

เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยไฟโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LIGHT-FRACTION LIQUID FUEL BY PYROLYSIS OF OIL FROM PALM EMPTY FRUIT BUNCH
USING MIXED CATALYSTS



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

Department of Chemical Technology

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2019

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลาะ
	ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม
โดย	น.ส.สุดาพร สุนทร
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ทิณชีระนันท์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิชากร จารุศิริ)	

สุดาพร สุนทร : เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่า
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม. (LIGHT-FRACTION LIQUID FUEL BY PYROLYSIS OF
OIL FROM PALM EMPTY FRUIT BUNCH USING MIXED CATALYSTS) อ.ที่ปรึกษา
หลัก : ศ. ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) โดยไพโรไลซิส
น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้
ประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ที่ผสมกันในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 และนำมาผสมกับ 10%
นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY ทำการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว
ที่มีสัดส่วนเบามากที่สุด โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ (2K factorial
design) มีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 420-450 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการ
ทดลอง 30-60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาผสมร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่าง
แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 70 ต่อ 30 และ
30 ต่อ 70 เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert พบว่า ภาวะที่เหมาะสม
คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 449.99 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา
ผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิล
บนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 32.51 ต่อ 67.49 จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 69.50 และร้อยละ
ผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา 64.17 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ มีองค์ประกอบของ
คาร์บอนร้อยละ 84.93 ไฮโดรเจนร้อยละ 12.57 และออกซิเจนร้อยละ 2.51 ตรวจไม่พบค่าความเป็นกรด
และมีค่าความร้อนเท่ากับ 42.50 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6172082023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Pyrolysis/Palm oil/Decarboxylation/Light-Fraction liquid fuel

Sudaporn Soonthorn : LIGHT-FRACTION LIQUID FUEL BY PYROLYSIS OF OIL FROM PALM EMPTY FRUIT BUNCH USING MIXED CATALYSTS. Advisor: Prof. THARAPONG VITIDSANT, Ph.D.

This research aims to produce light fraction liquid fuel (C₅-C₁₅) by catalytic cracking and deoxygenation of residue palm oil from empty fruit bunch in batch reactor. The catalysts are MgO, Activated Carbon (AC), MgO/AC and 10% Ni/HY-zeolite were used in this study. The 2K factorial design were used to determine investigate the optimum condition for obtaining the maximum liquid and light fraction liquid fuel yield. The parameter investigation were studied by varying several operating conditions as temperature range of 420-450 °C, reaction time of 30-60 minutes, the amount of catalysts loading 1-5% (by weight), The weight ratio between (MgO+AC) and 10% Ni/HY-zeolite was set up at 70:30 and 30:70. The analysis results from design-expert program showed that the optimum condition for pyrolysed liquid fraction from residue palm oil from empty fruit bunch where using mixed catalysts as following was reaction temperature of 449.99 °C, reaction time 30 minutes, amount of catalysts 1% and The ratio between (MgO+AC) and 10%Ni/HY-zeolite at 32.51:67.49 which gave the light fraction liquid fuel and liquid yield of 64.17 %wt and gave liquid yield of 69.50 %wt. The liquid product was composed of 84.93% of carbon, 12.57% of hydrogen and 2.51% of oxygen. The physicochemical analysis from liquid product obtained 42.50 MJ/kg of heating value.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับการสนับสนุนในการวิจัยค้นคว้าแนวทาง คำแนะนำ ตลอดจนการช่วยเหลือให้คำปรึกษาในการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ จากคณาจารย์ เจ้าหน้าที่นักวิทยาศาสตร์ รวมถึงบุคคล หน่วยงาน และเงินทุนในการศึกษาค้นคว้าและทุนวิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้โอกาสคำแนะนำ แนวทาง และคำปรึกษาเพื่อปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมถึงคณาจารย์ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิณฺฐิระนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาสละเวลาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบริษัท ทักซิณปาล์ม (2521) จำกัด ที่อนุเคราะห์น้ำมันจากทะเลปาล์มเปล่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) สำหรับการให้ทุนสนับสนุนในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณบุคลากรทั้งในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน และศูนย์เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล อำเภอแก่งคอย จ.สระบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ให้การอบรมสั่งสอนและกำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนรุ่นพี่ และรุ่นน้องทุกคนในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดาพร สุนทร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ปีโตรเลียม.....	5
2.1.1 น้ำมันดิบ	5
2.1.2 แก๊สธรรมชาติ.....	10
2.2 พลังงานชีวมวล	11
2.2.1 กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ	11
2.3 น้ำมันปาล์ม.....	12
2.3.1 การผลิตน้ำมันปาล์ม	13
2.3.2 ผลผลิตจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม.....	13

2.4 การกลั่นน้ำมัน	14
2.5 กระบวนการไพโรไลซิส	15
2.5.1 ประเภทของการไพโรไลซิส	15
2.5.2 ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส	16
2.6 การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน.....	16
2.6.1 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน.....	17
2.6.2 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	18
2.6.3 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา.....	20
2.7 การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันด้วยกระบวนการดีออกซิจีเนชัน	21
2.7.1 ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน.....	21
2.7.2 ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน	22
2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา	22
2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์	24
2.10 ถ่านกัมมันต์	25
2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	26
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	31
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา	32
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	32
3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า	34
3.2.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิส	35
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	38

3.4. การดำเนินการทดลอง.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	43
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่า	43
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น.....	43
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	44
4.2 วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	47
4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	47
4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF.....	48
4.2.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน.....	50
4.3 การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	50
4.4 ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม.....	56
4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	57
4.4.2 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	59
4.4.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	61
4.4.4 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	63

4.5	ภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบ ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม.....	65
4.6	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลอง การกลั่น	66
4.7	วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา	67
4.8	การวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	68
4.9	วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	68
4.10	วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม.....	69
4.11	วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบ ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี.....	72
4.11.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สในผลิตภัณฑ์แก๊ส ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) โดยใช้ตัวตรวจวัด thermal conductivity detector: TCD.....	72
4.11.2	การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สในผลิตภัณฑ์แก๊ส ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) โดยใช้ตัวตรวจวัด Flame Ionization Detector: FID.....	73
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	75
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	75
5.2	ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม.....		77
ประวัติผู้เขียน.....		102

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 พาราฟินที่พบในปิโตรเลียม.....	6
รูปที่ 2.2 แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียม.....	6
รูปที่ 2.3 แอโรมาติกที่พบในปิโตรเลียม.....	7
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเตตระลีน (tetralin)	7
รูปที่ 2.5 สารประกอบกำมะถันที่พบในปิโตรเลียม.....	8
รูปที่ 2.6 สารประกอบไนโตรเจนที่พบในปิโตรเลียม.....	8
รูปที่ 2.7 สารประกอบออกซิเจนที่พบในปิโตรเลียม.....	9
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ซึ่งมีวงพอร์ไฟรินเป็นโครงสร้างหลัก.....	9
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของแมกนีเซียมออกไซด์.....	24
รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาตีคาร์บอกซิเลชัน.....	25
รูปที่ 2.11 การเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆตามชนิดของซีโอไลต์.....	26
รูปที่ 3.1 เครื่องเอกซเรย์ดีฟแฟรกโตมิเตอร์.....	32
รูปที่ 3.2 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์.....	33
รูปที่ 3.3 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน.....	33
รูปที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ขนาด 70 มิลลิลิตร.....	34
รูปที่ 3.5 เครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องแกว่งปฏิกรณ์ขนาดเล็กและเครื่องควบคุมความร้อน.....	34
รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น.....	35
รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	36
รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ.....	36
รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน.....	37
รูปที่ 3.10 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ.....	37
รูปที่ 3.11 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิด thermal conductivity (GC-TCD).....	38
รูปที่ 3.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิด flame ionization (GC-FID).....	38
รูปที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปลาบเปล่าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแมสสเปกโตรมิเตอร์.....	44

หน้า

รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับ ถ่านกัมมันต์ (b) 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY (c) ซีโอไลต์ HY.....47

รูปที่ 4.3 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....55

รูปที่ 4.4 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว.....56

รูปที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลา ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียม ออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และภาวะที่ไม่ เดิมตัวเร่งปฏิกิริยา(*).....57

รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลา ในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียม ออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และภาวะที่ไม่ เดิมตัวเร่งปฏิกิริยา(*).....58

รูปที่ 4.7 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่าง แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และ ภาวะที่ไม่เดิมตัวเร่งปฏิกิริยา(*).....59

รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่าง แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และ ภาวะที่ไม่เดิมตัวเร่งปฏิกิริยา(*).....60

รูปที่ 4.9 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำ ปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนระหว่าง แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และ ภาวะที่ไม่เดิมตัวเร่งปฏิกิริยา(*).....61

หน้า

รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา(*).....62

รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดย 30/70 คือ MgO+AC ร้อยละ 30 ต่อ 10% Ni/HY-zeolite ร้อยละ 70 และ 70/30 คือ คือ MgO+AC ร้อยละ 70 ต่อ 10% Ni/HY-zeolite ร้อยละ 30 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา.....63

รูปที่ 4.12.องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดย 30/70 คือ MgO+AC ร้อยละ 30 ต่อ 10% Ni/HY-zeolite ร้อยละ 70 และ 70/30 คือ คือ MgO+AC ร้อยละ 70 ต่อ 10% Ni/HY-zeolite ร้อยละ 30 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา.....64

รูปที่ 4.13 โครมาโทแกรมองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....70

รูปที่ 4.14 โครมาโทแกรมจากโครมาโทแกรมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัด thermal conductivity detector : TCD.....72

รูปที่ 4.15 โครมาโทแกรมจากโครมาโทแกรมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิส น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัด Flame Ionization Detector : FID.....73

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 กรดไขมันที่พบในน้ำมันปาล์ม.....	13
ตารางที่ 2.2 ผลิตภัณฑ์จากการกลั่นปิโตรเลียม.....	16
ตารางที่ 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดย ไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยตัวเร่งปฏิกิริยาผสม.....	39
ตารางที่ 3.3 วิธีการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบ 2 ระดับ.....	39
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าก่อนการไพโรไลซิส.....	43
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊ส โครมาโทกราฟี-แมสสเปกโทมิเตอร์.....	45
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยเทคนิค XRF.....	48
ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง.....	50
ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์.....	52
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการ ไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์.....	54
ตารางที่ 4.7 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert.....	65
ตารางที่ 4.8 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert.....	65
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจาก ทะเลาะปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าก่อนการไพโรไลซิส.....	66
ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของของน้ำมันจากทะเลาะปาล์มเปล่าก่อนและหลังการ ไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม.....	67
ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง bomb calorimeter ของน้ำมันจาก ทะเลาะปาล์มเปล่าก่อนและหลังการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม.....	68
ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว.....	68

หน้า

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์ม เปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์.....	71
ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม.....	73
ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม.....	74



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันทั่วโลกมีการใช้พลังงานที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรและการใช้พลังงานเพื่อตอบสนองอุตสาหกรรมภาคการผลิตและบริการเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้มาจากแหล่งพลังงานหลักอย่างน้ำมันดิบซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งการผลิตเชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานปิโตรเลียมยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเพราะมีการปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สเรือนกระจก ทำให้การพัฒนาพลังงานทางเลือกได้รับความสนใจมากขึ้น เพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนพลังงานในอนาคต ในประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศที่มีพืชผลทางเกษตรรวมถึงเศษเหลือทิ้งจากการทำการเกษตรจำนวนมาก ทำให้ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ได้รับความสนใจในการนำมาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เนื่องจากหาได้ง่ายและมีปริมาณมาก

ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มนั้นจะได้ชีวมวลเป็นทะลายปาล์มเปล่าจำนวนมาก ซึ่งผู้ประกอบการโรงงานจะนำทะลายปาล์มเปล่าไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าใช้ในโรงงานน้ำมันปาล์มเพื่อลดต้นทุนด้านพลังงาน [1] นอกจากนี้ยังพบว่า สามารถหีบเอาน้ำมันปาล์มออกจากทะลายปาล์มเปล่าได้อีก ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์สูงสุดจากทรัพยากรที่มีอยู่ แต่น้ำมันที่ได้นั้นมีของเสียเจือปนอยู่และมีปริมาณออกซิเจนสูง ได้มีการศึกษาทดลองนำน้ำมันจากทะลายปาล์มเปล่าไปทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันซึ่งต้องทำปฏิกิริยาในสภาวะที่มีเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้ต้องมีการใช้น้ำปริมาณมากในการล้างเอาเบสออกและใช้เวลานานในการทำปฏิกิริยา อีกทั้งยังเกิดกลีเซอรอลเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ทำให้ต้องมีกระบวนการในการแยกผลิตภัณฑ์เพิ่มเข้ามา จะเห็นว่าเป็นวิธีการที่มีข้อเสียอยู่หลายประการ ในปัจจุบันจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการปรับปรุงน้ำมันจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีความร้อนด้วยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยมีข้อดี คือ สามารถใช้สารตั้งต้นได้หลายประเภท โดยสามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) ทำให้สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่นาน อีกทั้งผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ยังมีสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียม มีปริมาณออกซิเจนต่ำ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับการไพโรไลซิสมช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้และมีความจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้มากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิต

เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) โดยใช้น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าภายใต้กระบวนการไพโรไลซิส เพื่อเพิ่มผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาซึ่งมีองค์ประกอบของแนฟทาและเคโรซีนให้สูงขึ้น โดยสามารถปรับปรุงคุณภาพเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานได้ และศึกษาผลของตัวแปร ดังนี้ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาผสม และอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลและภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลวที่มีสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) มากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม
2. หาภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) มากที่สุด

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ที่ประกอบด้วย นิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ HY แมกนีเซียมออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ รวมถึงศึกษาผลของอุณหภูมิ เวลา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ ผ่านปฏิกิริยาการแตกตัวและดีคาร์บอกซิเลชัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) มากที่สุด

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

2. ศึกษาการใช้งานเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องมือและเครื่องทดสอบพร้อมทั้งตรวจสอบความพร้อมในการใช้งานและเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3. วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตร

(Gas Chromatography-Mass Spectrometry: GC-MS)

3.2 วิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Distillation Simulation Gas Chromatography: DGC)

4. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY ด้วยวิธี Wetness Impregnation โดยนำ $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นใส่ซีโอไลต์ชนิด HY ลงในสารละลาย แล้วนำสารละลายผสมที่ได้ไปปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ต่อมานำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปเคลือบที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการรีดิวซีในแก๊สไฮโดรเจนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปเคลือบผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา (passivate) ด้วยแก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

5. ศึกษาองค์ประกอบและสมบัติทางกายภาพของสารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

5.1 วิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

5.2 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction Spectroscopy (XRD)

5.3 หาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนจากวิธีดูดซับแก๊สไนโตรเจน (Surface Area and Porosity Analysis)

6. ออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบ 2 ระดับ (2K factorial design) โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 420-450 องศาเซลเซียส
- เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น
- อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม 70 ต่อ 30 และ 30 ต่อ 70

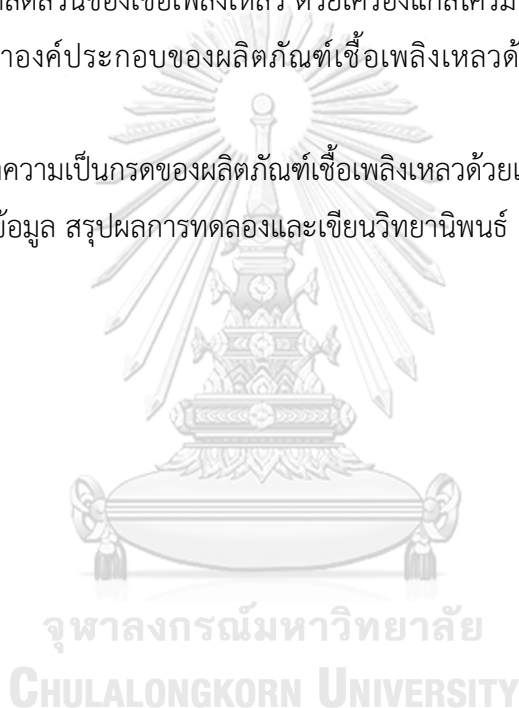
ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร คำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือด

7. หากภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) มากที่สุด

8. วิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว ที่ได้จากการไพโรไลซิส

- วิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเทคนิคบอมบ์แคลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter)
- วิเคราะห์หาสัดส่วนของเชื้อเพลิงเหลว ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น
- วิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์
- วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ

9. รวบรวม วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปิโตรเลียม

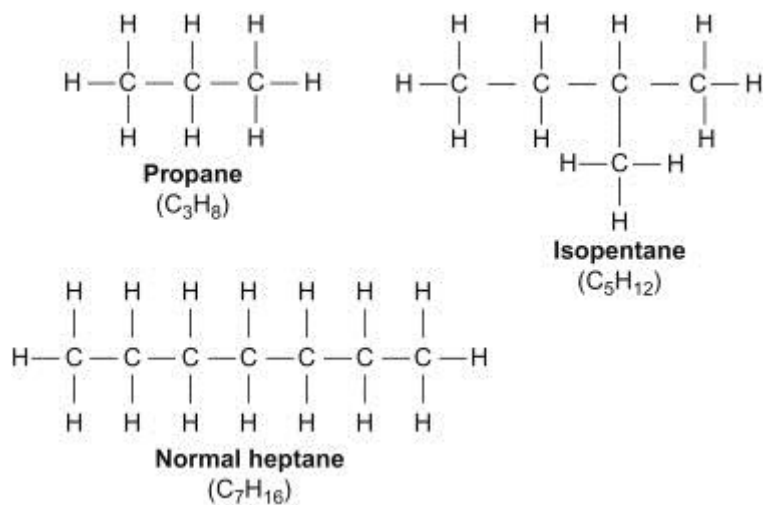
ปิโตรเลียม [2, 3] มาจากคำในภาษาละติน 2 คำ คือ petra (หิน) + oleum (น้ำมัน) รวมกันเป็นน้ำมันที่มาจากหิน หมายถึง สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยมีธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลัก 2 ชนิด คือ คาร์บอน และไฮโดรเจน อาจมีธาตุโลหะชนิดอื่นปนอยู่ เช่น กำมะถัน ออกซิเจน ไนโตรเจน ปนอยู่ด้วย ปิโตรเลียมเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของปิโตรเลียมเอง พลังงานความร้อน และความกดดันตามสภาพแวดล้อมที่ปิโตรเลียมสะสมตัวอยู่ ปิโตรเลียมเป็นได้ทั้ง 3 สถานะ คือ ของแข็ง ของเหลวและแก๊ส โดยขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ รวมถึงความร้อนและความดันของสภาพแวดล้อมในการเกิดและการกักเก็บปิโตรเลียม แบ่งตามสถานะได้เป็นสองชนิดหลัก คือ น้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ [4]

2.1.1 น้ำมันดิบ

น้ำมันดิบ สามารถพบได้ทั่วโลก มีสีเหลืองไปจนถึงสีดำ บางครั้งมีลักษณะขุ่นหนืด เป็นสารผสมที่มีสมบัติเป็นของเหลวติดไฟง่าย มีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันในแต่ละแหล่งกำเนิดซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ โครงสร้างของสารเคมีอินทรีย์ที่อยู่ในซากพืช ซากสัตว์ ความลึกของชั้นหินที่เป็นแหล่งกำเนิด ชนิดของชั้นหินที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนย้าย การเคลื่อนตัวของเปลือกโลกและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในแหล่งกักเก็บ มีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่โมเลกุลขนาดใหญ่ไปจนถึงโมเลกุลขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอินทรีย์อื่นๆรวมอยู่ด้วย เช่น สารอินทรีย์กำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาจมีสารประกอบโลหะบางชนิดเจือปนอยู่ด้วย มีองค์ประกอบที่ไฮโดรคาร์บอนสำคัญดังต่อไปนี้ [5]

1. พาราฟิน (paraffins)

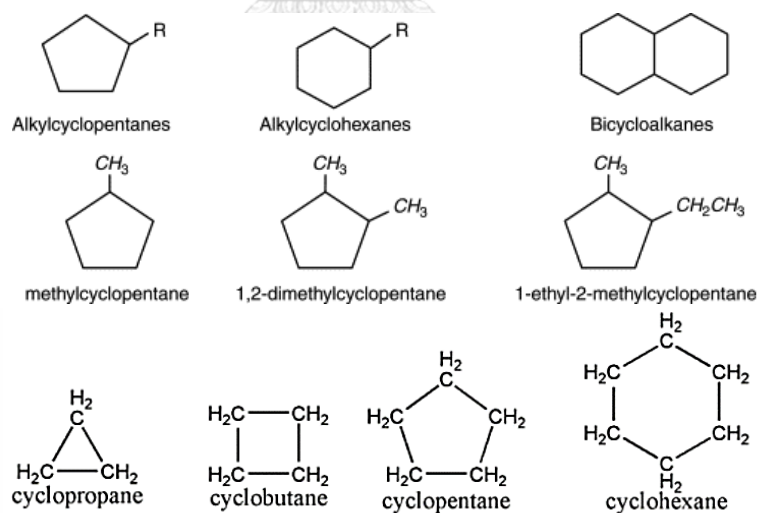
คือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว (saturated hydrocarbons) ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ C_1 - C_{40} และมากกว่า C_{40} ได้แก่ นอร์มัลพาราฟิน (n-paraffins) เช่น อีเทน มีเทน ส่วนพาราฟินที่มีกิ่งออกจากสายโซ่โมเลกุลหลัก เรียกพาราฟินแบบกิ่ง พาราฟินที่มีหมู่เมทิลต่ออยู่ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 คือไอโซพาราฟิน โครงสร้างพาราฟินแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 พาราฟินที่พบในปิโตรเลียม

2. แนฟทีน (naphthenes)

เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นวงพันธะเดี่ยว เรียกว่า ไฮโคแอลเคน ส่วนมากที่พบจะเป็นวงขนาดห้าเหลี่ยมและหกเหลี่ยม โดยในน้ำมันดิบจะมีแนฟทีนประมาณร้อยละ 50 และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง แสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.2

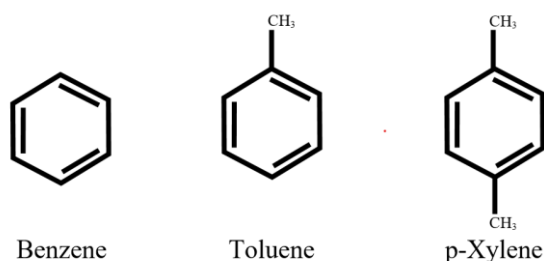


รูปที่ 2.2 แนฟทีนที่พบในปิโตรเลียม

3. แอโรมาติก

เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวที่ต่อกันเป็นวงด้วยอะตอมคาร์บอน 6 อะตอม มีพันธะเดี่ยว และพันธะคู่สลับกันไป ตัวอย่างเช่น เบนซีน มักพบในส่วนกลางของหอกลิ้นปิโตรเลียม เช่น

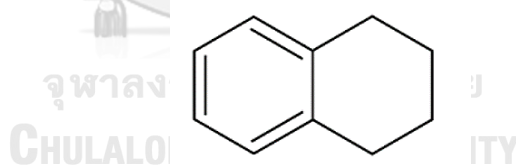
แก๊สออยล์ น้ำมันหล่อลื่นและกากการกลั่น อนุพันธ์ของเบนซีนที่พบมากที่สุดในปิโตรเลียมคือ โทลูอิน ไซลีน และอนุพันธ์ประเภทอื่นของเบนซีนได้แก่ สารที่มีวงแโรมาติกแนบต่อกัน เช่น ฟีนานทรีน แนฟทาลีน และแอนทราซีน เป็นต้น ตัวอย่างแโรมาติก แสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แโรมาติกที่พบในปิโตรเลียม

4. แนฟทีโน-แโรมาติก (naphtheno-aromatic)

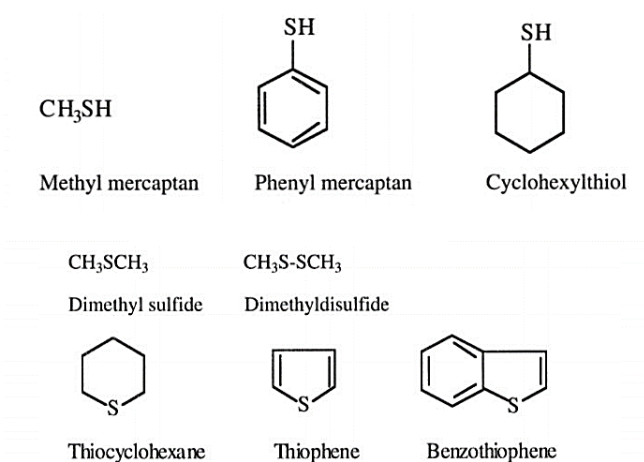
เป็นสารประกอบบางประเภทที่พบในน้ำมันดิบที่มีอายุการสะสมตัวน้อย มีโครงสร้างของ แโรมาติกและแนฟทีนอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ตัวอย่าง เช่น เตตระลิน (tetralin) หรือ เตตระไฮโดรแนฟทาลีน แสดงโครงสร้างในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเตตระลิน

5. สารประกอบกำมะถัน

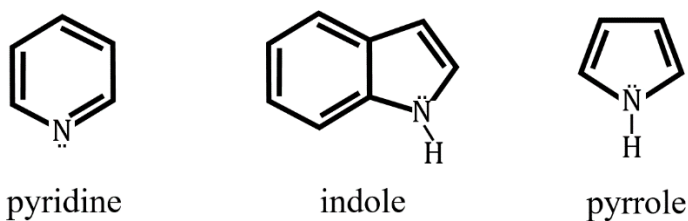
เป็นสารประกอบที่มีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนที่ตรวจพบในน้ำมันดิบมากที่สุด มีกลิ่นและมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำปฏิกิริยากับโลหะได้ จึงจำเป็นต้องกำจัดออกให้หมดก่อนนำไปใช้งาน ได้แก่ ไทออล ซัลไฟด์และไทโอฟิน เป็นต้น แสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สารประกอบกำมะถันที่พบในปิโตรเลียม

6. สารประกอบไนโตรเจน

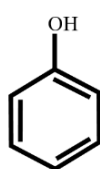
เป็นสารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล มีปริมาณร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนักของน้ำมันดิบ ได้แก่ พิริดีน ควิโนลีน อินโดล พิโรลและคาร์บาโซล สารประกอบของไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำมันดิบจะส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ เสื่อมสภาพเร็ว แสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.6



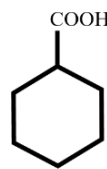
รูปที่ 2.6 สารประกอบไนโตรเจนที่พบในปิโตรเลียม

7. สารประกอบออกซิเจน

เป็นสารประกอบที่มีออกซิเจนอยู่ในโมเลกุล ส่วนมากอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ในน้ำมันดิบที่มีอายุการสะสมตัวน้อย พบอยู่ในปิโตรเลียมในช่วงร้อยละ 0.1-2.0 โดยน้ำหนัก กรดที่มีโครงสร้างเป็นวงมักมีจำนวนคาร์บอน 9-13 อะตอม ถ้ามีจำนวนอะตอมมากกว่า 14 อะตอมมักจะอยู่ในรูปวงสองวง บางครั้งอยู่ในรูปของแนฟทีน แอโรมาติก นอกจากนี้แล้วยังพบสารประกอบออกซิเจนในรูปของแอลกอฮอล์ ฟีนอล คีโตน เอสเทอร์ และแอนไฮไดรด์ แสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.7



Phenol

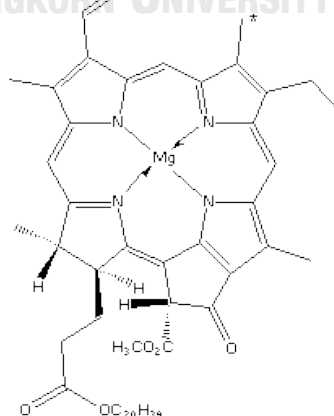
Cyclohexane
Carboxylic acid

รูปที่ 2.7 สารประกอบออกซิเจนที่พบในปิโตรเลียม

8. สารประกอบออร์แกโนเมทัลลิก

เป็นสารประกอบที่มีโลหะปนอยู่ในน้ำมันดิบ ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟริน (porphyrin) เรียกว่า ปิโตรพอร์ไฟริน (petroporphyrins) จะมีโลหะอื่นแทนที่ตำแหน่งของแมกนีเซียมที่อยู่ตรงกลางวงพอร์ไฟริน โดยโลหะที่พบมากได้แก่ แวนเนเดียมและนิกเกิล ที่พบรองลงมาได้แก่ เหล็กและทองแดง หมู่แทนที่ที่อยู่รอบวงพอร์ไฟรินอาจมีโครงสร้างแตกต่างจากคลอโรฟิลล์เล็กน้อยหรืออาจไม่มีหมู่แทนที่เลยในบางตำแหน่ง สารประกอบเชิงซ้อนของพอร์ไฟริน แวนเนเดียมและนิกเกิลมีความเสถียรสูง โดยสามารถกลั่นออกมาได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส แสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.8

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของคลอโรฟิลล์ซึ่งมีวงพอร์ไฟรินเป็นโครงสร้างหลัก

2.1.2 แก๊สธรรมชาติ

แก๊สธรรมชาติ เกิดจากการทับถมของซากสิ่งมีชีวิตนับล้านปี ที่ถูกแปรสภาพโดยความร้อนและความกดดันของผิวโลกจนกลายเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดสะสมอยู่รวมกันใต้ผิวโลก ประกอบด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆ ได้แก่ มีเทน อีเทน โพรเพน เพนเทน เฮกเซน และเฮปเซน เป็นต้น รวมถึงอาจมีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แหล่งกำเนิดของแก๊สธรรมชาติมีอยู่ด้วยกัน มีสองแหล่ง คือแหล่งกักเก็บใต้ผิวดินซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์โดยการขุดเจาะ แก๊สธรรมชาติ ลักษณะนี้เรียกว่า นอนแอสโซซิเอตเต็ดแก๊ส (non-associated gas) และแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการขุดเจาะน้ำมันดิบ ซึ่งมักเป็นแก๊สธรรมชาติ เนื่องจากแก๊สมิเทนและแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ มักจะละลายอยู่ในน้ำมันดิบ หรือของผสมของสารไฮโดรคาร์บอนอิมัตว์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงภายใต้ความดันสูง เมื่อน้ำมันดิบถูกนำขึ้นมาบนพื้นดินซึ่งมีความดันลดต่ำลงเท่ากับความดันบรรยากาศ สารไฮโดรคาร์บอนอิมัตว์ตั้งแต่ C_1 - C_4 จะคืนสภาพเป็นแก๊สเพราะสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้มีจุดเดือดต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ เรียกแก๊สธรรมชาติที่เกิดขึ้นในลักษณะนี้ว่า แอสโซซิเอตเต็ดแก๊ส (associated gas) องค์ประกอบในแก๊สธรรมชาติแต่ละแหล่งจะแตกต่างกัน มีเทนเป็นองค์ประกอบที่มีปริมาณมากที่สุด สารไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นที่พบและมีปริมาณน้อยกว่ามีเทนได้แก่ อีเทน โพรเพนและบิวเทน แก๊สธรรมชาติบางแห่งพบสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอน 5 ถึง 10 อะตอม ปนอยู่ แก๊สธรรมชาติที่มีแอลเคนอื่นๆ นอกเหนือจากมีเทนปะปนอยู่ จำนวนเล็กน้อย เรียกว่า แก๊สธรรมชาติแห้ง (dry or lean natural gas) แก๊สธรรมชาติส่วนใหญ่ที่พบในแหล่งแก๊สธรรมชาติมักเป็นแก๊สธรรมชาติแห้ง เมื่อนำแก๊สธรรมชาติแห้งมาอัดความดันที่อุณหภูมิปกติ แทบจะไม่มีของเหลวเกิดขึ้นเลย โดยทั่วไปแก๊สธรรมชาติแห้งเมื่อแยกเอาแก๊สที่ไม่ใช่สารไฮโดรคาร์บอนออกแล้วจะมีมีเทนอยู่ประมาณร้อยละ 85-95 ส่วนแก๊สธรรมชาติที่มีอีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทนปนอยู่ปริมาณมาก เรียกว่า แก๊สธรรมชาติชื้น (wet or rich natural gas) มักเป็นแก๊สธรรมชาติที่ได้จากแอสโซซิเอตเต็ดแก๊ส เมื่อนำมาอัดความดันที่อุณหภูมิห้องจะกลายเป็นของเหลวได้ จะพบมีเทนน้อยกว่าร้อยละ 85 องค์ประกอบในแก๊สธรรมชาติ นอกจากสารไฮโดรคาร์บอนยังพบแก๊สไนโตรเจน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แก๊สฮีเลียม แก๊สธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ปะปนอยู่ในปริมาณที่สูง เรียกว่า แก๊สธรรมชาติกัดกร่อน (sour natural gas) แก๊สธรรมชาติที่มีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์และคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่า แก๊สธรรมชาติไม่กัดกร่อน (sweet natural gas) โดยปกติแล้ว

แก๊สธรรมชาติสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เลย แต่สำหรับแก๊สธรรมชาติชั้น ต้องนำมาสกัดด้วยตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน เพื่อแยกเอาอีเทน โพรเพน บิวเทน และเพนเทนพลัส (pentane plus) ออกกลายเป็นของเหลวเรียกว่า ของเหลวแก๊สธรรมชาติ (natural gas liquid: NGL) ส่วนแก๊สธรรมชาติที่มีไฮโดรเจนซัลไฟด์ปนอยู่เมื่อกำจัดออกแล้วสามารถนำไปผลิตเป็นกำมะถันบริสุทธิ์ได้ แก๊สธรรมชาติที่เป็นของเหลวจะถูกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือส่วนที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น โพรเพน และมีบิวเทนปนอยู่เล็กน้อย นำไปใช้เป็นแก๊สหุงต้ม เรียกว่า แก๊สปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas: LPG) ส่วนที่สองที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นคาร์บอน 5 อะตอม จะถูกนำไปผสมในแก๊สลิ้นหรือน้ำมันเบนซิน

2.2 พลังงานชีวมวล

ชีวมวล [6] คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์อาจได้จากพืชและสัตว์ต่าง ๆ เช่น เศษไม้ ขยะ วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การแปรสภาพชีวมวลให้ได้พลังงานอาจจะทำโดยนำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเหล่านี้มีแหล่งที่มาต่าง ๆ กัน อาทิ พืชผลทางการเกษตร เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ไม้และเศษไม้หรือของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน ตัวอย่างเช่น แกลบได้จากการสีข้าวเปลือก เศษไม้ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ ทะลายปาล์มเปล่าได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลังได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก เป็นต้น พลังงานชีวมวลจึงหมายถึง พลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆ โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ

2.2.1 กระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ

1. การเผาไหม้โดยตรง เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่าง ชีวมวลประเภทนี้ คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้

2. แก๊สซิฟิเคชัน (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่า แก๊สชีวภาพ (biogas) ซึ่งองค์ประกอบของแก๊สซิฟิเคชันมักให้แก๊สมีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้กับกังหันแก๊ส (gas turbine) เพื่อผลิตไฟฟ้าหรือใช้กับเครื่องยนต์แบบสันดาปภายใน

3. การหมัก เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า

4. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้

กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลังให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน

กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์-เอสเทอริฟิเคชัน (trans-esterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล

กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่น กระบวนการไพโรไลซิส เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้ความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวไปเป็นเชื้อเพลิงในรูปของผสมระหว่างของเหลวและแก๊ส

2.3 น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์ม เป็นน้ำมันพืชที่ได้จากต้นปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis*) ซึ่งองค์ประกอบหลัก ประกอบไปด้วย ไตรกลีเซอไรด์ และ กรดไขมัน โดยกรดไขมันที่พบมากในน้ำมันปาล์ม แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 กรดไขมันที่พบในน้ำมันปาล์ม [7]

กรดไขมัน	ปริมาณที่พบ (ร้อยละ)
Lauric acid (12:0)	0.2
Myristic acid (14:0)	1.1
Palmitic acid (16:0)	44.0
Stearic acid (18:0)	4.5
Oleic acid (18:1)	39.2
Linoleic acid (18:2)	10.1
Linolenic acid (18:3)	0.4
Arachidic acid (20:0)	0.1

2.3.1 การผลิตน้ำมันปาล์ม

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตน้ำมันปาล์ม คือ ทะลายปาล์มสด หรือปาล์มลูกร่วง จะถูกส่งไปที่โรงสกัดน้ำมันปาล์ม สามารถแบ่งตามวิธีการผลิตที่แตกต่างกันได้ 2 รูปแบบ [8] คือ

1. โรงงานที่มีกระบวนการผลิตแบบหีบแห้งหรือสารสกัดน้ำมันปาล์มแบบรวมเมล็ดใน เป็นการผลิตที่ไม่ใช้น้ำหรือใช้น้ำในปริมาณน้อยมาก ส่วนใหญ่เป็นโรงงานขนาดเล็กและมีของเหลือจากกระบวนการผลิตในรูปกากปาล์มสามารถนำไปทำอาหารสัตว์

2. โรงงานที่มีการผลิตแบบหีบเปียกหรือแบบมาตรฐาน ที่สกัดแยกเมล็ดใน เป็นการผลิตที่ใช้ไอน้ำในการอบทะลายปาล์มก่อนนำไปแยกเป็นทะลายปาล์มเปล่าและผลปาล์ม ซึ่งจะนำสกัดเป็นน้ำมันปาล์มต่อไป โรงงานประเภทนี้มักเป็นโรงงานขนาดใหญ่และมีของเหลือจากกระบวนการผลิตในรูปทะลายปาล์มเปล่า เส้นใย และกะลาที่สามารถนำไปทำเชื้อเพลิงได้

2.3.2 ผลผลิตจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มต้องเอาทะลายปาล์มสดผ่านหม้อนึ่งที่มีความดันไอน้ำประมาณ 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อย่อยสลายเอนไซม์ที่มีอยู่ในผลปาล์มทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ และทำให้ตีทะลายและปลิดผลปาล์มได้ง่าย ให้ผลผลิตแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ

1. ผลผลิตโดยตรง คือ น้ำมันปาล์มที่ได้จาก

1.1 เปลือกผลปาล์ม น้ำมันชนิดนี้จะมีสีเข้ม มีความเหนียวระดับปานกลางถึงเหนียวมาก

1.2 เนื้อในเมล็ดปาล์ม น้ำมันที่ได้มีสีอ่อนกว่าน้ำมันจากเปลือกผลปาล์ม คือ มีสีเหลืองถึงเหลืองอมน้ำตาล และมีความเหนียวในระดับปานกลาง

2. ผลพลอยได้จากการผลิต ประกอบด้วยผลพลอยได้หลายชนิด ได้แก่

2.1 ทะลายปาล์มเปล่า ถูกแยกออกมาหลังจากอบนึ่งมีประมาณร้อยละ 55 - 58 ของปาล์มทั้งทะลาย ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงและทำปุ๋ย

2.2 กากเยื่อใยปาล์ม เป็นส่วนเปลือกของผลปาล์มที่หีบน้ำมันออกแล้วมีประมาณร้อยละ 12 ของปาล์มทั้งทะลาย ส่วนใหญ่จะใช้เป็นเชื้อเพลิงของโรงงาน

2.3 กากเมล็ดปาล์มน้ำมัน ได้จากการสกัดน้ำมันของเมล็ดปาล์มซึ่งจะมีทั้งกะลาและเนื้อปาล์ม

2.4 เนื้อในเมล็ดปาล์ม เป็นส่วนที่แยกเอาเปลือกและกะลาออก มีประมาณร้อยละ 5 โดยมีวิธีการสกัดน้ำมันออกสองวิธี คือ วิธีแรกเป็นการหีบน้ำมัน (expeller pressed type) โดยการใช้สกรูเป็นเกลียวบีบให้น้ำมันออก วิธีนี้จะทำให้ยังคงมีน้ำมันหลงเหลืออยู่ร้อยละ 5-10 และวิธีที่สองใช้ตัวทำละลายสกัดน้ำมัน (solvent extracted type) คือเฮกเซน ซึ่งทำให้กากน้ำมันที่ได้มีน้ำมันเหลืออยู่ร้อยละ 1-3 แต่มีคุณภาพมากกว่าวิธีแรก กากที่ได้จากการสกัดน้ำมันทั้ง 2 วิธีเรียกว่า กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม

2.5 กากผลปาล์ม จะประกอบด้วยเปลือกนอก กะลา และเนื้อในของเมล็ด

2.6 กะลาปาล์ม ใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานมีประมาณร้อยละ 8 ของผลปาล์มทั้งทะลาย

2.7 กากตะกอนปาล์ม มีประมาณร้อยละ 2 เป็นของเหลือที่เป็นของเหลวจากโรงงานปาล์มน้ำมัน

2.4 การกลั่นน้ำมัน

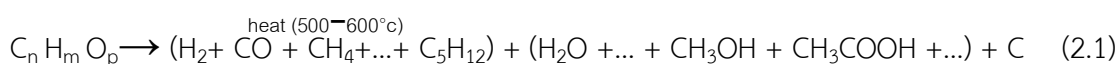
น้ำมันดิบที่ได้จากแหล่งกำเนิดชั้นใต้ดินนั้นก่อนจะนำไปใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีจำเป็นต้องนำมากลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบเพื่อแยกน้ำมันตามช่วงจุดเดือดที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยน้ำมันส่วนต่างๆที่ได้จากการกลั่นน้ำมันได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 [9]

ตารางที่ 2.2 ผลลัพธ์จากการกลั่นปิโตรเลียม [9]

ผลิตภัณฑ์	จุดเดือด (°C)	จำนวน คาร์บอน	สถานะ	การใช้ประโยชน์
แก๊สหุงต้ม	≤ 30	1-4	แก๊ส	สารเคมี วัสดุสังเคราะห์ เชื้อเพลิง ก๊าซหุงต้ม
เนฟทา	60-100	6-10	ของเหลว	สารตั้งต้นอุตสาหกรรมปิโตรเคมี
แกโซลีน	30-200	5-12	ของเหลว	น้ำมันเบนซิน ตัวทำละลาย
เคโรซีน	150-300	12-16	ของเหลว	น้ำมันก๊าด เชื้อเพลิงเครื่องยนต์ไอพ่น
ดีเซล	150-400	16-20	ของเหลว	เชื้อเพลิงเครื่องยนต์ดีเซล
น้ำมันเตา	250-400	20-70	ของเหลวหนืด	เชื้อเพลิงเครื่องจักร น้ำมันหล่อลื่น น้ำมันเครื่อง เทียนไข เครื่องสำอาง
ยางมะตอย	≥ 350	≥ 70	ของเหลวหนืด	ยางมะตอย ถนอม

2.5 กระบวนการไพโรไลซิส

ไพโรไลซิส [1, 10-13] เป็นกระบวนการสลายตัวทางเคมีความร้อน (Thermochemical decomposition) ในภาวะอับอากาศหรือไม่มีออกซิเจน ประกอบด้วยหลายปฏิกิริยาเคมี ขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติของสารตั้งต้น เป็นปฏิกิริยาแบบผันกลับไม่ได้ ซึ่งต้องการพลังงานหรือความร้อนเพื่อสลายพันธะเคมีของโครงสร้างสารประกอบอินทรีย์ โดยทั่วไปไพโรไลซิสจะเกิดได้ดีที่สภาวะดำเนินการอุณหภูมิประมาณ 300-650 องศาเซลเซียส ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการมีทั้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ปฏิกิริยาของไพโรไลซิสอย่างง่าย แสดงในสมการที่ 2.1



ชีวมวล

แก๊ส

ของเหลว

ของแข็ง

2.5.1 ประเภทของการไพโรไลซิส

โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก ตามสภาวะดำเนินการ ได้แก่ ไพโรไลซิสแบบช้า (slow pyrolysis) และไพโรไลซิสแบบเร็ว (fast pyrolysis)

1. กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า คือ กระบวนการที่เพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างช้าๆ ในภาวะไร้ออกซิเจนหรือไร้อากาศ ที่อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส และใช้เวลามากกว่า 24 ชั่วโมงเพื่อ

เพิ่มผลิตภัณฑ์ในส่วนของแข็งหรือถ่านชาร์ ในขณะที่กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้ามักดำเนินการที่อุณหภูมิสูง มีอัตราการให้ความร้อนต่ำ จะให้ผลิตภัณฑ์ทั้งในรูปแก๊ส ของเหลว และของแข็ง แต่สำหรับไพโรไลซิสแบบช้าที่ไม่ต้องการผลิตภัณฑ์ของแข็ง จะดำเนินการที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาไม่เกิน 1 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวมากขึ้น

2. กระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว ต้องการผลิตภัณฑ์ในส่วนของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพเป็นหลัก สารตั้งต้นจะถูกให้ความร้อนอย่างรวดเร็วไปที่อุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวสูงสุด ในภาวะไร้ออกซิเจนหรือไร้อากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเหลว โดยทั่วไปจะดำเนินการในช่วงอุณหภูมิ 400- 650 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้น มีอัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 10-50 องศาเซลเซียสต่อนาที

2.5.2 ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส

ผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วน [14] ได้แก่ ส่วนแรกเป็นของแข็งซึ่งมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่าถ่านชาร์ ส่วนที่สองคือของเหลวไฮโดรคาร์บอน มีลักษณะสีดำหรือน้ำตาล และ ส่วนที่สามคือส่วนที่เป็นแก๊สซึ่งคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้งการสลายตัวด้วยความร้อนทั้งขั้นต้นและการสลายตัวขั้นที่สอง ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส มักประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน อีเทน และเอทิลีน โดยปริมาณของผลิตภัณฑ์ในแต่ละส่วนขึ้นอยู่กับภาวะดำเนินการที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

นอกจากนี้อาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับกระบวนการไพโรไลซิส เป็นการช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันและแก๊สที่ได้ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดพลังงานกระตุ้น และส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดำเนินไปข้างหน้าได้มากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสแบ่งออกออก 2 กลุ่มตามคุณสมบัติดังนี้คือ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด (acid catalyst) (2) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นด่าง (base catalyst) หรือบางครั้งอาจเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอัลคาไลน์ (alkaline catalyst) โดยอาจมีการเติมโลหะชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงตัวเร่งให้ตัวเร่งปฏิกิริยาอ่อนไวขึ้น หน้าที่หลักของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการและมีค่าเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์สูงขึ้น ช่วยเลือกให้ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่มีความจำเพาะเจาะจงและช่วยเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังช่วยลดค่าจากกระบวนการให้น้อยลง

2.6 การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด ดังนี้ [15, 16]

2.6.1 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน

การแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลเล็กลง หากมีการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ดีจะสามารถทำให้การเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้มากที่สุด แต่หากมีการให้ความร้อนมากเกินไปอาจทำให้เกิดการแตกสลายเชิงความร้อนไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ควบแน่น (non-condensable pyrolysed oil) จำพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนภาวะแก๊ส $C_1 - C_4$ ซึ่งไม่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทั้งนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน ส่วนที่มีแซนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) อาจทำปฏิกิริยากันเองเนื่องจากมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากระบวนการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบต่อเนื่องแบบลูกโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นเริ่มต้น (initiation step) เป็นขั้นตอนการเกิดอนุมูลอิสระ เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการแตกพันธะของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนได้เป็นอนุมูลอิสระซึ่งจะไปทำปฏิกิริยาในขั้นต่อไป ดังแสดงในสมการที่ 2.2

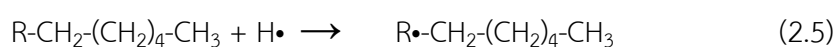


2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง เกิดการเปลี่ยนรูปของไอโซเมอร์และมีการแตกพันธะเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงพร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระอาจทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นอีก ทำให้ได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่สายโซ่สั้นลงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังแสดงในสมการที่ 2.3 – 2.5

การแตกตัวที่ตำแหน่งบีต้า (β -scission)



การเคลื่อนย้ายสายโซ่ (chain transfer)



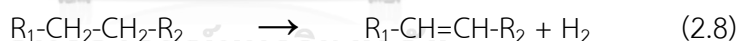
3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเพื่อหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่ โมเลกุลเดี่ยวหรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ดังแสดงในสมการที่ 2.6 และ 2.7



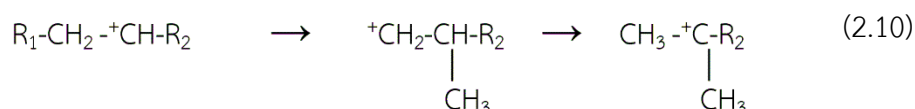
2.6.2 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการสลายพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างตามที่ต้องการ กลไกของการแตกโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

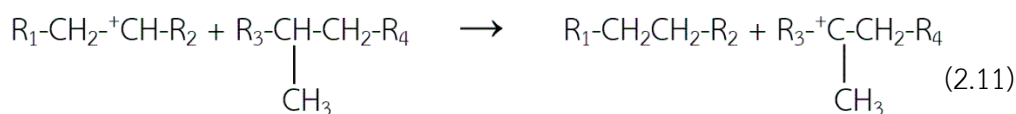
1. การเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์โบแคทไอออน คือ การที่โมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรด์ไอออน (hydride ion) ซึ่งมีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูง ทำให้คาร์โบแคทไอออนมีสภาพที่เป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์โบแคทไอออนที่เกิดขึ้นจะมีความเสถียรภาพแตกต่างกันออกไปตามโครงสร้างของไอออน ซึ่งโครงสร้างของไอออนแบบตติยภูมิ จะมีเสถียรภาพที่มากกว่าไอออนแบบทุติยภูมิ และไอออนแบบปฐมภูมิ ตามลำดับ แสดงในสมการที่ 2.8 และ 2.9



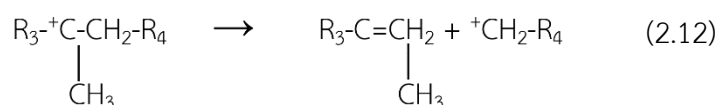
2. ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์โบแคทไอออน ซึ่งเกิดจากการความเสถียรที่ต่างกันของโครงสร้างคาร์โบแคทไอออนแต่ละลักษณะ จึงเกิดการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์โบแคทไอออนที่มีเสถียรภาพ ดังแสดงในสมการที่ 2.10



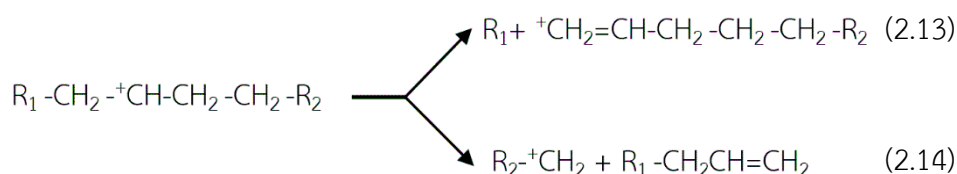
การเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (hydride transfer) เกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนบนสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน จากการเคลื่อนที่ของไฮโดรด์บนคาร์โบแคทไอออน แสดงในสมการที่ 2.11



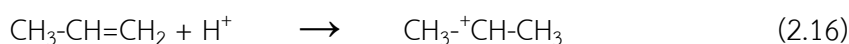
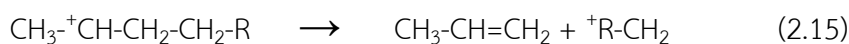
คาร์โบแคทไอออนขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่งปีต้า ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มักจะเป็นคาร์โบแคทไอออนปฐมภูมิ เช่น สารประกอบโอเลฟิน และคาร์โบแคทไอออนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง แสดงในสมการที่ 2.12



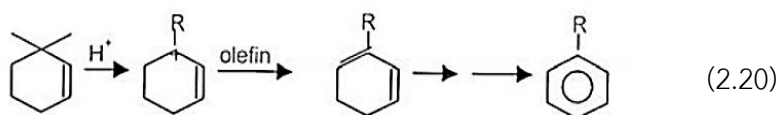
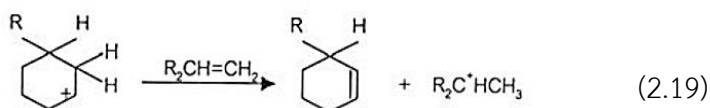
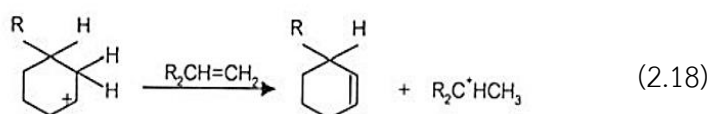
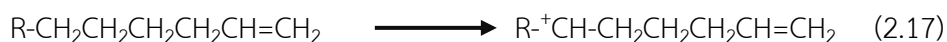
เกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) โดยปฏิกิริยาจะเกิดระหว่างคาร์โบแคทไอออนกับสายโซ่ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แสดงในสมการที่ 2.13 และ 2.14



กรณีที่มี R_1 คือ H การเกิด β -fission จะเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ซึ่งจะได้ พรอพีนเป็นผลิตภัณฑ์ และเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนได้เป็นโมเลกุลที่อยู่ในรูปคาร์โบแคทไอออน ซึ่งจะไม่สามารถเกิด β -fission ต่อได้ จากนั้นไอโซพรอพิลคาร์โบแคทไอออน จะถ่ายโอนเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ให้กับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นได้โพเพนเกิดขึ้นหรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพเพน ดังแสดงในสมการที่ 2.15 และ 2.16



ปฏิกิริยาดีไฮโดรไซคลิกเซชัน (dehydrocyclization) โดยโอเลฟินจะเกิดเป็นคาร์โบแคทไอออน จากนั้นเกิดปฏิกิริยา β -fission ได้เป็นโอเลฟินคาร์โบแคทไอออน โดยมีลักษณะเป็นวงแหวนแอโรมาติก จากนั้นเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ไอออนจากบริเวณตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้เป็น อัลลิลิกคาร์บอนเนียมไอออน (allylic carbonium ion) ที่มีความเสถียรและเกิดการรับโปรตอนจากไซโคลเฮกซะไดอิน ในปฏิกิริยาขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอโรมาติก แสดงในสมการที่ 2.17 - 2.20



การแตกพันธะของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง เนื่องจากมีสารจำพวกแอโรมาติกและโอเลฟินมาก ทำให้ออกเทนมีค่าสูง เมื่อเวลาดำเนินปฏิกิริยาต่อไปทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงหรือเสื่อมสภาพ และอาจไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ เกิดกากน้ำมันและโค้กบนพื้นผิว ทำให้พื้นที่ผิวลดลงและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

2.6.3 การแตกของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมในปฏิกิริยา

กระบวนการนี้เป็นปฏิกิริยาการแตกสลายเชิงความร้อนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับปฏิกิริยาที่มีการเติมไฮโดรเจนร่วมด้วย ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงมาก ปฏิกิริยาของพาราฟินและแนฟทีนเริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาแล้วโอเลฟินก็จะไปทำให้เกิดคาร์โบแคทไอออนบริเวณที่เป็นกรด (acid site) ของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไป เกิดการแตกตัวจากนั้นเมื่อเติมไฮโดรเจนจนอิ่มตัวทันทีที่เกิดปฏิกิริยาต่างๆขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภททำหน้าที่สองอย่างคือ แตกตัวและเติมไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาพวกนี้มักเป็นซิลิกา-อลูมินา สำหรับการแตกตัวพร้อมด้วยโลหะร่วมกับการเติมไฮโดรเจนโลหะที่ใช้เป็นพวก Rare Earth ที่นิยมคือ Pt Pd W และ Ni ปฏิกิริยาเกิดตรงผิวโลหะเป็นการเติมไฮโดรเจน ซึ่งจะช่วยให้บริเวณที่มีฤทธิ์เป็นกรดสะอาดไปด้วยเพราะคอยเติมไฮโดรเจนกำจัดพวกที่จะทำให้เกิดโค้กออกไป ปฏิกิริยาที่เกิดรวมแล้วจะเป็น

ประเภทคายความร้อนจึงทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ จึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อป้องกันการเกิดโค้กและเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยารวมถึงอาจทำให้เครื่องปฏิกรณ์เสียหายได้

2.7 การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันด้วยกระบวนการดีออกซิจีเนชัน

การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันโดยการลดปริมาณออกซิเจนด้วยกระบวนการดีออกซิจีเนชัน ร่วมกับการแตกสลายเชิงความร้อน (deoxygenation) [17] โดยเป็นการดึงหมู่ออกซิเจนของกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ที่มาจากการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำมันออก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบเป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน โดยดึงออกซิเจนออกมาในรูปของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เรียกว่า ปฏิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (decarbonylation) และสามารถดึงออกซิเจนออกมาในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่า ปฏิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ปฏิริยาอย่างง่ายแสดงในสมการที่ 2.21 และ 2.22

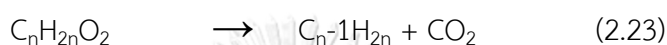


ปฏิริยานี้เกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน การเติมตัวเร่งปฏิริยา นอกจากจะช่วยลดอุณหภูมิในการเกิดปฏิริยาและยังช่วยลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนแก๊สที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลที่อุณหภูมิสูงแล้ว ยังช่วยในการเกิดปฏิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และดีคาร์บอนิลเลชันเพื่อลดปริมาณออกซิเจนอะตอมและเป็นการปรับปรุงสัดส่วนของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนและสัดส่วนของออกซิเจนต่อไฮโดรเจน ทำให้สมบัติของผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบทางเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น

2.7.1 ปฏิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

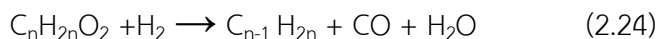
เป็นกระบวนการที่จะกำจัดหมู่คาร์บอกซิลในบรรยากาศไฮโดรเจน ซึ่งจะทำให้เกิดการกำจัดออกซิเจนออกมาในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [18] กลไกการเกิดปฏิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสามารถเกิดได้ 2 ทาง มีทั้ง แบบ β -elimination และ แบบ γ -hydrogen transfer ในการเกิดแบบ β -elimination หมู่คาร์บอกซิลิก และ unsaturated glycerol difatty ester (UGDE) จะได้เป็นผลผลิตจากไตรกลีเซอไรด์ ต่อมาจากปฏิริยาไฮโดรจีเนชันของ UGDE ทำให้เกิดกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่า 1 ตัว หรืออาจไปเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง [19] อย่างไรก็ตามในการ

เกิดแบบ γ -hydrogen transfer เริ่มจากเกิดการแตกออกของสายโซ่คาร์บอน C-C (bond) ที่หมู่ acyl group แบบ γ -hydrogen transfer และไปเกิดเป็นสารประกอบโอเลฟิน (terminal olefin) ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่ากรดไขมันเริ่มต้นของสายโซ่ที่เกิดการแตกออก 2 ตัว (C_{n-2}) ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน คือไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง n-pentadecane (C_{15}) และ n-heptadecane (C_{17}) [19, 20] ทำให้สรุปได้ว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง (alkane) ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่าไตรกลีเซอไรด์ 1 ตัว หรือคาร์บอนอะตอมเลขคี่ แสดงในสมการที่ 2.23



2.7.2 ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

เป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดการกำจัดหมู่คาร์บอนิล ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน เพื่อผลิตแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่ากรดไขมันตั้งต้น และให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นผลผลิตพลอยได้ออกมา [21] ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน กรดไขมันที่เป็นตัวกลาง (fatty acid intermediate) จะเกิดไปเป็นกรดฟอร์มิกมากกว่า [22] ต่อมากรดฟอร์มิกจะสลายตัวต่อไปได้ 2 แบบ ประกอบไปด้วยปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน ซึ่งจะก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำ ส่วนแบบที่สอง ไฮโดรจิเนชัน จะก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนออกมา ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดแบบดีไฮเดรชัน โดยงานวิจัยของ Santillan และคณะ [19] ได้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของไตรกลีเซอไรด์โดยใช้ tristearin เป็นสารตั้งต้นเพื่อที่จะผลิต n-pentadecane ซึ่งจะได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไอน้ำออกมาด้วย แสดงในสมการที่ 2.24



2.8 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา หมายถึง สารที่สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา และค่าการเลือกเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในปฏิกิริยาเคมีใดๆ โดยไม่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาและสามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ สารที่ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดยไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเทอร์โมไดนามิกของระบบ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงกระบวนการ

ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้ไปในทิศทางที่ใช้พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) ที่ต่ำลงและส่งผลให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งออกเป็น 2 ประเภท [23, 24] คือ

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น เป็นแก๊สหรือของเหลว ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มีหลายประการ เช่น สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ภายใต้สภาวะปกติ เป็นการลดค่าใช้จ่าย ไม่เกิดการสลายตัวของสารในกระบวนการผลิต สามารถเลือกเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเฉพาะปฏิกิริยาที่ต้องการได้และตัวเร่งมีราคาไม่ค่างสูงมากนัก แต่มีข้อเสีย คือ มีขั้นตอนยุ่งยากในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากผลิตภัณฑ์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีความบริสุทธิ์ อาจมีค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการล้างตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งทำให้เกิดน้ำเสียได้ รวมถึงมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์

2. ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (heterogeneous catalyst) คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในวัฏภาคที่แตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสถานะเป็นของแข็ง ในการเร่งปฏิกิริยาที่มีสารตั้งต้นมีสถานะเป็นของเหลวหรือแก๊ส ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา และจะมีขั้นตอนในการดูดซับ-คายซับ ของสารตั้งต้นบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ข้อดีของการเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์มีการเกิดสารพิษน้อยกว่า สามารถใช้ในภาวะที่มีความดันสูงหรืออุณหภูมิสูงได้ ในขั้นตอนการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นที่เหลือและผลิตภัณฑ์ทำได้ง่าย ทำให้สามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ได้และมีอายุในการใช้งานยาวนาน

สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ

1. พื้นผิว

พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะมีตำแหน่งที่ว่องไวที่เกิดจากการรวมตัวกันของอะตอมและโมเลกุลบนพื้นผิวของโลหะ ในการวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิค BET (Brunauer, Emmett and Teller) จะสามารถคำนวณพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการดูดซับของแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลวบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนั้นในการเพิ่มพื้นที่ผิวสามารถทำได้โดยการลดขนาดของวัสดุให้เล็กลงเป็นผงละเอียดแต่วิธีนี้ทำได้ยาก วิธีเพิ่มพื้นที่ผิวที่ดีที่สุด คือ การทำวัสดุให้พรุนโดยทำให้เกิดรูพรุนเล็กๆ จำนวนมาก

2. ขนาดและจำนวนรูพรุน

ขนาดและจำนวนรูพรุน สามารถบอกปริมาณพื้นที่ผิวภายในของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีพื้นที่ผิวภายในสูงจะมีรูพรุนขนาดล็กอยู่อย่างหนาแน่น ทำให้การกระจายตัวของตำแหน่งกัมมันต์ (active site) สูง และขนาดของรูพรุนที่เลือกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องมีขนาดที่เหมาะสมกับโมเลกุลของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากตำแหน่งกัมมันต์ได้ดีที่สุด เนื่องจากขนาดของรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญต่อความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาดของรูพรุนแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

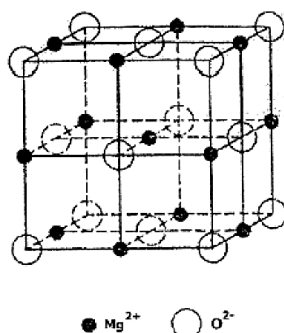
1. รูพรุนชนิดแมโครพอร์ (macropores) มีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรหรือมีรัศมีเฉลี่ยของรูพรุนใหญ่กว่า 25 นาโนเมตร

2. รูพรุนชนิดมีโซพอร์ (mesopores) มีขนาดของรูพรุนระหว่าง 2 และ 50 นาโนเมตรหรือมีรัศมีเฉลี่ยของรูพรุนระหว่าง 1 และ 25 นาโนเมตร

3. รูพรุนชนิดไมโครพอร์ (micropores) รูพรุนระดับอะตอม เป็นกลุ่มที่มีขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร หรือมีรัศมีเฉลี่ยของรูพรุนน้อยกว่า 1 นาโนเมตร

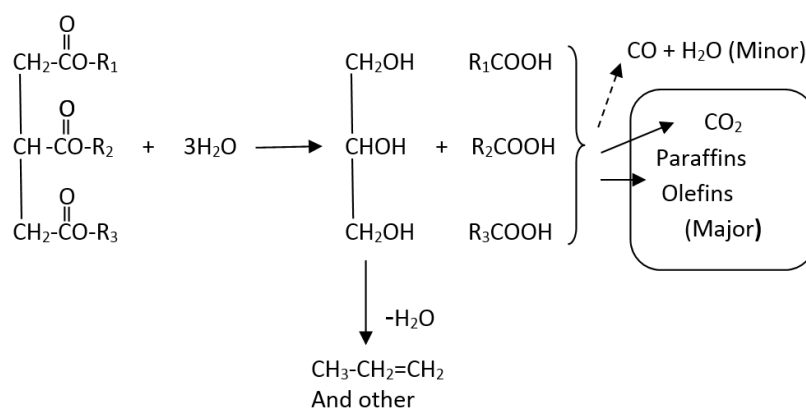
2.9 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นเบส มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาหลายแบบ ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันบนเบนซัลดีไฮด์ (benzaldehyde) ปฏิกิริยาการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันพืช เป็นต้น โดยในปฏิกิริยาการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์ แสดงโครงสร้างของแมกนีเซียมออกไซด์ [25] แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของแมกนีเซียมออกไซด์

แมกนีเซียมออกไซด์ทำหน้าที่ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ซึ่งเป็นการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลิกในกรดไขมันไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [26] แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

แมกนีเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดคาร์บอกซิลิกได้เป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนตและสารไฮโดรคาร์บอน จากนั้นแมกนีเซียมคาร์บอเนตจะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการที่ 2.25 และ 2.26



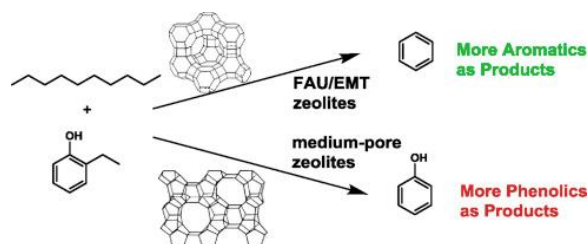
2.10 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ [27] เตรียมได้โดยให้ความร้อนเพื่อสลายสารอินทรีย์ (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ในสถานะที่มีออกซิเจนต่ำ โดยความร้อนจะสลายอะตอมต่างๆที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จนเหลือแต่อะตอมของคาร์บอนที่มีรูปแบบและเกิดการสร้างวงอะโรมาติก โดยอะตอมคาร์บอน ซึ่งเดิมสร้างพันธะโดยใช้ออร์บิทัลจากชั้น 2s จำนวน 2 ตัว และชั้น 2p จำนวน 2 ตัว เกิดการ Hybridization เปลี่ยนมาใช้ออร์บิทัลจากชั้น 1s เพียง 1 ตัวและชั้น 2p จำนวน 2 ตัวและมีออร์บิทัลอิสระจากชั้น 2p อีก 1 ตัว จึงเกิดพันธะแบบซิกมา (sigma bond) กับคาร์บอนอะตอมข้างเคียง 3 ตัว เรียงกันเป็นรูปสามเหลี่ยมระนาบเดียวกัน และออร์บิทัลอิสระที่เหลือจะโคจรอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่างของระนาบพร้อมที่จะเกิดพันธะไพ

(pi- bond) ซึ่งในที่สุดก็จะเกิดวงแหวนอะโรมาติกเคลื่อนที่ทั่วทั้งโครงสร้าง ได้เป็นวงอะโรติกเชื่อมโยงกันอย่างไม่มีการเบียด ทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุน ซึ่งจะมียอดประกอบของทาร์ (tar) และสารอื่นๆ ที่ได้จากการเผาผลาญโดยช่องว่างเหล่านี้จะเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้นเพื่อกำจัดทาร์ ชาติและสารประกอบอื่น โดยการเผาเพื่อให้สลายตัวออกจากช่องว่างรูพรุนเหล่านี้

2.11 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

ซีโอไลต์ [28] คือ สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) มีหน่วยย่อยที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอมและออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4) สร้างพันธะกันเป็นทรงสี่หน้า โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนทั้งสี่อะตอม จัดเรียงตัวเป็นโครงร่างผลึกของซีโอไลต์ ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนที่เชื่อมต่อกันอย่างเป็นระเบียบแบบสามมิติ โดยซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด ที่นิยมใช้ในปฏิกิริยาการแตกสลาย (cracking) สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม มีการใช้ในปฏิกิริยาการแตกสลายสายโซ่คาร์บอนร่วมกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพืชเพื่อผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถควบคุมการเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ตามชนิดและขนาดรูพรุน ซึ่งน้ำมันชีวภาพมันที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันที่ได้จากปิโตรเลียม แสดงการเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.11 [29]



รูปที่ 2.11 การเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆตามชนิดของซีโอไลต์

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fekadu และคณะ [30] ศึกษาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพีซีใช้แล้วไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ อุณหภูมิ 400 425 450 475 และ 500 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 และ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 และ 120 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO_2) ร้อยละ 1 2 4 6 และ 8 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เวลาในการทำปฏิกิริยา 120 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 4 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสูงสุดร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก เมื่อนำไปวัดค่าความหนืด ความหนาแน่น และค่าความร้อนเพื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้นก่อนทำการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าความหนืดมีค่าลดลงจาก 43.75 เป็น 3.55 ตารางมิลลิเมตรต่อวินาที ความหนาแน่นลดลงจาก 0.96 เป็น 0.86 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในขณะที่ให้ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 38.9 เป็น 40.8 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

Raja Shahruzzaman และคณะ [31] ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันพีซีใช้แล้วด้วยกระบวนการดีออกซิเจเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ และโคโลไมต์ที่ปรับปรุงโดยการกระจายตัวของนิกเกิล 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักบนพื้นผิวโดยทำการทดลองโดยใช้ fractionated cracking system เพื่อศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้และองค์ประกอบของน้ำมันพีซีใช้แล้วที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 390 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันพีซีใช้แล้ว 150 กรัม เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ที่ปรับปรุงโดยการกระจายตัวของนิกเกิล ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 36.4 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของเคโรซีนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 13.4 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของเคโรซีนร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก

ชัยพร จิงโชติกะพิศุฐ [32] ศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพเหลวจากการไพโรไลซิส น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลาโดยใช้โคโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 420 440 และ 460 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจน 1 3 และ 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2 3.5 และ 5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มจากทะเลสาบปาล์มเปลา 100 กรัม

ผลการศึกษาพบว่า ภาวะที่เหมาะสม ให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 67.10 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 460 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ได้เนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกากน้ำมัน ร้อยละ 8.23 17.12 37.50 และ 4.25 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยคิดเป็นสัดส่วนของเชื้อเพลิงเหลวเบาในช่วงคาร์บอนอะตอม 5 ถึง 15 อะตอม ร้อยละ 30 ต่อเชื้อเพลิงเหลวหนักในช่วงคาร์บอนอะตอม 15 อะตอมขึ้นไป ร้อยละ 70

Yi-Rong Chen [33] ศึกษาผลของการเติมถ่านกัมมันต์ในกระบวนการไพโรไลซิสของกากน้ำมัน ทำการทดลองโดยใช้ระบบคลื่นไมโครเวฟ กำลัง 600 วัตต์ เป็นแหล่งให้ความร้อน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่เติมคือ ร้อยละ 5-15 โดยน้ำหนัก ของกากน้ำมัน 10 กรัม พบว่า ภาวะที่เติมถ่านกัมมันต์ในปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงสุดคือร้อยละ 77.5 มีผลได้ของแก๊สไฮโดรเจนร้อยละ 16.74 ดีเซลร้อยละ 37.05 น้ำมันเตาร้อยละ 23.71 และค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 33.2 เป็น 36.8 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม

ภาณุพันธ์ พรหมบุตร และคณะ [34] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันตุงด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ภายใต้บรรยากาศแก๊สไฮโดรเจน 1 บาร์ ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิด คือ แคลเซียมออกไซด์และตัวเร่งฟลูออติดคะตะไลติกแครกกิ้งที่ใช้แล้ว ปริมาณโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 - 3 ต่อน้ำมันตุง 10 กรัม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 390 415 และ 440 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 45 และ 60 นาที พบว่า ภาวะที่เหมาะสมของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของน้ำมันตุง คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ปริมาณร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นแก๊สของเหลว ของแข็ง ร้อยละ 18.80, 76.50 และ 4.70 โดยน้ำหนักตามลำดับ และตัวเร่งปฏิกิริยาฟลูออติดคะตะไลติกแครกกิ้งที่ใช้แล้วปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นแก๊ส ของเหลว ของแข็ง ร้อยละ 19.80 78.00 และ 2.20 โดยน้ำหนักตามลำดับ องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลววิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ ประกอบด้วยร้อยละของแก๊สไฮโดรเจน 9.95 เคโรซีน 12.05 แก๊สออยล์เบา 22.95 แก๊สออยล์หนัก 4.78 และกากน้ำมัน 26.77 โดยน้ำหนักขององค์ประกอบทั้งหมด และที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาฟลูออติดคะตะไลติกแครกกิ้งที่ใช้แล้ว ประกอบด้วย

ร้อยละของแก๊สไฮโดรเจน 12.68 เคโรซีน 10.73 แก๊สออกซิเจน 23.40 แก๊สออกซิเจนหนัก 4.67 และกากน้ำมัน 26.52 โดยน้ำหนักขององค์ประกอบทั้งหมด และภาวะที่เหมาะสมในการให้ผลิตภัณฑ์เคโรซีนสูงที่สุดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ 3% ที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ให้เคโรซีน ร้อยละ 15.58 และตัวเร่งปฏิกิริยาฟลูออโรอะลูมิเนียมออกไซด์ที่เคลือบแล้ว 1% ที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ให้ผลิตภัณฑ์เคโรซีน ร้อยละ 13.26

เชษฐา จีงเจริญพาณิชย์ [35] ศึกษาการไพโรไลซิสเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 3 ลิตร ที่ภาวะดำเนินการอุณหภูมิ 380-430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 60-80 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100-300 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ร้อยละ 30-60 โดยปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ภาวะที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม design-expert พบว่าภาวะของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้วเป็น เชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ และถ่านกัมมันต์คืออุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนน้ำมันปรุงอาหารใช้แล้ว 66.60 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง อัตราการป้อนแก๊สตัวพา 100 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ร้อยละ 6.00 โดยน้ำหนัก จะได้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว 74.78 โดยน้ำหนัก ผลได้ของเนฟทาร้อยละ 20.17 โดยน้ำหนัก ผลได้ของเคโรซีนร้อยละ 10.39 โดยน้ำหนักและผลได้ของดีเซลร้อยละ 43.82 โดยน้ำหนัก

ปวีสุดา เนตรวงศ์ และคณะ [36] ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) บนตัวรองรับชนิดต่างๆ เพื่อผลิตไฮโดรคาร์บอนไปโอดีเซล ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ บนตัวรองรับเซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO₂) และถ่านกัมมันต์ ในการเร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของน้ำมันปรุงอาหารเหลือทิ้ง โดยการทดลองปฏิกิริยา ในเครื่องปฏิกรณ์ที่ 430 องศาเซลเซียส พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์บนตัวรองรับเซอร์โคเนียมออกไซด์ร่วมกับถ่านกัมมันต์เหมาะกับการใช้ในปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน โดย ZrO₂ สามารถยับยั้งการเกิดโค้กได้

ญาดา ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา (2556) [37] ศึกษาการไพโรไลซิสน้ำมันปาล์มจากทะเลาะเปลา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ขนาด 70 มิลลิลิตร โดยออกแบบการทดลองแฟทอเรียลสองระดับ โดยศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำ

ปฏิกิริยา 380-940 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจน 1-5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มจากทะเลลายปาล์มเปล่า 15 กรัม พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่ได้ร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวมากที่สุดคือร้อยละ 66.68 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ให้ร้อยละของเนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกากน้ำมัน 22.50 17.50 55.00 และ 5 โดยน้ำหนักตามลำดับ

Cheng และคณะ [38] ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอากาศยานจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยมี Ni-Mo/HY และ Ni-Mo/HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า Ni-Mo/HY จะให้เชื้อเพลิงอากาศยานเป็นไฮโดรเจนที่มากกว่าและแอมโรมาติกที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ Ni-Mo/HZSM-5 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 330 องศาเซลเซียส ไปถึง 390 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 4 เมกกะพาสคาล บนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo/HY พบว่า ร้อยละผลได้ของน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานเพิ่มขึ้นจาก 0 ไปร้อยละ 49.19 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 410 องศาเซลเซียส ปริมาณเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่เป็นแอมโรมาติกจะเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 30 ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่ผลิตได้

Trieu และคณะ [27] ศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่ง ที่มีปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างต่าง จากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างกรดและเบส โดยทางด้านเบสประกอบไปด้วยแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), แคลเซียมออกไซด์ (CaO) , ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และ โซเดียมเมตาซิลิเกต (Na₂SiO₃) ส่วนฝั่งกรดประกอบไปด้วยซีโอไลต์ชนิดต่างๆคือ HY, H-beta, HZSM-5 และ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) พบว่าที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเบสของ MgO ต่อ H-beta ที่ อัตราส่วน 3 ต่อ 1 จะให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งสูงถึงร้อยละ 35 และมีปริมาณออกซิเจน ในโครงสร้างต่ำที่สุด

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ และหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวที่มีองค์ประกอบในสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) มากที่สุด โดยมีสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ/สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
ซีโอไลต์ชนิดเอชวาย (HY-Zeolite) (Si/Al = 6)	Tosoh Corporation
นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel nitrate-hexahydrate, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)	QReC
แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO)	PanReac AppliChem
ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon, C)	PanReac AppliChem
แอซิโตน (Acetone, C_3H_6O)	QReC
โทลูอีน (Toluene, C_7H_8)	Merck
แก๊สไนโตรเจน 99.99%	BIG
แก๊สไฮโดรเจน 99.99%	BIG
แก๊สฮีเลียม 99%	BIG
แก๊สอากาศ	BIG
แก๊สออกซิเจน 99.99%	BIG
น้ำปราศจากไอออน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า	ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เครื่องซังสาร
2. ปีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. กระจกบอทวง
4. ซ้อนตักสาร
5. แท่งแม่เหล็กกวนสาร
6. แผ่นฟรอยด์อลูมิเนียม
7. เครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน
8. เหล็กคืบ
9. ตู้อบ
10. ถ้วยกระเบื้องทนความร้อน
11. เตาเผาความร้อนสูง
12. เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อใช้สำหรับรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยา
13. ตู้ดูดความชื้น

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-ray diffractometer: XRD) รุ่น D8 Discover ยี่ห้อ Bruker แสดงในรูปที่ 3.1 ใช้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ชนิด $\text{Cu K}\alpha$ (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม) ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 3.1 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์

2. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer: XRF) รุ่น S8 Tiger Eco ยี่ห้อ Bruker สำหรับวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของธาตุในตัวแข็ง แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์

3. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน ด้วยหลักการของ Brunauer-Teller (BET) รุ่น ASAP 2020 ยี่ห้อ Micromeritics แสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch reactor) ขนาด 70 มิลลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียว ไร้สนิม มีชุดฝาปิดสแตนเลสพร้อมชุดอุปกรณ์วัดความดันและวาล์วนิรภัย แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ขนาด 70 มิลลิตร

2. เครื่องแกว่งปฏิกรณ์ขนาดเล็กพร้อมอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล แสดงในรูปที่ 3.5 ทำหน้าที่แกว่งเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างทั่วถึง โดยสามารถปรับความเร็วรอบการแกว่งได้ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขดลวดความร้อนและตัดการจ่ายกระแสไฟเมื่อได้อุณหภูมิที่ตั้งไว้



รูปที่ 3.5 เครื่องปฏิกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องแกว่งปฏิกรณ์ขนาดเล็กและเครื่องควบคุมความร้อน

3. อุปกรณ์ทำความร้อนแบบสายรัด
4. เทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์
5. เครื่องซั่งสาร
6. ซ้อนตักสาร
7. ชุดเครื่องกรองสูญญากาศ
8. กระจกทรง
9. ขวดรูปชมพู่
10. แท่งแก้ว
11. แผ่นพรอยด์อลูมิเนียม
12. ขวดสำหรับเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลว

3.2.4 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกระบวนการโพลีไลซิส

1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC) (Agilent, GC7890A) ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สโซลีน เคโรซีน ดีเซลโดยใช้มาตรฐานวิเคราะห์ ASTM D2887 ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น GC7890A บริษัทเอจีแลนต์ เทคโนโลยี จำกัด (ประเทศไทย) ใช้คอลัมน์ชนิด capillary จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น DB-1 ขนาด 10 เมตร \times 0.53 มิลลิเมตร \times 2.65 ไมโครเมตร และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulation distillation software) แสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

2. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) (Agilent, GC7890A, MS5975C, Detector HP-5) เป็นเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี รุ่น GC7890A โดยมีเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์รุ่น GCMS5975C จากบริษัท J&W Scientific จำกัด รุ่น HP-5MS ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร มี 100% Dimethylpolysiloxane ความหนา 0.25 ไมโครเมตร เป็นวัฏภาคนิ่ง (stationary phase) ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -60 ถึง 350 องศาเซลเซียส แสดงในรูปที่ 3.7



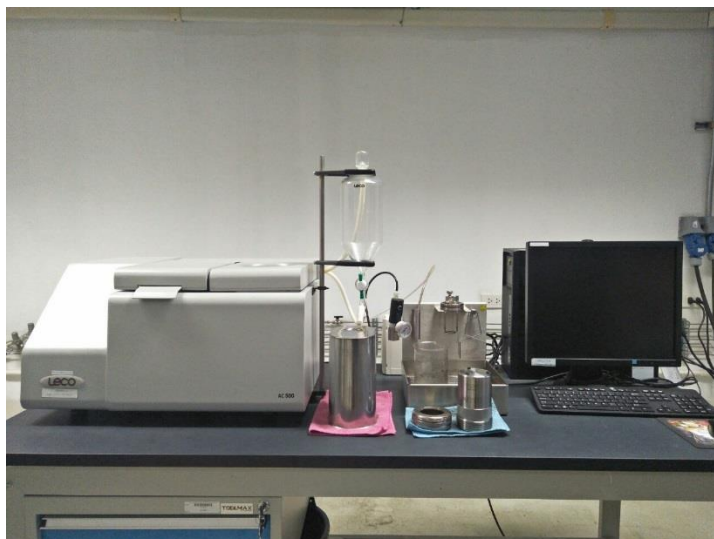
รูปที่ 3.7 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

3. เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบแยกธาตุ ยี่ห้อ LECO รุ่น AC500 เป็นเครื่องที่ใช้วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และออกซิเจน แสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบแยกธาตุ

4. เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน ยี่ห้อ LECO เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับหาค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อน

5. เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ รุ่น 916 Ti-Touch ยี่ห้อ Metrohm แสดงในรูปที่ 3.10 ใช้สำหรับวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



รูปที่ 3.10 เครื่องไทเทรตแบบอัตโนมัติ

6. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography: thermal conductivity detector and flame ionization detector) ใช้สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส แสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 ตามลำดับ



รูปที่ 3.11 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิด thermal conductivity (GC-TCD)



รูปที่ 3.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัดชนิด flame ionization (GC-FID)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ ด้วยวิธี wetness impregnation และเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ซึ่งประกอบด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY

3.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และ X-ray Fluorescence (XRF) และวิเคราะห์พื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน ด้วยหลักการของ Brunauer-Teller (BET)

3.3.3 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (DGC)

3.3.4 ออกแบบการทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบสองระดับ ประสมกลาง โดยมีระดับของตัวแปร คือ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) และระดับสูง (+) โดยมีตัวแปร ที่ศึกษา 4 ตัวแปร และภาวะทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง โดยมีการทดลองซ้ำของตัวแปรระดับกลาง 5 ครั้ง แสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดย ไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

ตัวแปร	สัญลักษณ์	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
	ตัวแปร	(-1)	(0)	(+1)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	A	420	435	450
เวลา (นาทีก)	B	30	45	60
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	C	1	3	5
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา	D	70 ต่อ 30	50 ต่อ 50	30 ต่อ 70

ตารางที่ 3.3 วิธีการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบ 2 ระดับ

การทดลองที่	A	B	C	D
1	420	30	1	70 ต่อ 30
2	450	30	1	70 ต่อ 30
3	420	60	1	70 ต่อ 30
4	450	60	1	70 ต่อ 30
5	420	30	5	70 ต่อ 30
6	450	30	5	70 ต่อ 30
7	420	60	5	70 ต่อ 30
8	450	60	5	70 ต่อ 30
9	420	30	1	30 ต่อ 70
10	450	30	1	30 ต่อ 70

ตารางที่ 3.3 (ต่อ) วิธีการออกแบบการทดลองเชิงประกอบแบบ 2 ระดับ

การทดลองที่	A	B	C	D
11	420	60	1	30 ต่อ 70
12	450	60	1	30 ต่อ 70
13	420	30	5	30 ต่อ 70
14	450	30	5	30 ต่อ 70
15	420	60	5	30 ต่อ 70
16	450	60	5	30 ต่อ 70
17	435	45	3	50 ต่อ 50
18	435	45	3	50 ต่อ 50
19	435	45	3	50 ต่อ 50
20	435	45	3	50 ต่อ 50
21	435	45	3	50 ต่อ 50

3.3.5 ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ และวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ของเหลว โดย หาสัดส่วนของเชื้อเพลิงเหลวตามมาตรฐาน ASTM D2887 โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น และวิเคราะห์หองค์ประกอบผลผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

3.3.6 หากภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม เพื่อให้ได้ผลผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มากที่สุด

3.3.7 เปรียบเทียบผลการทดลองจริงและผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม Design Expert และนำผลผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปทดสอบสมบัติของเชื้อเพลิง

3.4. การดำเนินการทดลอง

3.4.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY ด้วยวิธี Wetness Impregnation

เตรียม 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY โดยชั่งนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต 5.56 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร ชั่งซีโอไลต์ HY 10 กรัม แล้วเติมลงไปในสารละลายของ

นิกเกิลไนเตรดที่เตรียมไว้ ปั่นจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบแห้งโดยใช้ตู้อบสาร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส (อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในเตาเผาความร้อนสูง จากนั้นนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปทำการรีดิวซ์ก่อนใช้งาน ในสภาวะแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำไปเคลือบผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา (passivate) ด้วยแก๊สออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

3.4.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่าง แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY

นำแมกนีเซียมออกไซด์ และถ่านกัมมันต์ผสมกัน ($MgO+AC$) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 จากนั้นจึงนำไปผสมกับ ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY ในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 และ 30 ต่อ 70

3.4.3 เตรียมเครื่องปฏิกรณ์ให้พร้อมใช้งาน โดยทำการชั่งน้ำหนักก่อนเริ่มใช้ทำปฏิกิริยา แล้วจดบันทึก

3.4.5 ทำการอุ่นน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที

3.4.6 ชั่งน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่เตรียมไว้ ตามที่ต้องการ ใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วจึงชั่งน้ำมันที่อุ่นไว้ 15 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ จดบันทึกน้ำหนักรวมของเครื่องปฏิกรณ์และสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา

3.4.7 ปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ พร้อมกับไขเครื่องปฏิกรณ์ให้เข้าที่แน่นสนิท ทำการกำจัดอากาศภายในโดยใช้แก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำเครื่องปฏิกรณ์วางในเครื่องแกว่ง พร้อมกับติดตั้งอุปกรณ์ให้ความร้อน (band heater) ให้เรียบร้อย

3.4.8 ตั้งค่าอุณหภูมิที่ต้องการ เปิดปุ่มคำสั่งการแกว่ง รอให้ถึงอุณหภูมิที่ต้องการ แล้วทำการจับเวลาตามที่ต้องการศึกษา

3.4.9 เมื่อครบที่เวลาที่ต้องการศึกษา ปิดปุ่มคำสั่งการแกว่ง พร้อมกับ ตั้งค่าอุณหภูมิให้อยู่ที่อุณหภูมิห้อง รอจนเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

3.4.10 เปิดวาล์วปล่อยผลิตภัณฑ์แก๊สออก แล้วทำการชั่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์พร้อมผลิตภัณฑ์หลังการทดลอง พร้อมจดบันทึก

3.4.11 เก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ โดยการนำไปกรองด้วยกระดาษกรองชนิดใยแก้ว ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ แล้วเก็บผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการกรองแล้วในขวดเก็บสารเคมี เพื่อนำไปวิเคราะห์หาสัดส่วนของเชื้อเพลิง

3.4.12 ทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอีน

3.4.13 วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น และคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว โดยใช้สมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลว}}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}} \times 100 \quad (3.1)$$



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการไพโรไลซิส น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาผสม และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาผสม เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อการไพโรไลซิส น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา ในช่วงคาร์บอนอะตอมระหว่าง 5-15 อะตอมมากที่สุด

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนการไพโรไลซิส

จุดเดือด (°C)	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)
IBP - 200	แนฟทา (C ₅ -C ₁₂)	0.00
200 - 250	เคโรซีน (C ₁₂ -C ₁₅)	0.00
250 - 370	ดีเซล (C ₁₅ -C ₃₃)	24.10
370 - FBP	กากน้ำมัน (>C ₃₃)	75.90

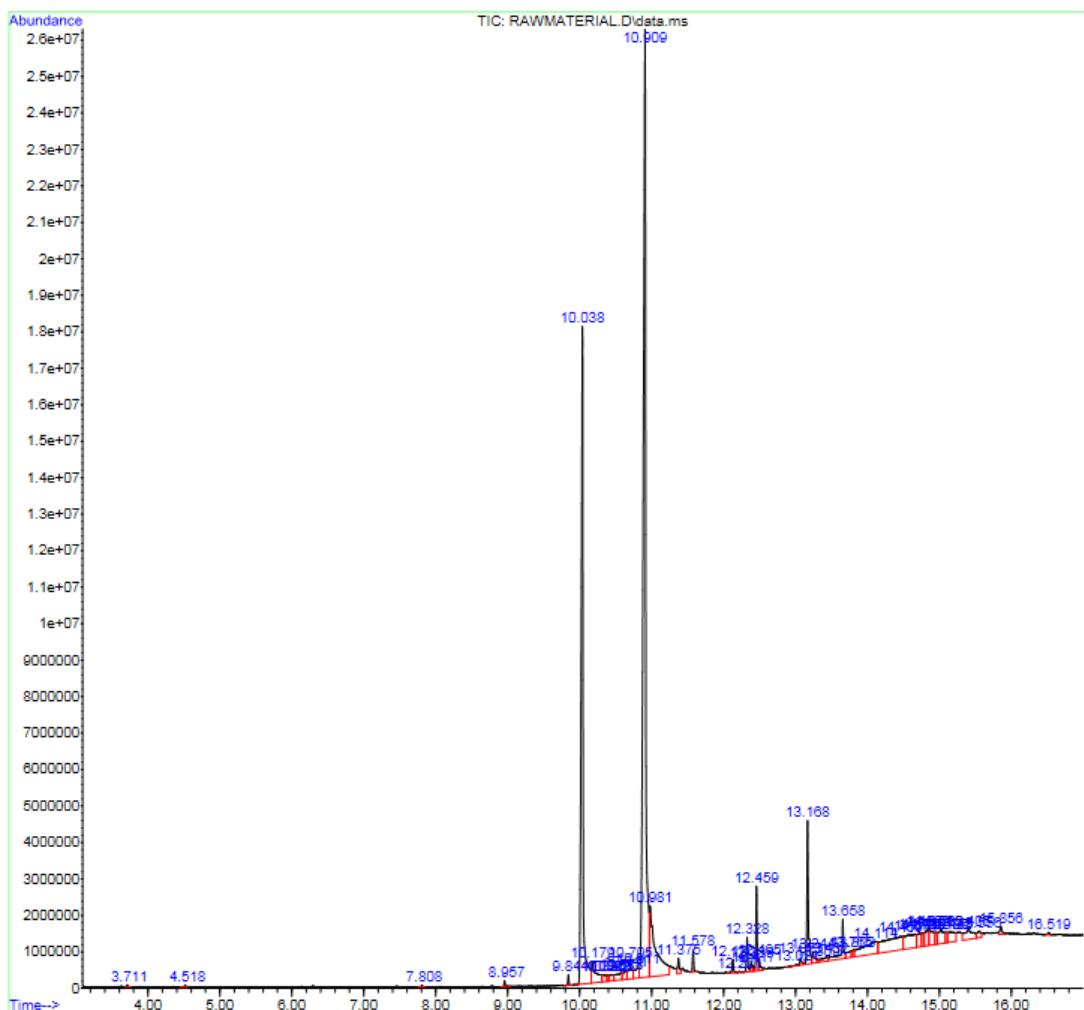
หมายเหตุ : IBP คือ Initial Bolling Point (จุดเดือดเริ่มต้น)

: FBP คือ Final Bolling Point (จุดเดือดสุดท้าย)

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ตามมาตรฐานของสมาคมการทดสอบและวัสดุอเมริกัน (American Society for Testing and Material : ASTM) โดยใช้มาตรฐานการวิเคราะห์ช่วงการกลั่นของน้ำมันปิโตรเลียม หมายเลข D2887 ซึ่งสามารถแยกองค์ประกอบตามช่วงการกลั่นตามจุดเดือด ได้แก่ แนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกากน้ำมัน พบว่าในน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่ามีองค์ประกอบหลัก 2 องค์ประกอบคือ ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในช่วง

ดีเซลร้อยละ 24.10 โดยน้ำหนัก และกากน้ำมันหรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายยาว มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 75.90 โดยน้ำหนัก ซึ่งยังไม่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาได้ จำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณภาพให้มีขนาดสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นลง น้ำหนักโมเลกุลเบาลง และให้มีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงสัดส่วนเบา

4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

จากรูปที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าเกิดพีคหลักที่เด่นชัด

4 พีค คือที่รีเทนชันไทม์ที่ 10.038 10.909 12.459 และ 13.168 จากพีคที่ปรากฏสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบได้เป็น กรดไขมันอิ่มตัวสูง คือ กรดไขมันปาล์มิติก (palmitic acid : C₁₆) กรดไขมันโอเลอิก (oleic acid : C₁₈) และยังพบกรดไขมันอิ่มตัวสเตียริก (stearic acid : C₁₈) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นแสดงให้เห็นว่า น้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล้าเป็นแหล่งของไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16-18 อะตอมเรียงต่อกัน จึงเป็นเหตุผลให้เลือกน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล้าเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล้าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
3.711	Phenol	0.03
4.518	3a,4,5,6,7,7a-Hexahydro-4,7-meth..	0.03
7.808	N,N'-Dimethyl-decane-1,10-diamine	0.03
8.957	Tetradecanoic acid	0.11
9.846	Hexadecanoic acid, methyl ester	0.16
10.038	n-Hexadecanoic acid	20.04
10.180	Octadecanoic acid	1.53
10.327	n-Hexadecanoic acid	0.44
10.392	n-Hexadecanoic acid	0.17
10.457	n-Hexadecanoic acid	0.38
10.578	n-Hexadecanoic acid	0.70
10.639	n-Hexadecanoic acid	0.50
10.704	8-Octadecenoic acid, methyl este...	0.90
10.812	n-Hexadecanoic acid	0.74
10.909	Oleic Acid	38.43
10.981	6-Octadecenoic acid	6.88

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล้าจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

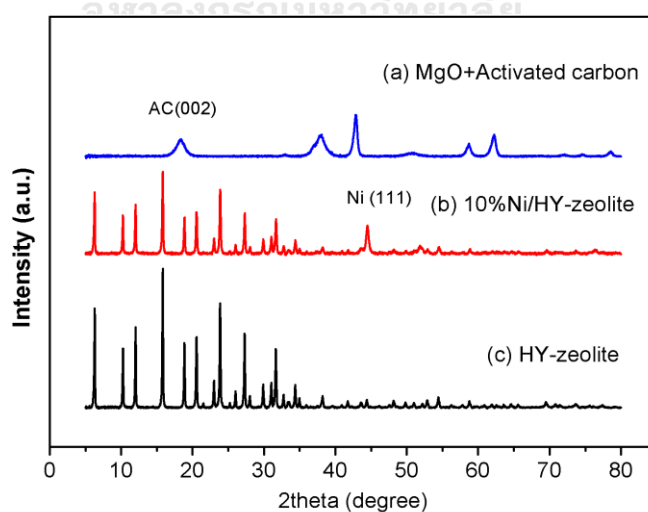
เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
11.376	Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(...	0.45
11.575	Palmitoyl chloride	0.39
12.130	9-Octadecenoic acid (Z)-, 2,3-di...	0.31
12.221	2-[4-Cyclohexylbutanoylamino]-3-...	0.02
12.330	Cyclohexanecarboxylic acid, dode...	0.71
12.390	2-Ethylbutyric acid, eicosyl ester	0.22
12.417	Tris(tert-butyltrimethylsilyloxy)...	0.12
12.459	Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(...	1.50
12.495	Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(...	0.37
13.023	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	0.05
13.071	1,2-Benzisothiazol-3-amine tbdms	0.20
13.168	9-Octadecenoic acid (Z)-, 2,3-di...	3.29
13.245	Tris(tert-butyltrimethylsilyloxy)...	0.42
13.310	Tris(tert-butyltrimethylsilyloxy)...	0.11
13.431	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	0.36
13.656	2-Propenoic acid, 2-methyl-, 2,3-...	1.45
13.765	Tris(tert-butyltrimethylsilyloxy)...	0.45
13.804	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	0.25
14.116	3-Quinolinecarboxylic acid, 6,8-...	3.02
14.458	Tris(tert-butyltrimethylsilyloxy)..	4.14
14.671	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	2.45
14.732	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	0.88
14.779	Tris(tert-butyltrimethylsilyloxy)...	0.51

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) องค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปลาไหลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
14.840	Tris(tert-butyl dimethylsilyloxy)...	0.92
14.870	Tris(tert-butyl dimethylsilyloxy)...	1.11
14.957	Tris(tert-butyl dimethylsilyloxy)...	0.39
15.022	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	1.33
15.104	Tris(tert-butyl dimethylsilyloxy)...	0.33
15.156	Methyltris(trimethylsilyloxy)silane	1.08
15.404	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	1.33
15.555	Tris(tert-butyl dimethylsilyloxy)...	0.40
15.854	Tris(tert-butyl dimethylsilyloxy)...	0.28
16.518	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-	0.08

4.2 วิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ (b) 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY (c) ซีโอไลต์ HY

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์พบว่า ที่ตำแหน่ง $2\theta = 18$ แสดงให้เห็นพีคของคาร์บอนหรือถ่านกัมมันต์ที่ผสมอยู่กับแมกนีเซียมออกไซด์ และในขณะที่ตำแหน่ง $2\theta = 41$ แสดงพีคหลักของโครงสร้างผลึกแมกนีเซียมออกไซด์ สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา (b) 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY พบว่าที่ตำแหน่ง $2\theta = 45$ แสดงให้เห็นพีคแหลมที่เกิดขึ้นแสดงถึงผลึกของนิกเกิล ซึ่งต่างจาก (C) ซีโอไลต์ HY ที่ไม่มีพีคในตำแหน่งนั้น เป็นการยืนยันได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีนิกเกิลอยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ HY

4.2.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry: XRF

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยเทคนิค XRF

MgO + Activated carbon (AC) ratio 50:50 (Element)	Compound	Concentration (% weight)
C	C	49.41
Mg	MgO	49.2
K	K ₂ O	0.93
Si	SiO ₂	0.28
Ca	CaO	0.18
10%Ni/HY-zeolite (Element)	Compound	Concentration (% weight)
Ni	NiO	16.40
Si	SiO ₂	64.70
Al	Al ₂ O ₃	18.20
Na	Na ₂ O	0.22
Fe	Fe ₂ O ₃	0.48

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไพโรไลซิสด้วยเทคนิค XRF

Mixed catalysts	Compound	Concentration
MgO+AC:10%Ni/HY-zeolite		(% weight)
ratio 30:70 (Element)		
Ni	NiO	11.80
Si	SiO ₂	44.70
Al	Al ₂ O ₃	12.30
Mg	MgO	16.10
C	C	14.80
K	K ₂ O	0.30

ตารางที่ 4.3 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY และตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY อัตราส่วน 30 ต่อ 70 พบว่า ในตัวเร่งปฏิกิริยาผสมมีองค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ และถ่านกัมมันต์เท่ากับร้อยละ 16.10 และ 14.80 ตามลำดับ โดยเมื่อรวมกันคิดเป็นร้อยละ 30.90 ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม และมีองค์ประกอบของนิกเกิลเท่ากับร้อยละ 11.80 ซิลิกอนไดออกไซด์ร้อยละ 44.70 อะลูมิเนียมออกไซด์ร้อยละ 12.30 เมื่อรวมกันคิดเป็นร้อยละ 68.80 ของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

4.2.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุน (BET) (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) (cm ³ /g)	ขนาดรูพรุน (Pore size) (nm)
แมกนีเซียมออกไซด์	40.55	0.133	13.13
ถ่านกัมมันต์	1208.65	0.660	2.19
ซีโอไลต์ HY	604.72	0.391	2.59
10% นิกเกิลบนตัวรองรับ	532.15	0.325	2.44
ซีโอไลต์ HY			
ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	530.25	0.346	2.61

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุน (surface area) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) และขนาดรูพรุน (Pore size) ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษา ด้วยเทคนิค Brunauer Emmett Teller (BET method) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่ใช้ มีพื้นที่ผิวรูพรุนสูง ขนาดรูพรุนของตัวเร่ง-ปฏิกิริยาผสมอยู่ที่ 2.61 นาโนเมตร ซึ่งจัดอยู่ในช่วงขนาดรูพรุนที่เป็นขนาดกลาง (mesopore) โดยส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาบริเวณเร่ง (active site) ได้ดี กล่าวคือโมเลกุลของน้ำมันปาล์มต้องเข้ามาในบริเวณเร่งเพื่อเกิดปฏิกิริยาและจะสามารถเข้ามาได้เมื่อบริเวณเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีขนาดรูพรุนมากกว่า 2 นาโนเมตรขึ้นไป ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่ใช้มีขนาดรูพรุนมากกว่า 2 นาโนเมตร ทำให้โมเลกุลของน้ำมันเข้าไปที่บริเวณเร่งเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้

4.3 การศึกษาผลของตัวแปรต่างๆต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

การออกแบบการทดลอง 2⁴ แฟกทอเรียล เพื่อวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง คือ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส เวลาที่ใช้ในการไพโรไลซิส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

เพื่อวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ พบว่ามีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 51.50 - 69.50 โดยน้ำหนัก แสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว
	A (°C)	B (min)	C (% w/w)	D	
1	420	30	1	70:30	58.50
2					60.50
3					67.50
4	450	30	1	70:30	68.50
5					65.50
6					67.00
7	450	60	1	70:30	54.00
8					54.50
9					54.00
10	420	30	5	70:30	55.00
11					62.50
12					450

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบ
ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว
	A (°C)	B (min)	C (%) w/w)	D	
13					63.50
14	420	60	5	70:30	62.50
15					52.50
16	450	60	5	70:30	52.00
17					65.00
18	420	30	1	30:70	65.00
19					69.50
20	450	30	1	30:70	68.50
21					65.50
22	420	60	1	30:70	66.50
23					52.00
24	450	60	1	30:70	52.50
25					59.50
26	420	30	5	30:70	60.50
27					67.50
28	450	30	5	30:70	66.00
29					65.50
30	420	60	5	30:70	66.50
31					51.50
32	450	60	5	30:70	52.50

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบ
ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

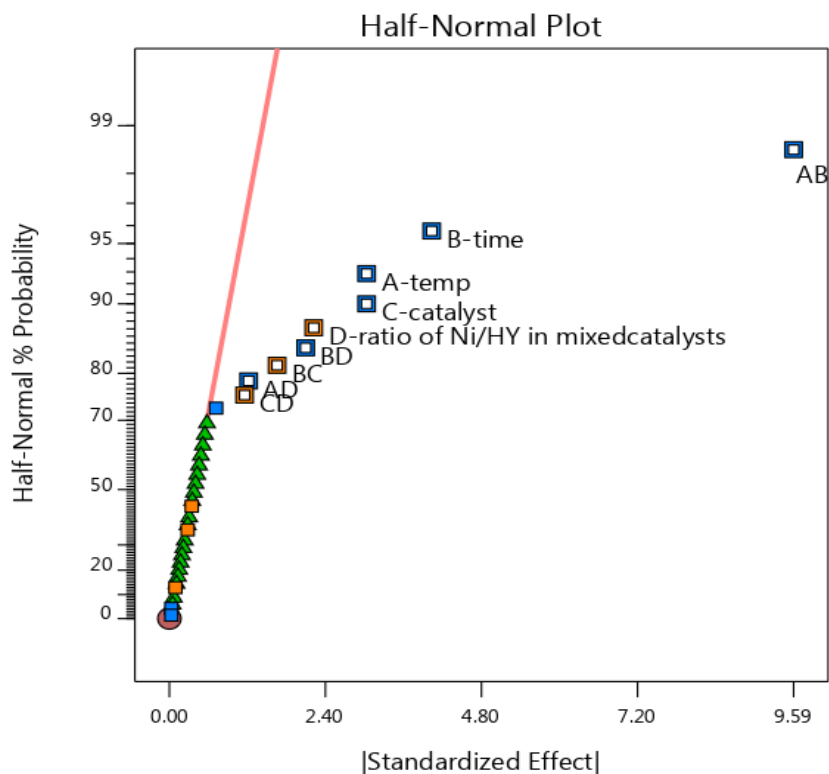
การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว
	A (°C)	B (min)	C (%) w/w)	D	
33	435	45	3	50:50	58.00
34	435	45	3	50:50	61.50
35	435	45	3	50:50	55.00
36	435	45	3	50:50	58.50
37	435	45	3	50:50	53.50

จากผลการทดลอง นำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert เพื่อศึกษาความแปรปรวน (analysis of variance : ANOVA) จากการคำนวณบ่งบอกได้ถึงปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยปัจจัยนั้นต้องมีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 แสดงข้อมูลในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปลาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

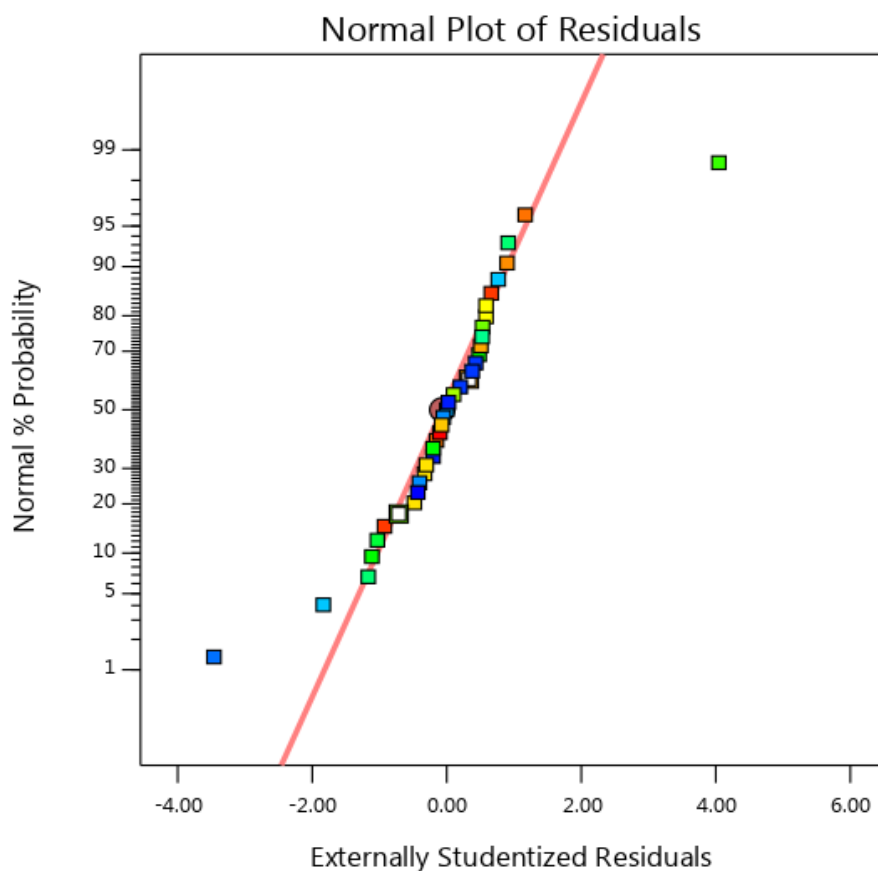
Source	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F value	Prob > F value
Model	1132.32	9	125.81	58.70	< 0.0001
A	73.51	1	73.51	34.30	< 0.0001
B	130.01	1	130.01	60.66	< 0.0001
C	73.51	1	73.51	34.30	< 0.0001
D	39.38	1	39.38	18.38	0.0002
AB	736.32	1	736.32	343.57	< 0.0001
AD	11.88	1	11.88	5.54	0.0264
BC	21.95	1	21.95	10.24	0.0036
BD	35.07	1	35.07	16.36	0.0004
CD	10.7	1	10.7	4.99	0.0343
Residual	55.72	26	2.14		
total	1247.74	36			

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เมื่อพิจารณาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว คือ อุณหภูมิ (A) เวลา (B) ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (C) อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม (D) และยังพบว่า มีปัจจัยที่มีอันตรกิริยาระหว่างกัน คือ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา (AB) อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม (AD) อันตรกิริยาระหว่างเวลาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (BC) อันตรกิริยาระหว่างเวลาและอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม (BD) อันตรกิริยาระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาและอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม (CD)



รูปที่ 4.3 half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สอดคล้องกับการทำ half normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว เมื่อทำการพลอตค่ากับ effect พบว่า ตัวแปรที่มีแนวโน้มเบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง ได้แก่ A B C D AB AD BC BD CD ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า คือปัจจัยที่ส่งผลร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมอย่างมีนัยสำคัญ จึงนำข้อมูลไปสร้าง Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.4 Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

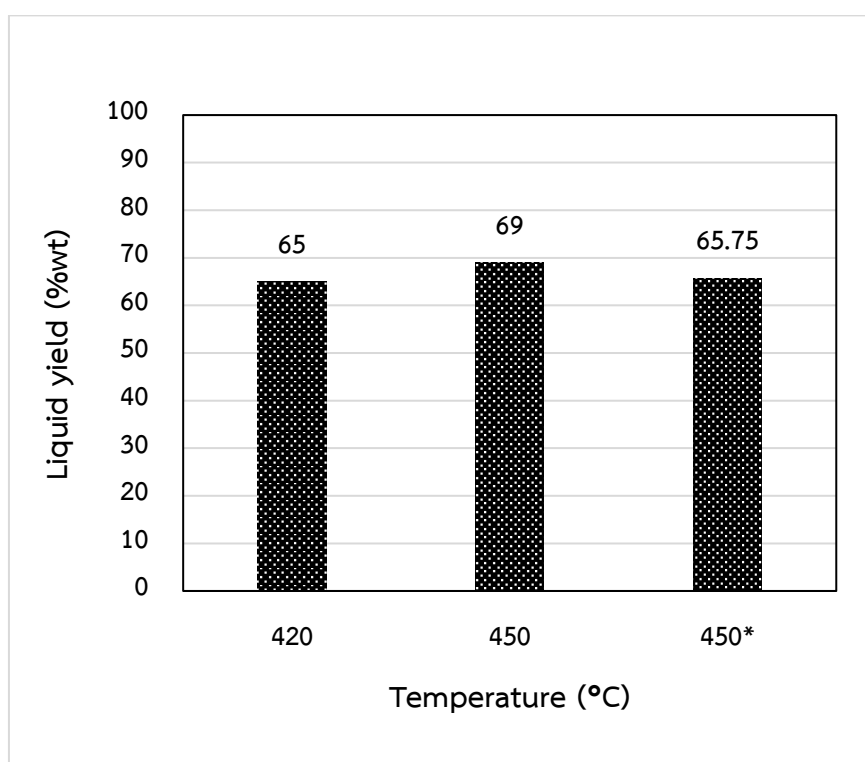
รูปที่ 4.4 แสดง Normal probability plot of residuals ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว พบว่ามีค่า $R^2 = 0.95$ มีค่าใกล้เคียง 1 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลที่นำมาศึกษามีความน่าเชื่อถือของข้อมูล และสามารถนำมาวิเคราะห์ทางสถิติต่อไปได้

4.4 ผลของตัวแปรที่ศึกษาต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

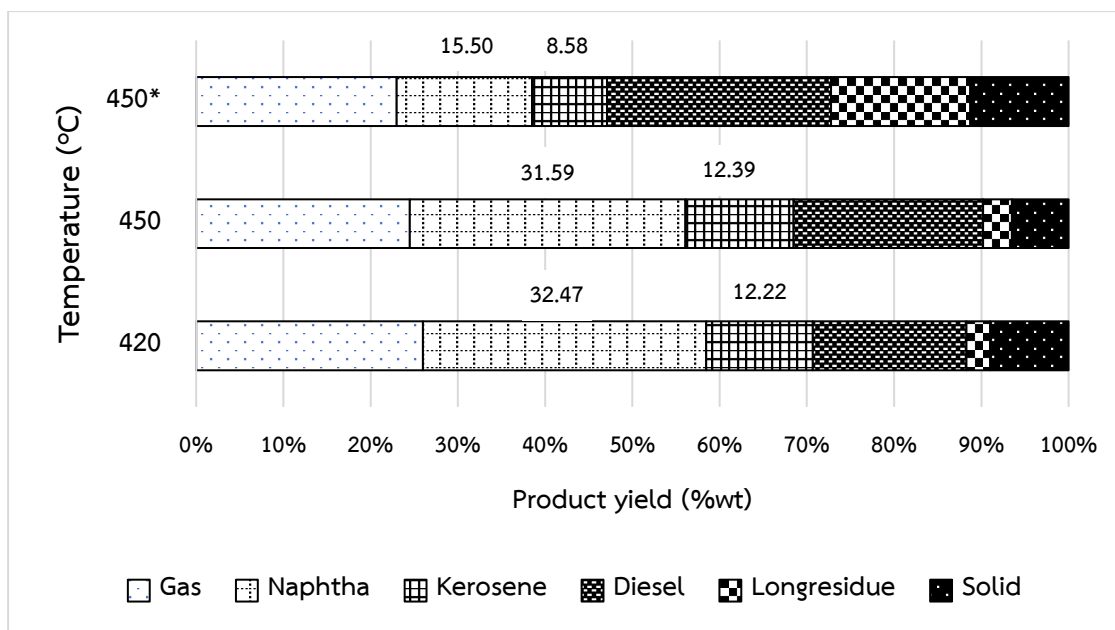
เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้วิธี ANOVA แล้ว แสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม จึงได้ทำการศึกษาต่อไปว่าปัจจัยเหล่านั้นส่งผลอย่างไร โดยการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างค่าต่ำและค่าสูงของแต่ละปัจจัย

4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

ศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 420 และ 450 องศาเซลเซียส มีตัวแปรที่คงที่ คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70



รูปที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา(*)



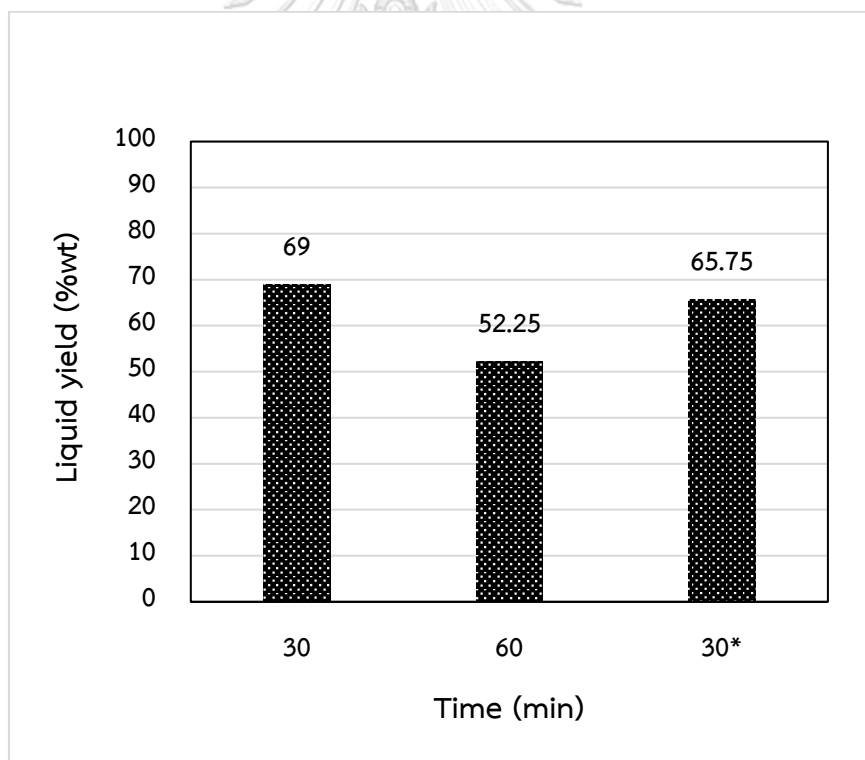
รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา(*)

รูปที่ 4.5 ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ 420 และ 450 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในปริมาณมากขึ้น และเมื่อนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือด แสดงในรูปที่ 4.6 พบว่าองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของเนฟทาและโครซีนหรือองค์ประกอบที่เป็นเชื้อเพลิงเหลว สัดส่วนเบาตกลงเพียงเล็กน้อย จากแนวโน้มดังกล่าวอธิบายได้ว่า ในช่วงแรกของการแตกสลายเชิงความร้อน อุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และมอนอกลิเซอไรด์ ไปเป็นกรดไขมันอิสระ และเกิดการแตกสลายของหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิล ในขณะที่การทดลองนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งมีบทบาทในการแตกสลายหมู่คาร์บอนิลและหมู่คาร์บอกซิล ไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะพบแก๊สทั้งสองเป็นแก๊สที่ไม่ควมแน่นในปฏิกิริยานี้ จากนั้นอุณหภูมิและเวลาในการดำเนินปฏิกิริยาไปข้างหน้าทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางแตกตัวต่อไปเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก เกิดการแตกตัวต่อไปด้วยการเคลื่อนย้ายไฮโดรเจนบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

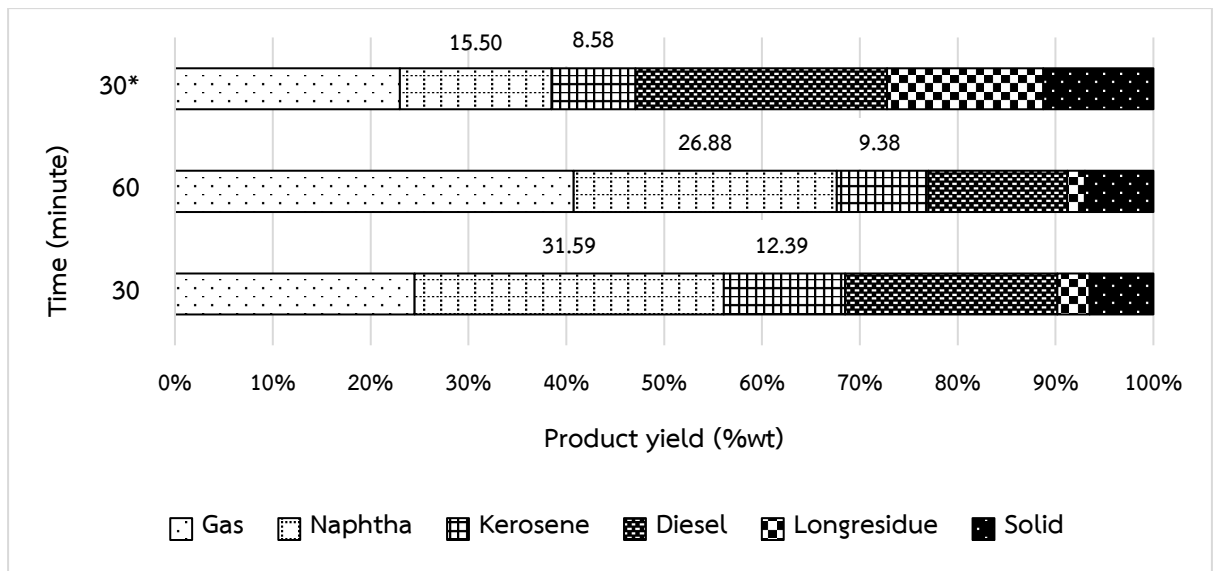
และการเกิดการเลือกเกิดเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจากขนาดของรูพรุนขนาดกลางจำพวก mesopore ได้เป็นไฮโดรคาร์บอนเบาที่มีขนาดอะตอม 5-15 อะตอม ไปเป็นแก๊โซลีน และ เคโรซีนตามลำดับ

4.4.2 ผลของเวลาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจาก ทะลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

ศึกษาผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว ทำการ ทดลองโดยใช้ระยะเวลาที่ต่างกัน คือ 30 นาที และ 60 นาที มีตัวแปรที่คงที่ คือ อุณหภูมิในการทำ ปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนอัตราส่วน ระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70



รูปที่ 4.7 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิ ในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่าง แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และ ภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา(*)

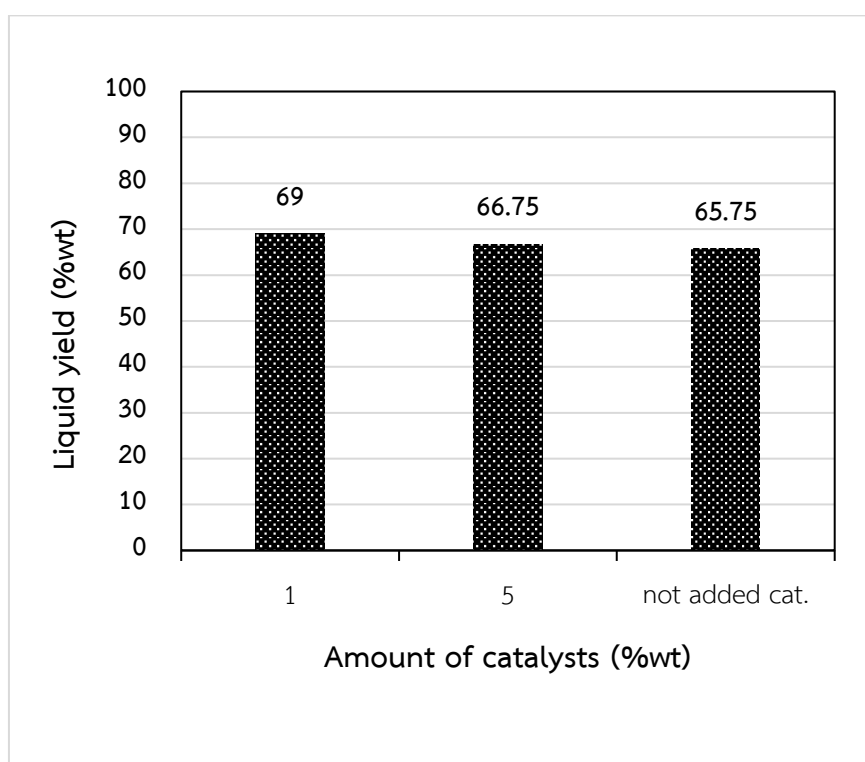


รูปที่ 4.8 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา(*)

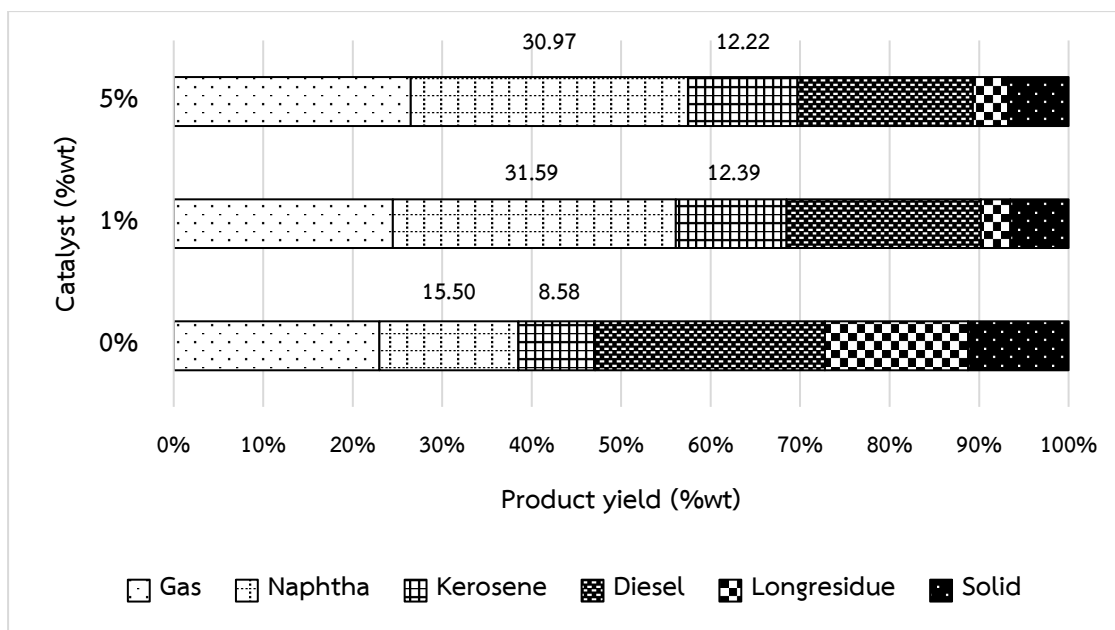
รูปที่ 4.8 ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา คือ 30 นาที และ 60 นาที พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในปริมาณลดลง แสดงในรูปที่ 4.7 และเมื่อนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือด พบว่าองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของแนฟทาและเคโรซีนหรือเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาลดลง เช่นเดียวกัน จากแนวโน้มดังกล่าวอธิบายได้ว่า เวลาที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกตัวโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน การให้เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดการแตกตัวไปเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเกิดการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีปริมาณลดลง รวมถึงองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของแนฟทาและเคโรซีนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก เกิดการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนจึงลดลงเช่นเดียวกัน แสดงในรูปที่ 4.8

4.4.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก มีตัวแปรที่คงที่ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และอัตราส่วนอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70



รูปที่ 4.9 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา(*)

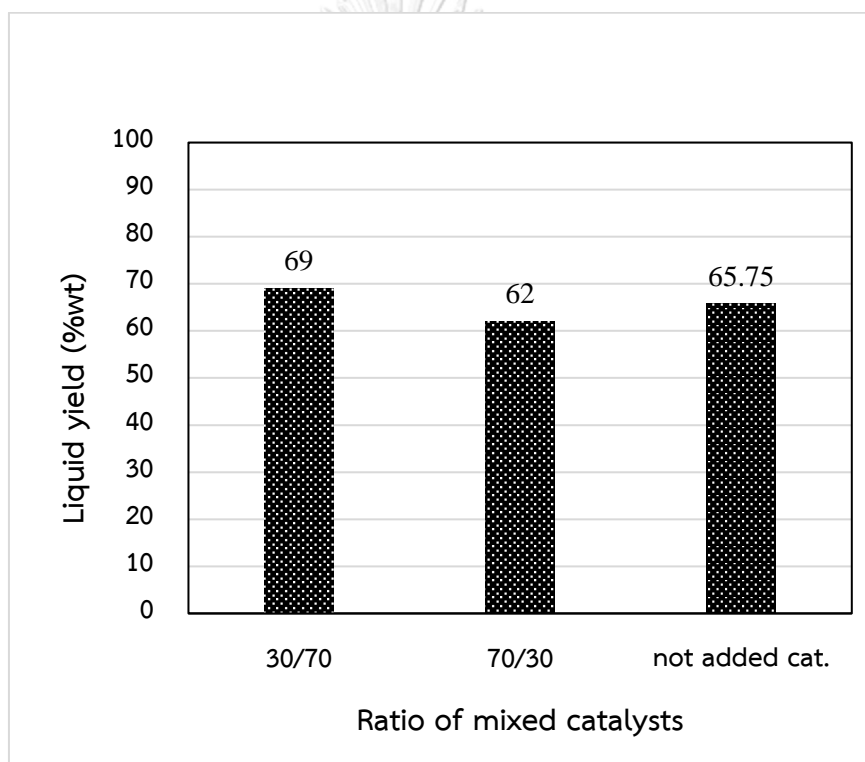


รูปที่ 4.9 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา อณุมณีในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30:70 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา

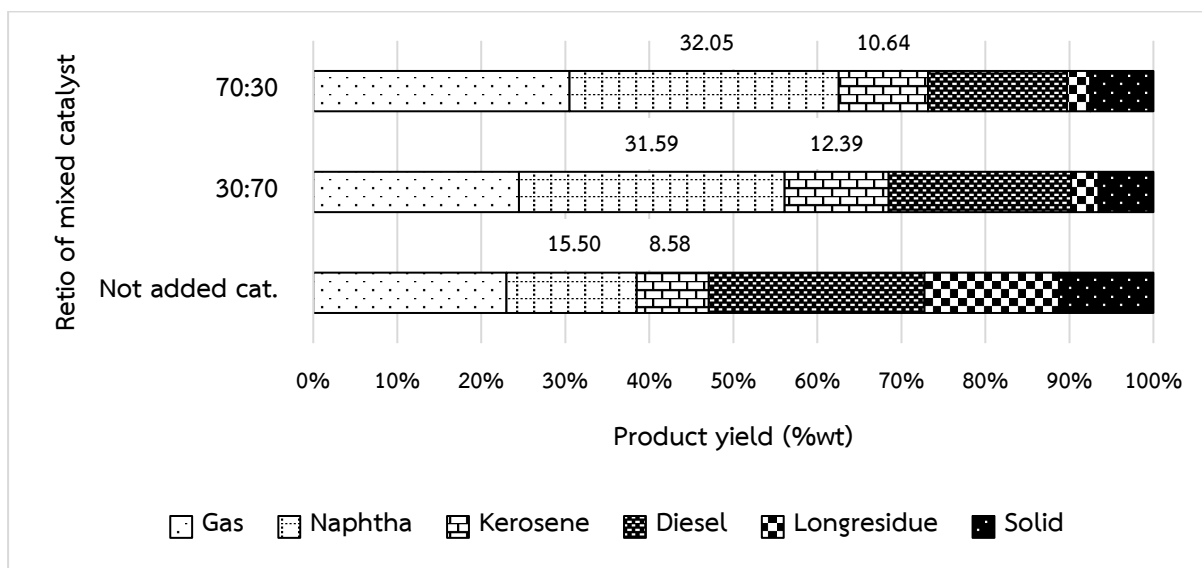
รูปที่ 4.9 ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักพบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณเพิ่มขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวในปริมาณลดลง และเมื่อนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือด พบว่าองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของแนฟทาและเคโรซีนหรือเชื้อเพลิงสัดส่วนเบาลดลงเล็กน้อย จากแนวโน้มดังกล่าวอธิบายได้ว่า ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้มากขึ้น ทำให้โมเลกุลเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องไปเป็นแก๊ส ผลิตภัณฑ์แก๊สจึงมีปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีปริมาณลดลง รวมถึงองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของแนฟทาและเคโรซีนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก เกิดการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนจึงลดลงเช่นเดียวกัน แสดงในรูปที่ 4.9

4.4.4 ผลของอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในอัตราส่วน 70 ต่อ 30 และ 30 ต่อ 70 มีตัวแปรที่คงที่ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดย 30/70 คือ MgO+AC ร้อยละ 30 ต่อ 10% Ni/HY-zeolite ร้อยละ 70 และ 70/30 คือ คือ MgO+AC ร้อยละ 70 ต่อ 10% Ni/HY-zeolite ร้อยละ 30 และภาวะที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 4.12 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทำปฏิกิริยา อุดมทฤษฎีในการทำปฏิกิริยา 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก โดย 30/70 คือ MgO+AC ร้อยละ 30 ต่อ 10% Ni/HY-zeolite ร้อยละ 70 และ 70/30 คือ คือ MgO+AC ร้อยละ 70 ต่อ 10% Ni/HY-zeolite ร้อยละ 30 และภาวะที่ไม่เติม ตัวเร่งปฏิกิริยา

จากรูปที่ 4.11 ทำการทดลองโดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสม กับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คืออัตราส่วน 70 ต่อ 30 และ 30 ต่อ 70 พบว่า เมื่ออัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY เพิ่มขึ้น จะได้ผลิตภัณฑ์ เชื้อเพลิงเหลวในปริมาณเพิ่มขึ้น และเมื่อนำผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตาม คาบจุดเดือด พบว่าองค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของเนฟทาและเคโรซีนหรือองค์ประกอบที่เป็นเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน จากแนวโน้มดังกล่าวอธิบายได้ว่า อัตราส่วนของ ตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY มีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกตัวโมเลกุล ไฮโดรคาร์บอน เมื่ออัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY เพิ่มขึ้น ทำให้ เกิดการแตกตัวไปเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเกิดการแตกตัวต่อไปเป็น แก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวมีปริมาณเพิ่มขึ้น รวมถึง

องค์ประกอบที่อยู่ในช่วงคาบจุดเดือดของเนฟทาและเคโรซีนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กมีมากขึ้นตามไปด้วย แสดงในรูปที่ 4.12

4.5 ภาวะที่เหมาะสมของการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

ตารางที่ 4.7 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert

Name	Goal	Lower limit	Upper limit	Unit
Temperature	is in rang	420	450	°C
Time	is in rang	30	60	min
Catalysts	is in rang	1	5	% w/w
Ratio between MgO+AC and 10% Ni/HY-zeolite	is in rang	70:30	30:70	-
Liquid yield	maximize	51.50	69.50	%wt

ตารางที่ 4.8 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert

ตัวแปร	ภาวะจากโปรแกรม	ภาวะจากการทดลองจริง
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	449.99	450
เวลา (นาที)	30.00	30
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ (โดยน้ำหนัก)	1.00	1
อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	32.51:67.49	30:70
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว	69.50	69.00
ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C ₅ -C ₁₅)	64.17	63.75
ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C ₅ -C ₁₅) ในผลิตภัณฑ์ของเหลว (รูปแบบ normalize)	44.60	43.99

เมื่อหาภาวะที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากค่าตอบสนองคือ ร้อยละของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวให้มากที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-Expert โดยแสดงภาวะที่เหมาะสมดังตารางที่ 4.8 คือ ที่อุณหภูมิ 449.99 องศาเซลเซียส เวลา 30.00 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY อยู่ที่ 32.51:67.49 จะทำให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับ 69.50 มีร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) เท่ากับ 64.17 โดยน้ำหนัก ซึ่งคิดเป็นร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาในผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับร้อยละ 44.60 โดยน้ำหนัก และหลังจากได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้ว จึงนำมาทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรม แสดงในตารางที่ 4.10 ซึ่งพบว่า ค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert

4.6 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมกับน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนการไพโรไลซิส

จุดเดือด (°C)	องค์ประกอบ	น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า	
		ก่อนไพโรไลซิส	จากการไพโรไลซิส
		ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)	ร้อยละโดยน้ำหนัก (%wt)
IBP - 200	แนฟทา (C_5-C_{12})	0.00	45.80
200 - 250	เคโรซีน ($C_{12}-C_{15}$)	0.00	17.95
250 - 370	ดีเซล ($C_{15}-C_{33}$)	24.10	31.45
370 - FBP	กากน้ำมัน ($>C_{33}$)	75.90	4.80

หมายเหตุ : IBP คือ Initial Bolling Point (จุดเดือดเริ่มต้น)

: FBP คือ Final Bolling Point (จุดเดือดสุดท้าย)

จากตารางที่ 4.9 พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมมีองค์ประกอบของแนฟทาและเคโรซีนซึ่งเป็นเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) เพิ่มมากขึ้น เมื่อเทียบกับองค์ประกอบของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนการไพโรไลซิสซึ่งมีองค์ประกอบหลักเพียง 2

องค์ประกอบคือ ดีเซลและกากน้ำมัน โดยผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลว สัดส่วนเบาคิดเป็นร้อยละ 63.75 โดยน้ำหนัก

4.7 วิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) ด้วยเครื่อง CHNS analyzer ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบแบบแยกธาตุของของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าก่อนและหลังไพโรไลซิสโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเปรียบเทียบกับใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า	C	H	O*
ก่อนการไพโรไลซิส	75.82	12.30	11.88
ไพโรไลซิสโดยไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	80.43	12.43	7.14
ไพโรไลซิสโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	84.93	12.57	2.51

* by difference

ตารางที่ 4.10 แสดงองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และ ออกซิเจน (O) พบว่าน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าที่ใช้เป็นสารตั้งต้นก่อนการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม มีองค์ประกอบของออกซิเจนเท่ากับร้อยละ 11.88 ซึ่งมีความจำเป็นต้องปรับปรุงให้น้อยลง เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่สูงจะส่งผลให้ค่าความร้อนต่ำ และหลังจากผ่านการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่ภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนักอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30 ต่อ 70 พบว่า เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนลดลงเหลือร้อยละ 2.51 และมีค่าต่ำกว่าเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสในภาวะอุณหภูมิและเวลาเดียวกัน แบบไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาผสมที่มีองค์ประกอบของแมกนีเซียมออกไซด์ ส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมัน เกิดการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลิกในรูปแบบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จึงส่งผลให้ปริมาณของออกซิเจนลดลง

4.8 การวิเคราะห์ค่าความร้อน

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนด้วยเครื่อง bomb calorimeter ของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา่ก่อนและหลังการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา่	ค่าความร้อน (MJ/kg)
ก่อนการไพโรไลซิส	38.48
หลังการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	42.50

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา่ก่อนและหลังการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา่ก่อนการไพโรไลซิสมีค่าเท่ากับ 38.48 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) เมื่อผ่านการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ที่ภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30 ต่อ 70 พบว่า ค่าความร้อนผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวเพิ่มขึ้นเป็น 42.50 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (MJ/kg) ค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมันในน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา่ เกิดการกำจัดหมู่คาร์บอกซิลออกไปในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ส่งผลให้ออกซิเจนถูกกำจัดออกจากโมเลกุลของน้ำมัน จึงทำให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีค่าความร้อนสูงขึ้น

4.9 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4.12 ค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

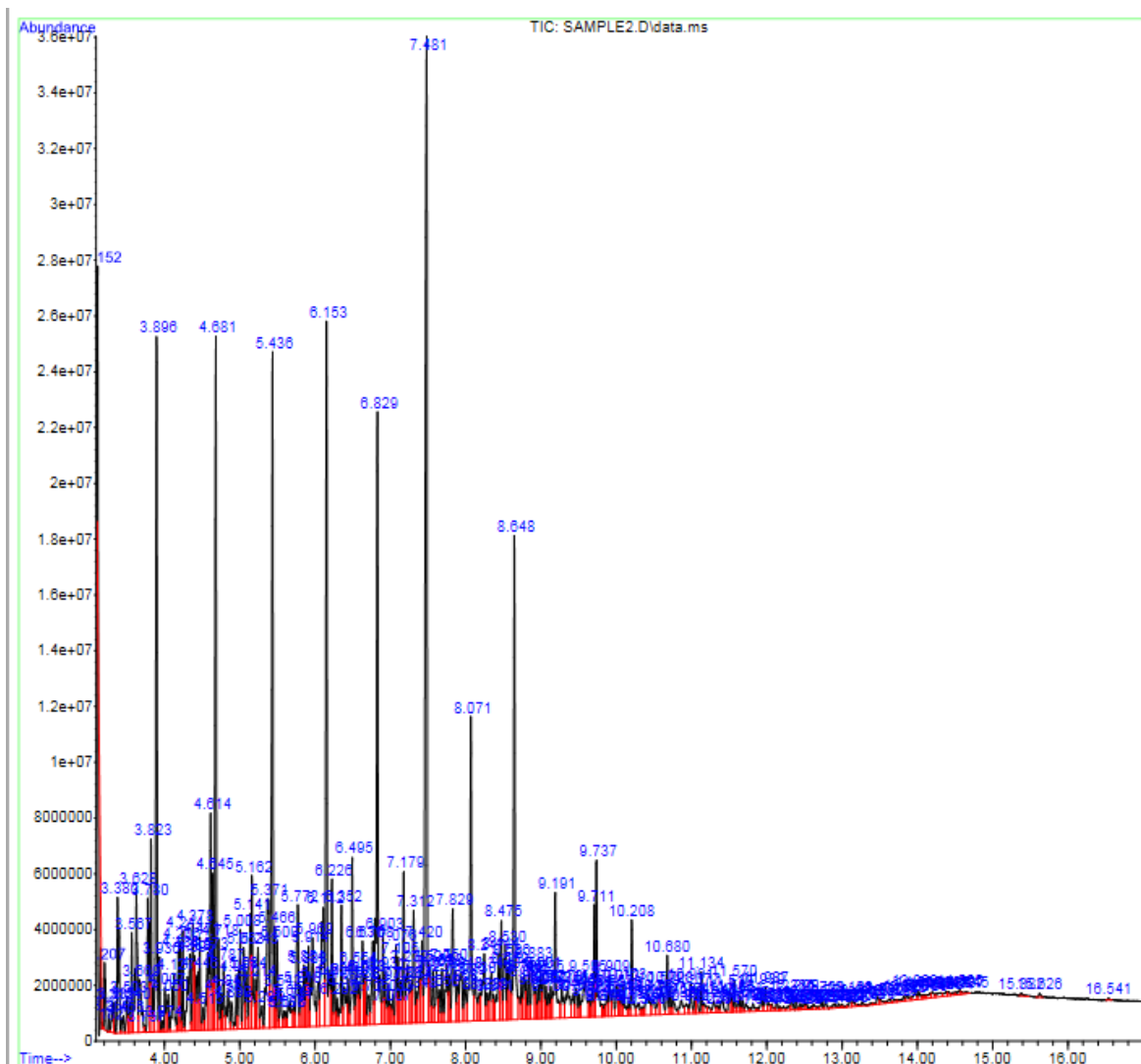
น้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา่	ค่าความเป็นกรด (mg KOH/g)
ก่อนการไพโรไลซิส	41.24
ไพโรไลซิสโดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาผสม	Non - detectable

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าความเป็นกรดของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา่ และผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลา่โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม ที่ภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วน

ระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 30 ต่อ 70 พบว่า ค่าความเป็นกรดของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าเท่ากับ 41.24 มิลลิกรัม โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และไม่พบค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการไพโรไลซิสโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่ใช้มีความเป็นเบสสูงจึงทำให้ค่า ความเป็นกรดลดลง เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน โดยแมกนีเซียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับ กรดคาร์บอกซิลิก เกิดเป็นแมกนีเซียมคาร์บอเนต และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ค่าความ เป็นกรดลดลง และแมกนีเซียมคาร์บอเนตจะเกิดการสลายตัวไปเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ และเกิด แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [27]

4.10 วิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์



รูปที่ 4.13 โครมาโทแกรมองค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่อผ่านการไพโรไลซิสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10-17 อะตอม เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งเสริมการเกิดการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวและดีคาร์บอกซิเลชันของกรดไขมันซึ่งเป็นองค์ประกอบในน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า ได้แก่ กรดไขมันปาล์มติก (palmitic acid : C_{16}) และกรดไขมันโอเลอิก (oleic acid : C_{18}) เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง เมื่อได้รับความร้อนและมีตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง แสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	พื้นที่พีค (ร้อยละ)
3.897	Decane	3.89
4.613	1-Undecene	1.33
4.682	Undecane	3.53
5.436	Dodecane	3.79
6.152	Tridecane	4.06
6.828	Tetradecane	3.85
7.483	Pentadecane	7.88
8.072	Hexadecane	1.94
8.649	Heptadecane	2.93
9.737	2-Heptadecanone	0.97

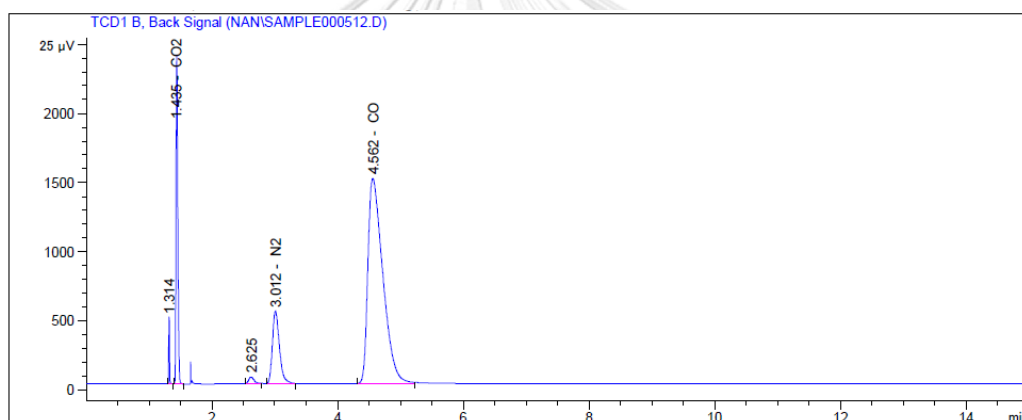
ตารางที่ 4.13 แสดงองค์ประกอบหลักของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ พบว่าประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 10 - 17 อะตอมเป็นหลัก ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลกรดไขมันในน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ทำให้โมเลกุลของไขมันปาล์มติก (palmitic acid) และกรดไขมันโอเลอิก (oleic acid) ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดกลางให้เป็นไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลเคนที่มีขนาดเล็กลง นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบอื่นๆที่ไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลเคนเกิดขึ้นด้วยแต่มีปริมาณน้อย สังเกตได้จากโครมาโทแกรมที่มีพีคความเข้มต่ำจำนวนมากในรูปที่ 4.13

4.11 วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบ ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี

การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบ
ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี(GC) โดยใช้ตัวตรวจวัด
thermal conductivity detector : TCD และ Flame Ionization Detector : FID

4.11.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สในผลิตภัณฑ์แก๊ส ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี
(GC) โดยใช้ตัวตรวจวัด thermal conductivity detector: TCD

ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่ง
ปฏิกิริยาผสม แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 โครมาโทแกรมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบ
ปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัด thermal
conductivity detector : TCD

จากรูปที่ 4.14 โครมาโทแกรมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมัน
จากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม โดยใช้ภาวะที่ดีที่สุด องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์
แก๊สประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของ
ความร้อนและการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า ทำให้โมเลกุลของ
ไฮโดรคาร์บอนที่อยู่รูปของไตรกลีเซอไรด์แตกตัวมีขนาดเล็กลง เมื่อหมู่เอสเทอร์แตกตัวเป็น
กรดไขมันอิสระ และเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน จึงพบองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

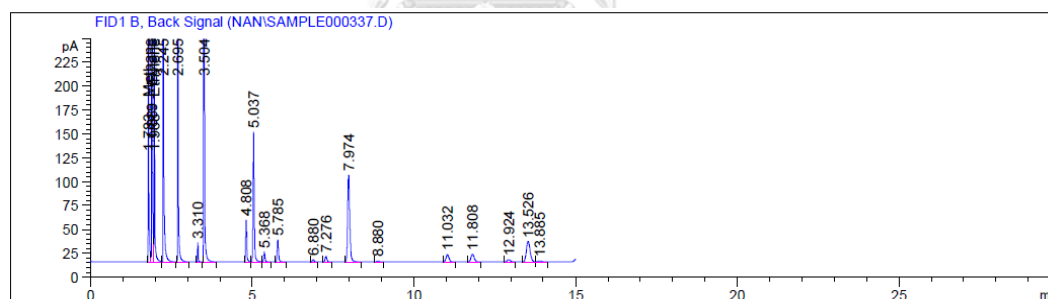
ส่วนองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่พบ เกิดจากการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน แสดงในตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	สูตรโมเลกุล	ปริมาณ ร้อยละ
1.435	Carbon dioxide	CO ₂	24.24
3.012	Nitrogen	N ₂	10.64
4.562	Carbon monoxide	CO	65.12

4.11.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สในผลิตภัณฑ์แก๊ส ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (GC) โดยใช้ตัวตรวจวัด Flame Ionization Detector: FID

ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สจากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 โครมาโทแกรมองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ตัวตรวจวัด Flame Ionization Detector : FID

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.15 พบว่าองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมโดยใช้ภาวะที่ดีที่สุด ประกอบไปด้วยแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก ได้แก่ มีเทน อีเทน และเอทิลีน ซึ่งเกิดจากการแตกตัวทางความร้อน และการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า แสดงในตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.15 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่า
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

เวลา (นาที)	องค์ประกอบ	สูตรโมเลกุล	ปริมาณ ร้อยละ
1.783	Methane	CH ₄	36.77
1.889	Ethane	C ₂ H ₆	40.10
1.968	Ethylene	C ₂ H ₄	23.13



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C_5-C_{15}) โดยไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ เพื่อภาวะที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบามากที่สุด โดยมีสมบัติใกล้เคียงกับเชื้อเพลิงเหลวที่สามารถนำไปปรับปรุงพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับอากาศยาน และเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาสามารถนำไปผ่านกระบวนการให้เป็นโอเลฟินที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพลาสติกได้ โดยการออกแบบการทดลองเชิงตัวประกอบแบบสองระดับ (2K factorial design) โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 420-450 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทดลอง 30-60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาผสมร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 70 ต่อ 30 และ 30 ต่อ 70 ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้นำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น จากการนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert พบว่า ภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 449.99 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนอัตราส่วนระหว่างแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผสมกับถ่านกัมมันต์ และ 10% นิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ HY คือ 32.51 ต่อ 67.49 จะได้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 69.50 และร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา 64.17 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นร้อยละ 44.60 โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลว ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้ตรวจไม่พบค่าความเป็นกรด และมีค่าความร้อนเท่ากับ 42.50 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำภาวะที่เหมาะสมไปทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องหรือเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อไปประยุกต์ใช้ในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม
2. ศึกษาการนำเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ไปกลั่นเพื่อแยกผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา ออกมาเพื่อไปทดสอบประสิทธิภาพการเป็นเชื้อเพลิงสำหรับอากาศยาน

3. ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดอื่นๆ ที่ให้ผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียม
4. ศึกษาการวิเคราะห์คุณภาพของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ ในคุณสมบัติด้านอื่นๆเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถนำไปปรับปรุงพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพต่อไป



บรรณานุกรม

1. คูชลธารา, ป. และ ศ. สรรพอค์, การแปลงสภาพทางเคมีความร้อน. พลังงานจากชีวมวลและวัสดุเหลือใช้. คิวพรีนแมเนจเม้นท์., 2558: p. 36-75.
2. ปิโตรเลียมและการผลิต [Online]. Available from: <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/236/oil/8.htm/>. [10 กุมภาพันธ์ 2563].
3. ปิโตรเลียม [Online]. Available from: <https://dmf.go.th/public/list/data/index/menu/652/mainmenu/652/>. [10 กุมภาพันธ์ 2563].
4. ชนิดของปิโตรเลียม [Online]. Available from: <https://www2.pttep.com/energyliteracy/PTTEP/issue.aspx?id=21>. [11 กุมภาพันธ์ 2563].
5. Sadeghbeigi, R., *FCC Feed Characterization in Fluid Catalytic Cracking Handbook (Third Edition)* [Online]. available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128126639000047>, 2012. [12 กุมภาพันธ์ 2563].
6. พลังงานชีวมวล [Online]. Available from: <http://www.energyvision.co.th/14424507/>. [17 กุมภาพันธ์ 2563].
7. Mancini, A., et al., *Biological and Nutritional Properties of Palm Oil and Palmitic Acid: Effects on Health*. *Molecules*, 2015. 20
8. การแปรรูปปาล์มน้ำมัน [Online]. Available from: <http://www.arda.or.th/kasetinfo/south/palm/used/01-02.php>. [17 กุมภาพันธ์ 2563].
9. ผลิตภัณฑ์จากการกลั่นปิโตรเลียม [Online]. Available from: <https://sites.google.com/site/resourcemanagemen00/phlitphanth-ca-kark-lan-pitorleiyam>. [17 กุมภาพันธ์ 2563].
10. จารุศิริ, ว., พลังงานจากชีวมวลเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้ (*Energy from Biomass Technology and Utilization*). กรุงเทพฯ: บริษัท โอ. เอส. พรีนติ้ง เฮ้าส์ จำกัด, 2561: p. 101-107.

11. Lam, S., et al., *Progress in waste oil to sustainable energy, with emphasis on pyrolysis techniques*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. 53: p. 741–753.
12. Ooia, X.Y., et al., *Overview on catalytic deoxygenation for biofuel synthesis using metal oxide supported catalysts*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. 112: p. 834–852.
13. Guran, S., *Sustainable Food Waste-To-energy Systems Chapter 8 - Sustainable Waste-to-Energy Technologies: Gasification and Pyrolysis*. Academic Press, 2018: p. 141-158.
14. Ruan, R., et al., *Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels (Second Edition) Chapter 1-Biofuels: Introduction*. Biomass, Biofuels, Biochemicals, 2019: p. 3-43.
15. H, H. and Scobert, *The chemistry of Hydrocarbon fuel*. New York, 1991.
16. JH, G. and H. GH, *Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing*. New York: Marcel Dekker, 1994.
17. Silva, L.N., et al., *Biokerosene and green diesel from macauba oils via catalytic deoxygenation over Pd/C*. Fuel, 2016. 164: p. 329-338.
18. Mohammad, M. and e. al, *Overview on the production of paraffin based-biofuels via catalytic hydrodeoxygenation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. 22: p. 121-132.
19. J.E., Santillan, and C.M., *Catalytic deoxygenation of fatty acids and their derivatives to hydrocarbon fuels via decarboxylation/decarbonylation*. J. Chem.Technol.Biotechnol, 2012. 87: p. 1041–1050.
20. Hermida, et al., *Deoxygenation of fatty acid to produce diesel-like hydrocarbons: A review of process conditions, reaction kinetics and mechanism*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 42: p. 1223=1233.
21. Chu, P.L., and e. al, *Process modeling of hydrodeoxygenation to produce renewable jet fuel and other hydrocarbon fuels*. Fuel, 2017. 196: p. 298-305.

22. Gosselink, R.W., et al., *Reaction pathways for the deoxygenation of vegetable oils and related model compounds*. ChemSusChem, 2013: p. 1-30.
23. เรืองพรวิสุทธิ, ว., เคมีพื้นผิวและปฏิกิริยาเร่ง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
24. วิทยาคุณ, จ. และ น. กฤษดานุรักษ์, การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐานและการประยุกต์ (*Catalysis : fundamentals and applications*). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
25. Khromova, S.A., et al., *Magnesium Containing Catalysts for the Decarboxylation of Bio Oil*. Catalysis in Industry, 2014. 5: p. 260-268.
26. Tani, H., et al., *selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon*. . Catalysis Today, 2011: p. 410-414.
27. มณีวรรณ, ส., และคณะ., *Activated carbon from tamarind shell for air filter of color coating Industry*. 2551.
28. KomvokisLynne, V., et al., *Zeolites in Fluid Catalytic Cracking (FCC)*.
29. Heuchel, M., et al., *Co-catalytic cracking of n-decane and 2-ethylphenol over a variety of deactivated zeolites for the conversion of fossil- and bio-based feeds in Co-FCC*. Microporous and Mesoporous Materials, 2017. 254: p. 59-68.
30. Wakoc, F.M., et al., *Catalytic cracking of waste cooking oil for biofuel production using zirconium oxide catalyst*. Industrial Crops & Products, 2018. 118: p. 282-289.
31. Shahrizzaman, R.M.H.R., R.Y. A. Salmiaton, and Y.H. Taufiq-Yap, *Modified local carbonate mineral as deoxygenated catalyst for biofuel production via catalytic pyrolysis of waste cooking oil*. American Institute of Physics, 2018: p. 020006-1-020006-6.
32. จิงโซติกะพิศิฐ, ช., การสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558.
33. Chen, Y.R., *Microwave pyrolysis of oily sludge with activated carbon*. Environmental Technology, 2016. 37:24: p. 3139-3145.

34. พรหมบุตร, ภ., และคณะ., การแตกตัวของน้ำมันพืชที่ไม่ใช่บริโภคด้วยความร้อนร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และฟลูอิดคະตะไลติกแครกกิงที่ใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.
35. Jungjaroenpanit, C. and T. Vitidsant, *Catalytic pyrolysis of used cooking oil by magnesium oxide supported on activated carbon in continuous reactor*. International Journal of chemical, Enviromental & Biological Science, 2013.
36. Natewong, P., et al., *Effect of support material on MgO-based catalyst for production of new hydrocarbon bio-diesel*. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Science, 2016: p. 153-165.
37. อยุธยา, ญ.ป.ณ., ไพโรไลซิสของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวบนแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมปิโตรเคมี และวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2556.
38. Cheng, J., et al, *Optimizing catalysis conditions to decrease aromatic hydrocarbons and increase alkanes for improving jet biofuel quality*. Bioresour Technol, 2014. 158: p. 378-382.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้		
	A (°C)	B (min)	C (%) w/w	D	ผลิตภัณฑ์ แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว
1	420	30	1	70:30	32.00	9.50	58.50
2					35.00	4.50	60.50
3	450	30	1	70:30	29.50	8.00	62.50
4					31.50	7.00	61.50
5	420	60	1	70:30	29.00	5.50	65.50
6					27.00	6.00	67.00
7	450	60	1	70:30	42.50	3.50	54.00
8					39.00	6.50	54.50
9	420	30	5	70:30	38.50	7.50	54.00
10					37.50	7.50	55.00
11	450	30	5	70:30	29.00	8.50	62.50
12					30.50	9.00	60.50
13	420	60	5	70:30	27.50	9.00	63.50
14					27.00	10.50	62.50
15	450	60	5	70:30	39.50	8.00	52.50
16					41.00	7.00	52.00
17	420	30	1	30:70	25.50	9.50	65.00
18					26.50	8.50	65.00

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซีน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้		
	A (°C)	B (min)	C (%) w/w	D	ผลิตภัณฑ์ แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ ของแข็ง	ผลิตภัณฑ์ ของเหลว
19	450	30	1	30:70	23.50	7.00	69.50
20					25.50	6.00	68.50
21	420	60	1	30:70	29.50	5.00	65.50
22					27.50	6.00	66.50
23	450	60	1	30:70	41.00	7.00	52.00
24					40.50	7.00	52.50
25	420	30	5	30:70	29.50	11.00	59.50
26					31.50	8.00	60.50
27	450	30	5	30:70	26.50	6.00	67.50
28					26.40	7.50	66.00
29	420	60	5	30:70	29.50	5.00	65.50
30					27.50	6.00	66.50
31	450	60	5	30:70	42.50	6.00	51.50
32					42.00	5.50	52.50
33	435	45	3	50:50	36.00	6.00	58.00
34	435	45	3	50:50	32.00	6.50	61.50
35	435	45	3	50:50	40.00	5.00	55.00
36	435	45	3	50:50	37.50	4.00	58.50
37	435	45	3	50:50	38.50	8.00	53.50

ตารางที่ ก.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซิสน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปล่าโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DGC

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละขององค์ประกอบ (โดยน้ำหนัก)			
	A (°C)	B (min)	C (%) w/w	D	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
1	420	30	1	70:30	37.30	18.30	34.70	9.70
2					37.40	18.10	34.00	10.50
3	450	30	1	70:30	51.10	18.30	25.90	4.70
4					52.30	16.00	27.40	4.30
5	420	60	1	70:30	45.90	20.80	29.90	3.40
6					40.30	25.50	30.30	3.90
7	450	60	1	70:30	40.10	25.40	30.40	4.10
8					42.00	23.60	31.40	3.00
9	420	30	5	70:30	52.50	18.10	25.30	4.10
10					48.70	21.30	25.40	4.60
11	450	30	5	70:30	53.60	19.10	25.30	2.00
12					50.10	20.40	26.80	2.70
13	420	60	5	70:30	40.00	16.50	33.80	9.70
14					38.30	16.80	34.20	10.70
15	450	60	5	70:30	37.80	22.10	34.10	6.00
16					38.10	22.50	36.40	3.00
17	420	30	1	30:70	50.10	19.30	26.50	4.10
18					49.80	18.30	27.70	4.20
19	450	30	1	30:70	44.10	19.10	33.50	3.30
20					47.50	16.80	29.40	6.30

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากการไพโรไลซีน้ำมันจากทะเลสาบปาล์มเปลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสม จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DGC

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละขององค์ประกอบ (โดยน้ำหนัก)			
	A (°C)	B (min)	C (%) w/w	D	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล	กากน้ำมัน
21	420	60	1	30:70	44.00	19.40	31.10	5.50
22	420	60	1	30:70	41.70	20.90	29.30	8.10
23	450	60	1	30:70	50.90	18.80	27.80	2.50
24	450	60	1	30:70	52.00	17.10	26.50	4.40
25	420	30	5	30:70	45.50	15.70	33.30	5.50
26	420	30	5	30:70	42.70	16.80	37.30	3.20
27	450	30	5	30:70	46.70	19.50	28.50	4.30
28	450	30	5	30:70	46.10	17.10	27.20	7.60
29	420	60	5	30:70	45.90	18.20	30.30	5.60
30	420	60	5	30:70	46.90	16.80	30.80	5.50
31	450	60	5	30:70	48.10	22.90	26.30	2.70
32	450	60	5	30:70	56.40	17.10	24.40	2.10
33	435	45	3	50:50	39.50	21.40	33.90	5.20
34	435	45	3	50:50	43.30	16.90	33.00	6.80
35	435	45	3	50:50	37.90	24.00	34.70	3.40
36	435	45	3	50:50	39.40	21.40	34.10	5.10
37	435	45	3	50:50	40.80	19.90	34.40	4.90

ภาคผนวก ข.

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

1.1 การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลว}}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}} \times 100$$

1.2 การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของแข็ง}}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}} \times 100$$

1.3 การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\begin{aligned} & \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส} \\ & = 100 - \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว} - \text{ร้อยละผลได้ของ} \\ & \text{ผลิตภัณฑ์ของแข็ง} \end{aligned}$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา (C₅-C₁₅) ในผลิตภัณฑ์ของเหลว

ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบาในผลิตภัณฑ์ของเหลว

$$= \frac{\text{ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสัดส่วนเบา} \times \text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว}}{100}$$

ภาคผนวก ค.

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล และการใช้โปรแกรม Design-Expert

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design) หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลอง นั้น การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดจากอันตรกิริยาของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ เนื่องจากการออกแบบการทดลองที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการทดลองทีละปัจจัย และทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ รวมทั้งทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้ ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ และในการทดลองนี้ใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ มีประโยชน์มากต่องานทดลองที่มีปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้สามารถลดจำนวนการทดลองลงเพื่อสามารถศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ ผลตอบสนองที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานสามารถยอมรับได้สำหรับการทดลองที่ใช้ศึกษาปัจจัยของระบบ

ตัวอย่าง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ ที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบ เชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ "ต่ำ" และ "สูง" การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบสามารถแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย + และ - บนแกน A และ B ตามลำดับ การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย สำหรับการออกแบบจะแทนด้วยตัวอักษรเล็ก จะเห็นได้ว่าสำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆจะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้นสำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้นสำหรับการออกแบบ 2^k ในที่นี้ a จะ แทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูงและ B ที่

ระดับต่ำ b แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ab แทนทั้ง ปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และแทน ทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

สูตรการคำนวณ

1. Contrast = (ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment) x [สัมประสิทธิ์ (-1 หรือ+1) ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร]

$$2. \text{Effect Estimate}_{AB...K} = \frac{2(\text{Contrast})_{AB...K}}{n2^k}$$

$$3. \text{Sum of Squares}_{AB...K} (SS_{AB...K}) = 2(\text{Contrast}_{AB...K})^2$$

$$4. \text{Total of sum of squares} (SS_T) = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots / N$$

เมื่อ N = จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด

$$5. \text{Sum of Squares Error} (SS_E) = SS_T - SS_{\text{main effect}}$$

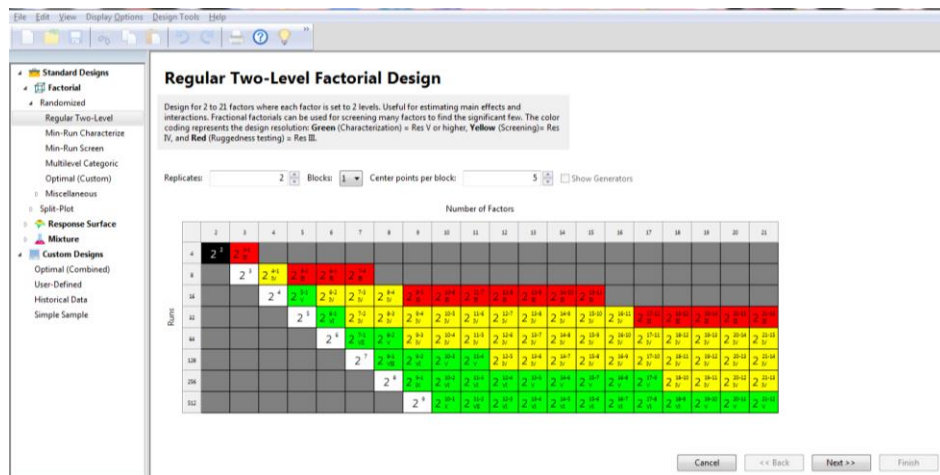
$$6. \text{Mean of Square} (MS) = SS / \text{Degree of freedom}$$

$$7. \% \text{ Normal Probability} = \frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{total Cumulative frequency}}$$

$$8. F_o = MS_{\text{effect}} / MS_{\text{error}}$$

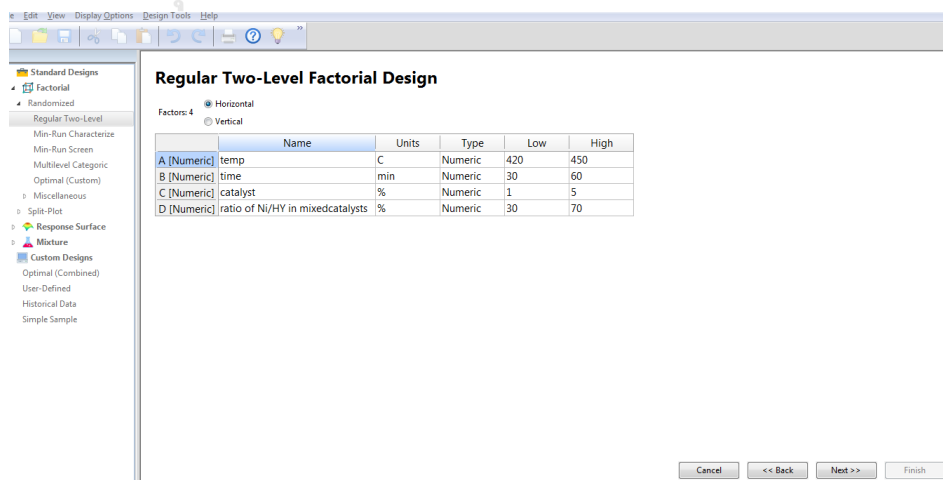
การใช้โปรแกรม Design-Expert

1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file >>> New Design แสดงหน้าจอตั้งในรูปที่ ค.1 จากนั้นเลือกแบบจำลองตามตัวแปรที่ต้องการศึกษา ในงานวิจัยนี้ต้องการศึกษาตัวแปร 4 ตัวแปร ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลอง แบบ 2^4



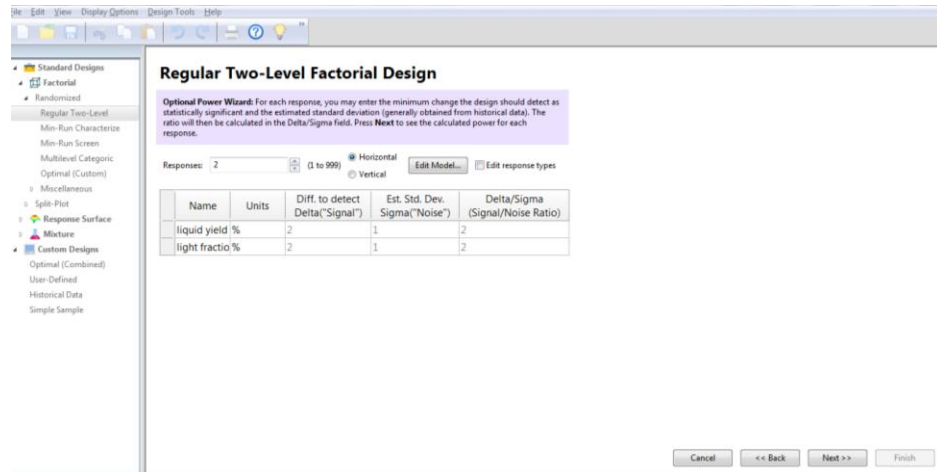
รูปที่ ค.1 ตารางในการเลือกแบบจำลองของ two-level factorial Design

2. เมื่อเลือกแบบจำลองตามที่ต้องการแล้ว โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างต่าง ในรูปที่ ค.2 เพื่อให้ทำการใส่ข้อมูลของตัวแปรที่จะทำการศึกษา จากนั้นกด Next



รูปที่ ค.2 ตารางข้อมูลของตัวแปร

3. เมื่อกด next แล้ว โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง ในรูปที่ ค.3 เพื่อให้ใส่ข้อมูลของผลตอบสนองที่ต้องการ



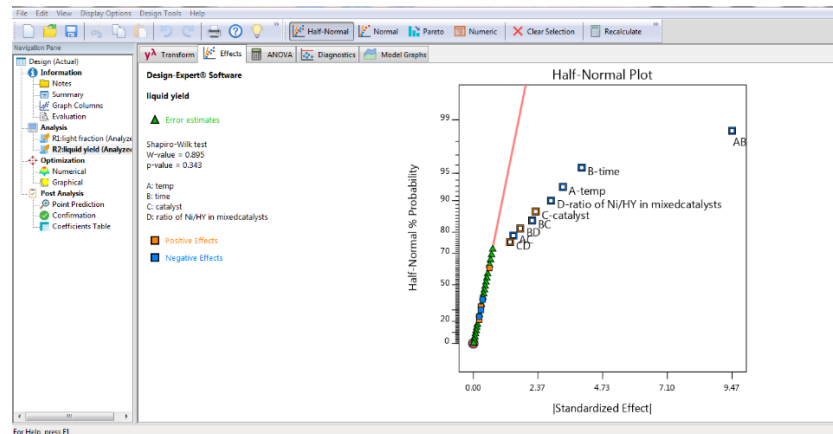
รูปที่ ค.3 ตารางค่าตัวแปรตอบสนอง

4. เมื่อกดปุ่ม Next โปรแกรมจะแสดงตาราง ในรูปที่ ค.4 เมื่อทำการทดลองเรียบร้อยแล้ว นำข้อมูลมาใส่ในตารางให้ครบถ้วน

Std	Run	Factor 1 Atemp C	Factor 2 Btime min	Factor 3 Ccatal. %	Factor 4 Drati. %	Response 1 light fracti. %	Response 2 liquid yie. %
28	1	450	30	5	70	69.2	65.5
31	2	450	60	5	70	71	51.5
4	3	450	30	1	30	68.3	68.5
14	4	420	60	5	30	62.6	66.5
8	5	450	60	1	30	65.6	54.5
10	6	420	30	5	30	68.1	65
26	7	420	30	5	70	59.5	61.5
13	8	420	60	5	30	63.4	65.5
7	9	450	60	1	30	65.5	54
37	10	435	45	3	50	60.7	53.5
21	11	420	60	1	70	56.5	65
29	12	420	60	5	70	64.1	65
19	13	450	30	1	70	72.7	62.5
24	14	450	60	1	70	60.6	51
6	15	420	60	1	30	65.8	67
9	16	420	30	5	30	69.4	65
12	17	450	30	5	30	64.3	68.5
25	18	420	30	5	70	61.2	59.5
15	19	450	60	5	30	69.7	51
20	20	450	30	1	70	70.5	60
11	21	450	30	5	30	63.2	67.5
18	22	420	30	1	70	70	55
23	23	450	60	1	70	59.9	52.5
22	24	420	60	1	70	53.1	62

รูปที่ ค.4 ตารางบันทึกค่าการทดลองในภาวะต่างๆ

5. เมื่อได้ข้อมูลครบถ้วนแล้ว จะเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยเลือกตัวแปรตอบสนองที่ต้องการ ที่แถบคำสั่งซ้ายมือ แล้วเลือกคำสั่ง Effect โปรแกรมจะแสดงผลในรูปที่ ค.5 ทำการเลือกจุดที่มีแนวโน้มออกจากเส้นตรง



รูปที่ ค.5 half normal plot ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง

6. ทำการเลือก คำสั่ง ANOVA โปรแกรมจะแสดงตารางในรูปที่ ค.6 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ทำการอ่านค่า และวิเคราะห์ผล

ANOVA for selected factorial model

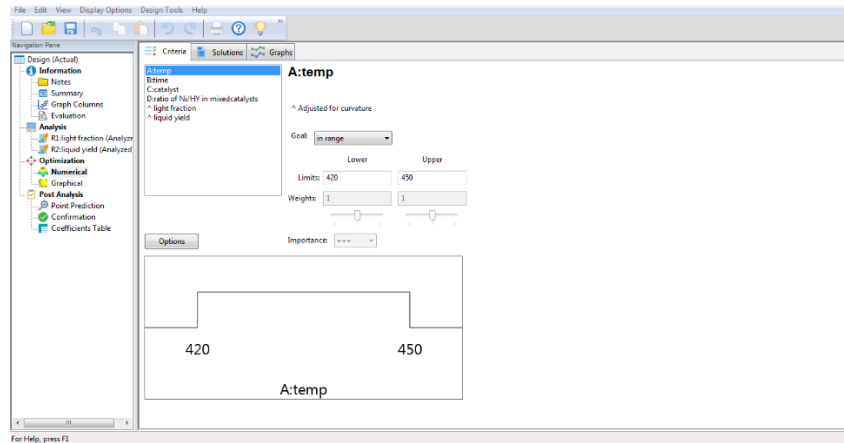
Response 2: liquid yield

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	1128.26	9	125.36	44.97	< 0.0001 significant
A-temp	86.13	1	86.13	30.90	< 0.0001
B-time	126.01	1	126.01	45.21	< 0.0001
C-catalyst	41.63	1	41.63	14.94	0.0007
D-ratio of Ni/HY in mixedcatalysts	64.70	1	64.70	23.21	< 0.0001
AB	717.26	1	717.26	257.32	< 0.0001
AC	17.26	1	17.26	6.19	0.0196
BC	37.20	1	37.20	13.34	0.0011
BD	23.63	1	23.63	8.48	0.0073
CD	14.45	1	14.45	5.18	0.0313
Curvature	52.88	1	52.88	18.97	0.0002
Residual	72.47	26	2.79		
Lack of Fit	5.80	6	0.9661	0.2898	0.9348 not significant
Pure Error	66.68	20	3.33		
Cor Total	1253.61	36			

Factor coding is Coded.
Sum of squares is Type III - Partial

รูปที่ ค.6 ตารางแสดงค่าการวิเคราะห์ด้วย ANOVA

7. เมื่อทำการวิเคราะห์ ตัวแปรตอบสนองเรียบร้อยแล้ว ทำการวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสม โดยเลือกคำสั่ง Numerical ทางด้านซ้ายมือ โปรแกรมจะแสดงหน้าต่าง ในรูปที่ ค.7 ให้ทำการกำหนดค่าของตัวแปรตอบสนองที่ต้องการ เช่น เลือกให้มีค่าสูงสุด (maximize) จากนั้นกด solution



รูปที่ ค.7 การกำหนดตัวแปรตอบสนองที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสม

8. เมื่อกด solution โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างของภาวะที่ได้จากการคำนวณ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ในรูปที่ ค.8

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
A:temp	is in range	420	450	1	1	3
B:time	is in range	30	60	1	1	3
C:catalyst	is in range	1	5	1	1	3
D:ratio of Ni/HY in mixedcatalysts	is in range	30	70	1	1	3
light fraction	none	55.1	73.5	1	1	3
liquid yield	maximize	51.5	69.5	1	1	3

Number	temp	time	catalyst	ratio of Ni/HY in mixedcatalysts	light fraction	liquid yield	Desirability	
1	449.828	30.038	1.034		69.961	63.922	69.541	1.000 Selected
2	450.000	30.000	1.000		70.000	63.837	69.625	1.000
3	449.992	30.129	1.001		69.166	63.973	69.508	1.000
4	449.711	30.067	1.024		69.763	63.959	69.502	1.000
5	449.972	30.015	1.085		69.283	64.048	69.501	1.000
6	449.947	30.006	1.053		69.769	63.947	69.554	1.000
7	449.989	30.046	1.027		68.707	64.051	69.510	1.000
8	449.996	30.002	1.001		67.487	64.170	69.500	1.000
9	449.676	30.030	1.020		69.521	63.983	69.508	1.000

รูปที่ ค.8 ตารางคำนวณภาวะที่เหมาะสม

ภาคผนวก ง.

การหาค่าประกอบของผลิตภัณฑ์เหลว

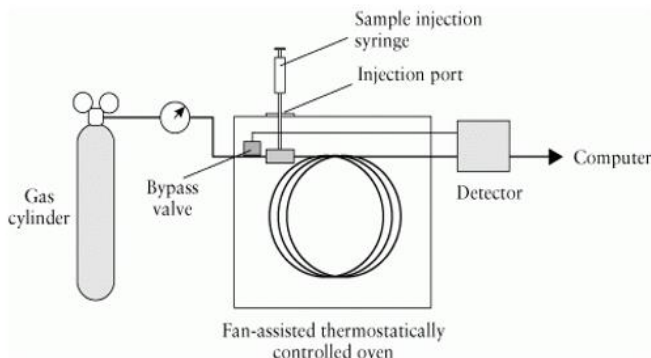
แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

แก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคของการแยกทางโครมาโทกราฟี ซึ่งนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในวงการอุตสาหกรรม การศึกษา การวิจัย เนื่องจากมีความสามารถแยกและวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีองค์ประกอบที่มีความซับซ้อนได้ มีความเฉพาะเจาะจงและความไวสูงและยังให้ผลเที่ยงตรงและรวดเร็ว การวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของแข็ง เรียกว่า "gas-solid chromatography" (GSC) และ การใช้เฟสอยู่กับที่เป็นของเหลว เรียกว่า "gas-liquid chromatography" (GLC) โดยเทคนิคของ GLC เป็นที่นิยมมากกว่า GSC

สารตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยกลายเป็นไอได้ ดังนั้นวิธีการของ แก๊สโครมาโทกราฟี จึงไม่ใช่เทคนิคสำหรับการวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ เพราะสารประกอบอินทรีย์สามารถกลายเป็นไอได้ในที่ทำการทดลองเมื่อสารตัวอย่างถูกทำให้กลายเป็นไอที่ inlet แล้วจะถูกพาเข้าไปยังคอลัมน์ด้วยแก๊สตัวพาซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อย ใช้หลักการแยก "likes dissolve likes" วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ การวิเคราะห์เชิงคุณภาพสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างได้จากการเทียบค่ารีเทนชันไทม์ (retention time) ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี แสดงในรูปที่ ง.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chulalongkorn University



รูปที่ ง.1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

1. แก๊สที่ใช้งานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ มี 3 ชนิด คือ
 - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สพา (Carrier Gases) เพื่อ จะใช้พาไอของแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์
 - 1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)
 - 1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID
2. gas traps และ filters เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ ซึ่งมีลักษณะเป็น cartridge คือ
 - 2.1 molecular sieve trap ใช้ดูดความชื้น
 - 2.2 oxygen trap เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน
 - 2.3 hydrocarbon fitter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมัน สำหรับแก๊สตัวพาควรจะต้องผ่าน filter อากาศควรจะต้องผ่าน charcoal filter
3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (flow regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สตัวพา
4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (injection pot) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ
5. คอลัมน์ (column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง (inner diameter) 3-6 มม. นอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดเล็ก (capillary column) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มม. แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้
 - 5.1 Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลวเคลือบเป็นฟิล์ม บางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร
 - 5.2 Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับหรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายใน ความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร
 - 5.3 Micro packed Column คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร
6. Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ ทำให้แตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมีขั้วไฟฟ้า (electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิด

กระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น การพิจารณาว่า ควรเลือกใช้ดีเทคเตอร์ชนิดใดนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารและความไวของดีเทคเตอร์ ดีเทคเตอร์แต่ละชนิดเหมาะสำหรับวิเคราะห์สารแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ซึ่งนิยมใช้กัน 2 ชนิดคือ TCD และ FID

วิธีแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถใช้ในการการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด (boiling distribution) เพื่อบอกองค์ประกอบของน้ำมันได้ดังนี้

การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง simulated distillation gas chromatography โดยจะวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของแต่ละองค์ประกอบ แสดงในตารางที่

ค.

1

ตารางที่ ง.1 คาบจุดเดือดของแต่ละองค์ประกอบ

จุดเดือด (°C)	องค์ประกอบ
IBP - 200	Naphtha (C ₅ -C ₁₂)
200 - 250	Kerosene (C ₁₂ -C ₁₅)
250 - 370	Diesel (C ₁₅ -C ₃₃)
370 - FBP	Long residue (>C ₃₃)

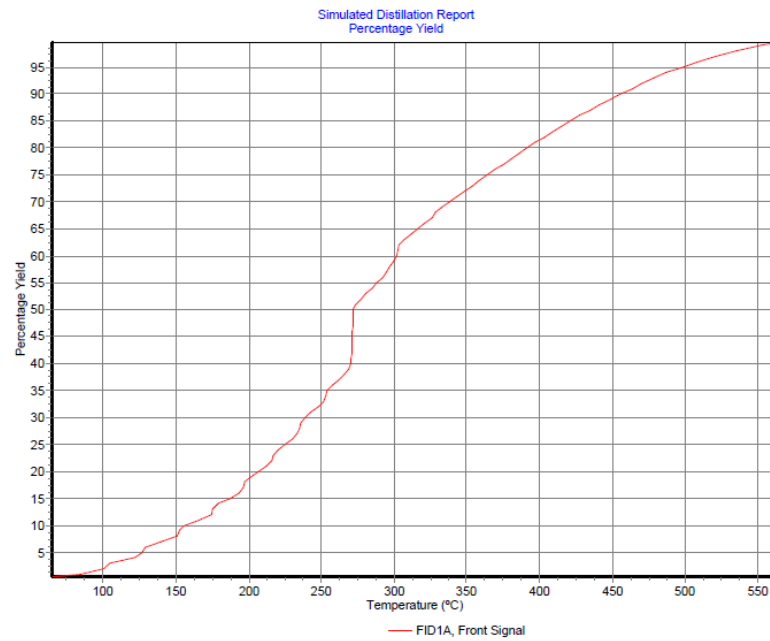
หมายเหตุ : IBP คือ Initial Bolling Point (จุดเดือดเริ่มต้น)

: FBP คือ Final Bolling Point (จุดเดือดสุดท้าย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เริ่มต้นการวิเคราะห์โดยการเตรียมสารตัวอย่าง คือ นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่จะวิเคราะห์ไปละลายในตัวทำละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น ยี่ห้อ Agilent รุ่น 7890A เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2887 โดยใช้ดีเทคเตอร์ชนิด FID วิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ simulated distillation คอลัมน์ที่ใช้เป็นชนิด pack column ที่มีความยาว 5 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตรและมีความหนาของฟิล์ม 0.15 ไมครอน โดยภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ อุณหภูมิคอลัมน์ (column temperature or oven temperature) 30-320 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิหัวฉีด 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (detector temperature)

320 องศาเซลเซียส และมี carrier gas เป็นแก๊สฮีเลียมมีอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที โดยแผนภูมิจำลองการกลั่น แสดงในรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.2 แผนภูมิจำลองการกลั่นที่ได้จากเครื่อง *simulated distillation gas chromatography*

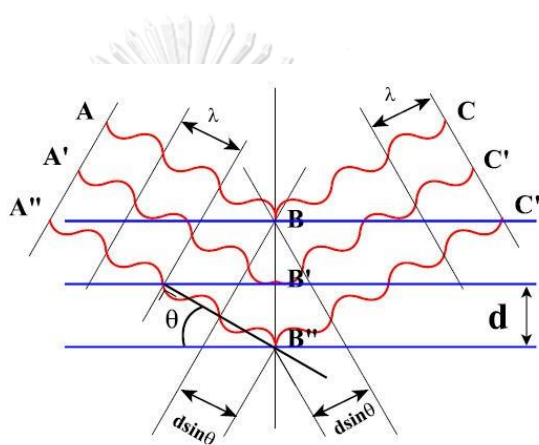


ภาคผนวก จ.

การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction: XRD)

เอกซเรย์ดิฟแฟกโตมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสาร โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ไปกระทบที่สารตัวอย่าง ทำให้เกิดการเลี้ยวเบน และสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆกัน แสดงในรูปที่ จ.1



รูปที่ จ.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก

โดยมีหัววัดสัญญาณ (detector) เป็นตัวรับข้อมูล องค์ประกอบและโครงสร้างของสารจะมีองค์ประกอบในการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ในมุมที่แตกต่างกันออกไปขึ้นกับองค์ประกอบ รูปร่าง และลักษณะผลึก ผลที่ได้จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆได้ นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาและวิเคราะห์ปริมาณความเป็นผลึก ขนาดของผลึก ความสมบูรณ์ของผลึก และความเค้นของสารประกอบในสารตัวอย่าง และเมื่อวิเคราะห์กับอุปกรณ์เสริม เช่น อุปกรณ์ให้ความเย็น-ร้อน จะสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกในขณะทดสอบเปลี่ยนแปลงไป ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีขนาดของหน่วยเซลล์ (unit cell) ที่ไม่เท่ากันทำให้รูปแบบ (XRD pattern) ของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งจะช่วยให้ทราบว่าในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบโดยอยู่

เครื่องตรวจสอบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยกฎของแบรกก์ (Bragg's law) คือ

$$2d\sin\theta = n\lambda$$

โดยที่ λ แทน ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ (อังสตรอม)

n แทน ลำดับการสะท้อน

d แทน ระยะห่างระหว่างระนาบ (อังสตรอม)

ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ยังผ่านชั้นผลึกที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้หัววัดสัญญาณรับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆของการทดสอบ

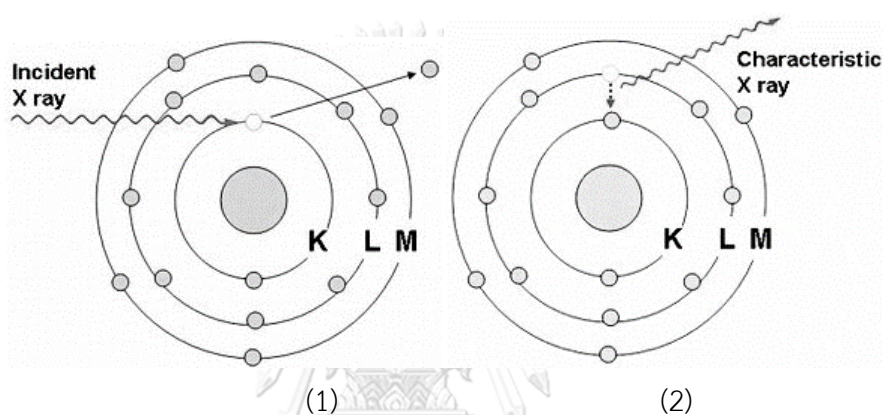
2. การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray Fluorescence Spectroscopy: XRF)

เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ชนิดของธาตุและปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เปลี่ยนระดับชั้นที่มีพลังงานสูงไปยังชั้นที่มีพลังงานต่ำกว่า และคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X ray) ของแต่ละธาตุ อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม แบ่งเป็นชั้น (shells) โดยชั้นในสุด ได้แก่ ชั้น K มีระดับพลังงาน (energy level) ต่ำสุด ถัดออกมา ได้แก่ ชั้น L, M, N, ... ซึ่งจะมีระดับพลังงานสูงขึ้นตามลำดับ นอกจากอิเล็กตรอนในชั้น K ที่มีระดับพลังงานเดียวแล้ว อิเล็กตรอนในชั้นอื่น ยังแบ่งเป็นชั้นย่อย ได้แก่ LI, LII, LIII และ MI, MII, MIII, MIV, MV ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิด จะมีความแตกต่างของพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน อิเล็กตรอนในแต่ละชั้นของวงโคจร มีพลังงานยึดเหนี่ยว (binding energy) ที่ได้รับจากนิวเคลียสแตกต่างกัน อิเล็กตรอนวงในที่อยู่ใกล้นิวเคลียส จะได้รับพลังงานยึดเหนี่ยวมากกว่าอิเล็กตรอนวงนอก และธาตุที่มีเลขอะตอม (Z) สูงขึ้น จะมีพลังงานยึดเหนี่ยวต่ออิเล็กตรอนมากขึ้น การวิเคราะห์โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ โดยทั่วไป จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม โดยใช้รังสีเอ็กซ์พลังงานสูงจากหลอดรังสีเอ็กซ์ (X-ray tube) หรือไอโซโทปรังสี (radioisotope) ที่ให้รังสีเอ็กซ์

หลอดรังสีเอ็กซ์ประกอบด้วยไส้หลอด (filament) ที่เป็นแคโทด (cathode) หรือขั้วลบ และแอโนด (anode) หรือขั้วบวกที่มีความต่างศักย์สูง (high voltage) ทำด้วยโลหะที่มีเลขอะตอมสูงและทนความร้อนได้ดี เช่น W, Mo หรือ Rh เมื่อป้อนไฟฟ้าเข้าไป จะทำให้เกิดความร้อนที่แคโทดและมี

อิเล็กตรอนหลุดออกมา ความต่างศักย์จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าชนแอโนดที่เป็นเป้า (target) และปล่อยรังสีเอกซ์แบบต่อเนื่อง

เมื่อยังรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา อิเล็กตรอนหรือโปรตอนไปยังอะตอมของธาตุ จะชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม ทำให้ตำแหน่งนั้นว่าง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่ เช่น จากชั้น L ไปชั้น K จากชั้น M ไปชั้น K หรือจากชั้น M ไปชั้น L โดยคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะ (characteristic X-ray) ของแต่ละธาตุ



รูปที่ จ.2 (1) รังสีเอกซ์พลังงานสูงทำให้อิเล็กตรอนในชั้น K หลุดออกไปจากวงโคจร

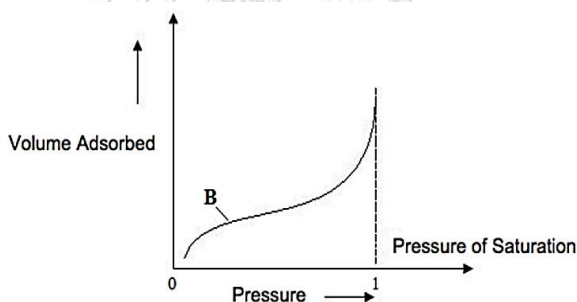
(2) อิเล็กตรอนในชั้น M ที่มีพลังงานสูงกว่าลงมาแทนที่ โดยคายรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานจำเพาะออกมา

การหาชนิดของธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอกซ์จำเพาะ ขณะที่การหาปริมาณธาตุ สามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่คายออกมา รังสีเอกซ์ที่ให้ออกมาจากแต่ละธาตุในตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์พลังงานของรังสี เพื่อหาชนิดของธาตุ และวิเคราะห์ความเข้มของรังสีเพื่อหาปริมาณธาตุได้โดยใช้ห้วงวัดรังสีเอกซ์แบบก๊าซ (gas ionization chamber) ชนิด proportional counter ห้วงวัดรังสีแบบเปล่งแสง (scintillation counter) หรือห้วงวัดรังสีแบบสารกึ่งตัวนำ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ห้วงวัดชนิดซิลิกอน(ลิเทียม): Si(Li) หรือเจอร์มาเนียมบริสุทธิ์สูง : HPGe

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์โดยทั่วไป ประกอบด้วยห้วงวัดรังสี (detector) ส่วนสร้างสัญญาณ (preamplifier) ส่วนขยายสัญญาณ (amplifier) ส่วนวิเคราะห์สัญญาณ (multichannel analyzer) หรือ MCA ประกอบกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมประมวลผลและแสดงผลการวิเคราะห์

3. การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน ด้วยเทคนิคบีอีที (BET)

การวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน เป็นขั้นตอนหนึ่งของการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากพื้นผิวจะเป็นบริเวณที่ใช้ว่างองค์ประกอบกัมมันต์ที่จะใช้ในการเกิดปฏิกิริยา การวัดพื้นที่ผิวภายในของวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จาก ไอโซเทิร์มของการดูดซับทางกายภาพหรือวิธีบีอีที (BET ย่อมาจาก Brunauer-Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ การดูดซับของแก๊สไนโตรเจน แสดงในภาพที่ จ.3 จะเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดันจนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง (ตำแหน่ง B) ซึ่งเส้นกราฟจะราบ แสดงถึงปรากฏการณ์ที่การดูดซับบนพื้นผิวเป็นแบบชั้นเดียว และเมื่อความดันย่อยของไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจนเกินจุดที่เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนเหลวในรูพรุนทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



ภาพที่ จ.3 กราฟการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิคบีอีที (BET)

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้วเกิดเป็นการดูดซับชั้นเดียว คือ สมการของ BET แสดงตามสมการที่ จ.1

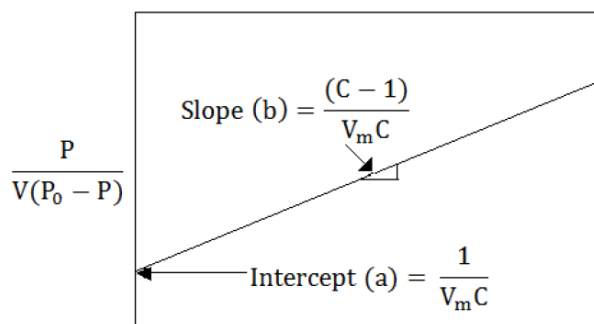
$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \quad \text{สมการที่ จ.1}$$

เมื่อ P คือ ความดันย่อยของแก๊สที่ถูกดูดซับ

P_0 คือ ความดันไออิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ C อุณหภูมิที่ศึกษา

V คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

V_m คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดเป็นการปกคลุมชั้นเดียว และ C คือ ค่าคงที่สมการที่ จ.1 นี้ เขียนในรูปของกราฟเส้นตรง $y = a + bx$ เมื่อ x เป็น P/P_0 , Y เป็น $P / V(P_0 - P)$, a คือจุดตัดแกน y เป็น $1/V_m C$ และ b คือความชัน เป็น $(C-1)/V_m$ แสดงในภาพที่ จ.3



ภาพที่ จ.3 กราฟเส้นตรงของสมการบีอีที

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	สุดาพร สุนทร
วัน เดือน ปี เกิด	26 กรกฎาคม 2538
สถานที่เกิด	อุบลราชธานี
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (Bachelor of Science, major Industrial Chemistry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang)
ที่อยู่ปัจจุบัน	222/162 หมู่ที่ 11 ตำบลบางพลีใหญ่ อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540
ผลงานตีพิมพ์	ได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการ The 26th PPC Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 11th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2020) เมื่อวันที่ 23 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 โดยนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์และได้รับการตีพิมพ์งานวิจัยลงในบทความวิจัยของงานประชุมวิชาการในครั้งนี้ด้วย