

การเปลี่ยนปาล์มโอเลอินเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานบนนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์  
ชนิดปีตาและเอชวาย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

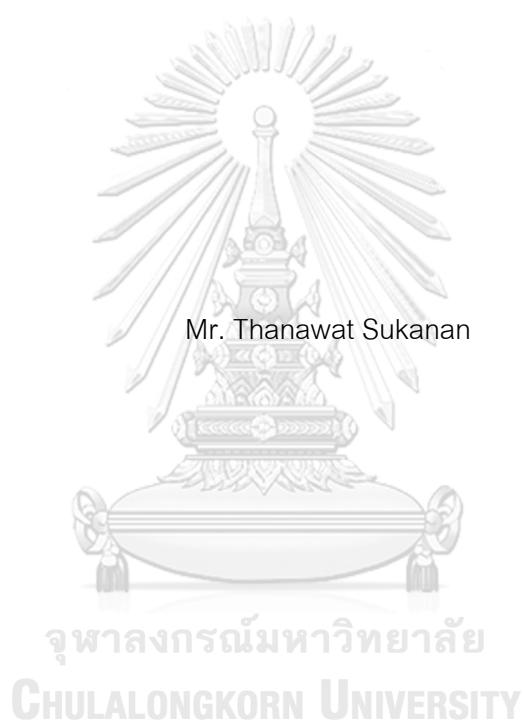
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONVERSION OF PALM OLEIN TO BIOJET FUEL OVER NICKEL SUPPORTED ON  
BETA AND HY ZEOLITES



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	การเปลี่ยนปาล์มโอเลอินเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับ อากาศยานบนนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิดปีตาและ เอชวาย
โดย	นายธนวัฒน์ สุขอนันต์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ
.....	
(ศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	กรรมการ
.....	
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิญาชีระนันท์)	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
.....	
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป สามารถ)	

ธนวัฒน์ สุขอนันต์ : การเปลี่ยนปาล์มโอเลอินเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน  
 บนนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิดบีตาและเอชวาย. ( CONVERSION OF PALM  
 OLEIN TO BIOJET FUEL OVER NICKEL SUPPORTED ON BETA AND HY  
 ZEOLITES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่มีเสถียรภาพใน  
 การทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เพิ่มปริมาณโซ่กิ่ง โซ่ตรง และลดปริมาณอะโรมาติก จากปาล์ม  
 โอเลอินบนนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิดบีตาและเอชวาย ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย  
 อุณหภูมิ 430 - 460 องศาเซลเซียส ปริมาณนิกเกิล ร้อยละ 0 - 15 โดยน้ำหนัก ความดัน  
 บรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 0 - 10 บาร์ และน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 0 - 5 โดยน้ำหนัก  
 ที่เวลาในการทดลอง 5 ชั่วโมง ภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาแคแรกกิ่ง คือออกซิเจนชั้น  
 และไอโซเมอไรเซชันต่อการเกิดน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน คือ อุณหภูมิ 430  
 องศาเซลเซียส ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ โดยใช้นิกเกิล ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนซี  
 โอไลต์ชนิดเอชวาย ปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยให้  
 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 63 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 30 และร้อยละผลได้ของของแข็ง 7  
 โดยน้ำหนัก ซึ่งองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีร้อยละผลได้ของน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับ  
 อากาศยานร้อยละ 56 แก๊สไฮลีนร้อยละ 28 ดีเซลร้อยละ 13 และกากน้ำมันร้อยละ 3 โดยการ  
 เลือกสรรของผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นดังนี้ ไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงร้อยละ 58 อะโรมาติกร้อยละ 23  
 และโซ่กิ่งร้อยละ 19 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต
		.....
ปี	2562	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
การศึกษา		.....

# # 6072058023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORD: Deoxygenation, Biojet fuel, Palm olein oil, Zeolite

Thanawat Sukanan : CONVERSION OF PALM OLEIN TO BIOJET FUEL OVER NICKEL SUPPORTED ON BETA AND HY ZEOLITES. Advisor: Assoc. Prof. PRASERT REUBROYCHAROEN, Ph.D.

The aim of this study is to produce quality jet biofuel with high amount of normal paraffins, branch chain, low aromatic hydrocarbons and low oxygen content from palm olein using Beta and HY zeolites supporting Ni as catalyst in a micro reactor. The experiments were done by varied operating conditions as reactor temperature 360-460 °C, mass of nickel 0-15% by weight, initial hydrogen pressure 0-10 bar and mass of catalyst 0-5% by weight with reaction time 5 hours. From the results, it was found that the reaction temperature, amount of nickel, initial hydrogen pressure and weight of catalyst were significantly affected to the oil yield and product selectivity. The analyst oil product from simulated distillation gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometer was found that the reaction temperature is 430 °C and initial hydrogen pressure 10 bar by using 5%Ni/Beta Zeolite as catalyst for 5 hours. This was optimum condition of thermal cracking, deoxygenation and isomerization that gave the highest yield and quality of bio jet. The oil yield was 63% by weight, 56% bio jet, 28% gasoline, 13% diesel and 3% long residues and the selectivity of oil product was 58% alkane, 23%aromatic and 19% branch chain respectively.

Field of Study: Chemical Technology

Student's Signature

.....

Academic Year: 2019

Advisor's Signature

Year:

.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือและการสนับสนุนในการวิจัยค้นคว้าและการใช้เครื่องมือจากอาจารย์ เจ้าหน้าที่ นักวิทยาศาสตร์ รวมถึงบุคคล หน่วยงานและแหล่งเงินทุนการศึกษาและทุนวิจัยมาโดยตลอด

อันดับแรกข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัยขึ้นนี้ พร้อมทั้งคอยให้คำปรึกษา คอย สนับสนุนและคอยช่วยแก้ไขปัญหาลดการทำการวิจัย ซึ่งเป็นกำลังหลักที่ทำให้งานวิจัยนี้มีความ ราบรื่นไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตตานต์ ประธานสอบวิทยานิพนธ์ และ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านคือ รองศาสตราจารย์ ดร. นพิตา หิณชี่ระนันท์ และผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร. ชนาธิป สามารถ ที่ให้ความกรุณาและสละเวลาในการมาเป็นกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ เชื้อเพลิงและพลังงานจากชีวมวล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความ อนุเคราะห์ใน การใช้อุปกรณ์และเครื่องมือ รวมถึงนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ คอยให้ความช่วยเหลือและคอยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) ที่ได้ให้การ สนับสนุนด้านทุนการศึกษา รวมถึงค่าใช้จ่ายในงานวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านรวมถึงเพื่อน รุ่นพี่และรุ่นน้องทุกคนทั้งในภาควิชาเคมี เทคนิคและในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ที่คอยให้ความช่วยเหลือ คอยชี้แนะ ให้ ความรู้และให้คำแนะนำ และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจและ ให้การสนับสนุนอย่างเต็มที่สำหรับการเรียนในครั้งนี้จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ได้สำเร็จลุล่วง

ธนวัฒน์ สุขอนันต์

## สารบัญ

	หน้า
.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ค
..... ง	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ .....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
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 น้ำมันปิโตรเลียม หรือน้ำมันดิบ (crude oil).....	5
2.2 การกลั่นน้ำมัน.....	8
2.3 น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน.....	9
2.3.1 องค์ประกอบของน้ำมันเครื่องบินไอพ่น.....	13
2.3.1.1 Net heat combustion .....	13
2.3.1.2 ค่าความหนืด (kinetic viscosity).....	14

2.3.1.3 Volatility และ low Temperature Properties.....	14
2.3.1.4 ปริมาณแอมโรมาติก.....	14
2.3.1.5 สารปนเปื้อนที่อาจจะก่อให้เกิดการกัดกร่อน .....	15
2.3.1.6 สารปนเปื้อนที่อาจจะก่อให้เกิดการอุดตัน .....	15
2.3.1.7 สารตัวเติม.....	15
2.3.1.8 Thermal Stability .....	15
2.4 น้ำมันปาล์ม .....	16
2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มไปสู่น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน .....	17
2.5.1 กระบวนการดีออกซิจีเนชัน (deoxygenation) .....	17
2.5.1.1 ปฏิกิริยาhydrogenation .....	19
2.5.1.2 กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน และ ดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarboxylation and decarbonylation).....	21
2.5.1.2.1. Decarboxylation (DCO <sub>2</sub> ).....	21
2.5.1.2.2 Decarbonylation (DCO).....	22
2.5.1.3 กระบวนการไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (hydrodeoxygenation).....	23
2.5.2 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking).....	25
2.5.3 กระบวนการการแตกตัวเชิงปฏิกิริยา (catalytic cracking).....	26
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	30
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	32
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง .....	33
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	33
3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	33



3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากปาล์ม โอเลอินผ่านการดื่อกซิจีเนชัน แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน.....	34
3.3 ขั้นตอนการทดลอง .....	35
3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตา และเอชวายด้วยวิธี Wetness Impregnation .....	35
3.3.2 ทดสอบปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน.....	36
3.3.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์ผล.....	39
3.3.3.1 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน ที่ได้จากปฏิกิริยาดีออกซิจี เนชัน แครกกิง และไอโซเมอไรเซชัน.....	39
3.3.3.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง .....	46
4.1 การวิเคราะห์สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง .....	46
4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา .....	47
4.2.1 การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก (X-ray diffraction).....	47
4.2.2 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen adsorption-desorption) .....	48
4.2.3 วิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี (NH <sub>3</sub> -TPD).....	49
4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา .....	50
4.4 ผลของชนิดของตัวรองรับซีโอไลต์.....	54
4.5 ผลของปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับเอชวายซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	57
4.6 ผลของความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น .....	61
4.7 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง .....	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ .....	67
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	67

5.2 ข้อเสนอแนะ .....	67
บรรณานุกรม .....	68
ภาคผนวก ก การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	72
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด (Boiling Distillation) .....	73
ภาคผนวก ค ตัวอย่างกราฟแสดงค่าต่างๆ .....	74
ประวัติผู้เขียน.....	77



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 น้ำมันส่วนต่างๆที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ .....	9
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติต่างๆของน้ำมันเครื่องบินไอพ่น .....	10
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันปาล์ม .....	16
ตารางที่ 3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง .....	32
ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ทดลองปฏิกิริยา ดิออกซิเจนชั้น แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน.....	38
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มโอเลอินตามคาบจุดเดือด.....	46
ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกนิกเกิลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดปีตาและเอชวาย.....	48
ตารางที่ 4.3 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซนต์นิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดปีตา และเอชวาย.....	48
ตารางที่ 4.4 ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซนต์นิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดปีตา และเอชวาย .....	49
ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอน .....	56
ตารางที่ 4.6 จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ปริมาณนิกเกิลต่างๆบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวาย.....	60

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างไฮโดรคาร์บอนพาราฟิน .....	5
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างไฮโดรคาร์บอนไซโคลอัลเคน .....	6
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างไฮโดรคาร์บอนแอโรมาติก .....	7
รูปที่ 2.4 ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันปาล์มจากทั่วโลกในปี 2019 .....	17
รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันที่เป็นไปได้ของไตรกลีเซอไรด์ .....	18
รูปที่ 2.6 กลไกการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์ด้วยวิธี (a) $\beta$ -elimination และ (b) แบบ $\gamma$ -hydrogen transfer .....	19
รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยา hydrogenation ของน้ำมันพืช (TGs) .....	20
รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ( $\text{DCO}_2$ ) และดีคาร์บอนิลเลชัน (DCO) ของ tristearin .....	23
รูปที่ 2.9 โอกาสในการเกิดปฏิกิริยา Hydrodeoxygenation ของน้ำมันพืช .....	24
รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยา hydroisomerization ของ n-alkane บน bifunctional catalyst .....	25
รูปที่ 2.11 รูปแบบการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์ .....	28
รูปที่ 2.12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแคตาไลติกแครกกิงในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืชโดยใช้ Zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา .....	29
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง .....	36
รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน .....	37
รูปที่ 3.3 เตาปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 85 มิลลิลิตร .....	37
รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น .....	39
รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ .....	40
รูปที่ 3.6 เครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ differential scanning calorimeter (DSC) .....	41

รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์วิเคราะห์โครงสร้างผลึกและวัฏภาค .....	42
รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค .....	43
รูปที่ 3.9 วิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค.....	45
รูปที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) 5 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนักของนิกเกิลที่อบบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดปีตา (b) 5 เปอร์เซ็นโดยน้ำหนักของนิกเกิลที่อบบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวาย..	47
รูปที่ 4.2 ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นนิกเกิลที่อบบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดปีตา และ เอชวาย ด้วยเทคนิค Temperature-Programmed Desorption (TPD) .....	49
รูปที่ 4.3 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ 5%Ni/Beta เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	50
รูปที่ 4.4 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ 5%Ni/Beta เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	51
รูปที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	52
รูปที่ 4.6 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	53
รูปที่ 4.7 การเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยมี 5%Ni/Beta และ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	55
รูปที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ซีโอไลต์เอชวายเป็นตัวรองรับ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	57
รูปที่ 4.9 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ซีโอไลต์เอชวายเป็นตัวรองรับ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	58

รูปที่ 4.10 การเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยมีนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิด เอชวายที่ปริมาณนิกเกิลต่างๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	59
รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	61
รูปที่ 4.12 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 5 ชั่วโมง .....	62
รูปที่ 4.13 การเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยมีนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิด เอชวายที่ปริมาณนิกเกิลต่างๆเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	63
รูปที่ 4.14 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	64
รูปที่ 4.15 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วง แก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง .....	65
รูปที่ 4.16 การเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง..	66

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันการคมนาคมและการขนส่งทางอากาศยานมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปริมาณความต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานของทั้งโลกมีมากถึง 800 ล้านลิตร ต่อวัน ซึ่งถือเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่เกิดจากการคมนาคมขนส่งเลยทีเดียว สมาคมขนส่งทางอากาศระหว่างประเทศ (IATA) ประมาณการไว้ว่าความต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานจะมากขึ้นเรื่อยๆถึง 5 เปอร์เซ็นต์ต่อปี ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหามากมาย ทั้งภาวะโลกร้อนอันเนื่องมาจากการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากสู่บรรยากาศ ทั้งปริมาณเชื้อเพลิงอากาศยานที่ได้จากแหล่งปิโตรเลียมมีอยู่อย่างจำกัด และราคาน้ำมันดิบที่แกว่งตัว ทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ก็คือการผลิตเชื้อเพลิงอากาศยานจากปาล์มโอเลอินเพื่อนำมาใช้ทดแทน อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่ได้จากปาล์มโอเลอินมีความเสถียรในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidative stability) และ ค่าความร้อนต่ำ เนื่องจากมีโอเลฟินส์มาก ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพที่ด้อยลงของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานเมื่อมีการเก็บรักษาในระยะเวลาอันยาวนาน และค่าจุดเยือกแข็งที่สูงเนื่องจากมีสายโซ่ตรงมากและมีโซ่กิ่งน้อย เมื่อนำไปผสมและใช้งานจริงกับเชื้อเพลิงอากาศยานจากปิโตรเลียมจะส่งผลเสียต่อค่าการไหลเท ณ อุณหภูมิต่ำ (Cold properties) จึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีในการผลิตและปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงอากาศยานสามารถผลิตได้โดย กระบวนการไฮโดรทรีตเมนต์ (hydrotreatment) จากน้ำมันพืช, กระบวนการสังเคราะห์แบบฟิชเชอร์โทรป (Fischer-Tropsch synthesis) และ การไพโรไลซิสจากสารชีวมวล ทว่ากระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นนี้ต่างมีกระบวนการที่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากปาล์มโอเลอิน ซึ่งประกอบด้วย กรดไขมัน และ ไตรกลีเซอไรด์ ในโครงสร้าง ผ่านการเกิดปฏิกิริยาพร้อมกัน 3 ปฏิกิริยา ประกอบด้วย ดิออกซิจีเนชัน แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน โดยมีนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิดบีตาและเอชวายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในปฏิกิริยาดิออกซิจีเนชันสามารถเกิดได้ 3 แบบ ประกอบไปด้วย ปฏิกิริยาดิไฮเดรชันซึ่งจะกำจัดโมเลกุลของน้ำ ดังแสดงในสมการ (1), ปฏิกิริยาดิคาร์บอกซิเลชัน ซึ่งจะช่วยกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ดังแสดงในสมการ (2) และปฏิกิริยาดิคาร์บอนิลเลชัน ช่วยกำจัด แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ดังแสดงในสมการ (3) [1]



ซึ่งจะช่วยลดปริมาณออกซิเจนในโครงสร้าง ส่วนปฏิกิริยาแครกกิงจะเน้นให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในช่วงเชื้อเพลิงอากาศยาน (C8 – C16) ส่วนทางด้านของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันจะช่วยเพิ่มโซ่กิ่งในโครงสร้าง จากทั้ง 3 ปฏิกิริยาที่กล่าวมาจะช่วยลดปริมาณโอเลฟินส์ และเพิ่มโซ่กิ่งส่งผลให้เชื้อเพลิงอากาศยานที่ผลิตได้มีความเสถียรในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidative stability) และ ค่าความร้อนที่สูงขึ้น จุดเยือกแข็งที่ต่ำลง เพื่อให้ได้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่มีคุณภาพ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากปาล์มโอเลอินผ่านการดักออกซิจีเนชัน แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน
2. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาและภาวะในการทดลองที่มีต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่ได้จากปาล์มโอเลอิน

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากปาล์มโอเลอินบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิดบีตาและเอชวาย รวมถึงศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนของนิกเกิลต่อซีโอไลต์ ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้และคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ผ่านปฏิกิริยา ดักออกซิจีเนชัน แครกกิง และไอโซเมอไรเซชัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่มีคุณภาพจากปาล์มโอเลอิน และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิดเบต้าและเอชวาย

## 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
2. เตรียมวัสดุดิบ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย



- สังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดปีตา และ เอชวาย ด้วยวิธี Wetness Impregnation โดยนำ  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นใส่ซีโอไลต์ชนิดปีตาหรือ เอชวาย ลงไปในสารละลาย แล้วนำสารละลายผสมที่ได้ไปปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ต่อมานำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และทำการรีดิวซ์ในแก๊สไฮโดรเจนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยจะทำการเพิ่มอัตราส่วนของนิกเกิลต่อซีโอไลต์ชนิดปีตา และ เอชวาย ที่ 5, 10, และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
3. ศึกษาลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดปีตา และเอชวายโดยใช้เทคนิควิเคราะห์ต่างๆ ดังนี้
    - พื้นที่ผิวจำเพาะ ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุนด้วยเทคนิค  $\text{N}_2$  adsorption-desorption
    - ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Temperature-Programmed Desorption (TPD)
    - สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
  4. ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์ โดยนำน้ำมันปาล์มโอเลอินผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ โดยใช้อัตราส่วนโดยปาล์มโอเลอิน 15 กรัมต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 กรัม จากนั้นทำการไล่อากาศด้วยการอัดแก๊สไฮโดรเจน และอัดแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ความดัน 5 และ 10 บาร์ และให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดระหว่าง 370 ถึง 460 องศาเซลเซียส กำหนดค่าความเร็วรอบใบกวน 800 รอบต่ออนาที ซึ่งจะใช้เวลาทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง โดยเริ่มนับเวลาที่อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนด เมื่อครบเวลาทำการทดลอง ทำการลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จนถึงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยถุงเก็บแก๊สตัวอย่าง และนำส่วนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ (ของแข็งและของเหลว) มาทำการแยกด้วยการกรอง จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปชั่งหาน้ำหนัก และนำไปวิเคราะห์ต่อไป
  5. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆในการทำปฏิกิริยาพร้อมกัน 3 ปฏิกิริยา ประกอบด้วย ดีออกซิจีเนชัน แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน ได้แก่
    - อุณหภูมิ (370 - 460 องศาเซลเซียส)
    - ชนิดของตัวรองรับซีโอไลต์ได้แก่ ปีตา และ เอชวาย

- ปริมาณของนิกเกิลต่อซีโอไลต์ชนิดเอชวาย 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
  - ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 0, 5 และ 10 บาร์เกจ
  - ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองที่ 0, 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
6. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาพร้อมกัน 3 ปฏิกิริยา ประกอบด้วย ไดออกซิเจนเนชัน แครกกิง และไอโซเมโรเซชัน ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ของเหลว ของแข็ง และแก๊ส
- คำนวณปริมาณร้อยละผลได้ (Yield) และการเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์
  - วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC)
  - วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เหลวด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี แมสสเปกโตรเมทรี (Gas- chromatography- mass spectrometry, GC/MS)
  - วิเคราะห์จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์เหลว ด้วย (Differential Scanning Calorimetry, DSC)
  - วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC)
  - วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

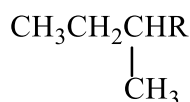
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำมันปิโตรเลียม หรือน้ำมันดิบ (crude oil)

น้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันดิบ สามารถพบได้ทั่วโลก มีสีจากสีเหลืองไปจนถึงสีดำ บางครั้งมีลักษณะขุ่นหนืด โดยเป็นสารผสมที่มีสมบัติเป็นของเหลวติดไฟง่าย มีองค์ประกอบหลักเป็นไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่โมเลกุลขนาดใหญ่ไปจนถึงโมเลกุลขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอินทรีย์อื่นๆรวมอยู่ด้วยบางส่วนเช่น สารอินทรีย์กำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาจมีสารประกอบโลหะบางชนิดเจือปนอยู่ด้วย ทำให้น้ำมันปิโตรเลียมมีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปแล้วแต่แหล่งที่มา ทั้งนี้เพราะสัดส่วนของปริมาณไฮโดรคาร์บอนต่างๆและสารอื่นๆที่เจือปนอยู่รวมกันจากแต่ละพื้นที่ที่ไม่เหมือนกัน โดยถือเป็นเรื่องสำคัญในการกำหนดคุณภาพของน้ำมัน และกรรมวิธีในการผลิตที่เหมาะสมต่อน้ำมันปิโตรเลียมในแต่ละพื้นที่ๆแตกต่างกัน ซึ่งเมื่อนำมากลั่นลำดับส่วนจะให้แก๊สธรรมชาติ แก๊สโซลีน แนฟทา น้ำมันก๊าด น้ำมันเตา น้ำมันหล่อลื่น ไชพาราฟิน (paraffin wax) และอื่นๆ โดยองค์ประกอบสำคัญของน้ำมันปิโตรเลียมสามารถแบ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญได้ 3 ชนิด ดังนี้ [2]

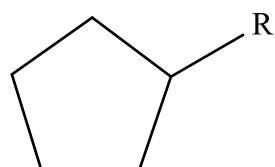
1. อัลเคนหรือพาราฟิน ซึ่งมีทั้งชนิด normal, iso- และ branched alkanes



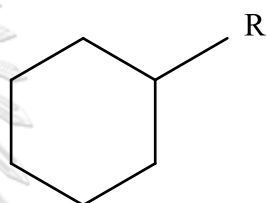
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างไฮโดรคาร์บอนพาราฟิน

2. ไฮโดรคาร์บอนหรือแนฟทีน (naphthene หรือ cycloparaffins) ประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวน 5, 6 เหลี่ยมและวงแหวนแบบเชื่อมต่อกัน

Alkylcyclopentane



Alkylcyclohexane



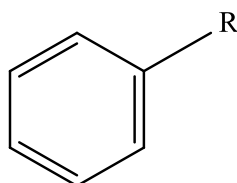
Bicycloparaffin



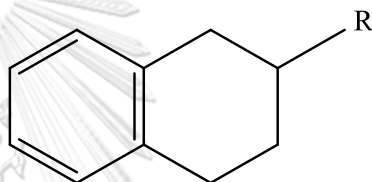
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างไฮโดรคาร์บอนไซโคลอัลเคน

## 3. แอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

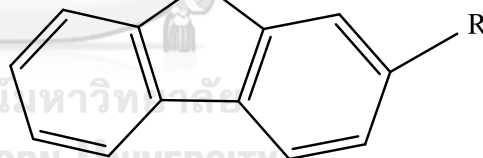
Alkylbenzene



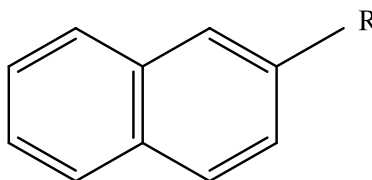
Aromatic cycloparaffin



Fluorene



Binuclear aromatic



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างไฮโดรคาร์บอนแอโรมาติก

นอกจากนี้ยังพบพบสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ประเภทไฮโดรคาร์บอน (non-hydrocarbon compound) ในน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งสารสำคัญที่พบได้แก่สารประกอบอินทรีย์กำมะถัน ไนโตรเจน และออกซิเจน และสารประกอบโลหะบ้างเล็กน้อยโดยเฉพาะสารประกอบวานาเดียม นอกจากนี้แล้วยังมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญอีกประเภทหนึ่งก็คืออัลคีน หรือ โอลิฟิน (Alkene or Olefin) ซึ่งไม่มีอยู่เลยในน้ำมันปิโตรเลียมตั้งแต่แรก แต่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการแตกตัว (Cracking) ที่ใช้กันในโรงกลั่นน้ำมัน

## 2.2 การกลั่นน้ำมัน

น้ำมันดิบที่ขุดขึ้นมาได้จากใต้ดินนั้นก่อนจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี จำเป็นต้องนำมากลั่นเสียก่อน ซึ่งกระบวนการสำคัญอันดับแรกในการกลั่นน้ำมันก็คือ การกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบเพื่อแยกน้ำมันออกเป็นส่วนๆตามช่วงจุดเดือดที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงแต่ละชนิด โดยน้ำมันส่วนต่างๆที่ได้จากการกลั่นน้ำมันได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ซึ่งในส่วนของ atmospheric residue จะออกทางกันหอกกลั่น อาจใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือใส่เข้าไปใน vacuum distillation unit หรือเข้า catalytic cracking หรือ hydro cracking unit residue โดยทั่วไปจะนำไปทำ hydrotreat เพื่อแยกโลหะและกำมะถันออกก่อนทำการแครกกิง (cracking) [2]

ตารางที่ 2.1 น้ำมันส่วนต่างๆที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ

[2]

ไฮโดรคาร์บอนส่วนต่างๆ	จุดเดือด ( $^{\circ}\text{C}$ )	ประโยชน์เชิงเชื้อเพลิง	การกระจายตัวโดยประมาณของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน
แก๊สต่างๆ	< 20	Refinery fuel Liquid petroleum gas (LPG)	$\text{C}_1\text{-C}_4$
แก๊สโซลีนชนิดเบา (light gasoline)	20 - 75	ใช้ผสมในน้ำมันแก๊สโซลีน	$\text{C}_4\text{-C}_7$
แนพธา (naphtha)	75-200		$\text{C}_6\text{-C}_{12}$
น้ำมันก๊าด	160-290	น้ำมันเครื่องบิน น้ำมันตะเกียง น้ำมันรถแทรกเตอร์	$\text{C}_8\text{-C}_{16}$
แก๊สออยล์	250-380	น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา	$\text{C}_{15}\text{-C}_{25}$
กากไฮโดรคาร์บอน (Atmospheric residue)	>380	Heavy fuel oil	C สูงมากๆ

### 2.3 น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน

น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินแบ่งออกตามลักษณะการใช้งานของเครื่องยนต์ได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำมันเบนซินเครื่องบินใบพัด (Aviation Gasoline) ซึ่งเครื่องบินในปัจจุบันไม่ได้ใช้น้ำมันประเภทนี้แล้ว และน้ำมันเครื่องบินไอพ่น (Aviation Turbine Fuels) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยในปัจจุบันเครื่องบินไอพ่นได้รับความนิยมอย่างสูง เพราะมันสามารถบินได้รวดเร็ว มีประสิทธิภาพดี และประหยัดเพราะใช้เชื้อเพลิงราคาถูก และสามารถหาได้ไม่ยากนัก ในช่วงแรกทางด้านอากาศยานนิยมใช้น้ำมันก๊าดทั่วไปเป็นเชื้อเพลิง ต่อมามีการพัฒนาการทางด้านเครื่องยนต์กลไกในการบินมากขึ้น ทำให้เกิดความต้องการทางด้านคุณภาพเป็นพิเศษสำหรับใช้ในการบิน จึงก่อให้เกิดการจัดทำ

ข้อกำหนดคุณภาพและคุณสมบัติต่างๆของเชื้อเพลิงอากาศยานให้เป็นมาตรฐานสำหรับทั่วโลก ซึ่งองค์กรที่จัดทำข้อกำหนดมาตรฐานของคุณภาพเชื้อเพลิงอากาศยานที่เป็นที่ยอมรับได้แก่ องค์กรการบินระหว่างประเทศ (IATA) ,กระทรวงกลาโหมอังกฤษ (DERD), กระทรวงกลาโหมสหรัฐ (US-MIL) และ ASTM

น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินไอพ่นที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 2 กลุ่มใหญ่ๆ กลุ่มแรกจะเป็นน้ำมันก๊าดที่มีคุณสมบัติเหมาะต่ออากาศยาน ซึ่งเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในสายการบินเชิงพาณิชย์ต่างๆ เพราะมีจุดวาบไฟที่สูงทำให้มีความปลอดภัยมาก ซึ่งที่นิยมใช้กันก็จะมี Jet A และ Jet A-1 ซึ่ง น้ำมัน 2 ตัวนี้แตกต่างกันแค่ค่า Freezing point โดย Jet A มี จุดแข็งตัว (Freezing point) ที่  $-40^{\circ}\text{C}$  ส่วน Jet A-1 มีค่า Freezing point ที่  $-47^{\circ}\text{C}$  ในส่วนของอีกกลุ่มหนึ่งจะเป็นน้ำมันประเภท Wide cut gasoline ซึ่งเกิดจากการผสมน้ำมันก๊าดร่วมกับเนฟทาแล้วเติม LPG เพื่อปรับ RVP ซึ่งถือเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบเบาและระเหยได้ง่าย มีกำลังมากก่อให้เกิดความเร็วสูงสำหรับเครื่องบิน ซึ่งมักจะถูกนำไปใช้ในการทหาร ซึ่งน้ำมันที่ใช้กันมี JP-4, JP-5 เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆของน้ำมันเครื่องบินได้แสดงไว้ใน ตารางที่ 2.2 [2]

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติต่างๆของน้ำมันเครื่องบินไอพ่น

(ตาม DERD 2429 ฉบับที่ 9, IATA November 1982, ASTM-D 1655-83a และ US-MIL)

คุณสมบัติ	ขีดจำกัดสำหรับ JetA-1	ขีดจำกัดสำหรับ JP-1	วิธีทดสอบ ASTM-D
1 สภาพน้ำมัน	ใสสะอาด	ใสสะอาด	
2 สี (เซย์โบลต์)	ต่ำสุด +15	ต่ำสุด +22	156
3 องค์ประกอบ :			
ปริมาณแอมโมเนีย (%V)	สูงสุด 22.0	สูงสุด 25.0	1319
ปริมาณไอเรพินส์ (%V)	ต่ำสุด 5.0	ต่ำสุด 5.0	1319
Hydroprocessed fuel in Batch	รายงาน		
4 การเผาไหม้			
Specific Energy, net (MJ/kg)	ต่ำสุด 42.8	-	1405
Aniline Gravity Product	-	ต่ำสุด 5250	1405



Luminometer Number	ต่ำสุด 45	-	1740
จุดควีน (mm)	ต่ำสุด 25	ต่ำสุด 25	1322
หรือจุดควีน (mm)	ต่ำสุด 19	ต่ำสุด 20	1322
และ Naphthalene	สูงสุด 3.0	ต่ำสุด 3.0	1840
5 การระเหยและการไหล การกลั่น ASTM จุดแรก, °C	รายงาน	รายงาน	86
จุด 10% °C	สูงสุด 204	รายงาน	
จุด 20% °C	รายงาน	สูงสุด 143	
จุด 50% °C	รายงาน	สูงสุด 188	
จุด 90% °C	รายงาน	สูงสุด 243	
End Point, °C	สูงสุด 300	สูงสุด 270	
Residue / Loss, %v	สูงสุด 1.5/1.5	สูงสุด 1.5/1.5	
Flash point, °C	ต่ำสุด 38	-	3828
RVP at 37.8 °C, kPa		ต่ำสุด 14/	323
		สูงสุด 21	
Density at 15 °C, kg-L	ต่ำสุด .775/	ต่ำสุด .751/	1298
	สูงสุด .804	สูงสุด .802/	
Freezing Point, °C	สูงสุด -47	สูงสุด -58	2386
Viscosity at -20°C, Centistoke	สูงสุด 8.0	-	445
6 การกัดกร่อน			
Total acidity mgKOH/g	สูงสุด 0.015	สูงสุด 0.015	3242
Total Sulfur Content, % wt	สูงสุด 0.30	สูงสุด 0.30	1266
Doctor Test	Negative	Negative	235
หรือ Mercaptan Sulfur, %wt	สูงสุด 0.003	สูงสุด 0.001	3227
Copper Strip Corrosion (2hr 100°C)	สูงสุด No.1	สูงสุด No.1	130
Silver Strip Corrosion (4hrs 50°C)	สูงสุด No.2	-	IP 227

7.สารปนเปื้อน			
Existent Gum (mg/100ML) (Steam jet)	สูงสุด 7	สูงสุด 7.0	381
Water Reaction:			1094
Interface Rating	สูงสุด 1 b	สูงสุด 1b	
Separation Rating	-	สูงสุด 2	
Microseparometer (MSEP) Rating			
Fuel with Static Dis. Add.	ต่ำสุด 70	ต่ำสุด 85	3948
Fuel without Static Dis. Add	ต่ำสุด 85	-	2276
Particulate, Total (mg/L)	-	สูงสุด 1-0	2276
8 Stability			3241
Thermal Stability (JFTOT)			
Filter Pressure Differential	สูงสุด 25 mmHg	สูงสุด 25 mmHg	
Tube Rating (Visual)	น้อยกว่า 3	น้อยกว่า 3	
9 ตัวเติม			
Anti-Oxidant (mg/L)	17.0 – 24.0	17.00 – 24.0	
Static Dissipator (Stadis 450) (mg/L)	Report	สูงสุด 3.0	
Anti Icing Additive (%V)	-	0.10 – 0.15	FS 5327
Corrosion Inhibitor (mg/L)	Nil	7.5 – 16.0	
Metal Deactivator / Lubricity Improver	Nil	-	
10 อื่นๆ			
Electrical Conductivity (pS/m)	ต่ำสุด 120	200 - 600	2624
Electrical Conductivity at (pS/m)	สูงสุด 450		

### 2.3.1 องค์ประกอบของน้ำมันเครื่องบินไอพ่น

องค์ประกอบของน้ำมันเครื่องบินไอพ่นถือเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมคุณภาพของน้ำมัน เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดี เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยจะต้องจำกัดปริมาณไฮโดรคาร์บอนประเภทโอเลฟินส์และ แอโรมาติกไม่ให้มีมากเกินไปในน้ำมัน โดยใช้มาตรฐาน ASRM D1319 เพราะการเผาไหม้ของไฮโดรคาร์บอนทั้งสองชนิดที่กล่าวมานี้จะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่ไม่สะอาด ยิ่งไปกว่านั้นไฮโดรคาร์บอนแอโรมาติกที่มีปริมาณมากเกินไปยังก่อให้เกิดควันและเขม่าเกาะเครื่องยนต์ทำให้เสื่อมประสิทธิภาพลงได้ โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของน้ำมันเครื่องบินประกอบไปด้วยสารประกอบหลากหลาย เช่น Paraffins 20 เปอร์เซ็นต์, isoparaffin 40 เปอร์เซ็นต์, naphthenes 20 เปอร์เซ็นต์ และ aromatic 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น [3] ซึ่งองค์ประกอบหลักๆที่สำคัญของน้ำมันเครื่องบินคือ paraffin, isoparaffin และ cycloparaffins รวมกันประมาณ (70-85%) โดยการมีโซ่กิ่ง และ วง ในโครงสร้างจะช่วยลด freezing point ของน้ำมันเครื่องบิน ซึ่งจะส่งผลให้ปลอดภัยและส่งผลกระทบต่อการบินในที่สูง [4] อย่างไรก็ตามการมีแอโรมาติกมากอาจทำให้เกิดเขม่าควันขึ้น (smoke) ซึ่งอาจส่งผลให้ combustion chamber และ turbine blades เสียหายได้ [5] มากไปกว่านั้นการที่น้ำมันเครื่องบินมี sulfur, nitrogen, oxygen อยู่ในโครงสร้าง จะส่งผลเสียต่อคุณสมบัติทางด้าน anti-oxidation และ lubricity ของน้ำมันเครื่องบิน

#### 2.3.1.1 Net heat combustion

คุณสมบัติในการเผาไหม้ทางด้าน Net heat combustion หรือ higher heating value (HHV) ถือเป็นหนึ่งในคุณสมบัติที่เฉพาะและสำคัญต่อประสิทธิภาพน้ำมันเครื่องบิน โดยใช้วัดปริมาณพลังงานความร้อนที่ปล่อยมาระหว่างการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ [6] โดยใช้วัดเพื่อกำหนดค่าต่ำสุดเพื่อให้เครื่องบินสามารถบินไปถึงที่หมายได้ มากไปกว่านั้นไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟินจะเกิดการเผาไหม้ดีมาก แต่ไฮโดรคาร์บอนพวกแอโรมาติก และแนฟทาลินจะเกิดการเผาไหม้ไม่ดึ๊ง ซึ่งวิธีการวัดคุณสมบัติการเผาไหม้อีกอย่างจะทำโดยวัดด้วยจุดควันแบบเดียวกับน้ำมันก๊าด หรืออาจวัดจากความสว่างจากการจุดไฟ ด้วยเครื่องมือ Luminometer (ASTM D 1740) โดยค่า Luminometer Number (LN) ของน้ำมันต้องมีค่าไม่ต่ำเกินไป ไม่อย่างนั้นจะส่งผลเสียต่ออายุห้องเผาไหม้ได้

### 2.3.1.2 ค่าความหนืด (kinetic viscosity)

ค่าความหนืด (kinetic viscosity) น้ำมันที่มีค่าความหนืดสูงจะก่อให้เกิดปัญหาทางด้านการทำให้น้ำมันเกิดเป็นตะกอนยาก ทำให้หัวฉีดได้รับความเสียหาย อาจเกิดขึ้นจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของเครื่องยนต์ไม่มีประสิทธิภาพ และมีอนุภาคของแข็งหลงเหลืออยู่ในน้ำมัน ในทางกลับกันถ้าน้ำมันมีค่าความหนืดที่ต่ำเกินไปจะส่งผลเสียต่อความไหลลื่นของปั๊มและหัวฉีด ตาม ASTM D-1655 ได้กำหนดค่าความหนืดที่เหมาะสมแก่น้ำมันเครื่องบินมีค่าไม่เกิน  $8 \text{ mm}^2/\text{s}$  ที่อุณหภูมิ  $-20^\circ\text{C}$  สำหรับน้ำมันเครื่องบิน Jet A และ Jet A-1 [7]

### 2.3.1.3 Volatility และ low Temperature Properties

โดยน้ำมันเครื่องบินที่ดีควรมีความสามารถในการจุดติดไฟได้ง่าย เกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงได้อย่างสม่ำเสมอแม้จะทำการบินในที่สูง ซึ่งในที่สูงจะทำให้อุณหภูมิโดยรอบต่ำ น้ำมันเครื่องบินยังต้องสามารถฉีดออกมาเป็นฝอยได้ดี และสามารถระเหยไปเป็นพลังงานได้ดีด้วย ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานด้านการระเหย ประกอบไปด้วย ค่าจุดวาบไฟ, ค่าการกลั่น, และคุณสมบัติด้านการไหลเทที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งมีบทบาทสำคัญมากโดยเฉพาะ จุดเยือกแข็ง (Freezing point) ของน้ำมันเครื่องบินเป็นจุดที่สามารถทำการบินได้ก่อนที่น้ำมันจะกลายเป็นของแข็ง อีกทั้งยังจะมีผลต่อการทำงานของปั๊ม เครื่องยนต์ และ อัตราการใช้ น้ำมันของเครื่องยนต์อีกด้วย โดยมาตรฐาน ASTM D1655 ได้กำหนดให้ค่าจุดเยือกแข็งของน้ำมันเครื่องบิน Jet A เท่ากับ  $-40^\circ\text{C}$  และน้ำมันเครื่องบิน Jet A-1 เท่ากับ  $-47^\circ\text{C}$  [7] โดยค่าจุดเยือกแข็งจะขึ้นอยู่กับจำนวนคาร์บอนอะตอมและ ปริมาณโซ่ตรง (n-paraffin) [8]

### 2.3.1.4 ปริมาณแอโรมาติก

ปริมาณแอโรมาติกในน้ำมันเครื่องบินถือเป็นอีกหนึ่งในจุดที่สำคัญมากเพราะจะส่งผลต่อการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ volatile number และ mass emission indices (EIs) ของเครื่องยนต์ [58] ซึ่งน้ำมันเครื่องบินโดยทั่วไปแล้วจะมีปริมาณแอโรมาติกอยู่ในช่วง 5 – 25 % [9]

### 2.3.1.5 สารปนเปื้อนที่อาจจะก่อให้เกิดการกัดกร่อน

ในการที่จะรักษาเครื่องยนต์ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีอายุการใช้งานยาวนาน ต้องมีการป้องกันการกัดกร่อนของเครื่องยนต์ โดยได้มีมาตรฐานกำหนดปริมาณสารเจือปนไว้ ดังนี้ ปริมาณเมอร์แคปแทน, ตัวเลขความเป็นกรด (Total Acid Number, ASTM D 3242), ปริมาณกำมะถัน (ASTM D-1266), ความสามารถในการกัดกร่อนแผ่นเงิน (IP 227) และ ความสามารถในการกัดกร่อนทองแดง (Copper Strip Corrosion, ASTM D-130)

### 2.3.1.6 สารปนเปื้อนที่อาจจะก่อให้เกิดการอุดตัน

สารปนเปื้อนที่อาจจะก่อให้เกิดการอุดตันได้แก่ ฝุ่นละอองต่างๆ (Particulate), ยางเหนียว (Gum) และที่ต้องคำนึงถึงมากที่สุดคือ น้ำ โดยเมื่อน้ำเย็นลงจะก่อให้เกิดการแข็งตัวและไปอุดตันได้ ดังนั้นต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติของน้ำมันในการอุ้มน้ำและการคายน้ำออก โดยจะตรวจสอบทั้ง Water Reaction โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 1094 และ Water Separation Index โดยใช้มาตรฐาน ASTM D 2550

### 2.3.1.7 สารตัวเติม

โดยน้ำมันเครื่องบินชนิดไอพ่นต้องใช้สารตัวเติมหลายอย่าง เช่น สาร Anti-oxidant, สารป้องกันการแข็งตัว (Anti Icing Additive) และ สารเพิ่มการนำไฟฟ้าของน้ำมัน (Anti Static Additive) เป็นต้น

### 2.3.1.8 Thermal Stability

ในการบินที่ความสูงมากๆด้วยความเร็วสูงจะทำให้เครื่องยนต์เกิดความร้อนมาก โดยระบบของเครื่องบินจะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นตัวหล่อเย็นสำหรับเครื่องยนต์ระบบไฮโดรลิกส์ ทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงเองจะร้อนขึ้นและอาจเกิดการเสื่อมสภาพกลายเป็นของแข็งเคลือบผิวเครื่องยนต์ได้ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องถ่ายเทความร้อน และหัวฉีดได้ ดังนั้นจึงต้องมีการทดสอบความทนทานต่อความร้อนของน้ำมันเครื่องบินที่ 260<sup>o</sup> C โดยให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D 3241 [2]

## 2.4 น้ำมันปาล์ม

น้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันพืชที่ได้จากต้นปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis*) ซึ่งองค์ประกอบหลักก็จะเหมือนน้ำมันพืชทั่วไป ประกอบไปด้วย ไตรกลีเซอไรด์ และ กรดไขมัน ซึ่งน้ำมันปาล์มเป็นน้ำมันพืชชนิดอิ่มตัวเพราะมีกรดไขมันในโครงสร้างมากถึง 50 mol.% ดังแสดงในตารางที่ 2.3 [10]

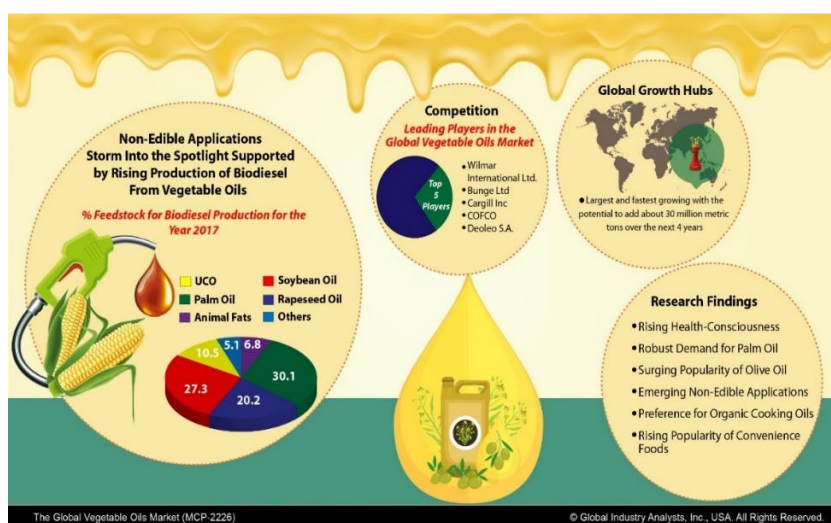
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของกรดไขมันที่มีอยู่ในน้ำมันปาล์ม

[11]

กรดไขมัน อิ่มตัว	จำนวนคาร์บอน อะตอม	สูตรโครงสร้าง	เปอร์เซ็นต์
Lauric acid	$C_{12:0}$	$C_{12}H_{24}O_2$	0.4
Myristic acid	$C_{14:0}$	$C_{14}H_{28}O_2$	0.7
Palmitic acid	$C_{16:0}$	$C_{16}H_{32}O_2$	35.1
Palmitoleic acid	$C_{16:1}$	$C_{16}H_{30}O_2$	0.2
Stearic acid	$C_{18:0}$	$C_{18}H_{36}O_2$	5.3
Oleic acid	$C_{18:1}$	$C_{18}H_{34}O_2$	45.5
Linoleic acid	$C_{18:2}$	$C_{18}H_{32}O_2$	9.7
Linoleic acid	$C_{18:3}$	$C_{18}H_{30}O_2$	0.7
Arachidic acid	$C_{20:0}$	$C_{20}H_{40}O_2$	0.7
Eicosenoic acid	$C_{20:1}$	$C_{20}H_{38}O_2$	-

นอกจากน้ำมันมะพร้าว และ น้ำมันดอกทานตะวันแล้ว น้ำมันปาล์มถือเป็นหนึ่งในน้ำมันพืชกินได้ซึ่งถูกใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการประกอบอาหาร ทั้งใน เอเชีย แอฟริกา และ อเมริกาใต้ ซึ่งในปัจจุบันน้ำมันพืชเป็นที่ต้องการมากขึ้นทั่วโลกโดยเฉพาะในอเมริกา และ บราซิล ซึ่งจะนำน้ำมันพืชมาใช้ประโยชน์ในหลายๆด้าน เช่น ใช้ในการประกอบอาหาร ใช้ในการผลิตเครื่องสำอางค์ เป็นต้น ซึ่งทำนายได้ว่าในปี 2020 ปริมาณความต้องการน้ำมันพืชจะมีมากถึง 206.8 ล้านเมตริกตัน โดยน้ำมันพืชที่มีความต้องการสูงประกอบไปด้วย น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันดอกทานตะวัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มยังสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ

อีกทั้งความต้องการผลิตน้ำมันพืชก็มีมากขึ้น ดังนั้นน้ำมันปาล์มถือเป็นหนึ่งในสารตั้งต้นที่สำคัญในการผลิตพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจาก ฟอสซิล ซึ่งสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น ทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification) ไฮโดรดีออกซิเจเนชัน (hydrodeoxygenation) เทอร์มอล-แครกกิง (thermal cracking) คาตาไลติก-แครกกิง (catalytic cracking) และ ดีออกซิเจเนชัน (deoxygenation)



รูปที่ 2.4 ปริมาณความต้องการใช้น้ำมันปาล์มจากทั่วโลกในปี 2019

[12]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

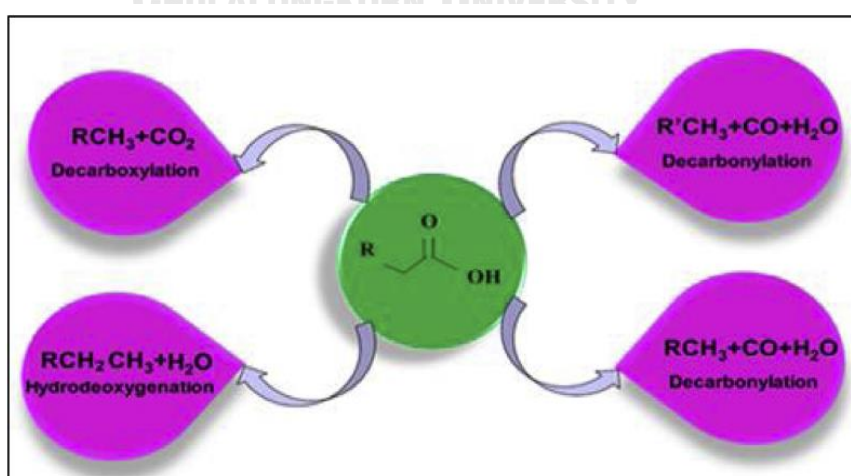
## 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มไปสู่น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน

### 2.5.1 กระบวนการดีออกซิเจเนชัน (deoxygenation)

การเกิดปฏิกิริยาดีออกซิเจเนชันให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพจากไตรกลีเซอไรด์ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมช่วยด้วยและทำภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน [13] ดีออกซิเจเนชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ก่อให้เกิดสารประกอบโซ่ตรง (n-alkanes) ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่าเดิม และกำจัดน้ำออกมาในรูปผลผลิตพลอยได้ [10] ซึ่งจริงๆ แล้วก็เหมือนกับกระบวนการ hydrogenolysis ที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากสารประกอบอินทรีย์ มากไปกว่านั้นปฏิกิริยาดีออกซิเจเนชันของไตรกลีเซอไรด์มีกลไกการเกิดที่ซับซ้อน

ในปฏิกิริยาไดออกซิเจนชั้น สายโซ่ที่ไม่อิ่มตัวของไตรกลีเซอไรด์ จะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นสายโซ่ อิ่มตัวภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนบนบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม หลังจากนั้นไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัว จะถูกเปลี่ยนไปเป็น กรดไขมัน (fatty acid) ผ่านตัวกลาง (intermediate) di และ mono glycerides ต่อมาจะเกิดการก่อเป็นสายโซ่ C-C bond และเกิดการแตกตัวของสารประกอบ glycerol ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็น propane และ free fatty acids [14] ต่อมากรดไขมันอิ่มตัวที่ ได้จะถูกลดรูป (reduce) ไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ได้ 3 วิธี ประกอบด้วย decarboxylation ( $\text{DCO}_2$ ), decarbonylation (DCO) และ hydrodeoxygenation (HDO) ดัง แสดงในรูปที่ 2.5 [13, 15] ปฏิกิริยา  $\text{DCO}_2$  และ DCO เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งจะกำจัด ออกซิเจนออกจากกรดไขมัน และให้ผลผลิตเป็นสารประกอบโซ่ตรง (n-alkanes) ที่มีจำนวนคาร์บอน อะตอมน้อยกว่ากรดไขมันอยู่ 1 อะตอม ยิ่งไปกว่านั้นปฏิกิริยา  $\text{DCO}_2$  จะผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มาเป็นผลผลิตพลอยได้ (by product) [14] ในส่วนของปฏิกิริยา HDO จะเกิดภายใต้ บรรยากาศไฮโดรเจน จะให้ผลผลิต alkane ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับกรดไขมันเลย และ ได้น้ำออกมาเป็นผลผลิตพลอยได้ (by product)

ในการที่จะผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานที่มีคุณภาพนั้น ต้องคำนึงถึง cold point และ viscosity ด้วย ซึ่งปฏิกิริยา deoxygenation เพียงอย่างเดียวจะให้ผลิตภัณฑ์โซ่ตรง (linear paraffins) ที่มีค่า cold point และ viscosity ที่สูง ส่งผลให้ poor cold flow properties [16] ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มปฏิกิริยา hydro cracking เข้าไปในกระบวนการด้วย เพื่อที่จะได้น้ำมันเบาที่มี องค์ประกอบเป็นโซ่ตรง อยู่ในช่วงระหว่าง C8 ถึง C16 ทำให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพในช่วงน้ำมัน เชื้อเพลิงอากาศยานและ มี cold flow properties ที่ดีขึ้น [17]

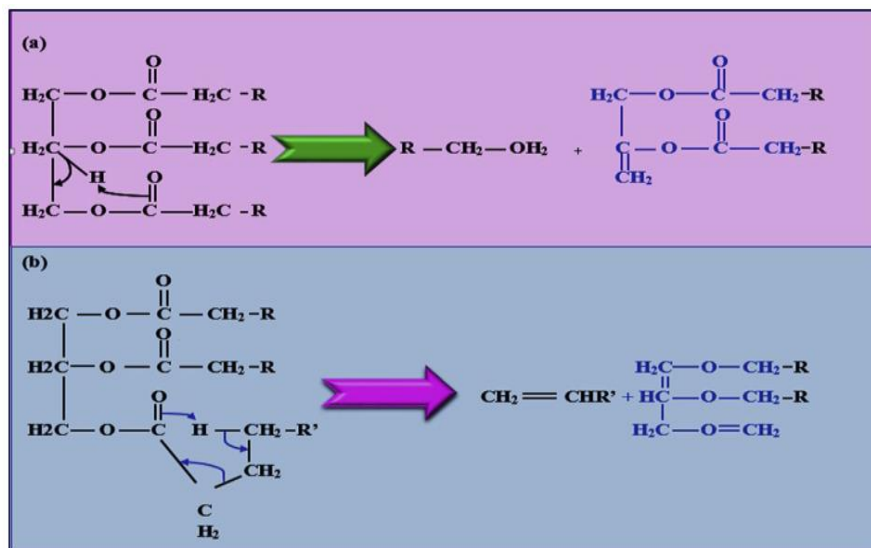


รูปที่ 2.5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไดออกซิเจนชั้นที่เป็นไปได้ของไตรกลีเซอไรด์



### 2.5.1.1 ปฏิกิริยาhydrogenation

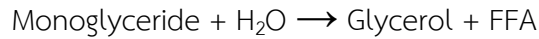
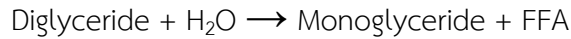
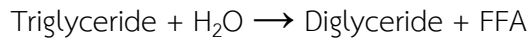
ปฏิกิริยาhydrogenation ที่มีไตรกลีเซอไรด์เป็นสารตั้งต้น จะเกิดการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวไปเป็นไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจน ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาhydrogenation นี้ จะเกิดได้ 2 แบบ ผสมกัน ระหว่าง  $\beta$ -elimination หรือ  $\gamma$ -elimination ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [18]



รูปที่ 2.6 กลไกการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์ด้วยวิธี (a)  $\beta$ -elimination และ (b) แบบ  $\gamma$ -hydrogen transfer

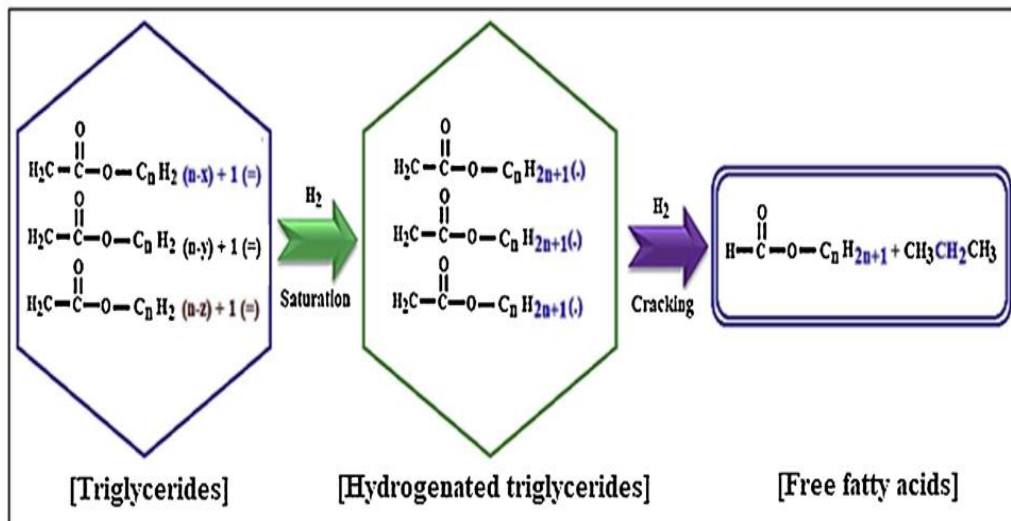
[18]

รูปที่ 2.6 (a) แสดงการเกิดปฏิกิริยาแบบ  $\beta$ -elimination ซึ่งจะมีการตัดสายโซ่ที่ตำแหน่ง  $\beta$  ได้กรดไขมันของไตรกลีเซอไรด์ 1 ตัว ออกมาภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเพื่อจะไปเกิดเป็นกรดคาร์บอกซิลิกต่อไป และเกิดเป็นไตรกลีเซอไรด์ภายใน 20 นาที [62] ต่อมาไฮโดรเจนของไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดไปเป็นโมโนกลีเซอไรด์ในรูปของ palmitic acid (C16:0), steric acid(C18:0) และ arachidic acid(C20:0) เพียงเล็กน้อยในรูปของตัวกลาง (intermediate product) ภายใน 40 นาที อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาหลักที่จะเกิดขึ้นก็คือโมโนกลีเซอไรด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมัน (FFAs) และกลีเซอรอล หลังจากผ่านไป 60 นาที ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาจากไตรกลีเซอไรด์ไปเป็นกรดไขมัน (FFAs) ถูกแสดงไว้ในสมการที่ 2.1



สมการที่ 2.1

รูปที่ 2.6(b) แสดงการแตกออกของสายโซ่คาร์บอน C-C (bond) ที่หมู่ acyl group แบบ  $\gamma$ -hydrogen transfer [18] และไปเกิดเป็นสารประกอบโอเลฟิน (terminal olefin) ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่า กรดไขมันเริ่มต้นของสายโซ่ที่เกิดการแตกออก 2 ตัว ( $\text{C}_{n-2}$ ) [19] ระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปริมาณร้อยละผลได้ของกรดไขมันจะค่อยๆ ลดลงทีละน้อยและไปเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นในรูปของ alkane หรือ  $\alpha$ -olefin ในปฏิกิริยานี้เราไม่ต้องการให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สเราต้องการเพียงแค่กรดไขมันที่อิ่มตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าจากปฏิกิริยานี้กรดไขมันจะถูกเปลี่ยนมาเป็น ผลิตภัณฑ์ตัวกลาง (intermediate product) ของไตรกลีเซอไรด์ และยังทำให้ผลิตภัณฑ์ที่จะไปเกิดต่อ ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างอีกด้วยกลไกการเกิดปฏิกิริยา hydrogenation/hydrolysis ของน้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์ แสดงไว้ในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการเกิดปฏิกิริยา hydrogenation ของน้ำมันพืช (TGs)

[20]

### 2.5.1.2 กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน และ ดีคาร์บอนิลเลชัน

#### (Decarboxylation and decarbonylation)

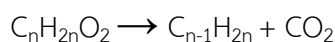
กระบวนการดีคาร์บอกซิเลชัน และ ดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarboxylation and decarbonylation) ของไตรกลีเซอไรด์ ถือเป็นกระบวนการที่ให้ประสิทธิภาพดีในการผลิตพลังงาน เชื้อเพลิงทดแทน ในทางทฤษฎีปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของ fatty acid และ fatty acid ester จะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งจะช่วยกำจัดหมู่เอสเตอ์ (-COO-) ออกมาในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ CO<sub>2</sub> ซึ่งบางครั้งก็มีการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วยเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ซึ่งปฏิกิริยานี้มักชอบเกิดที่อุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน การเติมตัวเร่งปฏิกิริยานอกจากจะช่วยลดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาและยังช่วยลดปริมาณไฮโดรคาร์บอนแก๊สที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลที่อุณหภูมิสูงแล้ว ยังช่วยในการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และดีคาร์บอนิลเลชัน เพื่อกำจัดปริมาณออกซิเจนได้ด้วย โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในปฏิกิริยานี้และมีการใช้กันมาอย่างยาวนานคือโลหะแพลเลเดียม (Pd) อย่างไรก็ตามการใช้ Pd ปริมาณมากๆเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ค่อยนิยมมากนักเนื่องจาก โลหะPdมีราคาแพงมาก ซึ่งไม่คุ้มค่าสำหรับการใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และจากการทดลองก่อนหน้านี้ พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Pd จะเสื่อมสภาพเร็วมาก ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือแค่ 10% ในเวลาเพียงแค่ 10 ถึง 20 นาทีเท่านั้น เนื่องจากการเกิดโค้กที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา Pd

#### 2.5.1.2.1. Decarboxylation (DCO<sub>2</sub>)

Decarboxylation (DCO<sub>2</sub>) เป็นกระบวนการที่จะกำจัด หมู่ carboxyl group ในบรรยากาศไฮโดรเจน ซึ่งจะทำให้เกิดการกำจัดออกซิเจนออกมารูปของแก๊ส CO<sub>2</sub> [20] ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยา DCO<sub>2</sub> สามารถเกิดได้ 2 ทาง มีทั้ง แบบ  $\beta$ -elimination และ แบบ  $\gamma$ -hydrogen transfer

ในการเกิดแบบ  $\beta$ -elimination หมู่ carboxylic acid และ unsaturated glycerol difatty ester (UGDE) จะได้เป็นผลผลิตจากไตรกลีเซอไรด์ ต่อมาจากการเกิดปฏิกิริยา hydrogenation ของ UGDE ทำให้เกิดกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่า 1 ตัว หรืออาจไปเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง (normal paraffin) [24] อย่างไรก็ตามในการเกิดแบบ  $\gamma$ -hydrogen transfer เริ่มจากเกิดการแตกออกของสายโซ่คาร์บอน C-C (bond) ที่หมู่ acyl group แบบ  $\gamma$ -hydrogen transfer และไปเกิดเป็นสารประกอบโอเลฟิน (terminal olefin) ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่า กรดไขมันเริ่มต้นของสายโซ่ที่เกิดการแตกออก 2 ตัว (C<sub>n-2</sub>) [18]

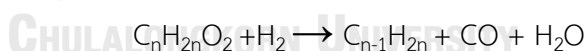
ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากปฏิกิริยา  $\text{DCO}_2$  คือไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง n-pentadecane  $\text{C}_{15}$  และ n-heptadecane  $\text{C}_{17}$  [18, 21] ทำให้สรุปได้ว่าปฏิกิริยา  $\text{DCO}_2$  สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง (alkane) ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่าไตรกลีเซอไรด์ 1 ตัว หรือคาร์บอนอะตอมเลขคี่ ดังแสดงในสมการที่ 2.2



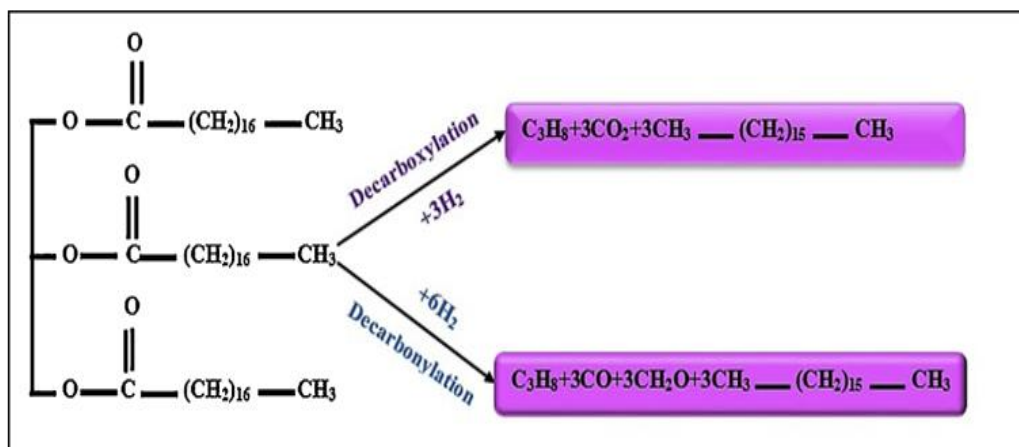
สมการที่ 2.2

#### 2.5.1.2.2 Decarbonylation (DCO)

Decarbonylation เป็นปฏิกิริยาที่จะเกิดการกำจัดหมู่ carbonyl group ภายใต้อบรยากาศไฮโดรเจน เพื่อผลิต alkanes ที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมน้อยกว่ากรดไขมันตั้งต้น และให้แก๊ส CO เป็นผลผลิตพลอยได้ (by product) ออกมา [15] ระหว่างการเกิดปฏิกิริยา DCO กรดไขมันที่เป็นตัวกลาง (fatty acid intermediate) จะเกิดไปเป็นกรด formic acid มากกว่าที่จะเกิดเป็น  $\text{CO}_2$  [19] ต่อมากรด formic acid จะสลายตัวต่อไปได้ 2 แบบ ประกอบไปด้วย dehydration ซึ่งจะก่อให้เกิดแก๊ส CO และ  $\text{H}_2\text{O}$  ส่วนแบบที่สอง hydrogenation จะก่อให้เกิดแก๊ส  $\text{CO}_2$  และ  $\text{H}_2$  ออกมา [21] ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดแบบ dehydration [18] ซึ่งงานวิจัยของ Santillan และคณะ ได้ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยา DCO ของไตรกลีเซอไรด์โดยใช้ tristearin เป็นสารตั้งต้นเพื่อที่จะผลิต n-pentadecane ซึ่งจะได้ CO และ  $\text{H}_2\text{O}$  ออกมาด้วย ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ในส่วนของกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบสมบูรณ์ทั้ง  $\text{DCO}_2$  และ DCO ของ tristearin ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 [18]



สมการที่ 2.3

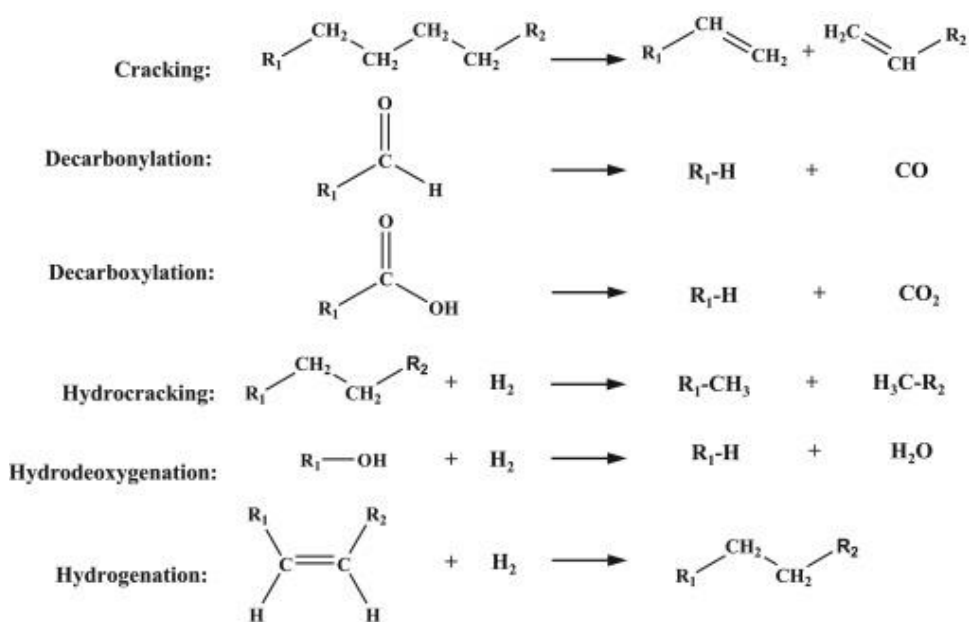


รูปที่ 2.8 การเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (DCO<sub>2</sub>) และดีคาร์บอนิลเลชัน (DCO) ของ tristearin

[18]

### 2.5.1.3 กระบวนการไฮโดรดีออกซิเจนเนชัน (hydrodeoxygenation)

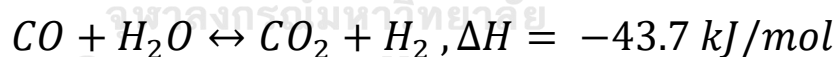
ในการที่จะผลิตเชื้อเพลิงทดแทนที่มีคุณภาพสูงจากแหล่งพลังงานทางเลือกเช่นน้ำมันชีวภาพ น้ำมันพืชนั้น กระบวนการไฮโดรดีออกซิเจนเนชัน (hydrodeoxygenation) หรือ (HDO) ถือเป็นหนึ่งในกระบวนการที่มีประสิทธิภาพดี สามารถทำให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันจากแหล่งฟอสซิลที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ซึ่งกระบวนการ HDO จะเกิดในสภาวะบรรยากาศไฮโดรเจนที่สูง และต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ bi-functional ซึ่งมีสารหมู่โลหะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่บนซัพพอร์ตชนิดกรด ยกตัวอย่างเช่น Pt/HZSM-5, Pd/HY, NiMo/Y-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiCo/Y-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-HZSM-5, Re-MoO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> [6, 22] ระหว่างการเกิดปฏิกิริยา HDO ของน้ำมันพืชจะเกิดปฏิกิริยาหลายๆปฏิกิริยาร่วมด้วย และจะให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนผสมในช่วงระหว่างแก๊สโซลีนไปจนถึงน้ำมันแก๊ส ดังแสดงในรูปที่ 2.9



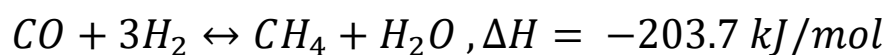
รูปที่ 2.9 โอกาสในการเกิดปฏิกิริยา Hydrodeoxygenation ของน้ำมันพืช

ปฏิกิริยาHDOหลักๆที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างต่ำ เพราะ สารประกอบไม่อิ่มตัวในน้ำมันพืช จะถูก hydrogenated ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน นอกจากปฏิกิริยาหลักแล้ว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาอันดับสองอีกมากมายได้ด้วย ดังแสดงในสมการที่ 2.4

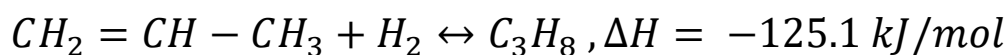
- Water gas shift reaction:



- Methanation:



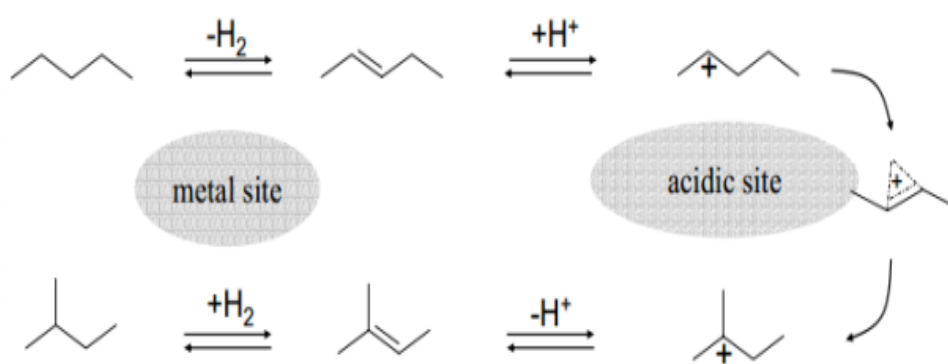
- Hydrogenation of propylene to propane



สมการที่ 2.4

นอกจากนี้เชื้อเพลิงเหลวอาจมีประโยชน์มากขึ้นอีกถ้าเกิดการทำให้ปฏิกิริยา hydroisomerization ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งปริมาณมากขึ้น [23] ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยา hydroisomerization ประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอนดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.10 โดยในขั้นแรกจะเกิดการก่อตัวเป็นสารตัวกลางโอเลฟิน (immediate olefin) บนหมู่โลหะ (metal site) ต่อมา

โอเลฟินที่ได้มีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ง่ายทำให้ได้รับโปรตรอน  $H^+$  จากหมู่กรดของตัวรองรับ และไปเกิดเป็น carbocation ต่อมา carbocation จะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ไปเป็น iso-paraffin carbocation หลังจากนั้นจะเกิดการหลุดออกของโปรตรอนหนึ่งตำแหน่ง ไปเกิดเป็น iso-olefin หลังจากนั้น iso-olefin จะถูก hydrogenated อย่างรวดเร็วบนหมู่โลหะก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็น iso-paraffin ในที่สุด



รูปที่ 2.10 กลไกการเกิดปฏิกิริยา hydroisomerization ของ n-alkane บน bifunctional catalyst

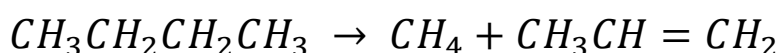
[23]

### 2.5.2 กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking)

กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน ถือเป็นกระบวนการทางเคมีที่มีมายาวนานใช้ในการทำให้สารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแยกตัวหรือแตกตัวเป็นน้ำมันส่วนเบาหรือเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงรวมทั้งมีจำนวนอะตอมของคาร์บอนน้อยลง โดยไม่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ในการที่จะผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากการพืช กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนถือเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมากซึ่งใช้ในการเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ หรือกรดไขมันในน้ำมันพืช ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงได้ ซึ่งเชื้อเพลิงที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับ แก๊สโซลีน เชื้อเพลิงอากาศยาน หรือ ดีเซลที่ได้ใช้กันอยู่ทั่วไปในท้องตลาด เนื่องจากอุณหพลศาสตร์ (thermodynamic) ของกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนต้องการใช้อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงๆ ซึ่งอาจจะเริ่มต้นที่  $350^{\circ}C$  หรือ ที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ โดยจะขึ้นอยู่กับความต้องการว่าอยากจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอะไร [15-21] อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิ

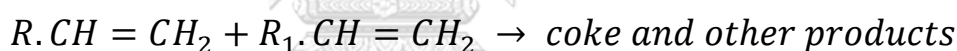
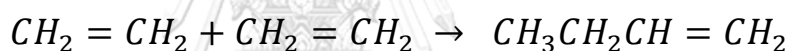
และเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นอาจก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์อื่นที่ไม่ต้องการร่วมด้วยเช่น แก๊ส หรือ โค้ก เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง กลไกการเกิดปฏิกิริยาเทอร์โมล-แครกกิงของสารประกอบ อินทรีย์เกิดได้ด้วยกันสองแบบดังนี้

- 1.) ปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง : สารประกอบ ไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแยกตัวหรือแตกตัวเป็นน้ำมันส่วนเบาหรือเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก



สมการที่ 2.5

- 2.) ปฏิกิริยาอันดับสอง : การเกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการจาก active of free radical group



สมการที่ 2.6

แม้ว่ากระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนจากน้ำมันพีซ จะได้น้ำมันส่วนเบาในช่วง ดีเซล น้ำมันอากาศยาน หรือ แก๊สโซลีน อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงจะเกิด active of free radical group มาก ซึ่งจะส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็น olefin และ coke มากกว่าที่จะเป็น โชนโตร หรือ โชนโตรก ซึ่งการมีโชนโตร หรือ โชนโตรกในโครงสร้างจะทำให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพ และเป็นที่ต้องการในปัจจุบัน

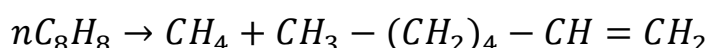
### 2.5.3 กระบวนการการแตกตัวเชิงปฏิกิริยา (catalytic cracking)

กระบวนการการแตกตัวเชิงปฏิกิริยา เป็นกระบวนการที่มีการพัฒนามาจากเทอร์โมลแครกกิง ใช้ในการแตกโมเลกุลน้ำมันขนาดใหญ่ให้กลายเป็นขนาดที่ต้องการโดยการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย เพราะว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ปรับปรุงการแตกโมเลกุลของน้ำมันให้เป็นไปตามที่ต้องการมากขึ้น โดยสามารถที่จะควบคุมและปรับแต่งโมเลกุลของ



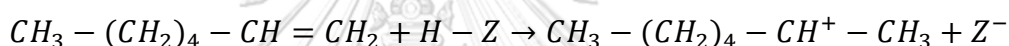
น้ำมันให้มีขนาดและรูปร่างเหมาะกับการใช้งาน ปฏิกิริยาในกระบวนการแตกตัวเชิงปฏิกิริยา คือปฏิกิริยาของคาร์โบเนียมไอออน (carbonium ion) ที่เกิดจากการที่ไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรเจนไอออนประจุลบไป ทำให้ตัวมันเองมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า ยกตัวอย่างกลไกการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการแตกตัวไลติกแครกกิงของน้ำมันโมเลกุลขนาดใหญ่โดยมี ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [19] แสดงไว้ดังนี้

-การแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking)



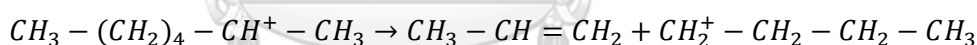
สมการที่ 2.7

-การเกิดคาร์โบเนียมไอออนบนซีโอไลต์เอชวาย (proton shift)



สมการที่ 2.8

-การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่ของคาร์โบเนียมไอออน



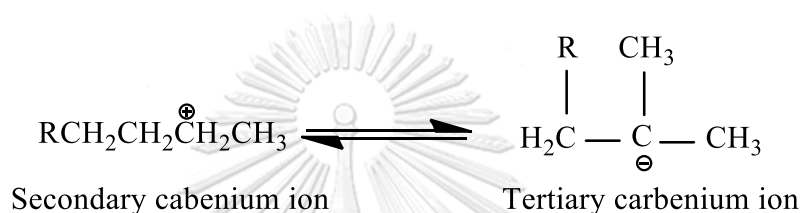
สมการที่ 2.9

เมื่อคาร์โบเนียมไอออนเกิดขึ้นแล้วจะทำปฏิกิริยาเป็นห่วงโซ่ต่อไปดังนี้

- 1.) เกิดการแตกตัวขึ้นที่ตำแหน่งปีตาของแขนนับจากจุดที่เป็นประจุบวก ทำให้เกิดโอเลฟิน และเกิดคาร์โบเนียมไอออนที่เล็กลง
- 2.) เกิดการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์ขึ้นได้สองวิธี ดังแสดงในรูปที่ 2.11
  - เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างประจุบวกกับไฮโดรเจน
  - เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างประจุบวกกับกลุ่มเมทิล ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดกับ Primary Carbon Position มากที่สุด สำหรับ Secondary และ Tertiary จะเกิดขึ้นน้อยลง และเป็นเหตุให้เกิดไอโซพาราฟินส์มากขึ้น
- 3.) เกิดโมเลกุลวงแหวน ซึ่งจะก่อให้เกิดสารประเภทแอโรมาติก
- 4.) การเกิดโมเลกุลโอเลฟินขึ้น และเกิดการคายโปรตรอนออกมา

- 5.) เกิดการรวมตัวขึ้นเป็นพอลิเมอร์และเกิดการสลับโมเลกุลของกันและกัน
- การเกิดปฏิกิริยาหยุดห่วงโซ่ (termination) คาร์โบเนียมไอออนจะเกิดการหยุดห่วงโซ่ได้โดยจะทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา
  - ปฏิกิริยาลำดับที่สองที่อาจจะเกิดขึ้นได้ประกอบไปด้วย การลดไฮโดรเจนในแนฟทีน ให้เป็นสารประกอบแอโรมาติก หรือ การเกิดโค้กต่อไป

#### -Isomerization



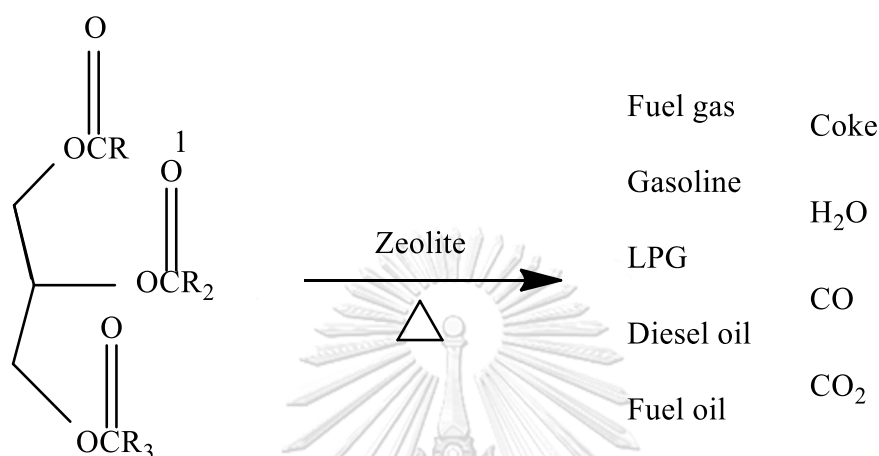
#### -Cyclisation



รูปที่ 2.11 รูปแบบการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

ซีโอไลต์ถือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดชนิดนิยมที่ใช้ปฏิกิริยาแครกกิงมาอย่างยาวนานในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยเริ่มแรกจะได้มีการใช้ซีโอไลต์แบบอสัณฐาน (amorphous zeolites) ที่มีปริมาณ  $\text{SiO}_2$  ที่สูง ( $87\%\text{SiO}_2 / 13\%\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ต่อมาได้มีการลองปรับเพิ่มปริมาณซิลิกาให้ต่ำลงเหลือ 75% เพื่อเพิ่มความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะส่งผลต่อการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลหรือปฏิกิริยาแครกกิงนั่นเอง [13] อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณกรดก็มักจะทำให้เกิดโค้กที่อุณหภูมิสูงๆ ตามมาด้วยนอกจากนั้นยังมักเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงขึ้นด้วยเช่น isomerization, alkylation or cyclisation มีการใช้กระบวนการแคตาไลติกแครกกิงในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจากน้ำมันพืช เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถควบคุมการเลือกเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ ดังงานวิจัย

[24-26] ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด zeolite Y, HZSM-5, alumina ถูกใช้ในการแตกตัวโมเลกุลของน้ำมันพืช โดยใช้อุณหภูมิในการทดลองระหว่าง 480 ถึง 540<sup>o</sup>C ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการแตกตัวโมเลกุลของน้ำมันพืชโดยใช้ Zeolite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ซึ่งน้ำมันชีวภาพที่ได้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันที่ได้จากซากฟอสซิลทั้งในด้านของปริมาณสายโซ่ตรง โซ่กิ่ง หรือแม้กระทั่งแอมโรมาติก ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญมาไม่ว่าจะเป็นในน้ำมันแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน หรือดีเซล อย่างไรก็ตามปริมาณโอเลฟินหรือพาราฟินก็ยังมีอยู่มากในโครงสร้างของน้ำมันชีวภาพที่ได้ทำให้ประสิทธิภาพทางความเสถียรในการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidative stability) ต่ำ ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพที่ด้อยลงของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเมื่อมีการเก็บรักษาในระยะเวลานาน ที่เป็นเช่นนี้เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดไม่ได้ช่วยให้เกิดการกำจัดแก๊สออกซิเจนหรือเกิดปฏิกิริยาดีออกซิเจนชัน (deoxygenation) บน ไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมันนั่นเอง [27]

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Cheng และคณะ [28] ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงอากาศยานจากน้ำมันถั่วเหลืองโดยมี Ni-Mo/HY และ Ni-Mo/HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า Ni-Mo/HY จะให้เชื้อเพลิงอากาศยานเป็นไฮโดรเจนที่มากกว่าและ แอโรมาติกที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับ Ni-Mo/HZSM-5 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจาก 330 ขึ้นไปถึง 390 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 4 MPa บนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Mo/HY พบว่าผลได้ของน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพสำหรับยานเพิ่มขึ้นจาก 0 ไปยัง 49.19 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ขึ้นไปถึง 410 องศาเซลเซียส ปริมาณเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่เป็นแอโรมาติกจะเพิ่มขึ้นถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะส่งผลเสียต่อคุณภาพเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่ผลิตได้

Sousa และคณะ [11] ศึกษาการผลิตน้ำมันแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน และน้ำมันดีเซล จากน้ำมันเมล็ดปาล์ม และปาล์มโอเลอินในรูปแบบของไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมัน ผ่านปฏิกิริยา ไดออกซิเจนชัน แครกกิง และ ไอโซเมไรเซชัน โดยมีบีตาซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 10 บาร์ ของแก๊สไฮโดรเจน เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยมีการปั่นกววนอยู่ที่ 800 รอบต่อนาที จะเกิดร้อยละผลได้เป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนเหลวสูงถึง 96 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ของเหลววิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas chromatography mass - spectrometry, GC/MS) และวิเคราะห์จุดเยือกแข็งของเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่ได้ น้ำมันปาล์ม และ น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่ได้น้ำมันปาล์มผสมกับเชื้อเพลิงอากาศยานที่ได้จากปิโตรเลียม ด้วยเครื่องวัดค่าความต่างความร้อนของสาร (Differential Scanning-Calorimetry, DSC)

Silva และคณะ [10] ศึกษาการผลิตน้ำมันแก๊สโซลีน และ น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากน้ำมันปาล์ม และน้ำมันอัลมอนต์ในรูปแบบของไตรกลีเซอไรด์ และ กรดไขมัน ผ่านปฏิกิริยา ไดออกซิเจนชัน โดยมีแพลลาเดียมบนตัวรองรับซาร์โคลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ศึกษาผลของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ และ กรดไขมันของสารตั้งต้น, อุณหภูมิ, ความดัน และ การปั่นกววน ต่อการเกิดปฏิกิริยา พบว่าเมื่อใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมันอัลมอนต์ในรูปแบบของกรดไขมัน ที่อุณหภูมิในการทำ

ปฏิกิริยา 300 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 10 บาร์ ของแก๊สไฮโดรเจน เป็นเวลา 5 ชั่วโมง โดยมีการปั่นกววนอยู่ที่ 700 รอบต่อนาที จะเกิดร้อยละผลได้เป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนเหลวสูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์

Trieu และคณะ [29] ศึกษาการสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่ง ที่มีปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างต่ำ จากน้ำมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผสมระหว่างกรดและเบส โดยทางด้านเบสประกอบไปด้วย (MgO, CaO, SiO<sub>2</sub> และ Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ส่วนฝั่งกรดประกอบไปด้วย (HY, H-beta, HZSM-5 และ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) พบว่าที่อัตราส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเบสของ MgO: H-beta ที่อัตราส่วน 3 ต่อ 1 จะให้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งสูงถึง 35 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณออกซิเจนในโครงสร้างต่ำที่สุด



**บทที่ 3**  
**วิธีการดำเนินการวิจัย**

**3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง**

วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 วัตถุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

วัตถุดิบ/สารเคมี	บริษัทผู้ผลิต
ซีโอไลต์ชนิดบีตา (HBeta Zeolite) (Si/Al = 27)	Tosoh Corporation
ซีโอไลต์ชนิดเอชวาย (HY Zeolite) (Si/Al = 6)	Tosoh Corporation
นิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรต (Nickel nitrate-hexahydrate, $Ni(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ )	QReC
แอซีโตน (Acetone, $C_3H_6O$ )	MERCK
ไดคลอโรมีเทน (dichloro methane, $CH_2Cl_2$ )	QRec
แก๊สไนโตรเจน 99.99%	BIG
แก๊สไฮโดรเจน 99.99%	BIG
แก๊สฮีเลียม 99%	BIG
แก๊สไนโตรเจน 98% ออกซิเจน 2%	BIG
แก๊สอากาศ	BIG
น้ำปราศจากไอออน	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
น้ำมันปาล์มโอเลอิน	Lam Soon (Thailand) Public Company Limited

### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
2. กระบอกตวง (Graduated cylinder)
3. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic bar)
4. แผ่นฟรอยด์อลูมิเนียม (Aluminum foil)
5. โถดูดความชื้น (Desiccator)
6. ถ้วยกระเบื้องทนความร้อน (Crucible)
7. ช้อนตักสาร (Spatula)
8. เหล็กคีบ (Forceps)
9. เตาเผา (Furnace) และท่อควอตซ์ (Quartz tube)
10. ตู้อบ (Oven)
11. เครื่องชั่งสาร (analytical balance)
12. เครื่องกวนสารพร้อมให้ความร้อน (Hot-plate stirrer)
13. เตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace)

#### 3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ X-ray diffractometer (XRD), (Bruker model)
2. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน  $N_2$  physisorption via BET method, (Micromeristics ASAP 2020 system)
3. เครื่องวัดความเป็นกรดจากการคายแก๊สโพรบแอมโมเนียตามอุณหภูมิที่โปรแกรม Ammonia ( $NH_3$ ) - temperature programmed desorption (Micromeristics TPD 2920 system)

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากปาล์ม  
โพลีเอทิลีนผ่านการดัดออกซิเจนชั้น แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน

1. เครื่องชั่งสาร (analytical balance)
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller)
3. สายรัดให้ความร้อน (heater band)
4. เทอร์มอคัปเปิล (Thermocouple)
5. เครื่องปฏิกรณ์ชนิดกะ 75 ml (batch reactor)
6. เครื่องควบคุมความเร็วรอบในการปั่นกวน (speed control motor)
7. เครื่องทำความเย็นให้กับคอนเดนเซอร์ (batch reactor)
8. กระดาษกรอง (filter paper)
9. ขวดรูปชมพู่ ( Erlenmeyer Flask )
10. ปีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 50 และ 100 มิลลิลิตร
11. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump)
12. ช้อนตักสาร (Spatula)
13. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น  
(distillation simulation gas chromatography, DGC) (Agilent, GC7890A)
14. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์  
(gas chromatography mass spectrometer, GC-MS)  
(Agilent, GC7890A, MS5975C, Detector HP-5)
15. เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์  
(differential scanning calorimeter, DSC)
16. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC)



### 3.3 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตา และเอชวายด้วยวิธี Wetness Impregnation

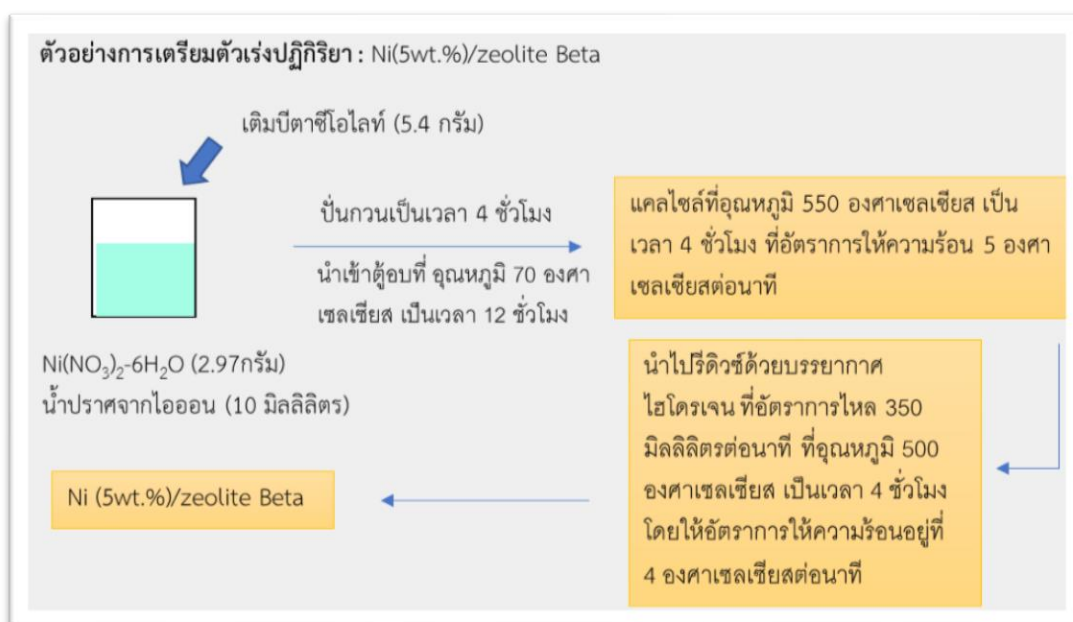
การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตา และเอชวายด้วยวิธี Wetness Impregnation เริ่มแรกเตรียม 5%Ni/Beta โดยชั่งนิกเกิลในเตรตเฮกซะไฮเดรตมา 2.61 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน 20 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ซีโอไลต์ชนิดบีตา 10 กรัม ลงไปในสารละลาย ผสมให้เข้ากันโดยการปั่นกวนเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในตู้อบสาร ต่อมานำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้ไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในเตาเผาที่ความร้อนสูง และทำการรีดิวซ์ในแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และนำไปเคลือบผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยออกซิเจน (passivate) ด้วยแก๊สไนโตรเจน 98 เปอร์เซ็นต์ เจือจางด้วยออกซิเจน 2 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 18 ชั่วโมง ต่อมาทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวาย โดยวิธีการเตรียมจะเหมือนกับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตาดังกล่าวไว้ก่อนหน้านี้ และทำการเพิ่มอัตราส่วนของนิกเกิลต่อซีโอไลต์ชนิดเอชวาย ที่ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักนิกเกิลต่อน้ำหนักตัวรองรับซีโอไลต์ ดังนั้นเราจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้

1) 5%Ni/Beta

2) 5%Ni/HY

3) 10%Ni/HY

4) 15%Ni/HY



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

### 3.3.2 ทดสอบปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน

หลังจากเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาได้แล้ว จะทำการทดสอบปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน แครกกิง และไอโซเมอไรเซชัน โดยใช้เครื่องมือที่ใช้ทดสอบปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน แครกกิง และไอโซเมอไรเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ขนาด 85 มิลลิลิตรดังแสดงในรูปที่ 3.3 จะนำปาล์มโอเลอินผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ โดยใช้อัตราส่วนน้ำมันปาล์มโอเลอิน 15 กรัมต่อตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ สวมเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับใบพัดปั่นกวน มีท่อปล่อยแก๊สไฮโดรเจนและแท่งเทอร์มอคัปเปิล แล้วไขเครื่องปฏิกรณ์เข้าให้สนิท จากนั้นสวมสายรัดให้ความร้อน (heater band) รอบๆเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นทำการไล่อากาศด้วยการอัดแก๊สไฮโดรเจน เมื่อมั่นใจว่าแก๊สไฮโดรเจนไหลผ่านเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยต่อท่อสายยางจุ่มลงในน้ำแล้วเกิดฟองอากาศออกมา ให้ปิดวาล์วทางออกแก๊สไฮโดรเจนในระบบ และเปิดวาล์วให้แก๊สไฮโดรเจนเข้าไปในระบบโดยใช้ความดัน 5 และ 10 บาร์ เมื่อพบว่าได้ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนที่ต้องการ และไม่มีกรั่วไหลของแก๊สแล้ว จึงเริ่มทำปฏิกิริยาให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดระหว่าง 370 ถึง 460 องศาเซลเซียส กำหนดค่าความเร็วรอบใบกวน 800 รอบต่อนาที ซึ่งจะใช้เวลาทำปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง โดยเริ่มนับเวลาที่อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ถึงค่าที่กำหนด



รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบปฏิกิริยาดีออกซิเจเนชัน แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน



รูปที่ 3.3 เตาปฏิกรณ์แบบกะ ขนาด 85 มิลลิลิตร

เมื่อครบเวลาทำการทดลอง ทำการลดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์จนถึงอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยถุงเก็บแก๊สตัวอย่าง และนำส่วนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ (ของแข็งและของเหลว) มาทำการแยกโดยนำไปเทใส่กระดาษกรอง ที่วางอยู่บนชุดกรองร่วมกับปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) หลังจากนั้นนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่แยกได้ไปชั่งหาน้ำหนัก และนำไปวิเคราะห์ต่อไป โดยสถานะที่ใช้ทดลองปฏิกิริยาไดออกซิเจนชั้น แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน จะแสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะที่ใช้ทดลองปฏิกิริยา ไดออกซิเจนชั้น แครกกิง และ ไอโซเมอไรเซชัน

ชื่อตัวอย่าง	โลหะนิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ (Ni/Zeolite)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ตัวเร่ง/น้ำมันปาล์ม)	ความดัน (บาร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
5%Ni/Beta	5%	5%	10	370
5%Ni/Beta	5%	5%	10	400
5%Ni/Beta	5%	5%	10	430
5%Ni/Beta	5%	5%	10	460
5%Ni/HY	5%	5%	10	370
5%Ni/HY	5%	5%	10	400
5%Ni/HY	5%	5%	10	430
5%Ni/HY	5%	5%	10	460
5%Ni/HY	5%	5%	5	430
5%Ni/HY	5%	5%	0	430
HY	-	5%	10	430
10%Ni/HY	10%	5%	10	430
15%Ni/HY	15%	5%	10	430
5%Ni/HY	5%	2.5%	10	430
-	-	-	10	430

### 3.3.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์และวิเคราะห์ผล

#### 3.3.3.1 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน ที่ได้จากปฏิกิริยาไดออกซิจีเนชัน แครกกิง และไอโซเมอไรเซชัน

##### (1.) การวิเคราะห์เชิงปริมาณขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สโซลีน เชื้อเพลิงอากาศยาน และดีเซล ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งใช้มาตรฐาน ASTM D2887 ในการวิเคราะห์ โดยตัวเครื่องจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี GC7890A ของบริษัทเอจิลেন্টเทคโนโลยีส์ จำกัด (ประเทศไทย) และใช้คอลัมน์ capillary รุ่น DB-1 ขนาด 10 เมตร x 0.53 มิลลิเมตร x 2.65 ไมโครเมตร ของบริษัท J&W Scientific จำกัด และในส่วนต่อมาเป็นซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulation distillation software)



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น

## (2.) การวิเคราะห์เชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว

ทำการวิเคราะห์เชิงคุณภาพของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่ได้จากปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน แครกกิง และไอโซเมอไรเซชัน โดยการจำแนกว่าภายในโครงสร้างมีส่วนประกอบของ โഴตรง โซกิ้ง หรือแอโรมาติก มากน้อยเท่าไร โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งใช้เทคนิคการแยกองค์ประกอบของสารผสมโดยอาศัยความแตกต่างของอัตราการเคลื่อนที่ของแต่ละองค์ประกอบของสารผสมบนเฟสคงที่ (Stationary phase) ภายใต้การพาของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) โดยเฟสคงที่คือสารที่อยู่ภายในคอลัมน์ ส่วนเฟสเคลื่อนที่คือแก๊สฮีเลียม ซึ่งภายในคอลัมน์จะเกิดการแยกสารผสม โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่อยู่ภายในและสารผสม จากนั้นโมเลกุลของสารเชิงเดี่ยวจะถูกพาเข้าสู่เครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ และได้รับพลังงานจากลำแสงอิเล็กตรอนพลังงานสูงที่ 70 อิเล็กตรอนโวลต์ เพื่อทำให้เกิดการแตกตัวอยู่ในรูปประจุ โดยจะมีรูปแบบการแตกตัวของแต่ละโมเลกุลมีลักษณะเฉพาะ เรียกว่า Mass spectrum โดยจะแสดงการแตกตัวในรูปของ mass-to-charge ratio ( $m/z$ ) โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการทดลอง รุ่น GC7890A และเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น GCMS5975C เป็นดีเทคเตอร์ ของบริษัท เอจิลেন্ট เทคโนโลยีส์ จำกัด (ประเทศไทย) ส่วนคอลัมน์ในการวิเคราะห์คือ รุ่น HP-5MS เป็น Capillary column จำกัด บริษัท J&W Scientific จำกัด ขนาด 0.25 มิลลิเมตร ยาว 30 เมตร และมี 100% Dimethylpolysiloxane หนา 0.25 ไมโครเมตร เป็นวัฏภาคนิ่ง (stationary phase) โดยใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) อัตราการไหล 1.0 มิลลิลิตร/นาที ใช้อัตราในการฉีดสาร (split ratio) 15:1 และ อุณหภูมิในการตรวจวัด (detector temperature) เป็น 280 องศาเซลเซียส ปริมาณของสารที่ฉีดคือ 0.1 ไมครอน ซึ่งจะใช้  $m/z$  Scan range ในช่วง 33-500 องศาเซลเซียส โดยใช้  $CS_2$  เป็นตัวทำละลายที่ใช้กับผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลว



รูปที่ 3.5 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์

(3.) การวิเคราะห์จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการทดลอง

ทำการวิเคราะห์จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ differential scanning calorimeter (DSC822) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องจะทำการทดสอบวัสดุโดยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสารตัวอย่างเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การหลอมเหลว การเปลี่ยนสถานะ การเปลี่ยนรูปผลึก เป็นต้น ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนของตัวอย่าง โดยในการวิเคราะห์ตัวอย่างตัวอย่างจะถูกวางบนจานอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในเตาที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยภายในเตาจะมีสารอ้างอิงซึ่งเป็นจานอะลูมิเนียมเปล่า เพื่อใช้เป็นตัวเปรียบเทียบกับตัวอย่างภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยทำการลดอุณหภูมิจาก 25 ไปยัง -75 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความเย็น 5 องศาเซลเซียสต่อ นาที โดยจะใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 8 มิลลิกรัม และใช้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อ นาที



รูปที่ 3.6 เครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ differential scanning calorimeter (DSC)

#### (4.) การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอน

ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอน โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) รุ่น 7820A, Agilent ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ประกอบด้วย ดีเทคเตอร์ Flame Ionization Detector (FID) และ Thermal Conductivity Detector (TCD) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส

#### 3.3.3.2 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

##### (1.) การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและวัฏภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและวัฏภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยเครื่อง X-ray diffractometer ที่ใช้ในการทดลอง ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Discover แสดงดังรูปที่ 3.6 ใช้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ชนิด  $\text{Cu K}\alpha$  (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.5406 อังสตรอม) แรงดันไฟฟ้า 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ อัตราการสแกน 0.01 ดีกรีต่อวินาที และมุม  $2\theta$  ในช่วง 5 ถึง 80° .



รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์วิเคราะห์โครงสร้างผลึกและวัฏภาค



(2.) การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน

ในการทดลองนี้จะทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ รูปแบบการกระจายตัว และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาโดย รุ่น ASAP2020 ยี่ห้อ Micromeritic แสดงดังรูป 3.7 ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับทางกายภาพด้วยแก๊สไนโตรเจน เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ สมบัติความพรุน โดยปริมาณแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับและความดันย่อยที่เปลี่ยนแปลงไป จะถูกบันทึกเพื่อสร้างเป็นไอโซเทิร์มของการดูดและการคายซับที่ความดันสัมพัทธ์ในช่วง  $10^{-7}$  ถึง 1



รูปที่ 3.8 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน

โดยการคำนวณพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากสมการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) ได้ดังสมการที่ 3.1 [30] ส่วนปริมาตรรูพรุนและการกระจายขนาดรูพรุนสามารถหาได้จากสมการของ Barret-Joyner-Halenda (BJH pore size distribution)

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m c} + \frac{c - 1}{V_m c} \cdot \frac{P}{P_0}$$

สมการที่ 3.1

เมื่อ  $V$  = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดัน  $P$

$V_m$  = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับในการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว

$P_0$  = ความดันอิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง

$c$  = ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับและการทำแก๊สให้เป็นของเหลว

(liquefaction) หรือ การควบแน่น ดังสมการที่ 3.2

$$C = e^{(\Delta H_{a,1} - \Delta H_c)/RT}$$

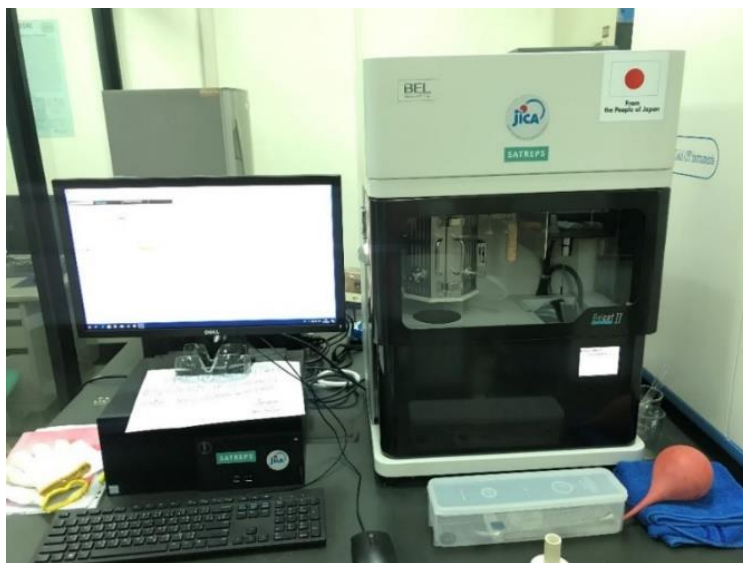
สมการที่ 3.2

เมื่อ  $\Delta H_{a,1}$  = ความร้อนของการดูดซับของโมเลกุลหรืออะตอมที่เกิดการดูดซับในชั้นแรก

$R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส

### (3.) การวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา

ทำการวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Temperature-Programmed Desorption (TPD) เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ด้วยเทคนิค TPD แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยใช้แก๊สแอมโมเนียเป็นแก๊สโพรบในการวิเคราะห์สภาพกรด เมื่อกำจัดความชื้นและทำความสะอาดพื้นของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนในบรรยากาศแก๊สเฉื่อยแล้ว ป้อนแก๊สแอมโมเนียที่เจือจางในแก๊สเฉื่อยและปล่อยให้เกิดการดูดซับบนตัวเร่งปฏิกิริยาจนอิ่มตัวที่อุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นกำจัดแอมโมเนียที่ไม่ถูกดูดซับหรือดูดซับด้วยแรงทางกายภาพโดยการไล่ด้วยแก๊สเฉื่อยหรือดูดออกด้วยสุญญากาศ เมื่อระบบเข้าสู่สมดุลให้ป้อนแก๊สเฉื่อยพร้อมกับเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แอมโมเนียที่ถูกดูดซับไว้จะค่อยๆ คายออกจากตำแหน่งกรดและถูกพาเข้าสู่ดีเทคเตอร์ด้วยก๊าซเฉื่อย สัญญาณที่เกิดขึ้นจากดีเทคเตอร์เมื่อนำไปเทียบกับเส้นโค้งสอบเทียบจะได้ปริมาณแอมโมเนียที่คายออกมา ซึ่งสามารถคำนวณเป็นปริมาณตำแหน่งกรดได้ [30]



รูปที่ 3.9 วิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค  
*Temperature-Programmed Desorption (TPD)*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากปาล์มโอเลอิน ผ่านการดัดแปลงชีนิเจนชั้น แครกกิง และ ไอโซเมอโรเซชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิดบีตาและเอชวาย ทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยศึกษาตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร ประกอบด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และปริมาณนิกเกิลบนตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปลงชีนิเจนชั้น แครกกิง และ ไอโซเมอโรเซชัน เพื่อให้ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวที่มีค่าการกระจายตัวของคาร์บอนอะตอมใกล้เคียงน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับอากาศยานมากที่สุด และมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับอากาศยานที่ใช้กันอยู่ทั่วไป

#### 4.1 การวิเคราะห์สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

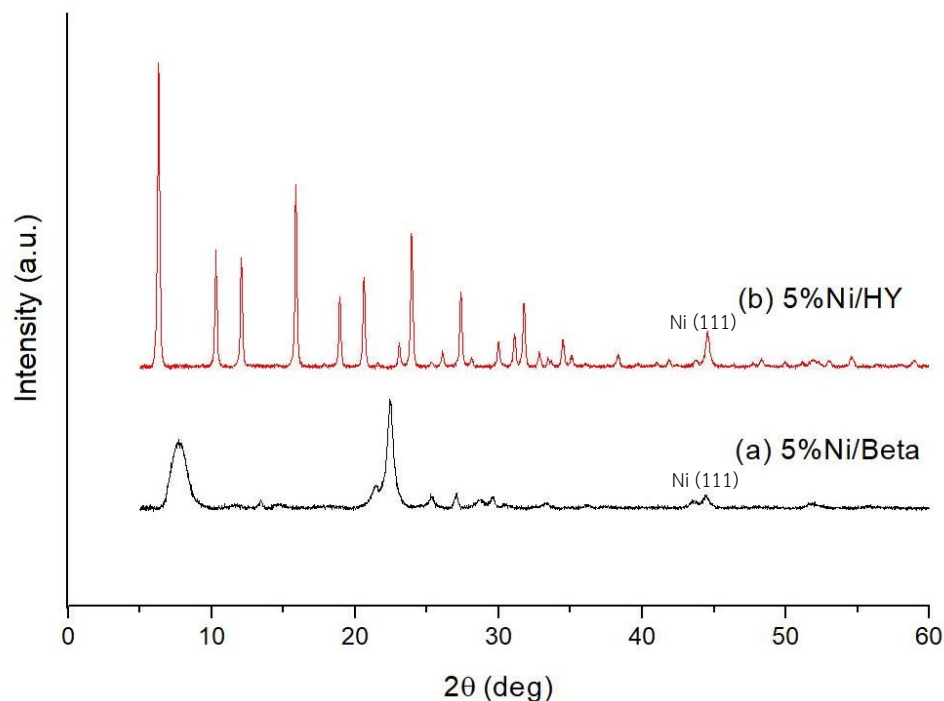
ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไปเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาดัดแปลงชีนิเจนชั้น โดยได้ศึกษาองค์ประกอบของสารตั้งต้นโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยกากน้ำมันถึง 87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือเป็นสารตั้งต้นหลักในการทำปฏิกิริยา และตามมาด้วยแก๊สออยล์หนัก 13 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์มโอเลอินตามคาบจุดเดือด

คาบจุดเดือด (องศาเซลเซียส)	องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%wt.)
340 - 370	แก๊สออยล์หนัก (Heavy gas oil)	13
370 - FBP	กากน้ำมัน (Long residue)	87

## 4.2 การวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.2.1 การวิเคราะห์การจัดเรียงตัวของผลึก (X-ray diffraction)



รูปที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา (a) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของนิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตา (b) 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของนิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวาย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY และ 5%Ni/Beta Zeolite แสดงในภาพที่ 4.1 พบว่า ณ ตำแหน่งที่  $2\theta = 45$  เป็นพีคแหลมทั้งคู่แสดงถึงอสังฐานของนิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์แต่ละชนิด โดยจะสังเกตเห็นอสังฐานของนิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตาเกิดพีคเล็กกว่าเมื่อเทียบกับพีคของนิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวาย โดยขนาดผลึกนิกเกิลบนซีโอไลต์ชนิดบีตามีค่าเท่ากับ 20.58 นาโนเมตร และขนาดผลึกนิกเกิลบนซีโอไลต์ชนิดเอชวายมีค่าเท่ากับ 28.54 นาโนเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับการทดลองของ Tao Li และคณะ [31]

ตารางที่ 4.2 ขนาดผลึกของนิกเกิลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตาและเอชวาย

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ขนาดผลึกของนิกเกิล (นาโนเมตร)
5%Ni/Beta	20.58
5%Ni/HY	28.84

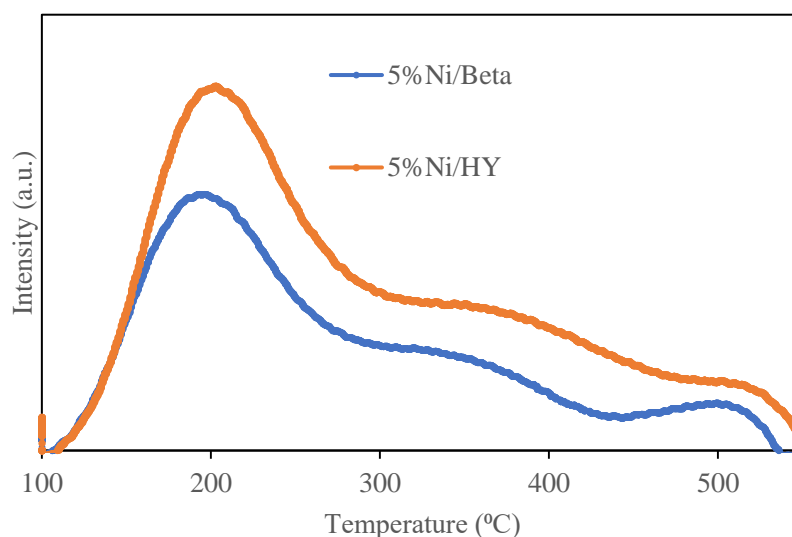
4.2.2 วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและรูพรุนของอนุภาคด้วยเทคนิคการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen adsorption-desorption)

ตารางที่ 4.3 แสดงพื้นที่ผิว ปริมาตร และขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์นิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตา และเอชวาย

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิวรูพรุน (BET) m <sup>2</sup> /g	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) Cm <sup>3</sup> /g	ขนาดรูพรุน (Pore size) nm
5%Ni/beta	551.62	0.537	3.892
5%Ni/HY	537.50	0.343	2.554

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) และขนาดรูพรุน (Pore size) ของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลที่อยู่บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดบีตา และเอชวายด้วยเทคนิค Brunauer Emmett Teller (BET method) พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 5%Ni/beta และ 5%Ni/HY ที่ใช้ในการทดลอง มีพื้นที่ผิวรูพรุนค่อนข้างมากทั้งคู่ คือ 551.62 และ 537.50 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และในส่วนของขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 มีค่าเท่ากับ 3.892 และ 2.554 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงของ Meso-porous material (2-50นาโนเมตร) ซึ่งส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาบริเวณเร่ง (active site) ของตัวเร่งปฏิกิริยา กล่าวคือโดยปกติแล้วโมเลกุลของน้ำมันปาล์มหรือน้ำมันพืชจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาบนตำแหน่ง active site ของตัวเร่งปฏิกิริยาได้นั้น ตัวเร่งปฏิกิริยาต้องมีขนาดรูพรุนมากกว่า 2 nm ขึ้นไป ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองมีขนาดรูพรุนมากกว่า 2 nm ทั้งคู่ ทำให้โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์สามารถเข้าไปเกิดปฏิกิริยา ไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (HDO) และเกิดการแตกตัว (cracking) ภายในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ตำแหน่งบริเวณเร่ง (active site) ได้ [22] [32]

#### 4.2.3 วิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยวิธี (NH<sub>3</sub>-TPD)



รูปที่ 4.2 ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์นิกเกิลที่อุบุนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด ปีตา และ เอชวาย ด้วยเทคนิค Temperature-Programmed Desorption (TPD)

ตารางที่ 4.4 ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์นิกเกิลที่อุบุนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิด ปีตา และเอชวาย

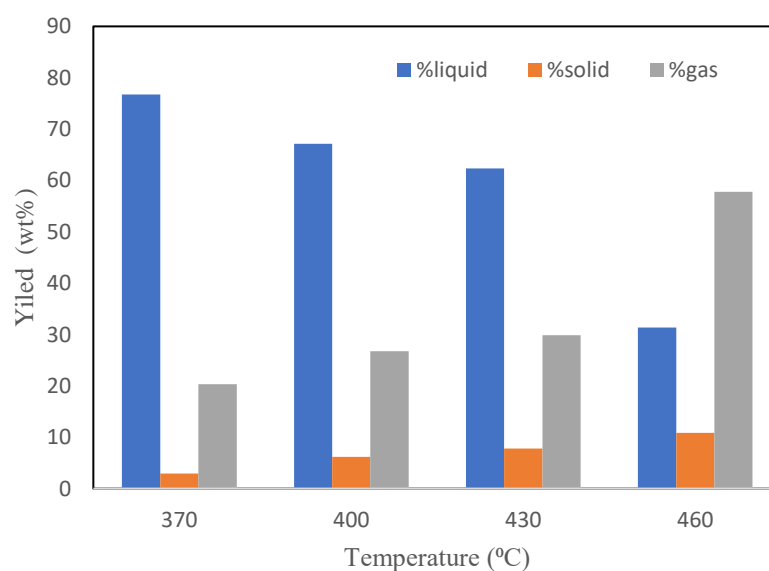
Catalyst	Acidity (mmol NH <sub>3</sub> /g)	
	Weak (100 - 350 <sup>o</sup> C)	Medium (350 - 550 <sup>o</sup> C)
5%Ni/Beta	0.305	0.304
5%Ni/HY	0.441	0.472

การวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Temperature-Programmed Desorption (TPD) จากรูปที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 แสดงโปรไฟล์การดูดซับแอมโมเนียของกรด พบว่าเกิดพีคขึ้นตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิที่ 100 ไปจนถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งจะแสดงค่าความแรงของกรด (acid strength) จากต่ำไปจนถึงสูง พบว่าทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY และ 5%Ni/Beta มีทั้ง

ความเป็นกรดอ่อน และค่าความเป็นกรดปานกลางทั้งคู่ โดยกราฟของทั้ง 2 ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะเกิดพีคที่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน แสดงถึงค่า acid strength ที่ใกล้เคียงกัน แต่จะพบได้ว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY จะมีค่าความเป็นกรด (acid site) มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/Beta โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY จะมีค่าความเป็นกรดอ่อนอยู่ที่ 0.305 มิลลิโมลของแอมโมเนียต่อกรัม และความเป็นกรดกลางอยู่ที่ 0.304 มิลลิโมลของแอมโมเนียต่อกรัม ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/Beta จะมีค่าความเป็นกรดอ่อนอยู่ที่ 0.305 มิลลิโมลของแอมโมเนียต่อกรัมและความเป็นกรดกลางอยู่ที่ 0.304 มิลลิโมลของแอมโมเนียต่อกรัม

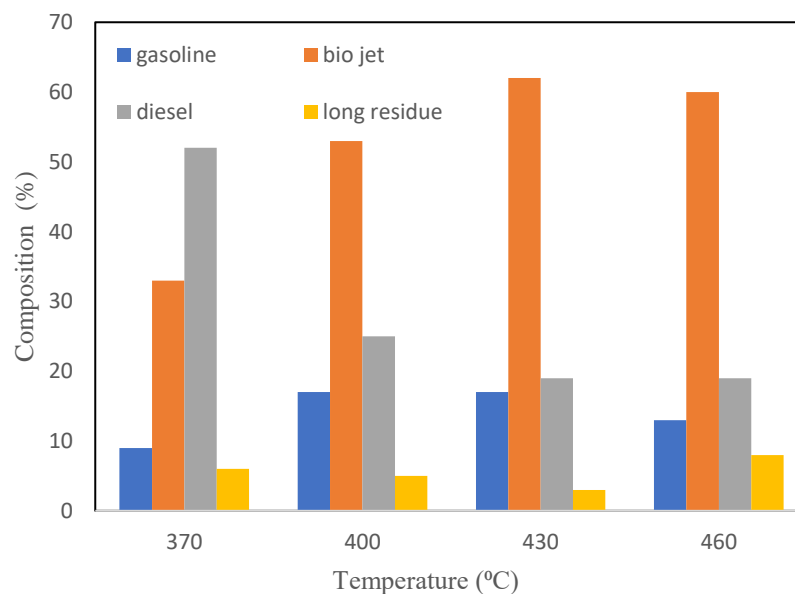
#### 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา

การศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยในการทดลองนี้ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดท์ ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และมีการปั่นกววนอยู่ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที โดยใช้ซีโอไลต์ 2 ชนิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบไปด้วย 5%Ni/Beta และ 5%Ni/HY โดยจะใส่ลงไปปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณน้ำมันปาล์มโอเลอิน 15 กรัม และศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองดังนี้ 370, 400, 430 และ 460 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ 5%Ni/Beta เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

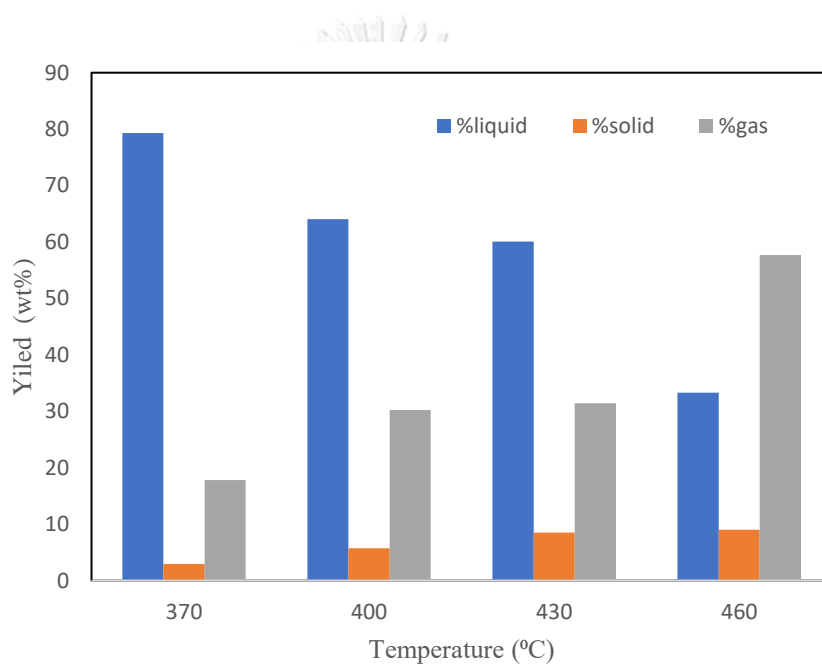




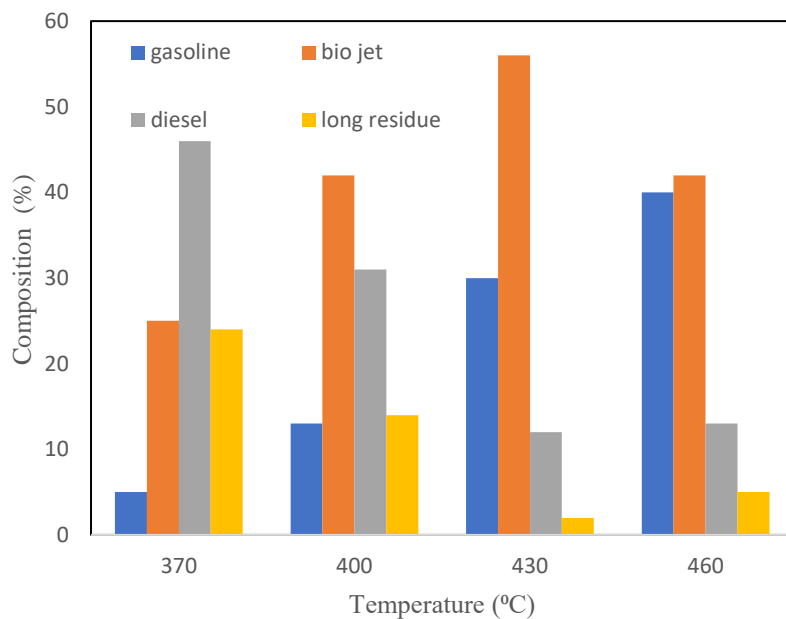
รูปที่ 4.4 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมันโดยใช้ 5%Ni/Beta เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เป็นอย่างมาก พบว่าที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีลักษณะทางกายภาพค่อนข้างจะหนืด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 400, 430 จนถึง 460 องศาเซลเซียสจะให้น้ำมันที่มีความหนืดลดลงและใสขึ้น รูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4 เมื่อใช้ 5%Ni/Beta เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองจาก 370 ไปเป็น 400 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพอากาศยาน และแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นจาก 32 ไปเป็น 52 เปอร์เซ็นต์ และ 8 ไปเป็น 17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนดีเซลมีร้อยละผลได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 52 ไปเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีค่าลดลงมาจาก 76 เหลือ 67 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อาจเกิดจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดโค้กเพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละผลได้ที่แก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 20 ไปเป็น 27 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง โดยจะเห็นได้จากดีเซลแตกตัวไปเป็นเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพ แก๊สโซลีน และ แก๊สไฮโดรคาร์บอน ต่อมาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองจาก 400 ไปเป็น 430 องศาเซลเซียส ก็จะส่งผลคล้ายเดิมดังกล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ต่างกันตรงที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว และ แก๊ส มีค่าใกล้เคียงเดิม และให้ร้อยละผลได้ที่ เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพมากที่สุดคือ 61 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองขึ้นไป

จนถึง 460 องศาเซลเซียส พบว่าดีเซล และเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน มีค่าร้อยละผลได้ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวก็ลดลงอย่างมากเหลือเพียง 31 เปอร์เซ็นต์ และเกิดแก๊สมากขึ้นถึง 58 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากการที่ไฮโดรคาร์บอนเหลวแตกตัวต่อไปเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงในรูปของแก๊ส โดยพบว่าอุณหภูมิในการทดลองที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพ และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด คือ 430 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.6 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

ในทำนองเดียวกัน เมื่อใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีลักษณะทางกายภาพค่อนข้างจะหนืด แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 400, 430 จนถึง 460 องศาเซลเซียสจะให้น้ำมันที่มีความหนืดลดลงและใสขึ้น รูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองจาก 370 ไปเป็น 400 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพ และแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นจาก 25 ไปเป็น 42 เปอร์เซ็นต์ และ 5 ไปเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนดีเซล และกากคาร์บอนมีร้อยละผลได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัดจาก 45 ไปเป็น 31 เปอร์เซ็นต์ และ 23 ไปเป็น 14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และยังพบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีค่าลดลงมากกว่า 79 เหลือ 63 เปอร์เซ็นต์ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อาจเกิดจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดโค้กเพิ่มขึ้น ส่วนร้อยละผลได้ที่เป็นแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 18 ไปเป็น 30 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดการแตกตัวของไฮโดรคาร์บอนสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลงได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทดลองสูงขึ้น โดยจะเห็นได้จากดีเซล และกากไฮโดรคาร์บอนแตกตัวไปเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน แก๊สโซลีน และแก๊สไฮโดรคาร์บอน ต่อมาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองจาก 400 ไปเป็น 430 องศาเซลเซียส ก็จะส่งผลคล้ายเดิมดังกล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ต่างกันตรงที่ร้อยละผลได้ของ

ผลิตภัณฑ์เหลว และแก๊สมีค่าใกล้เคียงเดิม และให้ร้อยละผลได้ที่เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานมากที่สุด อยู่ที่ 55 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองขึ้นไปจนถึง 460 องศาเซลเซียส พบว่า ดีเซลและไฮโดรคาร์บอนหนักมีค่าร้อยละผลได้ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในส่วนของร้อยละผลได้ที่เป็นแก๊สโซลีนมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดถึง 40 เปอร์เซ็นต์ และเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพลดลงมาเหลือเพียง 42 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวก็ลดลงอย่างมากเหลือเพียง 32 เปอร์เซ็นต์ และเกิดแก๊สมากขึ้นถึง 58 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากการที่ไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วงเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพเกิดการแตกตัวต่อไปเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงในรูปของแก๊สโซลีน และ แก๊สไฮโดรคาร์บอน

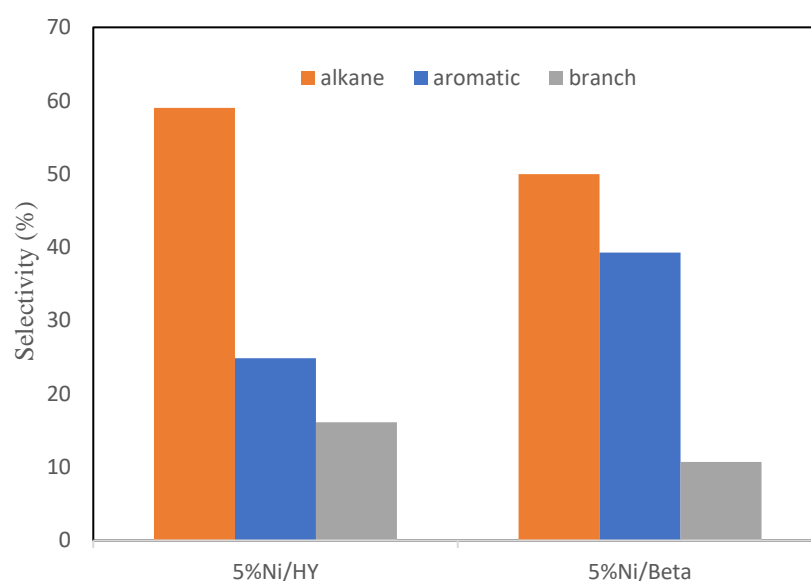
ซึ่งจากแนวโน้มของทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็น 5%Ni/Beta และ 5%Ni/HY ดังกล่าวมาข้างต้นนั้น ในช่วงแรกที่อุณหภูมิในการทดลองยังไม่สูงมาก ไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในน้ำมันปาล์มโอเลอิน จะเกิดการ ตัดสายโซ่ที่ตำแหน่ง  $\beta$  ได้กรดไขมันของไตรกลีเซอไรด์ ออกมาภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเพื่อจะไปเกิดเป็นกรดคาร์บอกซิลิกต่อไป และเหลือเป็นไตรกลีเซอไรด์ ต่อมาไตรกลีเซอไรด์เกิดการแตกตัวต่อไปเป็น โมโนกลีเซอไรด์ และจะแตกตัวต่อไปเป็นกรดไขมัน (FFAs) และกลีเซอรอล ต่อมาผลของอุณหภูมิจะทำให้เกิดปฏิกิริยา ดีคาร์บอกซิเลชัน และดีคาร์บอนิลเลชัน ได้เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในรูปอนุโมลอิสระ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ ก็จะมีการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนต่อไปเรื่อยๆ จากไฮโดรคาร์บอนหนักกลายเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและเบา จนกลายเป็นแก๊สในที่สุด

โดยจะสรุปได้ว่าทั้งตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/Beta และ 5%Ni/HY จากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะใส่ลงปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาณน้ำมันปาล์มโอเลอิน 15 กรัม ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจน 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และมีการปั่นกวนอยู่ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที โดยอุณหภูมิในการทดลองที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุดคือ 430 องศาเซลเซียส

#### 4.4 ผลของชนิดของตัวรองรับซีโอไลต์

การศึกษาผลของซีโอไลต์ 2 ชนิดที่ใช้เป็นตัวรองรับสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองโดยได้จำแนกองค์ประกอบภายในโครงสร้างผลิตภัณฑ์เพื่อศึกษาปริมาณ โซ่ตรง โซ่กิ่ง หรือแอมโรมาติก โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) โดยใช้คอลัมน์ในการวิเคราะห์คือ

รุ่น HP-5MS ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยจะใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณน้ำมันปาล์มโอเลอิน 15 กรัม ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และมีการปั่นกวนอยู่ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.7 การเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยมี 5%Ni/Beta และ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY จะให้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลเคน หรือไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง มากกว่าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 5%Ni/Beta ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ และให้ไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งมากกว่า 7 เปอร์เซ็นต์ มากไปกว่านั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY ยังให้ผลิตภัณฑ์เป็นแอมโรมาติกน้อยกว่า 5%Ni/Beta ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY มีความเป็นกรด (acid site) มากกว่า 5%Ni/Beta ทั้งจากผลของ TPD และสัดส่วนของ Si/Al ที่น้อยกว่าของ 5%Ni/HY มีค่าเท่ากับ 6 ทำให้มีตำแหน่ง Bronstead acid ที่มากกว่า เมื่อเทียบกับ 5%Ni/Beta โดยสัดส่วน Si/Al ของ 5%Ni/Beta เท่ากับ 27 ทำให้ได้โซ่ตรงมากกว่า และเกิดแอมโรมาติกน้อยกว่าเมื่อใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [31] และอาจจะเกี่ยวกับสมบัติทางกายภาพและความเป็นกรดที่เหมาะสมแก่การแตกตัวไปเป็นโซ่ตรง และง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอ

ไรเซชันมากกว่า โดยในซีไอไฮด์ชนิดเอชวายจะมีโครงสร้างแบบ FAU ส่วนซีไอไฮด์ชนิดบีตาจะมีโครงสร้างแบบ BEA [31] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY ให้ผลิตภัณฑ์เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพที่มีคุณภาพดีกว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/Beta โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY ให้ค่าการเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน เกิดไปเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง 58 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่ง 14 เปอร์เซ็นต์ และแอรอมาติก 24 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิในการทดลอง 430 องศาเซลเซียส

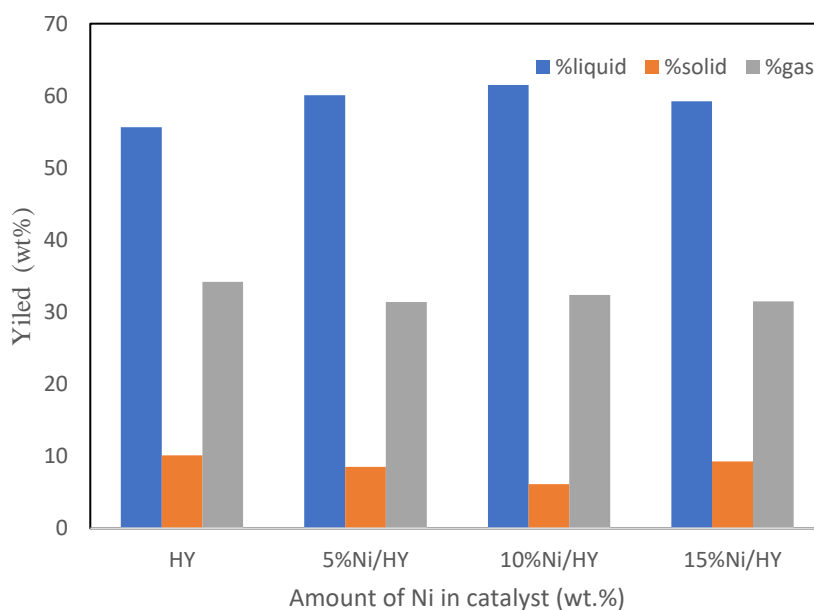
ต่อมาเมื่อนำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการทดลอง โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) โดยใช้ FID และ TCD เป็นดีเทคเตอร์ จากตารางที่ 4.4 พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแก๊สขนาดเล็ก (C1-C4) เช่น มีเทน อีเทน เอทิลีน โดยจะเกิดเป็นมีเทนมากที่สุดถึง 33 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้ผลพลอยได้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ แสดงถึงการกำจัดแก๊สออกซิเจน ผ่านการเกิดปฏิกิริยา Decarboxylation และ Decarbonylation

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอน

แก๊ส	ผลการทดลอง
ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊ส %	
CO	1.064087062
CO <sub>2</sub>	3.761375851
ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอน %	
C1	33.62425152
C2	2.202133459
C3	0.392314323
C4	0.275652441

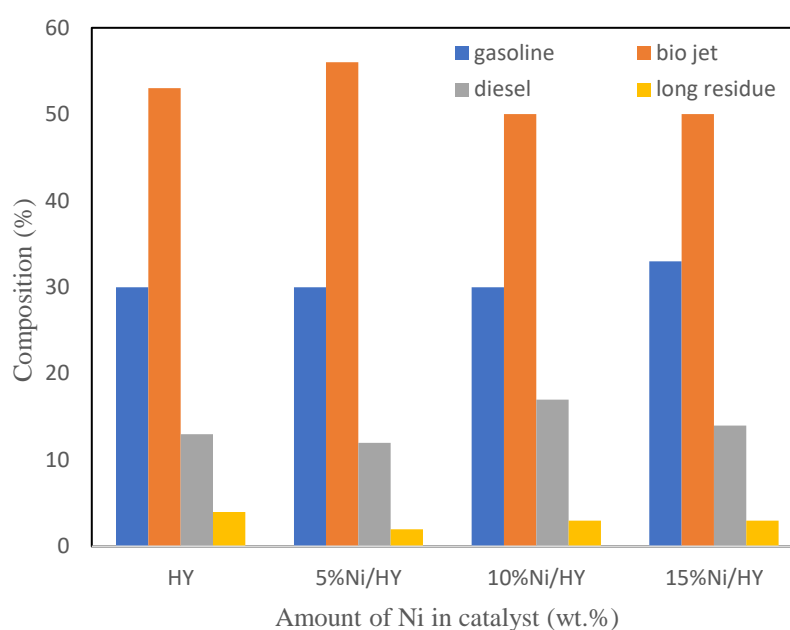
#### 4.5 ผลของปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับเฮชวายซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

การศึกษาผลของปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเฮชวายที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยในการทดลองนี้ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ที่ความดันบรรยากาศ ไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และมีการปั่นกววนอยู่ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที โดยจะใช้ซีโอไลต์ชนิดเฮชวายเป็นตัวรองรับ โดยจะใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณน้ำมันปาล์มโอเลอิน 15 กรัม และศึกษาผลของปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับเฮชวายซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดลองดังนี้ 0, 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองรูปที่ 4.8 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับเฮชวายซีโอไลต์ จาก 0 จนถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แก๊สไฮโดรคาร์บอน และของแข็งมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ซีโอไลต์เฮชวายเป็นตัวรองรับ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 พบว่า เมื่อเราเพิ่มปริมาณนิกเกิลจาก 0 เป็น 5 เปอร์เซ็นต์ร้อยละผลได้ที่เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ต่อมาเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลไปเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าร้อยละผลได้ที่เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานลดลงเหลือ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลขึ้นไปอีกเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าร้อยละผลได้ที่เป็นเชื้อเพลิงอากาศยาน มีค่าใกล้เคียงเดิมแทบไม่เปลี่ยนแปลง



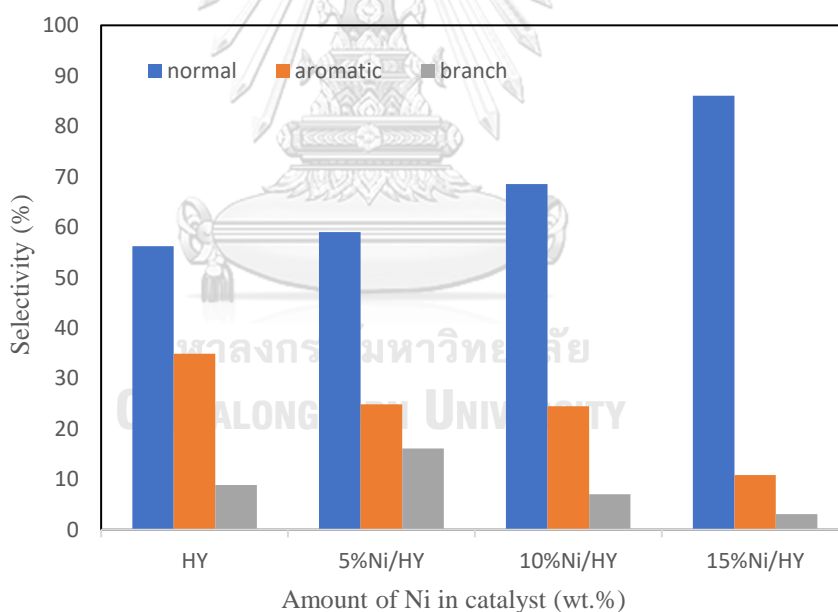
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.9 ร้อยละขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ซีโอไลต์เอชวายเป็นตัวรองรับ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อจำแนกองค์ประกอบภายในโครงสร้างเพื่อศึกษาปริมาณ โชนโตรเจน ไช่กิ่ง หรือแอโรมาติก โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) โดยใช้คอลัมน์ในการวิเคราะห์คือ รุ่น HP-5MS ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลจาก 0 ไปเป็น 5 เปอร์เซ็นต์ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นอัลเคนหรือโชนโตรเจนมีค่าใกล้เคียงเดิม ส่วนเกิดไปเป็นโชนโตรเจนมากขึ้น จาก 8 ไปเป็น 17 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของแอโรมาติก มีค่าลดลงมาจาก 36 เหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ ต่อมาเมื่อ



เพิ่มปริมาณนิกเกิลไปเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดเป็นอัลเคน เพิ่มมากขึ้น จาก 60 ไปเป็น 68 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของปริมาณแอรอมาติกมีค่าใกล้เคียงเดิม และปริมาณโซ่กิ่งกลับมีค่าลดลงเหลือ เท่ากับก่อนการเติมนิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวาย กล่าวได้ว่าในส่วนของโซ่กิ่งที่หายไปจะ ไปเกิดเป็นโซ่ตรงที่เพิ่มขึ้น ต่อมาเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลขึ้นไปอีกถึง 15 เปอร์เซ็นต์ พบว่าผลผลิตภัณฑ์ที่ได้ เกิดเป็นอัลเคนเพิ่มมากขึ้นมากไปจนถึง 85 เปอร์เซ็นต์ และในส่วนของแอรอมาติกลดลงไปมากเหลือ เพียง 10 เปอร์เซ็นต์ และโซ่กิ่งแทบไม่เกิดเลยเหลือเพียงแค่ 4 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่ม ปริมาณนิกเกิลมากขึ้น จะทำให้ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความเลือกสรรไปเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงมากขึ้น สูงสุดจากการทดลองถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ที่ปริมาณนิกเกิล 15 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นเพราะนิกเกิลมี ความสามารถในการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน ทำให้ที่ปริมาณนิกเกิลสูงๆจะเกิดการดูดซับแก๊สไฮโดรเจน ได้ดี ทำให้เกิดการ hydrogenated ของสายโซ่โมเลกุลมากขึ้นจึงก่อให้เกิดไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงมาก ขึ้น



รูปที่ 4.10 การเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยมีนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิด เอชวายที่ปริมาณนิกเกิลต่างๆ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

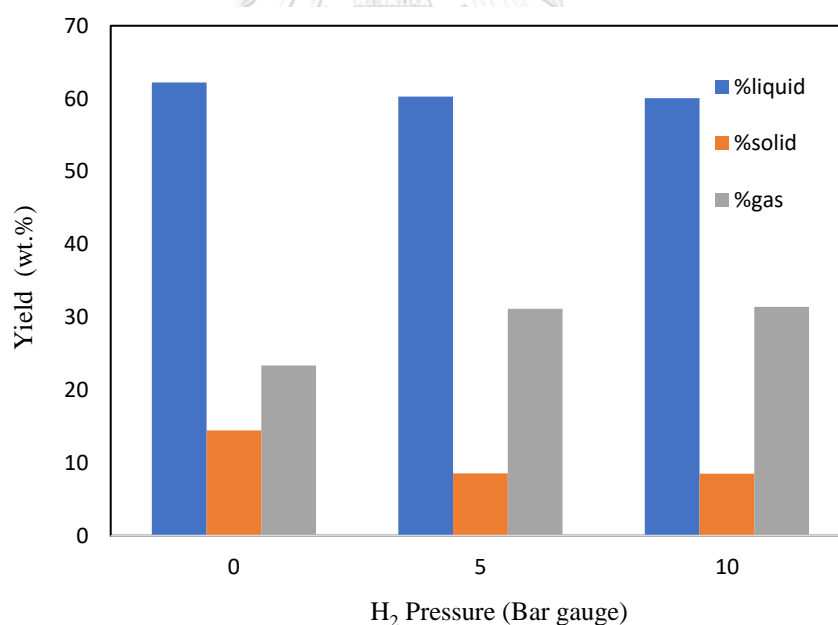
เมื่อวิเคราะห์จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่ง แคลอริมิเตอร์ differential scanning calorimeter (DSC822) โดยจะทำการลดอุณหภูมิจาก 30 ไปยัง - 50 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความเย็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยจะใช้ปริมาณสารตัวอย่าง 8 มิลลิกรัม และใช้แก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลจาก 0 เป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจุดเยือกแข็งลดลงจาก -14.63 ไปยัง - 25.35 องศาเซลเซียส อาจเป็นเพราะปริมาณไฮโดรคาร์บอนแอโรมาติกที่ลดลง โดยแอโรมาติกมีการจัดเรียงตัวของพันธะอย่างหนาแน่นและเรียงตัวชิดกันมาก จำเป็นต้องใช้พลังงานปริมาณมากในการสลายพันธะ ดังนั้นถ้ามีแอโรมาติกอยู่ปริมาณมากเยอะจุดเดือดก็ยิ่งมากนั่นเอง และไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งที่เพิ่มขึ้น โดยระหว่างสายโซ่โมเลกุลของโซ่กิ่งจะไม่สามารถเรียงแนบชิดกันได้เนื่องจากมีกิ่งคาร์บอนขัดขวางอยู่ทำให้ใช้พลังงานในการสลายพันธะไม่มากนัก ดังนั้นถ้ามีโซ่กิ่งอยู่ปริมาณมากเยอะจุดเดือดก็ยิ่งน้อยนั่นเอง ต่อมาพอเพิ่มปริมาณนิกเกิลเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจุดเยือกแข็งเพิ่มขึ้นเป็น -9.33 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากปริมาณไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงมากขึ้น โดยโซ่ตรงจะมีการจัดเรียงตัวระหว่างสายโซ่เรียงตัวชิดกันมากเนื่องจากไม่มีกิ่งมาคอยขัดขวาง ซึ่งจำเป็นต้องใช้พลังงานมากกว่าโซ่กิ่งในการสลายพันธะ ดังนั้นถ้าโซ่ตรงอยู่ปริมาณมากจุดเดือดก็ยิ่งมากขึ้นนั่นเอง และปริมาณโซ่กิ่งที่ลดลง และยังพบว่าที่ปริมาณนิกเกิลเป็น 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณดีเซล และกาคาร์บอนอยู่มาก ต่อมาเมื่อเพิ่มปริมาณนิกเกิลเป็น 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจุดเยือกแข็งลดลงเหลือ -15.16 องศาเซลเซียส แม้ว่าปริมาณโซ่ตรงจะเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณแอโรมาติก และโซ่กิ่งก็ลดลงไปมากเช่นกัน สรุปได้ว่า ที่ปริมาณนิกเกิล 5 เปอร์เซ็นต์ บนตัวรองรับซีโอไลต์เอชวาย ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีจุดเยือกแข็งต่ำสุดที่ -25.35 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.6 จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ปริมาณนิกเกิลต่างๆบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวาย

Sample	T <sub>onset</sub>
HY	-14.63
5%Ni/HY	-25.35
10%Ni/HY	-9.33
15%Ni/HY	-15.16

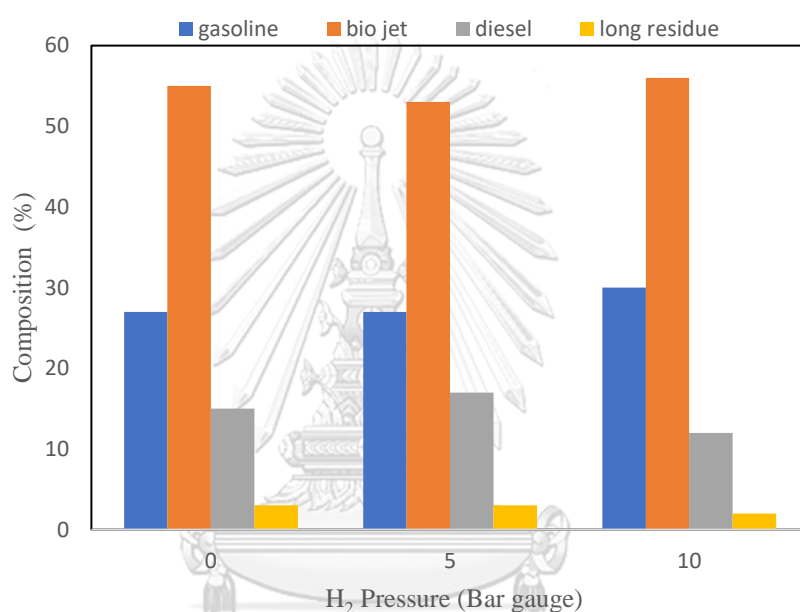
#### 4.6 ผลของความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น

การศึกษาผลของความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการแตกตัวของของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยในการทดลองนี้ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และมีการปั่นกววนอยู่ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที โดยจะใช้ซีโอไลต์ชนิดเอชวายเป็นตัวรองรับ โดยจะใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาณน้ำมันปาล์มโอเลอิน 15 กรัม และศึกษาผลของความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองดังนี้ 0, 5 และ 10 บาร์ จากผลการทดลองรูปที่ 4.11 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น จาก 0 จนถึง 10 บาร์ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงเพียงเล็กน้อย แก๊สไฮโดรคาร์บอนลดลงเหลือ 23 เปอร์เซ็นต์ และของแข็งมีค่าลดลงเหลือเพียง 8 เปอร์เซ็นต์ และที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 และ 10 บาร์ ให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาเป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊สไฮโดรคาร์บอน ที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

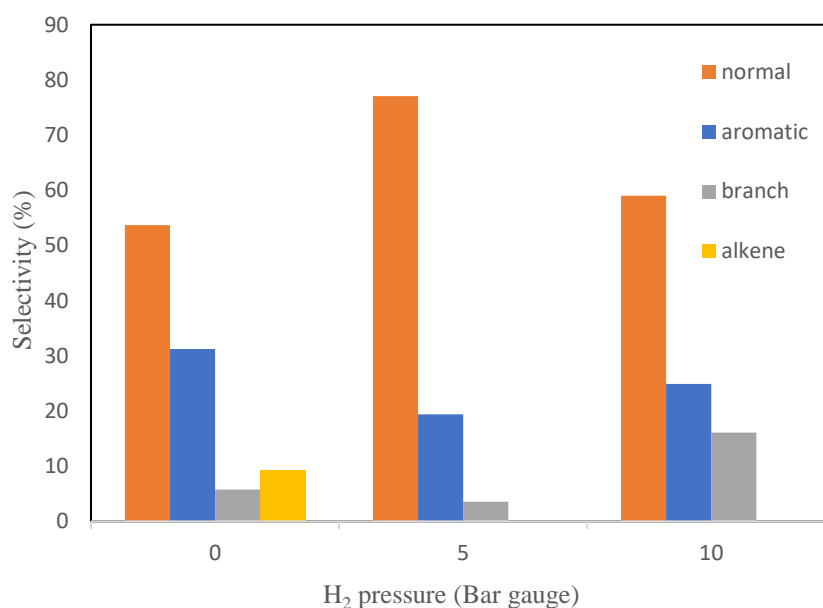
เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 0, 5 และ 10 บาร์ จะให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง แก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน ใกล้เคียงกัน โดยที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ จะเกิด แก๊สโซลีน และน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน มากที่สุด ที่ 30 และ 56 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเกิดดีเซล และ กากน้ำมันน้อยที่สุด



รูปที่ 4.12 ร้อยละขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงแก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อจำแนกองค์ประกอบภายในโครงสร้างเพื่อศึกษาปริมาณโซ่ตรง โซ่กิ่ง หรือแอมโรมาติก โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) โดยใช้คอลัมน์ในการวิเคราะห์คือ รุ่น HP-5MS ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่อเพิ่มความไฮโดรเจนดันในการทดลองจาก 0 เป็น 5 บาร์ ปริมาณอัลเคนหรือโซ่ตรงของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นมาจาก 55 ไปเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแอมโรมาติกลดลงจาก 31 เหลือเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของโซ่กิ่งมีค่าใกล้เคียงเดิมแทบไม่เปลี่ยนแปลง และแอลคีนหรือไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวลดลงจนแทบไม่เห็นเลย ต่อมาเมื่อเพิ่มความดันไฮโดรเจน

ขึ้นไปเป็น 10 บาร์ พบว่าปริมาณอัลเคนของผลิตภัณฑ์ลดลงมาเหลือ 60 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณแอโรมาติกลดลงจาก 32 เหลือเพียง 25 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณโซ่กิ่งเพิ่มขึ้นมาจาก 4 ไปเป็น 15 เปอร์เซ็นต์ กล่าวคือ ปริมาณโซ่ตรง และแอโรมาติกที่ลดลง จะไปเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งนั่นเอง

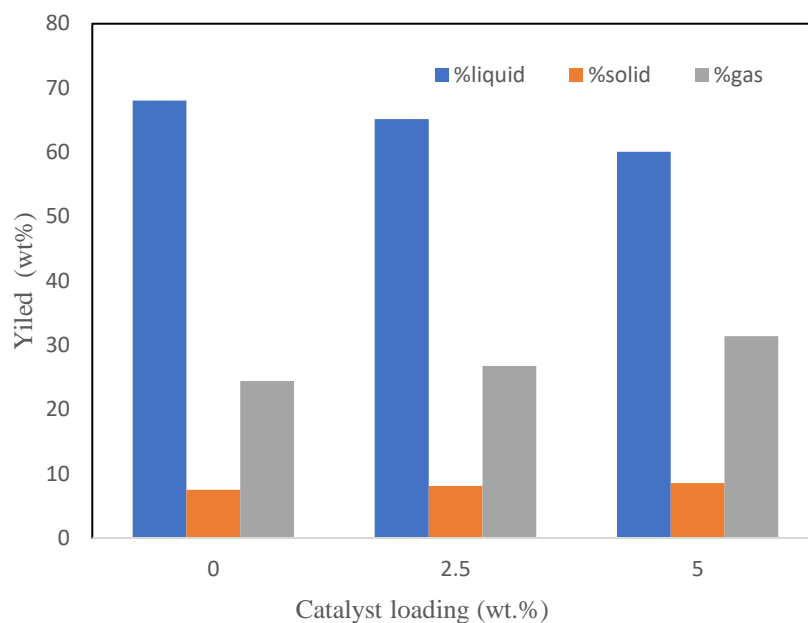


รูปที่ 4.13 การเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยมีนิกเกิลที่รองรับด้วยซีโอไลต์ชนิดเอชวายที่ปริมาณนิกเกิลต่างๆเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

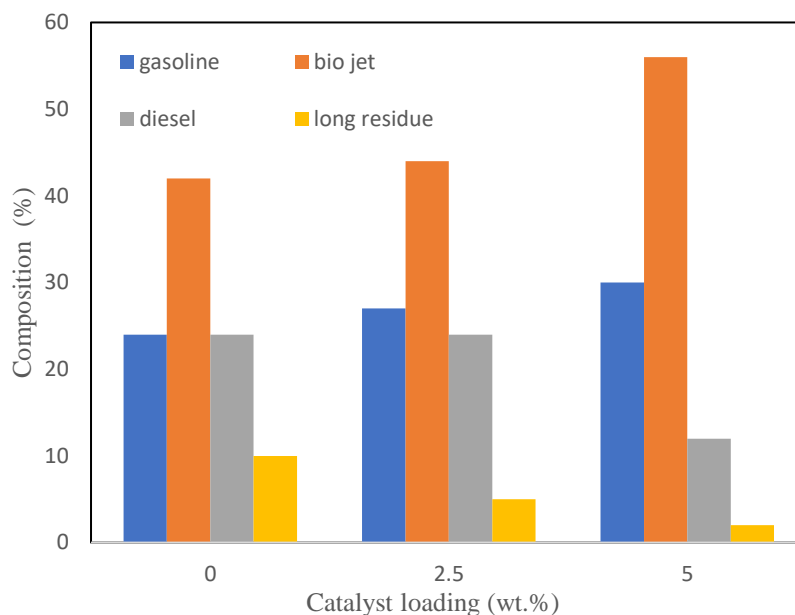
#### 4.7 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวาย ที่มีต่อการแตกตัวของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยในการทดลองนี้ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดท์ ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และมีการปั่นกวอยู่ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที และศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ในการทดลองดังนี้ 0, 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 68 เหลือ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่เป็นเช่นนี้เพราะตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนให้มีขนาดเล็กลงจากการแตกตัวด้วยความร้อน จึงเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง



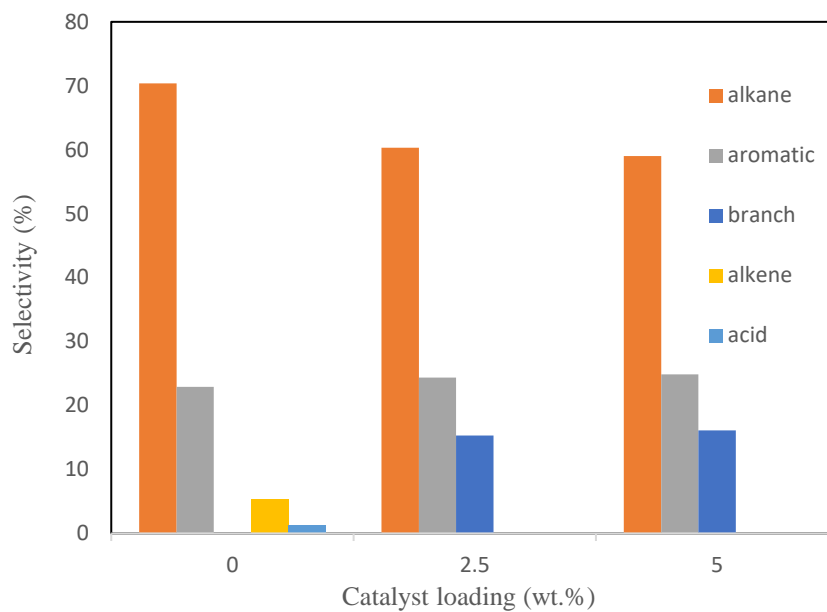
รูปที่ 4.14 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่อมีการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจาก 0 ไปยัง 2.5 เปอร์เซ็นต์ ร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีน และ น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเกิดการไฮโดรคาร์บอนหนัก หรือการไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนนั่นเอง ต่อมาเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไปจนถึง 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าร้อยละผลได้ของแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ร้อยละผลได้ของน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานเพิ่มขึ้นจาก 44 ไปถึง 57 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่ากากน้ำมัน หรือไฮโดรคาร์บอนหนัก และดีเซลมีร้อยละผลได้ลดลงมาก เนื่องมาจากกากน้ำมันและดีเซล เกิดจากการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กกว่าเดิมซึ่งมีค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดอยู่ในช่วงน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานนั่นเอง



รูปที่ 4.15 ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วง แก๊สโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน ดีเซล และกากน้ำมัน โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อจำแนกองค์ประกอบภายในโครงสร้างเพื่อศึกษาปริมาณ โซ่ตรง โซ่กิ่ง และแอมโรมาติก โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบด้วยแมสสเปกโตรมิเตอร์ (gas chromatography mass spectrometer, GC-MS) โดยใช้คอลัมน์ในการวิเคราะห์คือ รุ่น HP-5MS ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 พบว่า ในตอนที่ยังไม่ได้ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปในการทดลอง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณอัลเคนหรือโซ่ตรงมากที่สุดถึง 70 เปอร์เซ็นต์ แต่จะเกิดไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งอยู่เลย โดยจะพบอัลคีนหรือไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว และกรดไขมันหลงเหลืออยู่เล็กน้อย ต่อมาเมื่อเริ่มใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา จาก 2.5 ไปถึง 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะเกิดไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งขึ้นประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงลดลงไปเหลือประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และไม่เกิดไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว กับกรดไขมันหลงเหลืออยู่ในโครงสร้าง อาจเป็นเพราะเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา อาจส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมไรเซชันไปเกิดเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่กิ่งได้ และพบว่าที่ปริมาณการตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรง โซ่กิ่ง และแอมโรมาติก แบบไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 4.16 การเลือกสรร (Selectivity) ของผลิตภัณฑ์เหลว โดยใช้ 5%Ni/HY เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันปาล์มโอเลอิน เพื่อแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันเครื่องบิน โดยในน้ำมันปาล์มโอเลอินมีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันที่มีไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลสูงอยู่ เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวไปเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง และได้ผลิตภัณฑ์เหลวเกิดขึ้น และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ในเชิงคุณภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่นเพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือด และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบกับแมสสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อจำแนกองค์ประกอบภายในโครงสร้าง โดยได้ศึกษาตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 370 – 460 องศาเซลเซียส ชนิดของตัวรองรับซีโอไลต์ เบต้า และเอชวาย ปริมาณนิกเกิลบนตัวรองรับซีโอไลต์ 0 – 15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 0 - 10 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0 – 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 430 องศาเซลเซียส โดยใช้นิกเกิล 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บนตัวรองรับซีโอไลต์ชนิดเอชวายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
- ศึกษาการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีองค์ประกอบของโลหะออกไซด์ชนิดอื่นๆ
- ศึกษาชนิดของตัวรองรับซีโอไลต์อื่นๆ
- ศึกษาเวลาที่ใช้ในการทดลอง
- ศึกษาความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้นที่สูงขึ้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ที่ใช้ในการทดลองสามารถทนความดันได้สูงสุดเมื่อใช้ความดันบรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้นเพียง 10 บาร์

## บรรณานุกรม

1. Filho GNR, B.D., Djega-Mariadassou G. Formation of alkanes, *alkylbenzenes during the catalytic hydrocracking of vegetable oils*. Fuel, 1993. **72**: p. 543-549.
2. ไชยเวช, ศ.ด.ป., ปีโตรเลียมเทคโนโลยี. 2005. 1000.
3. Gutiérrez-Antonio, C., et al., *A review on the production processes of renewable jet fuel*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **79**: p. 709-729.
4. Blakey, S., L. Rye, and C.W. Wilson, *Aviation gas turbine alternative fuels: A review*. Proceedings of the Combustion Institute, 2011. **33**(2): p. 2863-2885.
5. Ashraful, A.M., et al., *Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review*. Energy Conversion and Management, 2014. **80**: p. 202-228.
6. L. O, M.L.C.P.D.S., *Comparative study of calorific value of rapeseed, soybean, jatropha curcas and crambe biodiesel*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013(Energies Power Quality): p. 1-5.
7. <51 Chemical-composition-and-fuel-properties-of-alternative-jet-fuels2018BioResourcesOpen-Access.pdf>.
8. Zhang, C., et al., *Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: Progress, challenges, and opportunities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. **54**: p. 120-138.
9. I.A. Al-Nuaimi, M.B., M. Selam, H.A. Choudhury, M.M. El-Halwagi, and N.O. Elbashir, *Optimization of synthetic jet fuels aromatic/parafnic composition via experimental & property integration methods*. Chem. Eng. Technol, 2016: p. 1-23.
10. Silva, L.N., et al., *Biokerosene and green diesel from macauba oils via catalytic deoxygenation over Pd/C*. Fuel, 2016. **164**: p. 329-338.
11. Sousa, F.P., et al., *Simultaneous deoxygenation, cracking and isomerization of palm kernel oil and palm olein over beta zeolite to produce biogasoline, green*

- diesel and biojet-fuel*. Fuel, 2018. **223**: p. 149-156.
12. ; Available from:  
<https://www.strategyr.com/MarketResearch/ViewInfoGraphNew.asp?code=MCP-2226>.
  13. Galadima, A. and O. Muraza, *Catalytic upgrading of vegetable oils into jet fuels range hydrocarbons using heterogeneous catalysts: A review*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015. **29**: p. 12-23.
  14. Vásquez, M.C., E.E. Silva, and E.F. Castillo, *Hydrotreatment of vegetable oils: A review of the technologies and its developments for jet biofuel production*. Biomass and Bioenergy, 2017. **105**: p. 197-206.
  15. Chu, P.L., et al., *Process modeling of hydrodeoxygenation to produce renewable jet fuel and other hydrocarbon fuels*. Fuel, 2017. **196**: p. 298-305.
  16. X. Li, X.L., Y. Jin, J. Li, H. Zhang, A. Zhang, J. Xie, *Heterogeneous sulfur-free hydrodeoxygenation catalysts for selectively upgrading the renewable bio-oils to second generation biofuels*. Renew. Sustain. Energy Rev., 2017.
  17. C.W. Wei, T.L., M. Jennifer, Z. Yanan, T. Eric, B. Liaw, W. Ethan, B. Mary,, *Review of Biojet fuel Conversion Technologies*. National Renewable Energy Laboratory, 2016.
  18. J.E. Santillan, 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.
  19. R.W. Gosselink, S.A.W.H., S.W. Chang, Jv Haveren, Krijn P. de Jong, and D.S.v.E. J.H. Bitter, *Reaction pathways for the deoxygenation of vegetable oils and related model compounds*. ChemSusChem, 2013: p. 1–20.
  20. Mohammad, M., et al., *Overview on the production of paraffin based-biofuels via catalytic hydrodeoxygenation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 121-132.
  21. Hermida, L., A.Z. Abdullah, and A.R. Mohamed, *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.
22. X. Zhao, L.W., S. Cheng, J. Julson, *Review of heterogeneous catalysts for catalytically upgrading vegetable oils into hydrocarbon biofuels*. Catalysts, 2017. **7**: p. 1–25.
  23. da Mota, S.A.P., et al., *Production of green diesel by thermal catalytic cracking of crude palm oil (Elaeis guineensis Jacq) in a pilot plant*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014. **110**: p. 1-11.
  24. Palanisamy, S. and B.S. Gevert, *Study of non-catalytic thermal decomposition of triglyceride at hydroprocessing condition*. Applied Thermal Engineering, 2016. **107**: p. 301-310.
  25. R.Y. Sudhakara, S.K.M., S. Debaprasad, *Hydrodeoxygenation of karanja oil over supported nickel catalysts: influence of support and nickel loading*. Catal. Sci. Technol., 2015. **1**: p. 1–10.
  26. Kim, S.K., et al., *Production of renewable diesel via catalytic deoxygenation of natural triglycerides: Comprehensive understanding of reaction intermediates and hydrocarbons*. Applied Energy, 2014. **116**: p. 199-205.
  27. Sadrameli, S.M., *Thermal/catalytic cracking of liquid hydrocarbons for the production of olefins*. Catalytic cracking review, 2016. **Fuel 173** p. 285-297.
  28. Cheng, J., et al., *Optimizing catalysis conditions to decrease aromatic hydrocarbons and increase alkanes for improving jet biofuel quality*. Bioresour Technol, 2014. **158**: p. 378-82.
  29. Trieu, T.Q., et al., *Direct synthesis of iso-paraffin fuel from palm oil on mixed heterogeneous acid and base catalysts*. Monatshefte für Chemie - Chemical Monthly, 2017. **148(7)**: p. 1235-1243.
  30. Assoc. Prof. Dr. Chawalit Ngamcharussrivichai, A.P.D.N.H., *Catalyst Technology*. catalysis, 2011. **364**.
  31. Li, T., et al., *Hydrocracking of palm oil to jet biofuel over different zeolites*.

International Journal of Hydrogen Energy, 2016. **41**(47): p. 21883-21887.

32. Liu, Q., et al., *One-step hydrodeoxygenation of palm oil to isomerized hydrocarbon fuels over Ni supported on nano-sized SAPO-11 catalysts*. Applied Catalysis A: General, 2013. **468**: p. 68-74.



## ภาคผนวก ก

### การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว} = \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักของสารตั้งต้น (กรัม)}}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักของสารตั้งต้น (กรัม)}}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส} = 100 - (\text{ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เหลว} + \text{แข็ง})$$

$$\text{ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊ส} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคของสาร } A \times \text{ร้อยละแก๊สมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ใต้พีคของแก๊สมาตรฐาน}}$$

## ภาคผนวก ข

### การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด (Boiling Distillation)

การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC) วิเคราะห์ตามจุดเดือดของสาร ดังนี้

IBP – 170 °C = Gasoline

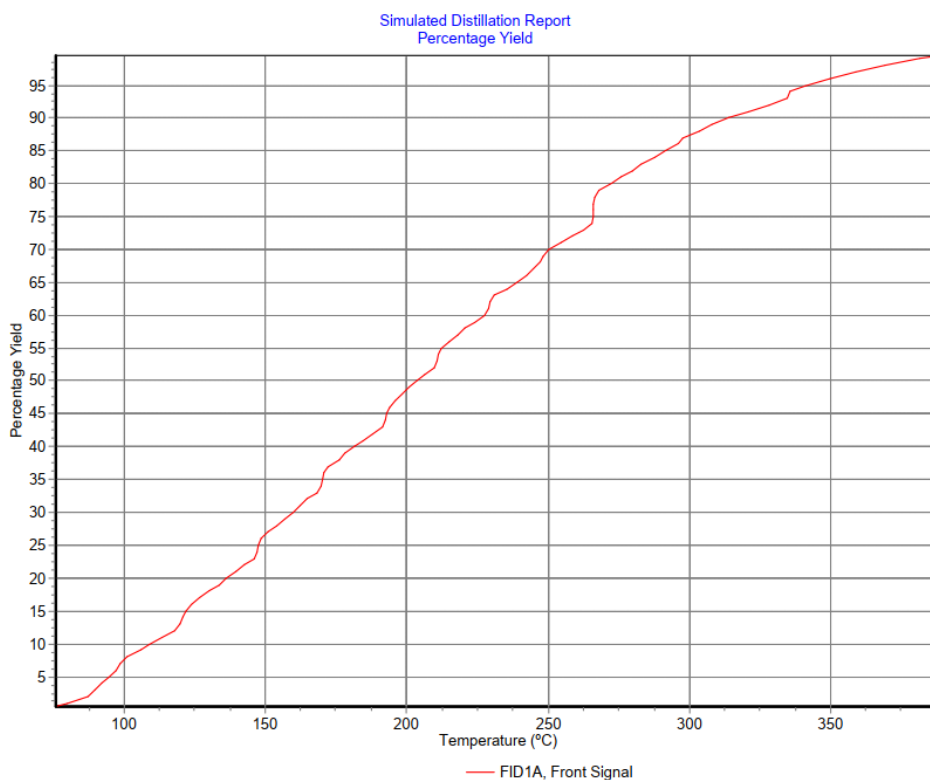
170 – 260 °C = Bio jet

260 – 370 °C = Diesel

370 – FBP °C = Long Residue

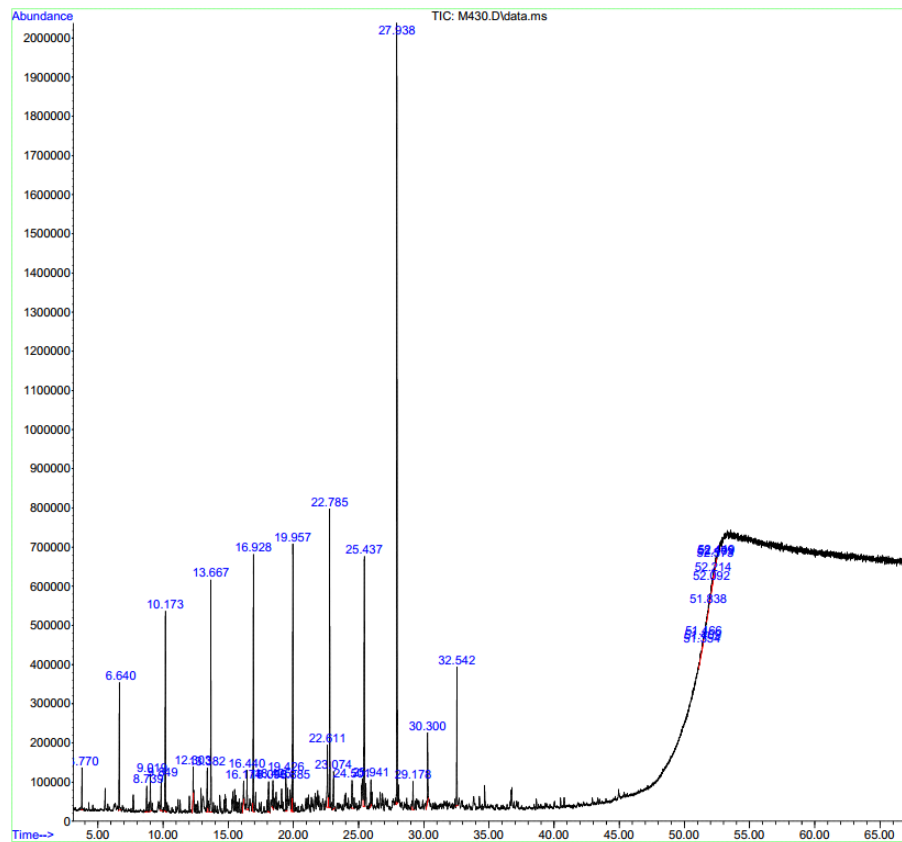
ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เพื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สโซลีน เชื้อเพลิงอากาศยาน และดีเซล ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ซึ่งใช้มาตรฐาน ASTM D2887 ในการวิเคราะห์ โดยตัวเครื่องจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี GC7890A ของบริษัทเอจิลেন্টเทคโนโลยีส์ จำกัด (ประเทศไทย) และใช้คอลัมน์ capillary รุ่น DB-1 ขนาด 10 เมตร x 0.53 มิลลิเมตร x 2.65 ไมโครเมตร ของบริษัท J&W Scientific จำกัด และในส่วนต่อมาจะเป็นซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulation distillation software)

ภาคผนวก ค  
ตัวอย่างกราฟแสดงค่าต่างๆ

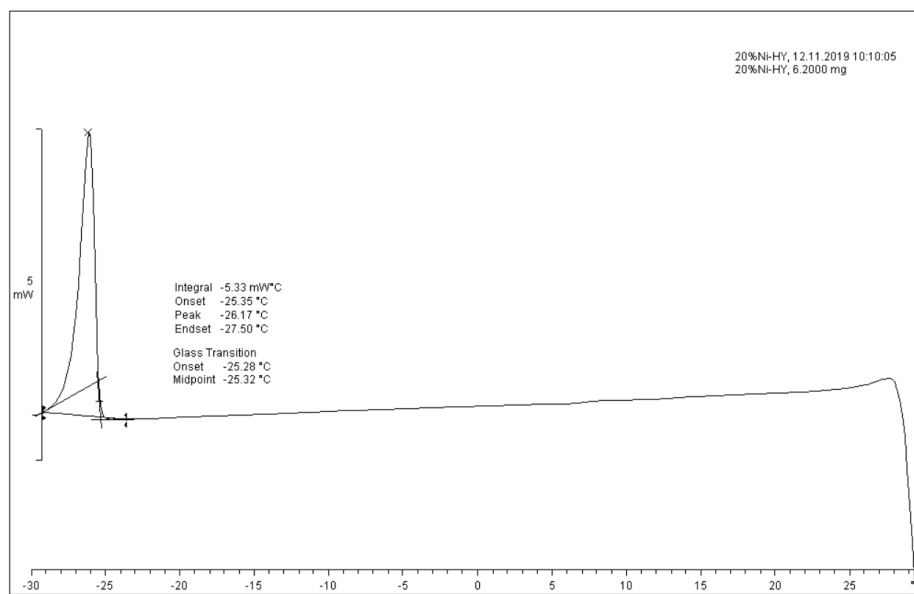


รูปที่ ข-3.2 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (distillation simulation gas chromatography, DGC) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 10%Ni/HY ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง





รูปที่ ข-3.2 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีประกอบ  
กับแมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5%Ni/HY ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก  
ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์  
เป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ ข-3.2 วิเคราะห์จุดเยือกแข็งของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง โดยใช้เครื่องดิฟเฟอเรนเชียล สแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ differential scanning calorimeter (DSC822)

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธนวัฒน์ สุขอนันต์
วัน เดือน ปี เกิด	5 มีนาคม 2537
สถานที่เกิด	สงขลา ประเทศไทย
วุฒิการศึกษา	B.Eng. (Petrochemical and Polymeric Materials) Silpakorn University
ที่อยู่ปัจจุบัน	197/111 หมู่ 7 ต.บางกรวย อ.บางกรวย จ.นนทบุรี 11130
ผลงานตีพิมพ์	ได้เข้าร่วมงานประชุมวิชาการ The 25th Symposium on Petroleum, Petrochemicals, and Polymers and The 10th Research Symposium on Petrochemical and Materials Technology (PPC & PETROMAT Symposium 2019) เมื่อวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2562 โดยนำเสนอผลงานวิจัยในรูปแบบโปสเตอร์และได้รับการตีพิมพ์งานวิจัยลงในบทความวิจัยของงานประชุมวิชาการในครั้งนี้ด้วย