
12.451	25982	0.44	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-
12.504	10434	4.9	1,2-benxenediol, 4-methyl-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

12.863	23669	0.62	Thymol
12.948	56065	0.76	4-indancarboxylicacid
13.167	4529	0.36	1,2-ethanediamine
13.237	10147	1.84	2-aminobenzyl alcohol
13.392	17359	1.05	1,4-benzenediol, 2,5-dimethyl-
13.430	27407	0.93	Phenol, 2,6-dimethoxy-
13.462	14521	0.68	1H-indenol
13.793	17272	7.96	4-Ethylcatwchol
13.943	13988	0.91	Indolizine, 3-methyl-
14.034	59879	3.58	Tetradecane
14.093	25236	0.41	2,4,6-Octatrien-1-ol, 3,7-dimethyl-(E,E)-
14.221	32903	0.54	2,3-dimethylamphetamine
14.269	22639	1.72	2-Alkyl-4-methylphenol
14.419	28670	0.54	4(1H)-Pyrimidinone, 2-(ethythio)-
14.537	225033	0.7	Folic acid
14.612	26099	1.49	4-Isopropylthiophenol
14.692	32905	0.68	3,5-dimethylamphetamine
14.751	33397	1.59	phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-
14.831	7875	0.62	1-Heptanamine
14.986	25981	2.26	1,3-Benzenediol, 4-propyl-
15.216	35080	1.53	1-Cyclohexene-1-acetaldehyde-, 2,6,6-trimethyl-
15.296	117637	0.52	Nonadecane
15.451	24473	0.38	4-Hydroxy-3-methylacetophenone
15.499	35317	0.57	Silanediamine, 1-Chloro-N,N,N,N-1-pentamethyl-
16.077	24462	0.94	Benzoic acid, 2,4-dimethyl-
16.120	24386	0.66	4-Chromanol
16.419	21872	0.42	1-Hexanimine, N-nitro-
16.500	83028	5.73	Hexadecane

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

17.634	71394	0.98	Pentadecane
18.719	105886	4.67	Octadecane
20.313	727	0.44	Propanamide
20.672	612	0.38	N-Methylallylamine
20.725	194493	2.28	Hexacosane
22.399	60440	0.51	Dodecanamide
22.565	223852	0.9	Hentraicontane
23.977	128443	1.2	9-Octadecenamide, (Z)-
24.175	83610	0.54	Tetradecanamide

ตารางที่ ง-2 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทเมทรี

RT (minute)	Ref	Peak Area	Name
6.428	430	0.84	Spiropentane
6.540	1648	0.88	Butyrolactone
7.455	421	0.76	1-Pentyne
7.717	2592	5.69	phenol
8.070	39994	0.61	Pentane, 2,2-dimethyl-
8.503	13927	0.56	3,3'-Iminobispropylamine
8.739	5931	0.4	1-Methylcycloheptene
8.963	5379	4	Phenol, 2-methyl-
9.290	5367	5.96	p-Cresol
9.584	10417	3.54	Phenol, 2-methoxy-
9.846	5200	0.59	Pyridine, 3,4-dimethyl-
10.295	9907	0.51	Phenol, 2-ethyl-
10.461	9936	2.79	Phenol, 2,4-dimethy
10.728	9908	1.04	Phenol, 4-ethyl
10.760	9915	1.38	Phenol, 2-ethyl-
11.172	5754	7	Catechol

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

11.253	97086	2.01	Oxalic acid, isohexyl neopentyl ester
11.820	16430	1.29	Phenol, 4-ethyl-3-methyl-
12.108	10431	2.69	1,3-Benzenediol, 2-methyl-
12.215	1570	2.25	Pent-4-enylamine
12.456	25382	1.04	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-
12.504	10433	4.09	1,2-Benzenediol, 4-methyl-
12.948	24497	0.78	1-(4-Hydroxymethylphenyl)ethanone
13.273	17627	1.77	2-Cyclopenten-1-one, 3,4,5,5-tetramethyl
13.397	10196	0.77	Pyridine, 3-ethyl-, 1-oxide
13.435	27407	2.21	Phenol, 2,6-dimethoxy-
13.542	23343	0.41	4-Ethylphenethylamine
13.793	17272	5.44	4-Ethylcatechol
13.954	13977	0.59	1H-Indole, 3-methyl-
14.034	59881	5.31	Tetradecane
14.098	24666	0.78	Guanine
14.221	33397	0.8	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)
14.275	22638	1.71	5-Methyl-2-allylphenol
14.622	26017	0.72	4-Methoxyphenyl methyl carbinol
14.697	37087	0.44	Benzenamine, 2-methoxy-5-nitro-
14.756	33250	3.66	trans-Isoeugenol
14.836	21287	0.43	4-Amino-2-oxy-furazan-3-carboxylic acid
14.991	25981	1.71	1,3-Benzenediol, 4-propyl-
15.227	34991	1.78	Benzenethiol, 4-(1,1-dimethylethyl)-
15.307	129497	0.47	Nonadecane, 3-methyl-
15.767	16777	0.39	Benzenamine, 5-methoxy-2-methyl
16.505	83027	8.16	Hexadecane
17.639	616	0.38	Azetidine, 1-methyl-
18.719	105884	5.66	Octadecane

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

20.730	202662	2.21	Heptacosane
22.404	252	0.56	Ethanamine, N-methyl-
22.570	3692	0.78	2-Butyn-1-ol, 4-methoxy-
23.988	128443	1.47	9-Octadecenamide, (Z)-
24.180	4620	0.7	1-Propanamine, N1-methyl-2-methoxy

ตารางที่ ง-3 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ใช้แล้วด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทเมทรี

RT (minute)	Ref	Peak Area	Name
5.642	5109	3.4	Bicyclo[2.1.1]hex-2-ene, 2-ethenyl
5.786	5107	1.51	Tricyclo[4.1.1.0(7,8)]oct-3-ene
6.439	6359	1.3	2-Hexynoic acid
6.615	72	0.89	Acetaldehyde
7.471	2592	9.21	Phenol
8.075	73873	3.3	Octane
8.749	77	0.82	Ethylene floro
8.969	5380	5.58	Phenol, 2-methyl-
9.295	5368	7.62	p-Cresol
9.589	10715	2.68	Cyclohexane, (1-methylethylidene)-
9.851	5134	0.66	3-Chloro-N-methylpropylamine
10.306	9995	0.79	Benzenemethanol, .alpha.-methyl
10.466	9877	2.86	2-Pyridinemethanamine, .alpha.-methyl
10.734	9917	1.29	Phenol, 4-ethyl-
10.766	9915	0.97	Phenol, 2-ethyl-
11.172	1944	2.9	Ethanedial, dioxime
11.263	38315	8.45	Dodecane
11.820	16452	1.17	Phenol, 3-(1-methylethyl)-
12.108	1022	1.36	1,5-Hexadiyne
12.510	10478	1.83	2-(2-Methylvinyl)thiophene

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

13.799	17272	1.89	4-Ethylcatechol
14.039	59881	13.92	Tetradecane
14.275	76	0.64	Ethyne, fluoro-
14.991	10082	0.89	Methanesulfonamide, N,N-dimethyl-
15.141	727	0.74	Propanamide
16.510	83026	13.72	Hexadecane
18.596	53808	1.31	N-Isopropyl-3-phenylpropanamide
18.725	71394	5.92	Pentadecane
20.736	1557	1.73	Cyclopropanecarboxamide

ตารางที่ ง-4 ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแคลไซน์โดโลไมต์และ FCC ใช้แล้วในอัตราส่วน 1:1 ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟ-แม๊สสเปกโทเมทรี

RT (minute)	Ref	Peak Area	Name
5.786	75	0.45	Ethylene oxide
6.434	72	0.69	Acetaldehyde
6.541	1611	0.87	Ethenamine, N-methyl-N-nitroso-
7.455	2744	0.76	4-Cyclopentene-1,3-dione
7.717	2591	7.25	Phenol
8.070	1537	0.6	3-Butenamide
8.936	5380	4.56	Phenol, 2-methyl-
9.290	5268	7.23	p-Cresol
9.584	10423	1.63	2-Acetyl-5-methylfuran
9.841	32947	0.61	Benzeneethanamine, .alpha.,2,6-trimethyl-
10.301	9907	0.8	Phenol, 2-ethyl-
10.461	9936	3.19	Phenol, 2,4-dimethyl-
10.729	9917	1037	Phenol, 4-ethyl-
10.761	5199	1.39	Pyridine, 3,5-dimethyl-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

10.921	9483	0.49	N,N-Dimethyl-dimethylphosphoric amide
11.167	5754	7.36	Catechol
11.253	48880	2.27	Undecane, 2,4-dimethyl-
11.814	16450	1.48	Phenol, 4-(1-methylethyl)-
12.103	10429	2.74	1,2-Benzenediol, 4-methyl-
12.210	72	0.42	Acetaldehyde
12.499	10434	4.3	1,2-Benzenediol, 4-methyl-
12.868	23712	0.5	Phenol, p-tert-butyl-
13.237	15295	1.75	Phenol, 4-(2-propenyl)-
13.398	17438	0.61	2-(2,2-Dimethylvinyl)thiophene
13.435	17890	0.44	Isoquinoline, decahydro-
13.462	32947	0.75	Benzeneethanamine, .alpha.,2,6-trimethyl-
13.793	17321	5.47	1,3-Benzenediol, 4-ethyl-
14.034	59880	6.12	Tetradecane
14.093	25794	0.87	Vanillin
14.275	22638	1.37	5-Methyl-2-allylphenol
14.414	16328	0.57	4-Hydroxy-3-methylbenzaldehyde
14.617	26119	0.81	2-(2,2-Dimethylcyclopropyl)thiophene
14.751	32903	0.93	2,3-Dimethylamphetamine
14.986	25981	1.25	1,3-Benzenediol, 4-propyl-
15.227	24874	1.13	Benzoic acid, 2-(methylamino)-
15.296	616	0.49	Azetidine, 1-methyl-
16.500	83027	9.73	Hexadecane
18.719	105885	7.17	Octadecane
20.730	194493	3	Hexacosane
22.399	106565	0.85	Hexadecanamide
22.565	1981	1.02	1,3-Propanediamine, N-methyl-
23.982	128445	2.24	9-Octadecenamide, (Z)-
24.175	130204	0.8	Octadecanamide

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกันต์ธีรา คำภีระ เกิดเมื่อวันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมตอนปลาย จากโรงเรียนสระบุรีวิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 ก่อนเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาคปลาย ปีการศึกษา 2558 ได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ชื่องาน The 24th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 9th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology" (PPC & PETROMAT Symposium 2018) โดยนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์และได้รับการตีพิมพ์งานวิจัยลงในบทความวิจัยของงานประชุมวิชาการในครั้งนี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. "เซลลูโลส." Retrieved 20 พฤษภาคม, 2561, from http://www.wikiwand.com/th/เซลลูโลส.
2. "การเกิดปิโตรเลียม." Retrieved 20 พฤษภาคม, 2561, from http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/1589-การเกิดปิโตรเลียม.
3. "ชีวมวล." Retrieved 20 พฤษภาคม, 2561, from http://www.energyvision.co.th/14424507/พลังงานชีวมวล.
4. "ปิโตรเลียมคืออะไร." Retrieved 20 พฤษภาคม, 2561, from https://www2.pttep.com/Energyliteracy/PTTEP/issue.aspx?id=21.
5. "พลังงานทดแทน." Retrieved 20 พฤษภาคม, 2561, from https://th.wikipedia.org/wiki/พลังงานทดแทน.
6. "ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย." Retrieved 20 พฤษภาคม, 2561, from http://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=486.
7. Bertero M, S. U. (2013). "Conversion of Pine Sawdust Bio-oil (Raw and Thermally processed) over Equilibrium FCC Catalyst." Bioresource Technology 135: 12.
8. Harold, H. S. (1991). The Chemistry of Hydrocarbon fuel. New York.
9. He M, X. B., Liu S, Hu Z, Guo X, Luo S,et al (2010). "Syngas Production from Pyrolysis of Municipal Solid Waste (MSW) with Dolomite as Downstream Catalysts." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 87: 8.
10. Matar, S. (1994). Chemistry of Petrochemical Processes. Texas.
11. O, T. (2014). "A Comparison of Catalyst Zeolite and Calcined Dolomite for Gas Production from Pyrolysis of Municipal Solid Waste (MSW)." Ecological Engineering 69: 7.
12. Pattiya, A. (2018). Catalytic pyrolysis Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications. Maha Sarakham, Thailand, Mahasarakham University.
13. Pattiya A, T. J., Bridgwater AV (2008). "Pyrolysis of Casava Rhizome in the Presence Catalysts." Apply Pyrolysis 81: 8.

14. Pattiya A, T. J., Bridgwater AV (2010). "Evaluated of Catalytic Pyrolysis of Cassava Rhizome by Principal Component Analysis." Fuel 89: 10.

15. Sirijanusorn S, S. K., Pattiya A (2013). "Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Counter Rotating Twin Screw Reactor Unit." Bioresource Technology 139: 6.

16. Stefanidis SD, K. S., Kalogainnis KG, Iliopoulou EF, Delimitis A, Yiannoulakis H, et al (2016). "Natural magnesium oxide (MgO) catalysts: A cost-effective sustainable alternative to acid zeolites for the in situ upgrading of biomass fast pyrolysis oil." Applied Catalysis B: Environmental 196: 10.

17. Suttibak S, S., Pattiya A (2012). "Production of Bio-oil via Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Fluidised-Bed Reactor." Energy Procedia 14: 6.

18. เรืองพรวิสุทธิ์, ว. (2554). เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์ท้อป.

19. ไชยเวช, ป. (2548). ปิโตรเลียมเทคโนโลยีปราโมชย์ ไชยเวช. กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

20. กรมพัฒนาพลังงานและอนุรักษพลังงาน (2558) พลังงานชีวมวล.

21. กลุ่มบริษัทพีซีสยาม (2556). "แร่โดโลไมต์ ". Retrieved 7 กรกฎาคม, 2560, from http://www.pcsiamgroup.com/fckfile/file/dolomite.pdf.

22. งามจรัสศรีวิชัย, น. ห. ช. (2556). เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.

23. ตันตยานนท์, ศ. (2535). ปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

24. พรหมบุตร ภ, ว. อ., สมมณี ป, วิทิตศานต์ ธ (2557). "การแตกตัวของน้ำมันพืชที่ใช้บริโภคด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา CaO และ FCC ที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ." วิศวกรรมสาร มก. 89: 10.

25. อ้อยใจ, ฉ. (2557). ผลของการแคลไซน์โดโลไมต์ต่อไพโรไลซิสน้ำมันพืชใช้แล้ว. สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์. กรุงเทพฯ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย