

การทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในของผสมเอทานอล-น้ำภาวะเหนือวิกฤต:
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

นางสาวรติมา จงอริยะกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

LIQUEFACTION OF OIL PALM SHELL IN SUPERCRITICAL ETHANOL-WATER
MIXTURE: EFFECT OF CATALYSTS

Miss Ratima Jongariyagul

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในของผสม
เอทานอล-น้ำภาวะเหนือวิกฤต: ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดย

นางสาวรติมา จงศิริทะกุล

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พุกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.บุญญาวัฒน์ ขยู่สุข)

รติมา จงอริยะกุล : การทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในของผสมเอทานอล-น้ำ
 ภาวะเหนือวิกฤต: ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา (LIQUEFACTION OF OIL PALM SHELL
 IN SUPERCRITICAL ETHANOL-WATER MIXTURE: EFFECTS OF CATALYSTS)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ, 85 หน้า.

การแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายผสมของเอทานอลและน้ำ
 ภาวะเหนือวิกฤต เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพ ทำการทดลองด้วยเครื่อง
 ปฏิกรณ์แบบแบตช์ ขนาดความจุ 250 มิลลิลิตร งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของตัวทำละลาย คุณณหภูมิตั้งแต่
 และตัวเร่งปฏิกิริยา (โพแทสเซียมคาร์บอเนต โซเดียมคาร์บอเนต แคลเซียมออกไซด์
 แมกนีเซียมออกไซด์ และซิงก์คลอไรด์) ต่อร้อยละการเปลี่ยน และร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ
 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟกับแมสสเปกโทรมิเตอร์ พบว่า
 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วง 300 ถึง 360 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มร้อยละผลได้และค่าความร้อน
 ของน้ำมันชีวภาพ และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวทำละลายที่เหมาะสมสามารถเพิ่มร้อยละการ
 เปลี่ยนและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ สำหรับกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการแปร
 รูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤตที่อุณหภูมิ 340
 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล ได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน
 ชีวภาพสูงสุดร้อยละ 40.9 โดยน้ำหนัก ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนตที่
 อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ณ ภาวะการทดลองเดียวกัน ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ
 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 66.5 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพด้วยเครื่อง
 แก๊สโครมาโทกราฟกับแมสสเปกโทรมิเตอร์ พบว่า องค์ประกอบหลักในน้ำมันชีวภาพ ได้แก่
 สารประกอบฟีนอล แอลกอฮอล์ และเอสเทอร์ เป็นต้น

ภาควิชาเคมีเทคนิค.....
 สาขาวิชาเคมีเทคนิค.....
 ปีการศึกษา2554.....

ลายมือชื่อผู้คิด รติมา จงอริยะกุล
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก 

5272501523: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : Liquefaction / Palm oil shell / Supercritical / Ethanol

RATIMA JONGARIYAGUL : LIQUEFACTION OF OIL PALM SHELL IN
 SUPERCRITICAL ETHANOL-WATER MIXTURE: EFFECTS OF CATALYSTS
 THESIS ADVISOR : PROF. PATTARAPAN PRASASSARAKICH, Ph.D., 85 p.

The liquefaction of oil palm shell in supercritical ethanol-water mixture (50, 70, 90 and 99.9% (v/v) ethanol) was performed in a 250 mL batch reactor to evaluate the optimum condition for bio-oil production. The effect of solvent, temperature and catalyst (K_2CO_3 , Na_2CO_3 , CaO, MgO and $ZnCl_2$) on conversion and bio-oil yield were investigated. The bio-oil was characterized by gas chromatography–mass spectrometry (GC/MS). Increasing temperature from 300°C to 360°C increased the oil yield and heating value of bio-oil. The efficient catalyst and suitable solvent gave a high oil yield and conversion. For non-catalytic liquefaction using 99.9% (v/v) ethanol at 340°C under 4.0 MPa initial pressure of H_2 , the bio-oil yield was only 40.9 %wt. For catalytic liquefaction, in the presence of 10 %wt K_2CO_3 under the same condition, 66.5 %wt of bio-oil yield were produced. From gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) analysis, the dominant components of bio-oil from oil palm shell liquefaction were found to be phenolics compounds, alcohol and ester.

Department :Chemical Technology.....

Student's Signature

Ratima Jongariyagul

Field of Study :Chemical Technology.....

Advisor's Signature

Prof. Pattarapan Prasassarakich

Academic Year :2011.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรพรณ ประศาสน์สารกิจ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือที่ดีตลอดมา

งานวิจัยเรื่อง “การทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในของผสมเอทานอล-น้ำภาวะเหนือวิกฤต: ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา” สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง (Center of Excellence for Petrochemical and Materials Technology) ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลิ พุกษาท ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ และ ดร.บุญญาวัฒน์ อยู่สุข กรรมการจากภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้กรุณาอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ ให้ความรู้และความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ รวมไปถึง พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และการสนับสนุนด้านต่างๆ เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวล.....	4
2.2 การใช้พลังงานชีวมวล.....	5
2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล.....	7
2.4 ส่วนประกอบของชีวมวล.....	9
2.5 ค่าความร้อน.....	11
2.6 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน.....	11
2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	19
2.8 ปาล์มน้ำมัน.....	25
2.9 กะลาปาล์มน้ำมัน.....	26
2.10 น้ำมันชีวภาพ.....	26
2.11 ของไหลภาวะเหนือวิกฤต.....	28
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30

บทที่	หน้า
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	34
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	35
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	36
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.1 การวิเคราะห์สมบัติกะลาปาล์มน้ำมัน.....	40
4.2 ผลของอุณหภูมิ.....	41
4.3 ผลของตัวทำละลาย.....	43
4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	47
4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ.....	54
5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	60
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	60
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกะลาปาล์มน้ำมัน.....	68
ภาคผนวก ข การคำนวณและข้อมูลการทดลอง.....	72
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์กะลาปาล์มน้ำมันด้วย TG/DTA.....	74
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ.....	75
ภาคผนวก จ สูตรโครงสร้าง.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล.....	6
2.2 องค์ประกอบของชีวมวล.....	9
2.3 สมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด.....	10
2.4 ตัวอย่างสารร่องไวและปฏิกิริยาที่เร่ง.....	21
2.5 ตัวอย่างของตัวรองรับและตัวส่งเสริมข้อมูล.....	21
2.6 สมบัติของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้และน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก.....	27
3.1 อุณหภูมิวิกฤต และความดันวิกฤตของตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต.....	36
4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติกะลาปาล์มแบบประมาณและแบบแยกธาตุ.....	40
4.2 ผลของอุณหภูมิต่อน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต.....	42
4.3 การวิเคราะห์สมบัติของกากของแข็งจากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต.....	44
4.4 ผลของทำละลายต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต.....	45
4.5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซิงก์คลอไรด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ที่มีต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลว ในตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต.....	49
4.6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต.....	49
4.7 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของชีวมวล ร้อยละผลได้ของของเหลวในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	53
4.8 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากกระบวนการทำกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต กรณีไม่ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	53

4.9 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแปรรูปกะลาปาล์มแสดง องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	56
4.10 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแปรรูปกะลาปาล์ม.....	58

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 วัฏจักรคาร์บอน (Carbon cycle).....	4
2.2 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล.....	5
2.3 เปรียบเทียบวัฏจักรคาร์บอนของสารชีวมวลและฟอสซิล.....	5
2.4 โครงสร้างของเซลลูโลส.....	7
2.5 โครงสร้างของลิกนิน.....	8
2.6 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล.....	12
2.7 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง.....	15
2.8 กลไกการแตกตัวโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ แบบ hydrogenation และแบบ hydrocracking ในสารละลาย DNM (Di-naphthyl-methane) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	19
2.9 ปาล์มน้ำมันและส่วนประกอบของผลปาล์มน้ำมัน.....	24
2.10 กะลาปาล์มน้ำมัน.....	26
2.11 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม.....	26
2.12 เฟสไดอะแกรมของของไหลภาวะเหนือวิกฤต.....	29
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4843.....	34
4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันในตัวทำละลายเอทานอล ภาวะการทดลอง: ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที (วงเล็บ แสดง ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมัน)	41
4.2 ผลตัวทำละลายต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ จากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันในภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที (ในวงเล็บแสดงร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมัน).....	45
4.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณออกซิเจนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที.....	50

ภาพที่	หน้า
4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณออกซิเจนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที.....	51
4.5 ลักษณะโครงสร้างของดิกนิน และ หน่วยย่อยของดิกนิน.....	55
ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนัก และอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของกะลาปาล์มน้ำมัน.....	74
ง1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 300 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v).....	76
ง2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v).....	77
ง3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	78
ง4 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงก์คลอไรด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	79
ง5 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	80
ง6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	81
ง7 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	82

ภาพที่	หน้า
๑1 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มสารประกอบพีนอล.....	83
๑2 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มเอสเทอร์.....	83
๑3 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มแอลกอฮอล์.....	84
๑4 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มอีเทอร์.....	84
๑5 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มไฮเลน.....	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมส่งผลให้มีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ภาวะการขาดแคลนพลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานฟอสซิลทำให้เชื้อเพลิงมีราคาเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ดังนั้นจึงมีความพยายามในการค้นคว้าและวิจัยแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ เพื่อให้สามารถประกอบกิจกรรมต่างๆ ได้อย่างยั่งยืน แหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจคือ แหล่งพลังงานที่ได้มาจากการแปรรูปชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่กักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยเฉพาะในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศเกษตรกรรม ส่งผลให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เช่น แกลบ ฟางข้าว ชานอ้อย และกะลาปาล์ม เป็นต้น โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็งที่มีความชื้นสูงทำให้ยากต่อการจัดเก็บ ดังนั้นจึงมีการศึกษาการแปรรูปวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) เพื่อเพิ่มมูลค่าและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันนั้นสามารถจำแนกได้ 2 เทคโนโลยีหลัก คือ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (Biochemical conversion process) และกระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน (Thermochemical conversion process) โดยที่กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อนนี้ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยได้อีก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเผาไหม้ กระบวนการไพโรไลซิส และกระบวนการแกซิฟิเคชัน โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลให้เป็นของเหลวนั้น สามารถทำได้ผ่านกระบวนการแกซิฟิเคชัน และกระบวนการไพโรไลซิส อย่างไรก็ตาม มีการศึกษาการแปรรูปชีวมวลให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายในภาวะเหนือวิกฤต พบว่า ตัวทำละลายสามารถเพิ่มอัตราการถ่ายโอนมวล ทำให้เกิดการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างของชีวมวลช่วยให้เกิดการละลายได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ตัวทำละลายบางชนิดยังสามารถเป็นแหล่งไฮโดรเจนให้แก่ระบบอีกด้วย งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษากระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว หรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ด้วยตัวทำละลายผสมของเอทานอลและน้ำในภาวะเหนือวิกฤต เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ รวมทั้งศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณและคุณภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นน้ำมันชีวภาพด้วยตัวละลายผสมของเอทานอล-น้ำในภาวะเหนือวิกฤต
2. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวทำละลาย และอุณหภูมิต่อผลได้ และองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพที่ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของชีวมวล โดยการวิเคราะห์แบบประมาณและแยกธาตุ
2. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลว หรือน้ำมันชีวภาพด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต
3. วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ และค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลว รวมถึงวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟกับแมสเปกโทสโกปี

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าเอกสารและข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสารเคมี
3. เตรียมกะลาปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัย โดยบดให้มีขนาด 250 ไมโครเมตร จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. วิเคราะห์สมบัติของกะลาปาล์ม
 - ค่าความร้อนของชีวมวล (Gross calorific value) ตาม ASTM D3177-02
 - องค์ประกอบของชีวมวลโดยประมาณ (Proximate analysis): ความชื้น ใยอาหารระเหย และคาร์บอนคงตัว ตาม ASTM D3172-3175
 - องค์ประกอบแยกธาตุ (Ultimate analysis): คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ตาม ASTM D5291-96

5. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ผลิตภัณฑ์ของเหลว และกากของแข็ง ในกระบวนการทำกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายผสมของเอทานอล-น้ำในภาวะเหนือวิกฤต (ความเข้มข้นของตัวทำละลายเอทานอล-น้ำ อุณหภูมิ และตัวเร่งปฏิกิริยา)
6. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้
 - องค์ประกอบของน้ำมันโดยวิธีแก๊สโครมาโทกราฟีแบบ Mass Spectroscopy (GC / MS)
 - ค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ (Calorific value) ตาม ASTM D2015
 - องค์ประกอบแยกธาตุ (Ultimate analysis): คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ตาม ASTM D3176
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

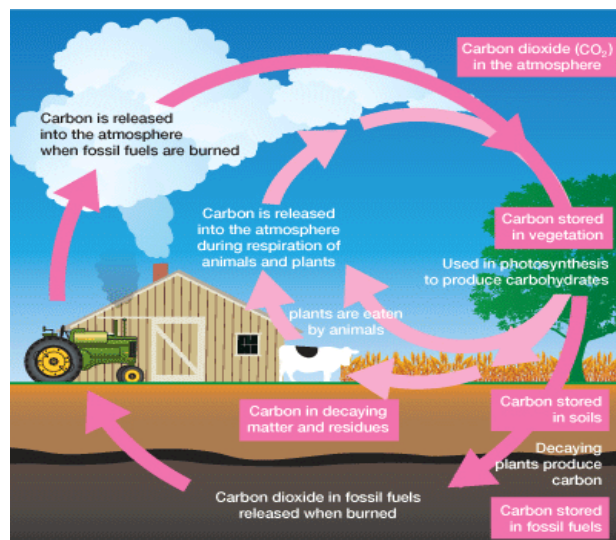
1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำมันชีวภาพจากกะลาปาล์มน้ำมัน
2. ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปชีวมวลที่มีราคาถูกให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีมูลค่ามากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (Biomass) [1]

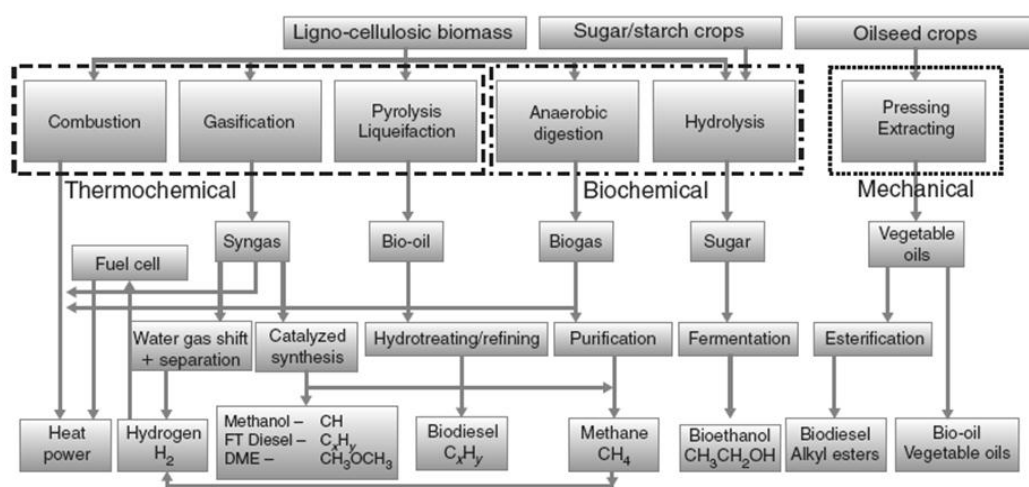
ชีวมวล (Biomass) ถือเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่กักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งไนโตรเจนและธาตุอื่นๆอีกเล็กน้อย โดยทั่วไปหมายถึงสิ่งมีชีวิตประเภทต้นไม้และพืช เช่น ต้นข้าวโพด มันสำปะหลัง ไม้ยางพารา อ้อย และ ปาล์มน้ำมัน ฯลฯ และเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด เปลือกไม้ยูคาลิปตัส แกลบ กากปาล์ม กากมันสำปะหลัง และ กะลามะพร้าว นอกจากนี้ยังรวมถึงพลังงานที่ได้จากสิ่งปฏิภูลของสัตว์ ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้เป็นแป้งและน้ำตาลแล้ว กักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช การนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงจึงได้พลังงานดังกล่าวออกมา และปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กลับคืนสู่บรรยากาศวนเวียนเป็นวัฏจักร ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 วัฏจักรคาร์บอน (Carbon cycle) [2]

2.2 การใช้พลังงานชีวมวล [3-5]

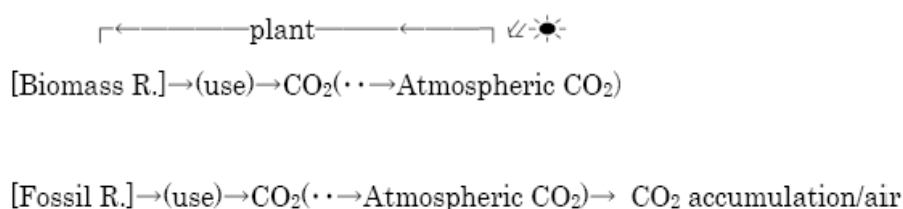
เชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นแหล่งให้ความร้อนและแสงสว่างที่สำคัญแหล่งแรกที่มีมนุษยชาติได้ใช้ ปัจจุบันก็เป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้นๆ ของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย จากภาพที่ 2.2 แสดงแนวทางการใช้ประโยชน์จากชีวมวล ตั้งแต่การใช้พื้นฐานในการเผาไหม้จนถึงการยกระดับการใช้ด้วยการแปลงสภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น



ภาพที่ 2.2 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล [3]

ในปัจจุบัน ชีวมวลได้รับความสนใจเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ด้วยเหตุผลต่างๆ ดังนี้

1. ชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี



ภาพที่ 2.3 เปรียบเทียบวัฏจักรคาร์บอนของสารชีวมวลและฟอสซิล [3]

2. ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

3. ชีวมวลมีปริมาณกำมะถัน และโลหะต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงฟอสซิล

4. การใช้ชีวมวลผลิตความร้อนหรือไฟฟ้านั้นไม่ส่งผลต่อการเพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก เนื่องจากสามารถผลิตชีวมวลขึ้นมาใหม่เพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการหายใจ

จากเหตุผลดังกล่าวชีวมวลจึงได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและนำมาพัฒนาเพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือกในการผลิตพลังงานต่อไป

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน ซึ่งเป็นหน่วยงานหลักของประเทศไทยในด้านพลังงานหมุนเวียน ได้จัดทำสถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2554 พบว่า จากการที่รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่ผลิตได้ภายในประเทศ โดยได้จัดทำแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน 15 ปี เพื่อผลักดันให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้น ได้ส่งผลให้การใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบไฟฟ้า ความร้อน เชื้อเพลิงชีวภาพ และก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์ ในปี 2554 เพิ่มขึ้นจากปีก่อน ร้อยละ 19.4 คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 12.1 ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยส่วนเหลือจากอ้อย เช่นชานอ้อยหรือยอดและใบอ้อย แกลบและฟางข้าว และส่วนเหลือของปาล์มน้ำมัน เช่น กะลา ทะลาย หรือเส้นใยปาล์ม จัดเป็นกลุ่มชีวมวลที่มีสัดส่วนสูงที่สุด คิดเป็น 85% ของศักยภาพชีวมวลทั้งหมดของประเทศ [6]

ตารางที่ 2.1 สัดส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล [7]

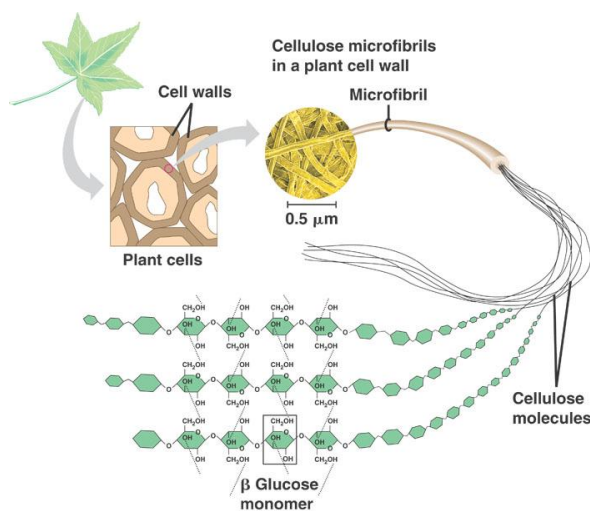
ชนิด	ผลผลิต	Crop/residue ratio	Energy content (MJ/kg)
อ้อย	ชานอ้อย	0.25	9.25
ข้าวเปลือก	แกลบ	0.23	14.27
	ฟางข้าว	0.45	10.24
มันสำปะหลัง	ลำต้นมันสำปะหลัง	0.08	18.42
ปาล์มน้ำมัน	ทะลายปาล์ม	0.43	17.86
	เส้นใยปาล์ม	0.15	17.62
	กะลาปาล์ม	0.05	18.46
มะพร้าว	กาบมะพร้าว	0.36	16.23
	กะลามะพร้าว	0.16	17.93

2.3 องค์ประกอบสำคัญของชีวมวล [8-9]

ชีวมวลเป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วย เซลลูโลส (Cellulose) 25-50% เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) 20-35% ลิกนิน (Lignin) 18-35% และสารสกัดบางจำพวก (Extractives) ซึ่งสร้างขึ้นจากกลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ โครงสร้างส่วนใหญ่มีน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides)

1. เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นเส้นใยของพอลิแซคคาไรด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช เซลลูโลสเกิดจากหน่วยของเซลโลบิโอสหลายหน่วยต่อกันเข้าไปเข้ามา และถือเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมากที่สุด เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักในไม้ ปอ และฟาง สมบัติทางเคมีที่สำคัญของเซลลูโลส คือ เป็นตัวที่ไม่ละลายและไม่ทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังภาพที่ 2.4



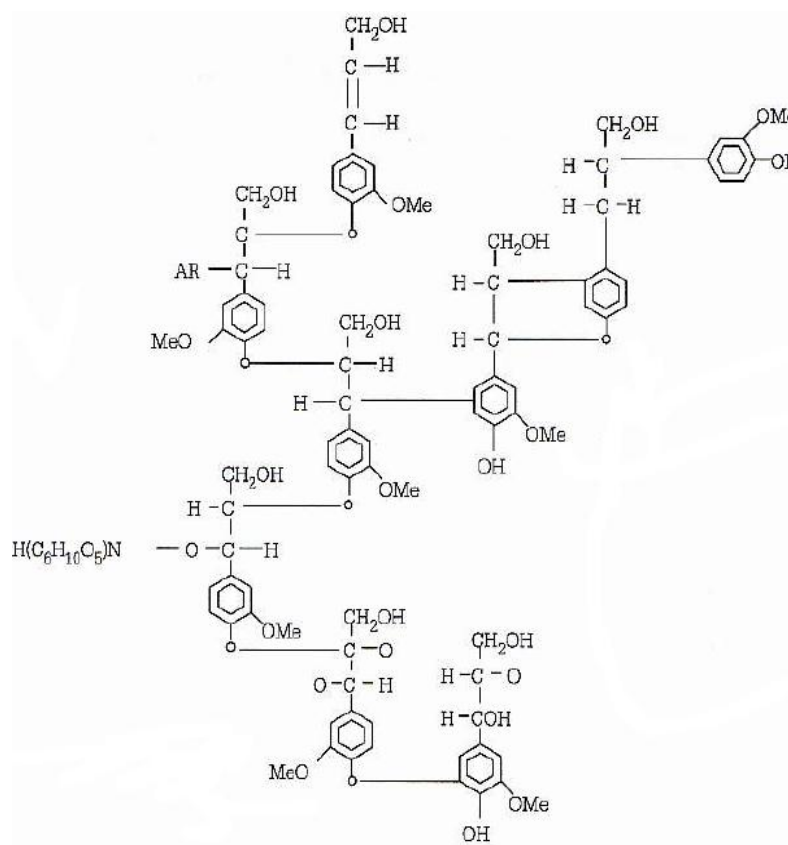
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของเซลลูโลส [10]

2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่อยู่ในรูปอสัณฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลส โดยสายโซ่พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสนั้นเกิดจากการผสมผสานกันของพอลิแซคคาไรด์หลายชนิด เช่น เพนโตแซน (Pentosan) เฮกโซแซน (Hexosan) และพอลิยูโรนิน (Polyuronides) เฮมิเซลลูโลสมีมวลโมเลกุลต่ำกว่า ส่งผลให้ละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส

3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในพืช ประกอบด้วยโครงสร้างแอมโรแมติกของหน่วยฟีนิลโพรเพนที่เชื่อมต่อกันด้วยคาร์บอนสายตรง (Aliphatic chain) มีลักษณะเป็นสามมิติ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ลิกนินมีคุณลักษณะที่เหมาะสมในการเป็นผนังเซลล์ของพืชที่เป็นเสมือนการยึดและเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์พืช ลิกนินอยู่ในรูปอสัณฐาน และละลายได้ดีกว่าเซลลูโลส สามารถแยกออกจากเนื้อไม้ได้โดยใช้ไอน้ำ ลิกนินมีความต้านทานต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และไม่สามารถถูกย่อยโดยแบคทีเรีย



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน [8]

เป็นที่น่าสนใจว่าสารประกอบเซลลูโลสส่วนใหญ่เป็นประเภทกลุ่มอะลิฟาติกที่มีอะตอมของออกซิเจนร่วมอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่พบในเนื้อไม้ แต่กลับไม่พบสารประกอบแอมโรแมติกเลย สารประกอบเซลลูโลสเหล่านี้มีหมู่ฟังก์ชัน (Functional group) หลัก ได้แก่ ไฮดรอกซิล (-OH) และเมทานอล (-CH₂OH) แต่ในลิกนินส่วนใหญ่เป็นสารประกอบของวงแหวนเบนซีน

โดยสารประกอบแอมโรแมติกเหล่านี้ ไม่ได้รวมกันเป็นกลุ่มก้อนใหญ่เหมือนกับในเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งหมู่ฟังก์ชันหลักในลิกนิน ได้แก่ เมทอกซี (-OCH₃) โดยมีไฮดรอกซิลและเมทานอลปนอยู่เล็กน้อย ลิกนินจึงค่อนข้างมีขี้และถือเป็นสารแอมโรแมติกโดยธรรมชาติ

ชีวมวลที่เป็นเศษวัสดุการเกษตรนั้น มีองค์ประกอบแตกต่างจากชีวมวลประเภทไม้ วัสดุเหล่านี้มีสารประกอบเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ พบลิกนินน้อยมากหรือไม่มีเลยจึงพบองค์ประกอบที่เป็นแอมโรแมติกน้อยกว่าชีวมวลที่เป็นไม้ และยังพบว่ามีส่วนที่เป็นโปรตีนอยู่ค่อนข้างมาก โดยตัวอย่างองค์ประกอบของชีวมวลแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของชีวมวล [8]

ชีวมวล	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)	อื่นๆ (%)
ฟางข้าว	38	36	16	10
ขี้ข้าวโพด	32	44	13	11
ชานอ้อย	35	25	20	20
กระดาศ	76	13	11	0
ไม้ไผ่	41	26	27	7

2.4 ส่วนประกอบของชีวมวล [8]

ส่วนประกอบของชีวมวลหรือสสารทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1. ความชื้น (Moisture)

ความชื้นหมายถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ ชีวมวลส่วนใหญ่จะมีความชื้นค่อนข้างสูงเพราะเป็นผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ถ้าต้องการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ชีวมวลควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 50

2. ส่วนที่เผาไหม้ได้ (Combustible substance)

ส่วนที่เผาไหม้ได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ สารระเหย (Volatiles matter) และคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) สารระเหย คือส่วนที่ลุกเผาไหม้ง่าย สลายตัวเมื่อได้รับความร้อนในที่ไม่มีอากาศ ดังนั้นชีวมวลที่มีค่าสารระเหยสูงแสดงว่าติดไฟได้ง่าย ส่วนคาร์บอนคงตัวเป็นของแข็งที่เป็นคาร์บอนที่เหลืออยู่

3. เถ้า (Ash)

เถ้าคือส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้ ชีวมวลส่วนใหญ่มีเถ้าประมาณร้อยละ 1-3 ยกเว้นแกลบ และฟางข้าวมีสัดส่วนเถ้าประมาณร้อยละ 10-20 ซึ่งจะมีปัญหาการเผาไหม้และกำจัดพอสมควร

อย่างไรก็ตามชีวมวลแต่ละชนิดมีสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และองค์ประกอบที่ หลากหลายแตกต่างกันไปดังตารางที่ 2.3 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาองค์ประกอบเหล่านี้ เพื่อหา วิธีในการนำชีวมวลไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีของชีวมวลแต่ละชนิด [5]

องค์ประกอบ	แกลบ	ฟางข้าว	ชานอ้อย	ไม้ ยางพารา	ซัง ข้าวโพด	กะลา ปาล์ม
Proximate analysis						
Moisture, %	12.0	10.0	50.7	45.0	40.0	12.0
Ash, %	12.7	10.4	1.4	1.6	0.9	3.5
Volatile Matter, %	56.5	60.7	42.0	45.7	45.4	68.2
Fixed Carbon, %	18.9	18.9	5.9	7.7	13.7	16.3
Ultimate Analysis						
Carbon, %	37.5	38.2	21.3	25.6	28.2	44.4
Hydrogen, %	4.4	5.0	3.1	3.2	3.4	5.0
Oxygen, %	33.3	35.3	23.3	24.5	27.4	34.7
Nitrogen, %	0.2	0.6	0.1	0.1	0.1	0.3
Sulfur, %	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Chlorine, %	0.1	Na	na	0.0	0.1	0.0
Ash, %	12.7	10.4	1.4	1.6	0.9	3.5
Moisture, %	12.0	10.0	50.7	45.0	40.0	12.0
Other Characteristics						
Bulk Density, kg/m ³	150	125	120	450	na	400
Higher heating value, kJ/kg	14,755	13,650	9,243	10,365	11,298	18,267
Lower heating value, kJ/kg	13,517	12,330	7,368	8,600	9,615	16,900

2.5 ค่าความร้อน [8]

ค่าความร้อน (heating value) คือ พลังงานความร้อนต่อน้ำหนักที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง โดยมีจุดเริ่มอยู่ที่อุณหภูมิอ้างอิง ค่าความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ค่าความร้อนสูง (HHV) และค่าความร้อนต่ำ (LHV) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนต่ำ คือ ค่าความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากการเผาไหม้กลายเป็นไอ ส่วนค่าความร้อนสูง คือ ค่าความร้อนที่ให้ออกมาหลังการเผาไหม้สมบูรณ์ เมื่อน้ำที่อยู่ในเชื้อเพลิงและที่เกิดจากผลผลิตการเผาไหม้อยู่ในสถานะของเหลว โดยค่าความร้อนสูงมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนต่ำ ดังนี้

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

ในการหาค่าความร้อนมักจะหาจากการทดลองด้วยเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ ค่าความร้อนของชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงในรูปของสัดส่วนคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) และกำมะถัน (S) หรือในรูปของสัดส่วนคาร์บอนคงตัว (FC) สารระเหย (VM) ความชื้น (MC) และเศษเถ้า นอกจากนี้อาจหาค่าความร้อนได้จากการใช้สูตรคำนวณอย่างง่าย ดังต่อไปนี้

สูตรของดูลอง (Dulong formula):

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

สูตรของเดเมียบาส (Demirbas):

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

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

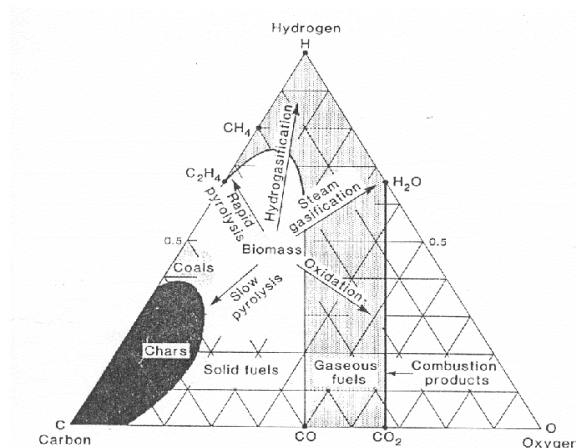
2.6 กระบวนการเปลี่ยนชีวมวลเป็นพลังงาน [8,11-12]

การแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน คือ กระบวนการที่จะนำพลังงานจากชีวมวลมาใช้ประโยชน์ โดยการทำให้เกิดการแตกตัวของอินทรีย์สารที่อยู่ในชีวมวล และผลิตพลังงานออกมา เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานแบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน และกระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี ซึ่งแต่ละกระบวนการมีวิธีการหลายรูปแบบ และให้ผลิตภัณฑ์ออกมาในรูปแบบที่แตกต่างกัน

2.6.1 กระบวนการทางเคมีความร้อน

การเปลี่ยนชีวมวลต่างๆ ให้เป็นพลังงาน โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีความร้อน (Thermochemical conversion) เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานความร้อนทำให้โครงสร้างทางเคมีของชีวมวลนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นพลังงานตามความต้องการ โดยเริ่มจากวิธีที่ง่ายที่สุด คือ การเผาไหม้โดยตรง การย่อยสลายด้วยความร้อน และการแปรรูปเป็นแก๊สชีวมวล วิธีการที่แตกต่างกันจะให้ผลิตภัณฑ์ออกมาที่แตกต่างกันซึ่งอาจอยู่ในรูปของแข็ง ของเหลว หรือแก๊สแล้วแต่กรณี กระบวนการทางเคมีความร้อนอาจแบ่งออกเป็น 4 วิธีคือ คือ กระบวนการเผาไหม้ (Combustion) กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) กระบวนการแก๊ซิฟิเคชัน (Gasification) และกระบวนการทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction)

ความแตกต่างของแต่ละกระบวนการข้างต้นนั้น ขึ้นอยู่กับภาวะที่ใช้ วัตถุประสงค์ หรือผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ต้องการ กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้ภาวะในการดำเนินงานที่รุนแรงน้อยกว่า เมื่อเทียบกับกระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน แต่เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ไม่แน่นอน อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ทำให้กระบวนการแปรรูปทางเคมีความร้อน มีความน่าสนใจมากกว่าทั้งในแง่ของปริมาณและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีความหลากหลายกว่า กระบวนการแปรรูปทางชีวเคมี โดยแผนภาพอธิบายกระบวนการเหล่านี้ไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แสดงดังกราฟสามเหลี่ยมดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชีวมวล [13]

1. กระบวนการเผาไหม้ (Combustion)

การเผาไหม้โดยตรง เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลโดยใช้ความร้อนในที่ที่มีอากาศ เพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ สารอินทรีย์ในชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานออกมา วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในรูปแบบของการใช้ฟืนและถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงการหุงต้ม ไม้ฟืนที่นำมาใช้อาจเป็นไม้จากป่าธรรมชาติ ป่าที่ปลูกเพื่อผลิตพลังงาน หรือเศษไม้ที่เหลือจากอุตสาหกรรมไม้ ประสิทธิภาพของการเผาไหม้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น ปริมาณ ความชื้นของชีวมวล เต็มเผา ปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ และอุณหภูมิในการเผาไหม้ เนื่องจากเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงพลังงานส่วนหนึ่งสูญเสียไปในการระเหยน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ต่ำ องค์ประกอบของเชื้อเพลิงแข็งประกอบไปด้วยส่วนที่ติดไฟ 2 ส่วน คือ สารระเหยง่าย และคาร์บอน ในกระบวนการเผาไหม้สารระเหยง่ายมักสูญเสียไป โดยทั่วไปเชื้อเพลิงชีวมวลมีพลังงานอยู่ในสารระเหยง่ายถึง 3 ใน 4 ส่วนของพลังงานทั้งหมด ถ้าไม่มีการเก็บสารระเหยนี้กลับมา ก็จะทำให้สูญเสียพลังงานไปในรูปของสารระเหย

กระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงเกิดขึ้นสองช่วง ในช่วงแรกเป็นการเผาไหม้ของสารระเหย ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคของแก๊ส เป็นปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับแก๊ส และช่วงหลังเป็นการเผาไหม้ของกากของแข็งที่เหลืออยู่ คือ ถ่านชาร์ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช้า ภาวะที่ใช้ดำเนินการ คือ อุณหภูมิตั้งแต่ 800 - 1400 องศาเซลเซียส ระบบการเผาไหม้โดยทั่วไปจะใช้อากาศเกินพอ เพื่อให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ทั้งนี้ยังมีผลการสูญเสียความร้อน เนื่องจากการใช้อากาศเกินพอน้อยเกินไปจนทำให้เกิดการเผาไหม้ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า การสูญเสียศักยภาพทางความร้อน (Potential heat loss) อยู่ในรูปขององค์ประกอบแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) หรือ คาร์บอน (C)

2. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพทางเคมีโดยการสลายคาร์บอนในเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นแก๊ส โดยการเผาชีวมวลในอุปกรณ์ที่ควบคุมปริมาณอากาศที่ใช้ในการเผาไหม้ ก๊าซที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า แก๊สชีวมวล ซึ่งจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน แก๊สชีวมวลที่ได้ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังมีแก๊สมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ กระบวนการแปรรูปชีวมวลเป็นแก๊สชีวมวลเป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายชีวมวลด้วยความร้อน แต่จะเกิดที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 600 องศาเซลเซียสขึ้นไป

3. กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)

เป็นกระบวนการย่อยสลายชีวมวลโดยใช้ความร้อนในที่มีอากาศปริมาณจำกัด ซึ่งจะเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปของแข็ง ของเหลว และแก๊ส การย่อยสลายด้วยความร้อนเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีแบบย้อนกลับไม่ได้ (Irreversible chemical process) ที่ใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 150 องศาเซลเซียสขึ้นไป และจะต้องป้อนอากาศในปริมาณจำกัด แก๊สที่ได้จากกระบวนการนี้ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แก๊สมีเทน (CH_4) และเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆอีกเล็กน้อย ของแข็งที่เหลือจากกระบวนการนี้ได้แก่ ถ่าน และขี้เถ้า (Ash) สำหรับส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำมัน น้ำ และน้ำมันดิน (Tar)

การย่อยสลายด้วยความร้อนแบบดั้งเดิม (Conventional pyrolysis) เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 600 องศาเซลเซียส เช่น กระบวนการเผาถ่าน ซึ่งก็คือการย่อยสลายไม้ด้วยความร้อน เป็นวิธีที่ทำกันมาแต่โบราณ ไอที่ได้จากกระบวนการจะระเหยไป ปริมาณอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงในการเผาไหม้เป็นตัวแปรที่สำคัญ และมีผลต่อทั้งอุณหภูมิและผลิตภัณฑ์ที่ได้

4. กระบวนการทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction)

เป็นกระบวนการแปรรูปเชื้อเพลิงแข็งให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว (Liquid fuel) การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลทำได้โดยการแยกคาร์บอนออกหรือการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction) เชื้อเพลิงเหลวที่ได้สามารถนำมากลั่นในกระบวนการกลั่นน้ำมัน จะได้น้ำมันสำหรับรถยนต์ และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น พลาสติก และสารละลายต่างๆ (Solvent)

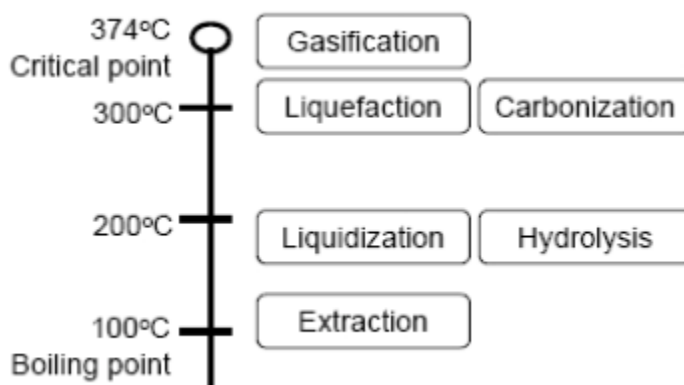
กระบวนการการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ การผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยตรง (Direct liquefaction) เป็นการแปรรูปชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้กระบวนการเดียว (Single process) และการผลิตเชื้อเพลิงเหลวโดยทางอ้อม (Indirect liquefaction) เป็นการนำชีวมวลมาผ่านกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงแก๊สก่อน ในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงเหลวนี้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ เวลา อุณหภูมิ และความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา รวมถึงอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลวได้รวดเร็วมีปริมาณมากขึ้น ภาวะที่ใช้ในการดำเนินการอยู่ที่ 350 ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 500 ถึง 4,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการส่วนใหญ่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ และต้องให้อัตราการเพิ่มความร้อนอย่างรวดเร็ว เพื่อป้องกันการรวมตัวของโมเลกุลที่แตกตัวจากการให้ความร้อนกลายเป็นพอลิเมอร์อีกครั้ง

ไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟคชัน (Hydrothermal Liquefaction)

กระบวนการการลิกวิแฟคชัน ชีวมวลในน้ำที่มีความดันสูงประมาณ 10 เมกะพาสคัล และอุณหภูมิสูงประมาณ 300-350 องศาเซลเซียส สารชีวมวลจะถูกเปลี่ยนเป็นของเหลว และของแข็ง เรียกว่าทาร์ ทาร์ที่มีน้ำหนักเบาจะละลายน้ำได้ สำหรับทาร์ที่มีน้ำหนักมากจะได้จากการผสมกันกับซาร์ ดังนั้นจึงเกิดผลิตภัณฑ์ ได้แก่ สารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ และสารจำพวกน้ำมัน

คุณลักษณะของไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟคชัน

ไฮโดรเทอร์มัลลิกวิแฟคชันนั้นทำปฏิกิริยาในน้ำ วัตถุประสงค์ตั้งต้นไม่ต้องผ่านกระบวนการอบแห้ง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับสารชีวมวลที่มีปริมาณความชื้นสูง เช่น สารชีวมวลน้ำ กากอินทรีย์ ชยะ และอื่นๆ นอกจากนั้นปฏิกิริยาหลายชนิดสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.7 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่มีความดันและอุณหภูมิสูงประมาณ 100 องศาเซลเซียส สารที่ละลายได้จะละลายในน้ำและเหมาะกับการสกัดสาร เหนืออุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เกิดการไฮโดรไลซิส และชีวมวลจำพวก เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โปรตีนและอื่นๆจะถูกย่อยสลายจากพอลิเมอร์เป็นโมโนเมอร์ และที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1 เมกะพาสคัล ของแข็งจำพวกสารชีวมวลจะถูกทำให้กลายเป็น Slurry และสารจำพวกน้ำมันยังไม่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียสและความดัน 10 เมกะพาสคัล ลิกวิแฟคชันเกิดขึ้นและจะได้สารจำพวกน้ำมัน ผลิตภัณฑ์หลักจะถูกซาร์และตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนให้กลายเป็น (Hydrothermal carbonization)



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในน้ำที่ความดันและอุณหภูมิสูง [8]

2.6.2 กระบวนการทางชีวเคมี

การเปลี่ยนชีวมวลต่างๆ ให้เป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ โดยอาศัยกระบวนการทางชีวเคมี (Biochemical conversion) เป็นการนำประโยชน์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะไม่ใช้ออกซิเจนหรือออกซิเจน กระบวนการนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ

1. การย่อยสลายสารอินทรีย์ในภาวะไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายในที่ที่ไม่มีอากาศ (Anaerobic digestion) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของชีวมวล โดยกระบวนการชีวเคมีในที่ที่ไม่มีอากาศให้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นแก๊สผสมระหว่างมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และอาจมีแก๊สอื่นปนอยู่บ้างเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไฮโดรเจน (H_2) และไนโตรเจน (N_2) ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพที่ได้จะขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สมีเทนในแก๊สผสม โดยปกติแก๊สมีเทนบริสุทธิ์มีค่าความร้อน 8,500 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร แก๊สมีเทนที่พบในแก๊สชีวภาพเป็นชนิดเดียวกับที่พบในแก๊สธรรมชาติ ในแก๊สธรรมชาติมีแก๊สมีเทนร้อยละ 80 ในแก๊สชีวภาพมีแก๊สมีเทนร้อยละ 50 – 75 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ และสภาวะแวดล้อมที่เกิดการย่อยสลาย ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณแก๊สมีเทน ถ้าแก๊สมีเทนมีเป็นองค์ประกอบร้อยละ 60 จะมีค่าความร้อนประมาณ 5,700 กิโลแคลอรีต่อลูกบาศก์เมตร การนำแก๊สชีวภาพมาเป็นพลังงานสามารถใช้ได้หลายทาง เช่น เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและให้แสงสว่าง เป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมันเตาในการผลิตไอน้ำในหม้อไอน้ำ หรือใช้ในการผลิตไฟฟ้า

2. การหมัก (Fermentation)

กระบวนการหมักเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ (Alcoholic fermentation) คือ การแตกตัวของสารประเภทไฮโดรคาร์บอนเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ (เอทานอล) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เอทานอลที่เกิดขึ้นสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้โดยผสมกับแก๊สโซลีนในอัตราส่วนร้อยละ 10 ต่อ 90 หรือ 20 ต่อ 80 แก๊สที่ได้เรียกว่า แก๊สโซลล์

กระบวนการผลิตเอทานอลจากวัสดุการเกษตรโดยผ่านการหมักประกอบไปด้วยกระบวนการหลัก 4 ขั้นตอน สรุปได้ดังนี้

- (1) การจัดหาวัตถุดิบในการผลิต วัตถุดิบที่นิยมใช้จะเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ พวกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบ เช่น มันสำปะหลัง ข้าว ข้าวโพด พวกที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เช่น อ้อย ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล โดยถ้าวัตถุดิบเป็นน้ำตาลสามารถใช้ในการหมักได้ทันที แต่ถ้าเป็นแป้งต้องเปลี่ยนน้ำตาลเสียก่อน

- (2) กระบวนการหมัก กระบวนการหมักจะต้องใช้ยีสต์ซึ่งเป็นจุลินทรีย์พวกหนึ่งใส่ลงในถังหมักโดยไม่ต้องมีอากาศ ยีสต์จะผลิตเอทานอลออกมา กระบวนการหมักใช้เวลา 1 – 2 วัน ซึ่งจะได้เอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 80
- (3) กระบวนการกลั่น เอทานอลที่ได้จากการหมัก เมื่อต้องการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง จะต้องไม่มีน้ำปนอยู่ ในการหมักจะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นต่ำ จึงต้องทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นมากขึ้น โดยการกลั่นลำดับส่วนเอาน้ำออก เมื่อนำเอทานอลที่มีน้ำปนไปกลั่น เมื่อถึงอุณหภูมิจุดเดือดของเอทานอลที่ 78 องศาเซลเซียส เอทานอลจะเดือดกลายเป็นไอแยกออกมาจากน้ำแล้วจึงนำไอของเอทานอลไปควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า 78 องศาเซลเซียส ก็จะได้เอทานอลที่มีความเข้มข้นสูง
- (4) การกำจัดของเสีย หลังจากที่แยกเอทานอลออกไปกลั่นแล้วจะเหลือส่วนของสารละลายที่เรียกว่า น้ำกากส่า ซึ่งจะมีน้ำตาล สารอินทรีย์ และเซลล์ยีสต์ปนอยู่มากมายก่อนที่จะปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำลำคลองต้องมีการบำบัดเสียก่อน

2.6.3 กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน (Thermal Cracking)

กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน คือ การเปลี่ยนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กด้วยอุณหภูมิสูง การแตกตัวในลักษณะนี้ถ้าเป็นไปได้ควรแตกให้พอดี ซึ่งถือว่ามีทางเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ในการแตกตัวโดยความร้อนนี้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะส่วนที่มีสายโซ่ของโอเลฟิน และไดโอเลฟิน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันเองต่อไป

ปฏิกิริยา Thermal cracking จัดเป็นปฏิกิริยาอนุมูลอิสระ (Free radical) แบบห่วงโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- (1) การเริ่มต้น (Initiation) คือ การเกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งทำให้แขนยึดกันระหว่างอะตอมคาร์บอนแตกออกจากกัน และเกิดเป็นอนุมูลอิสระอันเป็นต้นกำเนิดของปฏิกิริยาอื่นๆต่อไป
- (2) การเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Chain – carrying) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่อง คือ เกิดการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์ และแตกเป็นโมเลกุลย่อยๆออกไปพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น เช่นเดียวกับอนุมูลอิสระซึ่งอาจไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น เกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ และเกิดไฮโดรคาร์บอนที่เล็กลง

- (3) การหยุดปฏิกิริยา (Termination) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนั้น สามารถหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยการทำปฏิกิริยากันเอง รวมเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ที่มีความเสถียรขึ้น

2.6.4 กระบวนการแตกโมเลกุลโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking)

กระบวนการนี้ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

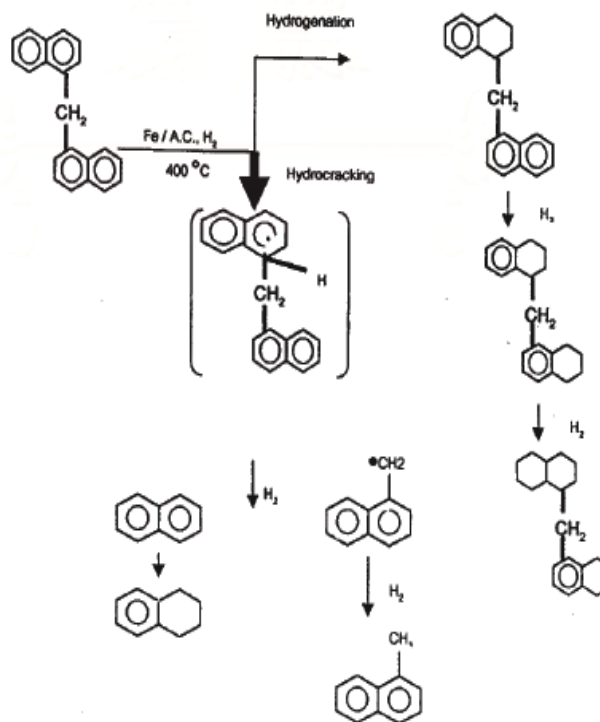
- (1) Non catalyst hydrocracking เป็นปฏิกิริยาที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ความร้อนกับแก๊สไฮโดรเจนที่เติมลงไป ช่วยในการแตกพันธะ C – C ได้เป็นอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอน หรือเรียกว่า Hydrolysis
- (2) Monofunctional hydrocracking เป็นการแตกพันธะ C – C โดยแก๊สไฮโดรเจนที่เติมลงไปช่วยในการแตกตัวโดยเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบนพื้นที่ที่ว่างไวของโลหะออกไซด์ของโลหะ หรือซัลไฟด์ หรือเรียกว่า Hydrogenolysis
- (3) Bifunctional hydrocracking เกิดการแตกพันธะ C – C โดยตัวเร่งปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนที่เติมเข้าไป โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นประกอบไปด้วยการแตกตัวที่เกิดบริเวณตัวรองรับที่มีความเป็นกรด และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันบนโลหะที่กระจายบนตัวรองรับ หรือเรียกว่า Hydrocracking

2.6.5 กระบวนการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการทางเคมี ผ่านการเติมไฮโดรเจนทำให้เกิดการแตกตัวของคาร์โบเนียมไอออนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลคือเกิดผลิตภัณฑ์เป็นสายโซ่ที่มีกิ่งแตกแขนงมากมาย ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาของพาราฟิน และแนฟทีน เริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินที่บริเวณที่เป็นโลหะของสารเร่งปฏิกิริยา โอเลฟินไปทำให้เกิดคาร์โบเนียมที่บริเวณกรดต่อไป จากนั้นเกิดการแตกตัวและถูกเติมไฮโดรเจนทำให้อิ่มตัวทันที ปฏิกิริยาเกิดขึ้นที่ชั้นต่างๆแสดงในรูปที่ 2.8

ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภททำหน้าที่ 2 อย่าง (Dual function catalyst) กล่าวคือ ทำหน้าที่ทั้งแตกพันธะคาร์บอน และเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารพวกซิลิกา-อะลูมินา สำหรับแตกตัวพร้อมด้วยโลหะสำหรับเติมไฮโดรเจนร่วมกัน ปฏิกิริยาที่เกิดตรงผิวโลหะเป็นการเติมไฮโดรเจนซึ่งช่วยให้บริเวณนั้นมีฤทธิ์เป็นกรด (Acid site) เพราะต้องคอยเติมพวกไฮโดรเจน เพื่อกำจัดส่วนที่ทำให้เกิดได้ก็ออกไป

ปฏิกิริยาที่เกิดรวมแล้วเป็นประเภทคายความร้อน จึงทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ การออกแบบกระบวนการจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิขึ้นอย่างดี เพราะหากมาสามารถควบคุมได้อาจเกิดเป็นโค้ก และตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ โดยแสดงกลไกการแตกตัวได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 กลไกการแตกตัวโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ แบบ Hydrogenation และ Hydrocracking ในสารละลาย DNМ (Di-naphthyl-methane) ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส [14]

2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยา [15-18]

ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สาร (Substance) ที่เติมลงไปในปฏิกิริยาในจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น แล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) เร็วขึ้นโดยสารนั้นจะไม่ถูกใช้ไป

2.7.1 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ไม่ไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา
2. ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
3. ต้องเป็นสสาร

การที่บอกว่าเมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดแล้วจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับคืนมาในปริมาณที่เท่าเดิม โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งตามความจริงตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีการเปลี่ยนแปลงไปในโครงสร้างและองค์ประกอบเนื่องจากกลไกของปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปเกี่ยวข้อง เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะบริสุทธิ์ ปกติจะมีการเปลี่ยนแปลงของความหยาบของผิวหน้าหรือโครงสร้างของผลึก อัตราส่วนของออกซิเจนต่อโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เป็นโลหะออกไซด์ปกติจะเปลี่ยนไป เนื่องจากอุณหภูมิและองค์ประกอบของสารที่มาสัมผัส

2.7.2 ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reaction)

คือปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เข้ามาช่วยเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalytic reaction)
2. ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ (Heterogenous catalytic reaction)
3. ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอนไซม์

โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ โดยทั่วไปมีสถานะเป็นของแข็ง ใช้เร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นเป็นของเหลวหรือแก๊ส ตัวเร่งปฏิกิริยาของแข็งนั้นมีความแข็งแรงเชิงกล ทนความดันและอุณหภูมิสูง สามารถแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ได้ง่าย

- ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือสารว่องไวเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยา (Active component) และตัวรองรับ (Support) หรือตัวพา (Carrier) มักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูงเพื่อให้เกิดการถ่ายโอนการกระจายตัวของสารว่องไวในการทำปฏิกิริยามากขึ้น แต่ในบางกรณี ตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีเพียงสารว่องไวเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างสารว่องไวและปฏิกิริยาที่ใช้แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างสารว่องไวและปฏิกิริยาที่เร่ง [19]

สารกัมมันต์	ธาตุ/สารประกอบ	ปฏิกิริยาที่เร่ง
โลหะ	Fe, Co, Ni, Cu, Ru, Rh, Pd, Ir, Pt, Au	Hydrodeoxygenation, steam reforming, hydrocarbon reforming, dehydrogenation, synthesis ammonia, Fischer-Tropsch, oxidations
ออกไซด์	ออกไซด์ ของ V, Mo, Fe, Cu, Mo, W, rare earth, Al, Si, Sn, Pb, Bi	Complete and partial oxidation of hydrocarbons and CO, acid-catalyzed reactions (e.g. cracking, isomerization, alkylation), methanol synthesis
ซัลไฟด์	ซัลไฟด์ ของ Co, Mo, W, Ni	Hydrotreating (hydrodesulfurization, hydrodenitrogenation, hydrodeoxygenation), hydrogenation
คาร์ไบด์	คาร์ไบด์ ของ Fe, Mo, W	Hydrogenation, Fischer-Tropsch synthesis

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของตัวรองรับและตัวส่งเสริม [19]

องค์ประกอบ	ชนิดของวัสดุ	ตัวอย่าง
ตัวรองรับ	Metal oxides	Transition metal and Group IIIS (Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , TiO_2)
	Metal oxides	Alkali or alkaline earth (K_2O , PbO)
	Stable, high surface area	Group IIIA, alkaline earth and transition metal oxides
	Metal oxides, carbons	(Al_2O_3 , SiO_2 , MgO) zeolites and activated carbon, transition metal oxides (MoO_2 , CuO)
ตัวส่งเสริม	Metal sulfides	Transition metal sulfides (MoS_2 , Ni_3S_2)

ตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวอาจมีองค์ประกอบที่ช่วยส่งเสริมการเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้นเรียกว่า ตัวส่งเสริม (Promoter) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารที่ใส่ลงไปปริมาณน้อยเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติเคมีหรือกายภาพของสารว่องไวหรือตัวรองรับ ซึ่งอาจเพิ่มแอกทิวิตี (Activity) การเลือกเกิดปฏิกิริยา (Selectivity) และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวอย่างของตัวรองรับและตัวส่งเสริมแสดงดัง ตารางที่ 2.5

1. **สารว่องไว** นอกจากตัวอย่างในตารางที่ 2.4 สารว่องไวยังสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มตามหน้าที่หลัก ได้แก่

- **โลหะ** มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิส และปฏิกิริยาออกซิเดชัน ตัวอย่างคือ นิกเกิล แพลเลเดียม แพลทินัม ทองแดง และเงิน การที่โลหะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันได้ เพราะโมเลกุลของแก๊สไฮโดรเจนถูกดูดซับแบบแตกตัวบนโลหะเหล่านี้ได้ และเกิดปฏิกิริยาได้ทันที

- **โลหะออกไซด์** แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนและปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ เช่น สารประกอบเชิงซ้อนของโมลิบดีต (Molybdate) และออกไซด์ของโลหะผสม ออกไซด์ประเภทนี้มีโครงสร้างเป็นไอออนิกซึ่งมีจำนวนออกซิเจนไม่แน่นอน ซึ่งออกซิเจนเคลื่อนย้ายออกจากโครงผลึกได้ อีกกลุ่มคือกลุ่มตัวเร่งปฏิกิริยาที่เร่งปฏิกิริยาการดั่งไฮโดรเจนออก ได้แก่ Fe_2O_3 , ZnO , Cr_2O_3/Al_2O_3 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้ ออกซิเจนสามารถจับอยู่กับโลหะอย่างแข็งแรงและจะต้องไม่ถูกรีดิวซ์โดยไฮโดรเจน ณ อุณหภูมิที่ใช้ในสภาวะการเกิดปฏิกิริยา

- **ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด** สามารถเร่งปฏิกิริยาได้หลายชนิด ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มักประกอบด้วยธาตุสองชนิดขึ้นไปเชื่อมต่อกันอย่างแข็งแรงด้วยอะตอมของออกซิเจน ตัวอย่างเช่น สารประกอบของซิลิกา-อะลูมินา และซีโอไลต์ชนิดต่างๆ

- **โลหะบนกรด** อาจเรียกได้ว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำหน้าที่สองอย่าง (Bifunctional catalyst) ตัวเร่งปฏิกิริยานี้ประกอบด้วยโลหะและองค์ประกอบที่เป็นกรด ทั้งสองส่วนต่างก็เร่งขั้นตอนในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา แต่อาจเร่งในขั้นตอนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก่ แพลเลเดียมบนซีโอไลต์ ($Pd/Zelite$) เร่งปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิส

2. ตัวรองรับหรือตัวพา

ความคิดเริ่มต้นของตัวรองรับ คือ เป็นสารเฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง เช่น โลหะแพลทินัม สำหรับการใช้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด คือ ปรับปรุงสมบัติด้านเชิงกลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่อ่อน แต่อย่างไรก็ตามตัวรองรับอาจแสดงความว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาอีกด้วย ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา และภาวะของปฏิกิริยา และอาจทำให้ปฏิกิริยาบางส่วนกับสารประกอบอื่นๆของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างกระบวนการผลิต เช่นเดียวกับตัวรองรับสามารถทำให้โครงสร้างที่ว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยามีความเฉื่อย

การเลือกตัวรองรับพิจารณาจากการมีลักษณะที่ต้องการของตัวรองรับ รวมถึงผลทางด้านเคมี และสมบัติกายภาพก็มีความสำคัญ ซึ่งประกอบไปด้วย

- เชื้อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
- มีสมบัติเชิงกลที่ต้องการ ทนต่อแรงกด มีความแข็ง ทนต่อการขัดสี
- เสถียรภายใต้ภาวะของปฏิกิริยา และภาวะที่ใช้ในการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
- พื้นผิวสูงและมีความพรุน แต่ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งานด้วย การมีความพรุน รวมถึงขนาดของรูพรุนและการกระจายของรูพรุนเหมาะสม การมีพื้นที่ผิวสูงหมายถึงมีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก แต่ถ้ารูพรุนเล็กเกินไปจะทำให้เกิดการอุดตันได้
- ราคาถูก ซึ่งช่วยให้ต้นทุนในการผลิตตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าต่ำ

- ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยารีดอกซ์

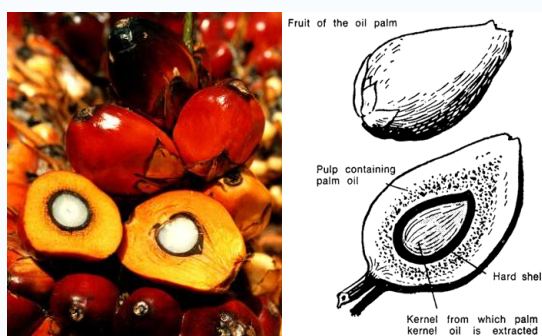
กลไกการถ่ายเทมวลสารซึ่งเข้าทำปฏิกิริยาบนตัวเร่งปฏิกิริยามี 7 ขั้นตอน ได้แก่

1. การนำพาสารตั้งต้นจากของไหลภายนอกไปยังผิวสัมผัสระหว่างของไหลและของแข็ง (พื้นผิวด้านนอกของอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา)
2. การแพร่ภายใน (Intraparticle diffusion) ของสารตั้งต้นเข้าสู่อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา (ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นรูพรุน)
3. การดูดซับของสารตั้งต้นที่ Active site ภายในของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา
4. การเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตั้งต้นที่ถูกดูดซับไปเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งยังคงถูกดูดซับ (ปฏิกิริยาบนพื้นผิว-ขั้นตอนของปฏิกิริยาที่แท้จริง)
5. การคายซับของผลิตภัณฑ์ที่ถูกดูดซับ
6. การแพร่ของผลิตภัณฑ์จาก Active site ของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาออกสู่ผิวด้านนอกของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา
7. การนำพาผลิตภัณฑ์จากพื้นผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับของแข็งไปยังอนุภาคของไหลที่ภาวะสมดุล

กระบวนการทั้ง 7 เกิดขึ้นสมบูรณ์บนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นรูพรุน แต่เมื่อใดที่ตัวเร่งปฏิกิริยามีรูพรุนขนาดใหญ่หรือมีรูพรุนน้อยมากจนนับไม่ได้ว่ามีรูพรุนปรากฏอยู่ ทำให้การแพร่หรือการถ่ายโอนมวลเกิดได้อย่างรวดเร็ว จนถือได้ว่ากระบวนการโดยรวมไม่มีขั้นตอน 2 และ 6

2.8 ปาล์มน้ำมัน (Oil Palm) [20]

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) เป็นพืชตระกูลปาล์มลักษณะลำต้นเดี่ยว ขนาดลำต้นประมาณ 12 -20 นิ้ว ผิวของลำต้นคล้ายๆ ต้นตาล ลักษณะใบเป็นรูปก้างปลา โคนกาบใบจะมีลักษณะเป็นซี่คล้ายหนามแต่ไม่คมมาก เมื่อไปถึงกลางใบหนามดังกล่าวจะพัฒนาเป็นใบ การออกดอกเป็นพืชที่แยกเพศ คือต้นที่เป็นเพศผู้ก็จะให้เกสรตัวผู้อย่างเดียว ต้นที่ให้เกสรตัวเมียจึงจะติดผล ลักษณะผลเป็นทะลายผลจะเกาะติดกันแน่นจนไม่สามารถสอดนิ้วมือเข้าไปที่ก้านผลได้ เวลาเก็บผลปาล์มจึงต้องใช้มีดงอเกี่ยวที่โคนทะลายแล้วดึงให้ขาด ก่อนที่จะตัดทะลายปาล์มต้องตัดทางปาล์มก่อน เพราะผลปาล์มจะตั้งอยู่บนทางปาล์ม กระบวนการตัดทาง(ใบ)ปาล์มและตัดเอาทะลายปาล์มลงเรียกรวมๆ ว่า ทางปาล์ม ปาล์มน้ำมันจัดเป็นพืชเศรษฐกิจ มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา เป็นพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าพืชน้ำมันทุกชนิด โดยปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบแสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ปาล์มน้ำมันและส่วนประกอบของผลปาล์มน้ำมัน [21]

ปาล์มน้ำมันสามารถนำมาแปรรูปทำเป็นน้ำมันปาล์มประกอบอาหาร เนย รวมถึงเป็นส่วนผสมในไบโอดีเซลด้วย ใบมาบดเป็นอาหารสัตว์ กะลาปาล์มเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิง ทะลายปาล์มใช้เพาะเห็ด และกระชังการปลูกลงดินไปแล้วก็ช่วยในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการช่วยลดภาวะโลกร้อนได้อีก

ในประเทศไทยมีการปลูกทั้งทางภาคใต้และภาคตะวันออก พันธุ์ปาล์มน้ำมันที่ส่งเสริมให้เกษตรกรปลูก เป็นปาล์มน้ำมันลูกผสมเทเนอร่า โดยเฉพาะที่สามจังหวัดชายแดนภาคใต้ ช่วงปี 2547 - 2550 มีการส่งเสริมการปลูกปาล์มน้ำมันในพื้นที่นาร้าง โดยกรมพัฒนาที่ดิน มีการชุดร่องให้ฟรี ให้พันธุ์และปุ๋ย โดยให้เหตุผลในการส่งเสริมการปลูกเนื่องจากเป็นปาล์มที่ให้น้ำมันใช้ได้ทั้งการบริโภคและใช้เป็นไบโอดีเซลได้

ปัจจุบัน ประเทศที่ผลิตและส่งออกน้ำมันปาล์มรายใหญ่ที่สุดในโลกคือประเทศมาเลเซีย ผลิตเป็นสัดส่วนมากถึงร้อยละ 47 ของการผลิตของโลก

ปาล์มน้ำมันที่เป็นพืชที่ให้น้ำมัน 2 ชนิด คือ น้ำมันปาล์มจากเปลือกผลปาล์ม ซึ่งมีปริมาณน้ำมันประมาณ 22% ของน้ำหนักทะลาย น้ำมันปาล์มมีองค์ประกอบทางเคมีเกี่ยวข้องกับวิตามินที่สำคัญอยู่ 2 ชนิด คือ วิตามินอี และสารแคโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสร้างวิตามินเอมีปริมาณสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่นๆ

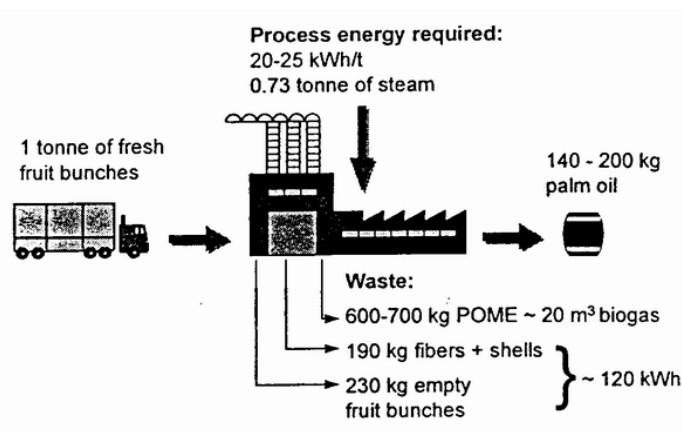
น้ำมันปาล์มมีกรดไขมันอิ่มตัว (กรดลอริก, ไมริสติก, บัลมิติกและสเตียริก) รวมกันประมาณ 52% และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (โอเลอิก, ลิโนลิก และลิโนลิโนอิก) รวมกันประมาณ 48% น้ำมันปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่สกัดได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันดิบยังไม่สามารถบริโภคได้ต้องนำไปทำการกลั่นให้เป็นน้ำมันบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการแยกยางเหนียวลดกรด ฟอกสี และดูดกลิ่น ได้เป็นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และมีผลพลอยได้ คือ กรดไขมัน ซึ่งผลผลิตทั้งหมดนี้เรานำไปใช้ เพื่อการอุปโภคบริโภคได้อย่างมากมาย เช่น ทำเป็นน้ำมันปรุงอาหาร น้ำมันทอด ผลิตนมข้น ไอศกรีม เนยเทียม เนยขาว ไขมันบั้งกรอบ เนยโกโก้ ครีมเทียม คอฟฟี่เมท ไขมันทำขนมปัง สบู่ เทียนไข ผงซักฟอก ยาสีฟัน และใช้ในอุตสาหกรรมโพลิโอเคมีคัลอย่างกว้างขวาง และที่สำคัญที่สุดในยุคน้ำมันปิโตรเลียมแพง ก็คือ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันดีเซล หรือที่เรานิยมเรียกว่า ไบโอดีเซล ในการผลิตเมทิลเอสเทอร์นี้เป็นการนำเอาน้ำมันปาล์มมาทำปฏิกิริยากับเมทานอล โดยมีโซดาไฟเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ เรียกว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเมทิลเอสเทอร์ และกรีเซอร์อลเป็นผลพลอยได้

2.9 กะลาปาล์มน้ำมัน (Oil palm shells) [22]

กะลาปาล์ม (ภาพที่ 2.10) และทะลายปาล์ม เป็นชีวมวลที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อนำปาล์ม 1 ตัน ผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ แล้ว จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 20 - 25 กิโลวัตต์ และใช้น้ำอีก 0.73 ตัน เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มประมาณ 140 - 200 กิโลกรัม และจะมีวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือ เปลือกปาล์ม กะลาปาล์ม ประมาณ 190 กิโลกรัม และได้เป็นทลายปาล์ม 230 กิโลกรัม หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 120 กิโลวัตต์ และมีน้ำเสียจากโรงงานคิดเทียบเท่าก๊าซชีวภาพได้ 20 ลูกบาศก์เมตร แสดงแผนภาพดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.10 กะลาปาล์มน้ำมัน [22]



ภาพที่ 2.11 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม [22]

2.10 น้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) [3]

น้ำมันชีวภาพมีลักษณะเป็นของเหลวสีน้ำตาลเข้มและมีกลิ่นเฉพาะตัว สมบัติของน้ำมันชีวภาพค่อนข้างต่างจากน้ำมันปิโตรเลียม ดังตารางที่ 2.4 และสามารถอธิบาย ดังนี้

1. **ปริมาณออกซิเจน** น้ำมันชีวภาพนั้นมีปริมาณออกซิเจนร้อยละ 35-40 โดยมวล แทรกอยู่ในรูปของสารประกอบมากมายในน้ำมันชีวภาพ ขึ้นกับชนิดของชีวมวลและความรุนแรงของกระบวนการผลิต (อุณหภูมิ, เวลาของปฏิกิริยา และอัตราการให้ความร้อน) ออกซิเจนที่แทรกตัวอยู่ในสารประกอบต่างๆของน้ำมันชีวภาพนั้น เป็นเหตุผลเบื้องต้นที่ทำให้สมบัติของน้ำมันชีวภาพแตกต่างจากน้ำมันปิโตรเลียม ปริมาณออกซิเจนที่สูงนั้นส่งผลให้ค่าความร้อนของน้ำมันลดลงต่ำกว่าร้อยละ 50 ของน้ำมันเชื้อเพลิงทางการค้าและไม่สามารถนำมาผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไปได้

ตารางที่ 2.6 สมบัติของน้ำมันชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้และน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก
[3]

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

2. **ปริมาณน้ำ** น้ำในน้ำมันชีวภาพมาจากชีวมวลที่ป้อนเข้าไปและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการกำจัดน้ำออกระหว่างกระบวนการผลิต ดังนั้นปริมาณน้ำขึ้นกับชนิดชีวมวลและภาวะที่ใช้ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นนั้น มีทั้งข้อดีและข้อเสียต่อสมบัติน้ำมันชีวภาพ น้ำทำให้ค่าความร้อนและคุณสมบัติในการลุกไหม้ของน้ำมันชีวภาพต่ำลง แต่มีส่วนช่วยในการเพิ่มความล่าช้าในการจุดติดไฟและบางกรณีช่วยลดอัตราการเผาไหม้เมื่อเทียบกับน้ำมันดีเซล ในทางตรงกันข้าม น้ำช่วยลดความหนืดของน้ำมันลงซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีเซลและทำให้ลดปริมาณการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์อีกด้วย

3. **ความหนืดและอายุการใช้งาน** ความหนืดของน้ำมันชีวภาพอยู่ในช่วงกว้างขึ้นกับชนิดชีวมวลและภาวะการผลิต โดยเฉพาะประสิทธิภาพของสารประกอบที่มีจุดเดือดต่ำภายในน้ำมันชีวภาพนั้นช่วยลดคุณสมบัติที่สูงลงได้เร็วกว่าน้ำมันปิโตรเลียม เมื่อทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิปานกลางจะสามารถสูบออกได้ง่าย แต่ข้อเสียของน้ำมันชีวภาพนั้น เมื่อเก็บไว้หรือใช้ที่อุณหภูมิสูง ค่าความหนืดจะสูงขึ้นตามเวลาเป็นผลมาจากสารประกอบของน้ำมันชีวภาพเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างกันเกิดการรวมตัวเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศด้วย

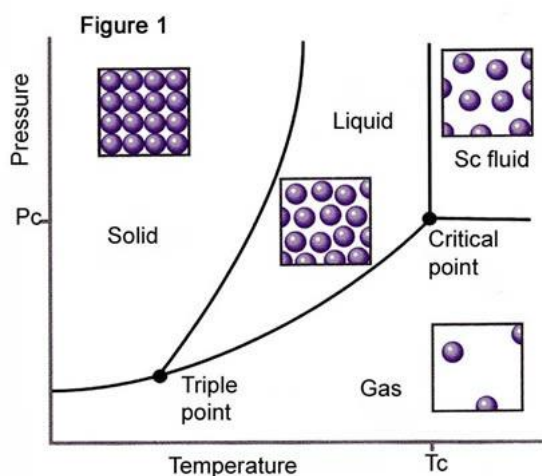
4. **การกักกร่อน** น้ำมันชีวภาพประกอบด้วยกรดอินทรีย์มากมาย โดยเฉพาะกรดอะซิติก และฟอร์มิก ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ค่าความเป็นกรด 2-3 จากเหตุผลนี้ น้ำมันสามารถกักกร่อน วัสดุภายในเครื่องยนต์ เช่น ท่อคาร์บอน และอะลูมิเนียม เป็นต้น

จากข้อมูลดังกล่าวจะพบว่า น้ำมันชีวภาพมีทั้งข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไปขึ้นกับการนำไปใช้ ถ้าพิจารณาข้อเสียของน้ำมันชีวภาพนั้น ส่วนสำคัญคือปริมาณออกซิเจนที่มากส่งผลต่อคุณภาพน้ำมันชีวภาพ ค่าความหนืดที่สูง ค่าความร้อนและความเสถียรทางเคมีต่ำ มีฤทธิ์กัดกร่อน และไม่สามารถนำมาผสมกับเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนได้

2.11 ของไหลภาวะเหนือวิกฤต (Supercritical Fluid, SCF) [23]

คือ สารใด ๆ ในภาวะซึ่งจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว เมื่อพิจารณาถึงแก๊สที่สามารถเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวได้ซึ่งมี 2 วิธีโดยการเพิ่มความดัน หรือลดอุณหภูมิเพื่อลดพลังงานจลน์ ทำให้ระยะทางระหว่างโมเลกุลลดลงเกิดแรงดึงดูดระหว่างกันควบแน่นเป็นของเหลว แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุด ๆ หนึ่ง โมเลกุลของแก๊สจะมีพลังงานจลน์มากแม้จะให้ความดันเท่าใด ก็ไม่สามารถทำให้แก๊สเกิดการควบแน่นเป็นของเหลวได้ อุณหภูมิสูงสุดที่แก๊สยังสามรถควบแน่นเป็นของเหลวได้เรียกว่า อุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c) และความดันที่จุดนี้เรียกว่า ความดันวิกฤต (Critical pressure, P_c) จุดที่มีอุณหภูมิเท่ากับ T_c และความดันเท่ากับ P_c เรียกว่า จุดวิกฤต (Critical point, CP) แสดงดังภาพที่ 2.12

ที่อุณหภูมิมากกว่า อุณหภูมิ T_c และความดันมากกว่า P_c สารจะอยู่ในภาวะที่มีสมบัติจำแนกไม่ได้ว่าเป็นแก๊สหรือของเหลว เรียกสารที่อยู่ในภาวะนี้ว่า ของไหลภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งมีสมบัติอยู่ระหว่างแก๊สกับของเหลวคือมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับของเหลว เมื่อนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของสารที่ต้องการละลายจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤตเกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction) กัน ลดเอนทัลปี เกิดการละลายได้ดี และขณะเดียวกันของไหลภาวะเหนือวิกฤตก็มีความหนืด และการแพร่กระจายใกล้เคียงกับแก๊ส ทำให้สามารถแทรกเข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลาย (Solute matrix) ได้ดี ด้วยสมบัติเหล่านี้ จึงนำของไหลภาวะเหนือวิกฤตมาเป็นตัวทำละลาย ซึ่งมีข้อดีเหนือตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไป คือ มีอัตราการถ่ายโอนมวลเร็วกว่าและมีความสามารถในการทำละลาย (Solvent power) ที่ดีกว่า



ภาพที่ 2.12 เฟสไดอะแกรมของของไหลภาวะเหนือวิกฤต [24]

สมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต

- **สมบัติการถ่ายโอน (Transport properties)** จากการศึกษาของไหลภาวะเหนือวิกฤตมีความหนืดต่ำและสัมประสิทธิ์การแพร่สูงทำให้สามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง สามารถแทรกซึม (Penetrate) เข้าไปในโครงสร้างภายในของตัวถูกละลายได้ดี ทำให้ตัวถูกละลายที่ละลายเข้าไปในของไหลภาวะเหนือวิกฤตและกระจายออกจากบริเวณที่เกิดการสกัดไปบริเวณอื่นได้ง่าย คือมีอัตราการถ่ายโอนมวลดี ส่งผลให้ของไหลภาวะเหนือวิกฤตเป็นตัวทำละลายที่ดี อย่างไรก็ตาม ความหนืด และสัมประสิทธิ์การแพร่ของของไหลภาวะเหนือวิกฤต มีความสัมพันธ์กับปัจจัยหลายประการเช่น อุณหภูมิ ความดัน และชนิดของของไหลภาวะเหนือวิกฤต จึงต้องมีการปรับภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้สกัดสารที่ต้องการได้ดีที่สุด

- **ความสามารถในการทำละลาย (Solvent power)** เป็นสมบัติเด่นประการหนึ่งของของไหลภาวะเหนือวิกฤตกว่าตัวทำละลายที่เป็นของเหลวทั่วไปเนื่องจากสามารถปรับให้มีความเข้มข้นหรืออ่อนได้ง่ายโดยการปรับภาวะที่ให้

ภาวะหรือตัวแปร ประการแรกคือ อุณหภูมิ โดยทั่วไปการเพิ่มอุณหภูมิให้กับตัวทำละลายที่เป็นของเหลว จะทำให้มีการละลายเพิ่มขึ้น แต่ในของไหลภาวะเหนือวิกฤต การเพิ่มอุณหภูมิ จะก่อให้เกิดผล 2 ประการที่ขัดแย้งกัน

1. เพิ่มการละลายของตัวถูกละลาย
2. ลดความหนาแน่น ทำให้โมเลกุลของของไหลภาวะเหนือวิกฤตกับตัวถูกละลายอยู่ห่างกัน การละลายของตัวถูกละลายจึงลดลง

ผลรวมของผลที่ขัดแย้งกัน 2 ประการนี้คือความสามารถในการทำละลายของของไหล ภาวะเหนือวิกฤต ซึ่งขัดแย้งในประการที่สอง สามารถแก้ไขได้โดยการใช้ความดันกับของไหล ภาวะเหนือวิกฤต เพื่อคงสภาพความหนาแน่นให้ใกล้เคียงกับสภาวะเดิมก่อนที่จะมีการเพิ่ม อุณหภูมิ กล่าวโดยสรุปคือ ตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อความสามารถในการละลาย คือ อุณหภูมิและ ความหนาแน่น และความดันจะมีผลทางอ้อม โดยส่งผ่านความหนาแน่น

- **สมบัติการเลือก (Selectivity properties)** เป็นสมบัติของของไหลภาวะเหนือวิกฤต ที่ สามารถปรับอุณหภูมิและความดัน เพื่อให้มีความสามารถในการทำละลายที่เหมาะสมเฉพาะกับ สารที่ต้องการสกัดให้มีการสกัดที่มากที่สุด โดยที่มีสารที่ไม่ต้องการปนออกมาให้น้อยที่สุด

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จิราพัชร คำพิเดช [25] ศึกษาการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวในเอทานอล ภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น เวลา ชนิดของตัวทำละลาย และร้อยละของน้ำในเอทานอลต่อร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของ ของเหลว และองค์ประกอบของของเหลว รวมถึงศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาไอร์ออน(II)ซัลไฟด์ ไอร์ออน(II)ซัลเฟต ไอร์ออน(III)ซัลไฟด์บนถ่านกัมมันต์ และแคลเซียมออกไซด์ ในกระบวนการทำ ให้เป็นของเหลว เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.13 เมกะพาสคัล ร้อยละผลได้ของของเหลวเท่ากับ 63.6 ซึ่งประกอบด้วย สารประกอบฟีนอลร้อยละ 41.6 เอสเทอร์ร้อยละ 27.3 อีเทอร์ร้อยละ 10.3 และแอลกอฮอล์ร้อยละ 5.4

Yuan และคณะ [26] ศึกษากระบวนการแปรรูปฟางข้าวให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัว ทำละลายผสมระหว่างเอทานอล-น้ำ และไพโรพานอล-น้ำภายใต้ภาวะเหนือและใต้จุดวิกฤต พบว่า ได้ปริมาณน้ำมันสูงสุดร้อยละ 39.7 เมื่อใช้อัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำและเอทานอลเท่ากับ 5:5 อุณหภูมิ 573 เคลวิน ในขณะที่ค่าความร้อนของน้ำมันที่ได้ขึ้นกับอุณหภูมิของปฏิกิริยาและ อัตราส่วนโดยปริมาตรของตัวทำละลาย การใช้ตัวทำละลายผสมทำให้จุดเดือดของผลิตภัณฑ์มีค่า ลดลงและเป็นตัวช่วยยับยั้งการเกิดกากของแข็ง (Residue) ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นำมา วิเคราะห์ ด้วยเครื่อง GC/MS พบว่ามีสารประกอบฟีนอลและอนุพันธ์เป็นองค์ประกอบหลัก

Liu และคณะ [27] ศึกษาการแปรรูปไม้สน (Pine wood) ให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายต่างๆ ได้แก่ น้ำ แอซีโตน และเอทานอล ในช่วงอุณหภูมิ 523-723 เคลวิน ความดันเริ่มต้น 1 เมกะพาสคัล ระยะเวลา 20 นาที ผลิตภัณฑ์เหลวและกากของแข็งที่ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC/MS และ FTIR ตามลำดับ พบว่า องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ขึ้นกับชนิดตัวทำละลาย การใช้แอซีโตนเป็นตัวทำละลายได้ 4-เมทิล-1,2-เบนซีนไดออกอล เป็นองค์ประกอบหลัก ในขณะที่เมื่อใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายได้ผลิตภัณฑ์เป็น 2-เมทอกซี-4-(1-โพรพีนิล)-ฟินอล และถ้าใช้น้ำได้ผลิตภัณฑ์ที่กระจายตัวแคบกว่า ตัวทำละลายแอซีโตนสามารถให้ร้อยละการเปลี่ยนสูงสุด ขณะที่ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพสูงสุดคือร้อยละ 26.5

Cheng และคณะ [28] ศึกษาผลของตัวทำละลายในการแปรรูปผงไม้สนให้เป็นของเหลวที่ความดันไฮโดรเจน 2.0 เมกะพาสคัล ช่วงอุณหภูมิ 200-350 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวทำละลาย ได้แก่ น้ำ เอทานอล เมทานอล และตัวทำละลายผสม ได้แก่ เอทานอล-น้ำ และเมทานอล-น้ำ ที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ที่ภาวะการทดลองเดียวกัน ตัวทำละลายผสมสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้มากกว่าตัวทำละลายเดี่ยว โดยตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอล-น้ำ ที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้สูงสุดถึงร้อยละ 65 และมีร้อยละการเปลี่ยนเท่ากับ 95 นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยน และร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพสูงขึ้น

Chumpoo และคณะ [29] ศึกษาการแปรรูปขานอ้อยให้เป็นของเหลวด้วยเอทานอลและตัวทำละลายผสมของเอทานอลและน้ำในภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ เวลา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น อัตราส่วนตัวทำละลายต่อขานอ้อย ร้อยละน้ำโดยปริมาตรในเอทานอล และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ไอร์รอน(III)ซัลไฟด์บนถ่านกัมมันต์ ไอร์รอน(II)ซัลไฟด์ และ ไอร์รอน(II)ซัลเฟต ต่อร้อยละการเปลี่ยนแปลงและร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ ในการแปรรูปขานอ้อยให้เป็นน้ำมันชีวภาพโดยใช้ไอร์รอน(II)ซัลเฟต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.93 เมกะพาสคัล เป็นเวลา 40 นาที ให้ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพเท่ากับ 73.8 และมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 99 นอกจากนี้ยังพบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ (26.8 MJ/kg) มีค่าความร้อนสูงกว่าขานอ้อย (14.8 MJ/kg) จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันด้วย GC/MS ทำให้ทราบว่าองค์ประกอบน้ำมันมีสารประกอบฟินอล แอลดีไฮด์ และเอสเทอร์

Mazaheri และคณะ [30-31] ศึกษาการสลายตัวของเส้นใยปาล์มให้เป็นของเหลวในภาวะได้อุณหภูมิด้วยตัวทำละลายต่างๆ ทั้งที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ซิงก์คลอไรด์ โซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ในกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ร้อยละการเปลี่ยนเป็นมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ คือ ร้อยละ 54.9 ที่อุณหภูมิ 483 เคลวิน และร้อยละ 75.8 ที่อุณหภูมิ 603 เคลวิน ในภาวะเดียวกัน ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มสูงขึ้นจากร้อยละ 28.8 เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นร้อยละ 39.1 เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้พบว่าเมื่อใช้ซิงก์คลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนมากขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์ก็เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อใช้โซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำให้ร้อยละการเปลี่ยนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 90

Xu และคณะ [32] ศึกษาการแปรรูปไม้ซิวมวล (Wood Biomass) ให้เป็นของเหลวโดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลายในภาวะต่ำกว่าวิกฤต/เหนือกว่าวิกฤต ช่วงอุณหภูมิ 280-380 องศาเซลเซียส น้ำมันหนัก (Heavy oil) ที่ได้มีค่าความร้อนสูงถึง 30-35 MJ/Kg (มากกว่าไม้ตัวอย่างเริ่มต้น) และน้ำมันที่ละลายน้ำที่มีค่าความร้อน 19-25 MJ/kg ในส่วนของการแปรรูปโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แบเรียมไฮดรอกไซด์ และโอโรอน(II)ซัลเฟต พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพในการช่วยให้เกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันหนักที่อุณหภูมิ 280-340 องศาเซลเซียส และช่วยส่งเสริมการเกิดก๊าซและน้ำที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 340 องศาเซลเซียส ในการแปรรูปชีวมวลโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันรวมเท่ากับร้อยละ 51 และเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 65 เมื่อใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้แบเรียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ได้น้ำมันหนักถึงร้อยละ 45 และจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วย GC/MS แสดงให้เห็นว่า น้ำมันหนักประกอบด้วย กรดคาร์บอกซิลิก สารประกอบฟีนอล และอนุพันธ์เป็นองค์ประกอบหลัก

Yang และคณะ [33] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการการแปรรูปไม้ซิวมวล ให้เป็นของเหลว โดยใช้เมทานอลเป็นตัวทำละลายภายใต้ภาวะต่ำกว่าวิกฤตและเหนือกว่าวิกฤต ที่ช่วงอุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2.0-10.0 เมกะพาสคัล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และรูบิเดียมคาร์บอเนต พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน การใช้โพแทสเซียมคาร์บอเนต และรูบิเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเพิ่มผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพได้ดีกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์

โดยเมื่อใช้รูปไบเดียมคาร์บอเนตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 2.0 เมกะพาสคัล สามารถเพิ่มผลิตภัณณ์น้ำมันได้ถึงร้อยละ 30

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายในภาวะเหนือวิกฤต เพื่อหาภาวะที่เหมาะสม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300-360 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูป คือ ของเหลว แก๊ส และกากของแข็ง จากนั้นทำการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC/MS และ ค่าความร้อน

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องบดกะลาปาล์มชนิดละเอียด บริษัท Retsch
2. ตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมโครเมตร (เบอร์ 60)
3. เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) ผลิตโดย Parr Instrument Company Model 4842 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SUS 316 อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ประกอบด้วย เทอร์โมคัปเปิลพร้อมชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) อุปกรณ์วัดความดันประกอบด้วยมาตรวัดความดันและอุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure Transducer) อุปกรณ์การกวนประกอบด้วยใบกวนพร้อมชุดกำหนดและวัดความเร็วรอบของใบกวน เครื่องปฏิกรณ์สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุดไม่เกิน 34 เมกะพาสคัล



ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ Parr Reactor Model 4842

3. เตาอบ (Oven) WTB Binder Model ED-115i
4. เครื่องแคลอรีมิเตอร์ (Oxygen Bomb Calorimeter) รุ่น 1341EE ผลิตโดยบริษัท Parr Instrument Company
5. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) รุ่น Agilent 6890N คอลัมน์ HP-5MS ที่ประกอบกับเครื่องแมสสเปกโทสโกปี (Mass Spectroscopy) รุ่น Agilent 5973 เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลว
6. เครื่องวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (CHN Analyzer) รุ่น CHN-2000 ผลิตโดยบริษัท Leco เป็นเครื่องมือวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบร้อยละคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ของชีวมวลหรือน้ำมันชีวภาพ
7. เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary Evaporator) รุ่น Bunchi Rotavapor R-200
8. ชุดอุปกรณ์การกรองประกอบด้วยกรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel) ขวดกรอง (Suction or filter flask) เครื่องดูดอากาศ และกระดาษกรอง Whatman No. 4
9. เดซิกเคเตอร์ ภายในบรรจุซิลิกาเจล (Silica gel) ดูดความชื้น

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. กะลาปาล์มบดผ่านตะแกรงร่อนขนาด 250 ไมครอน (เบอร์ 60)
2. แก๊สไฮโดรเจน 99.99% จาก บริษัท ไทยอินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
3. เอทานอล (Ethanol) 99.9 % จาก บริษัท Merck
4. แอซีโตน (Acetone) จาก บริษัท QReC
5. เอทิลแอซีเตต (Ethyl acetate) จาก บริษัท QReC
8. ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) จาก บริษัท Merck
9. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) จาก บริษัท QReC
10. โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) จาก บริษัท QReC
11. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) จาก บริษัท QReC
12. แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จาก บริษัท Ajax Finechem
13. ซิลิกาเจล จาก บริษัท วิทยาศาสตร์ จำกัด
14. น้ำกลั่น

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.3.1 การเตรียมการทดลอง

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาตัวแปรต่างๆต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตที่สามารถให้ไฮโดรเจนแก่ระบบและมีความสามารถในการถ่ายโอนความร้อนให้แก่สารตั้งต้นเป็นอย่างดี

ตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤตที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เอทานอล และสารละลายผสมของเอทานอล-น้ำ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 90 70 และ 50 โดยปริมาตร ซึ่งอุณหภูมิวิกฤตของตัวทำละลายเหล่านี้ แสดงได้ดังตารางที่ 3.1

อุณหภูมิวิกฤตของสารละลายเอทานอลได้จากการคำนวณผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ HYSIS ver.2.4.1 ของบริษัท Hyprotech สำหรับการคำนวณใช้สมการสถานะของ Peng-Robinson ในการหาอุณหภูมิวิกฤต และความดันวิกฤต

ตารางที่ 3.1 อุณหภูมิวิกฤต และความดันวิกฤตของตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ตัวทำละลาย	เอทานอล (%โดยปริมาตร)	อุณหภูมิวิกฤต (องศาเซลเซียส)	ความดันวิกฤต (เมกะพาสคัล)
เอทานอล	99.9	243.2	6.38
	90	251.2	10.34
	70	278.6	10.69
	50	310.7	14.45

3.3.2 การเตรียมตัวอย่างกะลาปาล์ม

1. บดกะลาปาล์มโดยใช้เครื่องบดอย่างละเอียด
2. คัดขนาดกะลาปาล์มด้วยตะแกรงเบอร์ 60 ให้มีขนาดเล็กกว่า 250 ไมครอน
3. นำกะลาปาล์มที่ได้มาอบไล่ความชื้นด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. นำกะลาปาล์มที่ได้มาวิเคราะห์เบื้องต้น หรือเก็บไว้ในเดซิکเคเตอร์ป้องกันความชื้นในการดำเนินการทดลองต่อไป

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติของกะลาปาล์ม

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis)

วิเคราะห์ตามมาตรฐานของ ASTM D3172 - 3175 ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยได้ และปริมาณคาร์บอนคงตัว

2. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

วิเคราะห์หาปริมาณร้อยละขององค์ประกอบคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHN analyzer

3. การหาค่าความร้อน (Heating Value)

วิเคราะห์หาค่าความร้อนของกะลาปาล์มด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ตาม ASTM D3177-02

3.3.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิ ตัวทำละลาย ชนิดและอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ผลของอุณหภูมิ

ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 320 340 และ 360 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที ด้วยเอทานอลเป็นตัวทำละลาย

2. ผลของตัวทำละลาย

ทำการทดลองโดยใช้เอทานอล และสารละลายผสมของเอทานอล-น้ำที่ความเข้มข้นร้อยละ 90 70 และ 50 โดยปริมาตรเป็นตัวทำละลาย ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล

3. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการทดลองด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาดังต่อไปนี้ $ZnCl_2$ MgO CaO K_2CO_3 และ Na_2CO_3 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 5 และ 10 โดยน้ำหนักของชีวมวล อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล โดยมีเอทานอลเป็นตัวทำละลาย

3.3.5 การแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลว

1. ชั่งกะลาปาล์ม 10 กรัม ลงในเครื่องปฏิกรณ์ เต็มตัวทำละลาย 100 มิลลิลิตร และเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในกรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์ใส่อากาศภายในเครื่องด้วยแก๊สไฮโดรเจนและอัดแก๊สไฮโดรเจนตามความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่กำหนด คือ 4.0 เมกะพาสคัล

3. ทดสอบรอยรั่ว จากนั้นประกอบเครื่องปฏิกรณ์กับเครื่องให้ความร้อน ตั้งค่าอุณหภูมิ โดยระบบของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ มีอัตราการให้ความร้อนประมาณ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตั้งค่าความเร็วรอบของใบกวนเป็น 100 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิขึ้นไปจนถึงค่าที่ตั้งไว้ จับเวลา 60 นาที
4. เมื่อครบเวลาที่กำหนด ทำการลดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ ให้มีค่าเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเครื่องปฏิกรณ์ออกจากอุปกรณ์ให้ความร้อน เป่าเครื่องปฏิกรณ์ด้วยพัดลมจนถึงอุณหภูมิห้อง จากนั้นปล่อยแก๊สที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ออกในตู้ดูดควัน
5. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวและการของแข็งออกมา ชะล้างด้วยแอสีโตน 20 มิลลิลิตร จนหมดพร้อมทั้งเทส่วนชะล้างไปผสมลงในผลิตภัณฑ์
6. ทำการแยกส่วนผลิตภัณฑ์เหลวออกจากกากของแข็งโดยการกรองด้วยอุปกรณ์การกรองสุญญากาศ และล้างของแข็งด้วยแอสีโตน นำมาล้างรวมกับของเหลวส่วนที่กรองได้
7. นำสารละลายของเหลวที่ได้ไประเหยเพื่อแยกตัวทำละลายออกจากผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องระเหยแบบหมุน
 - แยกตัวทำละลายแอสีโตนและเอทานอลออกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความดัน 400 มิลลิบาร์
 - แยกน้ำที่ยังคงอยู่ในผลิตภัณฑ์เหลวออกให้หมดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความดัน 400 มิลลิบาร์
 - ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลวที่แยกได้ และเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวไว้ในขวดเพื่อนำไปคำนวณและรอการวิเคราะห์ต่อไป
8. ชั่งน้ำหนักของแข็งที่ได้พร้อมกระดาศกรอบบนกระจกนาฬิกา จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในเดซิกเคเตอร์
9. ชั่งน้ำหนักของแข็งที่แยกได้ เพื่อนำไปคำนวณและรอการวิเคราะห์ต่อไป

3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ของเหลว

1. การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate Analysis) ด้วยเครื่องมือ CHN Analyser
2. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ของเหลว (Heating Value) ตามมาตรฐาน ASTM D 2015 ด้วยเครื่องบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (Oxygen Bomb Calorimeter)
- 3.การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) Agilent 6890N คอลัมน์ HP-5MS นำผลิตภัณฑ์เหลวมาละลายในเอทิลเอซีเตด จนมีความเข้มข้น 1000 ppm โดยประมาณ อุณหภูมิเตาอบเริ่มจาก 50 องศาเซลเซียส คงที่ 1 นาที สิ้นสุดที่ 250 องศาเซลเซียส คงที่เป็นเวลา 10 นาที ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที โดยมีแก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพาด้วยอัตราเร็ว 1 มิลลิลิตร/นาที ฉีดสารละลายนี้เข้าเครื่องที่ตำแหน่งฉีดสารที่มีอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส สัดส่วนการแบ่งฉีดเท่ากับ 20:1 ที่ประกอบกับเครื่อง แมสเปกโทมิเตอร์ รุ่น Agilent 5973 อุณหภูมิส่วนถ่ายโอน 280 องศาเซลเซียส MS Source อุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส Solvent delay 3 นาที

3.3.7 การคำนวณผลลัพธ์จากการทดลอง

$$\text{ร้อยละผลได้น้ำมัน} = [W_{\text{Oil}} / W_{\text{Sample,daf.}}] \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลได้กากของแข็ง} = [W_{\text{SR}} / W_{\text{Sample,daf.}}] \times 100$$

$$\text{ร้อยละผลได้แก๊สและน้ำ} = 100 - \text{ร้อยละผลได้น้ำมัน} - \text{ร้อยละผลได้กากของแข็ง}$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์ม} = 100 - \text{ร้อยละผลได้กากของแข็ง}$$

โดย W_{Oil} = น้ำหนักของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

W_{SR} = น้ำหนักของกากของแข็ง

$W_{\text{Sample,daf}}$ = น้ำหนักของกะลาปาล์มที่ปราศจากความชื้นและเถ้า

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต โดยศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการ คือ อุณหภูมิ ตัวทำละลายที่ใช้ ชนิดและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงผลของแต่ละตัวแปรต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ร้อยละผลได้ของกากของแข็ง ร้อยละผลได้ของ (แก๊ส+น้ำ) ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมัน และองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน และค่าความร้อน

4.1 การวิเคราะห์สมบัติกะลาปาล์มน้ำมัน

ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis) ตามมาตรฐาน ASTM D 3173-75 และผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ตามมาตรฐาน ASTM D 5291-96 ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุ (CHN Elemental analyzer) แสดงองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติกะลาปาล์มแบบประมาณและแบบแยกธาตุ

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
ความชื้น (Moisture)	5.3
สารระเหย (Volatile matter)	57.8
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	25.1
เถ้า (Ash)	11.8
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)	
คาร์บอน (C)	46.2
ไฮโดรเจน (H)	5.1
ไนโตรเจน (N)	0.8
ออกซิเจน (O)	47.9
ค่าความร้อน (MJ/kg)	
	15.8

คาร์บอนคงตัว* = 100-ผลรวมขององค์ประกอบแต่ละชนิดยกเว้นคาร์บอนคงตัว

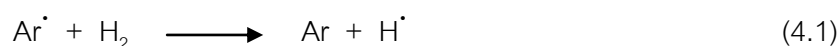
ออกซิเจน* = 100-ผลรวมของธาตุแต่ละชนิดยกเว้นออกซิเจน

4.2 ผลของอุณหภูมิ (Effect of Temperature)

4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลว โดยทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 300 – 360 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที ในตัวทำละลายเอทานอล 100 มิลลิลิตร โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.1

ในกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวโดยใช้ตัวทำละลายในภาวะเหนือวิกฤต ในช่วงอุณหภูมิ 300-360 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 3 เฟส ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) ผลิตภัณฑ์แก๊ส และกากของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการแปรรูปนี้ จากการทดลองที่อุณหภูมิ 300-340 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 4.1 พบว่า ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 33.4-40.9 จนกระทั่งที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพเริ่มลดลงเท่ากับร้อยละ 38.7 โดยที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส สามารถแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันไปเป็นน้ำมันชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 40.9 ทั้งนี้ ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบในกะลาปาล์มน้ำมัน เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และ ลิกนิน (Lignin) ซึ่งเริ่มสลายตัวได้ตั้งแต่ช่วง 200-280 องศาเซลเซียสขึ้นไป [34] ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอนุภาคขนาดเล็กซึ่งยังไม่มีเสถียรภาพ เป็นสารผลัดผลระหว่างปฏิกิริยา (Intermediates) ก่อนเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว สารผลัดผลระหว่างปฏิกิริยา เช่น อนุมูลอิสระแอโรแมติก (Aromatic free radical, Ar[•]) ที่แตกตัวจากลิกนินสามารถทำให้เสถียรอย่างรวดเร็วด้วยการเติมไฮโดรเจนหรือสารอนุมูลอิสระไฮโดรเจน (Hydrogen free radical, H[•]) เกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เสถียรโดยผ่านกลไกดังต่อไปนี้

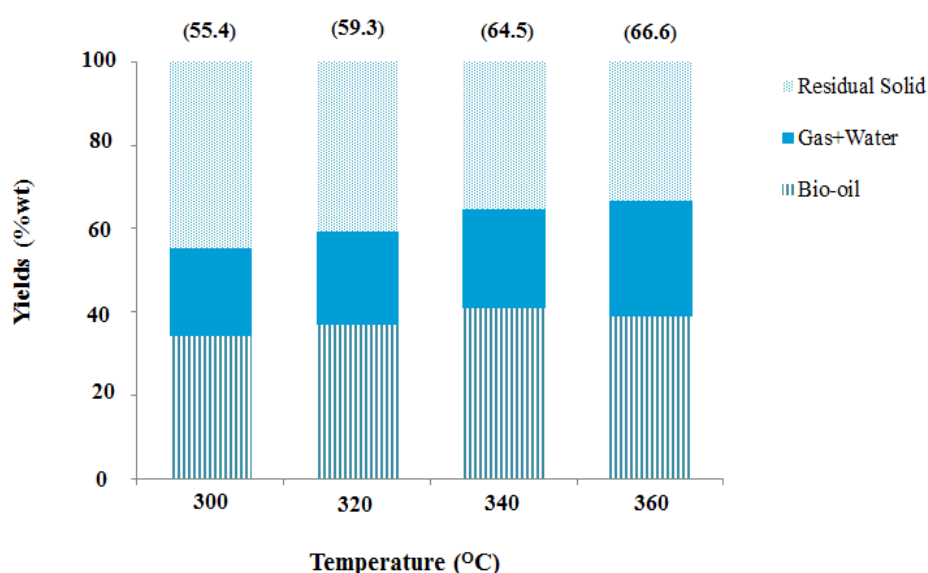


ปฏิกิริยานี้ยังป้องกันการเกิดปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation) และลดรวมตัวกันของอนุภาคอิสระซึ่งทำให้เกิดชาร์เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้การสลายตัวขององค์ประกอบในกะลาปาล์มน้ำมันเกิดเป็นน้ำมันชีวภาพเกิดมากขึ้น แต่พบว่าที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพมีแนวโน้มลดลงอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาการแตกตัว (Cracking) เนื่องจากอุณหภูมิที่สูง มีส่วนช่วยสนับสนุนให้มีการสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ส่งผลให้ปริมาณของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ลดลง เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมากขึ้น [35-36]

ตารางที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลว ในตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	300	320	340	360
ร้อยละการเปลี่ยน	55.6	59.3	64.5	66.6
ร้อยละผลได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
น้ำมันชีวภาพ	33.4	36.7	40.9	38.7
แก๊ส + น้ำ	21.2	22.6	23.6	27.9
กากของแข็ง	45.4	40.7	35.5	33.3
ค่าความร้อน (MJ/Kg)				
น้ำมันชีวภาพ	30.5	32.6	33.9	34.8
กากของแข็ง	15.6	11.3	8.5	7.8
วิเคราะห์น้ำมันชีวภาพแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)				
คาร์บอน (C)	70.4	72.3	73.4	73.6
ไฮโดรเจน (H)	8.0	8.5	8.7	8.7
ไนโตรเจน (N)	1.5	1.4	1.6	1.5
ออกซิเจน (O)	20.1	17.9	16.4	16.2

*ภาวะการทดลอง: เอทานอล 99.9 % (v/v) ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที



ภาพที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันในตัวทำละลายเอทานอล ภาวะการทดลอง: ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที (ในวงเล็บ แสดง ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมัน)

กล่าวได้ว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลว โดยใช้ตัวทำละลายในภาวะเหนือวิกฤต โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด ร้อยละ 40.9 โดยน้ำหนัก

4.2.2 ผลของอุณหภูมิต่อสมบัติของน้ำมันชีวภาพและกากของแข็ง

จากตารางที่ 4.2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นน้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความร้อนสูงขึ้น นั่นคือ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อน 30.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 360 องศาเซลเซียส ได้น้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อน 34.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม สอดคล้องกับปริมาณกากของแข็ง และค่าความร้อนของกากของแข็งที่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และผลการวิเคราะห์น้ำมันชีวภาพแบบแยกธาตุ พบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นน้ำมันชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบของคาร์บอนที่สูงขึ้น และองค์ประกอบของออกซิเจนน้อยลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เนื่องจากมีการกำจัดออกซิเจนออกไปในรูปของ คาร์บอนมอนอกไซด์ หรือคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านปฏิกิริยา decarbonylation และ decarboxylation ตามลำดับ ซึ่งให้ผลในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Zhong และคณะ [37] ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในกระบวนการแปรรูปชีวมวล 4 ชนิดให้เป็นของเหลว พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้

นอกจากนี้ อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้กากของแข็งมีองค์ประกอบของสารระเหยลดลง ในขณะที่องค์ประกอบของเถ้า และคาร์บอนคงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกะลาปาล์มน้ำมันตั้งต้น ดังตารางที่ 4.3 พบว่า สอดคล้องกับค่าความร้อนของกากของแข็งที่ลดลงเหลือ 8.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม จากกะลาปาล์มน้ำมันตั้งต้น 15.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากสารที่ระเหยได้จากกะลาปาล์มน้ำมันได้กลายเป็นน้ำมันชีวภาพ ทำให้น้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าความร้อนที่สูงกว่ากะลาปาล์มน้ำมัน 2 เท่า โดยประมาณ

จากข้อมูลข้างต้นเห็นได้ชัดว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการแปรรูปกะลาปาล์มไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์สมบัติของกากของแข็งจากระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต

การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	
ความชื้น (Moisture)	5.9
สารระเหย (Volatile matter)	3.7
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon)	31.2
เถ้า (Ash)	62.5
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)	
คาร์บอน (C)	20.0
ไฮโดรเจน (H)	1.3
ไนโตรเจน (N)	0.3
ออกซิเจน (O)	78.4
ค่าความร้อน (MJ/kg)	8.5

*ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที

4.3 ผลของตัวทำละลาย (Effect of Solvent)

4.3.1 ผลของตัวทำละลายต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

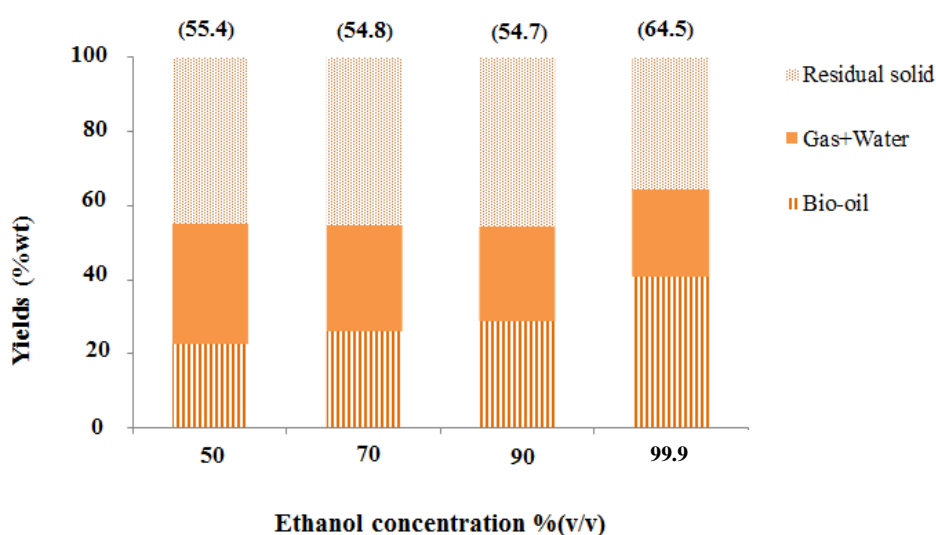
ในการศึกษาผลของตัวทำละลายที่มีต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที ตัวทำละลายที่ใช้ คือ เอทานอลบริสุทธิ์ (ร้อยละ 99.9 โดยปริมาตร) และตัวทำละลายผสมระหว่างเอทานอล-น้ำที่ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 90, 70 และ 50 โดยปริมาตร ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.2

ร้อยละของผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเปลี่ยนแปลงตามตัวทำละลายที่ใช้ในช่วงร้อยละ 22.9-40.9 พบว่า ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเอทานอล โดยตัวทำละลายที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 50 โดยปริมาตร ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเท่ากับร้อยละ 22.9 และตัวทำละลายที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 90 โดยปริมาตร ให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเท่ากับร้อยละ 28.9 โดยตัวทำละลายผสมที่ความเข้มข้นต่างๆ ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนที่ใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงร้อยละ 54.7-55.4 เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลเพิ่มขึ้นทำให้ได้น้ำมันชีวภาพเพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 4.2

ตารางที่ 4.4 ผลของทำละลายต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ความเข้มข้นของเอทานอล (ร้อยละโดยปริมาตร)	50	70	90	99.9
ร้อยละการเปลี่ยน	55.4	54.8	54.5	64.5
ร้อยละผลได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
น้ำมันชีวภาพ	22.9	26.3	28.9	40.9
แก๊ส + น้ำ	32.5	28.6	25.6	23.6
ของแข็ง	44.6	45.2	45.3	35.5
ค่าความร้อน (MJ/Kg)				
น้ำมันชีวภาพ	33.0	33.2	33.8	33.9
วิเคราะห์น้ำมันชีวภาพแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)				
คาร์บอน (C)	68.2	72.5	74.9	73.4
ไฮโดรเจน (H)	8.0	8.0	8.2	8.7
ไนโตรเจน (N)	2.6	2.4	2.4	1.6
ออกซิเจน (O)	21.3	17.1	15.3	16.4

*ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที



ภาพที่ 4.2 ผลของตัวทำละลายต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันในภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที (ในวงเล็บ แสดงร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมัน)

ในขณะที่ตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์ ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยน และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 64.5 และ 40.9 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ผลที่เกิดขึ้นนี้ อธิบายได้จากงานวิจัยการแปรรูปถ่านหินเป็นของเหลว ซึ่งพบว่าเมื่อถ่านหินถูกทำให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายที่สามารถทำหน้าที่เป็นตัวให้ไฮโดรเจน (Hydrogen donor) ในระหว่างเกิดปฏิกิริยา ช่วยทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมีเสถียรภาพได้ อีกทั้งป้องกันการเกิดปฏิกิริยา รีพอลิเมอไรเซชัน (Repolymerization) ทำให้ปริมาณกากของแข็งที่ได้ลดลง ความสามารถในการให้ไฮโดรเจนของตัวทำละลายของเอทานอลที่ภาวะเหนือวิกฤตนั้น ทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปกะลาปาล์มให้เป็นของเหลวมีเสถียรภาพ เกิดเป็นสารประกอบเล็กๆ นอกจากนี้เอทานอลยังมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) ต่ำกว่าน้ำ ทำให้ในภาวะเหนือวิกฤตสามารถละลายและแพร่กระจายแทรกตัวไปกับกะลาปาล์มน้ำมันได้ดีกว่าน้ำ จึงสามารถช่วยในการเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะกับสารประกอบโมเลกุลใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นเมื่อตัวทำละลายเอทานอลมีความเข้มข้นลดลง ทำให้ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยากับกะลาปาล์มน้ำมันลดลง [27, 38-40]

อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อตัวทำละลายเอทานอลมีความเข้มข้นลดลง ตัวทำละลายมีส่วนผสมของน้ำมากขึ้น ส่งผลให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สสูงขึ้นตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 โดยที่ความเข้มข้นเอทานอลร้อยละ 50 โดยปริมาตร ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเท่ากับร้อยละ 32.5 โดยน้ำหนัก และที่ความเข้มข้นของเอทานอลร้อยละ 90 โดยปริมาตร ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเท่ากับร้อยละ 25.6 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการใช้ตัวทำละลายที่มีสัดส่วนของน้ำในตัวทำละลายมากขึ้น ช่วยสนับสนุนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น [41]

4.3.2 ผลของตัวทำละลายต่อสมบัติของน้ำมันชีวภาพ

ในส่วนของคุณค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้ พบว่า ตัวทำละลายมีความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้น ทำให้ได้น้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนสูงไม่แตกต่างกัน โดยเมื่อใช้ตัวทำละลายเอทานอลบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลาย ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 33.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่สารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยปริมาตร ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 33.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

จากตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของกะลาปาล์มน้ำมันตั้งต้นกับผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพเมื่อใช้เอทานอลบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลาย พบว่าน้ำมันชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้นร้อยละ 27.2 (จากร้อยละ 46.2 เป็นร้อยละ 73.4) และปริมาณออกซิเจนต่ำลงร้อยละ 31.5 (จากร้อยละ 47.9 เป็นร้อยละ 16.4) เป็นผลให้ค่าความร้อนที่ได้มีค่าสูง แสดงให้เห็นว่ากระบวนการทำกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวช่วยเพิ่มมูลค่าของเชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ เห็นได้ว่าการที่ความเข้มข้นของสารละลายเอทานอลสูงขึ้น ส่งผลต่อปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดีออกซิเจเนชัน ทำให้ออกซิเจนถูกกำจัดออกไปในรูปของ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือคาร์บอนมอนอกไซด์ [27, 42]

จากผลการทดลอง จึงกล่าวได้ว่า เอทานอลความเข้มข้น 99.9 % (v/v) ถือเป็นตัวทำละลายที่เหมาะสมต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลว เนื่องจากเมื่อใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ได้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงสุด คือ ร้อยละ 40.9

4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา (Effect of Catalyst)

4.4.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ในการศึกษาผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที และใช้เอทานอลความเข้มข้น 99.9 % (v/v) เป็นตัวทำละลาย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ได้แก่ ซิงก์คลอไรด์ โซเดียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ดังแสดง ในตารางที่ 4.5 และ 4.6 และภาพที่ 4.3

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่ากระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิด ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของกะลาปาล์มน้ำมัน ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมันมีค่าสูงขึ้น อยู่ในช่วงร้อยละ 66.1-81.7 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีค่าร้อยละการเปลี่ยนเท่ากับร้อยละ 64.5

ที่ภาวะการทดลองเดียวกัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิด ในกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลว สามารถเพิ่มร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพให้มีค่าสูงขึ้นถึงร้อยละ 40.0-66.5 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเท่ากับร้อยละ 40.9 โดยเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของกะลาปาล์ม และโพแทสเซียมคาร์บอเนตอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพสูงมากเป็นร้อยละ 61.2 และ 66.5 ตามลำดับ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 สามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนตที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนักให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพเป็น 56.3 และ 56.5 ตามลำดับ ในขณะที่การใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของน้ำมันชีวภาพเพียงร้อยละ 44.7 เห็นได้ว่าแมกนีเซียมออกไซด์สามารถเพิ่มร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพจากกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้สามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเหล่านี้เป็นโลหะซึ่งมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาต่อน้ำและไฮโดรเจน ดังนั้นจึงสามารถไปช่วยทำให้อนุมูลอิสระที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันรับไฮโดรเจนได้ดีขึ้น ทำให้เกิดความเสถียรอย่างรวดเร็ว ป้องกันการสลายตัวไปเป็นผลิตภัณฑ์ [43-46]

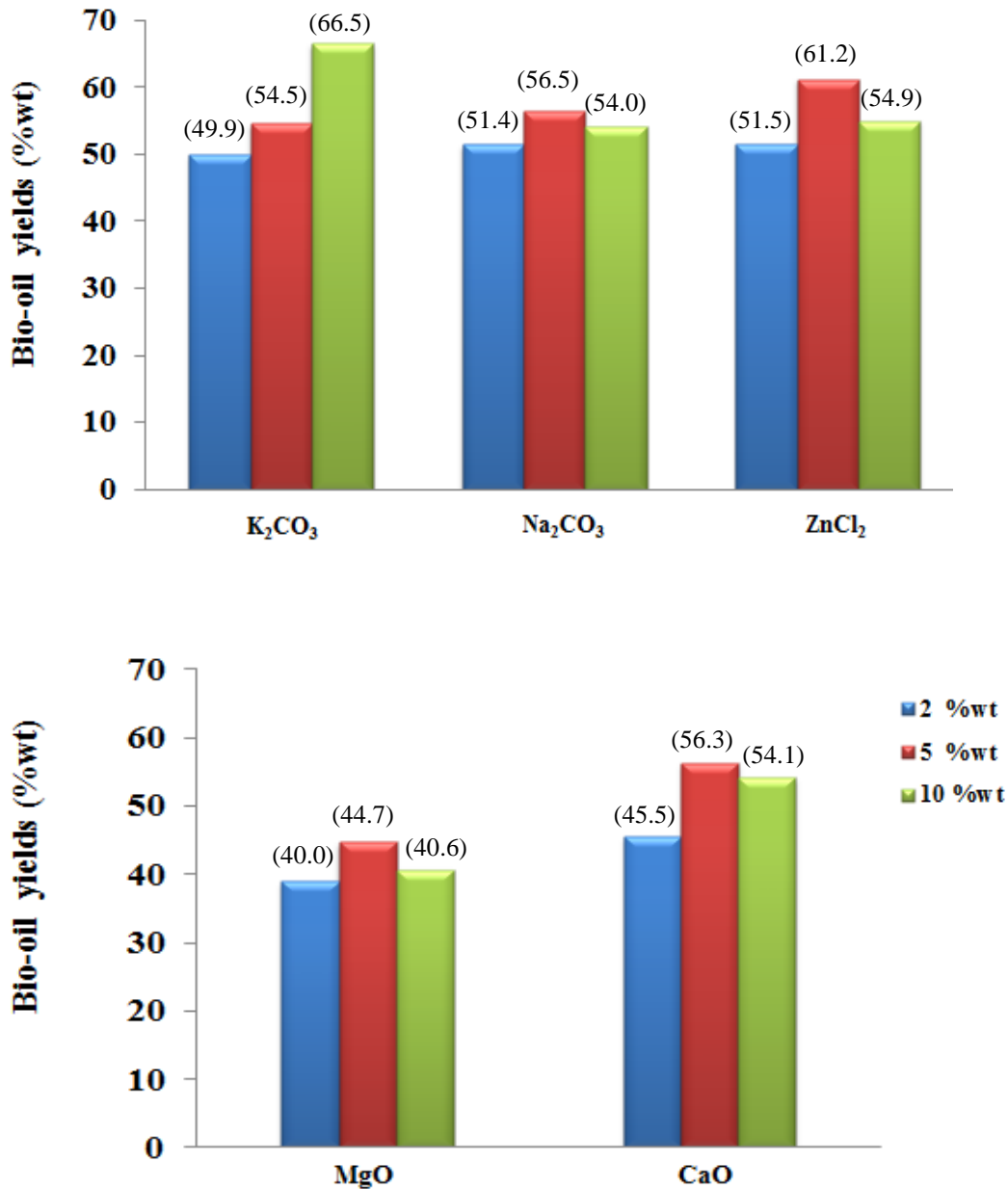
ตารางที่ 4.5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ซิงก์คลอไรด์ แมกนีเซียมออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ ที่มีต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลว ในตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต

ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	None	ZnCl ₂			MgO			CaO		
		2	5	10	2	5	10	2	5	10
ร้อยละการเปลี่ยน	64.5	59.9	74.3	69.5	54.9	66.1	53.5	61.2	75.9	70.9
ร้อยละผลได้ (daf)										
น้ำมันชีวภาพ	40.9	51.5	61.2	54.9	39.0	44.7	40.6	45.5	56.3	54.1
แก๊ส + น้ำ	23.6	8.4	13.1	14.6	15.9	21.3	12.9	15.6	19.6	16.8
กากของแข็ง	35.5	40.1	25.7	30.5	45.1	34.0	46.5	38.9	24.1	29.1
ค่าความร้อน (MJ/Kg)										
น้ำมันชีวภาพ	33.9	34.6	34.6	35.9	34.4	34.0	34.3	34.4	33.9	34.2
วิเคราะห์น้ำมันแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)										
คาร์บอน(C)	73.4	72.1	72.4	73.2	73.4	72.1	72.4	72.1	73.2	73.7
ไฮโดรเจน (H)	8.7	9.2	9.3	8.7	8.6	9.1	8.8	8.0	9.2	9.3
ไนโตรเจน (N)	1.6	1.2	1.6	1.2	1.6	1.8	1.5	1.3	1.0	1.1
ออกซิเจน (O)	16.4	17.5	13.9	13.9	16.4	17.0	17.3	18.6	16.6	15.9

ตารางที่ 4.6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมคาร์บอเนต ที่มีต่อกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลว ในตัวทำละลายเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต

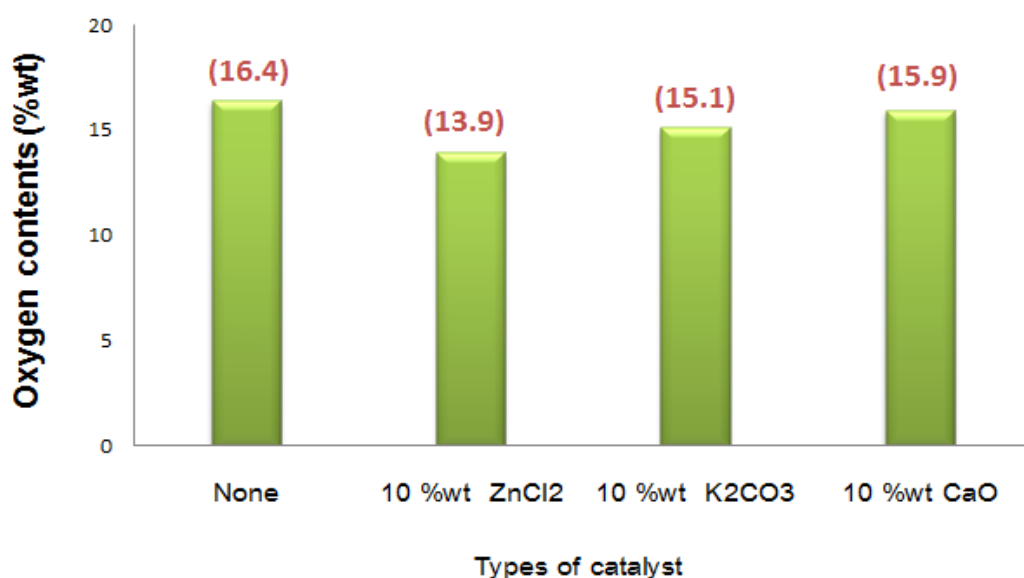
ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	None	K ₂ CO ₃			Na ₂ CO ₃		
		2	5	10	2	5	10
ร้อยละการเปลี่ยน	64.5	72.9	72.8	81.1	62.9	77.6	75.5
ร้อยละผลได้ (daf)							
น้ำมันชีวภาพ	40.9	49.9	54.5	66.5	51.4	56.5	54.0
แก๊ส + น้ำ	23.6	23.0	18.3	14.6	11.5	21.1	21.5
กากของแข็ง	35.5	27.1	27.2	18.9	37.1	22.4	24.5
ค่าความร้อน (MJ/Kg)							
น้ำมันชีวภาพ	33.9	34.5	33.6	33.5	33.7	33.6	33.2
วิเคราะห์น้ำมันแบบแยกธาตุ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, daf)							
คาร์บอน(C)	73.4	74.8	72.7	73.8	72.1	72.4	73.2
ไฮโดรเจน (H)	8.7	8.8	8.2	8.3	9.2	9.3	8.7
ไนโตรเจน (N)	1.6	1.2	1.1	1.1	1.2	1.6	1.2
ออกซิเจน (O)	16.4	15.1	18.0	16.9	17.5	16.7	16.9

*ภาวะการทดลอง : อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที



ภาพที่ 4.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันในกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันภาวะเหนือวิกฤต ที่อัตราส่วนร้อยละ 2 5 และ 10 โดยน้ำหนักของกะลาปาล์ม ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที (ในวงเล็บ แสดง ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพ)

ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม พบว่า สามารถช่วยลดปริมาณกากของแข็ง หรือกล่าวได้ว่าช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมันได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์คลอไรด์ แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และโซเดียมคาร์บอเนต สามารถลดปริมาณกากของแข็งได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนตสามารถลดปริมาณกากของแข็งได้ดีที่สุดที่อัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณกากของแข็งอยู่ในช่วงร้อยละ 18.9-33.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกากของแข็งที่ได้จากกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละ 35.5 โดยน้ำหนัก)



ภาพที่ 4.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณออกซิเจนของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพจากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันภาวะเหนือวิกฤต ภาวะการทดลอง: อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที

4.4.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของน้ำมันชีวภาพ

จากตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันภาวะเหนือวิกฤต กรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนสูงสุด คือ 33.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม สำหรับกรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิด มีค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 33.2-35.9

เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อใช้ซิงค์คลอไรด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าทำให้น้ำมันชีวภาพมีค่าความร้อนสูงสุดเท่ากับ 35.9 สอดคล้องกับการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ ซึ่งพบว่าปริมาณออกซิเจนของน้ำมันชีวภาพกรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและกรณีไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 13.9-18.6 โดยน้ำหนัก โดยตัวเร่งปฏิกิริยาซิงค์คลอไรด์ สามารถผลิตน้ำมันชีวภาพที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำสุดเท่ากับ 13.9 ดังภาพที่ 4.4 การที่ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากการแปรรูปทำให้เป็นของเหลวมีปริมาณออกซิเจนลดลงอันเนื่องมาจากรีดักชัน (Reduction) ออกซิเจนด้วยไฮโดรเจน ในกะลาปาล์มน้ำมันและตัวทำละลาย ซึ่งส่งผลต่อค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ ดังกล่าวมาในข้างต้น [47-49]

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการแปรรูปกะลาปาล์มเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต โดยพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวส่วนที่เหมาะสม ส่งผลให้ทั้งร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมัน และร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวภาพมีค่าสูงขึ้น จากผลการทดลอง พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5 ชนิด ด้วยอัตราส่วนร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ในกระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลว สามารถลดปริมาณกากของแข็งซึ่งถือเป็นการช่วยเพิ่มร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมัน โดยเรียงลำดับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมันจากมากไปน้อยได้ดังนี้



ในขณะเดียวกัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ โดยเรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ดังนี้



ตารางที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบผลวิจัยนี้กับผลวิจัยที่ผ่านมาของการแปรรูปชีวมวลชนิดต่างๆ โดยผลของตัวแปรกระบวนการ คือ ชนิดของชีวมวล ตัวทำละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยา และภาวะการทดลอง ที่มีต่อการแปรรูปชีวมวลให้เป็นของเหลว ได้เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนของชีวมวลและร้อยละผลได้ของเหลวที่ได้ของงานวิจัยอื่นกับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบร้อยละการเปลี่ยนแปลงของชีวมวล ร้อยละผลได้ของเหลวของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่ผ่านมา

ผู้วิจัย	ชนิดของชีวมวล	ตัวทำละลาย	ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดเครื่องปฏิกรณ์	ภาวะการทดลอง	ร้อยละการเปลี่ยน ของชีวมวล	ร้อยละผลได้ ของเหลว
Cemek et al. 2001	<i>Verbascum stak</i>	Ethanol	ZnCl ₂	100 ml	300°C, 90 min	NA	60.6
Zhong et al. 2004	<i>Fraxinus mandshurica</i>	Water	K ₂ CO ₃	250 ml	320°C, 10 min	92.7	30.7
Yuan et al. 2007	Rice straw	2-propanol / Water	-	1000 ml	300°C, 3 min	80.3	39.7
Xu et al. 2008	Jack pine powder	Ethanol	FeSO ₄	14 ml	350°C, 40 min H ₂ 5 MPa	90.0	55.0
Mazaheri et al. 2010	Oil palm fruit fiber	Water	Na ₂ CO ₃	450 ml	290°C, 45 min N ₂ 10 MPa	89.8	71.3
Akhtah et.al 2009	Empty palm fruit bunch	Water	K ₂ CO ₃	450 ml	270°C, 20 min N ₂ 20 bar	72.4	60.1
Cheng et al. 2010	White pine sawdust	Ethanol / Water	-	600 ml	300 °C, 15 min N ₂ 2 MPa	71.0	64.1
งานวิจัยนี้	Oil palm shell	Ethanol	K ₂ CO ₃	250 ml	340 °C, 60 min H ₂ 4 MPa	81.1	66.5

4.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพด้วย GC/MS

ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วย GC/MS ผลิตภัณฑ์น้ำมันละลายในเอทิลแอลกอฮอล์ 1000 ppm ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการทำเป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต

ตารางที่ 4.8 แสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการทำเป็นของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต ทั้งใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต ตามลำดับ ภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากกระบวนการทำกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต กรณีไม่ใช้และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

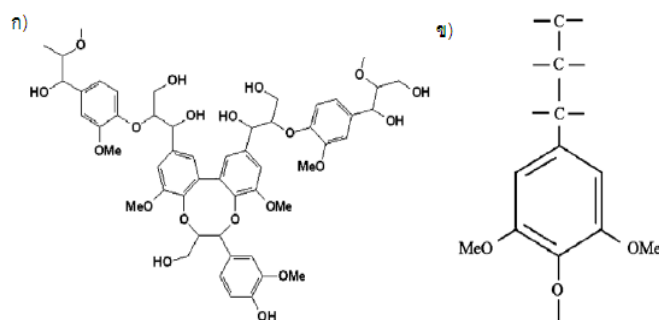
ชนิดของสารประกอบ	% Area					
	None	ZnCl ₂	MgO	CaO	K ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃
ฟีนอลิก	33.0	26.9	16.6	20.9	28.8	28.6
เอสเทอร์และอนุพันธ์	32.1	42.2	34.0	50.2	49.2	47.8
แอลกอฮอล์	2.0	11.2	7.7	5.1	13.1	4.1
คีโตนและอนุพันธ์	9.1	1.5	7.4	2.3	1.5	7.1
อีเทอร์และอนุพันธ์	8.3	6.9	3.4	4.3	0.8	1.3
ไฮโดรคาร์บอน	2.9	1.5	4.5	4.7	-	-

จากตารางที่ 4.8 พบว่า องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแปรรูปในกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารประกอบฟีนอล เอสเทอร์และแอลกอฮอล์ เนื่องจากลิกนินในกะลาปาล์มมีหน่วยของ ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane unit) สูง ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิดสารประกอบฟีนอล ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า ลิกนินสามารถสลายตัวเป็นสารตั้งต้นในการใช้ผลิต

อนุพันธ์ฟีนอล ซึ่งเป็นส่วนที่แตกออกมาจากโครงสร้างของลิกนินดังภาพที่ 4.5 (การแตกออกของ หมู่แอริลอีเทอร์ตัวเชื่อมต่อในโครงสร้างของลิกนิน) [25, 49-52]

โดยสรุป พบว่าเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะมีองค์ประกอบ คล้ายกัน แต่ต่างกันที่ปริมาณ คือมีองค์ประกอบของสารประกอบฟีนอลและเอสเทอร์มากขึ้น และ พบแอลกอฮอล์น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของน้ำมันชีวภาพกระบวนการทำเป็นของเหลวใน เอทานอลภาวะเหนือวิกฤต ที่อุณหภูมิ 300 และ 340 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิดสารจำพวกเอสเทอร์และอนุพันธ์มากขึ้น ในขณะที่สารประกอบฟีนอลลดลง เนื่องจาก อุณหภูมิไปช่วยให้เกิดการแตกตัวโครงสร้างวงแหวนแอโรแมติกแตกตัวกลายเป็นสารประกอบอื่นๆ มากขึ้น เช่น เอสเทอร์ เป็นต้น ดังตารางที่ 4.10



ภาพที่ 4.5 ก) ลักษณะโครงสร้างของลิกนิน และ ข) หน่วยย่อยของลิกนิน [39]

ตารางที่ 4.9 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแปรรูปกะลาปาล์ม

Compounds	Catalyst					
	None	ZnCl ₂	MgO	CaO	K ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃
% Area						
Phenolic compound						
Phenol						
phenol	12.5	11.1	7.7	13.5	6.6	3.0
2-methyl-Phenol	7.3	6.4	2.3	0.9	1.9	3.5
2-methoxy-Phenol	-	0.9	-	-	-	5.6
2-ethyl-Phenol	6.7	4.6	4.0	2.5	10.9	10.8
4-ethoxy-Phenol	-	-	-	-	2.5	0.7
4-ethyl-2-methoxy-Phenol	5.3	2.0	-	0.8	6.9	3.8
2-methoxy-4-propyl-Phenol	-	1.9	2.6	0.8	-	1.2
2-methoxy-4-methyl-Phenol	1.2	-	-	2.4	-	-
Alcohol						
4-Ethyl-4-heptanol	2.0	-	1.5	-	1.5	-
Pentanol	-	-	-	0.7	2.1	-
Benzyl Alcohol	-	0.8	-	0.5	4.8	-
1-Hexanol	-	1.3	2.1	-	0.9	1.2
2-Methyltetrahydro-2-furanol	-	1.4	-	2.9	-	-
1-Cyclohexanol	-	4.4	-	1.0	1.6	-
3-Methyl-4-penten-1-ol	-	1.1	1.1	-	0.8	2.2
Benzenepropanol	-	-	-	-	1.4	0.7
3-Ethyl-1-butanol	-	2.2	3.0	-	-	-
Ether						
2-ethoxy-Ether	3.2	-	0.7	1.5	-	-
2-Ethoxy-2-methylbutane	3.3	-	-	-	-	-
2-Ethoxypentane	-	-	1.6	1.3	-	1.3
2-ethoxy-Butane	-	3.1	-	-	0.8	-
Butyl Ethyl ether	1.8	3.8	1.1	1.5	-	-

Compounds	Catalyst					
	None	ZnCl ₂	MgO	CaO	K ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃
% Area						
Ester						
Ethyl 2-hydroxybutanoate	1.6	-	2.4	-	-	1.6
Ethyl 3-hexenoate	5.5	1.5	1.5	-	6.1	8.1
Ethyl 2-hexenoate	-	11.7	1.0	7.7	13.3	5.3
Diethyl succinate	1.1	-	-	1.2	4.7	1.8
2-Methylpentylhexanoate	0.9	-	1.1	0.8	0.6	-
Ethyl octanoate	0.8	1.1	-	1.2	4.9	1.3
Ethyl dodecanoate	8.4	15.1	12.1	20.5	14.3	19.5
Ethyl undecanoate	0.8	-	0.9	-	-	-
Ethyl tetradecanoate	13.0	-	2.3	7.6	4.0	6.7
Ethyl hexadecanoate	-	9.2	8.2	8.8	-	-
Methyl Palmitate	-	3.6	0.5	0.7	-	1.3
Ethyl ethoxyacetate	-	-	-	0.5	-	-
Ethyl benzoate	-	-	-	-	-	2.2
Ethyl benzenecarboxylate	-	-	-	1.2	1.3	-
Ketone						
2-Ethylcyclopentanone	5.4	-	1.1	0.7	-	4.3
3-Butylcyclopentanone	0.8	1.0	-	-	0.7	2.0
1,3-Benzodioxin-4-one	2.9	-	3.1	1.0	0.8	0.8
3,5-Heptadien-2-one	-	-	0.9	0.6	-	-
1-(1-cyclohexen-1-yl)Ethanone	-	0.5	2.3	-	-	-
Silane						
Trimethylsilane	2.2	-	-	0.8	-	-
Hydrocarbon						
2,4-Dimethyl Hexadiene	1.7	0.8	-	1.4	-	-
1-Octene	1.2	0.7	3.3	2.0	-	-
3-Decyne	-	-	1.2	1.3	-	-

ตารางที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแปรรูปกะลาปาล์ม

Compounds	Temperature (°C)	
	300	340
% Area		
Phenolic compound		
Phenol		
phenol	8.5	12.5
2-methyl-Phenol	2.0	7.3
2-methoxy-Phenol	4.3	-
2-ethyl-Phenol	6.7	6.7
4-ethoxy-Phenol	9.4	-
4-ethyl-2-methoxy-Phenol	-	5.3
2-methoxy-4-propyl-Phenol	6.3	-
2-methoxy-4-methyl-Phenol	2.6	1.2
Alcohol		
3-methyl-2-Pentanol	3.4	-
4-Ethyl-4-heptanol	1.2	2.0
Ether		
2-Ethoxy-2-methylbutane	4.1	3.2
2-ethoxy-Ether	5.5	3.3
Butyl Ethyl ether	0.9	1.8
Ester		
Ethyl 2-hydroxybutanoate	2.1	1.6
Ethyl 3-hexenoate	-	5.5
Ethyl 2-hexenoate	6.0	-
Diethyl succinate	-	1.1
2-Methylpentylhexanoate	-	0.9
Ethyl octanoate	2.3	0.8
Ethyl dodecanoate	1.6	8.4
Ethyl undecanoate	-	0.8
Ethyl tetradecanoate	5.2	13.0

Compounds	Temperature (°C)	
	300	340
% Area		
Ketone		
2-Ethylcyclopentanone	-	1.1
3-Butylcyclopentanone	-	0.8
1,3-Benzodioxin-4-one	1.7	2.9
Silane		
Trimethylsilane	-	2.2
Hydrocarbon		
2,4-Dimethyl Hexadiene	3.1	2.7
1-Octene	-	1.2

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษากระบวนการแปรรูปกะลาปาล์มน้ำมันให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลาย ภาวะเหนือวิกฤต ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 360 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล เวลา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงก์คลอไรด์ แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต ที่อัตราส่วนร้อยละ 2, 5 และ 10 โดยน้ำหนักของชีวมวล

1. ผลของอุณหภูมิ

- การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์ม และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้น จนถึงอุณหภูมิหนึ่งร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ขณะที่ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มยังคงสูงขึ้น
- การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ มีค่าความร้อนค่าสูงขึ้น และปริมาณออกซิเจนต่ำลง

2. ผลของตัวทำละลาย

- ตัวทำละลายที่เหมาะสมจากการศึกษานี้ ได้แก่ เอทานอลบริสุทธิ์
- เมื่อความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้น ช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว รวมถึงลดปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้
- ตัวทำละลายที่มีความเข้มข้นของเอทานอลต่ำ ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ แก๊สสูงกว่าตัวทำละลายที่มีความเข้มข้นสูง

3. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

- การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ซิงก์คลอไรด์ แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ โพแทสเซียมคาร์บอเนต และโซเดียมคาร์บอเนต ช่วยเพิ่มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว รวมทั้งช่วยลดปริมาณกากของแข็งที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มขึ้นสูงสุด

4. ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแปรรูปกะลาปาล์มด้วยการทำให้เป็นของเหลวในตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต ช่วยเพิ่มค่าความร้อนให้แก่ผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากเดิมกะลาปาล์มมีค่าความร้อนเพียง 14.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม แต่เมื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าความร้อนอยู่ในช่วง 30.4 - 35.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม
5. องค์ประกอบหลักของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่สังเคราะห์ได้คือ สารประกอบฟีนอล สารประกอบเอสเทอร์ และแอลกอฮอล์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษากระบวนการปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพโดยลดปริมาณออกซิเจนในน้ำมันที่ผลิตขึ้น ด้วยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชัน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะซัลไฟด์
2. ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทแอลคาไลในกระบวนการทำให้เป็นของเหลวของชีวมวล
3. ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์โดยการขยายขนาดการทดลองใหญ่ขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. ชีวมวล [ออนไลน์]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.apecthai.org> [2554, กันยายน 24].
- [2] Carbon cycle [Online]. 2007 Available from: <http://www.aqagcsebiology.blogspot.com> [2012, January 20].
- [3] นคร ทิพย์วงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2552.
- [4] วงกต วงศ์อภัย. ชีวมวล: อีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานไทย. มติชนสุดสัปดาห์ 24 (2547): 31.
- [5] ศูนย์ส่งเสริมประสิทธิภาพชีวมวล. ชีวมวล. [ออนไลน์]. 2550 แหล่งที่มา: <http://www.efc.or.th> [2554, ตุลาคม 10].
- [6] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. สถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2554 [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th> [2555, กุมภาพันธ์ 15].
- [7] วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. รายงานพลังงานของประเทศไทย. กรุงเทพฯ: วิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2544.
- [8] โครงการสนับสนุนการสร้างเอเชียพันธมิตรเพื่อการเกษตรใส่ใจสิ่งแวดล้อม. คู่มือสารชีวมวลเอเชีย แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล. กระทรวงเกษตร ป่าไม้ และประมง, 2551.
- [9] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. การผลิตเอทานอลจากชีวมวลปาล์มน้ำมัน [ออนไลน์]. 2551 แหล่งที่มา: <http://www.rdi.ku.ac.th>. [2555, มีนาคม 22]
- [10] Cellulose structure [Online]. Available from: learners.in.th/file/dawood/view/83293 [2012, January 28]
- [11] วรณัฐ แฉ่งสว่าง. พลังงานหมุนเวียน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท แอคทีฟ พรินท์ จำกัด, 2551.
- [12] ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [13] Probst, J., and Hicks, M. Synthetic Fuels. 102: McGraw Hill : 1985.

- [14] Wei, C., Zheng, L., and Hobart, W. K. Application of the rapid thermal process: sintering the sputtered aluminum/silicon contact in silicon detector fabrication. *Sci. NS-39* 4 (1992): 558.
- [15] Alvin, B. S., and Theodore, A. K. *Catalyst Manufacture*. 2nd edition. New York : Marcell Dekker, 1995.
- [16] วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. ปฏิกิริยาเร่งเคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [17] สมชัย อัครทิวา. ความรู้พื้นฐานทางวิศวกรรมของปฏิกิริยาเชิงเร่ง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ท้อป, 2546.
- [18] ธราธร มงคลศรี. หลักสูตรทางวิศวกรรมปฏิกิริยาตัวเร่ง. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [19] จตุพร วิทยา และ นุรักษ์ กฤษฏานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- [20] ปาล์มน้ำมัน [ออนไลน์]. 2550 แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org>. [2555, มีนาคม 22]
- [21] Palm oil [Online]. 2008. Available from: www.fao.org/docrep/006/t0309e/t0309e01.htm [2012, January 28]
- [22] Production of palm oil [Online]. 2010. Available from: www.charcoal.snmcenter.com/charcoalthai/chevamul.php [2008, January 28]
- [23] Sothanapan, U., and Pavowat, R. Principle of supercritical fluid. *J. STRECU*, 1993.
- [24] Supercritical fluids [Online]. 2007. Available from: www.le.ac.uk/chemistry/greenchem/supercritical_fluids.htm [2012, January 28]
- [25] จิราพัชร คำพิเดช. การผลิตน้ำมันชีวภาพโดยการทำให้กะลาปาล์มน้ำมันเป็นของเหลวในเอทานอลภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [26] Yuan, X., Li, H., Zeng, G. M., Tong, J.Y., and Xie, W. Sub- and supercritical liquefaction of rice straw in the presence of ethanol-water and 2-propanol-water mixture. *Energy* 32 (2007): 2081-2088.

- [27] Liu, Z., Zhang, F. Effects of various solvents on the liquefaction of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. Energy Conversion and Management 49 (2008): 3498-3504.
- [28] Cheng, S., Dacruz, I., Wang, M., Leitch M., and Xu, C. Highly efficient liquefaction of woody biomass in hot-compressed alcohol-water co-solvents. Energy & Fuels 24 (2010): 4659-4667
- [29] Chumpoo, J., and Prasassarakich, P. Bio-oil from hydro-liquefaction of bagasse in supercritical ethanol. Energy & Fuels 24 (2010): 2071-2077
- [30] Mazaheri, H., Lee, K.T., Bhatia, S., and Mohamed A. R. Subcritical water liquefaction of oil palm fruit press fiber for the production of bio-oil: effect of catalysts. Bioresource Technology 101 (2010): 745–751.
- [31] Mazaheri, H., Lee, K.T., Bhatia, S., and Mohamed A. R. Sub/supercritical liquefaction of oil palm fruit press fiber for the production of bio-oil: effect of solvent. Bioresource Technology 101 (2010): 7641–7647.
- [32] Xu C., Lad N. Production of heavy oils with high caloric values by direct liquefaction of woody biomass in sub/near- critical water. Energy & Fuels. 22 (2008): 635–642.
- [33] Yang Y., Gilbert A., Xu C. Production of bio-crude from forestry waste by hydro-liquefaction in sub-/super-Critical methanol. Environment and Energy Engineering 55 (2009): 807-819.
- [34] Behrendt F., Neubauer Y. Direct liquefaction of biomass. Chem. Eng. Technol. 31 (2008): 667-677.
- [35] Demirbas A. Mechanism of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. Energy Convers Manage 41 (2000): 633–646.
- [36] KucuK M.M., Agirtas S. Liquefaction of *Prangmites* by supercritical gas extraction. Bioresource Technology 69 (1999): 141-143.
- [37] Zhong C., Qu Y., Wei X. Experimental study on the direct liquefaction of *Cunninghamia lanceolata* in water”, Energy 28 (2003): 597-606.

- [38] Akiya N., Savage P.E. Roles of water for chemical reactions in high-temperature water. Chem.Rev. 102 (2002): 2725-2750.
- [39] Xu C., Etcheverry T. Hydro-liquefaction of woody biomass in sub- and supercritical ethanol with iron-based catalyst. Fuel 87 (2008): 335-345.
- [40] Florence A. T., Attwood D. A. Physicochemical principles of Pharmacy. second edition. London: Macmillan, 1988.
- [41] Akhtar, J., Kuang, S. K., and Amin, N. S. Liquefaction of empty palm fruit bunch (EPFB) in alkaline hot compressed water. Renewable Energy 35 (2010): 1220–1227.
- [42] Li, H. et al. The formation of bio-oil from sludge by deoxy-liquefaction in supercritical ethanol. Bioresource Technology 101 (2010): 2860-2866.
- [43] Yuan, X., Xie, W., Zeng, G., Tong, J., and Li, H. Influence of catalyst on the yields and properties of products from biomass liquefaction in supercritical water. Int J. Biotechnology 10 (2008): 35-44.
- [44] Sun, P., Henh, M., Sun, S., and Chen, J. Direct liquefaction of paulownia in hot compressed water: Influence of catalysts. Energy 35 (2010): 5421-5429
- [45] Krasaein, S., Stang, H. J., and Neksa, P. Development of large-scale hydrogen on liquefaction processes from 1898 to 2009. Int. J. Hydrogen Technology 35 (2010): 4524-4533
- [46] Balat, M. Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 1: Reactions of Pyrolysis. Energy Sources 30 (2008): 620-635.
- [47] Schobert, H. The chemistry of hydrocarbon fuels. London: Butterworths, 1990.
- [48] Mohan, D., Pittman, C. U., and Steele, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil a critical review. Energy and fuel 20 (2006): 848-889.
- [49] Uzun, B. B., and Sarioglu N. Rapid and catalytic pyrolysis of corn stalks. Fuel Processing Technology 90 (2009): 705-715.
- [50] Putun, E. Catalytic pyrolysis of biomass: Effects of pyrolysis temperature, sweeping gas flow rate and MgO catalyst. Energy 35 (2010): 2761 -2766.

- [51] Mullen, C. A., and Boateng, A. A. Catalytic pyrolysis-GC/MS of lignin from several sources. Fuel Processing Technology 91 (2010): 1446-1458.
- [52] Karagoz, S., Bhaskar, T., Muto, A., and Sakata, Y. Comparative studies of oil compositions produced from sawdust, rice husk, lignin and cellulose by hydrothermal treatment. Fuel 84 (2005): 875–884.

ภาคผนวก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของกะลาปาล์มน้ำมัน

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

- 1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (drying oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิคเคเตอร์ (desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
- 2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่างแกลบ
- 3) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
- 4) นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิคเคเตอร์ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

สูตรการคำนวณ

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

เมื่อ	M	=	ร้อยละของความชื้น
	W_1	=	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)
	W_2	=	น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.2 เถ้า (Ash): ASTM D3174

วิธีการทดลอง

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

สูตรการคำนวณ

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

- เมื่อ
- A = ร้อยละของเถ้า
- W_3 = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝานที่มีเถ้า (กรัม)
- W_4 = น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝาน (กรัม)
- W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบิลพร้อมฝาในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลพร้อมฝา บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชชีเบิลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 5) หย่อนครุชชีเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
- 6) นำครุชชีเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในโถดูดความชื้นประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรการคำนวณ

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

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	W_5	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
	W_6	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่การคำนวณ

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

2. การวิเคราะห์ค่าความร้อน (Gross Calorific Value) : ASTM D 2015

วิเคราะห์ด้วยเครื่องแคลอริมิเตอร์ (Oxygen Bomb Calorimeter)

วิธีการทดลอง

1. ชั่งกรดเบนโซอิกประมาณ 1 กรัม ให้มีความละเอียด 0.0001 กรัม ใส่ในถ้วยตัวอย่างเครื่อง
2. ตัดลวด (Fuse Wire) ความยาวประมาณ 10 เซนติเมตร ผูกที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนจุดระเบิด ให้ลวดแตะผิวตัวอย่างของแข็งในถ้วย
3. ล้างภายในบอมบ์ให้สะอาดด้วยน้ำกลั่น และเติมน้ำกลั่นลงในบอมบ์ 1 มิลลิลิตร
4. ประกอบบอมบ์ ปิดฝาให้แน่น อัดแก๊สออกซิเจนมีความดัน 30 บรรยากาศ และต้องเท่ากันทุกครั้ง ระวังอย่าให้ตัวอย่างกระจายจากถ้วยใส่ตัวอย่าง
5. นำบอมบ์ที่อัดแก๊สออกซิเจนแล้ววางลงในถังน้ำที่ปรับอุณหภูมิ ต่อขั้วไฟฟ้าสำหรับจุดระเบิด
6. เติมน้ำกลั่นลงในถังที่ปรับอุณหภูมิประมาณ 2000 มิลลิลิตร ปรับอุณหภูมิของน้ำโดยการกวนให้อุณหภูมิคงที่และต่ำกว่าอุณหภูมิของห้องประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส
7. ทิ้งไว้ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิคงที่
8. เมื่ออุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิเริ่มต้น (T_1) กดปุ่มจุดระเบิด
9. จับเวลาทุกๆ 1 นาทีจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ บันทึกเป็นอุณหภูมิสุดท้าย (T_2)
10. ปิดเครื่องและนำบอมบ์ออกจากเครื่อง ค่อยๆลดความดัน ถ้าภายในมีเขม่าหรือเถ้าไหม้ไม่หมดให้ทำใหม่
11. ล้างภายในบอมบ์ทุกส่วนด้วยน้ำล้างบอมบ์ที่เตรียมไว้ จนหมดความเป็นกรดและมีปริมาตรประมาณ 250 มิลลิลิตร ไตเตรตน้ำล้างด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมคาร์บอเนต บันทึกปริมาตรที่ใช้
12. วัดความยาวลวดที่เหลือ บันทึกผล

ภาคผนวก ข

การคำนวณและข้อมูลการทดลอง

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้น้ำมัน

$$\text{ร้อยละผลได้น้ำมัน} = [W_{\text{Oil}} / W_{\text{Sample,daf}}] \times 100$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้กากของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้กากของแข็ง} = [W_{\text{SR}} / W_{\text{Sample,daf}}] \times 100$$

3. การคำนวณร้อยละผลได้แก๊สและน้ำ

$$\text{ร้อยละผลได้แก๊สและน้ำ} = 100 - \text{ร้อยละผลได้น้ำมัน} - \text{ร้อยละผลได้กากของแข็ง}$$

4. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยน

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์มน้ำมัน} = 100 - \text{ร้อยละผลได้กากของแข็ง}$$

โดย W_{Oil} = น้ำหนักของน้ำมัน

W_{SR} = น้ำหนักของกากของแข็ง

$W_{\text{Sample,daf}}$ = น้ำหนักของกะลาปาล์มน้ำมันที่ปราศจากความชื้นและเถ้า

ตัวอย่างการคำนวณ

ภาวะของการทดลอง

อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส

ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล

ตัวทำละลายที่ใช้ เอทานอล 100 มิลลิลิตร

เวลา 40 นาที

การคำนวณ

น้ำหนักของกะลาปาล์มที่ปราศจากความชื้นและเถ้า (Dry ash free basis) = 10.0660 กรัม

น้ำหนักของน้ำมันชีวภาพ = 3.9848 กรัม

น้ำหนักของกากของแข็ง = 4.0884 กรัม

ร้อยละผลได้น้ำมันชีวภาพ = $[3.9848 / 10.0660] \times 100 = 39.49$

ร้อยละผลได้กากของแข็ง = $[4.0884 / 10.0660] \times 100 = 40.61$

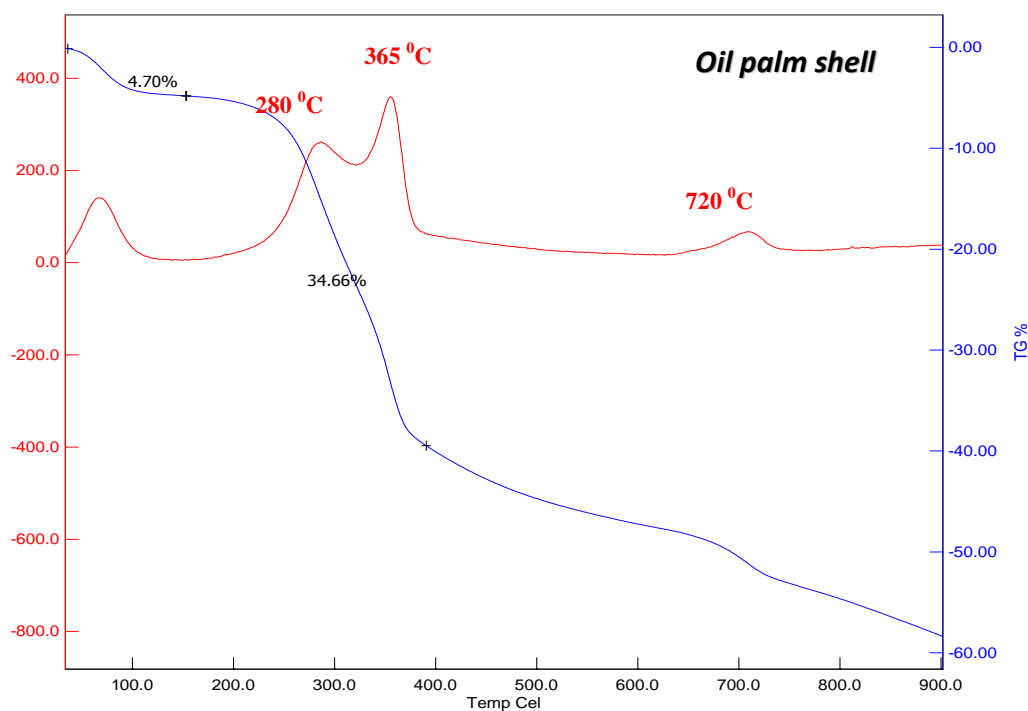
ร้อยละผลได้แก๊สและน้ำ = $100 - 39.49 - 40.61 = 19.9$

ร้อยละการเปลี่ยนของกะลาปาล์ม = $100 - 19.9 = 80.1$

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์กะลาปาล์มน้ำมันด้วย TG/DTA

การวิเคราะห์กะลาปาล์มน้ำมันด้วยเครื่อง TG/DTA



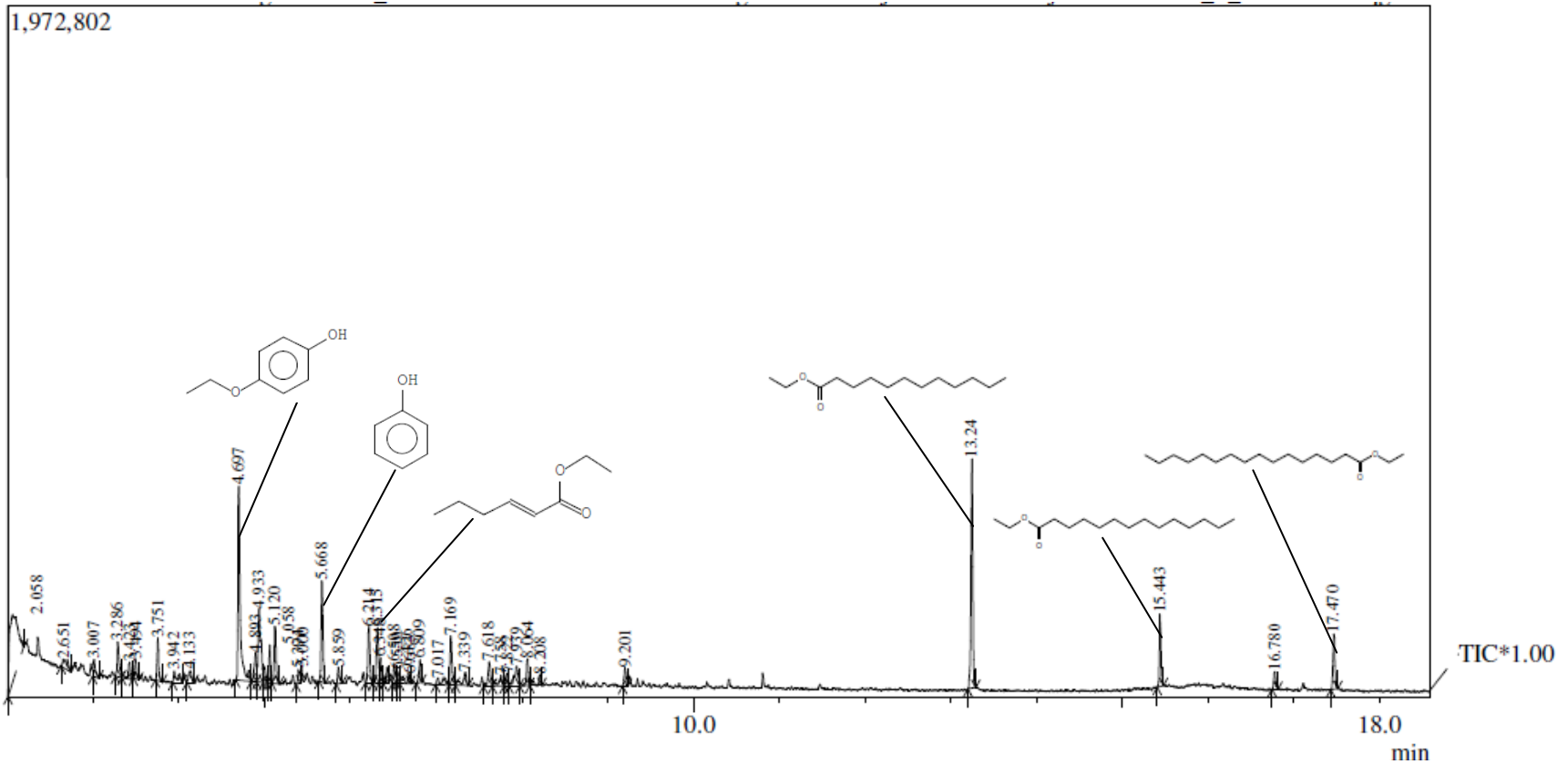
ภาพที่ ค1 ความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักและอัตราการสูญเสียน้ำหนักกับอุณหภูมิของกะลาปาล์มน้ำมัน

ภาคผนวก ง

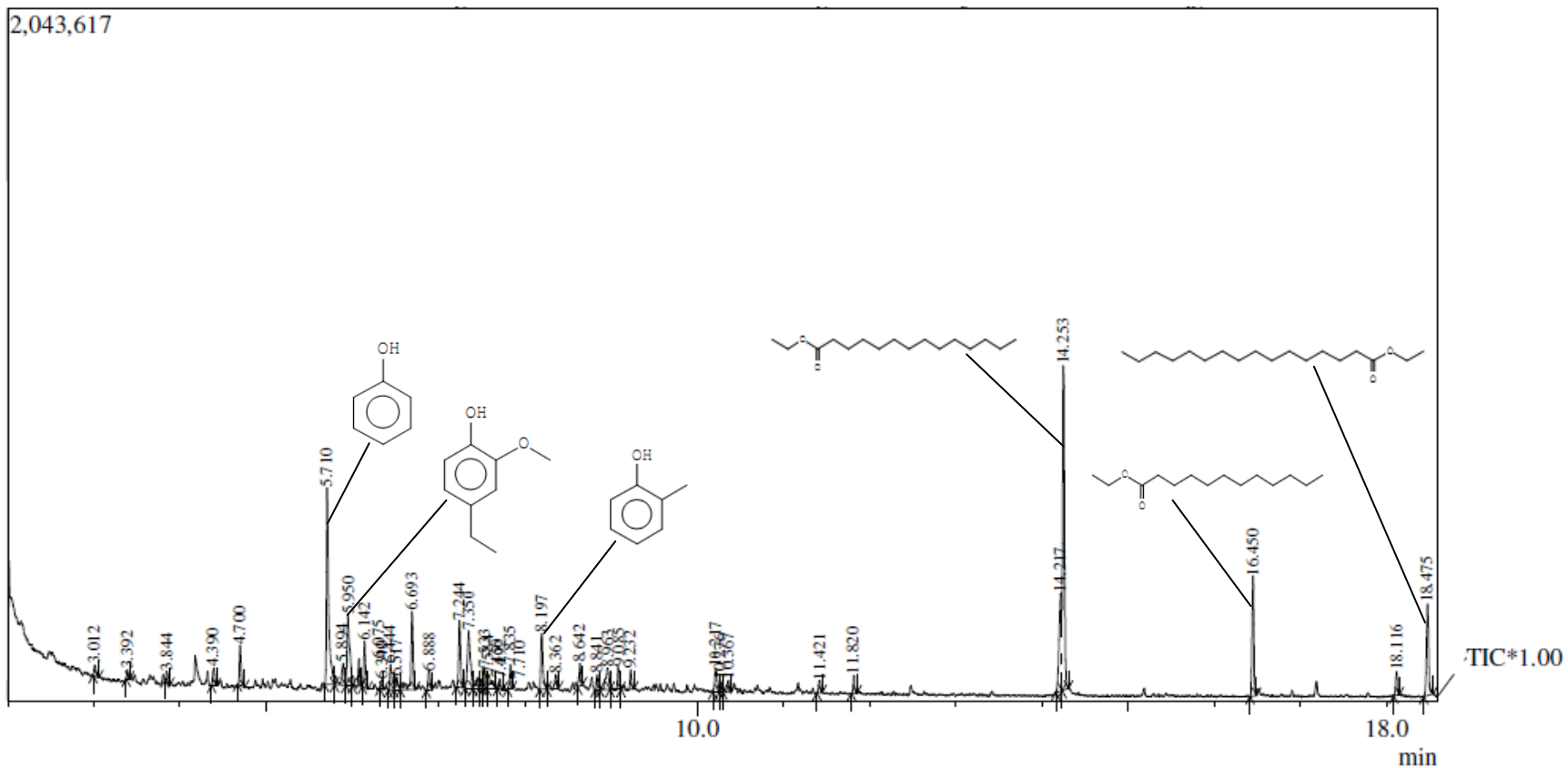
การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ

1. โคโรมาโทแกรมแสดงผลการแยกผลิตภัณฑ์ของเหลว

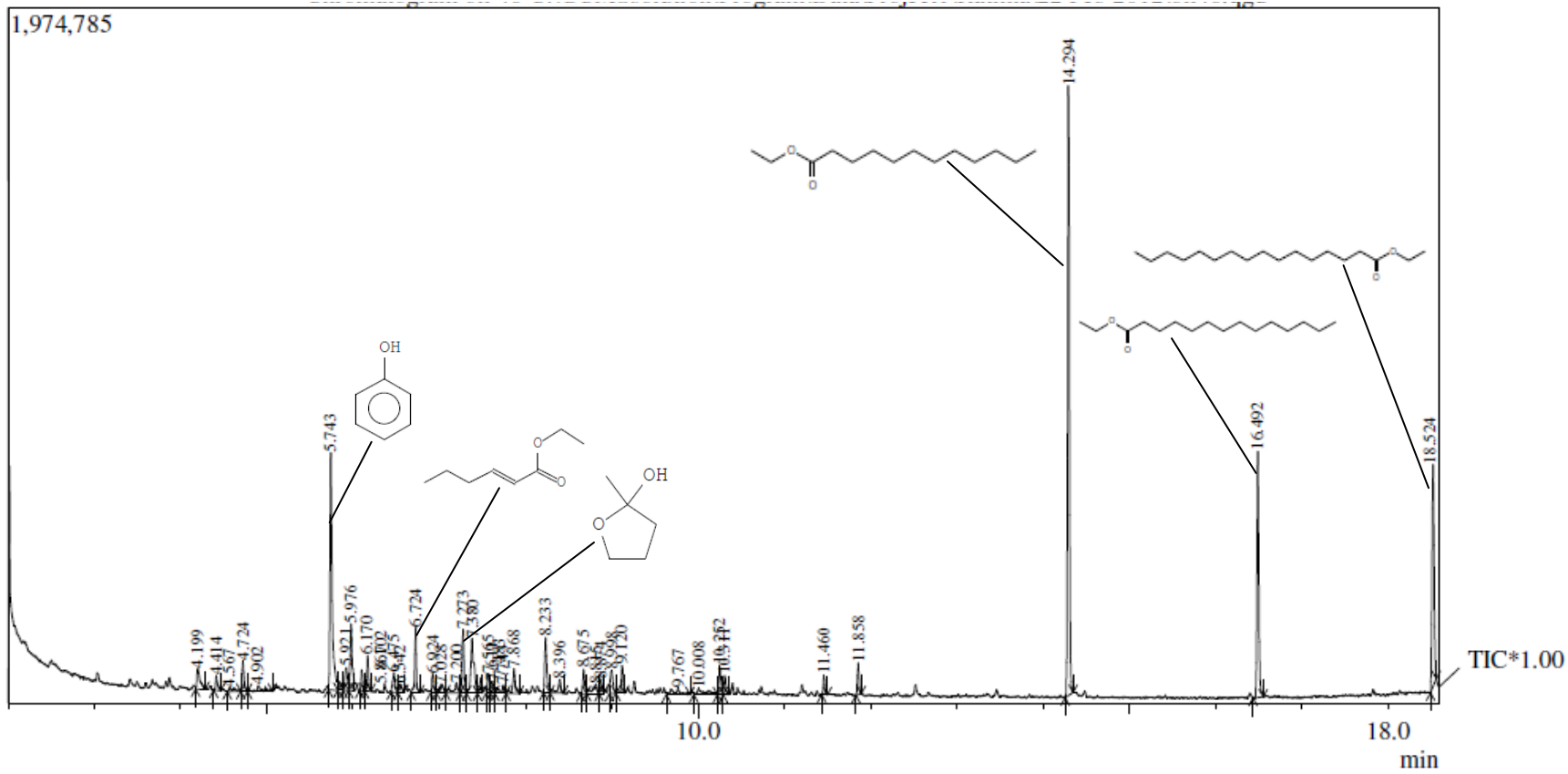
ผลิตภัณฑ์ของเหลวถูกละลายด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 1000 ppm วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี Agilent 6890N และ เครื่องแมสเปคโตรมิเตอร์ Agilent 5973N ได้โครมาโทแกรมดังแสดงในภาพที่ ง1-ง7



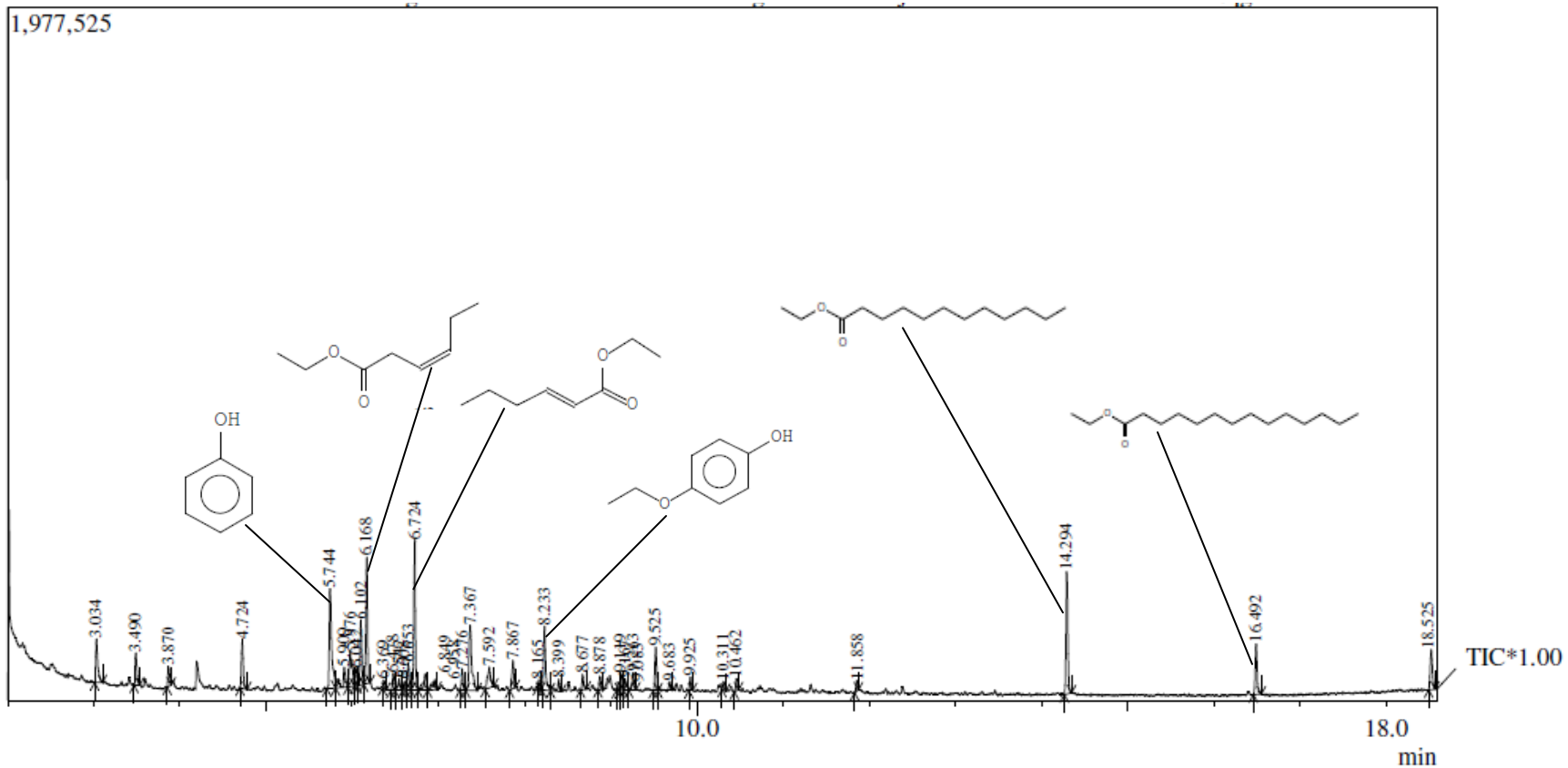
ภาพที่ ๑1 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 300 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v)



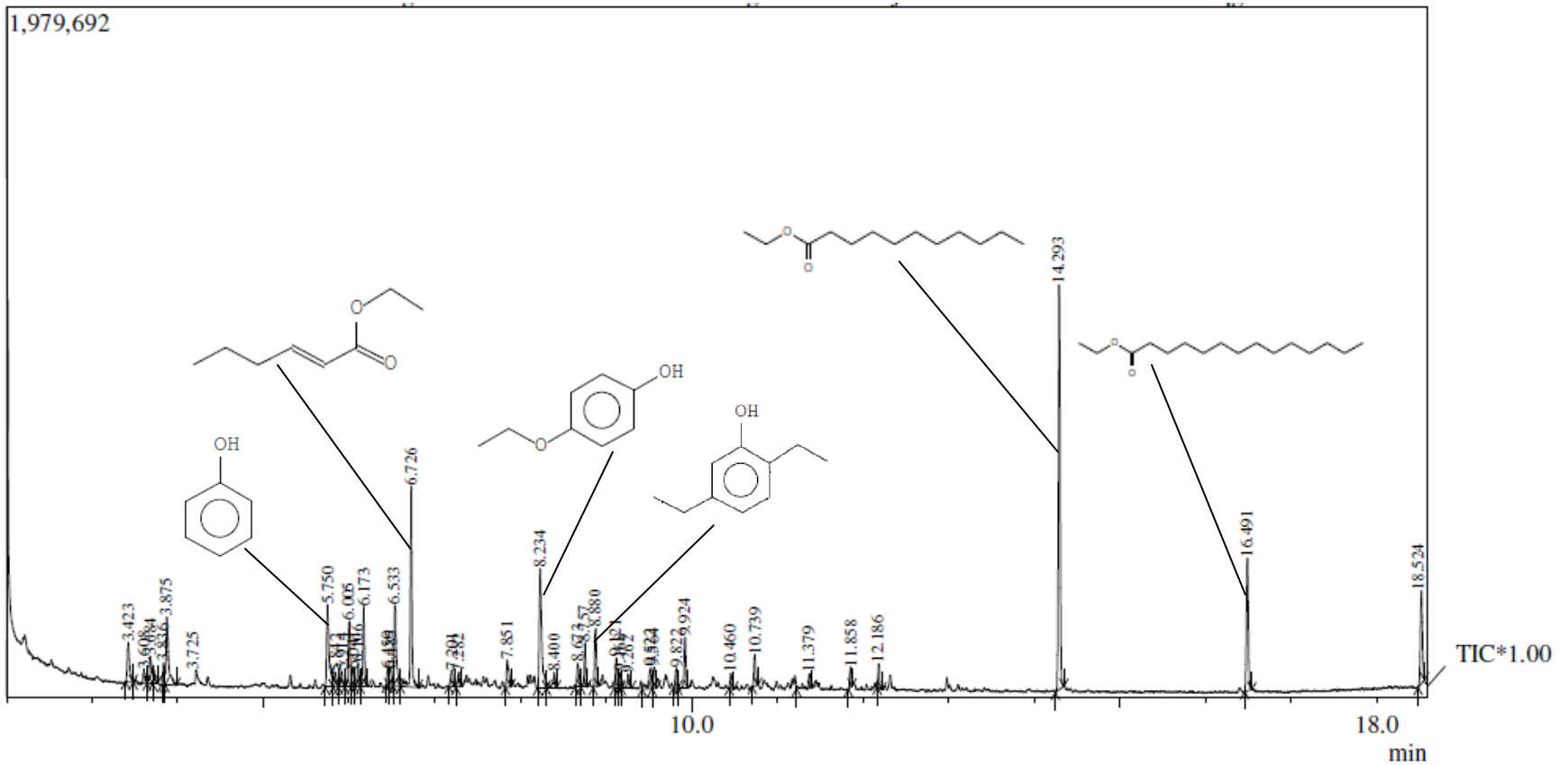
ภาพที่ ๖2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมันภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v)



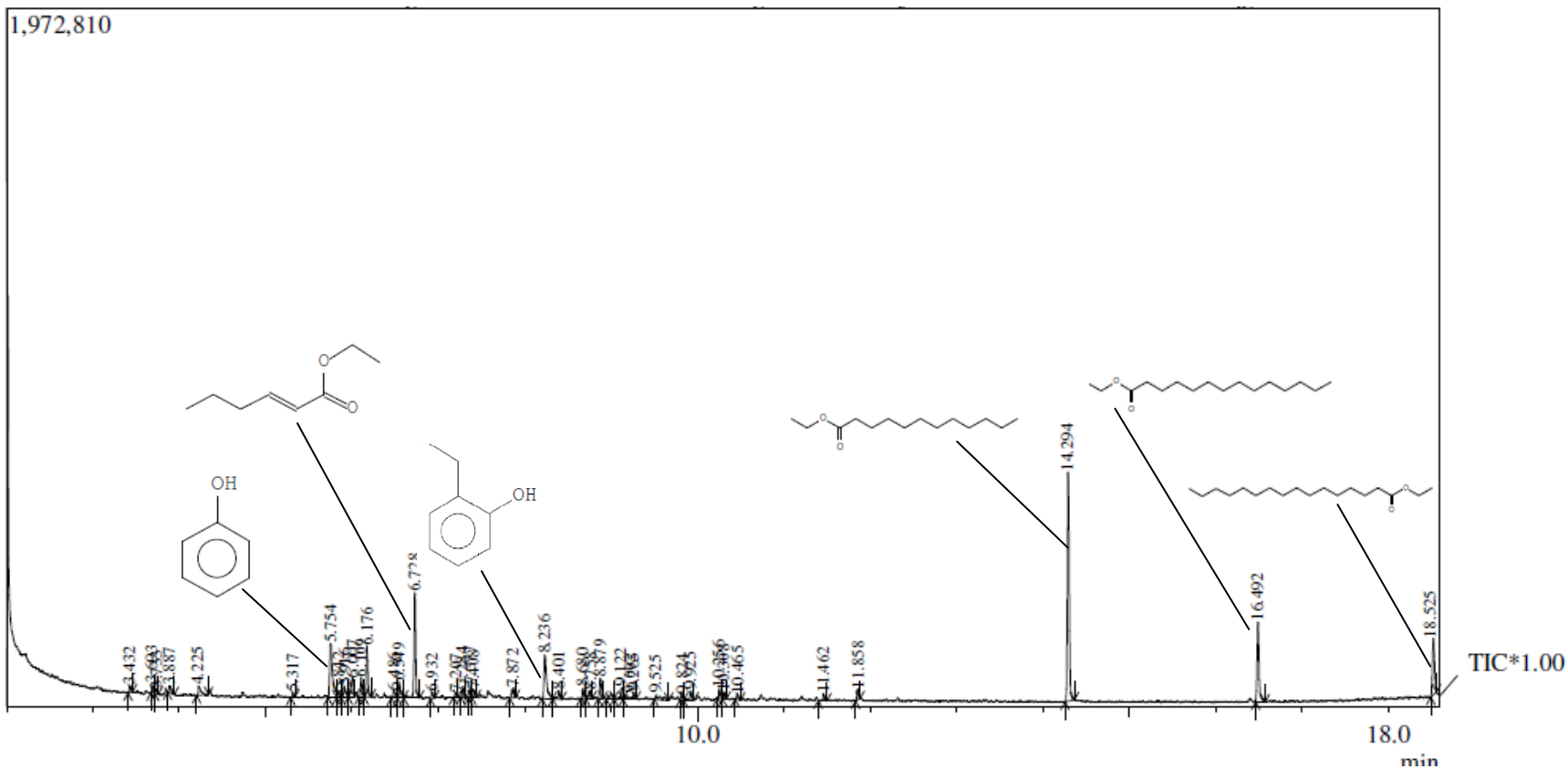
ภาพที่ 3 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



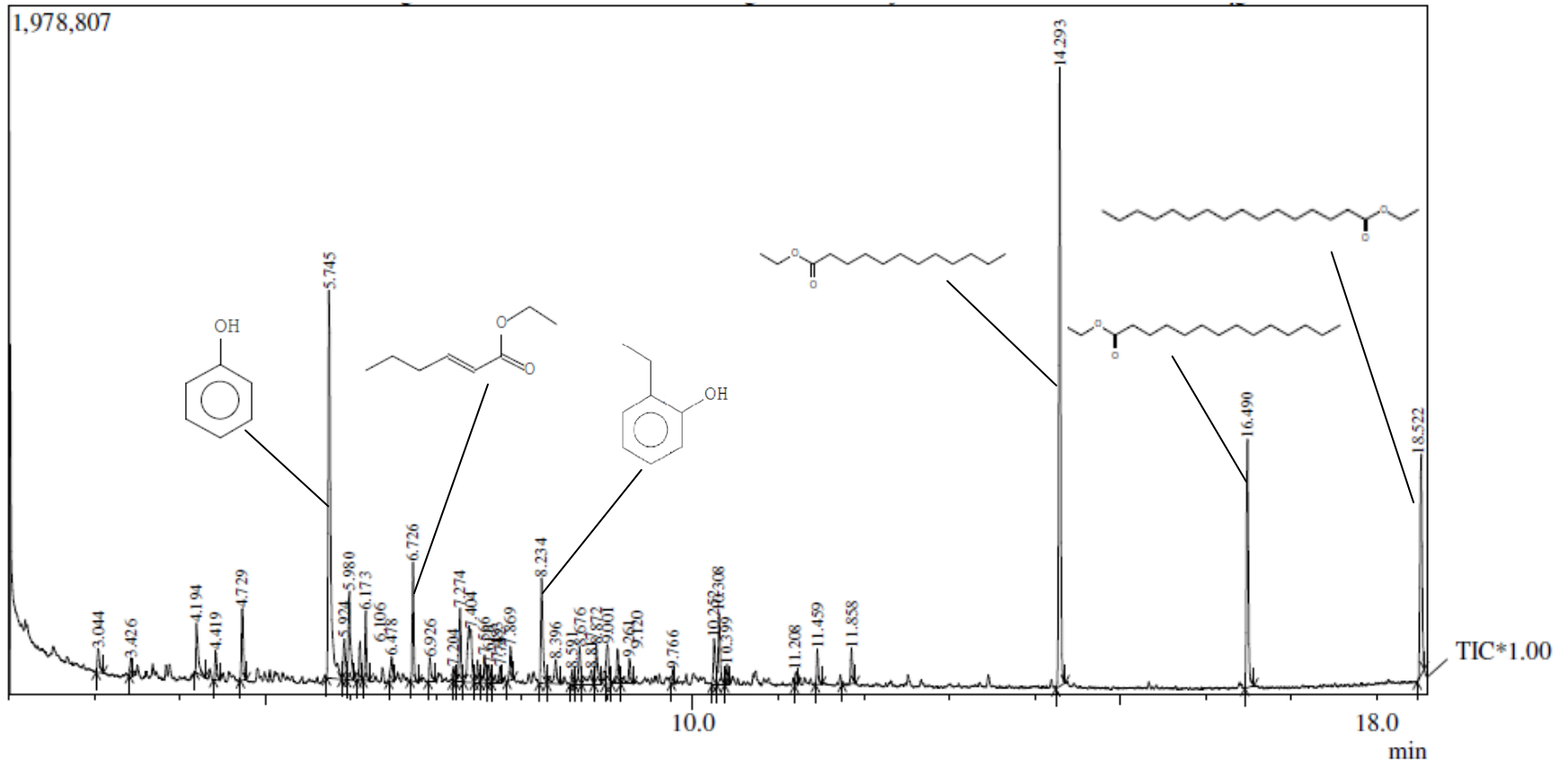
ภาพที่ ๔4 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 % (v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาซิงก์คอลลอยด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ ๖5 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนต ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



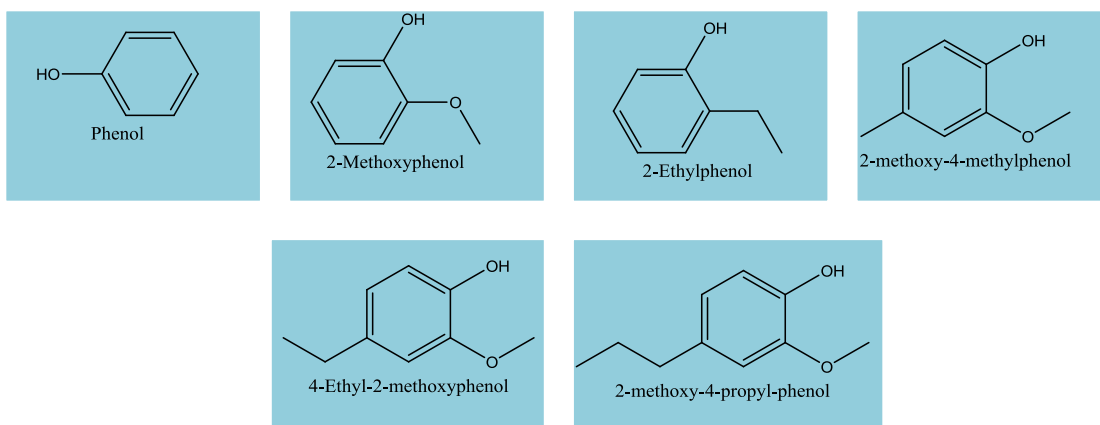
ภาพที่ ๖6 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 % (v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมคาร์บอเนต ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก



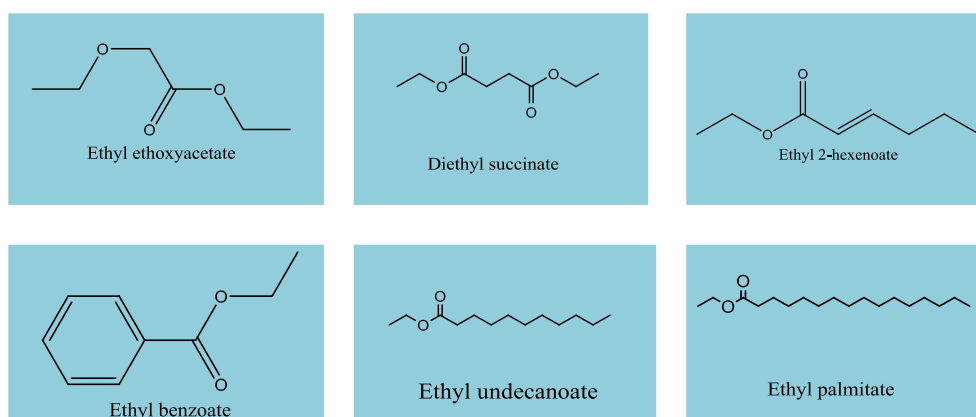
ภาพที่ ๗7 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภาวะการทดลอง 340 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 4.0 เมกะพาสคัล และเวลา 60 นาที และตัวทำละลายเอทานอล 99.9 %(v/v) ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ภาคผนวก จ

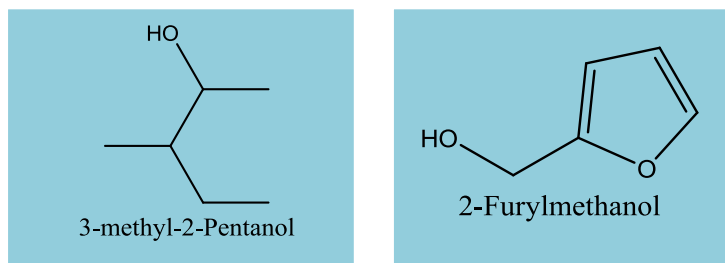
สูตรโครงสร้าง



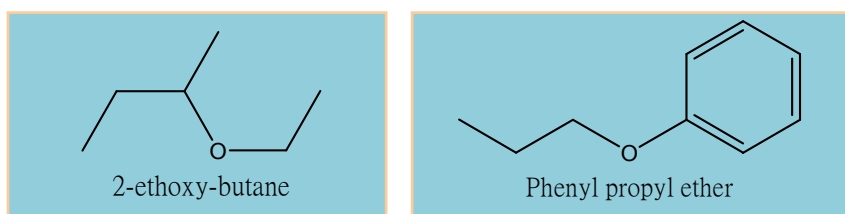
ภาพที่ จ1 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มสารประกอบฟีนอล



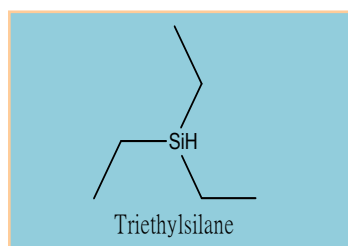
ภาพที่ จ2 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มเอสเตอร์



ภาพที่ ๑3 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มแอลกอฮอล์



ภาพที่ ๑4 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มอีเทอร์



ภาพที่ ๑5 สูตรโครงสร้างองค์ประกอบหลักของสารใน GC/MS ในกลุ่มซิลเลน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรติมา จงอริยะกุล เกิดวันที่ 14 กุมภาพันธ์ 2530 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552