การผลิตน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้นิกเกิลโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

นายกิตติเดช ประเสริฐทวีพร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIO-OIL PRODUCTION FROM PYROLYSIS OF RUBBER WOOD AND CASSAVA RHIZOME USING Ni/DOLOMITE IN FIXED BED REACTOR

Mr. Kittidech Praserttaweeporn

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science

Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้นิกเกิลโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง
โดย	นายกิตติเดช ประเสริฐทวีพร
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร ชวศิริ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

.... กรรมการ

Chulalongkorn University

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

กิตติเดช ประเสริฐทวีพร : การผลิตน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้นิกเกิลโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง. (BIO-OIL PRODUCTION FROM PYROLYSIS OF RUBBER WOOD AND CASSAVA RHIZOME USING Ni/DOLOMITE IN FIXED BED REACTOR) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

กระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ถูกใช้ในการศึกษาหาภาวะดำเนินการที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณผลได้ที่ดีที่สุดสำหรับน้ำมันชีวภาพ จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิลโดโลไมต์ โดยทดลองในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง มีปัจจัยต่างๆประกอบด้วย ขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.250-2.000 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส เวลาที่ 45-90 นาที และอัตราการไหลไนโตรเจนที่ 60-180 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการศึกษาพบว่าภาวะดำเนินการที่ดีที่สุดคือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร และ 0.850-2.000 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งภาวะดำเนินการดังกล่าวให้ปริมาณร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพร้อยละ 39.48 และ 40.39 ของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ ซึ่งเมื่อศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไรซิสพบว่าปริมาณน้ำมันชีวะภาพลดลงเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเติมเข้าไปในระบบ ในขณะที่ร้อยละผลได้ของปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้นแก๊สสูงสุดโดยวัดได้ที่ร้อยละ 39.30 และ 33.37 ของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ นอกจากนี้พบว่าในน้ำมันชีวภาพมีองค์ประกอบหลักคือ แอลเคน อะโรมาติก สารประกอบไนโตรเจนต และสารประกอบออกซิเจนต ในขณะที่แก๊สมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน เป็นองค์ประกอบหลัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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

6171912823 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: Bio-oil, Ni/Dolomite, pyrolysis, Catalyst, Biomass

Kittidech Praserttaweeporn : BIO-OIL PRODUCTION FROM PYROLYSIS OF RUBBER WOOD AND CASSAVA RHIZOME USING Ni/DOLOMITE IN FIXED BED REACTOR. Advisor: Prof. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.

Bio-oil production from pyrolysis of rubber wood and cassava rhizome in fixed bed reactor were investigated to find the optimum conditions for giving the highest bio-oil yield by using catalysts such as FCC, Dolomite and Ni/Dolomite. Experiments were carried out in fixed bed reactor that the studied variables were biomass particle size range of 0.250-2.000 mm, reaction temperature 400-600 ^{O}C, reaction time of 45-90 min and nitrogen flow rate of 60-180 ml/min. The results from experiment showed that the optimum conditions were average particle size of 0.355-0.710 mm and 0.850-2.000 mm for rubber wood and cassava rhizome, respectively, temperature 500 ^{O}C, 45 min reaction time and nitrogen flow rate of 60 ml/min. This condition produced bio-oil 39.48% and 40.39% for rubber wood and cassava rhizome, respectively. For performance of catalysts on pyrolysis showed that the bio-oil yield was decreased when catalyst was added into the process while gaseous product yield increased which the maximum measurement 39.30% and 33.37% for rubber wood and cassava rhizome, respectively. Additionally, bio-oil products were found that the major components as alkanes, aromatic, nitrogenic and oxygenic compound while gaseous products were found methane.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยให้คำปรึกษาและเสนอแนวทาง พร้อมให้คำแนะนำให้งานวิจัยและวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ช่วยแสดงความคิดเห็นในการปรับปรุงงานวิจัยในครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรินทร ชวศิริ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชลธารา และรองศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาเข้าร่วมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมทั้งแก้ไขจุดบกพร่องที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ทำให้เกิดความถูกต้องและสมบูรณ์ในงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณบุคลากรภายในศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ รวมถึง ห้องปฏิบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์ต่างๆ และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ในภาควิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่ได้ช่วยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และกำลังใจในการทำงานวิจัยและวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังทุกท่านที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

กิตติเดช ประเสริฐทวีพร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

.... ค

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

.... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง

กิตติกรรมประกาศ... จ

สารบัญ .... ฉ

บทที่ 1 7

บทนำ...7

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย..7

1.2 วัตถุประสงค์ 9

1.3 ขอบเขตงานวิจัย...9

1.4 ขั้นตอนวิธีดาเนินงานวิจัย 9

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 10

บทที่ 2 11

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..11

2.1 น้ำมันชีวภาพ 11

2.1.1 องค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพ 12

2.1.2 การใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพ..15

2.2 ชีวมวล 15

2.2.1 ศักยภาพชีวมวล 16

2.3 องค์ประกอบของชีวมวล 18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose) 18
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) 19
2.3.3 ลิกนิน (Lignin) 20
2.3.4 โปรตีน (Protein) 21
2.4 ส่วนประกอบของชีวมวล 21
2.4.1 ความชื้น (Moisture) 21
2.4.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance) 21
2.4.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือเถ้า (Ash) 22
2.5 พลังงานที่ได้จากชีวมวล 22
2.6 ข้อดีและข้อจำกัดของพลังงานชีวมวล 23
2.7 การแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง 24
2.7.1 ไพโรไลซิส (Pyrolysis) 25
2.7.2 ประเภทของไพโรไลซิส 26
2.7.3 ตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส 28
2.7.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส 30
2.8 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ 31
2.8.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ 31
2.8.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน 31
2.8.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ 32
2.8.4 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ 32
2.8.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู 33
2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) 33
2.9.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous catalysts) 34
2.9.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts) 34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.10 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts preparation)................36
2.10.1 การเคลือบฝังหรือการชุบเอิบ (Impregnation) 36
2.10.2 การตกตะกอน (Precipitation) 36
2.11 การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst activation) 37
2.11.1 การเผากระตุ้น (Calcination) 37
2.11.2 การรีดักชัน (Reduction) 38
2.12 โดโลไมต์ (Dolomite) 38
2.11.1 สมบัติทั่วไปของโดโลไมต์..39
2.13 นิกเกิล/โดโลไมต์ (Ni/Dolomite)...40
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 40
บทที่ 3 43
เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย...43
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 43
3.2 สารตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 48
3.3 ขั้นตอนการทดลอง 48
3.3.1 การเตรียมและวิเคราะห์(ชีวมวลและตัวเร่งปฏิกิริยา)...48
3.3.2 ออกแบบการทดลอง...49
3.3.3 วิธีการทดลอง 50
3.3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของสาร 51
3.4 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง..52
บทที่ 4 54
การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง...54
4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก 55

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแยกธาตุของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 57

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา 58

4.2.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโดโลไมต์ก่อน-หลังการแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝัง (Impregnation) นิกเกิลบนโดโลไมต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) 58

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อน-หลังการแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝัง (Impregnation) นิกเกิลบนโดโลไมต์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractrometer, XRD) 61

4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบรูนัวร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET) 62

4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง64

4.3.1 ผลของขนาดชีวมวล 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตรของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง....................64

4.3.2 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 67

4.3.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา 45, 60 และ 90 นาทีของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 70

4.3.4 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60, 120 และ 180 มิลลิลิตรต่อนาทีของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง....................72

4.3.5 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์, FCC และนิกเกิล/โดโลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดในภาวะที่เหมาะสมของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 74

4.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนของปริมาณน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เหลว 78

4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง 79

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 79
4.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ที่เกิดในภาวะที่เหมาะสม 81
4.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 83
บทที่ 5 86
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 86
5.1 สรุปผลการทดลอง 86
5.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง......86
5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นทางของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 86
5.1.3 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง 87
5.1.4 ศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม87
5.1.5 ศึกษาผลการวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง 87
5.1.6 ศึกษาผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหงมันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง 88
5.2 ข้อเสนอแนะ 88
ภาคผนวก 90
ภาคผนวก ก. 91
การวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลัง 91
1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) 91

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.1 การวิเคราะห์ น้ำหรือความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว................................91

1.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ 93

1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน 93

2. การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 93

3. การศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิล/โดโลไมต์ ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม 96

4. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์ 97

4.1 แก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatography, GC) 97

4.2 แก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS) 98

บรรณานุกรม 2

ประวัติผู้เขียน 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2. 1 แสดงปริมาณร้อยละธาตุองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพของชีวมวลประเภทต่างๆ ...11

ตารางที่ 2. 2 คุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันชีวภาพ 12

ตารางที่ 2. 3 แสดงปริมาณร้อยละขององค์ประกอบทั่วไปของน้ำมันชีวภาพของชีวมวลประเภทต่างๆ 13

ตารางที่ 2. 4 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2556 17

ตารางที่ 2. 5 แสดงค่าความร้อน ความชื้น ขี้เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของชีวมวล 23

ตารางที่ 2. 6 กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) และกระบวนการเชิงเคมีชีวภาพ (Biochemical conversion)....................25

ตารางที่ 2. 7 ตารางเปรียบเทียบประเภทของการไพโรไลซิสต่าง ๆ 27

ตารางที่ 4. 1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง 57

ตารางที่ 4. 2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุน (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์..............63

ตารางที่ 4. 3 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพารา 77

ตารางที่ 4. 4 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง.......77

ตารางที่ 4. 5 ผลอัตราส่วนของปริมาณน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เหลว...................78

ตารางที่ 4. 6 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไรซิสไม้ยางพารา 80

ตารางที่ 4. 7 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไรซิสเหง้ามันสำปะหลัง....................80

ตารางที่ 4. 8 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไรซิสไม้ยางพารา 81

ตารางที่ 4. 9 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไรซิสเหง้ามันสำปะหลัง....................81

ตารางที่ 4. 10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพารา....82

ตารางที่ 4. 11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง....82

ตารางที่ 4. 12 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโครมาโตแกรมในน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา....84

ตารางที่ 4. 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโครมาโตแกรมในน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง....85

ตารางที่ ก- 1 ผลของขนาดของอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง....94

ตารางที่ ก- 2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง....94

ตารางที่ ก- 3 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง....95

ตารางที่ ก- 4 ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง....95

Chulalongkorn University

ตารางที่ ข- 1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง....96

ตารางที่ ค- 1 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา....99

ตารางที่ ค- 2 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC....102

ตารางที่ ค- 3 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ 104

ตารางที่ ค- 4 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์............ 107

ตารางที่ ค- 5 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์............ 110

ตารางที่ ค- 6 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์............ 113

ตารางที่ ค- 7 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 116

ตารางที่ ค- 8 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC............ 120

ตารางที่ ค- 9 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์............ 123

ตารางที่ ค- 10 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์............ 127

ตารางที่ ค- 11 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์............ 131

ตารางที่ ค- 12 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์............ 136

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2. 1 โครงสร้างของเซลลูโลสในพืช 19
รูปที่ 2. 2 โครงสร้างของเซลลูโลส 19
รูปที่ 2. 3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส 20
รูปที่ 2. 4 มอนอเมอร์ย่อยของลิกนิน 21
รูปที่ 2. 5 แสดงช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน 28
รูปที่ 2. 6 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ 31
รูปที่ 2. 7 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน 32
รูปที่ 2. 8 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ 32
รูปที่ 2. 9 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ 33
รูปที่ 2. 10 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู 33
รูปที่ 2. 11 การเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 34
รูปที่ 2. 12 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ 39
รูปที่ 2. 13 การจำลองรูปแบบการการเคลือบฝัง (Impregnation) นิกเกิลบนโดโลไมต์ 40

รูปที่ 3. 1 โครงสร้างระบบของกระบวนการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ใช้ในงานวิจัย 43
รูปที่ 3. 2 ระบบของกระบวนการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ใช้ในงานวิจัย 44
รูปที่ 3. 3 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG)....45
รูปที่ 3. 4 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) 45
รูปที่ 3. 5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHN and S analyzer).....46
รูปที่ 3. 6 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี 46
รูปที่ 3. 7 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี 47
รูปที่ 3. 8 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์.....47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของไม้ยางพารา 55

รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของเหง้ามันสำปะหลัง 56

รูปที่ 4. 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) โดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์, (ข) โดโลไมต์หลังการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง, (ค) 5% นิกเกิล/โดโลไมต์, (ง) 10% นิกเกิล/โดโลไมต์, และ(จ) 20% นิกเกิล/โดโลไมต์ 60

รูปที่ 4. 4 รูปแบบ XRD ของ (ก) โดโลไมต์ก่อนแคลไซน์, (ข) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง, (ค) 5% นิกเกิล/โดโลไมต์, (ง) 10% นิกเกิล/โดโลไมต์, และ (จ) 20% นิกเกิล/โดโลไมต์ 62

รูปที่ 4. 5 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพารา 65

รูปที่ 4. 6 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลัง 66

รูปที่ 4. 7 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพารา 68

รูปที่ 4. 8 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลัง 69

รูปที่ 4. 9 ผลของเวลาที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพารา 71

รูปที่ 4. 10 ผลของเวลาที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลัง 71

รูปที่ 4. 11 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพารา 73

รูปที่ 4. 12 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลัง 73

รูปที่ 4. 13 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพารา 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4. 14 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลัง....76

รูปที่ 4. 15 ภาพจำลองแสดงการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการไพโรไรซิส....77

รูปที่ ค- 1 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา....99

รูปที่ ค- 2 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา FCC....101

รูปที่ ค- 3 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์....104

รูปที่ ค- 4 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์....107

รูปที่ ค- 5 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์....110

รูปที่ ค- 6 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์....113

รูปที่ ค- 7 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา....116

รูปที่ ค- 8 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา FCC....120

รูปที่ ค- 9 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์....123

รูปที่ ค- 10 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์....127

รูปที่ ค- 11 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์....131

รูปที่ ค- 12 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์....135

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมเป็นหนึ่งในปัญหาที่ใหญ่ที่สุดที่มนุษยชาติกำลังเผชิญอยู่ในปัจจุบัน ปัญหาพื้นฐานเกี่ยวกับมลภาวะคือการกำจัดชีวมวลเหลือทิ้งจำนวนมากที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ชีวมวลเหล่านี้ประมาณ 100,000 ล้านตันเพิ่มจำนวนขึ้นทุกปีในโลก ซึ่งครอบคลุมพื้นที่หลากหลาย โดยรวมถึงชีวมวลทางเกษตรกรรม การอุสาหกรรมแปรรูป และจากการแปรรูปอาหาร ชีวมวลประเภทนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาร้ายแรงต่อสุขภาพหรือสิ่งแวดล้อมหากไม่กำจัดอย่างเหมาะสม ดังนั้นการพัฒนากลยุทธ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพสำหรับการใช้และการจัดการชีวมวลต่าง ๆ เป็นสิ่งสำคัญ อาจช่วยทดแทนหรือลดการใช้สารเคมีหรือพลังงาน ในกระบวนการอุตสาหกรรมได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามบทบาทในฐานะทรัพยากรที่มีประโยชน์สำหรับชีวมวลเหล่านี้ มีประโยชน์สำหรับด้านการสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าและทดแทนทรัพยากรณ์หลักได้ ซึ่งกลายเป็นที่รู้จักมากขึ้น ดังนั้นการพัฒนาชีวมวลเหลือใช้เหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นนวัตกรรมจึงสามารถแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมและลดการพึ่งพาทรัพยากรปิโตรเลียมรวมไปถึงเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจอีกด้วย [1] ดังนั้นจึงมีนักวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้นไปที่การแปรรูปชีวมวลเหล่านี้เพื่อที่จะผลิตน้ำมันชีวภาพให้ได้คุณภาพทัดเทียมน้ำมันจากท้องตลาด เช่น ไม้ยางพารา [2] และ เหง้ามันสำปะหลัง [3] เป็นต้น

วัสดุลิกโนเซลลูโลสิก(lignocellulosic materials) [4] คือองค์ประกอบของพืชซึ่งประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน เป็นส่วนประกอบที่ได้มาจากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง เป็นชีวมวลที่ไม่ใช่อาหารจึงถูกมองว่าเป็นวัตถุดิบที่ดีมีแนวโน้มเป็นทางเลือกสำหรับพลังงานเชื้อเพลิงทดแทนได้ นอกจากนี้ลิกโนเซลลูโลสิก จัดว่าเป็นทรัพยากรที่ปลดปล่อยคาร์บอนเท่ากับศูนย์(carbon dioxide neutral) ธรรมชาติที่จะไม่เพิ่มคาร์บอนไดร์ออกไซด์ในชั้นบรรยากาศภายในวงจรชีวิตของมัน เนื่องจากพืชจะดูดซับคาร์บอนไดร์ออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากน้ำมันชีวภาพที่ได้จากชีวมวลเหล่านี้ ซึ่งจำเป็นต่อกระบวนการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ยังมีข้อดีคือเนื้อสารระเหยได้ดี ส่วนเถ้า ซัลเฟอร์ และไนโตเจนต่ำส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยเมื่อเกิดการ

เผาไหม้ โดยทรัพยากรชีวมวลในแต่ละปีที่ได้จากเศษซากพืช และไม้ที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 350 ล้านตัน เมื่อเทียบกับปริมานถ่านหิน

การจำแนกประเภทไพโรไลซิส [5] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข เช่น อัตราการให้ความร้อน และผลิตภัณฑ์หลัก ไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกได้สองประเภท คือไพโรไลซิสแบบช้า และไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยไพโรไลซิสแบบเร็วนั้นพบว่าใช้ในด้านการปรับปรุงคุณภาพผลผลิตด้านสถานะของเหลว ซึ่งนำไปสู่กระวนการใหม่ เช่น ไพโรไลซิสแบบแฟลช และไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ ในอีกด้านหนึ่งไพโรไลซิสที่ช้านั้นถูกใช้เพื่อผลิตถ่านชีวภาพ โดยมีเงื่อนไขการใช้งานคืออัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาที่อยู่ในไอน้ำเป็นชั่วโมง ที่อุณหภูมิประมาณ 350-500 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันบรรยากาศและบรรยากาศเฉื่อย ในทางตรงกันข้ามไพโรไลซิสแบบเร็วนั้นถูกใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพในช่วงอุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส อัตราความร้อนในช่วง 100-1000 องศาเซลเซียสต่อนาที ขนาดอนุภาคประมาณ 3.0 มิลลิเมตร และเวลาที่อยู่อาศัยของไอควบแน่นที่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบไพโรไลซิสโดยปกติแล้วจะอยู่ในบรรยากาศเฉื่อย 0.5-2 วินาทีภายใต้ความดันบรรยากาศหรือสุญญากาศ ผลผลิตในชั้นของเหลวของไพโรไลซิสแบบเร็วอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 ของผลิตภัณฑ์ รวมถึงน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาไพโรไลซิส เมื่อพิจารณาถึงกระบวนการไพโรไลซิสแบบใหม่คือไพโรไลซิสขั้นกลางจะเกิดขึ้นพร้อมกันระหว่างเวลาที่เป็นไอ 4-10 วินาที และเวลาในเฟสของแข็ง 0.5-25 นาที โดยมีผลผลิตในชั้นของเหลวร้อยละ 40-60 ของผลิตภัณฑ์ ส่วนแฟลชไพโรไลซิสเกิดขึ้นกับเวลาที่สั้นกว่าของการกลายเป็นไอซึ่งน้อยกว่า 0.5 วินาที ที่อุณหภูมิ 400-1000 องศาเซลเซียส และขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.5 มิลลิเมตรในระบบสุญญากาศไพโรไลซิสที่ความดันน้อยกว่า 50 กิโลปาสคาล

ไพโรไลซิสเป็นหนึ่งในกระบวนการทางเคมีความร้อนสำหรับการแยก “ลิกโนเซลลูโลสิก” ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเช่นน้ำมันชีวภาพ อย่างไรก็ตามน้ำมันชีวภาพดังกล่าวจะมีกลุ่มของฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรงและต้องปรับปรุงคุณภาพก่อนใช้งาน การเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันชีวภาพเป็นกระบวนการหนึ่งในการกำจัดออกซิเจนในสารประกอบออกซิเจนและปรับปรุงคุณภาพ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่ม Fluid catalytic cracking (FCC)[6] กับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์[7] ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพ

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณนิกเกิล/โดโลไมต์เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ และ ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC (Fluid Cracking Catalyst) ผ่านกระบวนการไพโรไล

ซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง รวมไปถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทดลองเช่น ผลของขนาดชีวมวลต่อร้อยละของผลได้ผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิต่อร้อยละของผลได้ผลิตภัณฑ์ เวลาต่อร้อยละของผลได้ผลิตภัณฑ์ และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์

1. ผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังจากไพโรไลซิสโดยใช้นิกเกิล/โดโลไมต์
2. หาภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณนิกเกิล/โดโลไมต์เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ และ ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC (Fluid Cracking Catalyst) ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง รวมไปถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทดลองเช่น ผลของขนาดชีวมวลต่อร้อยละของผลได้ผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิต่อร้อยละของผลได้ผลิตภัณฑ์ เวลาต่อร้อยละของผลได้ผลิตภัณฑ์ และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.4 ขั้นตอนวิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี งานวิจัย และข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาอุปกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ ชีวมวล ตัวเร่งปฏิกิริยา และสารเคมี
   - 2.1 ทำการเผาตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์และ FCC (Fluid Cracking Catalyst) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้น
   - 2.2 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ด้วยวิธีเตรียมตัวเร่งแบบเคลือบฝัง (Impregnation) ที่ปริมาณนิกเกิล ร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนักบนโดโลไมต์
   - 2.3 ทำการบดไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.250-2.000 มิลลิเมตร และทำการอบที่ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมงให้ได้ความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้น
3. ศึกษาสมบัติของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

3.1 ศึกษาอุณหภูมิของการสลายตัวจากความร้อนของชีวมวลด้วยเทคนิค Thermogravimetric/Differential Thermal Analysis

3.2 องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) เพื่อหาการระเหย ความชื้น เถ้า และคาร์บอนคงตัว

3.3 องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) เพื่อหาปริมาณ คาร์บอน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน

3.4 ปริมาณค่าความร้อน

4. ศึกษาผลของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง

4.1 ผลของขนาดชีวมวล 0.250-2.000 มิลลิเมตร

4.2 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 400-600 องศาเซลเซียส

4.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา 45-90 นาที

4.4 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 50-200 มิลลิลิตรต่อนาที

4.5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและอิทธิพลของปริมาณร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนัก

5. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์, FCC รวมไปถึงอิทธิพลของปริมาณนิกเกิล/โดโลไมต์ (ร้อยละ 0-20 โดยน้ำหนักของนิกเกิล)

6. วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยวิเคราะห์ทางคุณภาพและปริมาณของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography) และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS)

7. รวบรวมวิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้น้ำมันชีวภาพจากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังจากการไพโรไลซิส

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพ [8-10] เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน โดยโครงสร้างที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับชนิดของชนิด แหล่งที่มา และวิธีการเปลี่ยนจากชีวมวลให้กลายเป็นน้ำมันชีวภาพ และยังเป็นอีกเชื้อเพลิงชีวภาพที่สำคัญซึ่งได้รับจากการสลายตัวเชิงความร้อนชีวมวล เช่น ไพโรไลซิส

น้ำมันชีวภาพได้รับการพิจารณาเป็นวัตถุดิบที่มีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนน้ำมันเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าเนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานสูง และความสะดวกสบายในการจัดเก็บหรือการขนส่งเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ก๊าซ นอกจากนี้น้ำมันชีวภาพยังสามารถย่อยสลายได้ CO_2 หรือก๊าซเรือนกระจกที่เป็นกลางและสร้าง NO_x และ SO_x น้อยกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเผาไหม้ในเครื่องยนต์เมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงที่ใช้ปิโตรเลียม น้ำมันชีวภาพจึงเป็นเชื้อเพลิงที่มีประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อม การผลิตน้ำมันชีวภาพจนถึงปัจจุบันส่วนใหญ่ใช้ชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบ อย่างไรก็ตามน้ำมันชีวภาพที่ได้รับไม่สามารถนำมาใช้โดยตรงเป็นเชื้อเพลิงขนส่งเนื่องจากการที่มีความหนืดสูง, ปริมาณออกซิเจนสูง การกัดกร่อนสูง และความไม่แน่นอนความร้อน คุณภาพของน้ำมันชีวภาพที่ไม่ดีเกิดจากการมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งจะทำให้เกิดน้ำมันชีวภาพที่มีออกซิเจน และเป็นกรดสูงซึ่งต้องได้รับการปรับสภาพก่อนการใช้งาน ดังตารางที่ 2.1 – 2.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2. 1 แสดงปริมาณร้อยละธาตุองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพของชีวมวลประเภทต่างๆ [9]

ประเภทชีวมวล	ปริมาณธาตุองค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพ (ร้อยละ)					อื่น ๆ (ร้อยละ)	
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน	ซัลเฟอร์	เถ้า	น้ำ
ขี้เลื่อย	43.39	7.72	0.26	48.63	±0.05	0.17	29.8
หญ้า และฟาง	49.12	7.5	0.57	42.81	±0.05	0.10	15.1
ไม้เนื้อแข็ง และเนื้ออ่อน	45.03	6.98	0.02	47.97	-	-	27.0

น้ำมันชีวภาพที่ได้จากแหล่งต่างนั้น มักมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน อาทิเช่น ความชื้น ค่ากรด-เบส ค่าความถ่วงจำเพาะ และ อื่น ๆ ซึ่งตางรางที่ 2.2 แสดงช่วงเฉลี่ยๆของคุณสมบัติน้ำมันชีวภาพทั่วๆไปดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2. 2 คุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันชีวภาพ [10]

คุณสมบัติทั่วไป	น้ำมันชีวภาพ
ความชื้น (%)	15–30
pH	2.5
ความถ่วงจำเพาะ	1.2
ปริมาณธาตุองค์ประกอบ (ร้อยละ)	
คาร์บอน	54–58
ไฮโดรเจน	5.5–7.0
ไนโตรเจน	0–0.2
ออกซิเจน	35–40
เถ้า	0–0.2
ค่าความร้อน (HHV, MJ/kg)	16–19
ความหนืด (ที่ 50 ° C), cP	40–100
ของแข็ง	0.2-1
กากของแข็งจากการกลั่น	มากกว่า 50

2.1.1 องค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพ

น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) [8, 9] หรือที่เราเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าน้ำมันไพโรไลซิส มีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้ม มีสารประกอบของไฮโดรคาร์บอน และออกซิเจนในปริมาณมาก โดยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ได้แก่ แอลกอฮอล์ (Alcohols), อัลดีไฮด์ (Aldehydes), แอนไฮดัสซูการ์ (Anhydrosugars), ฟูแรน (Furans), คีโตน (Ketones) และกรดอะซิติก (Acetic acid) เป็นต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้เกิดจากการไพโรไลซิสชีวมวล เมื่อเกิดการสลายพันธะของเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ที่อุณหภูมิสูงจะได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและผ่านการควบแน่นกลับมาอยู่ในรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพเป็นสารผสมระหว่างสารอินทรีย์ที่สามารถละลายน้ำได้ที่มีร้อยละอยู่ที่ 70-85 เปอร์เซ็นต์ และอีกร้อยละ 15-30 เปอร์เซ็นต์ เป็นน้ำ น้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ในน้ำ เมทานอล เอทานอล และอะซิโตน แต่จะไม่สามารถละลายได้ในน้ำมัน

ไฮโดรคาร์บอน โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวภาพยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้ทันทีต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาน้ำมันชีวภาพก่อน ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2. 3 แสดงปริมาณร้อยละขององค์ประกอบทั่วไปของน้ำมันชีวภาพของชีวมวลประเภทต่างๆ [9]

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละ
เฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose)	
กรด (Acids)	**5.0–10.0**
- ฟอร์มิก (Formic)	0.3–9.1
- อะซิติก (Acetic)	0.5–12
- โพรพาโนอิก (Propanoic)	0.1–1.8
- เอสเตอร์ (Esters)	0.1–0.9
- แองเจลิกา แลคโตน (Angelica lactone)	0.1–1.2
- เมททิว ฟอร์เมท (Methyl formate)	0.1–0.9
- ฟูแรนโนน (2(5H)-furanone, 5-methyl)	
แอลกอร์ฮอล์ (Alcohols)	**1.0–10.0**
- เมทานอล (Methanol)	0.4–2.4
- เอทานอล (Ethanol)	0.6–1.4
- เอททาลีน ไกคอล(Ethylene glycol)	0.7–2
คีโตน (Ketones and hydroxyketones)	**1.0–10.0**
- อะซิโตน (Acetone)	2.8
- ไฮดรอกซีอะซิโตน (Hydroxyacetone)	0.7–7.4
- แอนไฮดราย (Aldehydes and hydroxyaldehydes)	5.0–20.0
- ฟอร์มาดีไฮด์ (Formaldehyde)	0.1–3.3
- อะเซตาดีไฮด์ (Acetaldehyde)	0.1–8.5
- เอทานิเดียร์ (Ethanedial)	0.9–4.6
- ไฮโดรไซยาอะซิตอลดีไฮด์ (Hydroxyacetaldehyde)	0.9–13
น้ำตาล (Sugars)	**1.0–5.0**
- ดีไซโลส (d-Xylose)	0.1–3.2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เซลลูโลส (Cellulose)	
น้ำตาล (Sugars)	**1.0–5.0**
- เลวอกลูโคซาน (Levoglucosan)	0.4–1.4
- กลูโคส (Glucose)	0.4–1.3
- ฟักซ์โตส (Fructose)	0.7–2.9
- เซลโลไบโอซาน (Cellobiosan)	0.6–3.2
- แอนไฮโดรกลูโคฟูแรนโนส (1,6-Anhydroglucofuranose)	3.1
ลิกนิน (Lignin)	
ฟีโนลิก (Phenolics)	**20.0–30.0**
- ฟีนอล (Phenol)	0.1–3.8
- เอททิวฟีโนน (2-Ethyl phenone)	0.1–1.3
- เบนซีน (1,4-DiOH benzene)	0.1–1.9
ไกวเอคอล (Guaiacols)	
- เมทท็อกซี ฟีนอล (2-Methoxy phenol)	0.1–1.1
- เมททิล ไกวเอคอล (4-Methyl guaiacol)	0.1–1.9
- ไอโซยูจีนอล (Isoeugenol)	0.1–7.2
- ยูยีนอล (Eugenol)	0.1–2.3
ไซริงกอล (Syringols)	
- ไดโอเมททิวฟีนอล (2,6-DiOMe phenol)	0.7–4.8
- โพรพิวริงกอล (Propyl syringol)	0.1–1.5
- ไซริงกอดีไฮ (Syringaldehyde)	0.1–1.5
ฟูแรน (Furans)	
- ฟูแรนโนน (Furanone)	0.1–1.1
- เฟอร์ฟูรอล (Furfural)	0.1–1.1
- เฟอร์ฟูรอล แอลกอฮอร์ (Furfural alcohol)	0.1–5.2
- เฟอร์ฟูรอลเมททิวไฮดรอกไซด์ (5-OH-methyl-2-furfural)	0.3–2.2
อื่นๆ	
- เมททิวไซโครเพนทีโนโลน (Methyl cyclopentenolone)	0.1–1.9
- เมทท็อกซีเบนซะดีไฮด์ ไฮดรอกไซด์(4-OH-3-	0.1–1.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

methoxybenzaldehyde)	
น้ำ	**15.0–30.0**

2.1.2 การใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพ

การใช้ประโยชน์จากน้ำมันชีวภาพนั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงหรือพัฒนาให้มีสมบัติที่ดีขึ้นก่อนนำไปใช้ โดยปัจจุบันการพัฒนาน้ำมันชีวภาพนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการใช้ในด้านพลังงานทดแทน โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดลงไปเพื่อลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส โดยการผลิตน้ำมันชีวภาพและแก๊สสังเคราะห์จากชีวมวลนั้น สามารถผ่านกระบวนการแปรรูปผลิตเป็นเชื้อเพลิงสะอาดได้ เมื่อเทียบกับการใช้ชีวมวลแข็งและการใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊ส พบว่าการผลิตแก๊สในปริมาณมากนั้นจำเป็นต้องใช้ชีวมวลในปริมาณที่สูง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาของเถ้าที่สูงตามมา แต่เมื่อใช้น้ำมันชีวภาพเป็นสารตั้งต้นแทน จะทำให้ได้ปริมาณเถ้าลดน้อยลง นอกจากนี้ยังมีปัญหาในด้านการขนส่งพบว่าเมื่อการใช้ชีวมวลเป็นสารตั้งต้นต้องใช้ ระบบในการขนส่งที่และพื้นที่จัดเก็บในปริมาณมากเมื่อเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในปริมาณอัตราส่วนเท่าๆกัน จึงสามารถลดต้นทุนที่เกิดจากส่วนนี้ลงได้

2.2 ชีวมวล

ชีวมวล[11] หมายถึงทรัพยากรใดๆ ของสิ่งมีชีวิตฯ ซึ่งรวมทั้งมนุษย์ พืช และสัตว์ โดยสิ่งมีชีวิตเหล่านี้สามารถนำมาแปรรูปให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์สารไปเป็นพลังงาน จึงทำให้มีการกำหนดนิยามของพลังงานชีวมวลซึ่งหมายถึงการนำชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาเปลี่ยนรูปให้เป็นพลังงานและใช้ประโยชน์ต่อไป โดยทั่วไปพลังงานจากชีวมวลที่พบกันแพร่หลายได้แก่ เป็นแหล่งพลังงานชีวมวลสามารถเผาให้ความร้อน หรือผลิตไอน้ำเพื่อใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า หรือแปลงเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่นก๊าซมีเทน เอทานอล หรือน้ำมันชีวภาพ ชีวมวลถูกนำมาใช้เป็นพลังงานตั้งแต่ผู้คนเริ่มเผากิ่งไม้เพื่อก่อไฟ ได้แก่ ต้นไม้ กิ่งไม้ เศษหญ้า กระดาษ และเศษไม้ ในหลายกรณีวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นพลังงานเป็นผลพลอยได้จากกิจกรรมต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ผลพลอยได้จากการเกษตรกรรม อุตสาหกรรม และการทำฟาร์มที่ถูกทิ้ง-เหลือใช้ เนื่องจากชีวมวลเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้ในกระบวนการที่เรียกว่าพลังงานทดแทนจากชีวมวล ซึ่งการเผาไม้จะปล่อยมลพิษทางอากาศเช่นกัน แต่ไม่ถึงขนาดการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกจากคาร์บอนไดออกไซด์ ในหลาย ๆ กรณีพืชที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจะปลูกขึ้น

โดยเฉพาะเพื่อเปลี่ยนเป็นเชื้อเพลิง นี่เป็นตัวอย่างที่ดีของพลังงานหมุนเวียนเนื่องจากพืชได้รับการปลูกเก็บเกี่ยวเปลี่ยนเป็นพลังงานจากนั้นพืชจะถูกปลูกและปลูกใหม่อีกครั้ง อีกทั้งพืชผลทางการเกษตรสามารถแปรสภาพด้วยกระบวนการเคมีชีวภาพเพื่อหมักผลิตเอทานอลเป็นพลังงานสะอาดประเภทหนึ่งได้

น้ำมันชีวภาพผลิตจากพืชหลายประเภท ได้แก่ ข้าวโพด อ้อยไม้ไผ่ ยางพารา มันสำปะหลัง และต้นยูคาลิปตัส รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วเช่นน้ำมันพืช หรือสาหร่าย อีกทั้งชีวมวลเหลือใช้ ขยะชีวะมวล และชีวมวลจากภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ซึ่งกำลังได้รับการสนใจอย่างกว้างข วางว่ามีศักยภาพในด้านพลังงานทอดแทนจากชีวมวล เนื่องจากสาหร่ายเติบโตเร็วมาก

2.2.1 ศักยภาพชีวมวล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผลการผลิตและการใช้ชีวมวล[12] พบว่าการใช้ชีวมวลในประเทศไทยยังมีความต้องการที่สูง ตัวอย่างเช่น กากอ้อย และแกลบ เป็นต้น ซึ่งชีวมวลเหล่านี้เป็นที่มีต้องการสูงของโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นชีวมวลที่เหมาะแก่การนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนภายใน ระบบของโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อลดต้นทุนจากการใช้พลังงานไฟฟ้าหรือเชื้อเพลิงต่าง ๆ ที่ให้ความร้อนซึ่งมีต้นทุนที่สูงกว่าจึงทำให้มีการต้องมีการนำเข้าหรือ ซื้อ-ขาย จากต่างประเทศ นอกจากนี้ยังมีชีวมวลบางประเภทที่ยังไม่ได้มีการนำไปใช้อย่างเป็นรูปธรรม ตัวอย่างเช่น ยอด-ใบอ้อย ฟางข้าว เหง้ามะสำปะหลัง ใบและก้านใบของปาล์มน้ำมัน เป็นต้น แต่ชีวมวลเหล่านี้สามารถต่อยอดไปเป็นผลิตภัณฑ์รูปแบบอื่น ๆ อาทิเช่น เครื่องห่มสิ่งทอ เฟอร์นิเจอร์ และผลิตภัณฑ์จากงานฝีมือ เป็นต้น สำหรับศักยภาพชีวมวลของประเทศไทย ส่วนใหญ่เกิดจากผลผลิตทางการเกษตรเทียบกับสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตเป็นชีวมวล ซึ่งเป็นข้อมูลจากกระทรวงพลังงานในปีพุทธศักราช 2556 โดยจะแสดงดังตารางที่ 2.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2. 4 ศักยภาพชีวมวลเชิงพื้นที่ของประเทศไทยปี 2556[12]

ชนิด	ผลผลิต(ตัน)	ชีวมวล	ปริมาณชีวมวลเหลือใช้ (ตัน)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	ศักยภาพพลังงาน	
					(TJ)	(ktoe)
อ้อย	66,816,446	ชานอ้อย	4,190,794.31	14.40	60,347.44	1,428.54
		ยอดและใบ	13,439,727.21	17.39	233,716.86	5,532.52
ข้าว	31,508,364	แกลบ	3,510,598.90	14.27	50,096.25	1,185.87
		ฟางข้าว	25,464,547.96	10.24	262,620.65	6,216.73
ถั่วเหลือง	190,480	ต้น/เปลือก/ใบ	170,383.17	19.44	3,312.35	78.41
ข้าวโพด	4,616,119	ซัง	584,539.15	18.04	10,545.09	249.62
		ลำต้น	2,758,777.36	18.04	49,768.34	1,178.11
ปาล์มน้ำมัน	8,162,379	ทะลายปาล์ม	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	2,203,740.00	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	**145,853,073**		**59,539,905.20**		**504,339.40**	**11,938.67**

หมายเหตุ ; 1 ktoe = 42,120,000 MJ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ส่วนใหญ่ชีวมวลเป็นพืชผลผลิตทางการเกษตรที่เหลือใช้จากการเก็บเกี่ยวและกรระบวนการแปรรูปในอุตหกรรมเกษตร โดยเราสามารถแบ่งประเภทชีวมวลตามแหล่งที่มาเป็น 3 ประเภทได้แก่

1. ประเภทที่หนึ่ง คือ ชีวมวลที่ได้จากโรงงานแปรรูปสินค้าทางงการเกษตร เช่น แกลบที่เหลือใช้จากโรงสีข้าว ซังข้าวโพดที่เหลือจากไซโลข้าวโพด ชานอ้อยที่เหลือจาก

กระบวนการผลิตน้ำตาลในโรงงานน้ำตาล ไม้ไผ่ที่เหลือจากการทำเฟอร์นิเจอร์ และไม้ยางพาราจากการเพราะปลูก ซึ่งเป็นที่ต้องการมากในระดับอุตสาหกรรมทั่วไป เนื่องจากราคาถูกเหมาะแก่การนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2. ประเภทที่สอง คือ ชีวมวลที่ได้จากการเพาะปลูกตามแหล่งต่างๆ เช่น ไร่ สวน และนาข้าว ตัวอย่างชีวมวลกลุ่มดังกล่าว ได้แก่ ฟางข้าวที่ได้จากนาข้าว ซังข้าวโพดจากการเก็บเกี่ยว เหง้ามะสำปะหลังที่เหลือจากการเก็บเกี่ยว ใบและทางใบปาล์มน้ำมันได้จากสวนปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรมทั่วๆไปเช่นเดียวกับชีวมวลประเภทที่หนึ่ง แต่จะมีค่าใช้จ่ายในส่วนของการจัดเก็บและขนส่ง จึงทำให้ต้นทุนมีค่าสูงขึ้น จึงเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์ที่ให้มูลค่าสูงกว่าเป็นพลังงานเชื้อเพลิง
3. ประเภทที่สาม คือ ชีวมวลที่ถูกเพราะเลี้ยงขึ้นเพื่อเป็นพลังงานโดยเฉพาะ เช่น การเพาะเลี้ยงสาหร่ายพบว่าชีวมวลประเภทสามมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและเติบโตได้ทุกสภาวะ เพื่อนำชีวมวลมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง หรือแหล่งพลังงานทดแทน จึงทำให้ชีวมวลประเภทนี้มีความน่าสนใจและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

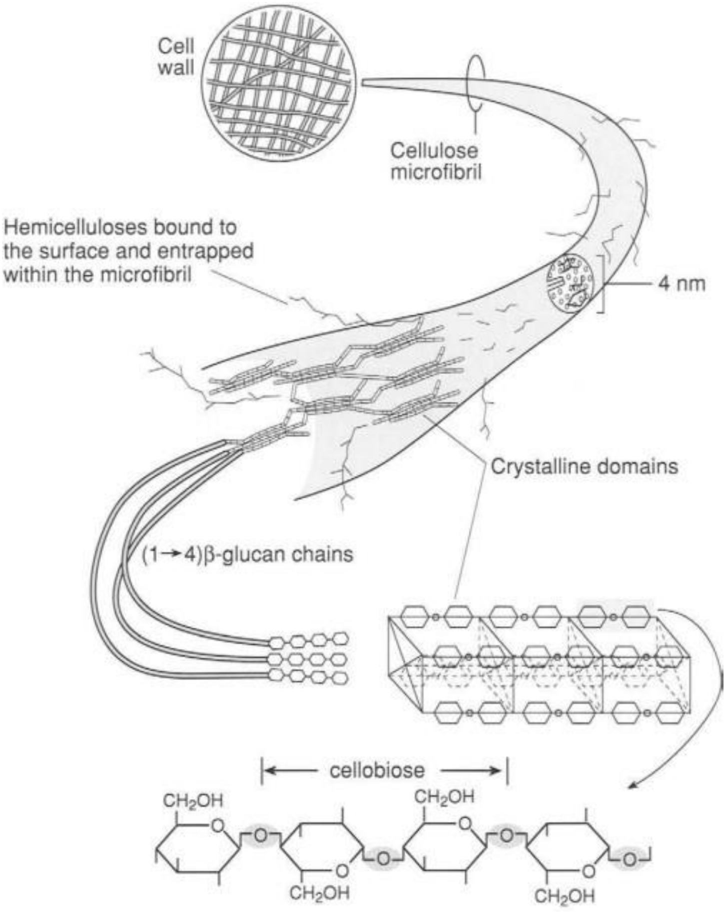
2.3 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบทั่วไปของชีวมวลจะประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และโปรตีนเป็นหลัก โดยปริมาณขององค์ประกอบจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล และแหล่งที่มาของชีวมวล

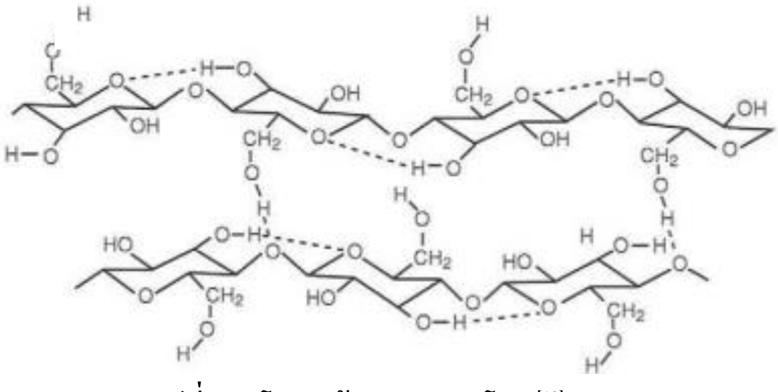
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส [13] เป็นองค์ประกอบสำคัญหนึ่งในโครงสร้างของพืชมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์สายโซ่ขนาดใหญ่ เซลลูโลสมีอยู่ในผนังเซลล์ของพืชทุกชนิดและแบคทีเรียบางชนิด โดยทั่วไปเซลลูโลสหรือพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharide) เกิดจากการมีดีกลูโคสเชื่อมโยงกันด้วยพันธะบีต้ากลูโคซิดิกที่มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ เมื่อ n คือ ระดับของพอลิเมอร์ไซซัน ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของเซลลูโลส และเมื่อเซลลูโลสเชื่อมกัน เรียกว่า ไมโครไฟบริล (Microfibril) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง แสดงในรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2. 1 โครงสร้างของเซลลูโลสในพืช [13]

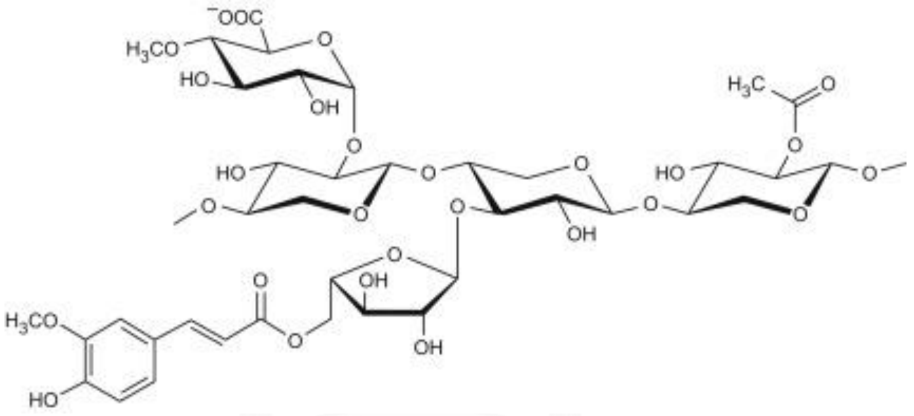


รูปที่ 2. 2 โครงสร้างของเซลลูโลส [13]

2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส [14] เป็นไบโอพอลิเมอร์ (biopolymer) ที่สำคัญอันดับสองในชีวมวลของพืชรองจากเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยมอนอแซคาไรด์ที่แตกต่างจากเซลลูโลส เฮมิ

เซลลูโลสไม่เพียงประกอบด้วยหน่วยกลูโคสเท่านั้น แต่ยังประกอบด้วยมอนอแซคาไรด์ เพนโทส และเฮกโซส อีกจำนวนหนึ่ง เฮมิเซลลูโลสถือว่าประเภทของ heteropolysaccharides มีโครงสร้างที่ซับซ้อนรวมทั้งน้ำตาลกลูโคสเป็น ไซโลส แมนโนส กาแลคโต ฟรุกโตส และกรดกาแลคในปริมาณต่างๆขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยน้ำตาล 50 และ 200 หน่วย มีสูตรโมเลกุลอย่างง่าย คือ $(C_5H_8O_4)_n$ ซึ่งมีหน่วยมอนอเมอร์เรียงตัวกันสั้นกว่าเซลลูโลส รวมถึงมีระดับของพอลิเมอร์ไซซันที่ต่ำกว่าเซลลูโลสอีกด้วย จึงทำให้เกิดการสลายพันธะได้ง่าย และละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้สามารถย่อยด้วยสารละลายกรดเจือจางและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น โดยเฮมิเซลลูโลสจะเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200-260 องศาเซลเซียสทำให้เป็นสารระเหยได้มากกว่า และมีการเกิดชาร์ และทาร์น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการสลายตัวของเซลลูโลส โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสแสดงในรูปที่ 2.3

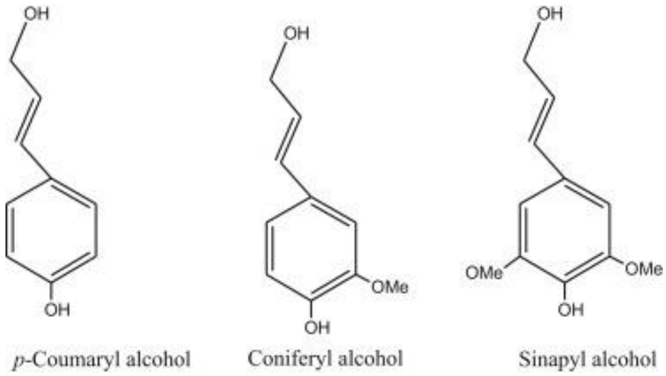


รูปที่ 2. 3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส [14]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนิน [15] เป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ และเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีโครงสร้างไม่แน่นอน ลิกนิกประกอบไปด้วยอนุพันธ์ของฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) เป็นพอลิเมอร์ของหน่วยโพรพิลฟีนอล(propyl phenol) เชื่อมกันเป็นโครงสร้างแบบสามมิติ แต่มีมอนอเมอร์ที่สามารถแบ่งหน่วยย่อยของลิกนินได้ 3 ชนิด ได้แก่ p-coumaryl alcohol, coniferyl alcohol และ sinapyl alcohol โดยลิกนินทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานเส้นใยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกัน จึงทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรง นอกจากนี้การสลายตัวทางความร้อนของลิกนินด้วยกระบวนการไพโรไลซิสนั้นจะเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิประมาณ 280-500 องศาเซลเซียส โครงสร้างของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2. 4 มอนอเมอร์ย่อยของลิกนิน [15]

2.3.4 โปรตีน (Protein)

โปรตีน [16] เป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ประกอบด้วยกรดอะมิโนที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์หรือพันธะเปปไทด์ ทำให้มีสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนที่อยู่ภายในโครงสร้างนั้น โดยทั่วไปมักพบโปรตีนเป็นองค์ประกอบในชีวมวลบางชนิดเท่านั้น เช่น สาหร่าย

2.4 ส่วนประกอบของชีวมวล

ส่วนประกอบของชีวมวล[17] จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ความชื้น ส่วนที่เกิดการเผาไหม้ และส่วนที่ไม่เกิดการเผาไหม้ โดยส่วนประกอบของชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้นถือเป็นเป็นส่วนที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น รวมถึงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ตามมาอีกด้วย ซึ่งชีวมวลแต่ละชนิดจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบที่แตกต่างกันทำให้เกิดสมบัติที่แตกต่างกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.1 ความชื้น (Moisture)

ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ภายในโครงสร้างของชีวมวล โดยปกติแล้วความชื้นหรือน้ำจะเป็นองค์ประกอบหลักของสิ่งมีชีวิต ซึ่งหากต้องนำชีวมวลมาใช้เป็นแหล่งพลังงานควรที่จะกำจัดความชื้นทั้งที่พื้นผิวและภายในโครงสร้างชีวมวลให้เหลือน้อยที่สุด

2.4.2 ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

ในส่วนที่เผาไหม้ได้สามารถแบ่งได้อีก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นสารระเหย (Volatiles matter) และส่วนคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) ซึ่งทั้งสองส่วนสามารถเกิดการลุกไหม้ได้ โดยส่วน

ของสารระเหย คือ ส่วนที่เกิดการระเหยเมื่อให้ความร้อน และส่วนของคาร์บอนคงตัว คือส่วนที่คาร์บอนหลงเหลือจากการสลายตัวเชิงความร้อนของสารระเหย

2.4.3 ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือเถ้า (Ash)

ส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้หรือเถ้า คือ ส่วนที่หลงเหลือจากการเผา โดยสัดส่วนขององค์ประกอบเถ้าจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดชีวมวล โดยทั่วไปสัดส่วนเถ้าของชีวมวลจะมีอยู่ประมาณ 1 ใน 3 โดยน้ำหนักชีวมวล ของแข็งส่วนที่เหลือจากการเผาไหม้สมบูรณ์จะทำให้เถ้ามีลักษณะเบา

2.5 พลังงานที่ได้จากชีวมวล

พลังงานที่ได้จากชีวมวล [17] โดยแต่ละชนิดจะมีให้พลังงานความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบชีวมวลที่กล่าวมาข้างต้น โดยค่าความร้อนของชีวมวลนั้นถือเป็นค่าที่สำคัญที่บ่งบอกว่าถึงพลังงานที่จะได้รับหรือสามารถทดแทนพลังงานเชื้อเพลิง โดยออกมาในรูปค่าความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- ค่าความร้อนต่ำ (Low Heating Value, LHV) เป็นค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจริงที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล โดยมีการหักค่าพลังงานส่วนหนึ่งที่ใช้สำหรับการระเหยน้ำที่อยู่สะสมภายในองค์ประกอบของชีวมวลระหว่างการเผาไหม้ หน่วยของค่าความร้อนจะอยู่ในหน่วย กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg) หรือกิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม (kcal/kg)
- ค่าความร้อนสูง (High Heating Value, HHV) เป็นค่าความร้อนทั้งหมดที่ได้จากการเผาไหม้ซึ่งรวมกับค่าการระเหยของน้ำ โดยหน่วยของค่าความร้อนสูงจะคล้ายกับหน่วยของค่าความร้อนต่ำนอกจากนี้การแสดงผลจะนิยมในการแสดงผลในรูปของค่าความร้อนสูง

โดยตารางที่ 2.3 จะแสดงองค์ประกอบของชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย ความชื้น ขี้เถ้า สารระเหยและคาร์บอนคงตัว นอกจากนี้แสดงค่าความร้อนสูงโดยประมาณของชีวมวล เช่น แกลบ ฟางข้าว กะลาปาล์ม ซังข้าวโพด ทะลายปาล์มและชานอ้อย เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2. 5 แสดงค่าความร้อน ความชื้น ขี้เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวของชีวมวล [17]

ชีวมวล	องค์ประกอบของชีวมวล				ค่าความร้อนสูง	
	ความชื้น (โดยน้ำหนัก)	ขี้เถ้า (โดยน้ำหนัก)	สารระเหย (โดยน้ำหนัก)	คาร์บอนคงตัว (โดยน้ำหนัก)	กิโลจูล/กิโลกรัม	แคลอรี่/กรัม
แกลบ	12.00	12.60	56.50	18.90	14,755	3,524.17
ฟางข้าว	10.00	10.39	60.71	18.90	13,650	3,260.25
กะลาปาล์ม	12.00	3.50	68.20	16.30	18,267	4,363.00
ไม้ยางพารา	45.00	1.59	45.70	7.71	10,365	2,475.64
ซังข้าวโพด	40.00	0.90	45.40	13.70	11,298	2,698.48
ทะลายปาล์ม	58.00	2.60	30.50	8.90	9,196	2,196.43
ต้นปาล์ม	48.40	1.20	38.70	11.70	9,370	2,237.99
ทางปาล์ม	78.40	0.70	16.30	4.60	3,908	933.41
กะลาปาล์ม	12.00	3.50	68.20	16.30	18,267	4,363.00
เส้นใยปาล์ม	38.58	4.42	42.60	14.40	13,127	3,135.33
ชานอ้อย	51.00	1.43	41.90	5.90	9,243	2,207.65
ใบอ้อย	9.00	6.10	67.80	16.90	16,794	4,011.18

2.6 ข้อดีและข้อจำกัดของพลังงานชีวมวล

2.6.1 ข้อดีของพลังงานชีวมวล

- กระบวนการเผาไหม้ชีวมวลนั้นจะก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและผลกระทบจากการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกได้น้อยกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงถ่านหินที่มาจากแหล่งฟอสซิส
- การย่อยสลายตัวโดยธรรมชาติของชีวมวล ทำให้เกิดมีเทนเกิดขึ้นจากการย้อยสลายอินทรีย์สาร ที่เป็นสาเหตุหนึ่งของการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจก
- องค์ประกอบของชีวมวลมีปริมาณซัลเฟอร์หรือกำมะถันในสัดส่วนที่น้อย เมื่อเทียบกับถ่านหิน การแปรสภาพชีวมวลเป็นพลังงาน จึงไม่มีการปลดปล่อยซัลเฟอร์ออกไซด์สู่บรรยากาศ และสิ่งแวดล้อม
- ขี้เถ้าจากชีวมวลมักมีสภาพเป็นเบสและธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโตของพืช จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเพาะปลูกหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรดได้
- ใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิง ลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ส่งผลให้เกิดการหมุนเวียนในประเทศ และเพิ่มรายได้ให้กับประชากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- ชีวมวลสามารถแปรรูปได้หลากหลาย ในรูปของ พลังงาน เป็นแหล่งทดแทนสารต้นต้นในภาคอุตสาหกรรม และผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย

2.6.2 ข้อจำกัดของพลังงานชีวมวล

- ชีวมวลมีน้ำหนักและเนื้อสะสารที่ไม่สม่ำเสมอและมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด สถานที่เพาะปลูก ภูมิอากาศของชีวมวล โดยส่วนใหญ่มีน้ำหนักเบาและมีขนาดเล็กยากต่อการขนส่ง เป็นผลให้ต้องเพิ่มค่าใช้จ่าย ต้นทุนอาจจะสูงขึ้นตามความต้องการตลาด
- ชีวมวลส่วนใหญ่มีค่าความชื้นที่สูง จึงต้องมีกระบวนการที่ลดปริมาณความชื้นของชีวมวลก่อนจะเข้าสู่ระบบผลิตพลังงานจากชีวมวล จึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงขึ้นและใช้เวลาที่มากขึ้น รวมไปถึงสถานที่จัดเก็บที่ต้องเพียงพอต่อปริมาณที่ต้องการ
- ชีวมวลส่วนใหญ่เป็นธาตุผสมระหว่างโลหะอัลคาไลน์ และอัลคาไลน์เอิรท์ ซึ่งมีความสามารถในกัดกร่อนได้ ต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพ ซึ่งเพิ่มค่าใช้จ่ายขึ้นอีด้วย

2.7 การแปรรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง

การแปรรูปชีวมวลให้อยู่ในรูปของพลังงานเชื้อเพลิงนั้น มีอยู่ 2 กระบวนการที่นิยมใช้โดยแพร่หลาย ได้แก่ กระบวนการทางเคมีความร้อน (thermochemical conversion) [18] หมายถึงการสลายตัวของสารอินทรีย์ของชีวมวลโดยใช้ความร้อนสำหรับการแปรสภาพสารชีวมวลไปเป็นเชื้อเพลิงจำพวกแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง รวมถึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการทางเคมี (chemical feeds stock) และกระบวนการเชิงเคมีชีวภาพ (biochemical conversion) [19] คือ การย่อยสลายชีวมวลด้วยเอนไซม์ หรือแบคทีเรีย โดยทั้งสองวิธีการนี้จะให้พลังงานเชื้อเพลิงในรูปที่แตกต่างกัน ซึ่งมีข้อดีข้อจำกัด และการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล กระบวนการ และสภาวะการดำเนินการ

ตารางที่ 2. 6 กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) และกระบวนการเชิงเคมีชีวภาพ (Biochemical conversion) [19]

กระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion)	กระบวนการเชิงเคมีชีวภาพ (Biochemical conversion)
นำไปใช้กับวัตถุดิบชีวมวลเกือบทุกชนิด	เกี่ยวข้องกับการใช้จุลินทรีย์เอนไซม์และ / หรือแบคทีเรีย
ไม่มีการปรับสภาพ	การปรับสภาพเป็นสิ่งสำคัญ
ผลผลิตค่อนข้างสูงเนื่องจากลักษณะทางเคมีของปฏิกิริยา	ผลผลิตมี จำกัด เนื่องจากการแปลงทางชีวภาพ
ผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงหลายรายการสามารถทำได้โดยใช้การแยกผลิตภัณฑ์แบบเศษส่วน	โดยปกติ จำกัด ผลิตภัณฑ์เพียงหนึ่งหรือไม่กี่ผลิตภัณฑ์และจะต้องมีจุลินทรีย์เอนไซม์เพิ่มเติมสำหรับผลิตภัณฑ์อื่น ๆ
เป็นอิสระจากสภาพอากาศ	ส่วนใหญ่อ่อนไหวต่ออุณหภูมิโดยรอบบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน
การใช้ประโยชน์อย่างสมบูรณ์ได้ทั้ง ขยะ / ชีวมวล	การผลิตของเสียทุติยภูมิเช่นกากตะกอนชีวมวล
ใช้เวลาในกระบวนการตอบสนองน้อย	ใช้เวลาในกระบวนการตอบสนองมาก

2.7.1 ไพโรไลซิส (Pyrolysis)

ไพโรไลซิส [5, 20] เป็นวิธีการทางเคมีความร้อนเพื่อแปรสภาพชีวมวลในภาวะอับอากาศหรือไม่มีออกซิเจน ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนเป็นหลัก โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล ได้แก่ ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ(bio-oil) ของแข็งหรือถ่านชาร์(char) และผลิตภัณฑ์ที่ไม่ควบแน่น(non condensable pyro-gas) ปฏิกิริยาแสดงดในสมการที่ 2.1 และ 2.2

ชีวมวล $\longrightarrow$ ผลิตภัณฑ์เหลว + ถ่านชาร์ + ผลิตภัณฑ์แก๊ส (มีเทน+ คาร์บอนไดออกไซด์ + คาร์บอนมอนอกไซด์ + ไฮโดรเจน) + น้ำ + อื่นๆ (2.1)

ของเหลวอินทรีย์ $\longrightarrow$ ผลิตภัณฑ์เหลว (สารจำพวกแอโรมาติก) + ถ่านชาร์ + ผลิตภัณฑ์แก๊ส (มีเทน + คาร์บอนไดออกไซด์ + (2.2)

คาร์บอนมอนอกไซด์ + ไฮโดรเจน) + น้ำ + อื่นๆ

2.7.2 ประเภทของไพโรไลซิส

การจำแนกประเภทไพโรไลซิส [5, 20] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข เช่น อัตราการให้ความร้อน และผลิตภัณฑ์หลัก ไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกได้ 5 ประเภท ดังต่อไปนี้

- ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis) เป็นไพโรไลซิสที่มีการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิสูง ทำให้ชีวมวลเกิดการแตกตัวเป็นสารระเหยและเกิดการควบแน่นกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของเหลวเป็นส่วนใหญ่ ไพโรไลซิสแบบเร็วนั้นถูกใช้ในการผลิตน้ำมันชีวภาพในสภาวะดำเนินนการที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส อัตราความร้อนในช่วง 100-1000 องศาเซลเซียสต่อนาที ขนาดอนุภาคประมาณ 3.0 มิลลิเมตร และเวลาที่อยู่อาศัยของไอควบแน่นที่เข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์แบบไพโรไลซิสโดยปกติแล้วจะอยู่ในบรรยากาศเฉื่อย 0.5-2 วินาทีภายใต้ความดันบรรยากาศหรือสุญญากาศ ผลิตภัณฑ์ของเหลวของไพโรไลซิสแบบเร็วอยู่ในช่วงร้อยละ 65-75 ของผลิตภัณฑ์
- ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) หรือ คาร์บอไนเซซัน**(Carbonization/torrefaction)** เป็นกระบวนการเคมีความร้อนที่ให้ความร้อนกับชีวมวลอย่างช้าๆ และมักมีการจำกัดอากาศเพื่อไม่ให้เกิดการลุกไหม้แปรสภาพเป็นเถ้า สารชีวมวลจะเกิดการแตกสลายเชิงความร้อนให้สารที่ระเหยได้ออกไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ไม่เผาไหม้มีคาร์บอนคงตัวในปริมาณที่สูง โดยมีเงื่อนไขการใช้งานคืออัตราการให้ความร้อนต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียสต่อนาที และเวลาที่อยู่ในไอน้ำเป็นชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมง
- แฟลชไพโรไลซิส (Flash pyrolysis) เป็นกระบวนการไพโรไลซิสที่พัฒนามาจากไพโรไลซิสแบบเร็ว แต่ระยะเวลาที่อยู่เครื่องปฏิกรณ์จะสั้นกว่า เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สูงละมีร้อยละของแข็งและแก๊สในปริมาณต่ำ
- ไฮโดรไพโรไลซิส (Hydro pyrolysis) เป็นการให้ความร้อนในบรรยากาศของไฮโดรเจน โดยทำการอัดความดันเข้าไปและอุณหภูมิที่ใช้ไม่เกินช่วงของแกซิฟิเคชัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวสูง และมีความเสถียร แต่ต้องใช้พลังงานในการอัดความดันให้อยู่ในภาวะบรรยากาศไฮโดรเจน

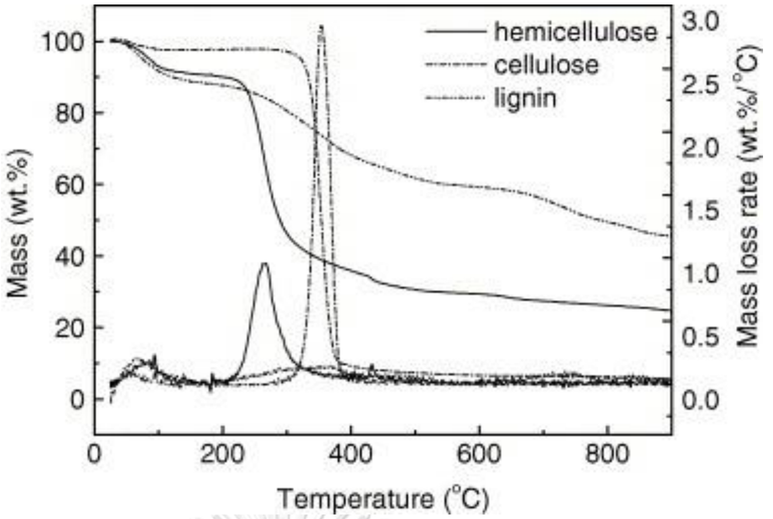
- ไฮดรัสไพโรไลซิส (Hydrous pyrolysis) เป็นการสลายตัวด้วยตัวกลางเป็นน้ำร้อนที่มีการอัดความดัน เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) พร้อมกับการสลายตัวด้วยความร้อน โดยการทำกระบวนการนี้มักใช้กับชีวมวลที่มีความชื้นหรือออกซิเจนในปริมาณที่สูง เนื่องจากออกซิเจนจากโมเลกุลของน้ำสามารถร่วมทำปฏิกิริยาการสลายตัวได้

ตารางที่ 2. 7 ตารางเปรียบเทียบประเภทของการไพโรไลซิสต่าง ๆ [5, 20]

กระบวนการ	เวลาของปฏิกิริยา	อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	ช่วงอุณหภูมิของปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์หลัก
ไพโรไลซิสแบบเร็ว (Fast pyrolysis)	1-2 วินาที	100-1000	400-600	น้ำมันและแก๊ส
ไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis)	1 หรือมากกว่า 24 ชั่วโมง	ต่ำกว่า 80	ต่ำกว่า 400	ถ่านชาร์ น้ำมัน และแก๊ส
แฟลชไพโรไลซิส (Flash pyrolysis)	น้อยกว่า 1 วินาที	มากกว่า 1000	มากกว่า 650	น้ำมันและแก๊ส
ไฮโดรไพโรไลซิส (Hydro pyrolysis)	10 วินาที	80-100	ต่ำกว่า 500	น้ำมัน
ไฮดรัสไพโรไลซิส (Hydrous pyrolysis)	5-30 นาที	80-100	ต่ำกว่า 400	น้ำมัน

โดยช่วงอุณหภูมิจากการไพโรไรซิสข้างต้น เป็นปัจจัยสำคัญต่อการไพโรไลซิสชีวมวล ซึ่งแตกต่างกันตามปริมาณส่วนประกอบของชีวมวล ได้แก่ เฮมิเซลลูโลส, เซลลูโลส และลิกนิน [21] ที่มีการสลายตัวเชิงความร้อนที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2. 5 แสดงช่วงอุณหภูมิการสลายตัวของ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน [21]

2.7.3 ตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสส่วนใหญ่คำนึกผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารระเหย และการกระจายตัวของชีวมวลเป็นหลัก ดังนั้นภาวะในการไพโรไลซิส ถือเป็นหลักสำคัญที่ทำให้ผลได้ผลิตภัณฑ์เป็นไป รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลนั้นๆ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ โดยตัวแปรพื้นฐานที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน และตัวแปรอื่น ๆ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิสต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- **อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส (Temperature)**

อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส[22] ถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้บ่งบอกผลิตภัณฑ์ที่ จะเกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส โดยเราสามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งที่อุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงประมาณ 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของความชื้นส่วนใหญ่ที่อยู่ภายในโครงสร้างของชีวมวล ส่วนที่สองอุณหภูมิอยู่ในช่วง 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส โดยเป็นการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบหลักที่อยู่ในชีวมวลนั้น ๆ เพื่อเกิดเป็นสารระเหยขึ้นและสามารถเกิดการควบแน่นกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ และส่วนที่สามจะมีช่วงอุณหภูมิอยู่ที่ 500 ถึง 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลที่หลงเหลืออยู่ ซึ่งจะมีส่วนที่ไม่เกิดการสลายตัวทางความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งคือ ถ่านชาร์ และขี้เถ้า โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสที่ 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส ถือเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับชีวมวล โดยจะให้ร้อยละของสารระเหยสูงถึง 75 เปอร์เซ็นต์

- **อัตราการให้ความร้อน (Heating rate)**

อัตราการให้ความร้อน [23] ถือเป็นตัวแปรอีกหนึ่งตัวที่มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยที่ได้จากการควบแน่นของสารระเหยชีวมวล โดยอัตราการให้ความร้อนต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งหรือถ่านชาร์เป็นหลัก ส่วนการไพโรไลซิสที่อัตราการให้ความร้อนสูง เซลลูโลสจะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สที่มีสัดส่วนของพวกโอเลฟินสูง และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของแข็งที่ต่ำ ในกระบวนการไพโรไลซิสที่มีอัตราการให้ความร้อนสูง จะทำให้เกิดการแตกตัวของชีวมวลได้รวดเร็วเนื่องจากความร้อนที่เข้าไปสัมผัสกับชีวมวลมีปริมาณมากและมีระยะเวลาที่เหมาะสมแก่การผลิตเป็นผลิตภัณฑ์เหลว แต่ถ้าสูงเกินไปจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแก๊สแทน โดยการปรับอัตราการให้ความร้อนขึ้นอยู่กับผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการ ว่าอยากได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเป็นหลักหรือผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นหลัก

- **ขนาดของอนุภาค (Particle size)**

จากการศึกษาผลของขนาดของอนุภาค[24] พบว่าขนาดของอนุภาคส่งผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากความสัมพันธ์กับอัตราการถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer) โดยแปรผกผันกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย กล่าวได้ว่าเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยใหญ่การถ่ายโอนความร้อนจะต่ำเนื่องจากขนาดใหญ่จะมีพื้นผิวที่ (Surface area) ทำให้ความร้อนต้องมีความสามารถในการแพร่ผ่านเข้าไปในเนื้อของชีวมวลเพื่อเกิดการสลายตัวได้ยาก ในทางกลับกันเมื่อขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กการถ่ายโอนความร้อนจะสูง แต่เมื่อมีขนาดเล็กมากเกินไปจะทำให้เกิดผลของการสลายของขั้นทุติยภูมิ (Secondary Decomposition) ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์แก๊สเป็นหลัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- **เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน (Residence time)**

เวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อน [25] มีผลต่อปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ กล่าวได้ว่าเมื่อชีวมวลสัมผัสกับความร้อนมากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์ ทำให้เป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นกับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ง่าย แต่เมื่อเวลาที่ชีวมวลสัมผัสกับความร้อนน้อย ทำให้ความร้อนเกิดการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์ จึงทำให้เหลือปริมาณชีวมวลมากส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ของแข็งเป็นหลัก

- **อัตราการไหลของแก๊สตัวพา (Flow rate of carrier gas)**

อัตราการไหลของแก๊สตัวพา [26] ถือเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากแก๊สตัวพาถือเป็นแก๊สที่พาสารระเหยที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวลออกจากเครื่องปฏิกรณ์ไปยังชุดควบแน่นและกลั่นตัวกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ง่าย กล่าวคือที่ที่มีอัตราการไหลของแก๊สตัวพาสูงจะทำให้เกิดการพาของสารระเหยได้ดี ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณมากต่างจากอัตราการไหลของแก๊สตัวพาที่ต่ำ จะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณน้อย

2.7.4 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

โดยเราสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ และผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

- **ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ**

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ [7-10] จะมีองค์ประกอบ 2 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน คือ ส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ และส่วนที่เป็นน้ำมันชีวภาพหรือสารที่ไม่สามารถละลายน้ำได้โดยส่วนที่เป็นน้ำมันชีวภาพจะมีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น

- **ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์**

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ [4] จะมีองค์ประกอบทางเคมี คือคาร์บอน เป็นหลักในปริมาณที่สูง สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนใดๆอีก แต่ส่วนใหญ่จะทำการผ่านกระบวนเล็กน้อยเพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ของแข็งให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น อาทิเช่น การกระตุ้นถ่านด้วยวิธีการเผาทำให้เกิดเป็นถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีคุณสมบัติดับกลิ่น หรือนำไปเป็นเชื้อเพลิงในครัวเรือนได้ อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งยังเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการเจือปนของสารประกอบไนโตรเจนหรือกำมะถันในปริมาณน้อย เมื่อทำการเผาไหม้จึงส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมที่น้อยอีกด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- **ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส**

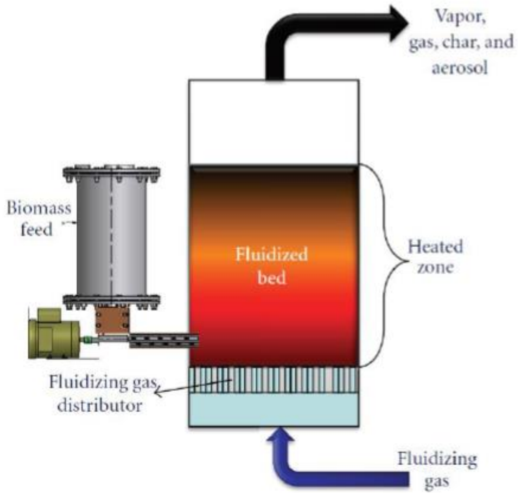
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส [6, 27] จะเป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์จะประกอบด้วย แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนียเป็นหลัก ส่วนแก๊สอนินทรีย์จะประกอบด้วย มีเทน อีเทน และเอทีลีน เป็นหลัก ซึ่งแก๊สที่กล่าวมาข้างต้นสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานในรูปแบบของพลังงานเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนได้

2.8 ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้กระบวนการเชิงเคมีความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) และเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor)

2.8.1 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ

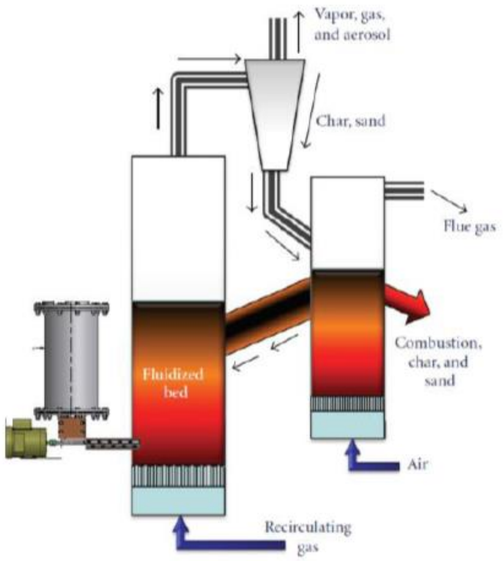
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ (Bubbling fluidized-bed reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำการป้อนอากาศจากส่วนล่างขึ้นบน ซึ่งแรงดันของอากาศจะทำการพาอนุภาคให้เกิดการลอยตัวขึ้นและหมุนเวียนภายในเครื่องปฏิกรณ์ และมีอีกส่วนหนึ่งเกิดการรวมตัวกันแล้วก่อตัวเป็นฟอง แล้วเกิดการแทรกตัวบริเวณผิวหน้าของเบดและแตกตัวในที่สุด เมื่อฟองแก๊สลอยขึ้นชีวมวลจะเกิดการลอยตามขึ้นผสมกัน โดยแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2. 6 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบฟองอากาศ [30]

2.8.2 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน

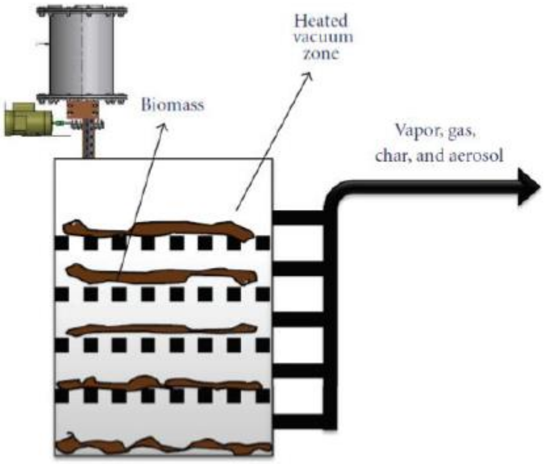
เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียนและเบดแบบถ่ายโอน (Circulating fluidized beds and transported bed) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอนุภาคของสารแขวนลอยด์หมุนเวียนอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์ที่มีกระแสไฟฟ้าสูงและจะมีกระแสสูงขึ้นเรื่อยๆจนเกิดส่วนที่หลุดออกไป โดยส่วนที่หลุดออกไปจะเกิดการหมุนเวียนกลับมาใหม่ด้วยไซโคลน โดยแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2. 7 เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิไดซ์เบดแบบหมุนเวียน [30]

2.8.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ (Vacuum pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบให้มีอัตราการถ่ายโอนความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้สลายตัวของชีวมวลหรือการเผาไหม้ ภายใต้ภาวะความดันต่ำและใช้เวลาในเครื่องปฏิกรณ์ที่ยาวนาน ซึ่งเหมาะสำหรับจากการทำไพโรไลซิสแบบช้า (Slow pyrolysis) โดยแสดงดังรูปที่ 2.8

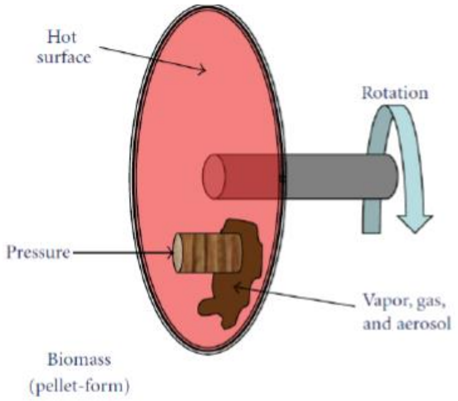


รูปที่ 2. 8 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบสุญญากาศ [30]

2.8.4 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ

เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ (Ablative pyrolysis reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่อาศัยการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะที่ชีวมวลเกิดการเคลื่อนไปชนกับของแข็งที่เป็นแหล่ง

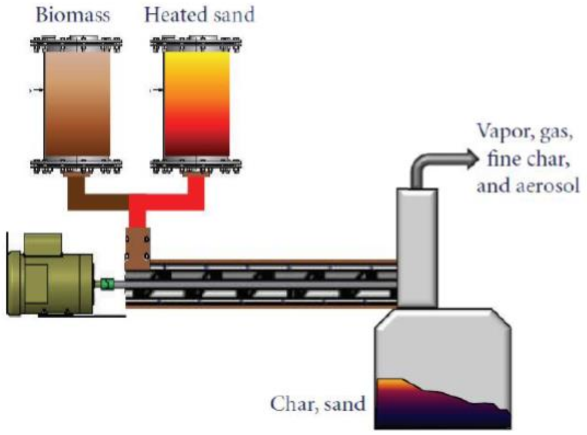
ให้ความร้อน ซึ่งจุดเด่นของเครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ คือ การใช้ความดันสูงในขนาดการป้อนชีวมวลทำให้เกิดการเฉือนชีวมวลกับผนังของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีอุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส จึงทำให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดี โดยแสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2. 9 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรซิสแบบแอบลาทีฟ [30]

2.8.5 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู

เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู (Auger reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่ไม่มีแก๊สตัวพาและใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส มีความสามารถในการทำงานอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ใช้ทรายร้อนเป็นตัวพาและให้ความร้อนพร้อมทั้งบดอัดด้วยสกรู ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบสกรูจะถูกควบแน่นกลายเป็นน้ำมันชีวภาพ โดยแสดงดังรูปที่ 2.10

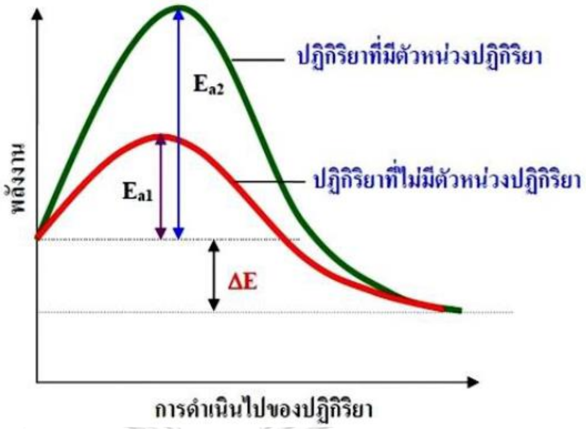


รูปที่ 2. 10 เครื่องปฏิกรณ์แบบสกรู [30]

2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst)

ตัวเร่งปฏิกิริยา [31] คือสารที่กระตุ้น ทำให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น โดยไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตั้งต้น แต่จะช่วยส่งเสริมให้เกิดผลิตภัณฑ์ได้เร็ว และดีขึ้นทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ หรืออย่างใดอย่างหนึ่งขึ้นหรือเฉพาะเจาะจงยิ่งขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.24 โดยชนิดของตัวเร่ง

ปฏิกิริยานั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous catalysts) และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneouse catalysts)



รูปที่ 2. 11 การเกิดปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา [31]

2.9.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous catalysts)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous catalysts) [31] คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่สถานะเดียวกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งของแข็งหรือของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกเอกพันธุ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งที่แน่นอนเพื่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาได้อย่างชัดเจนและรวดเร็ว รวมไปถึงง่ายต่อการศึกษา เนื่องจากการวิเคราะห์สารในกระบวนการต่างๆ ที่อยู่ในรูปของสารละลายทำได้ง่ายด้วยใช้เทคนิคทางสเปกโทรสโกปี และการหาอัตราของการเกิดปฏิกิริยาก็ทำได้ง่ายเช่นกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์เป็นที่นิยมกันอย่างกว้างขวางและเป็นที่สนใจในวงกว้างเพราะตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์มีความสามารถในการเลือกที่สูง (Selectivity) และว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่เป็นการคายความร้อน แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์คือเกิดการสลายตัวหรือเสื่อมสภาพได้ง่ายในภาวะที่อุณหภูมิและความดันสูง รวมไปถึงการแยกผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยานั้นทำได้ยาก

2.9.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts) [31] คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่สถานะแตกต่างกับสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์ เช่น สารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องเป็นของเหลวหรือแก๊ส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์นิยมใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมจำพวก ยา เชื้อเพลิง ตัวทำละลาย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์เป็นของแข็งมีความแข็งแรงเชิงกลที่ดีทนทานต่ออุณหภูมิและความดันสูง และยังสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้นได้ง่าย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย 2 องค์ประกอบหลัก ได้แก่

ส่วนที่ทำให้เกิดการว่องไวของปฏิกิริยา (Active component) และส่วนที่สองคือตัวรองรับ (Support) หรือตัวพา (Carrier) มักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เพื่อง่ายต่อการกระจายตัวของส่วนที่ทำให้เกิดการว่องไว แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจจะมีเพียงส่วนที่ทำให้เกิดการว่องไวของปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์แบ่งเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

- ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบบัลค์ (bulk catalyst) หรือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีตัวรองรับ (unsupported) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบทางเคมีทำหน้าที่เป็นตำแหน่งกัมมันต์กระจายอยู่ในโครงสร้างหรือผลึก เช่น TiO_2, ZnO, CaO และ MgO เป็นต้น ตัวเร่งเหล่านี้ไม่มีรูพรุนภายในโครงสร้าง จึงมีพื้นผิวจำเพาะไม่สูงนัก
- ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ (supported catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้ประกอบด้วยโลหะกัมมันส์กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของตัวรองรับ (support) เช่น Pt / Al_2O_3, Pt / C และ MoS_2/ Al_2O_3 โดยโลหะกัมมันต์ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาหลัก (main reaction) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการส่วนตัวรองรับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ในบางกรณีช่วยเพิ่มเสถียรภาพของโลหะกัมมันต์ได้ ตัวรองรับบางชนิดเช่นตัวรองรับชนิดกรด (acid support) ยังทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาได้ด้วยจึงถูกใช้เป็นตัวรองรับของตัวเร่งปฏิกิริยาสองหน้าที่ (bifunctional catalysts)

จะเห็นได้ว่าการจำแนกประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เกณฑ์นี้ไม่สื่อถึงการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาและมีรายละเอียดแฝงค่อนข้างมาก ทั้งนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญ ได้แก่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- วัฏภาคกัมมันต์ (Active phase) ทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาหลัก
- ตัวรองรับ (support) เป็นวัสดุที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยามีพื้นที่ผิวสูงทำหน้าที่รองรับ กระจายวัฏภาคกัมมันต์ ให้ผลึกเล็กกระจายตัวบนพื้นผิว
- ตัวสนับสนุน(Promoter) ซึ่งช่วยเสริมสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาในด้านกัมมันตภาพการเลือกจำเพาะหรือเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

กล่าวคือ องค์ประกอบของ CaO และ MgO เป็นตัวรองรับ (support) และทำหน้าที่ตัวสนับสนุน(Promoter) ให้วัฏภาคกัมมันต์ (Active phase) นั้นคือนิกเกิล (Ni) ซึ่งเป็นโละแทรนซิชันที่มีกัมมันตภาพสูงในการเร่งปฏิกิริยาจะสามารถดูดทรัพย์เชิงเคมีกับสารตั้งต้น อย่างไรงานวิจัยนี้จึงสนใจนิกเกิล (Ni) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาหลัก (main reaction)และใช้โดโลไมต์ (Dolomite) ที่มี

องค์ประกอบของ CaO และ MgO เป็นตัวรองรับ (support) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันชีวภาพ

2.10 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts preparation)

วิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalysts preparation) [31] ส่งผลต่อสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้ โดยมี 2 วิธีหลักๆ ดังต่อไปนี้

2.10.1 การเคลือบฝังหรือการชุบเอิบ (Impregnation)

การเคลือบฝังหรือการชุบเอิบ (Impregnation) เป็นวิธีการพื้นฐานที่ง่ายและสะดวกที่สุดในการกระจายวัฏภาคกัมมันต์บนพื้นผิวของตัวรองรับ เนื่องจากไม่มีขั้นตอนการกรองและการล้างจึงเป็นวิธีที่นิยมทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและอุตสาหกรรม ซึ่งเหมาะสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โลหะมีตระกูลซึ่งมีราคาแพง โดยสารตั้งต้นโลหะกัมมันต์ต้องละลายได้ดีในน้ำหรือตัวทำละลายอื่น ๆ ที่เหมาะสม อาทิเช่น เกลือโลหะไนเตรต เกลือโลหะแอซีเทต เกลือโลหะคลอไรด์ เป็นต้นปริมาตรและความเข้มข้นของสารละลายโลหะส่งผลต่อปริมาณและการกระจายตัวของอนุภาคโลหะที่ติดบนผิวของตัวรองรับโดยทั่วไปกำหนดปริมาตรของสารละลายที่ใช้ให้ใกล้เคียงกับปริมาตรรูพรุนของตัวรองรับเพื่อให้โลหะกัมมันต์ทั้งหมดในสารละลายเติมเต็มภายในรูพรุนพอดีเรียกวิธีนี้ว่าอิมเพรกเนชันแบบเปียกพอดี (incipient wetness impregnation) ตัวรองรับที่เหมาะสมสำหรับการพอกพูนด้วยวิธีนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.10.2 การตกตะกอน (Precipitation)

การตกตะกอน (Precipitation) เทคนิคนี้เป็นการพอกพูนโลหะกัมมันต์ที่ละลายในตัวกลางของเหลวลงบนตัวรองรับโดยทำให้ไอออนของโลหะกัมมันต์ตกตะกอนอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ (metal hydroxide) หรือโลหะคาร์บอเนต (metal carbonate) ผ่านการปรับค่ากรด-เบสของระบบให้เหมาะสมโดยเติมสารละลายเบสเช่น NaOH, NH_4OH หรือ Na_2CO_3 เป็นต้น ตัวรองรับที่มีลักษณะเป็นผงหรือเม็ดที่ผ่านการอบแห้งหรือการเผาเพื่อไล่ความชื้นและสิ่งปนเปื้อนออกแล้วนำไปกวนผสมกับสารละลายเกลือโลหะกัมมันต์ทำให้ได้ของผสมแขวนลอย (slurry) จากนั้นค่อยๆ เทหรือหยดสารละลายเบสลงไปจนค่ากรด-เบสของของผสมสูงขึ้นไอออนของโลหะที่ใช้เป็นสารตั้งต้นจะตกตะกอนภายในรูพรุนของตัวรองรับ เมื่อนำของแข็งไปอบแห้งเพื่อไล่ตัวทำละลายและเผาเพื่อสลายเกลือโลหะตะกอนโลหะกัมมันต์จะแปรสภาพเป็นโลหะออกไซด์บนตัวรองรับการ

เลือกชนิดของสารตั้งต้นเกลือโลหะและชนิดของเบส ซึ่งมีความสำคัญมากเนื่องจากไอออนบางชนิดที่ตกค้างในตัวเร่งปฏิกิริยามักจะส่งผลที่ไม่พึงประสงค์แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาได้

2.11 การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst activation)

วิธีการเตรียมที่กล่าวแล้วข้างต้นยังไม่พร้อมนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น แอนไอออนตกค้างอยู่บนตัวรองรับ สถานะออกซิเดชันของโลหะกัมมันต์ยังไม่เหมาะสมการเกิดโลหะออกไซด์ผสมที่มีโครงสร้างเฉพาะต้องใช้พลังงานก่อกัมมันต์สูง หรือต้องการเพิ่มสมบัติเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยาดังนั้นจำเป็นต้องมีกระบวนการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst activation) เพื่อแปรสภาพ หรือเปลี่ยนโลหะกัมมันต์ ให้มีโครงสร้างหรือองค์ประกอบทางเคมีในรูปแบบที่มีกัมมันตภาพสูงจากการกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งทำได้หลายวิธีขึ้นกับชนิดของโลหะกัมมันต์ ซึ่งที่พบบ่อย ได้แก่ การเผากระตุ้น (Calcination), การรีดักชัน (Reduction) และ การซัลฟิเดชัน (Sulfidation) โดยในจะกล่าวถึง สองวิธีแรก คือ

2.11.1 การเผากระตุ้น (Calcination)

การเผากระตุ้น (Calcination) เป็นการใช้ความร้อนปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะที่มีอากาศหรือในบรรยากาศของแก๊สชนิดอื่น ๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายหลังจากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ การเผากระตุ้น (Calcination) ยังเป็นขั้นตอนสำคัญของการเตรียมตัวรองรับและวัสดุของแข็งที่มีพื้นที่ผิวสูงและสมบัติเชิงกลที่ดีวัตถุประสงค์ของการเผาตัวเร่งปฏิกิริยามีหลายประการ ดังต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

- ความร้อนจากการเผาช่วยสลายแอนไอออนจากสารตั้งต้นเกลือโลหะที่ตกค้างบนตัวรองรับหรือตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งยังช่วยกำจัดสารเจือปนทำให้รูพรุนจำนวนมากภายในโครงสร้างเปิดออก
- การเผาตะกอนโลหะในอากาศทำให้สารประกอบโลหะแปรสภาพเป็นโลหะออกไซด์ซึ่งเป็นโครงสร้างทางเคมีที่ง่ายต่อการรีดิวซ์และการซัลฟิไดซ์เป็นโลหะกัมมันต์ในรูปโลหะประจุศูนย์ (zero valence metals) และโลหะซัลไฟด์ตามลำดับ
- วัฏภาคออกไซด์ของตัวรองรับและตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดที่มีเสถียรภาพแปรตามอุณหภูมิ (metastable phase) ต้องใช้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้นจึงจะเกิดโครงสร้างโลหะออกไซด์ที่ต้องการ
- การเผากระตุ้นจะเกิดการควบแน่นของพันธะภายในตะกอนโลหะ หรือการรวมตัวกันของอนุภาคขนาดเล็กให้มากขึ้นทำให้ได้ผลึกหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่ และเพิ่มความแข็ง

เชิงกลให้กับโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นทำให้โลหะกัมมันต์ยึดจับบนพื้นผิวของตัวรองรับด้วยพันธะที่แข็งแรงขึ้นซึ่งช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนให้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยา

2.11.2 การรีดักชัน (Reduction)

การรีดักชัน (Reduction) เป็นขั้นตอนที่จำเป็นในการเปลี่ยนรูปโลหะออกไซด์หรือเกลือโลหะกัมมันต์ในตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลายเป็นโลหะที่มีสถานะออกซิเดชันตามต้องการ ก่อนนำไปใช้ในปฏิกิริยา โดยโลหะหลายชนิดแสดงสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาได้เมื่อมีสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ดังสมาการที่ 2.9

$$NiO + H_2 \longrightarrow Ni^0 + H_2O \qquad (2.9)$$

กระบวนการรีดักชันเป็นการให้ความร้อนกับตัวเร่งปฏิกิริยาในบรรยากาศของแก๊สรีดิวซ์ เช่นไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ แก๊สสังเคราะห์ (synthetic gas) ซึ่งเป็นแก๊สผสมของคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) หรือไฮดราซีน (hydrazine) โดยไฮโดรเจนเป็นตัวเลือกอันดับแรก ๆ เนื่องจากความเป็นพิษต่ำกว่าและหาซื้อได้ง่ายแก๊สรีดิวซ์อื่นๆ โดยแก๊สดังกล่าวต้องมีความบริสุทธิ์สูงหากมี ออกซิเจน แก๊สซัลเฟอร์ ความชื้น และไฮโดรคาร์บอนเจือปนอยู่ต้องนำไปผ่านขั้นตอนปรับสภาพให้บริสุทธิ์ก่อนซึ่งใช้หลักการการดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดต่างๆ เช่น โมเลกุลาร์ซีฟใช้สำหรับการดูดซับความชื้น การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ใช้การดักจับด้วย ZnO เป็นต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.12 โดโลไมต์ (Dolomite)

โดโลไมต์ [31] โดโลไมต์เป็นแร่แมกนีเซียมหรืออีกชื่อหนึ่งที่เรียกว่า แคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต (Calcium Magnesium Carbonate) มีสูตรโมเลกุล คือ CaMg(CO3)2) หรือ ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$) การใช้โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้รับความสนใจมากซึ่งโดโลไมต์จัดเป็นหินคาร์บอน(Carbonate rock) และพบได้ตามแหล่งธรรมชาติ โดยรูปทั่วไปของโดโลไมต์จะยังไม่สามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้เลยต้องผ่านกระบวนการเผา(Calcination) ก่อนเพื่อทำให้รูปของแคลเซียมแมกนีเซียมคาร์บอเนต โดยทั่วไปโดโลไมต์มีองค์ประกอบหลักที่แตกตัวจากการเผาแล้วที่แคลเซียมออกไซด์(CaO) 30%, แมกนีเซียมออกไซต์(MgO) 21%, คาร์บอนไดออกไซด์(CO_2) 45% และมีองค์ประกอบ อื่น ๆ อีกเพียงเล็กน้อย เช่น SiO_2, Fe_2O_3, และ Al_2O_3 ปะปนอยู่

2.11.1 สมบัติทั่วไปของโดโลไมต์

โดโลไมต์จะมีลักษณะทางกายภาพ เป็นผงมีสีขาว ผิวมันแวววเหมือนแก้ว ทึบแสง ความแข็ง ตามมาตราฐานของ Mohs' scale ประมาณ 3.5 ถึง 4 ความถ่วงจำเพาะอยู่ที่ 2.82 ถึง 2.95 และความพรุนอยู่ที่ 8.6 และมีสมบัติทางเคมี คือ สามารถเกิดการทำปฏิกิริยาในกรดเกลือที่เจือจางได้ดี และเมื่อนำไปละลายน้ำจะให้ค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง pH 9.0 ถึง 10.71

รูปที่ 2. 12 ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ [31]

โดยเราสามารถพบแร่โดโลไมต์ได้ทั่วไปในหลายจังหวัดของประเทศไทย ในภาคต่างๆ เช่น ภาคเหนือ พบที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน จังหวัดเชียงใหม่ จังหวัดลำปาง จังหวัดเชียงราย จังหวัดแพร่ จังหวัดลำพูน จังหวัดน่าน และจังหวัดอุตรดิตถ์ เป็นต้น ในภาคกลาง พบที่จังหวัดนครสวรรค์ จังหวัดสระบุรี และจังหวัดลพบุรี เป็นต้น ในภาคตะวันตก พบที่จังหวัดชลบุรี จังหวัดจันทบุรี จังหวัดระยอง และจังหวัดปราจีนบุรี เป็นต้น และในภาคใต้ พบที่จังหวัดชุมพร จังหวัดสุราษฎร์ธานี จังหวัดนครศรีธรรมราช จังหวัดสงขลา จังหวัดพัทลุง และจังหวัดตรัง เป็นต้น

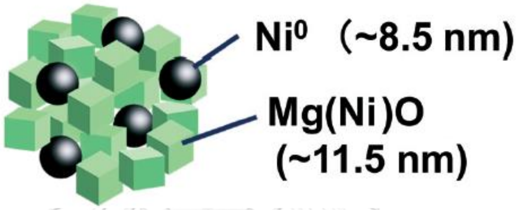
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.12.2 ประโยชน์ของโดโลไมต์

- ใช้เป็นหินคลุกได้ (Aggregate) สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างที่ใช้สำหรับสร้างคอนกรีต หรือปูนซีเมนต์ที่ทนต่อการขัดสี (Abrasion) แต่จะต้องมีไม่มีสารจำพวกดินดานผสมอยู่ด้วย เพราะจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่าย
- ใช้เป็นสารที่เชื้อในอุตสาหกรรมถลุงเหล็ก เพื่อเป็นตัวดึงซิลิกาแมงกานีสให้กลายเป็นสารมลทินลอยขึ้นบนผิวของโลหะ
- ใช้ปรับค่าความเป็นกรดเบสของดินหรือแก้ดินเปรี้ยวได้
- ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ เช่น ซีโดไรต์เทียม เกลือแมกนีเซียม
- ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เป็นสารเสริมวัสดุทนความร้อน
- ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกสีหรือฟอกขาวกระดาษ

2.13 นิกเกิล/โดโลไมต์ (Ni/Dolomite)

ในวิจัยนี้สนใจเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิล/โดโลไมต์ (Ni/Dolomite) [32] กับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์ โดยทำการปรับปริมาณร้อยละของนิกเกิลบนโดโลไมต์ จากการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝัง (Impregnation) และทำการกระตุ้นผ่านการรีดักชัน (Reduction) เพื่อเปลี่ยนรูปโลหะออกไซด์หรือเกลือโลหะกัมมันต์ในตัวเร่งปฏิกิริยาให้กลายเป็นโลหะที่มีสถานะออกซิเดชันตามต้องการ ก่อนนำไปใช้ในการไพโรไรซิส โดยโลหะหลายชนิดแสดงสมบัติเชิงเร่งปฏิกิริยาได้เมื่อมีสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) เหมาะสมรีดักชัน



รูปที่ 2. 13 การจำลองรูปแบบการการเคลือบฝัง (Impregnation) นิกเกิลบนโดโลไมต์ [32]

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kurnia และคณะ [6] ได้ศึกษาการปรับปรุงและการผลิตน้ำมันชีวภาพจากดีแอลคีเลชั่นลิกนินด้วยกระบวนการไพโรไลซิสเบดนิ่งแบบเร็ว โดยการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC (Fluid Cracking Catalyst) 5 ชนิดคือ H-Ferrierite และ H-Mordenite ที่เป็น 2 ชั้นระนาบช่องว่าง (Pore Dimension) กับ H-ZSM-5, H-Beta และ H-USY ที่เป็น 3 ชั้นระนาบช่องว่าง (Pore Dimension) ที่อุณหภูมิคงที่ที่ 650 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที พบว่าในด้านปริมาณการผลิตน้ำมัน H-Ferrierite มีปริมาณน้ำมันชีวภาพดีสุดใน 5 ชนิดรองลงมาคือ H-Mordenite, H-ZSM-5, H-Beta และ H-USY ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบในด้านการปรับปรุงน้ำมันพบว่า H-Ferrierite และ H-Mordenite ที่เป็น 2 ชั้นระนาบช่องว่าง (Pore Dimension) พบปริมาณหมู่ฟีนอล และหมู่ฟีนอลอีเทอ เป็นจำนวนมากในทางกลับกัน H-ZSM-5, H-Beta และ H-USY ที่เป็น 3 ชั้นระนาบช่องว่าง (Pore Dimension)ที่ สามารถกำจัดองค์ประกอบออกซิเจนได้เป็นอย่างดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Charusiri และคณะ [7] ได้ศึกษาปัจจัยการปรับปรุงและการผลิตน้ำมันชีวภาพจากฟางอ้อยด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบต่อเนื่อง โดยมีตัวแปรขนาดเฉลี่ยสี่ระดับคือ 250, 500, 750 และ 1000 ไมโครเมตร โดยขนาด 500 ไมโครเมตรให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพสูงสูด การออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบสี่ระดับคืออุณหภูมิที่ 400, 450, 500 แล 550 องศาเซลเซียสพบว่าที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสให้ปริมาณของเหลวที่ดีเทียบเท่ากับ 400 องศาเซลเซียสแต่ปริมาณแก๊สสังเคราะห์ที่ได้ 450 องศาเซลเซียสดีกว่าเนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวเกิดการสลายเกิน (Overcracking) ซึ่งทำให้ปริมาณเกิดเพิ่มขึ้น ในด้านอัตราการป้อนชีวมวลคือ 0.3, 0.6, 0.9 และ 1.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ปรากฏว่าปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ดีสุดที่ 0.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อีกส่วนคืออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 80. 120, 160 และ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีปรากฏว่า 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีให้ผลดีสุดและท้ายสุดการเผาโดโลไมต์ที่ 700 องศาเซลเซียส(2 ชั่วโมง), 800 องศาเซลเซียส(2 ชั่วโมง), 800 องศาเซลเซียส(4 ชั่วโมง), 800 องศาเซลเซียส(6 ชั่วโมง) และ 900 องศาเซลเซียส(2 ชั่วโมง) พบว่า เมื่อใช้การเผาโดโลไมต์ที่ 800 องศาเซลเซียส(6 ชั่วโมง) จะได้ปริมาณน้ำมันมากที่สุดที่ 450 องศาเซลเซียส 0.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และ 80 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และ 500 ไมโครเมตร

Elbaba และคณะ [6, 26] ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณนิกเกิล/โดโลไมต์ผ่านการบวนการไพโรไลซิสและแก๊สสังเคราะห์จากยางรถยนต์โดยมีปัจจัยคือปริมาณนิกเกิล/โดโลไมต์ที่แตกต่างกัน เช่น ร้อยละ5-20 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับโดโลไมต์แบบเผาที่ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลาสามชั่วโมงพบว่า โดโลไมต์แบบเผาให้ปริมานน้ำมันชีวภาพมากที่สุดตามด้วยปริมาณนิกเกิล/โดโลไมต์ที่ ร้อยละ5-20 โดยน้ำหนักตามลำดับ

Ly และคณะ [27] ได้ศึกษาการผลิตน้ำมันชีวภาพจากต้นทิวลิปด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบฟลูอิดไดร์ทเบดเปรียบเทียบระหว่างกรณีใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์แบบเผาที่ 900 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสต้นทิวลิปมีดังนี้ คือ อัตราการป้อนชีวมวล 100 กรัมต่อชั่วโมงที่ขนาด 0.8-1.2 มิลลิเมตร จากการทดลองดังนี้ คือ อุณหภูมิที่ 450 องศาเซลเซียส

Stefanidis และคณะ [28] ศึกษาและทดลองเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสชีวมวล เพื่อการเตรียมน้ำมันชีวภาพ โดยมีการเปรียบเทียบกับ ZSM-5 แล้วพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์นั้นดีกว่า ZSM-5 ในด้านการปรับปรุงคุณภาพ

น้ำมันโดยการลดปริมาณองประกอบออกซิเจนในน้ำมันชีวภาพออก แสดงให้เห็นว่าน้ำมันชีวภาพมีความเป็นกรดที่ลดลง ในทางตรงกันข้ามตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมนั้นเกิดโค๊กมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ ZSM-5 ซึ่งหากมองด้านการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพแล้วแมกนีเซียมให้น้ำมันชีวภาพที่ดีกว่า

Sirijanusorn และคณะ [29] ได้ศึกษาการไพโรไลซิสผ่านปฏิกรณ์แบบ Counter rotating twin screw reactor ด้วยเหง้ามันสำปะหลัง โดยมีปัจจัยต่าง ๆ คืออุณหภูมิช่วง 500-700 องศาเซลเซียส ขนาดของชีวมวลเล็กกว่า 0.6 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 4-10 ลิตรต่อนาที จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพมากที่สุดโดยขนาดของชีวมวลที่เหมาะสมกับอุณหภูมิดังกล่าวคือ 0.025-0.425 มิลลิเมตรและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 4 ลิตรต่อนาที ที่ความดันคงที่ 2 บาร์

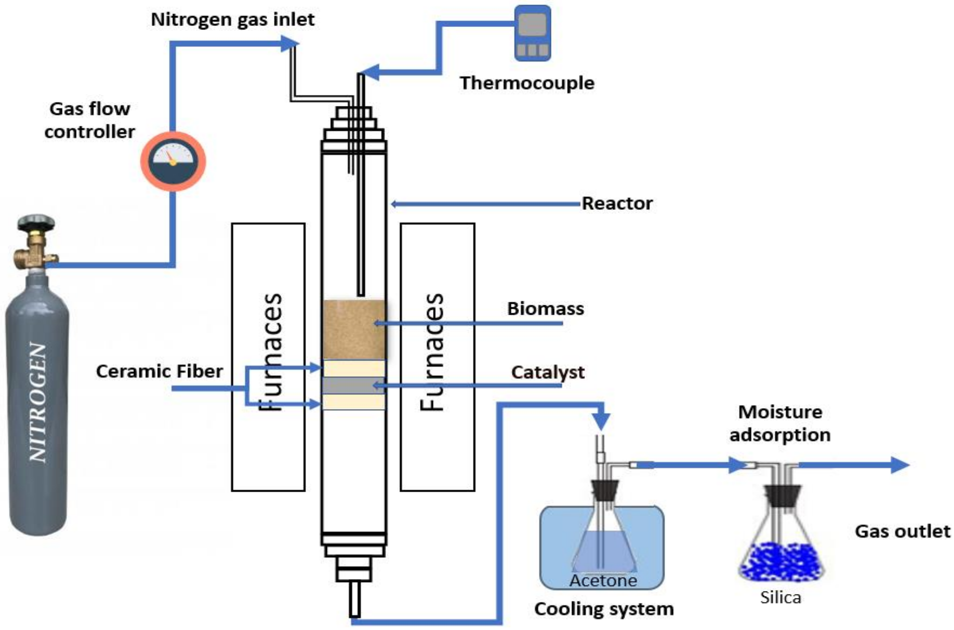
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
เครื่องมือและวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบหลัก โดยมีการเก็บเกี่ยวจากชีวมวล จากภาคการเกษตร อุตสาหกรรมการแปรรูป และอุตสาหกรรมอาหาร จะถูกทำให้สะอาด และทำการอบแห้ง เพื่อนำไปบดและแยกขนาดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ในส่วนเครื่องปฏิกรณ์จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตะแกรงร่อนขนาด 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตร
2. ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Binder รุ่น ED 56 ใช้อบไล่ความชื้นสำหรับชีวมวลที่ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 6 ถึง 8 ชั่วโมง เพื่อปรับปริมาณความชื้นของชีวมวลให้น้อยกว่า 0.5 ก่อนการไพโรไลซิส
3. เตาเผาอุณหภูมิสูง Carbolite furnace Gero 30-3000 องศาเซลเซียส ใช้ในการเผากระตุ้นและเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา
4. เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง
5. เตาเผาทรงกระบอก Carbolite Gero 30-3000 รุ่น GVA พร้อมตัวควบคุม Carbolite Gero 301 ช่วงอุณหภูมิ 30-1200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3. 1 โครงสร้างระบบของกระบวนการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ใช้ในงานวิจัย

รูปที่ 3. 2 ระบบของกระบวนการสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ใช้ในงานวิจัย

โดยรูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่ใช้สำหรับการไพโรไลซิส และในรูปที่ 3.2 คือระบบของกระบวณการไพโรไลซิสที่ใช้ทำการทดลองในงานวิจัยนี้ โดยแสดงส่วนประกอบตามรูปที่ 3.1 และ 3.2 มีดังนี้

1. Carrier Gas หรือ ไนโตรเจนแก๊ส (N2) ทำหน้าที่เป็นตัวพาสารตัวอย่างที่ถูกทำให้เป็นไอหรือเป็นแก๊สไหลผ่านคอลัมน์เข้าสู่กระบวนการควบแน่นและลดอุณหภูมิ (Condenser and Cooler)

2.Gas Flow Controller ทำหน้าที่ควบคุมและวัดปริมาณแก๊สในโตรเจนที่เข้าและออกภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

3.Reactor หรือเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว และ Tube furnace หรือเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบทรงกระบอก ใช้สำหรับการไพโรไลซิสพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบทรงกระบอก ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส

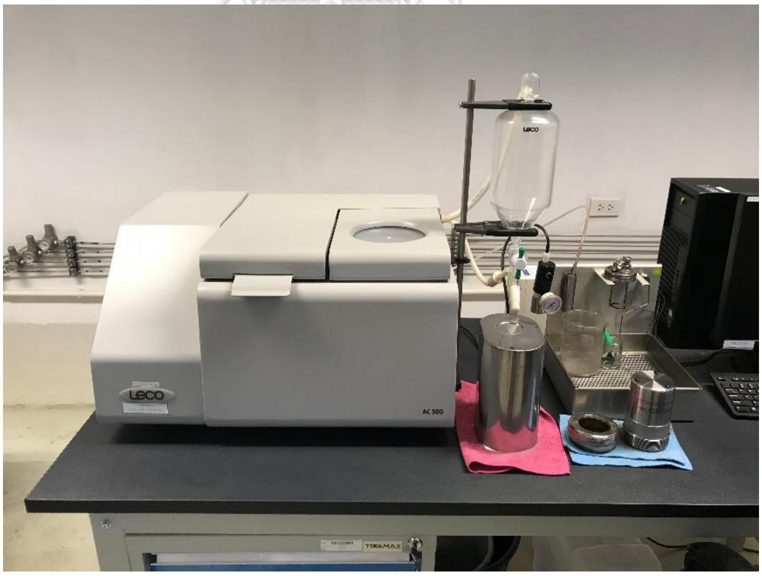
4.Thermocouple หรืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความร้อน หรืออุณหภูมิให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยในเข้าไปภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งใกล้ชีวมวลเพื่อวัดอุณหภูมิบริเวณชีวมวลในขณะไพโรไลซิส

5.Condenser และ Cooler คือระบบที่ทำการควบแน่นไอหรือแก๊สของสารที่ได้จากการไพโรไลซิสซึ่งภายในบรรจุอะซิโตนเพื่อกักเก็บน้ำมันชีวภาพ

6.Gas Drier ทำหน้าที่กำจัดความชื้นให้กับแก๊สเพื่อจัดเก็บ

รูปที่ 3. 3 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG)

จากรูปที่ 3.3 แสดงเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก(Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) รุ่น TGA701 จากบริษัท LECO จำกัด ใช้สำหรับวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อนของชีวมวล



รูปที่ 3. 4 เครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter)

จากรูปที่ 3.4 แสดงเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) รุ่น AC500 จากบริษัท LECO จำกัด ใช้สำหรับหาค่าความร้อนของชีวมวลและผลิตภัณฑ์

รูปที่ 3. 5 เครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHN and S analyzer)

จากรูปที่ 3.5 แสดงเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH และ S (CHN and S analyzer) จากบริษัท LECO จำกัด ใช้สำหรับวิเคราะห์ธาตุ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ โดยจะได้ปริมาณออกซิเจนจากการคำนวน (By Difference)

รูปที่ 3. 6 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

จากรูปที่ 3.6 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatograph, GC) รุ่น GC7820A มี Detector แบบ Thermal Conductivity Detector (TCD) จากบริษัท Agilent technology จำกัด ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมีของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส

รูปที่ 3. 7 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

จากรูปที่ 3.7 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatograph, GC) รุ่น GC7820A มี Detector แบบ Flame Ionization Detector (FID) จากบริษัท Agilent technology จำกัด ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส

รูปที่ 3. 8 เครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์

จากรูปที่ 3.8 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS) ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี รุ่น GC7890A และเครื่องแมสสเปคโทรมิเตอร์ รุ่น 5975C inert XL MSD เป็น Detector จากบริษัท Agilent technology จำกัด

และใช้ Capillary column จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น HP-5MS ขนาด 30 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.250 มิลลิลิตร

3.2 สารตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลัง ขนาด 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตร
2. โดโลไมต์ (Dolomite) เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. FCC (ใช้แล้ว) เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักจากการเคลือบฝัง (Impregnation) และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ไนโตรเจน (Nitrogen gas) มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 บรรจุในถังความดันสูง จากบริษัท BIG (ประเทศไทย) จำกัด
5. อะซิโตน (Acetone) เกรดการค้า

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1.การเตรียมและวิเคราะห์(ชีวมวลและตัวเร่งปฏิกิริยา) 2.การออกแบบการทดลองและจัดหาอุปกรณ์ 3.วิธีการทดลอง และ 4.การพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของผลิตภัณฑ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3.1 การเตรียมและวิเคราะห์(ชีวมวลและตัวเร่งปฏิกิริยา)

- การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์(Dolomite) และFCC (Fluid Cracking Catalyst) ใช้แล้ว โดยการเผากระตุ้นที่อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้นเพื่อใช้ในการไพโรไรซิส
- การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ด้วยวิธีเตรียมตัวเร่งแบบเคลือบฝัง (Impregnation) ที่ปริมาณนิกเกิล ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักบนโดโลไมต์
- เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์(Dolomite) สำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ด้วยวิธีเตรียมตัวเร่งแบบเคลือบฝัง (Impregnation) โดยทำการเผากระตุ้นที่อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมงแล้วปล่อยให้อุณหภูมิลดลงที่อุณหภูมิห้อง

- จากนั้นทำการละลาย $Ni(NO_3)_2{\cdot}6H_2O$ *(Nickel(ii) Nitrate Hexahydrate)* ลงในน้ำ DI (Deionized water) แล้วนำมาหยดลงบนโดโลไมต์(Dolomite) ที่ผ่านการเผาให้ชุ่มพร้อมกับใช้แท่งแก้วคนให้ผสมกัน ก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง แล้วนำมาเผากระตุ้นที่อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- จากนั้นทำการรีดิวซ์ (Reduce Catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล/โดโลไมต์ที่ผ่านการเคลือบฝัง(Impregnation) ด้วยไฮโดรเจนที่ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมงปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง และเก็บบรรจุในเครื่องดูดความชื้น
- ทำการบดไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงขนาด 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตร และทำการอบที่ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง จากนั้นเก็บในตู้ดูดความชื้น
- ทำการวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล ดังต่อไปนี้
  - วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis, ASTM D7582)
  - วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis, ASTM D5373)
  - วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis/Differential thermal analysis, TGA/DTG, ASTM D7582)
  - วิเคราะห์หาค่าความร้อนของชีวมวล (ASTM D5865)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.3.2 ออกแบบการทดลอง

- ศึกษาผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ในกระบวนการที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ในช่วง ขนาด 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตร โดยมีภาวะคงที่ดังนี้ อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 50 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ที่ 400 องศาเซลเซียส (±3 องศาเซลเซียส) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 45 นาที ในภาวะไร้ตัวเร่งปฏิกิริยา
- ศึกษาผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ในกระบวนการที่มีอุณหภูมิอยู่ที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส (±3 องศาเซลเซียส) โดยมีภาวะคงที่ดังนี้ อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 50 องศาเซลเซียสต่อนาที ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.355-0.710 มิลลิเมตร อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 45 นาที ในภาวะไร้ตัวเร่งปฏิกิริยา

- ศึกษาผลของเวลาในกระบวนการไพโรไลซิสที่ 45, 60 และ 90 นาที โดยมีภาวะคงที่ดังนี้ อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 50 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ที่ 500 องศาเซลเซียส (±3 องศาเซลเซียส) อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 60 มิลลิลิตรต่อนาทีเป็นเวลา 45 นาที ในภาวะไร้ตัวเร่งปฏิกิริยา
- ศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 60, 120, และ 180 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีภาวะคงที่ดังนี้ อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 50 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ที่ 500 องศาเซลเซียส (±3 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 45 นาที ในภาวะไร้ตัวเร่งปฏิกิริยา
- ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์, FCC รวมไปถึงอิทธิพลของปริมาณนิกเกิล/โดโลไมต์ (ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของนิกเกิล) โดยใช้ภาวะดำเนินการที่เหมาะสมจากการศึกษาตัวแปรที่ 1 ถึง 4

3.3.3 วิธีการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ก่อนการทดลองและบันทึกผล
2. บรรจุชีวมวล 15 กรัมตามตัวแปรขนาดที่ต้องการศึกษา คั่นด้วยชั้นบาง ๆ ใยแก้ว (ceramic fiber) ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ชั่งน้ำหนักและบันทึกผลการทดลอง
3. ติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งในเตาเผาทรงกระบอกในแนวตั้ง(Carbolite Gero 30-3000 รุ่น GVA พร้อมตัวควบคุม Carbolite Gero 301) ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งเพื่อวัดความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ชีวมวลได้รับ แล้วต่อเข้ากับระบบแก๊สไนโตรเจน โดยสารระเหยจะควบแน่นภายใต้ระบบควบแน่นและเย็นตัวลง โดยมีอะซิโตนบรรจุภายใน ระบบนี้จะควบคุมอุณหภูมิที่ 0 องศาเซลเซียสตลอดระยะเวลาการทดลอง โดยทำการชั่งน้ำหนักขวดชมพู่หลังเติมอะซิโตนและบันทึกผลการทดลอง
4. เริ่มการทดลองโดยทำการเปิดแก๊สไนโตรเจนถูกส่งผ่านเครื่องปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหล 60 มิลลิลิตรต่อนาทีประมาณ 15-30 นาทีก่อนไพโรไลซิสเริ่มต้น
5. เปิดเตาเผา ทำการปรับค่าอุณหภูมิโดยมีอัตราการให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และเวลาตามตัวแปรที่ต้องการทำการศึกษา
6. เมื่อผลิตภัณฑ์เหลวเข้าสู่ภาชนะรองรับที่มีอะซิโตนบรรจุอยู่ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผลการทดลอง

7. นำผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ไปประเหยที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดอะซิโตนทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผลการทดลอง
8. นำเครื่องปฏิกรณ์ที่บรรจุถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส ไปทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผลการทดลอง
9. ทำการคำนวณร้อยละผลได้ (yield) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักพร้อมบันทึกผลการทดลอง
10. ทำซ้ำการทดลองพร้อมบันทึกผลการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆ และหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพหรือผลิตภัณฑ์เหลวจากชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง
11. ศึกษาตัวแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส ขนาดอนุภาคเฉลี่ย อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน และเวลา โดยทำตามขั้นตอน 1 ถึง 9 ปรับค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อศึกษาปัจจัยตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยและหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง เมื่อทราบภาวะที่เหมาะสม จะทำการบรรจุชีวมวลพร้อมทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชีวมวลที่ 1: 10 และ และทำตามขั้นตอน 1 ถึง 9 พร้อมศึกษาเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของสาร

1. การวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

- การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะผ่านเทคนิค การวิเคราะห์สมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG)
- การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) และการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง
- วิเคราะห์ค่าความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์(Bomb calorimeter)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกริยา

- การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโดโลไมต์ก่อน-หลังการแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝัง(Impregnation) นิกเกิลบนโดโลไมต์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
- การวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อน-หลังการแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝัง(Impregnation) นิกเกิลบนโดโลไมต์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractrometer, XRD)
- การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบรูนัวร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET)

3. การวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์

- วิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์(Bomb calorimeter)
- การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)ของผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์
- วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatograph, GC)
- วิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพ โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปกโทรเมทรี (Gas Chromatography Mass Spectrometry)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4 การคำนวณร้อยละผลได้จากการทดลอง

การคำนวณปริมาณผลิตภัณฑ์เหลว ถ่านชาร์ และแก๊ส จะแสดงดังสมการต่อไปนี้

- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์เหลว (% Liquid yield) = $\mathbf{W}_{\text{ผลิตภัณฑ์เหลว}}/\mathbf{W}_{\text{ชีวมวล}} \times 100$
- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของถ่านชาร์ (% Solid yield) = $\mathbf{W}_{\text{ถ่านชาร์}}/\mathbf{W}_{\text{ชีวมวล}} \times 100$
- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส (% Gas yield) = 100 – ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เหลว – ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแข็ง

เมื่อ ;

$\mathbf{W}_{\text{ผลิตภัณฑ์เหลว}}$ = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการทดลอง

$\mathbf{W}_{\text{ถ่านชาร์}}$ = หนักของถ่านชาร์ที่ได้จากการทดลอง

$\mathbf{W}_{\text{ชีวมวล}}$ = น้ำหนักของชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง

การคำนวณร้อยละน้ำมันชีวภาพต่อน้ำ ของผลิตภัณฑ์เหลวจะแสดงดังสมการต่อไปนี้

- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ (% Bio-oil in liquid product) = $\mathbf{W}_{\text{น้ำมันชีวภาพ}} / \mathbf{W}_{\text{ผลิตภัณฑ์เหลว}} \times 100$
- ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ (% Water in liquid product) = $\mathbf{W}_{\text{น้ำในผลิตภัณฑ์เหลว}} / \mathbf{W}_{\text{ผลิตภัณฑ์เหลว}} \times 100$

เมื่อ ;

$\mathbf{W}_{\text{ผลิตภัณฑ์เหลว}}$ = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการทดลอง

$\mathbf{W}_{\text{น้ำมันชีวภาพ}}$ = หนักของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการทดลอง

$\mathbf{W}_{\text{น้ำ}}$ = หนักของน้ำที่ได้จากการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

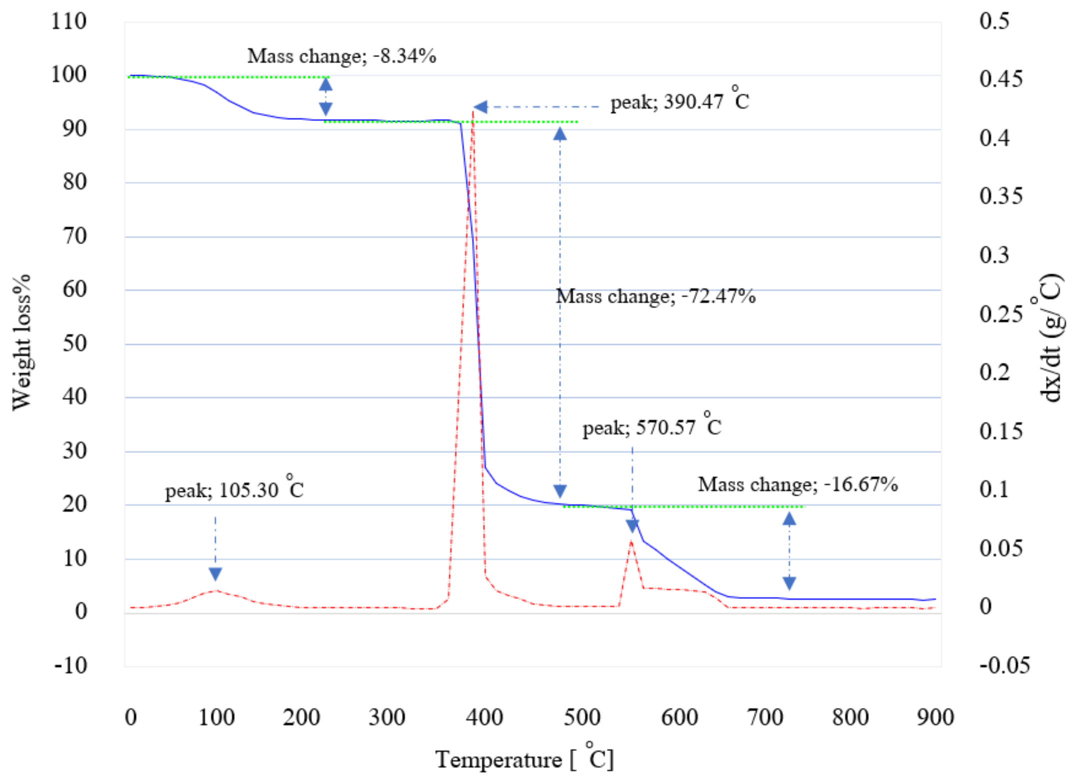
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลังภายใต้เครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง โดยตัวแปรที่สนใจศึกษาภายในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย อุณหภูมิไพโรไลซิส ขนาดอนุภาค เวลา และอัตราการไหลของไนโตรเจน นอกจากนี้ยังศึกษาอิทธิพลผลของตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์, FCC และอิทธิพลของปริมาณนิกเกิลบนโดโลไมต์ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของนิกเกิลที่ภาวะเดียวกัน และทำการพิสูจน์เอกลักษณ์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นและลักษณะของไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลังจะวิเคราะห์ผ่านเทคนิค การวิเคราะห์สมบัติการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

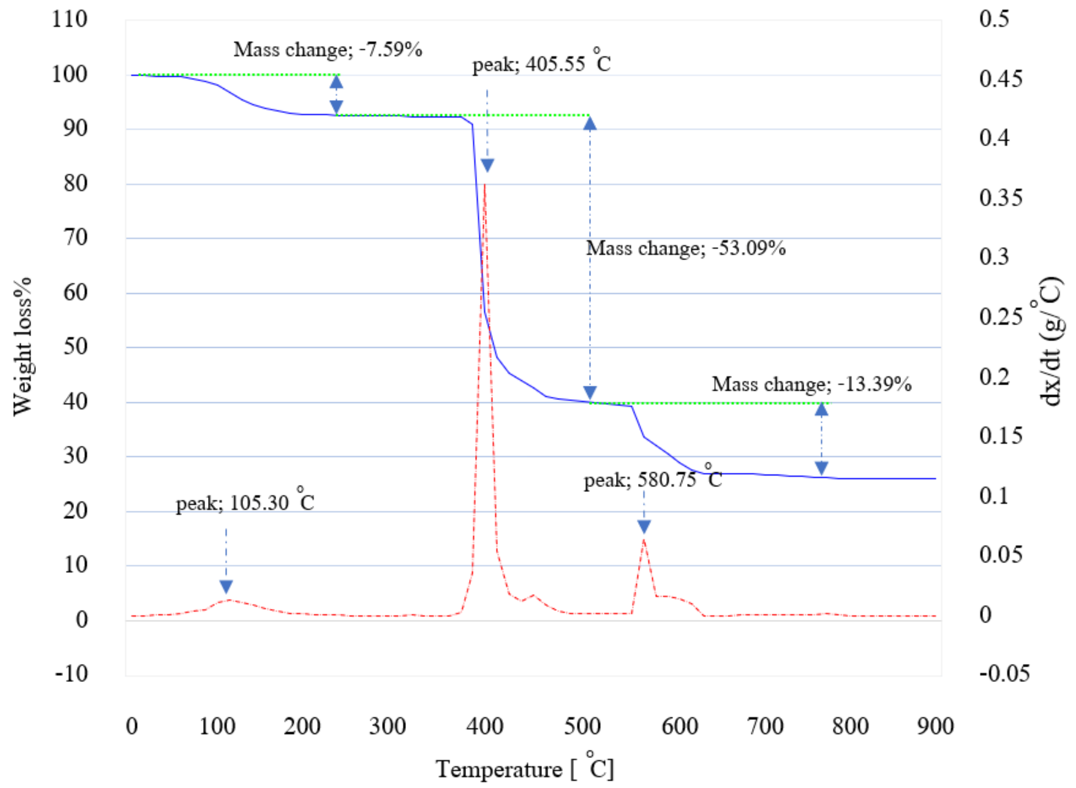
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก



รูปที่ 4. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของไม้ยางพาราในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ไนโตรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก (TGA) และอัตราการสูญเสียน้ำหนัก (DTG) ของเหง้ามันสำปะหลังในภาวะอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้ภาวะไนโตรเจน

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (TGA/DTG) ที่อุณหภูมิห้องจนถึง 950 องศาเซลเซียส เพื่อดำเนินการที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้สภาวะไนโตรเจน พบว่าช่วงการสลายตัวของไม้ยางพารา สามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคล้ายคลึงกันทั้งไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง คือ ช่วงแรกที่อุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวของความชื้นหรือน้ำที่อยู่ภายในผิวและโครงสร้างของวัสดุชีวมวลไม้ยางพารา ในช่วงที่สองเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 360 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวสูงสุดที่ช่วงประมาณ 400 และเริ่มช้าลงและคงที่ 500 องศาเซลเซียส พบว่าช่วงดังกล่าวไม้ยางพาราสลายตัวไปถึงร้อยละ 80 ของน้ำหนักและเหง้ามันสำปะหลังสลายตัวไปถึงร้อยละ 60 ของน้ำหนัก ซึ่งอธิบายได้จากการสลายตัวเชิงความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 280-400 องศาเซลเซียสเป็นการสลายตัวของสารระเหยได้ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงมวลในช่วงของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส คาดได้ว่าเป็นไอของสารระเหย จนเข้า

สู่ช่วงที่สามเริ่มสลายตัวเริ่มที่ประมาณ 600 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของคาร์บอนที่ได้รับความร้อนมากขึ้นจนเริ่มการสลายตัวในชีวมวลทั้งสองจนหมดที่ช่วงอุณหภูมิใกล้ถึง 700 องศาเซลเซียส โดยจะมีคาร์บอนคงตัวและขี้เถ้าร้อยละ 20 และร้อยละ40 ของน้ำหนักโดยประมาณสำหรับไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับปริมาณขององค์ประกอบแบบประมาณจะมีค่าที่สอดคล้องกัน

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและแยกธาตุของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

การวิเคราะห์แบบประมาณของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง พบว่าไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังมีความชื้นร้อยละ 8.34 และ 7.59 โดยน้ำหนักตามลำดับ สารระเหยร้อยละ 72.47 และ 53.09 โดยน้ำหนักตามลำดับ ขี้เถ้าร้อยละ 2.52 และ 25.93 โดยน้ำหนักตามลำดับ และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 16.67 และ 13.39 โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4. 1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ แบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

วิเคราะห์แบบประมาณ	**ร้อยละโดยน้ำหนัก***	
	ไม้ยางพารา	**เหง้ามันสำปะหลัง**
ความชื้น	8.34	7.59
สารระเหย	72.47	53.09
ขี้เถ้า	2.52	25.93
คาร์บอนคงตัว	16.67	13.39

วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	**ร้อยละโดยน้ำหนัก***	
	ไม้ยางพารา	**เหง้ามันสำปะหลัง**
คาร์บอน	47.39	33.54
ไฮโดรเจน	6.73	4.75
ไนโตรเจน	0.30	1.13
ซัลเฟอร์	0.02	0.07
ออกซิเจน**	45.56	60.51
ค่าความร้อน (แคลอรี่ต่อกรัม)	**4,102**	**2,961**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หมายเหตุ : *หลักอ้างอิงพื้นฐานแห้ง (Dry basis), **วิธีคำณวนจากผลต่าง (By the different)

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้บ่งบอกปริมาณน้ำมันชีวภาพว่ามีปริมาณมากหรือน้อยเพียงใด โดยสารระเหยของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังสูงถึงร้อยละ 72.47 และ 53.09 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งคาดคะเนได้ว่าปริมาณไอและน้ำมันชีวภาพ ที่จะออกมาจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังโดยมีค่าประมาณร้อยละ 70 และ 50 โดยน้ำหนักตามลำดับ และในส่วนผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง พบว่ามีปริมาณ คาร์บอนร้อยละ 47.39 และ 33.54 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 6.73 และ 4.75 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.3 และ 1.13 โดยน้ำหนักตามลำดับปริมาณซัลเฟอร์ร้อยละ 0.02 และ 0.07 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 45.56 และ 60.51 โดยน้ำหนักตามลำดับ และค่าความร้อน 4,102 และ 2,961 แคลอรี่ต่อกรัมของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ

4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

การวิเคราะห์และสมบัติพื้นฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์, FCC รวมไปถึงอิทธิพลของปริมาณนิกเกิล/โดโลไมต์ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของนิกเกิล จะถูกวิเคราะห์ผ่านเทคนิคการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray Diffractometer, XRD) และ เทคนิคบรูนัวร์ เอ็มเมทท์และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET)

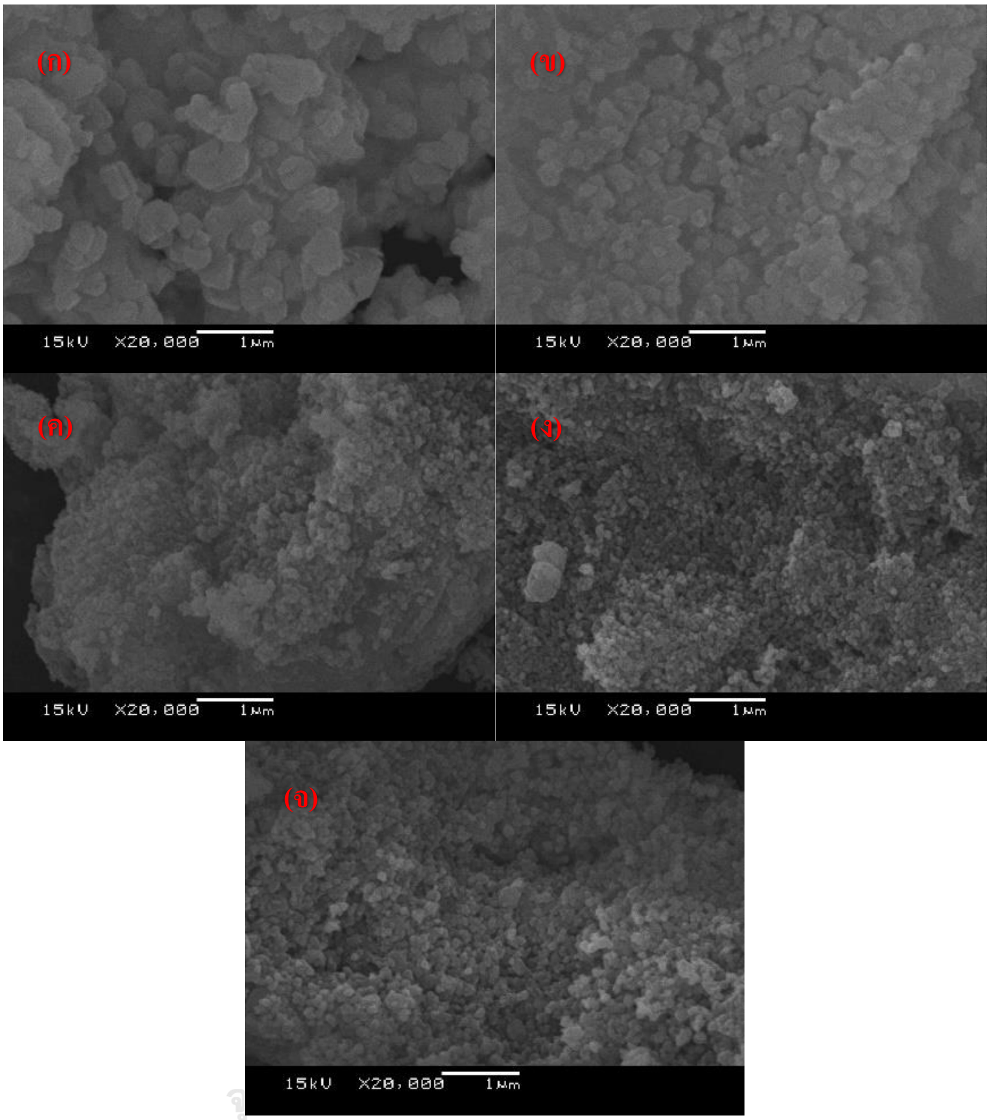
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.1 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของโดโลไมต์ก่อน-หลังการแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝัง (Impregnation) นิกเกิลบนโดโลไมต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

รูปที่ 4.3 แสดงภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของโดโลไมต์ โดยรูปที่ 4.3 (ก) แสดงโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์และรูปที่ 4.3 (ข) แสดงโดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่กำลังขยาย 20,000 เท่า พบว่าโดโลไมต์ที่ผ่านการแคลไซน์มีการสลายตัวของสารบางองค์ประกอบ เมื่อเทียบผลกับ XRD พบว่าการสลายตัวดังกล่าว คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) ที่พื้นสลายตัว ทำให้มีปริมาณความขรุขระ (grain) เพิ่มมากขึ้นดังภาพ ซึ่งทำให้เกิดองค์ประกอบใหม่ขึ้น เช่น แคลเซียม

ออกไซด์ (CaO), แคลเซียมคาร์บอเนต ($Ca(CO)_3$) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มาปิดบังปริมาณพื้นผิวรูพรุนเดิมทำให้ปริมาณพื้นผิวรูพรุนลดลง จากรูปที่ 4.3 (ค), (ง) และ (จ) แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝัง(Impregnation) ที่ปริมาณนิกเกิล ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักบนโดโลไมต์ พบว่าจากการสลายตัวของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) เกิดองค์ประกอบโลหะออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) และแมกนีเซียมนิกเกิลไดออกไซด์ ($MgNiO_2$) ขึ้นมาบดบังปริมาณพื้นผิวรูพรุนเดิมโดยเมื่อเปรียบเทียบปริมาณพื้นผิวรูพรุนพบว่ารูปที่ 4.3 (ค) ที่นิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนักโดยมีอนุภาคของนิกเกิลเล็ก ๆ ปกคลุมที่บริเวณพื้นผิวของโดโลไมต์เป็นหย่อม ๆ และเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักแสดงในรูปที่ 4.3 (ง) พบว่ามีอนุภาคของนิกเกิลปกคลุมที่บริเวณพื้นผิวของโดโลไมต์อย่างหนาแน่นโดยไม่มีการซ้อนทับของอนุภาคดังกล่าว (Monolayer) แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของนิกเกิลบดบังปริมาณพื้นผิวรูพรุนเดิมบนพื้นผิวของโดโลไมต์ และจากรูปที่ 4.3 (จ) เมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของโดโลไมต์พบว่าการซ้อนทับของอนุภาคของนิกเกิลที่ปกคลุมบนพื้นผิวของโดโลไมต์เป็นชั้น ๆ (Multilayer) ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณพื้นผิวรูพรุนลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยา (ก) โดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์, (ข) โดโลไมต์หลังการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง, (ค) 5% นิกเกิล/โดโลไมต์, (ง) 10% นิกเกิล/โดโลไมต์, และ(จ) 20% นิกเกิล/โดโลไมต์

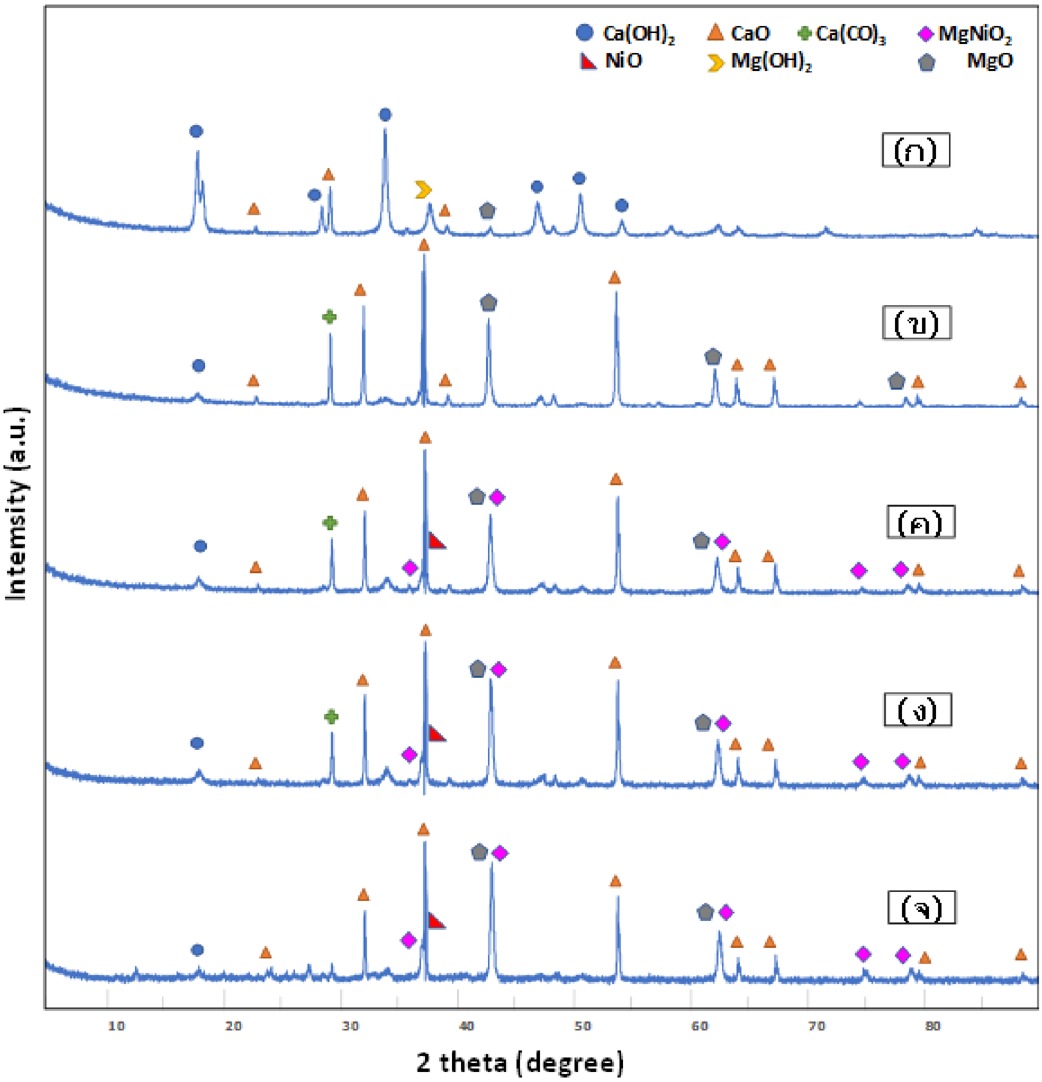
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เมื่อเปรียบเทียบรูปที่ 4.3 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบจากเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractrometer, XRD) พบว่าการแคลซิเนชัน (Calcination) และการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเคลือบฝัง มีความสำคัญต่อลักษณะทางสัญฐานวิทยาของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา ให้อยู่ในรูปของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม ผลที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อน-หลังการแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝัง (Impregnation) นิกเกิลบนโดโลไมต์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffractrometer, XRD)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโดโลไมต์ก่อน-หลังแคลไซน์ และหลังการเคลือบฝังนิกเกิลบนโดโลไมต์ ด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ จะแสดงองค์ประกอบของแคลเซียมออกไซด์ที่ตำแหน่ง 32.2°, 37.3°, 53.8°, 64.1°, 67.4°, 79.6° และ 88.5° สำหรับ 2ϴ, แมกนีเซียมออกไซด์ที่ตำแหน่ง 36.8°, 42.8°, 62.2°, 74.5° และ 78.5° สำหรับ 2ϴ ซึ่งพบว่าในโครงสร้างผลึกของโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์ มีแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปะปนอยู่ เมื่อทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการเคลือบฝังตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยนิกเกิลจะแสดงพีคของแคลเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้น อีกทั้งการเคลือบฝังตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยนิกเกิลทำให้เกิดโลหะแมกนีเซียมนิกเกิลออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะหายไปเนื่องจากการสลายตัวทางความร้อนในช่วงแรก [33] จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าข้างต้นว่า เมื่อทำการแคลไซน์ และทำการเคลือบฝังตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยนิกเกิล เกิดการเปลี่ยนองค์ประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ให้อยู่ในรูปของแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ รวมไปถึงให้เกิดโลหะแมกนีเซียมนิกเกิลไดออกไซด์ และนิกเกิลออกไซด์ ขึ้นอีกด้วย ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4. 4 รูปแบบ XRD ของ (ก) โดโลไมต์ก่อนแคลไซน์, (ข) โดโลไมต์หลังแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง, (ค) 5% นิกเกิล/โดโลไมต์, (ง) 10% นิกเกิล/โดโลไมต์, และ (จ) 20% นิกเกิล/โดโลไมต์, แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ●, แคลเซียมออกไซด์ ▲, แคลเซียมคาร์บอเนต ✚ , นิกเกิลแมกนีเซียมไดออกไซด์ ◆, นิกเกิลออกไซด์ ◣, แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ❯ , และแมกนีเซียมออกไซด์ ⬟ [32-33]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบรูนัวร์ เอ็มเมทท์ และเทลเลอร์ (Brunauer Emmett Teller, BET)

ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (Surface area) และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ก่อนและหลังการแคลไซน์ด้วยเทคนิค (Brunauer Emmett Teller, BET)

ตารางที่ 4. 2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุน (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุน (S_{BET}) (ตารางเมตรต่อกรัม)	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)
FCC ใช้แล้ว แคลไซน์ 800 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง	98.50	0.15
โดโลไมต์ ก่อนแคลไซน์	10.72	0.03
โดโลไมต์ แคลไซน์ 800 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง	10.02	0.02
นิกเกิลโดโลไมต์ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	8.22	0.03
นิกเกิลโดโลไมต์ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	9.77	0.04
นิกเกิลโดโลไมต์ปริมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก	8.47	0.02

จากตารางที่ 4.2 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ก่อนการแคลไซน์มีพื้นที่ผิวรูพรุนเท่ากับ 10.72 ตารางเมตรต่อกรัม เมื่อทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมงมีพื้นที่ผิวรูพรุนลดลงเป็น 10.02 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรรูพรุนลดลงจาก 0.03 เป็น 0.02 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เนื่องจากการสลายตัวของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) จากความร้อน และเกิดองค์ประกอบใหม่ขึ้นผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอเนชัน (Decarbonation) ตามสมการที่ 4.1 ถึง 4.3

$$CaMg(CO_3)_2 \longrightarrow MgO + CO_2 \quad (4.1)$$

$$CaCO_3 \longrightarrow CaO + CO_2 \quad (4.2)$$

ปฏิกิริยารวม; $$CaMg(CO_3)_2 \longrightarrow MgO+CaO+CO_2 \quad (4.3)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ซึ่งสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลต่อการแตกตัวโมเลกุลของสารตั้งต้น การที่พื้นที่ผิวรูพรุนและปริมาตรหลังจากการแคลไซน์ลดลง เนื่องจากเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่สลายตัวทางความร้อน นอกจากนี้การเคลือบฝังตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยนิกเกิล (Impregnation) บนโดโลไมต์ เกิดองค์ประกอบโลหะออกไซด์ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) และแมกนีเซียมนิกเกิลไดออกไซด์ ($MgNiO_2$) เมื่อโลหะนิกเกิลปกคลุมที่ผิวของโดโลไมต์ และขึ้นมาบดบังปริมาณพื้นผิวรูพรุนเดิมของโดโลไมต์

โดยเมื่อเปรียบเทียบผ่านการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) พบว่าปริมาณพื้นผิวรูพรุนที่นิกเกิลร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

โดยมีอนุภาคของนิกเกิลเล็ก ๆ ปกคลุมที่บริเวณพื้นผิวของโดโลไมต์เป็นหย่อม ๆ และเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลเป็นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่ามีอนุภาคของนิกเกิลปกคลุมที่บริเวณพื้นผิวของโดโลไมต์อย่างหนาแน่นโดยไม่มีการซ้อนทับของอนุภาคดังกล่าว (Monolayer) และเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลเป็นร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของโดโลไมต์พบว่าการซ้อนทับของอนุภาคของนิกเกิลที่ปกคลุมบนพื้นผิวของโดโลไมต์เป็นชั้น ๆ (Multilayer) ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณพื้นผิวรูพรุนลดลง

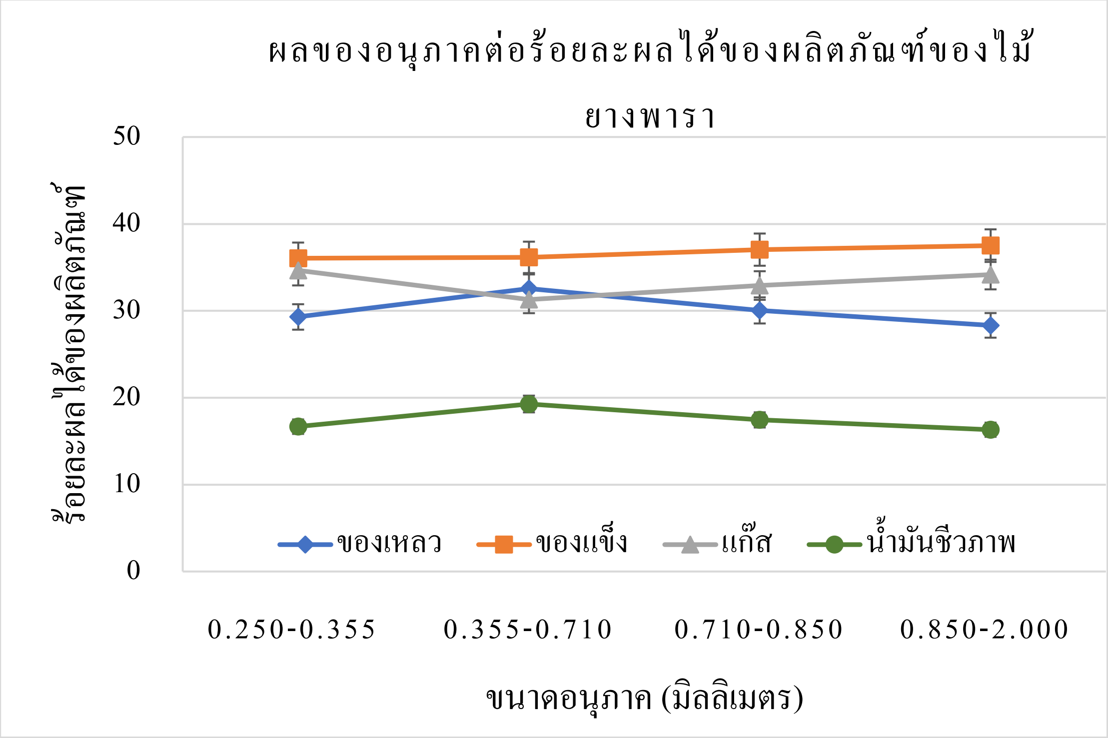
4.3 ผลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลังประกอบด้วยตัวแปรที่สำคัญ 4 ตัวแปร คือ

1. ผลของขนาดชีวมวล 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตร
2. ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส
3. ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา 45, 60 และ 90 นาที
4. ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60, 120 และ 180 มิลลิลิตรต่อนาที

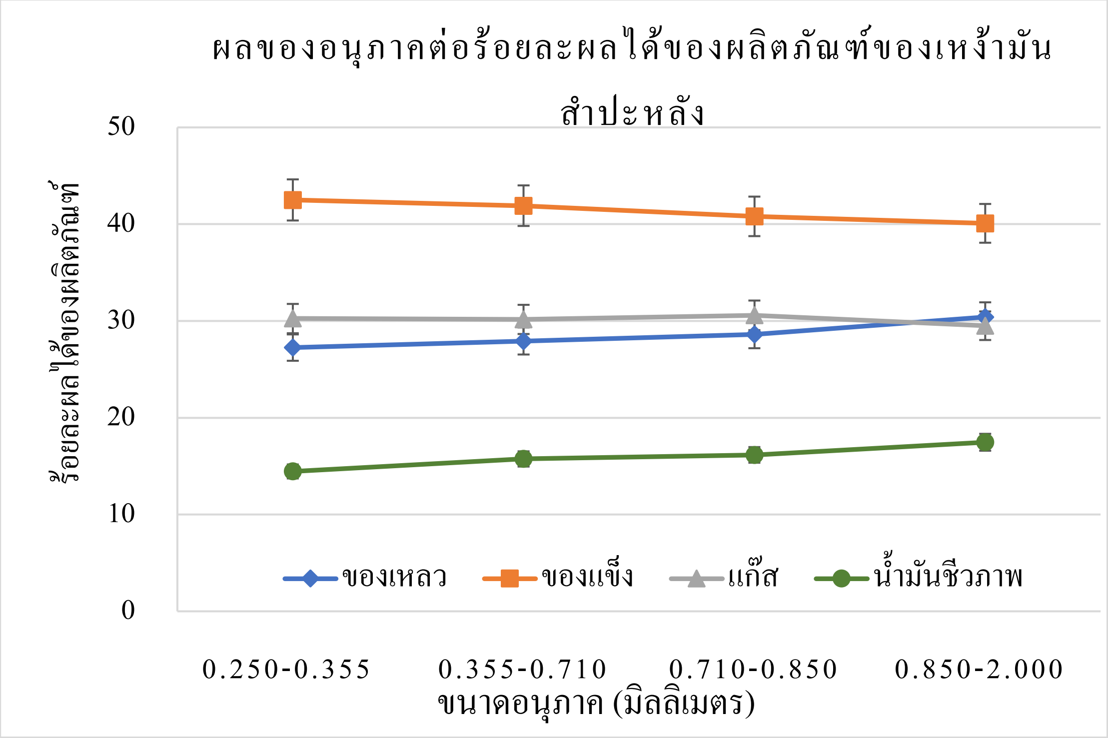
4.3.1 ผลของขนาดชีวมวล 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตรของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

ผลการทดลองแสดงขนาดเฉลี่ยชีวมวลที่ใช้ในการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง มีช่วงเฉลี่ยอยู่ที่ 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตร เมื่อให้ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ได้แก่ อุณภูมิไพโรไลซิสที่ใช้เท่ากับ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 45 นาที พบว่าร้อยละของของเหลวที่ได้จากไม้ยางพาราจะอยู่ระหว่าง 28.32 ถึง 32.56 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละของของเหลวที่ได้จากเหง้ามันทำปะหลังจะอยู่ระหว่าง 27.25 ถึง 30.41 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4. 5 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพารา เมื่อภาวะคงที่ที่อุณภูมิ 400 องศาเซลเซียส, อัตราการไหลไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 6 ผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลังเมื่อภาวะคงที่ที่อุณภูมิ 400 องศาเซลเซียส, อัตราการไหลไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงผลของขนาดเฉลี่ยชีวมวลที่ใช้ไพโรไลซิสภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง โดยแสดงผลของขนาดอนุภาคเฉลี่ยต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากการทดลองขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 0.250-0.355, 0.355-0.710, 0.710-0.850 และ 0.850-2.000 มิลลิเมตร พบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตรของไม้ยางพารา และขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตรของเหง้ามันสำปะหลัง โดยมีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวดีสุดอยู่ที่ร้อยละ 32.56 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 30.41 โดยน้ำหนักสำหรับไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ

ไม้ยางพาราขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตรให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุด ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวอยู่ที่ร้อยละ 32.56 โดยน้ำหนัก โดยไม้ยางพาราที่มีขนาดเฉลี่ยน้อยกว่า 0.355-0.710 มิลลิเมตรเกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีเกินไป จึงทำให้ความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์แพร่ผ่านเข้าไปภายในไม้ยางพาราได้ง่ายจึงสลายตัวง่าย สารระเหยกลายเป็นแก๊สขนาดเล็กที่ไม่สามารถกลับมาในรูปของผลิตภัณฑ์เหลวได้ ในทางตรงกันข้ามกันไม้ยางพาราที่มีขนาดเฉลี่ยมากกว่า 0.355-0.710 มิลลิเมตร เกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ไม่ดีนักเนื่องจากเนื้อไม้ที่หนาแน่นและแข็ง จึงได้ค่าผลิตภัณฑ์เหลวลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากขนาดอนุภาคเฉลี่ย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ขนาดใหญ่จะมีการถ่ายโอนความร้อนที่ไม่ดีนัก ทำให้เกิดการสลายตัวของไม้ยางพาราได้น้อยและเกิดการสลายตัวที่ไม่สมบูรณ์

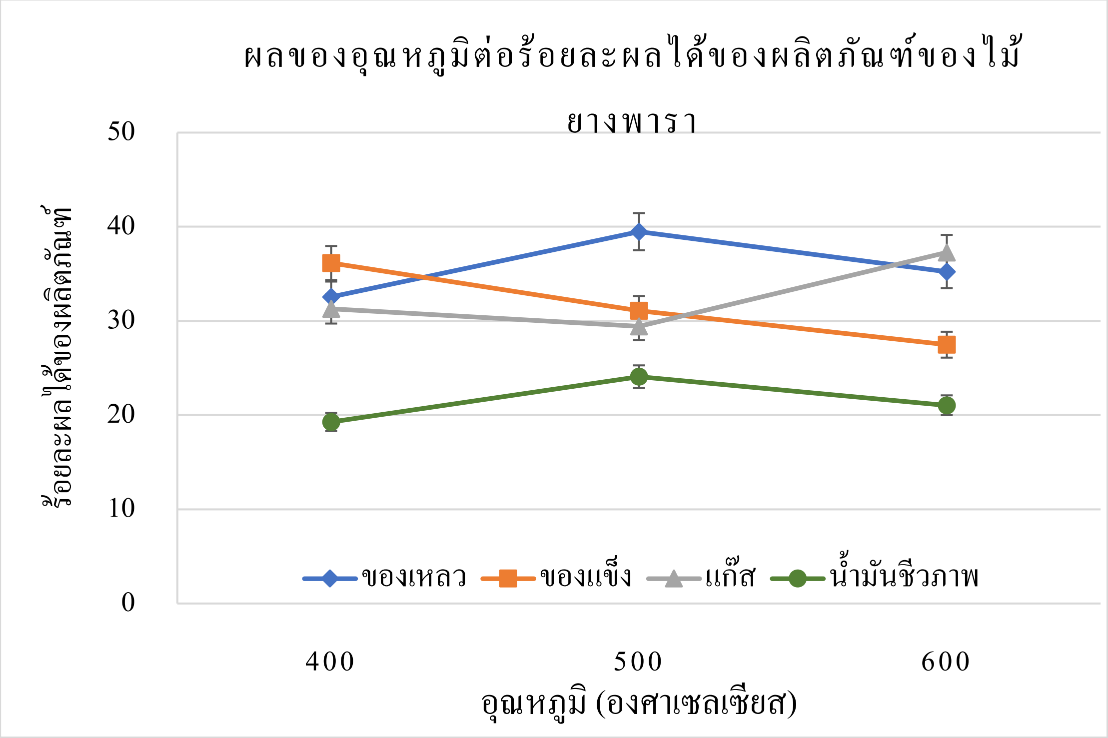
เหง้ามันสำปะหลังให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดเหง้ามีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร โดยเหง้ามันสำปะลังที่มีขนาดเฉลี่ยน้อยกว่า 0.850-2.000 มิลลิเมตร ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 30.41 โดยน้ำหนัก เนื่องเหง้ามันสำปะหลังมีขนาดเฉลี่ยน้อยกว่า 0.850-2.000 เกิดการถ่ายโอนความร้อนได้ดีเกินไป จึงทำให้ความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์แพร่ผ่านเข้าไปภายในได้ง่ายจึงสลายตัวง่าย จึงได้ค่าผลิตภัณฑ์เหลวลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น

ดังนั้นสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยของชีวมวลที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสพบว่าไม้ยางพาราขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร และเหง้ามันสำปะหลังขนาด 0.850-2.000 มิลลิเมตรให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวดีที่สุด แต่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเหล่านั้นให้ผลร้อยละที่ใกล้เคียงกัน และไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

4.3.2 ผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

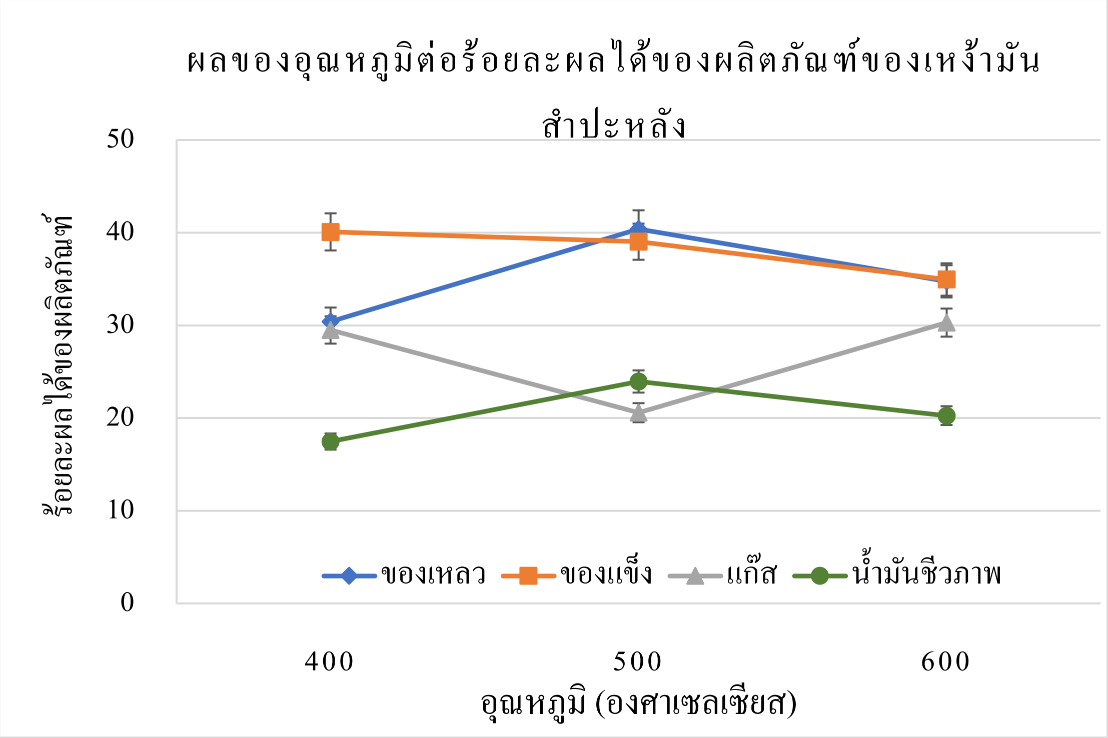
ผลการทดลองแสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียสเมื่อให้ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไม้ยางพาราที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร ขนาดเฉลี่ยของเหง้ามันสำปะหลังอยู่ที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร อัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยาคือ 45 นาที พบว่าร้อยละของของเหลวที่ได้จากไม้ยางพาราจะอยู่ระหว่าง 32.56 ถึง 39.48 โดยน้ำหนัก และร้อยละของของเหลวที่ได้จากเหง้ามันทำปะหลังจะอยู่ระหว่าง 30.41 ถึง 40.39 โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 7 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพาราเมื่อภาวะคงที่ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.355-0.710 มิลลิเมตร อัตราการไหลไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 8 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลังเมื่อภาวะคงที่ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.850-2.000 มิลลิเมตร อัตราการไหลไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ในภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งโดยปัจจัยอุณหภูมิไพโรไลซิสถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้น พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ 400, 500 และ 600 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อความร้อนสูงขึ้นการสลายเชิงความร้อนจะมากขึ้น โดยเทียบจากปริมาณน้ำมันชีวภาพที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 32.56 เป็น 39.48 โดยน้ำหนักของไม้ยางพารา และจากร้อยละ 30.41 ถึง 40.39 โดยน้ำหนักของเหง้ามันสำปะหลัง อธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิการแพร่ความร้อน เข้าไปยังชีวมวลได้มากขึ้นจึงเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ดีนั้น คือเกิดปฏิกิริยาเคมีความร้อน (Thermal cracking) และเกิดเป็นสารระเหยที่สามารถควบแน่นกลับมาเป็นอยู่ในผลิตภัณฑ์เหลวได้ในปริมาณที่มากขึ้น ต่อมาเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิไพโรไลซิสไปที่ 600 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์พบว่าผลิตภัณฑ์เหลวจะมีค่าลดลงอยู่ที่ร้อยละ 35.24 โดยน้ำหนักของไม้ยางพารา และร้อยละ 34.75 โดยน้ำหนักของเหง้ามันสำปะหลัง เนื่องจากที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการสลายทางความร้อนขั้นทุติยภูมิ (Secondary thermal decomposition) ของสารระเหยที่เป็นแก๊สขนาดเล็กที่ไม่

สามารถควบแน่นกลับมาในรูปของผลิตภัณฑ์เหลวได้ และออกจากเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งในรูปผลิตภัณฑ์แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลวจึงมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณแก๊สมากขึ้น โดยสมการการสลายตัวของชีวมวลจะแสดงดัง สมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ชีวมวล ⟶ ผลิตภัณฑ์เหลว + ถ่านชาร์ + ผลิตภัณฑ์แก๊ส (2.1)
(มีเทน+ คาร์บอนไดออกไซด์ +
คาร์บอนมอนอกไซด์ + ไฮโดรเจน) + น้ำ + อื่นๆ

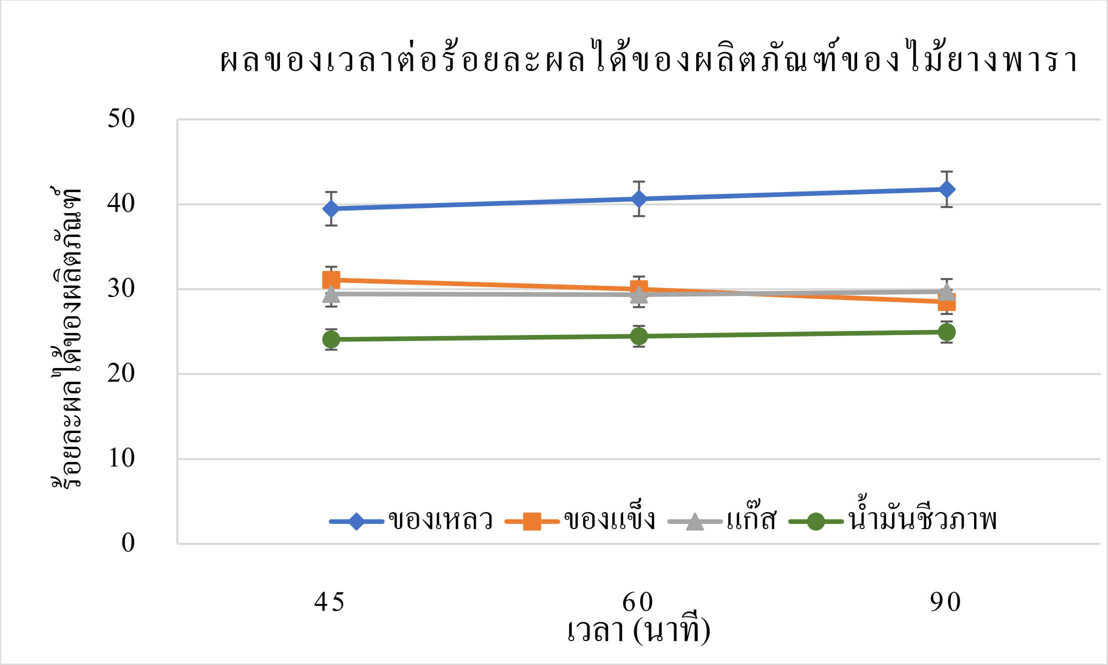
ของเหลวอินทรีย์ ⟶ ผลิตภัณฑ์เหลว (สารจำพวกแอโรมาติก) + ถ่านชาร์ (2.2)
+ ผลิตภัณฑ์แก๊ส (มีเทน + คาร์บอนไดออกไซด์ +
คาร์บอนมอนอกไซด์ + ไฮโดรเจน) + น้ำ + อื่นๆ

จึงสรุปได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเกิดการแพร่ความร้อนไปยังชีวมวลมากขึ้นส่งผลให้เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ดีขึ้นได้ปริมาณร้อยละน้ำมันชีวภาพมากขึ้น เมื่อสูงเกินไปส่งผลให้เหิดการสลายตัวทางความร้อนที่มากเกินไปซึ่งได้ปริมาณณแก๊สที่เพิ่มมากขึ้น โดยช่วงอุณหภูมิที่ดีที่สุดที่ให้ผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด สำหรับการไพโรไลซิสไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลัง คือ 500 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน

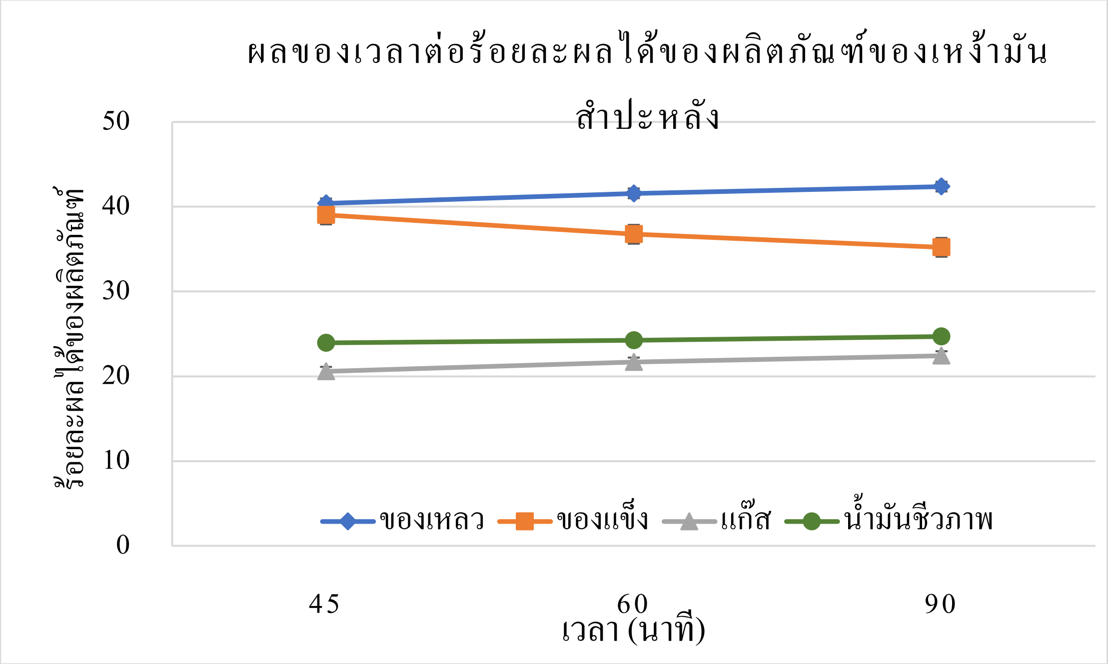
4.3.3 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยา 45, 60 และ 90 นาทีของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองแสดงเวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45, 60 และ 90 นาที เมื่อให้ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไม้ยางพาราที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร ขนาดเฉลี่ยของเหง้ามันสำปะหลังอยู่ที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าร้อยละของของเหลวที่ได้จากไม้ยางพาราจะอยู่ระหว่าง 33.84 ถึง 39.48 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละของของเหลวที่ได้จากเหง้ามันทำปะหลังจะอยู่ระหว่าง 35.98 ถึง 40.39 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4. 9 ผลของเวลาที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพาราเมื่อภาวะคงที่ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.355-0.710 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4. 10 ผลของเวลาที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลังเมื่อภาวะคงที่ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.850-2.000 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที

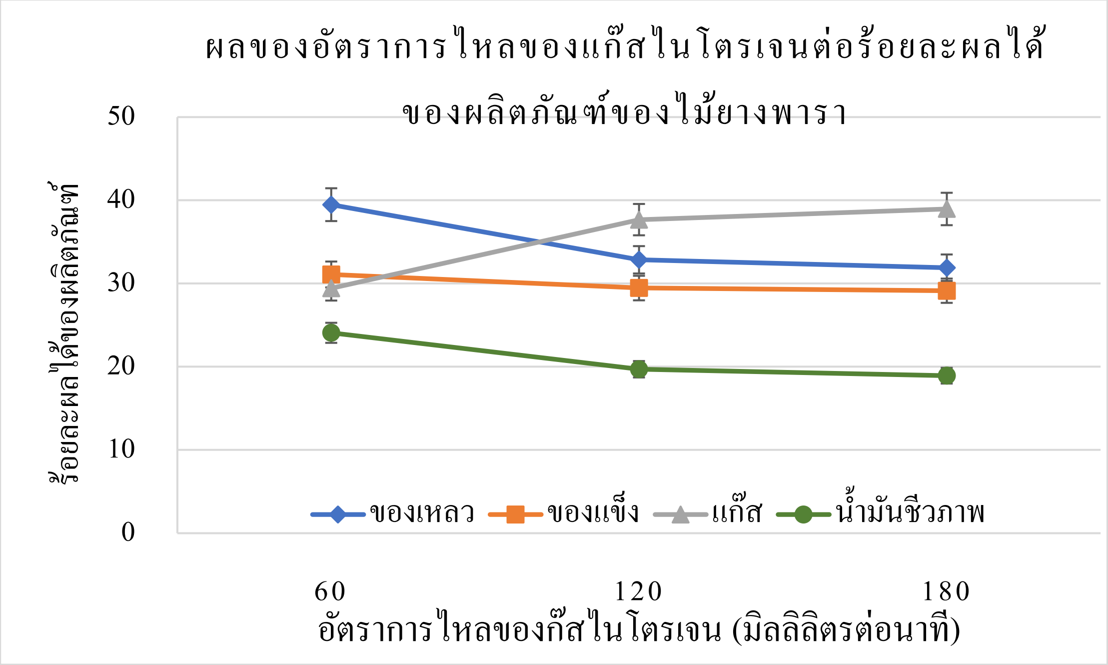
จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงผลของเวลาในการไพโรไลซิสที่ใช้ในภายในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ 45, 60 และ 90 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการไพโรไลซิส และปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ได้ผลิตภัณฑ์เหลวที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากชีวมวลที่อยู่ภายในเครื่องปฏิกรณ์นานยิ่งขึ้น จะทำให้เกิดการแพร่ความร้อน (Heat transfer) ในชีวมวลมากขึ้น ความร้อนที่แพร่เข้าไปภายในชีวมวลเกิดการสะสมมากขึ้น เวลานาน ๆ ส่งผลต่อการสลายตัวของสารเมื่อได้รับความร้อนที่มากตามไปด้วย และยังส่งผลถึงน้ำมันชีวภาพจากการระเหยและควบแน่นของแก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส ส่งผลต่อปริมาณแก๊สและน้ำมันชีวภาพเพิ่มมากขึ้น

จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เมื่อเวลามากขึ้นจะส่งผลต่อสองส่วนหลัก คือ ชีวมวล และน้ำมันชีวภาพ ที่ได้รับความร้อนสะสมทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ระเหยกลายเป็นแก๊สและควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้มากขึ้น พบว่าเวลาที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ที่ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวดีที่สุดคือ 45 นาทีของทั้งไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง เนื่องจากเมื่อเวลามากขึ้นปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้นั้นมีปริมาณน้อยไม่คุ้มค่าต่อการเวลาที่ดำเนินไป

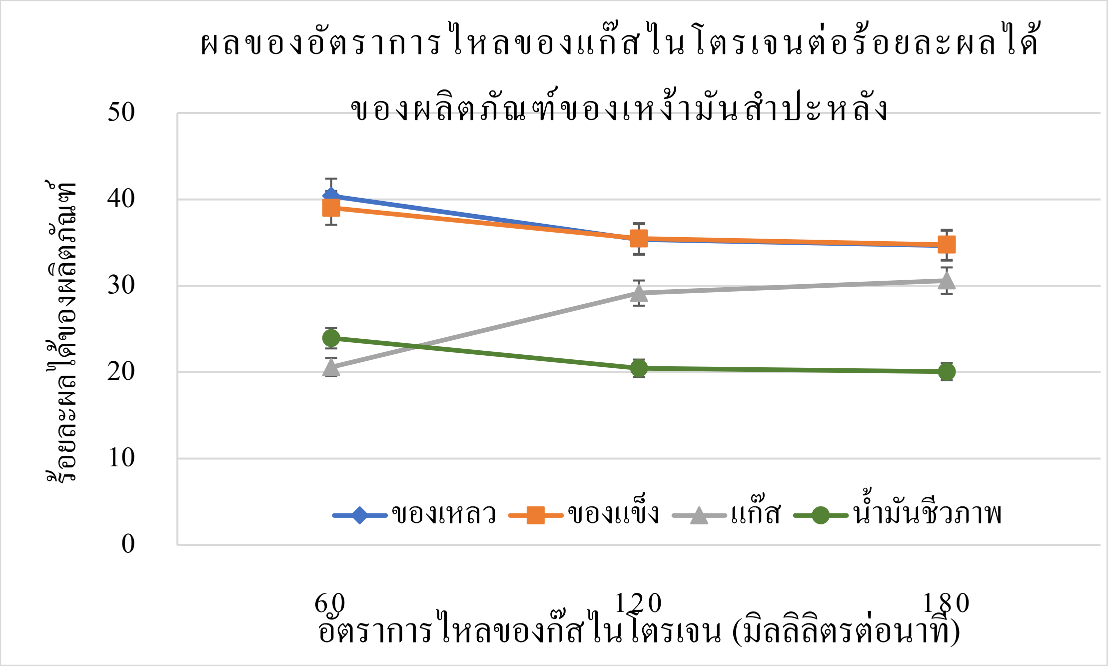
4.3.4 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60, 120 และ 180 มิลลิลิตรต่อนาทีของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

ผลการทดลองแสดงอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง เมื่อทำการปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60, 120 และ 180 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อให้ตัวแปรอื่น ๆ คงที่ได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไม้ยางพาราที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร ขนาดเฉลี่ยของเหง้ามันสำปะหลังอยู่ที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที พบว่าร้อยละของของเหลวที่ได้จากไม้ยางพาราจะอยู่ระหว่าง 31.90 ถึง 39.48 โดยน้ำหนัก และ ร้อยละของของเหลวที่ได้จากเหง้ามันทำปะหลังจะอยู่ระหว่าง 34.65 ถึง 40.39 โดยน้ำหนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 11 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพาราเมื่อภาวะคงที่ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.355-0.710 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาที่ 45 นาที



รูปที่ 4. 12 ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลังเมื่อภาวะคงที่ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.850-2.000 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และเวลาที่ 45 นาที

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง พบว่าเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งที่ช่วง 60, 120 และ 180 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนมากขึ้นปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวลดลง เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนมีหน้าที่เป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) ที่สามารถพาในสองทิศทางคือแพร่ความร้อนเข้าไหลผ่านเนื้อสารหรือชีวมวล (Heat transfer) และพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางร้อนของชีวมวล (Mass transfer) ไปยังไปยังชุดควบแน่นและควบแน่นกลับมาในรูปผลิตภัณฑ์เหลว เมื่อเปรียบเทียบปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลว คาดได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นการพาความร้อนไหลผ่านชีวมวลเร็วเกินไปทำให้การสลายตัวเชิงความร้อนลดลง หรือเกิดการพาความร้อนที่ใช้สำหรับการสลายตัวออกไปด้วย อีกทั้งการพาสารระเหยที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางร้อนของชีวมวล (Mass transfer) ที่เร็วเกินไป ทำให้ชีวมวลที่ได้รับความร้อนและเกิดการสลายตัวเป็นแก๊สถูกพาออกจากเครื่องปฏิกรณ์และเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนที่ไม่สมบูรณ์ สารระเหยได้จึงไม่สามารถควบแน่นเป็นของเหลวได้ดีพอ ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้มีค่าลดลง

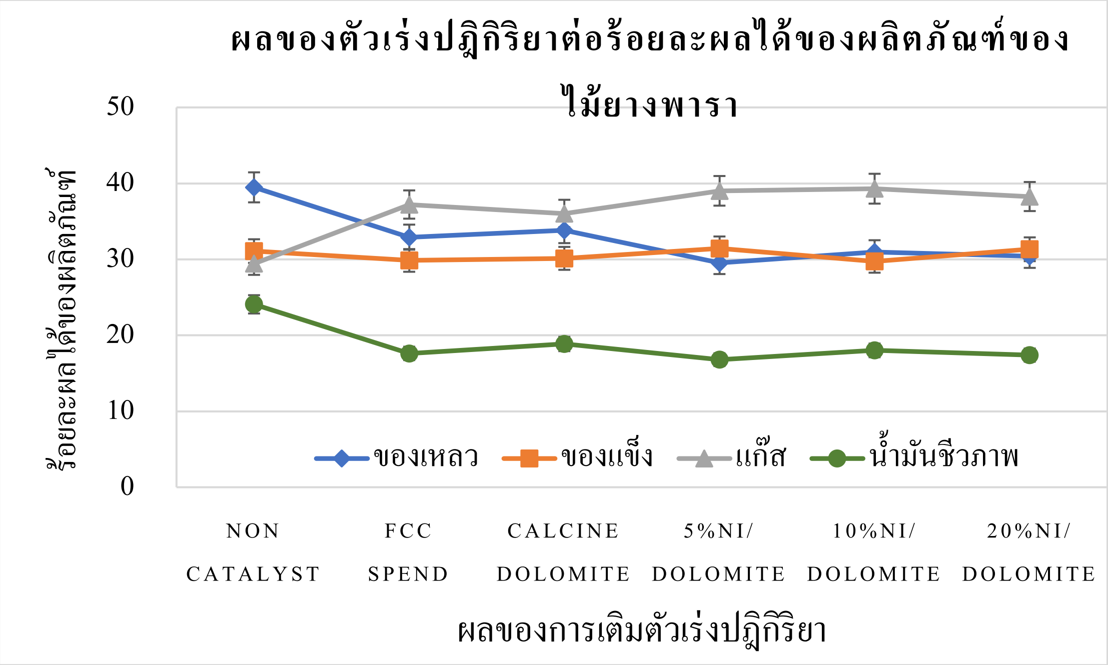
เมื่อเพิ่มอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนขึ้นทำให้เกิดการพาความร้อนและแก๊สเร็วเกินไป เกิดการสลายตัวเชิงความร้อนได้ลดลง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จึงมีค่าลดลง โดยอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้คือ 60 มิลลิลิตรต่อนาทีของทั้งไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

จากการทดลองผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไม้ยางพาราที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร และขนาดเฉลี่ยของเหง้ามันสำปะหลังอยู่ที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที และอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 มิลลิลิตรต่อนาที โดยพบว่าร้อยละของของเหลวที่ได้จากไม้ยางพาราสูงถึง 39.48 โดยน้ำหนัก และร้อยละของของเหลวที่ได้จากเหง้ามันทำปะหลังสูงถึง 40.39 โดยน้ำหนัก

4.3.5 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์, FCC และนิกเกิล/โดโลไมต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดในภาวะที่เหมาะสมของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

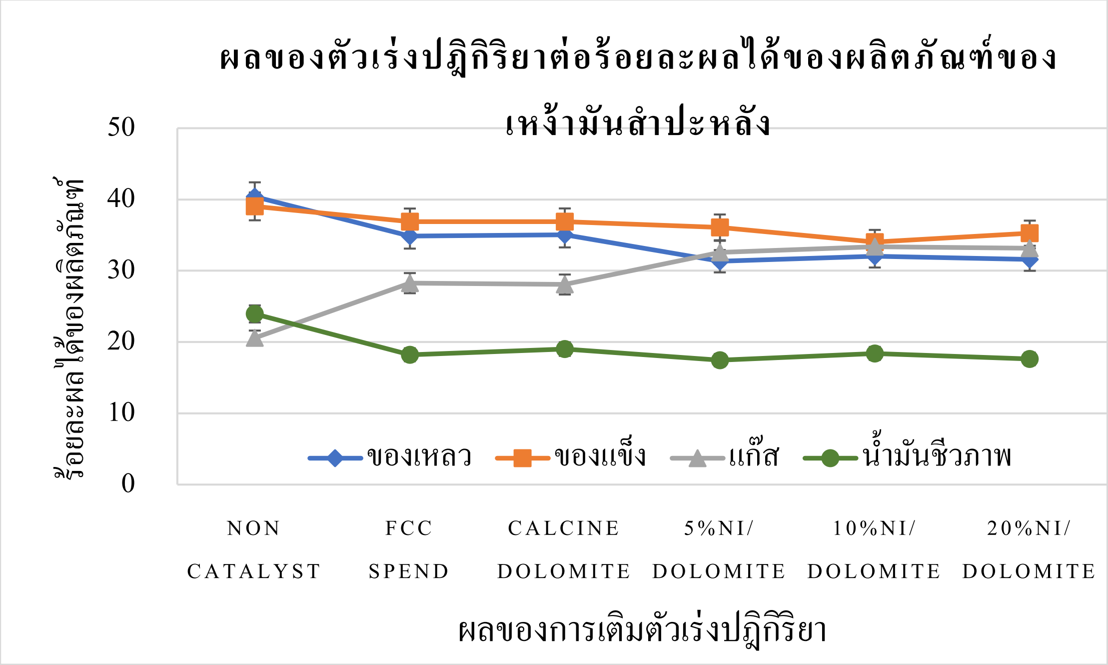
การทดลองแสดงผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิล/โดโลไมต์ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของนิกเกิล โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิดในอัตราร้อยละ 10 ของน้ำหนักชีวมวลที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ยางพาราและ

เหง้ามันสำปะหลัง ในภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไม้ยางพาราที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร และขนาดเฉลี่ยของเหง้ามันสำปะหลังที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที และอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 มิลลิลิตรต่อนาที



รูปที่ 4. 13 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากไม้ยางพาราเมื่อภาวะคงที่ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.355-0.710 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4. 14 ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากเหง้ามันสำปะหลังเมื่อภาวะคงที่ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.850-2.000 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลไนโตรเจนแก๊สที่ 60 มิลลิลิตรต่อนาที และเวลา 45 นาที

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดงผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งโดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิสนี้ถือเป็นปัจจัยส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊ส พบว่าเมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่งปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวลดลง ในขณะที่ปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากโดโลไมต์มีสมบัติช่วยส่งเสริมในการแตกตัว (Cracking) และเปลี่ยนรูปน้ำมันดินที่เกิดขึ้น (Reducing Tar) ทำให้เกิดการแตกตัวที่ดีกลายเป็นแก๊สที่มีขนาดเล็ก ในส่วนของสารระเหยที่เกิดการสลายตัวเชิงความร้อน ทำให้สารระเหยที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่แตกตัวกลายเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งเป็นไอแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นกลับเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้ และออกไปในรูปของผลิตภัณฑ์แก๊ส ดังแสดงในสมการที่ 4.4 ถึง 4.6

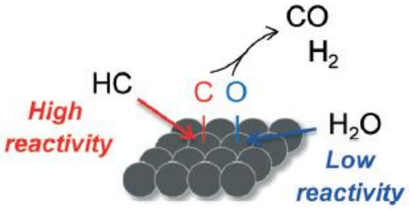
$$NiO + H_2 \longrightarrow Ni^{(0)} + H_2O \qquad (4.4)$$

$$Ni^{(0)} + C_xH_y \longrightarrow NiC_x + H_y \qquad (4.5)$$

ปฏิกิริยารวม;

$$NiC_x + H_y \longrightarrow Ni + CO + H_y \qquad (4.6)$$

อีกทั้งยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบที่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนิเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นหลัก โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนิเซียมออกไซด์ (MgO) ทำหน้าที่ลดหมู่ออกซิเจนที่เกิดจากการไพโรไลซิสผ่านปฏิกิริยาดีออกซิเจนเนตชัน และโลหะแมกนีเซียมนิกเกิลออกไซด์ ($MgNiO_2$) และ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดหมู่ออกซิเจนจากการสลายน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นในองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพ ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4. 15 ภาพจำลองแสดงการเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการไพโรไรซิสดังสมาการ 4.4-4.6 [32]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4. 3 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพารา

ผลิตภัณฑ์	กระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพารา						ไม้ยางพารา[35]
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล /โดโลไมต์	10% นิกเกิล /โดโลไมต์	20% นิกเกิล /โดโลไมต์	
ของเหลว (ร้อยละ)	39.48	32.92	33.83	29.54	30.97	30.4	43.0
ของแข็ง (ร้อยละ)	31.09	29.86	30.13	31.44	29.73	31.33	37±0.011
แก๊ส (ร้อยละ)	29.43	37.22	36.04	39.02	39.30	38.27	20±0.285

หมายเหตุ ; [35] Ayman et al.;

ตารางที่ 4. 4 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง

ผลิตภัณฑ์	กระบวนการไพโรไลซิสของเหง้ามันสำปะหลัง						เหง้ามันสำปะหลัง[36]
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล /โดโลไมต์	10% นิกเกิล /โดโลไมต์	20% นิกเกิล /โดโลไมต์	
ของเหลว (ร้อยละ)	40.39	34.85	35.03	31.34	32.06	31.57	43.04
ของแข็ง (ร้อยละ)	39.03	36.88	36.9	36.09	34.03	35.27	26.10
แก๊ส (ร้อยละ)	20.58	28.27	28.07	32.57	33.37	33.16	30.86

หมายเหตุ ; [36] Kuntheera K.;

ตารางที่ 4.3 และ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไรซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ดังนั้นจากการศึกษาการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในการไพโรไลซิส พบว่าเมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าลดลง ในขณะที่ปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาในภาวะเดียวกัน

4.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนของปริมาณน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เหลว

การศึกษาอัตราส่วนน้ำมันชีวภาพและน้ำในผลิตภัณฑ์ของเหลวของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิล/โดโลไมต์ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของนิกเกิล โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิดในอัตราร้อยละ 10 ของน้ำหนักชีวมวลที่มีผลต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ในภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไม้ยางพาราที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร และขนาดเฉลี่ยของเหง้ามันสำปะหลังที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที และอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 มิลลิลิตรต่อนาที

ตารางที่ 4. 5 ผลอัตราส่วนของปริมาณน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เหลว

ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา	อัตราส่วนของปริมาณน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เหลว (ร้อยละผลได้)					
	ไม้ยางพารา			เหง้ามันสำปะหลัง		
	น้ำมันชีวภาพ	น้ำ	น้ำมันชีวภาพ/น้ำ	น้ำมันชีวภาพ	น้ำ	น้ำมันชีวภาพ/น้ำ
ไม่เติมตัวเร่ง	60.99	39.01	1.56	59.28	40.72	1.46
FCC ใช้แล้ว	53.52	46.48	1.15	52.26	47.74	1.09
แคลไซด์โดโลไมต์	55.75	44.25	1.26	54.26	45.74	1.19
5% นิกเกิล/โดโลไมต์	56.85	43.15	1.32	55.70	44.30	1.26
10% นิกเกิล/โดโลไมต์	58.18	41.82	1.39	56.43	43.57	1.30
20% นิกเกิล/โดโลไมต์	57.22	42.78	1.34	55.87	44.13	1.27

จากตารางที่ 4.5 แสดงอัตราส่วนของปริมาณน้ำมันชีวภาพต่อปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิสที่มีการเติมตัวเร่งร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนที่เป็นน้ำมันชีวภาพ (Organic phase) เป็นส่วนที่มีลักษณะเป็นของเหลว สีน้ำตาลเข้ม มีความหนืด ไม่สามารถ

สามารถละลายน้ำได้ และน้ำ โดยทั้งสองส่วนสามารถแยกจากผลิตภัณฑ์เหลวโดยใช้วิธีการระเหยที่ 105 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราส่วนของน้ำมันชีวภาพและน้ำมีค่าแตกต่างจากอัตราส่วนที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการดูดซับสารที่มีองค์ประกอบออกซิเจนภายในโครงสร้างของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง โดยอะตอมคาร์บอนต่อกับออกซิเจนในโครงสร้างโปรตีนเกิดการหลุดออกจากชีวมวล (Cracking) เป็นหมู่ออกซิเจนที่สามารถเกิดการจัดเรียงรูปแบบใหม่หรือเกิดการควบแน่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงทำให้อัตราส่วนของน้ำมันชีวภาพที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าลดลง มากกว่าการที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา อีกทั้งอะตอมของออกซิเจนที่เหลือจะเกิดการหลุดออกไปพร้อมกับส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเพิ่มขึ้นมาในระบบ ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.5 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพและถ่านชาร์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังนั้น จะศึกษาองค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ตามมาตราฐาน ASTM D5373 ค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D5865 และวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเทคแก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatograph, GC)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5.1 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพเปรียบเทียบกับองค์ประกอบแบบแยกธาตุของชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิส พบว่าในน้ำมันชีวภาพมีปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณองค์ประกอบออกซิเจนและปริมาณองค์ประกอบซัลเฟอร์ลดลง และยังพบว่าค่าความร้อนของทั้งไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณองค์ประกอบออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง พบว่าเมื่อกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาพบองค์ปะกอบออกซิเจนที่สูงกว่ากรณีที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาไปในระบบ

ตารางที่ 4. 6 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไรซิสไม้ยางพารา

วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา						ไม้ยางพารา
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล /โดโลไมต์	10% นิกเกิล /โดโลไมต์	20% นิกเกิล /โดโลไมต์	
คาร์บอน	79.48	80.77	80.38	80.42	80.63	79.83	47.39
ไฮโดรเจน	2.85	3.08	3.06	3.09	2.97	3.02	6.73
ไนโตรเจน	0.35	0.38	0.38	0.38	0.36	0.36	0.3
ซัลเฟอร์	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02
ออกซิเจน*	17.32	15.77	16.18	16.11	16.04	16.79	45.56
H/C (โมลต่อโมล)	0.43	0.46	0.46	0.46	0.44	0.45	1.71
O/C (โมลต่อโมล)	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.72
ค่าความร้อน (แคลอรี่ต่อกรัม)	6829	6939	6850	6943	6905	6917	4102

ตารางที่ 4. 7 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไรซิสเหง้ามันสำปะหลัง

วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง						เหง้ามันสำปะหลัง
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล /โดโลไมต์	10% นิกเกิล /โดโลไมต์	20% นิกเกิล /โดโลไมต์	
คาร์บอน	64.51	65.14	65.62	65.89	66.48	65.65	33.54
ไฮโดรเจน	6.99	7.13	7.24	7.35	7.31	7.32	4.75
ไนโตรเจน	2.11	2.22	2.46	2.66	2.32	2.46	1.13
ซัลเฟอร์	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.07
ออกซิเจน*	26.39	25.51	24.68	24.10	23.89	24.57	60.51
H/C (โมลต่อโมล)	1.30	1.31	1.33	1.34	1.32	1.34	1.70
O/C (โมลต่อโมล)	0.31	0.29	0.28	0.27	0.27	0.28	1.35
ค่าความร้อน (แคลอรี่ต่อกรัม)	6438	6599	6500	6526	6677	6536	2961

จากตารางที่ 4.8 และ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์เปรียบเทียบกับองค์ประกอบแบบแยกธาตุของชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิส พบว่าในน้ำมันชีวภาพมีปริมาณองค์ประกอบของคาร์บอนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณองค์ประกอบออกซิเจนและปริมาณองค์ประกอบซัลเฟอร์ลดลง และยังพบว่าค่าความร้อนของทั้งไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4. 8 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไรซิสไม้ยางพารา

วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา						ไม้ยางพารา
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล/โดโลไมต์	10% นิกเกิล/โดโลไมต์	20% นิกเกิล/โดโลไมต์	
คาร์บอน	60.33	61.92	62.63	60.97	63.49	63.83	47.39
ไฮโดรเจน	6.61	6.47	6.79	6.58	6.71	6.67	6.73
ไนโตรเจน	0.51	0.59	0.73	0.61	0.69	0.71	0.3
ซัลเฟอร์	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.02
ออกซิเจน*	32.55	31.02	29.85	31.84	29.11	28.79	45.56
H/C (โมลต่อโมล)	1.32	1.25	1.30	1.30	1.27	1.26	1.71
O/C (โมลต่อโมล)	0.40	0.38	0.36	0.39	0.34	0.34	0.72
ค่าความร้อน (แคลอรี่ต่อกรัม)	5804	6120	6137	5840	6151	6259	4102

ตารางที่ 4. 9 การวิเคราะห์แบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไรซิสเหง้ามันสำปะหลัง

วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง						เหง้ามันสำปะหลัง
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล/โดโลไมต์	10% นิกเกิล/โดโลไมต์	20% นิกเกิล/โดโลไมต์	
คาร์บอน	68.76	70.17	69.62	70.05	70.46	70.41	33.54
ไฮโดรเจน	3.16	2.86	3.37	2.91	3.11	3.03	4.75
ไนโตรเจน	0.98	0.91	0.96	0.85	1.03	0.99	1.13
ซัลเฟอร์	0.02	< 0.01	0.03	0.02	0.01	< 0.01	0.07
ออกซิเจน*	27.08	26.06	26.02	26.17	25.39	25.57	60.51
H/C (โมลต่อโมล)	0.55	0.49	0.58	0.50	0.53	0.52	1.70
O/C (โมลต่อโมล)	0.30	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	1.35
ค่าความร้อน (แคลอรี่ต่อกรัม)	5967	5904	5965	5953	5969	5884	2961

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ที่เกิดในภาวะที่เหมาะสม

ผลการทดลองแสดงผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์, FCC และนิกเกิล/โดโลไมต์ ร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของนิกเกิล โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิดในอัตราร้อยละ 10 ของน้ำหนักชีวมวลที่มีผลต่อองค์ประกอบแก๊สสังเคราะห์จากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ในภาวะที่เหมาะสมผ่านกระบวนการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์

เบคนิ่ง ที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไม้ยางพาราที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร และขนาดเฉลี่ยของเหง้ามันสำปะหลังที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที และอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 มิลลิลิตรต่อนาทีด้วยเทคแก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatograph, GC)

ตารางที่ 4. 10 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพารา

องค์ประกอบของแก๊ส	กระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพารา (ร้อยละ)					
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล /โดโลไมต์	10% นิกเกิล /โดโลไมต์	20% นิกเกิล /โดโลไมต์
ไฮโดรเจน	0.00	15.20	18.88	22.58	29.05	27.84
คาร์บอนไดออกไซด์	67.02	55.93	49.53	43.48	40.24	42.25
คาร์บอนมอนอกไซด์	12.80	11.38	12.22	13.16	8.08	7.95
มีเทน	17.13	14.46	15.36	17.57	17.94	17.55
อีเทน	1.36	1.23	1.65	1.33	2.01	1.87
เอทีลีน	1.36	1.39	1.90	1.48	2.25	2.13
โพรเพน	0.34	0.40	0.47	0.39	0.42	0.40
โพรพีลีน	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 4. 11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สสังเคราะห์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	กระบวนการไพโรไลซิสของเหง้ามันสำปะหลัง (ร้อยละ)					
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล /โดโลไมต์	10% นิกเกิล /โดโลไมต์	20% นิกเกิล /โดโลไมต์
ไฮโดรเจน	0.00	23.10	26.34	27.68	32.31	28.07
คาร์บอนไดออกไซด์	68.15	52.82	47.50	44.31	41.10	44.58
คาร์บอนมอนอกไซด์	10.79	9.47	7.91	7.87	8.32	8.40
มีเทน	14.08	11.97	14.95	16.95	15.35	15.76
อีเทน	1.95	1.11	1.40	1.31	1.26	1.37
เอทีลีน	1.91	1.09	1.29	1.27	1.21	1.34
โพรเพน	0.87	0.44	0.62	0.61	0.46	0.47
โพรพีลีน	2.23	-	-	-	-	-

จากตารางที่ 4.10 และ 4.11 แสดงองค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังทั้งที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา และมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

มีองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสในกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เกิดขึ้นในระบบและเพิ่มขึ้น เมื่อใช้นิกเกิล/โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ลดลง อีกทั้งยังมีองค์ประกอบแก๊สอื่นๆที่พบ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), แก๊สมีเทน (Methane), อีเทน (Ethane), เอทิลีน (Ethylene), โพนเพน (Propane) และ โพรพีลีน (Propylene) เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณร้อยละผลได้ของแก๊สที่เพิ่มขึ้นจากการไพโรไลซิสทั้งไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ

4.5.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

การวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันชีวภาพ โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปกโทรเมทรี (Gas Chromatography Mass Spectrometry) ของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังที่ได้จากการไพโรไลซิสในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง ซึ่งพบองค์ประกอบหลักๆ คือ ไฮโดรคาร์บอน เช่น แอลเคน และแอลคีน, สารประกอบอะโรมาติก เช่น เบนซีน ฟีนอล แอลกอฮอร์ และอินดีน, สารประกอบไนโตรเจน เช่น เอมีน เอมาย ไนตริล อินโดล และไพริดีน, แอลกอฮอร์ และอื่นๆ โดยเมื่อพิจารณาปริมาณองค์ปะกอบเหล่านี้พบว่า ไฮโดรคาร์บอน สารประกอบออกซิเจน และแอลกอร์ฮอล์มีปริมาณลดลงเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในระบบ ในขณะที่สารประกอบอะโรมาติกเพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกันทั้งในน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ทำให้สรุปได้ว่า ปริมาณไฮโดรคาร์บอนที่ลดลงนั้นนเป็นผลมาจากการตัวเร่งปฏิกิริยาที่เติมลงไปมีส่วนช่วยให้การสลาย (Cracking) ตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบอะโรมาติกพี่เพิ่มขึ้นพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีความสามารถในการเลือกเกิดปฏิกิริยาได้ดีในขณะที่องค์ประกอบออกซิเจนที่ลดลงนั้น พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบที่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนิเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นหลัก โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนิเซียมออกไซด์ (MgO) ทำหน้าที่ลดหมู่ออกซิเจนที่เกิดจากการไพโรไลซิสผ่านปฏิกิริยาดีออกซิเจนเนตชัน และโลหะแมกนีเซียมนิกเกิลออกไซด์ ($MgNiO_2$) และ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดหมู่ออกซิเจนจากการสลายน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นในองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพ ซึ่งผลสอดคล้องกันทั้งน้ำมันชีวภาพที่ได้จากไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ โดยแสดงดังตาราง 4.12 และ 4.13

ตารางที่ 4. 12 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโครมาโตแกรมในน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละองค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพของไม้ยางพารา					
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล/โดโลไมต์	10% นิกเกิล/โดโลไมต์	20% นิกเกิล/โดโลไมต์
ไฮโดรคาร์บอน	**44.32**	**43.13**	**36.17**	**27.43**	**28.51**	**28.76**
- แอลเคน	44.32	43.13	36.17	27.43	28.51	28.76
- แอลคีน	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
- แอลไคน์	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
สารประกอบอะโรมาติก	**17.79**	**20.84**	**20.90**	**21.04**	**22.52**	**20.82**
- เบนซีน	0.00	3.88	2.80	2.42	3.22	3.05
- ฟีนอล	13.31	10.72	10.70	11.86	12.76	12.93
- แอลกอฮอล์	4.47	6.24	7.39	6.76	6.54	4.84
- อินดีน	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
สารประกอบไนโตรเจน	**2.90**	**8.21**	**1.94**	**8.73**	**5.76**	**3.57**
- เอมีน	0.78	6.27	0.00	5.89	0.00	3.57
- เอมาย	1.13	0.00	1.31	1.98	3.85	0.00
- ไนตริล	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	0.00
- อินโดล	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
- ไพริดีน	0.99	1.94	0.63	0.85	1.24	0.00
สารประกอบออกซิเจน	**18.06**	**9.39**	**5.83**	**6.01**	**6.92**	**6.17**
- คีโตน	2.15	2.63	0.00	0.75	0.00	1.38
- เอซิด	15.91	4.69	5.83	5.26	6.92	4.08
- อัลดีไฮด์	0.00	2.06	0.00	0.00	0.00	0.70
แอลกอฮอล์	**12.27**	**0.00**	**8.05**	**6.17**	**9.02**	**4.23**
อื่นๆ	**4.67**	**18.44**	**27.12**	**30.62**	**27.27**	**36.46**
รวม	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4. 13 การวิเคราะห์องค์ประกอบของโครมาโตแกรมในน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	ปริมาณร้อยละองค์ประกอบในน้ำมันชีวภาพของไม้ยางพารา					
	ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	FCC ใช้แล้ว	แคลไซน์โดโลไมต์	5% นิกเกิล /โดโลไมต์	10% นิกเกิล /โดโลไมต์	20% นิกเกิล /โดโลไมต์
ไฮโดรคาร์บอน	**26.76**	**21.68**	**21.55**	**18.01**	**13.66**	**12.09**
- แอลเคน	26.76	21.68	21.55	18.01	13.66	11.89
- แอลคีน	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
- แอลไคน์	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
สารประกอบอะโรมาติก	**29.96**	**31.92**	**32.52**	**33.11**	**34.09**	**31.70**
- เบนซีน	0.00	3.16	0.91	0.30	0.46	0.39
- ฟีนอล	22.42	20.35	22.00	20.96	21.53	20.69
- แอลกอฮอล์	7.53	8.40	8.72	11.85	12.11	10.62
- อินดีน	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00
สารประกอบไนโตรเจน	**8.39**	**5.00**	**0.00**	**1.11**	**7.94**	**9.66**
- เอมีน	8.39	5.00	0.00	0.81	0.13	0.62
- เอมาย	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.96
- ไนตริล	0.00	0.00	0.00	0.00	6.81	5.55
- อินโดล	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
- ไพริดีน	0.00	0.00	0.00	0.30	0.96	0.53
สารประกอบออกซิเจน	**10.09**	**3.28**	**7.17**	**6.29**	**6.16**	**6.14**
- คีโตน	4.98	1.26	4.78	6.16	5.45	3.55
- เอซิด	5.12	2.02	2.39	0.14	0.23	2.59
- อัลดีไฮด์	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49	0.00
แอลกอฮอล์	**13.59**	**1.67**	**6.55**	**5.50**	**4.18**	**3.66**
อื่นๆ	**11.21**	**36.45**	**32.21**	**35.97**	**33.97**	**36.76**
รวม	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกระบวนไพโรไลซิสสำหรับไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิลโดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง สรุปได้ว่าว่ามีการสลายตัวสูงสุดของชีวมวลดังกล่าวในช่วง 400 องศาเซลเซียส โดยสามารถแบ่งการสลายตัวออกเป็น 3 ช่วงใหญ่ ได้แก่ ช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้นภายในชีวมวล ช่วงที่สองเป็นการสลายตัวสารระเหย และช่วงที่สามเป็นการสลายตัวของคาร์บอนหนักของทั้งไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ซึ่งอุณหภูมิที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์อยู่ระหว่างช่วง 400 ถึง 600 องศาเซลเซียส และเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

5.1.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นทางของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

ผลของสมบัติพื้นฐานของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ในส่วนของการวิเคราะห์แบบประมาณประกอบไปด้วยความชื้นร้อยละ 8.34 และ 7.59 โดยน้ำหนักตามลำดับ สารระเหยร้อยละ 72.47 และร้อยละ 53.09 โดยน้ำหนักตามลำดับ ขี้เถ้าร้อยละ 2.52 และร้อยละ 25.93 โดยน้ำหนักตามลำดับ และคาร์บอนคงตัวร้อยละ 16.67 และร้อยละ 13.39 โดยน้ำหนักตามลำดับ และยังพบว่ามีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 47.39 และร้อยละ 33.54 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 6.73 และร้อยละ 4.75 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.3 และร้อยละ 1.13 โดยน้ำหนักตามลำดับปริมาณซัลเฟอร์ร้อยละ 0.02 และร้อยละ 0.07 โดยน้ำหนักตามลำดับ ปริมาณออกซิเจนร้อยละ 45.56 และร้อยละ 60.51 โดยน้ำหนักตามลำดับ และค่าความร้อน 4,102 และ 2,961 แคลอรี่ต่อกรัมของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ

5.1.3 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและหาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

ผลของภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกิกรณ์เบดนิ่ง พบว่าภาวะที่เหมาะสม โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของไม้ยางพาราที่ 0.355-0.710 มิลลิเมตร และขนาดเฉลี่ยของเหง้ามันสำปะหลังที่ 0.850-2.000 มิลลิเมตร โดยมีปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิที่ 500 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 นาที และอัตราการไหลของไนโตรเจนแก๊สที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 60 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งพบว่าร้อยละของของเหลวที่ได้จากไม้ยางพาราสูงถึง 39.48 โดยน้ำหนัก และร้อยละของของเหลวที่ได้จากเหง้ามันทำปะหลังสูงถึง 40.39 โดยน้ำหนัก

5.1.4 ศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม

ผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิล/โดโลไมต์ในการไพโรไรซิส พบว่า น้ำชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสของทั้งไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่มากกว่าในกรณีที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ในขณะที่ผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นในระบบในกรณีที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.5 ศึกษาผลการวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

ผลการวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง พบว่าอัตราส่วนของน้ำมันชีวภาพต่อน้ำของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 60.99 ต่อ 39.01 (น้ำมันชีวภาพ:น้ำ) ของไม้ยางพารา และร้อยละ 59.28 ต่อ 40.72 (น้ำมันชีวภาพ:น้ำ) ของเหง้ามันสำปะหลังและเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาอัตราส่วนของน้ำมันชีวภาพลดลงและเกิดน้ำในระบบมากขึ้น ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังที่พบว่าน้ำมันชีวภาพของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง มีปริมาณคาร์บอนอะตอมที่มากกว่าเมื่อเทียบกับไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง (ชีวมวล) ที่ยังไม่ได้ไพโรไลซิส ส่งผลให้มีค่าความร้อนที่สูงกว่า โดยมีค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ที่ 6,829 และ 6,438 แคลอรี่ต่อกรัม และค่าคามร้อนของถ่านชาร์ที่ 5,804 และ 5,967 แคลอรี่ต่อกรัมของไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.6 ศึกษาผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิส ไม้ยางพาราและเหงมันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีจะถูกทดสอบด้วยเครื่องเครื่องแก๊สโครม าโทรกราฟี ร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์ (Gas Chromatograph Mass Spectrometer, GC-MS)

- การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวภาพที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอะโรมาติก สารประกอบไนโตรเจน สารประกอบออกซิเจน และแอลกอฮอล์ ซึ่งกรณีเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สารประกอบออกซิเจน และแอลกอฮอล์มีปริมาณที่ลดลง ในขณะที่สารประกอบอะโรมาติกมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นในระบบ

- การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยางพารราและเหง้ามันสำปะหลัง ที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่ามีองค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์แก๊ส คือ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และเมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้น ในขณะที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง อีกทั้งยังมีองค์ประกอบแก๊สอื่นๆที่พบ เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO), มีเทน (Methane), อีเทน (Ethane), เอทิลีน (Ethylene), โพนเพน (Propane) และ โพรพีลีน (Propylene)

5.2 ข้อเสนอแนะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความเป็นกรดและมีปริมาณออกซิเจนสูง จึงต้องทำการปรับภาวะค่าความเป็นกรดและลดปริมาณออกซิเจนก่อนนำไปใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง
- น้ำมันชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ ภายหลังกระบวนการไพโรไลซิสจะยังคงค้างอยู่ภายในเครื่องในปริมาณไม่มากนัก ควรมีการชะด้วยอะซิโตนเพื่อทำการเก็บน้ำมันดังกล่าวมาทำการคำนวณเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อน และให้ได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด
- ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ และนิกเกิล/โดโลไมต์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบที่เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนิเซียมออกไซด์ (MgO) เป็นหลัก โดยแคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนิเซียมออกไซด์ (MgO) ทำหน้าที่ลดหมู่ออกซิเจนที่เกิดจากการไพโรไลซิสผ่านปฏิกิริยาดีออกซิเจเนต และโลหะแมกนีเซียมนิกเกิลออกไซด์ ($MgNiO_2$) และ นิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการลดหมู่ออกซิเจนจากการสลายน้ำมันทาร์ที่เกิดขึ้นในองค์ประกอบน้ำมันชีวภาพซึ่งเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้

- จากงานวิจัยข้างต้นสามารถต่อยอดและหาแนวทางที่สามารถขยายไปในเชิงพาณิชย์ได้ เนื่องจากต้นทุนไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลังมีต้นทุนที่ต่ำ มีปริมาณที่ค่อนข้างมาก ในประเทศไทย จึงเหมาะสมที่จะนำไปค้นคว้าเพิ่มเติมและนำไปใช้ประโยชน์ในอนาคตได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์องค์ประกอบของชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา และเหง้ามันสำปะหลัง

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณเป็นการแยกองค์ประกอบอย่างง่าย ด้วยสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ น้ำหรือความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

1.1 การวิเคราะห์ น้ำหรือความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว

วิธีการวิเคราะห์ความชื้นจะใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยมาตรฐาน (Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis: ASTM D7582) ด้วยเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก(Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) รุ่น TGA701 จากบริษัท LECO จำกัด ซึ่งใช้กันปัจจุบันเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ซึ่งสามารถให้ค่าน้ำหรือความชื้น เถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัวออกมาได้ทันที จากการวัดค่าการสูญเสียน้ำหนัก และการสลายตัวของความชื้น สารอินทรย์ และเหลือเฉพาะน้ำหนักของสารอนินทรีย์ที่ไม่สลายเนื่องจากความร้อน

อุปกรณ์

1. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA/DTG) รุ่น TGA701 จากบริษัท LECO จำกัด
2. ถ้วยครูซิเบิล
3. โถดูดความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ทำการเผาครูซิเบิลในเตาเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ใส่ครูซิเบิลลงในเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก พร้อมกับจดวัดน้ำหนักถ้วยครูซิเบิลแล้วบันทึกค่า
3. ใส่ไม้ยางพาราหรือเหง้ามันสำปะหลังในครูซิเบิลลงในเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ประมาณ 1 กรัม พร้อมบันทึกน้ำหนักขณะชั่ง

4. ตั้งค่าอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ไนโตรเจน โดยกำหนดอุณหภูมิสูงสุดที่ 950 องศาเซลเซียส
5. รอผลการวิเคราะห์

สูตรการคำนวณในเครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

Moisture = $((W+W_1)-W_1)/W \times 100$

โดย Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

W_1 คือ น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝาปิด (กรัม)

W_2 คือ น้ำหนักของครูซิเบิลรวมกับน้ำหนักชีวมวลที่เสียไปในช่วง 0-120 องศาเซลเซียส (กรัม)

W คือ น้ำหนักของชีวมวล (กรัม)

Ash = $(W_3xW_4)/W \times 100$

โดย Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

W_3 คือ น้ำหนักของครูซิเบิลรวมกับน้ำหนักเถ้า (กรัม)

W_4 คือ น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝาปิด (กรัม)

W คือ น้ำหนักของชีวมวล (กรัม)

Volatile matter = $(W_5xW_6)/W \times 100$

โดย Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

W_5 คือ น้ำหนักของครูซิเบิลรวมกับน้ำหนักชีวมวลก่อนเผา (กรัม)

W_6 คือ น้ำหนักของครูซิเบิลพร้อมฝาปิดกับน้ำหนักชีวมวลหลังเผา (กรัม)

W คือ น้ำหนักของชีวมวล (กรัม)

Fixed carbon = 100 – Moisture – Ash – Volatile matter

โดย Fixed carbon คือ ร้อยละของปริมาณคาร์บอนคงตัว

Moisture คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น

Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

Volatile matter คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์

วิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ (Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke: ASTM D5373) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ CNH และ S (CHN and S analyzer) จากบริษัท LECO จำกัด ตัวอย่างจะถูกหลอมภายใต้สภาวะบรรยากาศที่มีแก๊สออกซิเจนภายในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction furnace) โดยซัลเฟอร์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO2) และคาร์บอนจะถูกเปลี่ยนให้เป็นสารประกอบคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2) หลังจากขั้นตอนการเผาไหม้ แก๊สจะเดินทางผ่านตัวกรองฝุ่นและดูดความชื้นออก เพื่อทำให้ก๊าซบริสุทธิ์มากขึ้น ในขั้นตอนต่อไปซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะถูกวัดที่ชุดตรวจจับสัญญาณแบบอินฟราเรด (Infrered cells) ในเครื่อง หลังจากการวัดค่าซัลเฟอร์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จะถูกออกซิเดชันเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เปลี่ยนเป็นซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ปริมาณคาร์บอนจะถูกตรวจวัดสัญญาณด้วยเซลล์อินฟราเรด

1.3 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

วิธีการวิเคราะห์ค่าความร้อน (Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke: ASTM D5865) ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Bomb Calorimeter) รุ่น AC500 จากบริษัท LECO จำกัด มีหลักการทำงานโดยใส่ตัวอย่างลงไปในลูกบอมบ์ เพื่อเผา จนตัวอย่างลุกไหม้ให้ความร้อนออกมา ความร้อนจะถ่ายเทให้กับน้ำที่ล้อมรอบลูกบอมบ์ เทอร์โมมิเตอร์อิเล็กโทรนิคจะวัดการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำ และรายงานผลค่า พลังงานความร้อนออกมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2. การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังด้วยด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ก-1 ก-2 ก-3 และ ก-4

ตารางที่ ก- 1 ผลของขนาดของอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
ผลของขนาดของอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา									
0.250-0.355	29.89	28.70	34.29	35.02	35.82	36.28	29.29	34.65	36.05
0.355-0.710	32.29	32.82	30.76	31.82	36.95	35.35	32.56	31.29	36.15
0.710-0.850	29.58	30.51	33.44	32.38	36.98	37.11	30.05	32.91	37.04
0.850-2.000	27.13	29.52	36.30	32.05	36.57	38.43	28.32	34.18	37.50
ผลของขนาดของอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง									
0.250-0.355	26.85	27.65	31.91	28.58	41.24	43.77	27.25	30.25	42.50
0.355-0.710	27.50	28.36	30.76	29.56	41.74	42.08	27.93	30.16	41.91
0.710-0.850	28.05	29.18	29.98	31.18	41.97	39.64	28.61	30.58	40.81
0.850-2.000	30.14	30.67	29.81	29.21	40.05	40.12	30.41	29.51	40.09

ตารางที่ ก- 2 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา									
400	32.29	32.82	30.76	31.82	36.95	35.35	32.56	31.29	36.15
500	39.08	39.88	28.83	30.03	32.09	30.09	39.48	29.43	31.09
600	36.24	34.24	34.91	39.64	28.85	26.12	35.24	37.28	27.48
ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง									
400	30.14	30.67	29.81	29.21	40.05	40.12	30.41	29.51	40.09
500	39.06	41.73	22.69	18.47	38.26	39.80	40.39	20.58	39.03
600	35.48	34.02	29.37	31.23	35.15	34.75	34.75	30.30	34.95

ตารางที่ ก- 3 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

เวลา(นาที)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา									
45	39.08	39.88	28.83	30.03	32.09	30.09	39.48	29.43	31.09
60	35.15	36.88	34.69	33.29	30.16	29.83	32.86	37.68	29.46
90	32.98	34.71	37.77	37.51	29.25	27.78	31.90	38.96	29.14
ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง									
45	39.06	41.73	22.69	18.47	39.06	39.80	40.39	20.58	39.03
60	40.41	42.74	27.50	23.77	40.41	38.28	41.58	21.67	36.75
90	41.04	43.70	28.65	28.98	41.04	35.91	42.37	22.42	35.21

ตารางที่ ก- 4 ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (มิลลิลิตรต่อนาที)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา									
60	39.08	39.88	28.83	30.03	32.09	30.09	39.48	29.43	31.09
120	32.82	32.89	37.08	38.28	30.09	28.83	32.86	37.68	29.46
180	31.11	32.69	40.71	37.22	28.18	30.09	31.90	38.96	29.14
ผลของอัตราการไหลแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง									
60	39.06	41.73	22.69	18.47	38.26	39.80	40.39	20.58	39.03
120	36.37	34.38	28.72	29.59	34.91	36.04	35.37	29.16	35.47
180	34.02	35.28	30.90	30.30	35.08	34.42	34.65	30.60	34.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3. การศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิล/โดโลไมต์ ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในภาวะที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา **FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิล/โดโลไมต์** สำหรับกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังด้วยเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข- 1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังในเครื่องปฏิกรณ์เบดนิ่ง

ตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อชีวมวล)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสไม้ยางพารา									
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	39.08	39.88	28.83	30.03	32.09	30.09	39.48	29.43	31.09
FCC ใช้แล้ว	33.16	32.69	38.02	36.42	28.83	30.89	32.92	37.22	29.86
แคลไซน์ โดโลไมต์	33.40	34.27	37.07	35.00	29.53	30.73	33.83	36.03	30.13
5% นิกเกิล/โดโลไมต์	28.08	31.00	40.32	37.72	31.60	31.27	29.54	39.02	31.44
10% นิกเกิล/โดโลไมต์	30.53	31.40	39.73	38.87	29.73	29.73	30.97	39.30	29.73
20% นิกเกิล/โดโลไมต์	29.13	31.67	39.67	36.87	31.20	31.47	30.40	38.27	31.33
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลัง									
ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	39.06	41.73	22.69	18.47	38.26	39.80	40.39	20.58	39.03
FCC ใช้แล้ว	34.82	34.89	27.43	29.09	37.75	36.02	34.85	28.26	36.88
แคลไซน์ โดโลไมต์	35.27	34.80	28.13	28.00	36.60	37.20	35.03	28.07	36.90
5% นิกเกิล/โดโลไมต์	30.94	31.74	32.93	32.20	36.13	36.06	31.34	32.57	36.09
10% นิกเกิล/โดโลไมต์	31.93	33.27	33.60	33.13	34.47	33.60	32.60	33.37	34.03
20% นิกเกิล/โดโลไมต์	30.87	32.27	34.40	31.93	34.73	35.80	31.57	33.17	35.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4. การวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลังด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์

4.1 แก๊สโครมาโทรกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทรกราฟีเป็นเทคนิควิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสาร ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถแยกสารตัวอย่างที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนและหลากหลายได้ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วและแม่นยำต่อการวิเคราะห์สูง โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทรกราฟี สามารถแบ่งเป็น 2 วิธีการ คือ การใช้เฟสอยู่กับที่ที่เป็นของแข็ง เรียกว่า "gas-solid chromatography" (GSC) และการใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของเหลว เรียกว่า " gas-liquid chromatography" (GLC) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีเฟสเคลื่อนที่ที่เป็นแก๊ส นอกจากนี้แก๊สโครมาโทรกราฟีใช้ได้กับสารที่สามารถเกิดการระเหยกลายเป็นไอได้ ณ อุณหภูมิของคอลัมน์เท่านั้น จึงทำให้แก๊สโครมาโทรกราฟีเป็นเทคนิคที่ใช้แยกสารประกอบทางเคมีหรือสารประกอบอินทรีย์เท่านั้น และแก๊สโครมาโทรกราฟีสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณโดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. แก๊สที่ใช้งานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ มี 3 ชนิด คือ

    1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สตัวพา (Carrier Gases) เพื่อจะใช้พาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์

    1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)

    1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. ตัวระบายแก๊ส (Gas Traps) และฟิลเตอร์ (Filters) เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็นแบบปลอกกระสุน (Cartridge) คือ

    2.1 ตัวระบายคัดขนาดโมเลกุล (Molecular Sieve Trap) ใช้ดูดความชื้น

    2.2 ตัวระบายออกซิเจน (Oxygen Trap) เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน

    2.3 ฟิลเตอร์ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon Filter) ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมันสำหรับแก๊สตัวพาควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter

3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา

4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ

5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร

เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มิลลิเมตร อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการแยกสารสเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพนอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดรูเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้

5.1 คอลัมน์ของเฟสหยุดนิ่ง Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลว เคลือบเป็นฟิล์ม บางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร

5.2 คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับหรือเมทริกซ์ บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร

5.3 คอมลัมน์ขนาดเล็ก (Micropacked Column) คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร

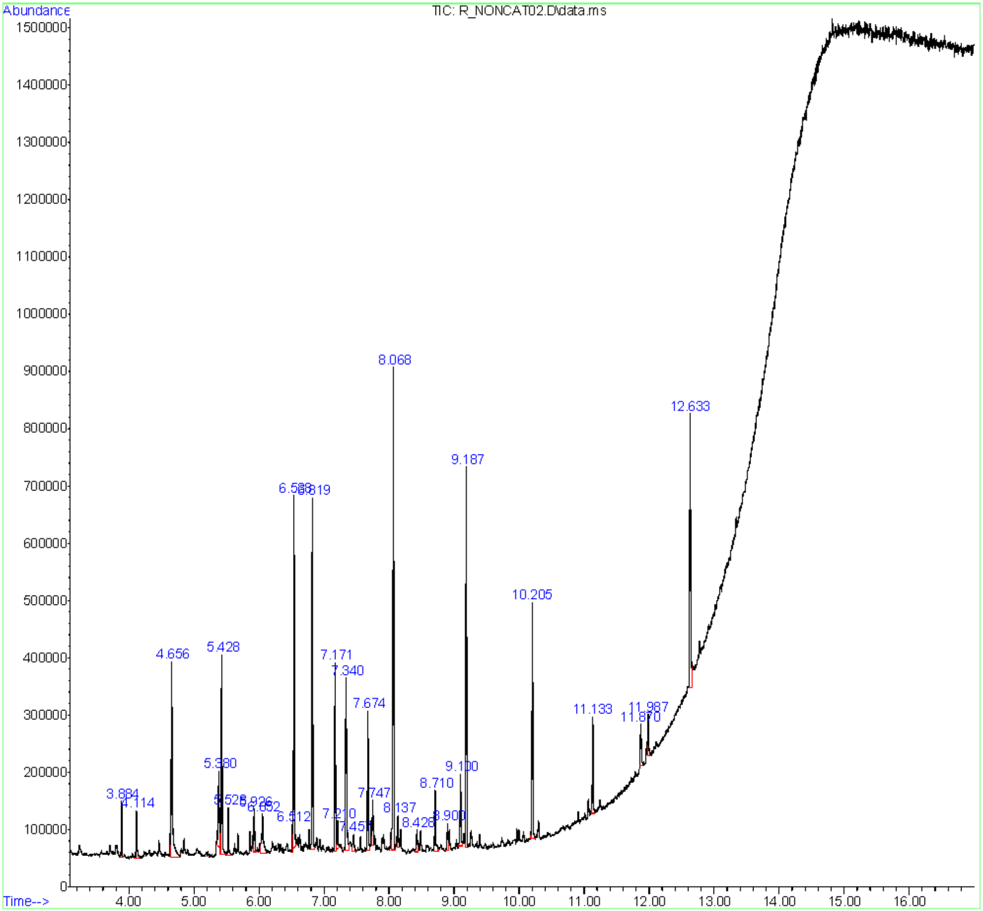
6. ตัวตรวจวัดเอฟไอดี Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมีขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นตัวตรวจวัดชนิด FID นี้เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด

4.2 แก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์ (Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS)

แก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์ เป็นเครื่องมีที่มีการต่อเครื่องแมสสเปคโทรมิเตอร์ร่วมด้วย เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยให้ผลเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แม่นยำกว่าแก๊สโครมาโทรกราฟี ซึ่งในแมสสเปคโทรมิเตอร์จะมีฐานข้อมูล (Library) เพื่อความถูกต้องโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารมาตราฐานเข้ามเปรียบเทียบ ถือเป็นข้อดีของเทคนิค โดยหลักการทำงานจะแบ่งเป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนของแก๊สโครมาโทรกราฟีทำหน้าที่แยกองค์ประกอบของสารผสม โดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนของสารแต่ละชนิดบนเฟสคงที่ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่เดียวกัน ส่วนของแมสสเปคโทรมิเตอร์จะได้รับสารประกอบเชิงเดี่ยวจากส่วนของแก๊สโครมาโทรกราฟี และทำการกระตุ้นทำให้เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปของประจุเรียกว่า ไอออนโมเลกุลลาร์ (Molecular ion: M+ or M-)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราและเหง้ามันสำปะหลัง ทั้งที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC, โดโลไมต์ และนิกเกิลโดโลไมต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของชีวมวล ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟีร่วมกับแมสสเปคโทรมิเตอร์ จะแสดงผลการทดลองดังตารางที่ ค-1 ถึง ค-6 สำหรับไม้ยางพารา และตารางที่ ค-7 ถึง ค-12 สำหรับเหง้ามันสำปะหลัง



รูปที่ ค- 1 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูป ค-1 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 44.32, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 17.79, สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 2.90, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 18.06, แอลกอฮอล์ร้อยละ 12.27 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 4.67 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

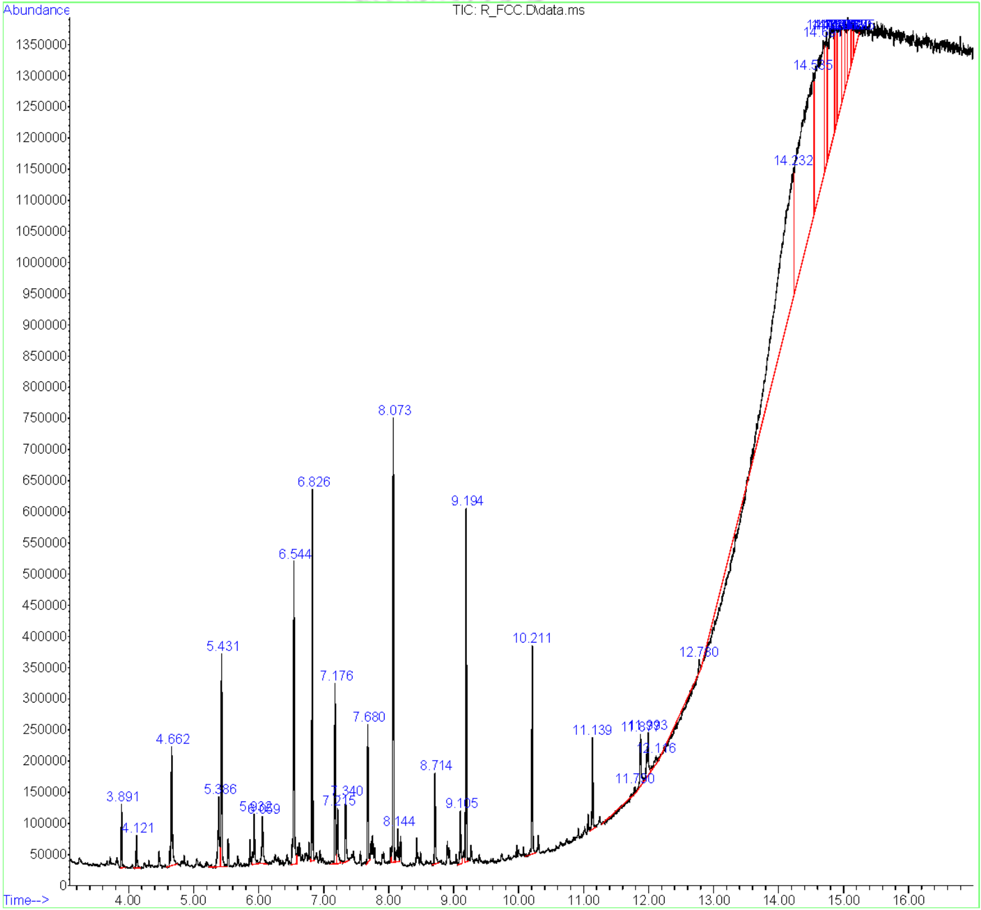
ตารางที่ ค- 1 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.884	1.26	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)
2	4.114	1.33	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	Oxygenic (Ketone)

3	4.656	6.6	Cyclobutanol	(Alcohol)
4	5.380	2.55	Catechol	Aromatic (Alcohol)
5	5.428	5.36	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
6	5.528	1.27	1-.beta.-d-Ribofuranosyl-1,2,4-triazole-3-carboxylic acid	Oxygenic (Acids)
7	5.926	1.19	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
8	6.052	1.93	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy	Aromatic (Phenol)
9	6.512	0.69	Benzenemethanol, 2-(2-aminopropoxy)-3-methyl-	Aromatic (Alcohol)
10	6.538	7.24	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
11	6.819	8.46	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
12	7.171	4.49	Benzoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy-	Oxygenic (Acids)
13	7.210	0.78	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
14	7.340	5.55	D-Allose	(Alcohol)
15	7.457	0.77	1-Methyl-2-phenoxyethylamine	Nitrogenous (Amines)
16	7.674	3.37	Hydroquinone mono-trimethylsilyl ether	Other
17	7.747	1.12	N-Methoxy-1-ribofuranosyl-4-imidazolecarboxylic amide	Nitrogenous (Amide)
18	8.068	11.61	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
19	8.137	0.78	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
20	8.428	0.68	2-Amino-1-(o-hydroxyphenyl)propane	Aromatic (Phenol)
21	8.710	1.77	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
22	8.900	0.8	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	Oxygenic (Ketone)
23	9.100	1.99	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
24	9.187	9.1	Octadecane	Hydrocarbons

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

				(Alkanes)
25	10.205	5.49	Heptadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
26	11.133	2.6	Nonadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
27	11.870	1.25	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
28	11.987	0.98	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	Nitrogenous (Pyridines)
29	12.633	8	Bis(2-ethylhexyl) phthalate	Oxygenic (Acids)



รูปที่ ค- 2 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา FCC

จากรูป ค-2 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 43.13, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 20.84, สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 8.21,

สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 9.39, และสารอื่น ๆ ร้อยละ 18.44 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-2

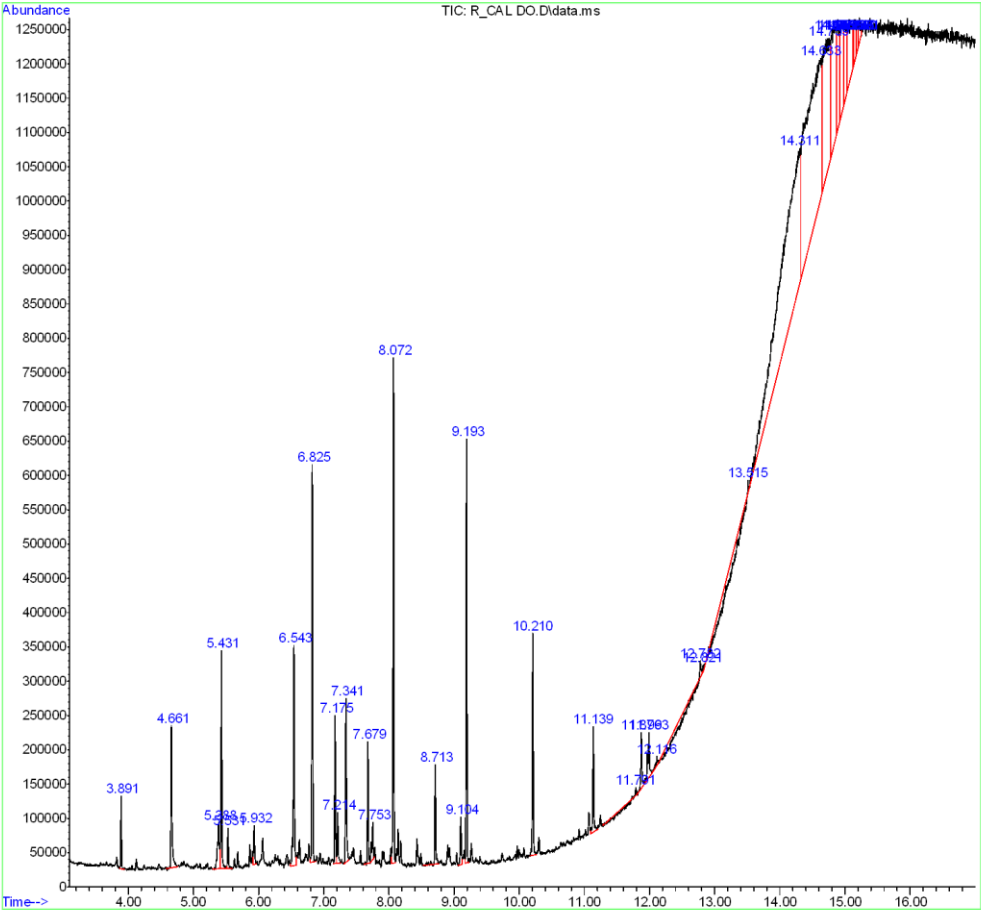
ตารางที่ ค- 2 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.893	0.48	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)
2	4.119	0.32	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	Oxygenic (Ketone)
3	4.661	1.4	1,3-Propanediamine, N-methyl-	Nitrogenous (Amines)
4	5.385	0.94	Catechol	Aromatic (Alcohol)
5	5.432	1.92	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
6	5.931	0.61	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Benzenes)
7	6.061	0.67	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	Aromatic (Benzenes)
8	6.542	1.78	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
9	6.824	2.79	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
10	7.175	1.55	Dehydroacetic Acid	Oxygenic (Acids)
11	7.214	0.56	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
12	7.340	0.68	1,2-Ethanediol, diformate	Oxygenic (Aldehyde)
13	7.682	1.12	5-tert-Butylpyrogallol	Aromatic (Alcohol)
14	8.072	3.62	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
15	8.146	0.36	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
16	8.714	0.84	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
17	9.104	0.55	1-Butanone, 1-(2,4,6-trihydroxy-3-methylphenyl)-	Oxygenic (Ketone)
18	9.195	2.87	Octadecane	Hydrocarbons

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

				(Alkanes)
19	10.210	1.74	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
20	11.137	0.82	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
21	11.792	0.2	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
22	11.879	0.64	2-Ethylacridine	Nitrogenous (Pyridines)
23	11.992	0.67	1,2,4-Triazol-3-amine, 5-(1,3,5-trimethyl-4-pyrazolyl)amino-	Nitrogenous (Amines)
24	12.117	0.24	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
25	12.781	0.81	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
26	14.233	0.32	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
27	14.536	0.21	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Other
28	14.692	0.62	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Other
29	14.740	2.9	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
30	14.818	0.79	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ค- 3 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์

จากรูป ค-3 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 36.17, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 20.90, สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 1.94, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 5.83, แอลกอฮอล์ร้อยละ 8.05 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 27.12 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-3

ตารางที่ ค- 3 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์

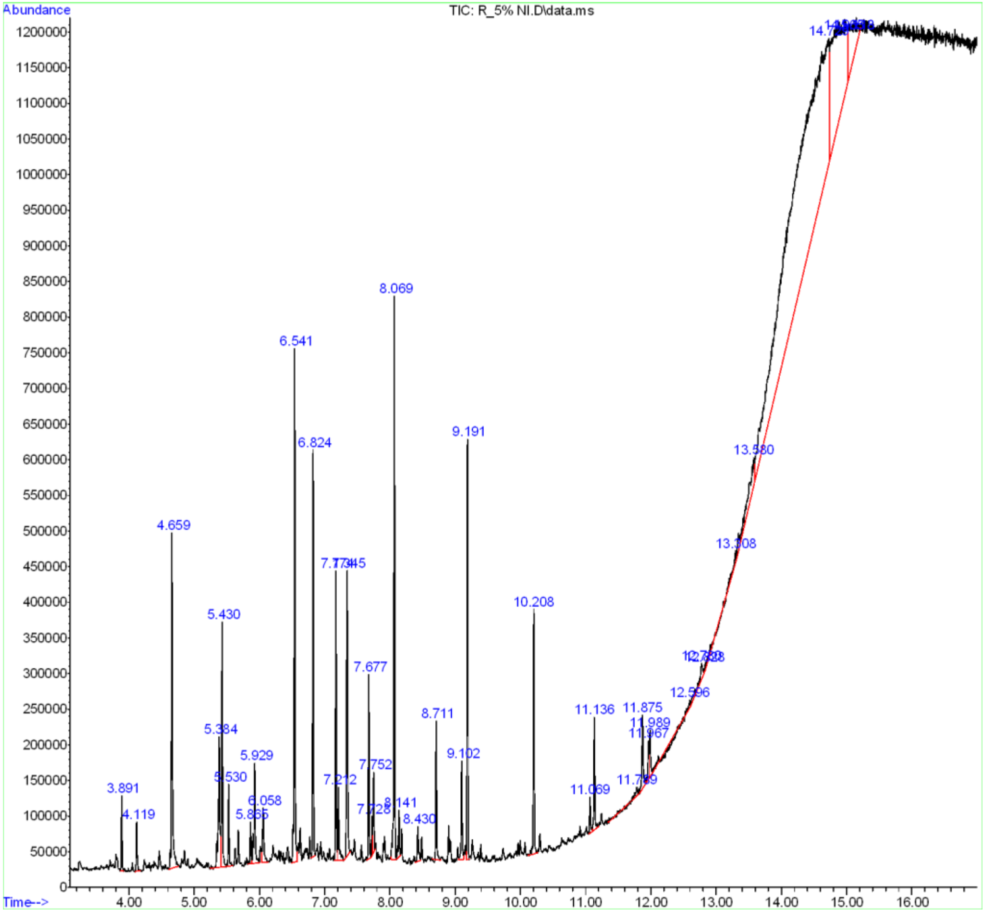
ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.889	0.5	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)

2	4.661	1.48	Cyclobutanol	(Alcohol)
3	5.389	0.82	Catechol	Aromatic (Alcohol)
4	5.432	1.74	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
5	5.532	0.37	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
6	5.931	1.38	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
7	6.542	2.17	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
8	6.824	3.11	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
9	7.175	1.2	4-Methoxy-2-methyl-1-(methylthio)benzene	Aromatic (Benzenes)
10	7.214	1.49	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	Aromatic (Phenol)
11	7.340	1.6	D-Allose	(Alcohol)
12	7.678	0.97	5-tert-Butylpyrogallol	Aromatic (Alcohol)
13	7.752	0.44	Urea, butyl-	Other
14	8.073	4.06	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
15	8.714	0.93	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
16	9.104	2.5	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
17	9.191	3.22	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
18	10.210	1.88	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
19	11.138	1	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
20	11.792	0.27	2-Ethylacridine	Nitrogenous (Pyridines)
21	11.875	0.56	8-Methyl-6-nonenamide	Nitrogenous (Amide)
22	11.992	0.67	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

23	12.117	0.11	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
24	12.781	1.31	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
25	12.820	0.05	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
26	13.513	2.86	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
27	14.311	0.23	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
28	14.632	0.23	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
29	14.758	0.62	1-Dimethyl(phenyl)silyloxypentane	Other
30	14.844	0.65	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
31	14.892	0.47	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
32	14.970	0.72	Arsenous acid, tris(trimethylsilyl) ester	Other
33	14.992	0.88	Cyclotrisiloxane, hexamethyl	Other
34	15.061	0.55	Cyclotrisiloxane, hexamethyl	Other
35	15.126	0.39	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
36	15.148	0.65	Cyclotrisiloxane, hexamethyl	Other
37	15.178	0.44	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
38	15.221	0.36	4-Methyl-2-trimethylsilyloxy-acetophenone	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ ค- 4 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์

จากรูป ค-4 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์ ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 27.43, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 21.04, สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 8.73, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 6.01, แอลกอฮอล์ร้อยละ 6.17 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 30.62 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-4

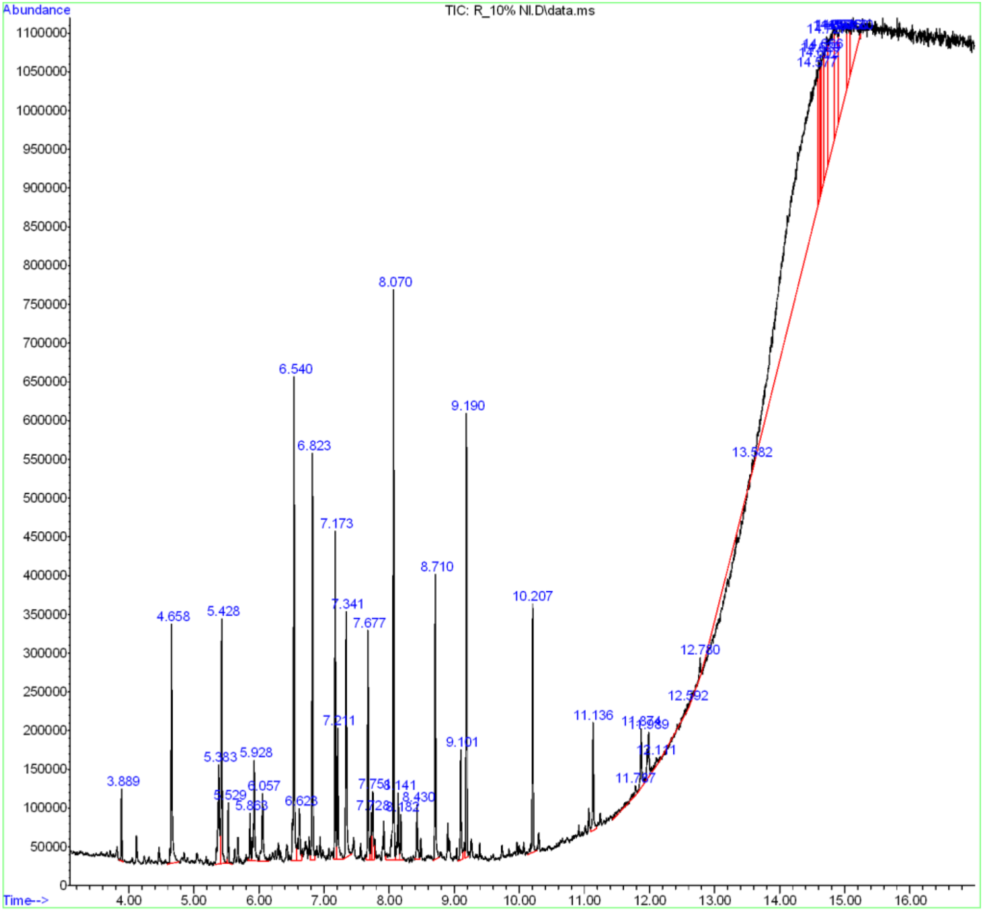
ตารางที่ ค- 4 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.889	0.43	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)

2	4.119	0.38	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	Oxygenic (Ketone)
3	4.660	2.76	1,3-Propanediamine, N-methyl-	Nitrogenous (Amines)
4	5.384	1.5	Catechol	Aromatic (Alcohol)
5	5.428	1.77	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
6	5.528	0.55	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
7	5.866	0.31	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	Aromatic (Alcohol)
8	5.931	1.01	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
9	6.056	0.59	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	Aromatic (Alcohol)
10	6.542	3.68	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
11	6.824	2.6	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
12	7.175	1.87	3-Hydroxy-4-methoxybenzoic acid	Oxygenic (Acids)
13	7.214	0.64	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
14	7.344	2.56	D-Allose	(Alcohol)
15	7.678	1.22	4-Ethylbiphenyl	Aromatic (Benzenes)
16	7.730	0.21	(+)-s-2-Phenethanamine, 1-methyl-N-vanillyl-	Nitrogenous (Amines)
17	7.752	0.54	N-Acetyl-d-serine	Other
18	8.068	3.75	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
19	8.142	0.4	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
20	8.428	0.33	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
21	8.710	0.93	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
22	9.100	0.78	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
23	9.191	2.75	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
24	10.210	1.69	Eicosane	Hydrocarbons

				(Alkanes)
25	11.068	0.26	Octadecanamide	Nitrogenous (Amide)
26	11.137	0.84	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
27	11.788	0.13	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	Nitrogenous (Pyridines)
28	11.874	0.74	9-Octadecenamide, (Z)-	Nitrogenous (Amide)
29	11.965	0.3	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	Nitrogenous (Pyridines)
30	11.987	0.39	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
31	12.594	0.21	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
32	12.781	0.41	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
33	12.828	0.03	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
34	13.309	0.26	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Other
35	13.578	1.52	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
36	14.727	8.97	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
37	14.965	0.81	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
38	15.117	2.3	Arsenous acid, tris(trimethylsilyl) ester	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ ค- 5 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์

จากรูป ค-5 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์ ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 28.51, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 22.52, สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 5.76, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 6.92, แอลกอฮอล์ร้อยละ 9.02 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 27.27 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-5

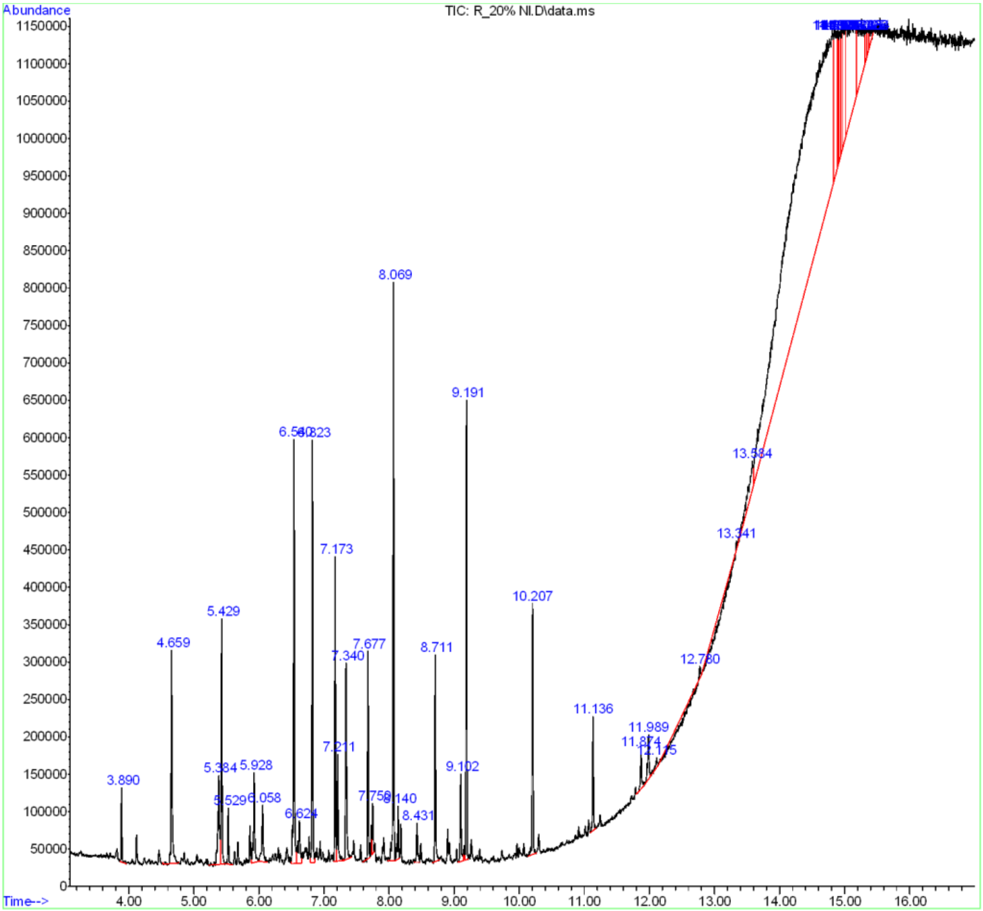
ตารางที่ ค- 5 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.889	0.43	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)

2	4.656	2.07	Cyclobutanol	(Alcohol)
3	5.385	1.25	Catechol	Aromatic (Alcohol)
4	5.428	1.86	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
5	5.528	0.41	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
6	5.861	0.32	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	Aromatic (Alcohol)
7	5.926	1.03	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
8	6.056	0.83	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	Aromatic (Alcohol)
9	6.542	3.78	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
10	6.624	0.69	Phenol, 3,4-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
11	6.824	2.89	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
12	7.171	2.17	Benzoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy	Oxygenic (Acids)
13	7.210	1.1	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
14	7.340	2.25	3,4-Altrosan	(Alcohol)
15	7.678	1.69	1,1'-Biphenyl, 2-ethyl-	Aromatic (Benzenes)
16	7.730	0.33	4-Amino-2,3-xylenol	Other
17	7.752	0.59	Ethanimidic acid, ethyl ester	Oxygenic (Acids)
18	8.068	4.1	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
19	8.142	0.65	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
20	8.181	0.35	Benzenepropanenitrile, .beta.-phenyl-	Nitrogenous (Nitriles)
21	8.432	0.47	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
22	8.710	2.02	N-(4-Methoxyphenyl)-2-hydroxyimino-acetamide	Nitrogenous (Amide)
23	9.100	0.87	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
24	9.191	2.96	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

25	10.205	1.8	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
26	11.137	0.91	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
27	11.788	0.38	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
28	11.874	0.65	2-Ethylacridine	Nitrogenous (Pyridines)
29	11.987	0.67	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
30	12.113	0.15	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
31	12.594	0	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
32	12.781	0.28	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
33	13.583	0.7	1-Dimethyl(phenyl)silyloxypentane	Other
34	14.575	0.7	Trimethyl[4-(2-methyl-4-oxo-2-pentyl)phenoxy]silane	Other
35	14.601	1.61	Methyltris(trimethylsiloxy)silane	Other
36	14.627	1.72	Arsenous acid, tris(trimethylsilyl) ester	Other
37	14.666	1.95	1,4-Bis(trimethylsilyl)benzene	Other
38	14.727	0.54	Trimethyl[4-(2-methyl-4-oxo-2-pentyl)phenoxy]silane	Other
39	14.827	0.5	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
40	14.853	0.64	Methyltris(trimethylsiloxy)silane	Other
41	14.944	0.83	Trimethyl[4-(2-methyl-4-oxo-2-pentyl)phenoxy]silane	Other
42	15.048	1.14	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
43	15.130	2.16	1,4-Bis(trimethylsilyl)benzene	Other



รูปที่ ค- 6 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 20 % นิกเกิล/โดโลไมต์

จากรูป ค-6 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์ ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 28.76, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 20.82, สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 3.57, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 6.17, แอลกอฮอล์ร้อยละ 4.23 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 36.46 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-6

ตารางที่ ค- 6 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสไม้ยางพาราที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์

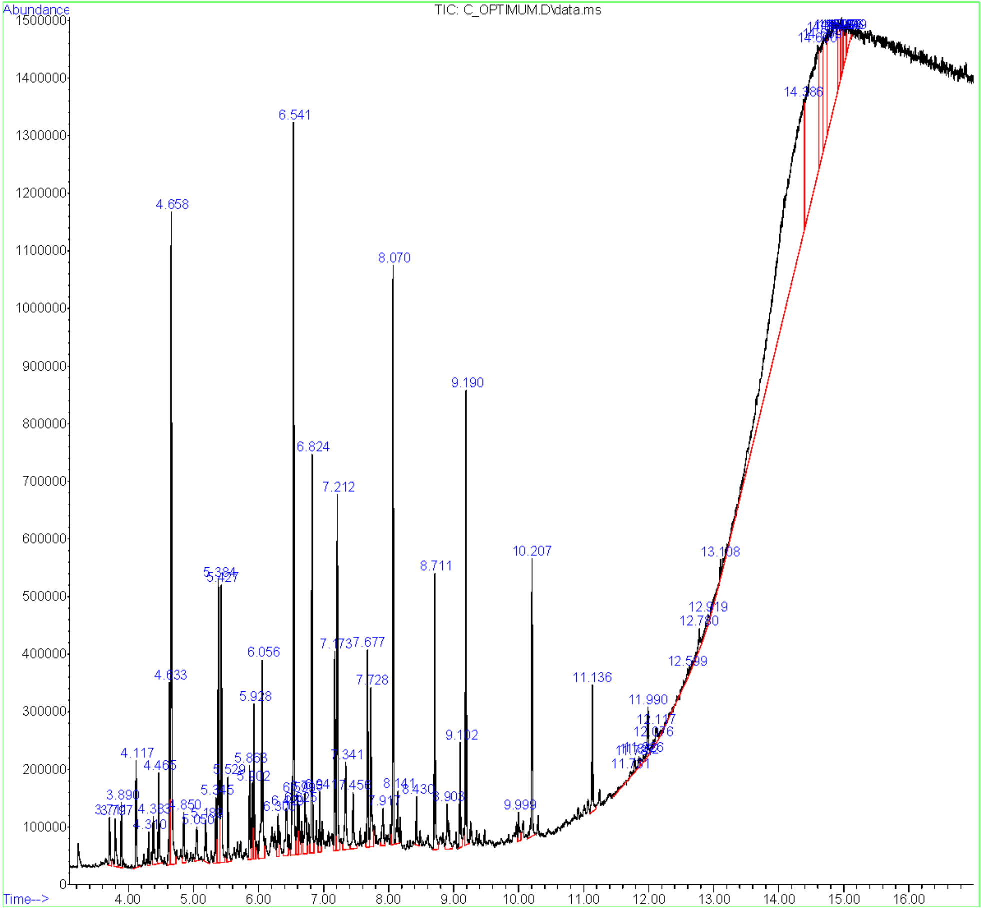
ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.889	0.39	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)

2	4.660	1.52	2-Propanamine	Nitrogenous (Amines)
3	5.384	0.93	Catechol	Aromatic (Alcohol)
4	5.428	1.46	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
5	5.527	0.32	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
6	5.926	0.74	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Benzenes)
7	6.056	0.56	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	Aromatic (Benzenes)
8	6.542	2.37	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
9	6.624	0.54	Phenol, 3,4-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
10	6.824	2.4	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
11	7.171	0.58	Benzoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy	Oxygenic (Acids)
12	7.210	0.7	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	Aromatic (Phenol)
13	7.340	1.48	D-Allose	(Alcohol)
14	7.678	1.13	5-tert-Butylpyrogallol	Aromatic (Alcohol)
15	7.752	0.3	d-Glycero-d-ido-heptose	Oxygenic (Aldehyde)
16	8.068	3.29	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
17	8.142	0.39	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
18	8.432	0.32	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
19	8.710	1.19	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
20	9.100	0.59	1-Butanone, 1-(2,4,6-trihydroxy-3-methylphenyl)-	Oxygenic (Ketone)
21	9.191	2.51	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
22	10.205	1.51	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
23	11.137	0.69	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

24	11.874	0.31	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
25	11.987	0.4	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
26	12.113	0.12	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
27	12.780	0.8	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
28	13.340	1.16	2-(Acetoxymethyl)-3-(methoxycarbonyl)biphenylene	Oxygenic (Acids)
29	13.583	0.97	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
30	14.814	0.38	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
31	14.844	2.98	Arsenous acid, tris(trimethylsilyl) ester	Other
32	14.900	1.32	Trimethyl[4-(2-methyl-4-oxo-2-pentyl)phenoxy]silane	Other
33	14.926	1.18	Trimethyl[4-(2-methyl-4-oxo-2-pentyl)phenoxy]silane	Other
34	14.957	1.15	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
35	14.978	2.12	1,1,1,3,5,5,5-Heptamethyltrisiloxane	Other
36	15.143	0.56	1,2-Bis(trimethylsilyl)benzene	Other
37	15.265	2.36	Trimethyl[4-(1-methyl-1-methoxyethyl)phenoxy]silane	Other
38	15.325	0.35	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
39	15.364	0.31	Trimethyl[4-(2-methyl-4-oxo-2-pentyl)phenoxy]silane	Other
40	15.386	0.22	Trimethyl[4-(2-methyl-4-oxo-2-pentyl)phenoxy]silane	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ ค- 7 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูป ค-7 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบ ไฮโดรคาร์บอน ร้อยละ 26.76, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 29.96 , สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 8.39, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 10.09, แอลกอฮอล์ร้อยละ 13.59 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 11.21 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค- 7 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.711	0.3	Phenol	Aromatic (Phenol)
2	3.798	0.4	Cyclopentanol	(Alcohol)
3	3.889	0.34	Decane	Hydrocarbons

				(Alkanes)
4	4.118	0.64	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	Oxygenic (Ketone)
5	4.309	0.19	Phenol, 2-methyl-	Aromatic (Phenol)
6	4.383	0.42	Butanoic acid, 2-butoxy-1-methyl-2-oxoethyl ester	Oxygenic (Acids)
7	4.465	0.67	Phenol, 3-methyl-	Aromatic (Phenol)
8	4.634	1.09	Phenol, 2-methoxy-	Aromatic (Phenol)
9	4.656	4.2	1,3-Propanediamine, N-methyl-	Nitrogenous (Amines)
10	4.851	0.37	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	Oxygenic (Ketone)
11	5.051	0.35	Phenol, 2,5-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
12	5.189	0.37	Phenol, 3,4-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
13	5.345	0.48	5-Hydroxymethyldihydrofuran-2-one	Oxygenic (Ketone)
14	5.384	0.2	Catechol	Aromatic (Alcohol)
15	5.428	2.11	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
16	5.527	5.5	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
17	5.861	0.59	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	Aromatic (Alcohol)
18	5.905	0.46	Hydroquinone	Oxygenic (Ketone)
19	5.926	0.58	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
20	6.056	1.97	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy	Aromatic (Phenol)
21	6.299	0.35	2-Methoxy-4-vinylphenol	Aromatic (Phenol)
22	6.429	0.06	Benzaldehyde, 2-fluoro	Other
23	6.542	0.55	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
24	6.598	0.44	Phenol, 2-methoxy-3-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
25	6.624	0.41	Phenol, 3,4-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
26	6.715	0.71	1,3-Benzenediol, 4-ethyl-	Aromatic (Alcohol)
27	6.824	2.45	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)

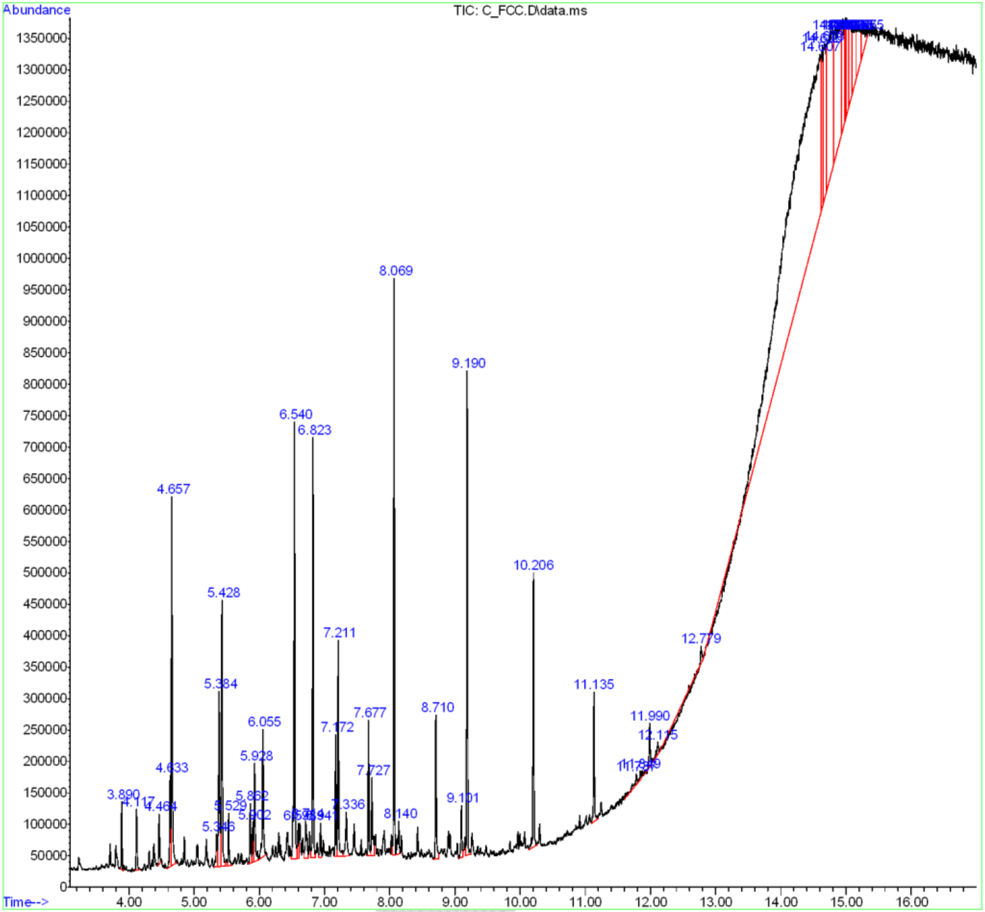
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

28	6.941	0.43	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
29	7.175	1.15	3-Hydroxy-4-methoxybenzoic acid	Oxygenic (Acids)
30	7.214	1.06	trans-Isoeugenol	Aromatic (Phenol)
31	7.340	0.9	.beta.-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro-	(Alcohol)
32	7.457	0.54	Apocynin	Oxygenic (Ketone)
33	7.678	0.62	5-tert-Butylpyrogallol	Aromatic (Alcohol)
34	7.730	1.07	Homovanillyl alcohol	Aromatic (Alcohol)
35	7.916	0.39	2,3,5,6-Tetrafluoroanisole	Other
36	8.068	3.19	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
37	8.142	0.44	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
38	8.432	0.32	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	Aromatic (Phenol)
39	8.710	1.69	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	Aromatic (Phenol)
40	8.905	0.59	1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)	Aromatic (Phenol)
41	9.100	0.72	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
42	9.191	2.72	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
43	9.997	0.27	n-Hexadecanoic acid	Oxygenic (Acids)
44	10.205	1.71	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
45	11.137	0.87	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
46	11.731	0.1	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
47	11.788	0.11	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
48	11.853	0.09	Heptasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13-tetradecamethyl-	Other
49	11.926	0.11	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
50	11.991	0.36	Heptasiloxane,	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

			1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13-tetradecamethyl-	
51	12.078	0.09	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
52	12.117	0.19	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsan	Other
53	12.598	0.17	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
54	12.780	0.35	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
55	12.919	0.2	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
56	13.110	0.27	Heptasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13-tetradecamethyl-	Other
57	14.384	0.07	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
58	14.601	0.46	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
59	14.671	0.59	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
60	14.736	0.06	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
61	14.848	0.13	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
62	14.918	0.06	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
63	14.970	0.59	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
64	14.996	0.66	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
65	15.048	0.5	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ค- 8 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา FCC

จากรูป ค-8 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา FCC ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 21.68, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 31.92 , สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 5.00, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 3.28, แอลกอฮอล์ร้อยละ 1.67 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 36.45 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-8

ตารางที่ ค- 8 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา FCC

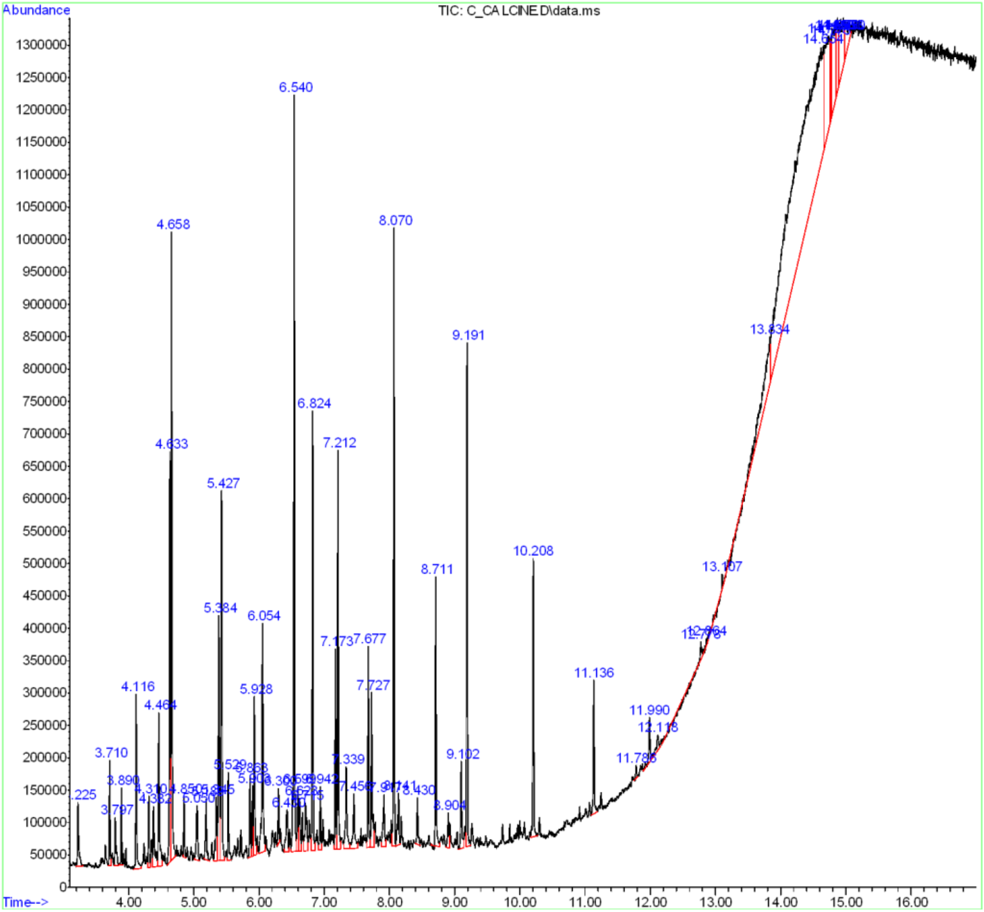
ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.889	0.35	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)

2	4.119	0.38	1,2-Cyclopentanedione, 3-methyl-	Oxygenic (Ketone)
3	4.466	0.33	Phenol, 3-methyl-	Aromatic (Phenol)
4	4.635	0.53	Phenol, 2-methoxy-	Aromatic (Phenol)
5	4.656	2.45	1,3-Propanediamine, N-methyl-	Nitrogenous (Amines)
6	5.346	0.28	Glycyl-L-norleucine, N-dimethylaminomethylene-, ethyl ester	Other
7	5.385	1.39	Catechol	Aromatic (Alcohol)
8	5.428	1.87	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
9	5.528	0.35	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
10	5.861	0.4	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	Aromatic (Alcohol)
11	5.901	0.24	3(2H)-Pyridazinone, 6-methyl-	Oxygenic (Ketone)
12	5.927	0.81	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
13	6.057	1.09	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	Aromatic (Alcohol)
14	6.538	2.89	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
15	6.598	0.27	3-Allyl-6-methoxyphenol	Aromatic (Phenol)
16	6.716	0.43	1,3-Benzenediol, 4-ethyl-	Aromatic (Alcohol)
17	6.824	2.56	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
18	6.941	0.24	trans-Isoeugenol	Aromatic (Phenol)
19	7.171	0.73	1,2,4-Trimethoxybenzene	Aromatic (Benzenes)
20	7.210	2.39	trans-Isoeugenol	Aromatic (Phenol)
21	7.335	0.47	D-Allose	(Alcohol)
22	7.678	0.82	1,1'-Biphenyl, 2-ethyl-	Aromatic (Benzenes)
23	7.726	0.61	Homovanillic acid	Oxygenic (Acids)
24	8.068	1.33	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
25	8.142	1.32	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
26	8.710	2.01	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

27	9.100	0.38	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
28	9.191	1.86	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
29	10.205	1.79	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
30	11.133	0.87	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
31	11.788	0.19	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
32	11.849	0.07	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
33	11.992	0.32	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
34	12.113	0.17	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
35	12.781	0.51	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
36	14.606	0.75	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
37	14.636	1.72	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
38	14.675	3.25	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
39	14.797	0.78	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
40	14.909	0.71	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
41	14.948	2.28	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
42	14.996	0.68	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Other
43	15.013	1.32	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
44	15.078	1.5	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
45	15.104	1.45	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
46	15.165	1.24	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
47	15.273	0.65	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ ค- 9 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์

จากรูป ค-9 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์ ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 21.55, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 32.52 , สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 7.17, แอลกอฮอล์ร้อยละ 6.55 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 32.21 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-9

ตารางที่ ค- 9 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแคลไซน์โดโลไมต์

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.226	0.55	Butyrolactone	Oxygenic (Ketone)
2	3.711	0.6	Phenol	Aromatic (Phenol)

3	3.798	0.42	Butanal, 3-methyl-	(Alcohol)
4	3.889	0.4	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)
5	4.114	0.16	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methy-	Oxygenic (Ketone)
6	4.309	0.42	Phenol, 2-methyl-	Aromatic (Phenol)
7	4.383	0.63	Butanoic acid, 2-butoxy-1-methyl-2-oxoethyl ester	Oxygenic (Acids)
8	4.465	1.24	p-Cresol	Aromatic (Phenol)
9	4.635	2.35	Phenol, 2-methoxy-	Aromatic (Phenol)
10	4.656	2.21	Cyclobutanol	(Alcohol)
11	4.851	0.38	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	Oxygenic (Ketone)
12	5.051	0.59	Phenol, 2,5-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
13	5.189	0.51	Phenol, 3,5-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
14	5.346	0.53	5-Hydroxymethyldihydrofuran-2-one	Oxygenic (Ketone)
15	5.385	1.92	Catechol	Aromatic (Alcohol)
16	5.428	2.79	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
17	5.528	0.6	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
18	5.861	0.57	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	Aromatic (Benzenes)
19	5.905	0.41	Hydroquinone	Oxygenic (Ketone)
20	5.926	1.13	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
21	6.056	1.08	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	Aromatic (Phenol)
22	6.299	0.35	2-Methoxy-4-vinylphenol	Aromatic (Phenol)
23	6.429	0.56	1,4-Benzenediol, 2-methyl-	Aromatic (Alcohol)
24	6.538	1.18	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
25	6.598	0.5	Eugenol	Aromatic (Phenol)
26	6.624	0.45	Phenol, 3,4-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)

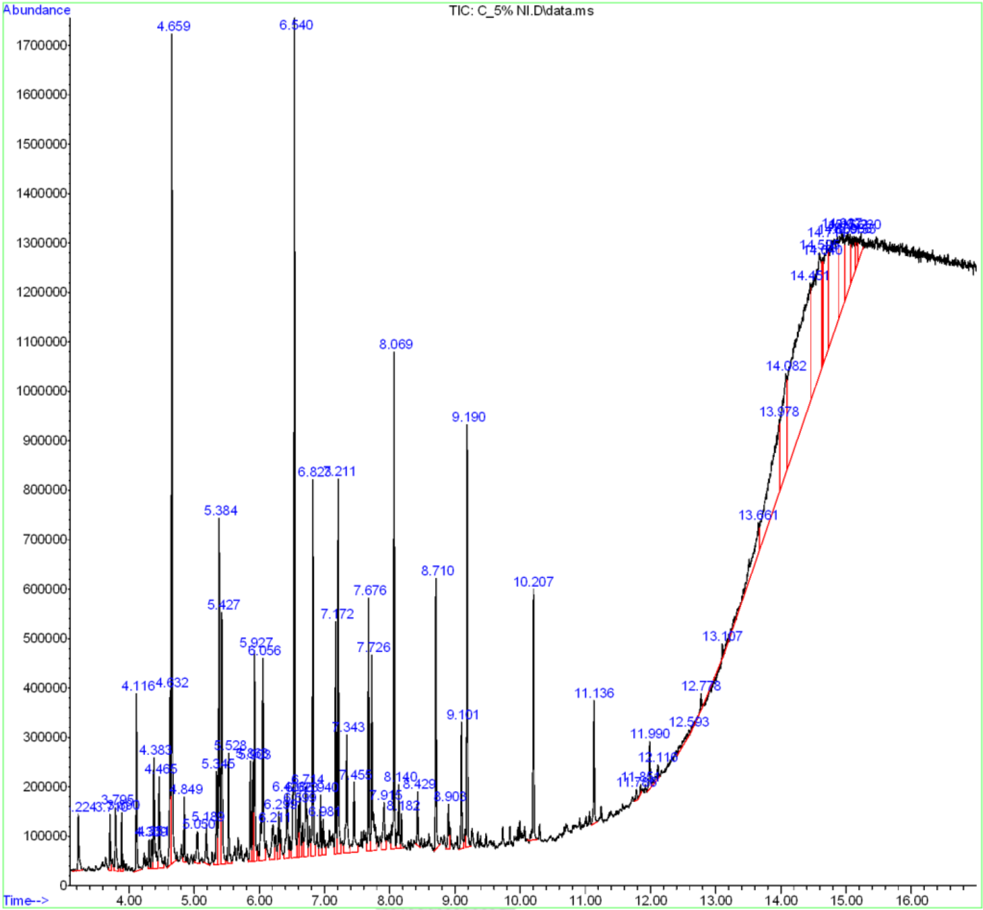
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

27	6.715	0.64	1,3-Benzenediol, 4-ethyl-	Aromatic (Alcohol)
28	6.824	2.87	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
29	6.941	0.44	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
30	7.175	0.19	Benzoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy-	Oxygenic (Acids)
31	7.210	1.55	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
32	7.340	0.88	D-Allose	(Alcohol)
33	7.457	0.66	Apocynin	Oxygenic (Ketone)
34	7.678	1.3	4,4-Dimethyl-5-methylene-2-allylamino-2-thiazoline	Other
35	7.726	1.22	Homovanillyl alcohol	Aromatic (Alcohol)
36	7.916	0.56	3H-Benz[e]indene, 2-methyl-	Aromatic (Indene)
37	8.068	2.62	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
38	8.142	0.51	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
39	8.432	0.37	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
40	8.710	1.66	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
41	8.905	0.31	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	Oxygenic (Ketone)
42	9.104	0.68	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
43	9.191	2.06	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
44	10.210	1.84	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
45	11.137	0.94	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
46	11.788	0.08	Tetrasiloxane, decamethyl-	Other
47	11.992	0.41	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
48	12.117	0.25	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

49	12.781	0.16	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Other
50	12.863	0.05	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
51	13.106	0.07	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
52	13.834	2.38	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
53	14.653	5.52	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
54	14.727	3.62	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
55	14.775	0.69	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
56	14.831	2.06	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
57	14.875	1.13	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
58	14.961	1.69	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
59	14.992	0.8	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ ค- 10 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์

จากรูป ค-10 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์ ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 18.01, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 33.11 ,สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 1.11, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 6.29, แอลกอฮอล์ร้อยละ 5.50 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 35.97 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-10

ตารางที่ ค- 10 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 5% นิกเกิล/โดโลไมต์

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.226	0.44	Butyrolactone	Oxygenic (Ketone)
2	3.711	0.33	Phenol	Aromatic (Phenol)

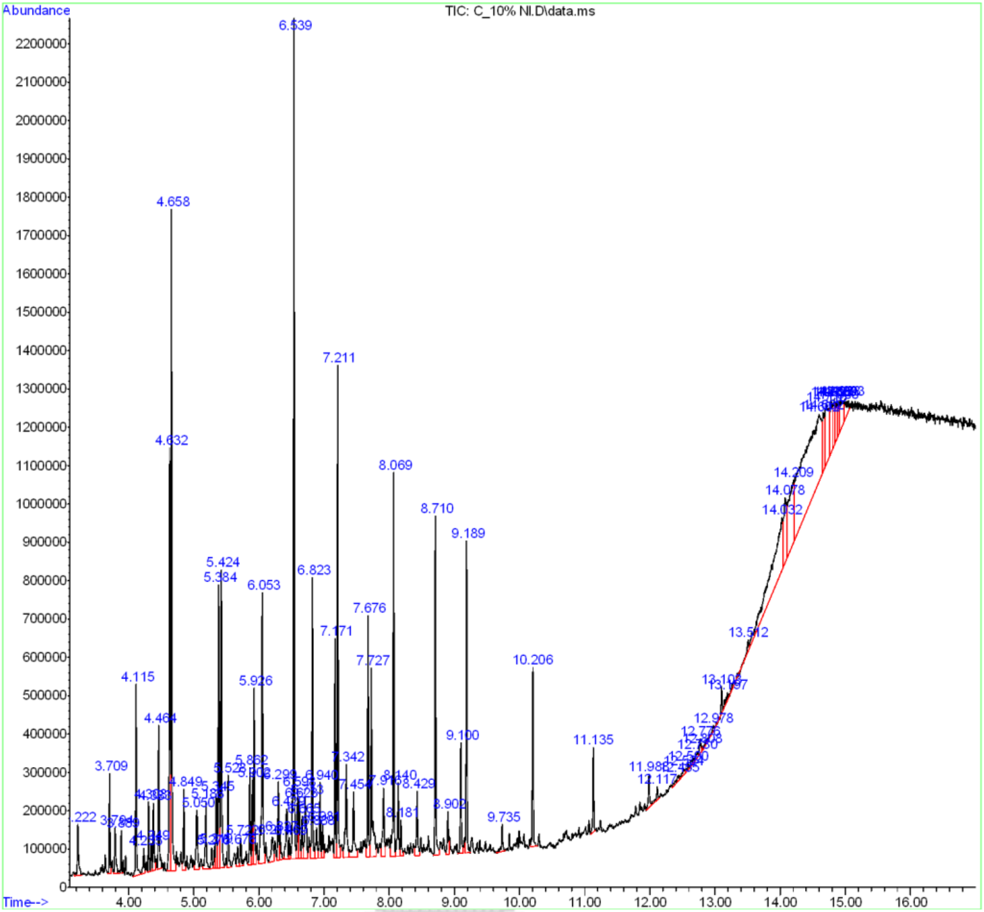
3	3.794	0.49	2-Hydroxy-gamma-butyrolactone	Oxygenic (Ketone)
4	3.889	0.29	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)
5	4.114	0.01	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	Oxygenic (Ketone)
6	4.309	0.16	Phenol, 2-methyl-	Aromatic (Phenol)
7	4.348	0.2	2H-Pyran-2-one, tetrahydro-	Oxygenic (Ketone)
8	4.383	0.07	2-Furanmethanol, tetrahydro-, acetate	Oxygenic (Ketone)
9	4.465	0.81	p-Cresol	Aromatic (Phenol)
10	4.630	1.07	Phenol, 2-methoxy-	Aromatic (Phenol)
11	4.661	1.83	Cyclopropyl carbino	(Alcohol)
12	4.851	0.37	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	Oxygenic (Ketone)
13	5.051	0.35	Phenol, 2,4-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
14	5.189	0.03	Phenol, 2,3-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
15	5.346	0.06	5-Hydroxymethyldihydrofuran-2-one	Oxygenic (Ketone)
16	5.385	2.27	Catechol	Aromatic (Alcohol)
17	5.428	1.81	Dodecane	Hydrocarbons (Alkanes)
18	5.528	0.67	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
19	5.861	0.61	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	Aromatic (Alcohol)
20	5.900	0.55	Hydroquinone	Oxygenic (Ketone)
21	5.926	1.42	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
22	6.057	1.99	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	Aromatic (Alcohol)
23	6.213	0.54	N-Methylallylamine	Nitrogenous (Amines)
24	6.299	0.38	2-Methoxy-4-vinylphenol	Aromatic (Phenol)
25	6.429	0.75	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	Aromatic (Alcohol)
26	6.538	4.78	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
27	6.598	0.39	Phenol, 2-methoxy-3-(2-propenyl)	Aromatic (Phenol)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

28	6.624	0.48	Phenol, 3,4-dimethox	Aromatic (Phenol)
29	6.716	0.83	1,3-Benzenediol, 4-ethyl-	Aromatic (Alcohol)
30	6.824	2.22	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
31	6.941	0.43	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
32	6.980	0.36	Glycine, N-(3-hydroxybenzoyl)-, methyl ester	Oxygenic (Ketone)
33	7.171	1.26	4-Methoxy-2-methyl-1-(methylthio)benzene	Other
34	7.210	2.21	trans-Isoeugenol	Aromatic (Phenol)
35	7.344	1.15	D-Allose	(Alcohol)
36	7.453	0.04	Apocynin	Oxygenic (Ketone)
37	7.678	0.41	1-(6-Hydroxyimidazo[2,1-b]thiazol-5-yl)ethanone	Oxygenic (Ketone)
38	7.726	0.66	1-(4-methylthiophenyl)-2-propanone	Oxygenic (Ketone)
39	7.916	0.56	2,3,5,6-Tetrafluoroanisole	Other
40	8.068	2.96	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
41	8.142	0.51	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	Aromatic (Phenol)
42	8.181	0.2	4-Propyl-1,1'-diphenyl	Aromatic (Benzenes)
43	8.428	0.36	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
44	8.710	1.63	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
45	8.900	0.34	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	Oxygenic (Ketone)
46	9.100	0.09	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
47	9.191	2.42	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
48	10.205	1.5	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

49	11.138	0.76	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
50	11.788	0.09	(E)-2-bromobutyloxychalcone	Oxygenic (Ketone)
51	11.853	0.05	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
52	11.992	0.34	Di-n-decylsulfone	Other
53	12.117	0.2	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	Nitrogenous (Pyridines)
54	12.594	0.26	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
55	12.776	0.16	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
56	13.106	0.24	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsan	Other
57	13.661	1.55	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
58	13.977	5.03	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
59	14.081	3.19	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
60	14.450	0.3	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
61	14.597	0.81	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
62	14.640	0.86	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
63	14.710	3.15	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
64	14.870	0.05	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
65	14.935	2.59	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
66	15.031	1.71	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
67	15.087	0.96	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
68	15.156	0.37	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
69	15.230	0.45	Trimethyl[4-(2-methyl-4-oxo-2-pentyl)phenoxy]silane	Other



รูปที่ ค- 11 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากรูป ค-11 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์ ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 13.66, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 34.09, สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 7.94, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 6.16 แอลกอฮอล์ร้อยละ 4.18 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 33.97 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-11

ตารางที่ ค- 11 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิล/โดโลไมต์

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.221	0.53	Butyrolactone	Oxygenic (Ketone)
2	3.711	0.66	Phenol	Aromatic (Phenol)

3	3.793	0.45	Cyclopentanol	(Alcohol)
4	3.889	0.29	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)
5	4.114	0.43	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	Oxygenic (Ketone)
6	4.236	0.26	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	Oxygenic (Ketone)
7	4.309	0.45	Phenol, 2-methyl-	Aromatic (Phenol)
8	4.348	0.24	2H-Pyran-2-one, tetrahydro-	Oxygenic (Ketone)
9	4.383	0.63	2-Furanmethanol, tetrahydro-, acetate	Oxygenic (Ketone)
10	4.465	0.62	p-Cresol	Aromatic (Phenol)
11	4.630	1.31	Phenol, 2-methoxy-	Aromatic (Phenol)
12	4.656	5.05	Diazene, [1-(2,2-dimethylhydrazino)ethyl]ethyl	Nitrogenous (Nitriles)
13	4.847	0.64	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	Oxygenic (Ketone)
14	5.051	0.8	Phenol, 2,4-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
15	5.189	0.68	Phenol, 3,5-dimethy	Aromatic (Phenol)
16	5.276	0.19	Phenol, 2,3-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
17	5.319	0.17	2-Methoxy-6-methylphenol	Aromatic (Phenol)
18	5.345	0.08	5-Hydroxymethyldihydrofuran-2-one	Oxygenic (Ketone)
19	5.384	2.44	Catechol	Aromatic (Alcohol)
20	5.423	1.24	Creosol	Aromatic (Phenol)
21	5.528	0.72	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
22	5.675	0.24	2,3-Anhydro-d-mannosa	(Alcohol)
23	5.723	0.31	3,4-Dimethoxytoluene	Aromatic (Phenol)
24	5.861	0.74	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	Aromatic (Alcohol)
25	5.900	0.05	Hydroquinone	Oxygenic (Ketone)
26	5.926	1.52	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
27	6.052	0.98	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	Aromatic (Phenol)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

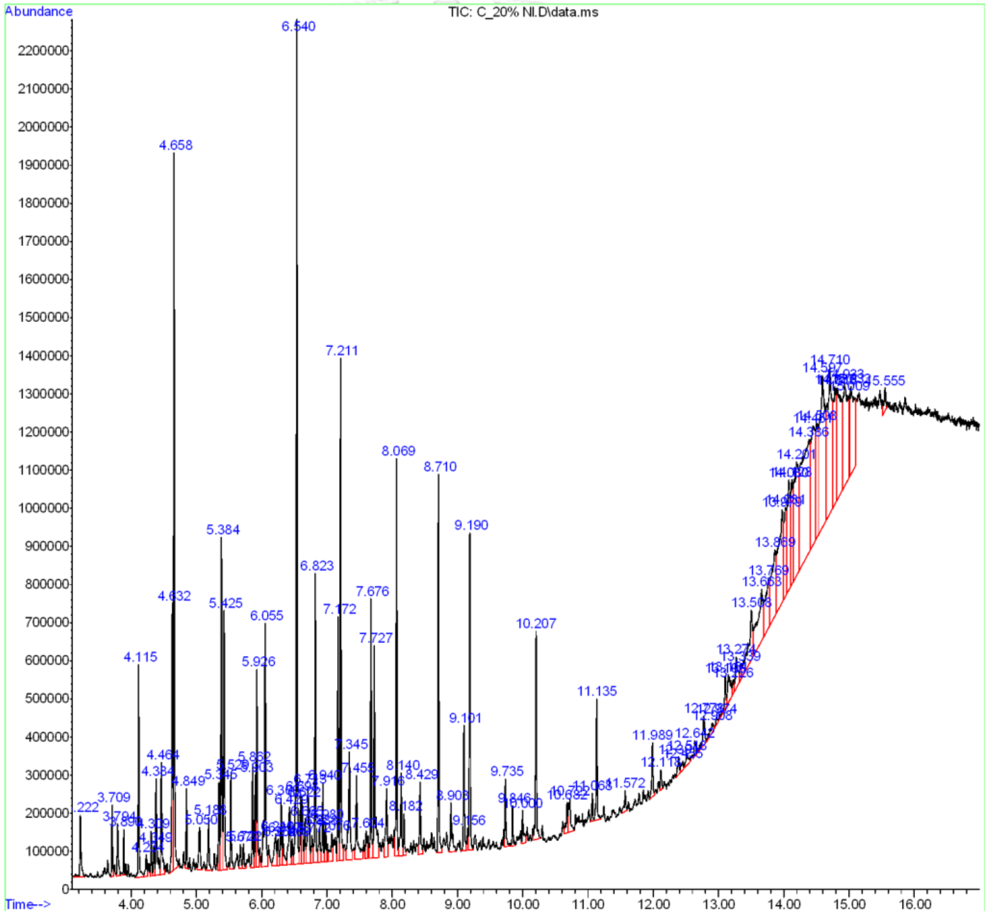
28	6.213	0.48	Butanal, 3-hydroxy-	(Alcohol)
29	6.299	0.67	2-Methoxy-4-vinylphenol	Aromatic (Phenol)
30	6.325	0.26	Z-1-Methoxy-2-pentene	Oxygenic (Aldehyde)
31	6.429	0.73	1,4-Benzenediol, 2-methyl-	Aromatic (Alcohol)
32	6.468	0.16	1H-Inden-5-ol, 2,3-dihydro-	Aromatic (Phenol)
33	6.538	0.12	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
34	6.598	0.6	Phenol, 2-methoxy-3-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
35	6.624	0.54	3-Amino-2,6-dimethoxypyridine	Nitrogenous (Pyridines)
36	6.663	0.34	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	Aromatic (Phenol)
37	6.711	0.85	1,3-Benzenediol, 4-ethyl-	Aromatic (Alcohol)
38	6.824	2.14	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
39	6.889	0.39	Vanillin	Oxygenic (Ketone)
40	6.941	0.62	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
41	6.980	0.32	Dimethylphenylphosphine	Other
42	7.171	1.6	4-Methoxy-2-methyl-1-(methylthio)benzene	Other
43	7.210	2.02	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
44	7.344	1.21	D-Allose	(Alcohol)
45	7.452	0.09	Apocynin	Oxygenic (Ketone)
46	7.678	1.78	5-tert-Butylpyrogallol	Aromatic (Alcohol)
47	7.726	0.02	Ethyl homovanillate	Oxygenic (Aldehyde)
48	7.916	0.08	4-Methyl-2,5-dimethoxybenzaldehyde	Oxygenic (Aldehyde)
49	8.068	2.99	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
50	8.142	0.78	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
51	8.181	0.34	4-Propyl-1,1'-diphenyl	Aromatic (Benzenes)
52	8.428	0.69	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)	Aromatic (Phenol)
53	8.710	2.56	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

54	8.900	0.41	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)	Oxygenic (Ketone)
55	9.100	0.92	Desaspidinol	Aromatic (Alcohol)
56	9.191	2.31	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
57	9.733	0.29	2-Nonadecanone	Oxygenic (Ketone)
58	10.205	1.41	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
59	11.133	0.68	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
60	11.987	0.31	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
61	12.117	0.17	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	Nitrogenous (Pyridines)
62	12.455	0.17	2-(Acetoxymethyl)-3-(methoxycarbonyl)biphenylene	Oxygenic (Acids)
63	12.525	0.12	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
64	12.590	0.1	1,2-Benzisothiazol-3-amine tbdms	Nitrogenous (Amines)
65	12.728	0.22	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
66	12.776	0.2	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
67	12.807	0.03	5-Methyl-2-phenylindolizine	Nitrogenous (Indoles)
68	12.976	0.19	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
69	13.101	0.2	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
70	13.197	0.15	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
71	13.513	0.21	Silicic acid, diethyl bis(trimethylsilyl) ester	Other
72	14.033	5.13	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
73	14.077	1.44	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
74	14.211	3.15	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
75	14.601	5.43	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
76	14.662	0.92	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

77	14.714	1.77	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
78	14.783	1.08	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
79	14.827	0.68	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
80	14.870	0.74	Trimethyl[4-(1-methyl-1-methoxyethyl)phenoxy]silane	Other
81	14.900	0.41	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
82	14.926	0.8	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
83	14.991	0.44	4-Methyl-2-trimethylsilyloxy-acetophenone	Other



รูปที่ ค- 12 โครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์

จากรูป ค-12 แสดงโครมาโตแกรมน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์ ซึ่งพบองค์ประกอบหลักทางเคมีของน้ำมันชีวภาพ

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 12.09, สารประกอบอะโรมาติกร้อยละ 31.70, สารประกอบไนโตรเจนร้อยละ 9.66, สารประกอบออกซิเจนร้อยละ 6.14, แอลกอฮอล์ร้อยละ 3.66 และสารอื่น ๆ ร้อยละ 36.76 โดยแสดงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ตรวจพบดังตารางที่ ค-12

ตารางที่ ค- 12 องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพจากการไพโรไลซิสเหง้ามันสำปะหลังที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา 20% นิกเกิล/โดโลไมต์

ลำดับที่	เวลา (นาที)	พื้นที่พีค (ร้อยละ)	ชื่อสาร	หมู่ฟังก์ชัน
1	3.221	0.04	Butyrolactone	Oxygenic (Ketone)
2	3.711	0.33	Phenol	Aromatic (Phenol)
3	3.793	0.34	Cyclopentanol	(Alcohol)
4	3.889	0.18	Decane	Hydrocarbons (Alkanes)
5	4.114	0.06	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	Oxygenic (Ketone)
6	4.236	0.08	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-	Oxygenic (Ketone)
7	4.309	0.22	Phenol, 2-methyl-	Aromatic (Phenol)
8	4.348	0.09	2H-Pyran-2-one, tetrahydro-	Oxygenic (Ketone)
9	4.383	0.03	2-Furanmethanol, tetrahydro-, acetate	Oxygenic (Ketone)
10	4.465	0.78	p-Cresol	Aromatic (Phenol)
11	4.630	1.33	Phenol, 2-methoxy-	Aromatic (Phenol)
12	4.656	3.58	Diazene, [1-(2,2-dimethylhydrazino)ethyl]ethyl-	Nitrogenous (Nitriles)
13	4.851	0.36	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-	Oxygenic (Ketone)
14	5.051	0.39	Phenol, 2,5-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
15	5.189	0.37	Phenol, 3,5-dimethyl-	Aromatic (Phenol)
16	5.345	0.04	5-Hydroxymethyldihydrofuran-2-one	Oxygenic (Ketone)
17	5.384	1.86	Catechol	Aromatic (Alcohol)
18	5.423	1.56	Creosol	Aromatic (Phenol)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

19	5.528	0.5	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	(Alcohol)
20	5.675	0.18	Cyclopentanecarboxylic acid, 3-tetradecyl ester	Oxygenic (Acids)
21	5.723	0.18	3,4-Dimethoxytoluene	Aromatic (Phenol)
22	5.861	0.56	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	Aromatic (Alcohol)
23	5.905	0.04	Hydroquinone	Oxygenic (Ketone)
24	5.926	1.17	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	Aromatic (Alcohol)
25	6.056	1.9	1,2-Benzenediol, 4-methyl-	Aromatic (Alcohol)
26	6.217	0.42	Ethanedial, bis(dimethylhydrazone)	Oxygenic (Ketone)
27	6.252	0.2	2-Ethyl-3-methoxypyrazine	Nitrogenous (Pyridines)
28	6.299	0.44	2-Methoxy-4-vinylphenol	Aromatic (Phenol)
29	6.330	0.26	Cyclopentanol, 2-methyl	(Alcohol)
30	6.429	0.62	1,4-Benzenediol, 2-methyl-	Aromatic (Alcohol)
31	6.468	0.16	1H-Inden-5-ol, 2,3-dihydro-	Aromatic (Phenol)
32	6.538	2.38	Phenol, 2,6-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
33	6.598	0.43	Phenol, 2-methoxy-3-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
34	6.624	0.42	Phenol, 3,4-dimethoxy-	Aromatic (Phenol)
35	6.663	0.27	Phenol, 2-methoxy-4-propyl-	Aromatic (Phenol)
36	6.711	0.74	4-Ethylcatechol	Aromatic (Alcohol)
37	6.772	0.21	1-Hexadecanol	(Alcohol)
38	6.824	1.59	Tetradecane	Hydrocarbons (Alkanes)
39	6.889	0.31	Vanillin	Oxygenic (Ketone)
40	6.941	0.47	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)	Aromatic (Phenol)
41	6.980	0.27	Benzoic acid, 4-hydroxy-	Oxygenic (Acids)
42	7.075	0.31	Propanedioic acid, propyl-	Oxygenic (Acids)
43	7.171	0.19	Benzoic acid, 4-hydroxy-3-methoxy-	Oxygenic (Acids)
44	7.210	2.51	trans-Isoeugenol	Aromatic (Phenol)

Chulalongkorn University

45	7.344	1.05	.beta.-D-Glucopyranose, 1,6-anhydro-	(Alcohol)
46	7.457	0.07	Apocynin	Oxygenic (Ketone)
47	7.604	0.24	Propanoic acid, 2-methyl-, 2-methylpropyl ester	Oxygenic (Acids)
48	7.678	1.3	Phenol, 3-[(trimethylsilyl)oxy]-	Other
49	7.726	0.05	1-(4-methylthiophenyl)-2-propanone	Oxygenic (Ketone)
50	7.916	0.63	2,3,5,6-Tetrafluoroanisole	Other
51	8.068	2.01	Hexadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
52	8.137	0.6	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
53	8.181	0.25	4-Propyl-1,1'-diphenyl	Aromatic (Benzenes)
54	8.428	0.51	Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	Aromatic (Phenol)
55	8.710	1.91	N-(4-Methoxyphenyl)-2-hydroxyimino-acetamide	Nitrogenous (Amide)
56	8.905	0.45	Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	Oxygenic (Ketone)
57	9.100	0.07	3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	Oxygenic (Acids)
58	9.156	0.13	Cetene	Hydrocarbons (Alkenes)
59	9.191	1.7	Octadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
60	9.737	0.09	2-Heptadecanone	Oxygenic (Ketone)
61	9.846	0.25	Hexadecanoic acid, methyl ester	Oxygenic (Acids)
62	10.002	0.26	Allantoin	Other
63	10.205	1.22	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
64	10.682	0.26	Pentadecane	Hydrocarbons (Alkanes)
65	10.721	0.4	1,1-Bis[aziridyltrimethylamine]	Nitrogenous (Amines)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

66	11.068	0.16	Oxacycloheptadec-8-en-2-one, (8Z)	Oxygenic (Ketone)
67	11.137	0.71	Eicosane	Hydrocarbons (Alkanes)
68	11.571	0.17	(-)-cis-3,4-Dimethyl-2-phenyltetrahydro-1,4-thiazine	Other
69	11.987	0.35	Octadecane, 1-iodo-	Other
70	12.117	0.14	Benzo[h]quinoline, 2,4-dimethyl-	Nitrogenous (Pyridines)
71	12.390	0.16	2-(Acetoxymethyl)-3-(methoxycarbonyl)biphenylene	Oxygenic (Acids)
72	12.455	0.1	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
73	12.516	0.17	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
74	12.642	0.12	Heptasiloxane, 1,1,3,3,5,5,7,7,9,9,11,11,13,13-tetradecamethyl-	Other
75	12.776	0.35	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
76	12.906	0.16	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
77	12.976	0.07	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
78	13.106	0.26	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
79	13.149	0.46	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
80	13.227	0.09	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
81	13.275	0.43	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
82	13.340	0.13	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsan	Other
83	13.509	1.19	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
84	13.661	1.64	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
85	13.769	1.07	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
86	13.869	0.84	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
87	13.977	0.46	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
88	14.029	0.13	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
89	14.081	0.78	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
90	14.129	0.36	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

91	14.202	0.85	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
92	14.385	0.96	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
93	14.450	2.8	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
94	14.506	1.72	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
95	14.597	0.53	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
96	14.710	0.88	Tris(tert-butyldimethylsilyloxy)arsane	Other
97	14.788	0.95	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
98	14.818	0.95	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
99	14.935	0.84	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
100	15.009	0.48	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
101	15.031	0.99	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other
102	15.555	0.25	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	Other

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1. Choa, E.J.; Trinha, L.T.P.; Songa, Y.; Leec, Y.G.; Baea, H-J. . "Bioconversion of Biomass Waste into High Value Chemical." *Bioresource Technology* 122386 (2019).

2. Amir Sada Khan, A.S.; Man, Z.; Bustam, M.A.; Kait, C.F.; Ullah, Z.; Nasrullah, A.; Khan, M.I.; Girma Gonfa, G.; Ahmad, P.; Muhammad, N. "Kinetics and Thermodynamic Parameters of Ionic Liquid Pretreated Rubber Wood Biomass." *J. Mol. Liquids.* 223 (2016): 754–62.

3. Ozoegwu, C.G.; Eze, C.; Onwosi, C.O.; Mgbemene, C.A.; Ozor, P.A. . "Biomass and Bioenergy Potential of Cassava Waste in Nigeria: Estimations Based Partly on Rural-Level Garri Processing Case Studies." *Renew Sust. Energ.* 72 (2017): 625-38.

4. Ghani, W.A.W.A.K.; Mohda, A.; Silva, G.d.; Bachmannd, R.T.; Taufiq-Yape, Y.H.; Rashidf, U.; Al-Muhtasebg, A.H. . "Biochar Production from Waste Rubber-Wood-Sawdust and Its Potential Use in C Sequestration: Chemical and Physical Characterization." *Industrial Crops and Products.* 44 (2013): 18-24.

5. Alvarez-Chavez, B.J.; Godbout, S.; Palacios-Rios, J.H.; Roux, E.; Raghavan, V. "Physical, Chemical, Thermal and Biological Pre-Treatment Technologies in Fast Pyrolysis to Maximize Bio-Oil Quality: A Critical Review." *Biomass and Bioenergy.* 128 (2019): 105-333.

6. Kurnia, I.; Karnjanakom, S.; Bayu, A.; Yoshida, A.; Rizkiana, J.; Prakoso, T.; Abudula, A.; Guan, G,. "In-Situ Catalytic Upgrading of Bio-Oil Derived from Fast Pyrolysis of Lignin over High Aluminum Zeolites." *Fuel Process. Technol.* 167 (2017): 730-37.

7. Charusiri, W.; Vitidsant, T. "Upgrading Bio-Oil Produced from the Catalytic Pyrolysis of Sugarcane (Saccharum Officinarum L) Straw Using Calcined Dolomite." *Sustainable Chemistry and Pharmacy.* 6 (2017): 114-23.

8. Man KeeLam, Choon GekKhoo, Keat TeongLee,. "Scale-up and Commercialization of Algal Cultivation and Biofuels Production." *Biomass, Biofuels, Biochemicals,* (2019): 475-506.

9. Adeniyi Lawal, Robert J.Farrauto. "The Convergence of Emission Control and Source of Clean Energy." *New and Future Developments in Catalysis* (2013): 195-231.

10. S.W. Banks, A.V. Bridgwater. "Catalytic Fast Pyrolysis for Improved Liquid Quality." *Processes and Technologies* (2016,): 391-429.

11. Thomas Abdallah. "Sustainable Mass Transit." *Challenges and Opportunities in Urban Public Transportation* (2017): 31-44.

12. ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล. "ศักยภาพของชีวมวล,." (2549).

13. Lalit M. Srivastava. "Plant Growth and Development." *Hormones and Environment* (2002): 757-72.

14.Herminia Dominguez González, María Jesús González Muñoz. "Water Extraction of Bioactive Compounds." *Plants to Drug Development* (2018): 530.

15. Durgesh Kumar Tripathi, Parvaiz Ahmad, ... Nawal Kishore Dubey. "Nanomaterials in Plants, Algae, and Microorganisms." *Concepts and Controversies* 1 (2018): 407-28.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

16. M.N. GUPTA. "Natural-Based Polymers for Biomedical Applications." *Woodhead Publishing Series in Biomaterials* (2008): 54-84.

17. Ashter, S.A. "Biomass and Its Sources." *Technology and Applications of Polymers Derived from Biomass*

(2018): 11-36.

18, Prabir Basu. "Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)." *Practical Design and Theory* (2018): 93-154.

19. Rawel Singh, Aditya Prakash, Bhavya Balagurumurthy, Thallada Bhaskar,. "Hydrothermal Liquefaction of Biomass." *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass* (2015): 269-91.

20. ประพันธ์ คูชลธารา และ ศศิธร สรรพ่อค้า. พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้,. กรุงเทพฯ, 2557.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

21. Haiping Yang, Rong Yan, Hanping Chen, Dong Ho Lee, Chuguang Zheng,. "Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis." *Fuel* 86, no. 12–13 (2007): 1781-88

22. Mohamed A.Fahim, Taher A. Alsahhaf, Amal Elkilani,. "Clean Fuels." *Fundamentals of Petroleum Refining* (2010): 303-24.

23. H.Haykiri-Acma, S. Yaman, S. Kucukbayrak,. "Effect of Heating Rate on the Pyrolysis Yields of Rapeseed." *Renewable Energy* 31, no. 6 (2006): 803-10

24. Jun Shen, Xiao-Shan Wang, Manuel Garcia-Pereza, Daniel Mourant, Martin J Rhodes, Chun-Zhu Li,. "Effects of Particle Size on the Fast Pyrolysis of Oil Mallee Woody Biomass." *Fuel* 88, no. 10 (2009): 1810-17.

25. A. Pattiya. "Fast Pyrolysis." *Direct Thermochemical Liquefaction for Energy Applications* (2018,): 3-28.

26. Elbaba, I.F.; Williams, P.T. . "High Yield Hydrogen from the Pyrolysis–Catalytic Gasification of Waste Tyres with a Nickel/Dolomite Catalyst." *Fuel.* 106 (2013): 528–36.

27. Ly, H.V.; Lim, D-H.; Sim, J.W.; Kim, S-S.; Kim, J. . "Catalytic Pyrolysis of Tulip Tree (Liriodendron) in Bubbling Fluidizedbed Reactor for Upgrading Bio-Oil Using Dolomite Catalyst." *Energy.* 162 (2018): 564-75.

28. Stefanidis, S.D.; Karakouliaa, S.A.; Kalogiannis, K.G.; Iliopouloua, E.F.; Delimitis, A.; Yiannoulakis, H.; Zampetakis, T.; Lappas, A.A.; Triantafyllidis, K.S. . "Natural Magnesium Oxide (Mgo) Catalysts: A Cost-Effective Sustainable Alternative to Acid Zeolites for the in Situ Upgrading of Biomass Fast Pyrolysis Oil." *Appl. Catal. B Environ.* 196 (2016): 155–73.

29. Sirijanusorn, S.; Sriprateep, K.; Pattiya, A. . "Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Counter-Rotating Twin Screw Reactor Unit." *Bioresource Technology* 139 (2013): 343–48.

30. Thanandorn Prakob. "Liquid Fuel Production from Pyrolysis of Ceratophyllum Demersum L. Using Dolomite in Continuous Reactor." Sci - Theses (2018).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

31. นพิดา หิญชีระนันทน์. เทคโนโลยีตัวเร่งปฏิกิริยา. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,: ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,, 2556.

32. Keiichi Tomishige, Dalin Li, Masazumi Tamura, Yoshinao Nakagawa,. "Nickel–Iron Alloy Catalysts for Reforming of Hydrocarbons: Preparation, Structure, and Catalytic Properties." *Science & Technology* 7 (2017): 3952.

33. Xua T, Xub F, Moyoa G.G, Sunc Y, Chenc Z, Xiaoa B, Wanga X, Hua Z,. "Comparative Study of Mxoy (M = Cu, Fe and Ni) Supported on Dolomite for Syngas Production Via Chemical Looping Reforming with Toluene." *Energy Conversion and Management*, no. 199, 111937 (2019,): 111937.

34. Ross A.B. "Classification of Macroalgae as Fuel and Its Thermochemical Behaviour." *Bioresour Technol* (2008): 494-504.

35. Ayman Hijazi, Ala'a H. Al-Muhtaseb, Samer Aouad, Mohammad N.Ahmad, Joseph Zeaiter,. "Pyrolysis of Waste Rubber Tires with Palladium Doped Zeolite." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7, no. 6 (2019): 103451.

36. Kuntheera Kumpeera. "Effects of Acid and Base Catalaysts on Bio-Oil Production of Casava Rhizome Pyrolysis in Continuous Reactor." Chulalongkorn Univesity, 2017.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กิตติเดช ประเสริฐทวีพร
วัน เดือน ปี เกิด	16 พฤษจิกายน 2533
สถานที่เกิด	หนองคาย
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) Bachelor of Engineering (Chemical Engineering)
ที่อยู่ปัจจุบัน	15/451 ดีคอนโดรามคำแหง ซอย9 ถนนรามคำแหง หัวหมาก กรุงเทพฯ 10240

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY