

ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโคบอลต์โม่ลิบตี้นั่ม

นายศิริชาติ ชูโต



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROTREATING REACTION OF PALM OLEIN USING  
NICKEL COBALT MOLYBDENUM CATALYST

Mr. Sirachart Chuto



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

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของพอลิเมอร์โอเลฟินโดยใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

โดย

นายศิริชาติ ชูโต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.นริศรา ทองบุญชู)

ศิรชาติ ชูโต : ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโคบอลต์  
โมลิบดีนัม (HYDROTREATING REACTION OF PALM OLEIN USING NICKEL COBALT  
MOLYBDENUM CATALYST) อ.ที่ปริภษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุณา, 103  
หน้า.

ไบโอดีเซลยุคที่สองหรือกรีนดีเซลเป็นดีเซลที่ผลิตจากไตรกลีเซอไรด์โดยใช้ปฏิกริยาไฮโดร  
ทรีตติง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบหลักคืออนอร์มอลอัลเคนและไอโซอัลเคน โดยที่ปฏิกริยาทำ  
ในเครื่องปฏิกริยารุ่นชนิดเบดนิ่งไหลต่อเนื่องใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์  
โมลิบดีนัม ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนแก๊สต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร จาก  
ปริมาณร้อยละผลได้ของอัลเคนแสดงให้เห็นว่าปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ  
และความดันในการทำปฏิกริยา อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันส่งผลต่อเส้นทาง  
ปฏิกริยาในขั้นกำจัดออกซิเจน โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเส้นทางกำจัดออกซิเจนจะเกิดผ่านปฏิกริยาดี  
คาร์บอกซิเลชันและปฏิกริยาดีคาร์บอนิลเลชันมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความดันจะทำให้เส้นทาง  
กำจัดออกซิเจนเกิดผ่านปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากขึ้น หลังการเกิดปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงจาก  
ไตรกลีเซอไรด์เป็นอนอร์มอลอัลเคน การเกิดปฏิกริยาไอโซเมอร์ไรเซชันต่อส่งผลกระทบต่ออย่างมากต่อ  
คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เนื่องจากคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำจะดีขึ้นเมื่อสัดส่วนไอโซตอนอร์  
มอลอัลเคนเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์  
โมลิบดีนัมให้ค่าร้อยละผลได้ของอัลเคนใกล้เคียงกันภายใต้สภาวะในการทำปฏิกริยาที่เหมาะสม แต่  
ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกริยาไอโซเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่าตัวเร่ง  
ปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมี  
คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเนื่องจากมี  
สัดส่วนไอโซตอนอร์มอลอัลเคนที่สูงกว่า

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริภษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5570397521 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: HYDROTREATING, HYDRODEOXYGENATION, BIODIESEL, GREEN DIESEL

SIRACHART CHUTO: HYDROTREATING REACTION OF PALM OLEIN USING NICKEL COBALT MOLYBDENUM CATALYST. ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 103 pp.

The second generation of biodiesel, so-called Green diesel, is diesel from triglycerides using hydrotreating reaction. Green diesel containing mainly normal-alkanes and iso-alkanes was investigated. The reaction was carried out in a trickle-bed reactor to analyse a variation of product yields under the two different catalysts, namely NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and NiCoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. The temperature range was 300°C to 380°C and the pressure range was 450 to 1050 psig at a constant LHSV of 1.0 h<sup>-1</sup> and H<sub>2</sub>/Oil ratio of 500/1 by volume. Experimental results showed that yield of alkanes in hydrotreating reaction increased with the increase of the temperature and the pressure. Moreover, by variation of temperature and pressure, various pathways were selected on oxygen removal step. Increasing the temperature enhanced decarboxylation and decarbonylation pathways, whereas increasing the pressure increased the contribution of hydrodeoxygenation pathway. After hydrotreating reaction of triglycerides to normal-alkanes, the isomerization reactions also have an important role in product properties, since cold flow properties of the products are improved significantly by increase of their i-/n-alkanes ratio. This study evidenced that when NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and NiCoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts were used, they produced a similar yield of total alkanes from the hydrotreating reaction under favorable conditions. However, using NiCoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst gave a higher isomerization activity than when NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was used. Therefore, products of the reaction carried out with NiCoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst containing higher i/n-alkanes had better cold flow properties than those of NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst.

Department: Chemical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Chemical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร. เจตศักดิ์ ไซยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์และช่วยชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ จนงานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์ และอาจารย์ ดร. นริศรา ทองบุญชู กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนอบรมสั่งสอนและให้คำแนะนำต่างๆอันจะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ คุณ สัณญา บุญญาสุวัฒน์ คุณกฤษยาพร ทินกร คุณรามนรี เนตรวิเชียร และบริษัทวีระสุวรรณ จำกัด ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ รวมถึงให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆตลอดการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยโพลิโอเคมีคอลทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังที่คอยให้คำปรึกษา ให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนที่ดีเสมอมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติ้ง.....	5
2.1.1 ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation, HDA).....	5
2.1.2 ปฏิกริยาไฮโดรดีซัลฟูไรเซชัน (Hydrodesulfurization, HDS).....	5
2.1.3 ปฏิกริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation, HDN).....	6
2.1.4 ปฏิกริยาไฮโดรดีเมทัลเลชัน (Hydrodemetallation, HDM).....	6
2.1.5 ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation, HDO).....	6
2.2 ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช [7, 11, 17].....	7
2.2.1 ปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation).....	7
2.2.2 ปฏิกริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation).....	7
2.2.3 ปฏิกริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization).....	8

2.2.4 ปฏิกริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking).....	8
2.3 งานวิจัยที่ศึกษาปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน .....	11
2.3.1 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของตัวเร่งปฏิกริยาต่อปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน .....	11
2.3.2 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของสภาวะการทดลองต่อปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน ...	13
2.3.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน.....	15
2.3.3.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง .....	15
2.3.3.2 ตัวเร่งปฏิกริยา .....	15
2.3.3.3 สภาวะการทดลอง.....	15
2.3.3.3.1 อุณหภูมิ.....	15
2.3.3.3.2 ความดันไฮโดรเจน.....	16
2.3.3.3.3 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว .....	16
2.3.3.3.4 อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน.....	16
2.4 งานวิจัยที่ศึกษาปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันและไอโซเมอร์ไรเซชัน.....	16
2.4.1 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของตัวเร่งปฏิกริยาและสภาวะการทดลองต่อปฏิกริยา ไฮโดรดีออกซิเจเนชันและไอโซเมอร์ไรเซชัน .....	16
2.4.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันและไอโซเมอร์ไรเซชัน .....	18
2.4.2.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง .....	18
2.4.2.2 ตัวเร่งปฏิกริยา .....	18
2.4.2.3 สภาวะการทดลอง.....	19
2.4.2.3.1 อุณหภูมิ.....	19
2.4.2.3.2 ความดันไฮโดรเจน.....	19
2.4.2.3.3 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว .....	19
2.4.2.3.4 อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน.....	19



2.5 การกำหนดขอบเขตงานวิจัย .....	20
บทที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์ .....	21
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
3.4 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	23
3.4.1 เทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ .....	24
3.4.2 เทคนิคพีอีที .....	24
3.4.3 เทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ .....	24
3.5 วิธีการทดลอง.....	24
3.5.1 การซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา .....	24
3.5.2 สภาวะในการทดลอง .....	25
3.5.3 การเก็บตัวอย่าง.....	25
3.6 การวิเคราะห์ผล .....	26
3.6.1 การแยกเฟสของเหลว.....	26
3.6.2 การวิเคราะห์น้ำมัน .....	26
3.6.2.1 ปริมาณน้ำมัน.....	26
3.6.2.2 ความหนาแน่นของน้ำมัน .....	26
3.6.2.3 ร้อยละกรดไขมัน .....	27
3.6.2.4 ปริมาณสารประกอบไอโซอัลเคนและสารประกอบนอร์มอลอัลเคน .....	28
3.6.2.5 คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ.....	29
3.6.3 การวิเคราะห์น้ำ.....	29
3.6.3.1 ปริมาณน้ำ.....	29

3.6.4 การวิเคราะห์ก๊าซ.....	29
3.6.4.1 การตรวจหาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	29
3.7 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง.....	30
3.7.1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor).....	30
3.7.2 การคำนวณปริมาณสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี (%wt).....	30
3.7.3 การคำนวณปริมาณร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น (Yields based on feedstock, wt %).....	31
3.7.4 การคำนวณค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (LSHV).....	31
3.7.5 การคำนวณหาค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ (%Fatty Acids Oleic)...	32
3.7.6 ค่าความคลาดเคลื่อน (Error bar).....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	34
4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น.....	34
4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	36
4.2.1 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	36
4.2.2 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่ง ปฏิกิริยา.....	37
4.2.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา.....	37
4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชิงคุณภาพและแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง.....	39
4.3.1 เทคนิคการใช้กรวยแยกเฟส.....	39
4.3.2 เทคนิคการไทเทรตตามวิธีการมาตรฐาน Ca-5a-40.....	39
4.3.3 เทคนิคการใช้แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์และแก๊สโครมาโทกราฟี- เพรมไอออนไนซ์.....	39
4.3.4 เทคนิคการผ่านก๊าซเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์.....	40

4.3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน.....	43
4.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ .....	43
4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม .....	45
4.4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา.....	47
4.4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม.....	50
4.4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน.....	51
4.5 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน.....	53
4.5.1 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ .....	53
4.5.2 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม .....	55
4.5.3 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา .....	56
4.5.4 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม .....	58
4.5.5 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน.....	60
4.6 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ.....	61
4.6.1 ผลกระทบของสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนต่อจุดขุ่น .....	62

4.6.2 ผลกระทบของสัดส่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอมต่อ	
สารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ต่อจุดขุ่น .....	63
4.6.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความดันและตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อจุดขุ่น.....	65
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	68
รายการอ้างอิง .....	69
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองที่ความดัน	
450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	72
ภาคผนวก ข ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองที่ความดัน	
750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	77
ภาคผนวก ค ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองที่ความดัน	
1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว .....	82
ภาคผนวก ง ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม ผลการทดลองที่	
ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	87
ภาคผนวก จ ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม ผลการทดลองที่	
ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	92
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม ผลการทดลองที่	
ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว .....	97
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์จุดขุ่น.....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	103

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2	สภาวะในการทดลอง	25
3.3	ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ	27
3.4	สภาวะของคอลัมน์	28
4.1	องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน	35
4.2	ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	37
4.3	ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา	37
ก-1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	72
ก-2	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	73
ก-3	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	74
ก-4	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	75
ก-5	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	76
ข-1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	77
ข-2	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	78



จ-1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	92
จ-2	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	93
จ-3	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	94
จ-4	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	95
จ-5	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	96
ฉ-1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	97
ฉ-2	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	98
ฉ-3	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	99
ฉ-4	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	100
ฉ-5	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	101
ช-1	ผลการวิเคราะห์จุดขุ่น	102

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	กราฟแสดงจุดเยือกแข็งของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนและสารประกอบไอโซอัลเคน [8]	3
2.1	แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา [7]	10
2.2	แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดย Chan [11]	10
2.3	แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดย Kovacs [17]	11
3.1	แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง	22
3.2	โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์	29
4.1	การคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	38
4.2	โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	40
4.3	แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดย Veriansyah [7]	42
4.4	ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	45
4.5	ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	47
4.6	ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อสัดส่วนโดยโมลของสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอมและสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	49



- 4.7 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม 51
- 4.8 ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน 51
- 4.9 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม 53
- 4.10 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 54
- 4.11 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 56
- 4.12 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 57
- 4.13 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 58
- 4.14 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 59
- 4.15 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 61

- 4.16 ผลกระทบของสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ต่อจุดชุน  
อุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ถึง 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1  
โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 63
- 4.17 ผลกระทบของสัดส่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ต่อ สารประกอบ  
อัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ต่อ จุดชุน อุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส  
ความดัน 450 ถึง 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของ  
ไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและ  
นิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 64
- 4.18 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อจุดชุน ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1  
ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 65
- 4.19 ผลกระทบของความดันต่อจุดชุน อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อ  
ชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม 66

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

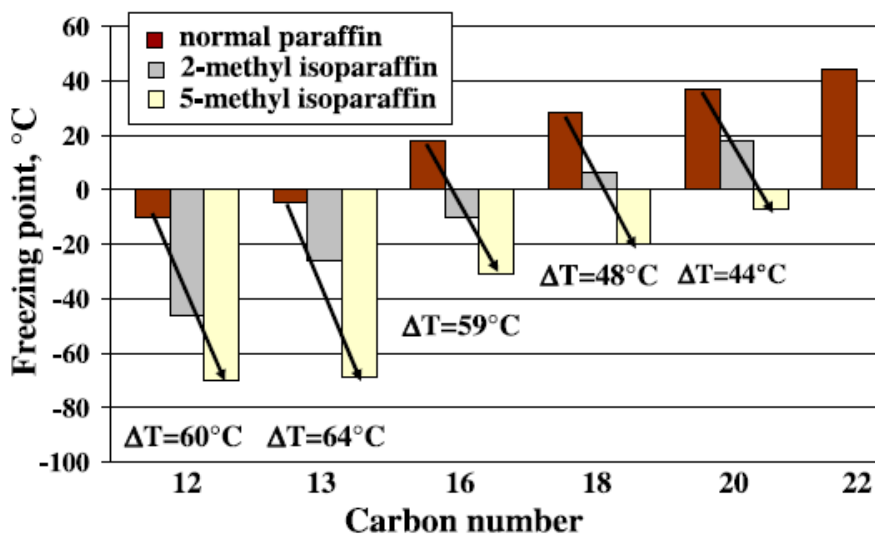
เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuels) คือพลังงานหมุนเวียนที่เกิดจากวัตถุดิบทางธรรมชาติหรือสารชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นสารที่ได้จากพืชและสัตว์ โดยพืชจะเป็นผู้ผลิตชีวมวลจากการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นสารอินทรีย์ซึ่งสารอินทรีย์ที่เกิดจากสิ่งมีชีวิตทั้งหมดนั้นเรียกว่าชีวมวล สารชีวมวลหากผ่านการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพได้โดยที่เชื้อเพลิงชีวภาพจะมีความแตกต่างจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียมคือเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพลังงานหมุนเวียนที่สามารถย่อยสลายไปเองได้ ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ ในปัจจุบันประเทศไทยสามารถผลิตพลังงานใช้เองภายในประเทศได้เพียงแค่บางส่วนซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของประชากรในประเทศ ส่งผลให้ในปัจจุบันจึงได้มีการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อนำมาทดแทนการนำเข้าเชื้อเพลิงปิโตรเลียมจากต่างประเทศ ในปัจจุบันเชื้อเพลิงชีวภาพที่ดำเนินการผลิตเชิงพาณิชย์และจำหน่ายอยู่ในประเทศนั้น ได้แก่ เอทานอล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ น้ำมันพืช และไบโอดีเซล ซึ่งเชื้อเพลิงชีวภาพที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบันคือไบโอดีเซล

ในกระบวนการผลิตไบโอดีเซลในยุคแรกจะทำการผลิตโดยนำน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์มาผ่านปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน หรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันโดยมีสารตั้งต้นเป็นสารชีวมวล เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันงา น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันละหุ่ง น้ำมันดอกทานตะวัน ไขมันวัว ไขมันหมู เป็นต้น ทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก เป็นต้น ซึ่งไบโอดีเซลนี้เป็นพลังงานทางเลือกที่จะนำมาใช้ทดแทนดีเซลปิโตรเลียม ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ สารอัลคิลเอสเทอร์ (Alkyl Ester) เช่น เมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester, FAMES) หรือเอทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Ethyl Ester, FAEES) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น ปฏิกิริยาดังกล่าวช่วยปรับปรุงโครงสร้างของน้ำมันพืชและไขมันสัตว์ให้มีความใกล้เคียงกับดีเซลปิโตรเลียมมากขึ้นและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์ อย่างไรก็ตามการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชัน หรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทเอสเทอร์ทำให้มีคุณสมบัติต่างจากดีเซลปิโตรเลียมที่เป็นสารประกอบอัลเคน ส่งผลให้เกิดปัญหาต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเช่น การต้องปรับปรุงเครื่องยนต์ก่อนนำไปใช้งาน

ส่งผลให้ในการผลิตไบโอดีเซลยุคต่อมานักวิจัยได้พยายามค้นคว้าหาปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับดีเซลปิโตรเลียม โดยต้องการผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบอัลเคนซึ่งเป็นสารประเภทเดียวกับดีเซลปิโตรเลียม หากพิจารณาโครงสร้างของน้ำมันพืชพบว่ามีองค์ประกอบหลักเป็นไตรกลีเซอไรด์แสดงให้เห็นว่าหากต้องการเปลี่ยนโครงสร้างให้กลายเป็นสารประกอบอัลเคนจะต้องการปฏิกิริยาที่สามารถทำให้พันธะอิมมัลแตกโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์และกำจัดออกซิเจนออกจากไตรกลีเซอไรด์ โดยปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการเปลี่ยนโครงสร้างดังกล่าวคือ ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งแต่ดั้งเดิมมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันดีเซลปิโตรเลียมโดยการทำให้อิมมัลและกำจัดองค์ประกอบที่ไม่ต้องการออกซึ่งมีการกำจัดออกซิเจนรวมอยู่ด้วย โดยที่ไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งมีชื่อเรียกว่า กรีนดีเซล (Green diesel) ได้มีงานวิจัยเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งกับไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชันผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับดีเซลปิโตรเลียมมากกว่าไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน [1], [2]

ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชมีความแตกต่างจากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปิโตรเลียมเนื่องจากสารตั้งต้นมีความแตกต่างกัน โดยน้ำมันพืชจะมีอะตอมออกซิเจนอยู่มากตรงข้ามกับน้ำมันปิโตรเลียมที่จะมีอะตอมออกซิเจนอยู่เพียงเล็กน้อย ทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรต้อออกซิเจนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกมีความสำคัญมากในปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช ดังนั้นจึงทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรต้อออกซิเจนชันเป็นปฏิกิริยาหลักที่มุ่งเน้นในการศึกษา มีงานวิจัยหลายงานได้ทำการศึกษาค้นคว้าหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไฮโดรต้อออกซิเจนชันของน้ำมันพืช ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต้อออกซิเจนชันได้ดีที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม [3], [4], [5], [6], [7]

ข้อเสียหลักของการผลิตไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งคือผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปัญหาด้านการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในบางสภาพอากาศ แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบอัลเคน แต่เดิมกรีนดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งจะมีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนซึ่งมีจุดเยือกแข็งที่สูงซึ่งหากเปลี่ยนโครงสร้างให้กลายเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน จะสามารถช่วยลดจุดเยือกแข็งลงได้ดังแสดงในรูปที่ 1.1 การเปลี่ยนโครงสร้างสามารถทำได้โดยการใช้ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดีที่สุดคือตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม [8], [9]



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงจุดเยือกแข็งของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนและสารประกอบไอโซอัลเคน [8]

สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติง และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันได้ดีที่สุดและเลือกการเติมโลหะโคบอลต์ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเพื่อต้องการให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันให้ดีขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของพาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการทดลองโดยใช้พาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น
2. ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส
3. ทำการทดลองที่ความดัน 450 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
4. ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

สามารถบอกถึงผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และ ไอโซเมอร์ไรเซชันของพาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลไฟไรเซชัน

#### 2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง

ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งแต่ดั้งเดิมเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันให้เหมาะสม การนำไปใช้งานโดยมีวัตถุประสงค์หลักสองอย่างคือ เพื่อให้พื้นระอิมตัว และเพื่อกำจัดองค์ประกอบบางประเภทที่ไม่ต้องการในน้ำมันออก เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ออกซิเจน และโลหะ การใช้ไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยาในการเข้าทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งจะประกอบไปด้วยปฏิกิริยาย่อยๆ ดังต่อไปนี้ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation, HDA) ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลฟูไรเซชัน (Hydrodesulfurization, HDS) ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation, HDN) ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลเลชัน (Hydrodemetallation, HDM) และ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation, HDO) โดยรายละเอียดของแต่ละปฏิกิริยาแสดงดังต่อไปนี้

##### 2.1.1 ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation, HDA)

ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันคือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้ไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อทำให้สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัวเปลี่ยนเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่อิ่มตัว ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.1



ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

##### 2.1.2 ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลฟูไรเซชัน (Hydrodesulfurization, HDS)

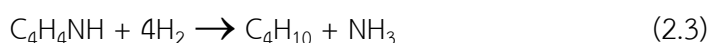
ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลฟูไรเซชันคือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้ไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา เพื่อกำจัดซัลเฟอร์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ วัตถุประสงค์เพื่อลดการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) หลังจากการเผาไหม้ ตัวอย่างของปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.2



ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลไฟด์ไรเซชัน

### 2.1.3 ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation, HDN)

ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชันคือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้ไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา เพื่อกำจัดไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ เพื่อลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) หลังจากการเผาไหม้ตัวอย่างของปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.3



ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน

### 2.1.4 ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลเลชัน (Hydrodemetallation, HDM)

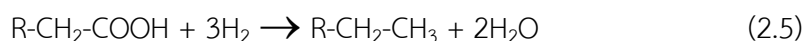
ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลเลชันคือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้ไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา เพื่อกำจัดโลหะบางชนิดที่ไม่ต้องการออก ตัวอย่างของปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.4



ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลเลชัน

### 2.1.5 ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation, HDO)

ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันคือ ปฏิกิริยาทางเคมีที่ใช้ไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา เพื่อกำจัดออกซิเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ สำหรับน้ำมันปิโตรเลียมจะมีองค์ประกอบของออกซิเจนอยู่น้อยจึงทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันไม่ใช่ปฏิกิริยาที่มีความสำคัญมาก แต่สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีส่วนประกอบของออกซิเจนอยู่มาก จึงทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมีความสำคัญมาก โดยที่ออกซิเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของน้ำ ตัวอย่างของปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.5



ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน



## 2.2 ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช [7, 11, 17]

ต่อมาได้มีนักวิจัยนำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงมาประยุกต์ใช้กับน้ำมันพืช เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้มีความใกล้เคียงกับดีเซลปิโตรเลียมมากที่สุด โดยที่องค์ประกอบหลักของน้ำมันพืชคือไตรกลีเซอไรด์ซึ่งมีความแตกต่างจากน้ำมันดีเซลปิโตรเลียมซึ่งเป็นสารประกอบอัลเคนอยู่มาก การจะทำให้โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์มีความใกล้เคียงกับสารประกอบอัลเคนสามารถทำได้โดยการทำให้พันธะอิ่มตัว แตกโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์และกำจัดออกซิเจนออก ซึ่งสามขั้นตอนดังกล่าวเป็นขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงดั้งเดิมที่ใช้งานกับน้ำมันปิโตรเลียม แต่เมื่อนำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงมาประยุกต์ใช้กับน้ำมันพืชจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นขึ้น คือปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation) ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน (Isomerization) และปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) โดยรายละเอียดของแต่ละปฏิกิริยาแสดงด้านล่าง

### 2.2.1 ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation)

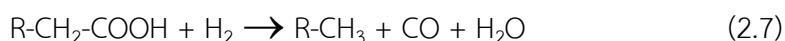
ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันคือ ปฏิกิริยาข้างเคียงของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อกำจัดออกซิเจนออกโดยไม่ใช้ไฮโดรเจนร่วมทำปฏิกิริยา โดยออกซิเจนออกจะถูกกำจัดออกในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักจะสูญเสียคาร์บอน 1 อะตอมไปกับผลิตภัณฑ์ข้างเคียง จึงเป็นปฏิกิริยาที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ตัวอย่างของปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.6



ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

### 2.2.2 ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation)

ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันคือ ปฏิกิริยาข้างเคียงของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนเข้าทำปฏิกิริยาเพื่อกำจัดออกซิเจนออกในรูปของคาร์บอนมอนอกไซด์และน้ำ ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักจะสูญเสียคาร์บอน 1 อะตอมไปกับผลิตภัณฑ์ข้างเคียงจึงเป็นปฏิกิริยาที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ตัวอย่างของปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.7



ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

### 2.2.3 ปฏิกริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน (Isomerization)

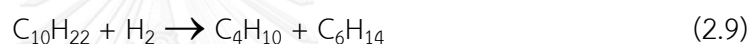
ปฏิกริยาไอโซเมอร์ไรเซชันคือ ปฏิกริยาทางเคมีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเข้าทำปฏิกริยาเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารให้แตกต่างจากเดิมแต่ยังคงมีมวลโมเลกุลเท่าเดิม (Isomer) ซึ่งการจัดเรียงโครงสร้างที่แตกต่างจากเดิมส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างกันตัวอย่างของปฏิกริยาดังสมการที่ 2.8



ปฏิกริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน

### 2.2.4 ปฏิกริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking)

ปฏิกริยาไฮโดรแครกกิงคือ ปฏิกริยาทางเคมีที่ใช้ไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกริยาเข้าทำปฏิกริยาเพื่อสลายโมเลกุลใหญ่ให้แตกตัวกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง ตัวอย่างของปฏิกริยาดังสมการที่ 2.9



ปฏิกริยาไฮโดรแครกกิง

จากปฏิกริยาทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้น ได้มีนักวิจัยนำเสนอแผนผังปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกริยาที่เป็นไปได้ดังต่อไปนี้

Veriansyah และคณะ 2012 [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 92 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาแพลทินัม พาราเดียม รูทีเนียม นิกเกิล นิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์ โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ เสนอแผนผังปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกริยาที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกริยาดังต่อไปนี้

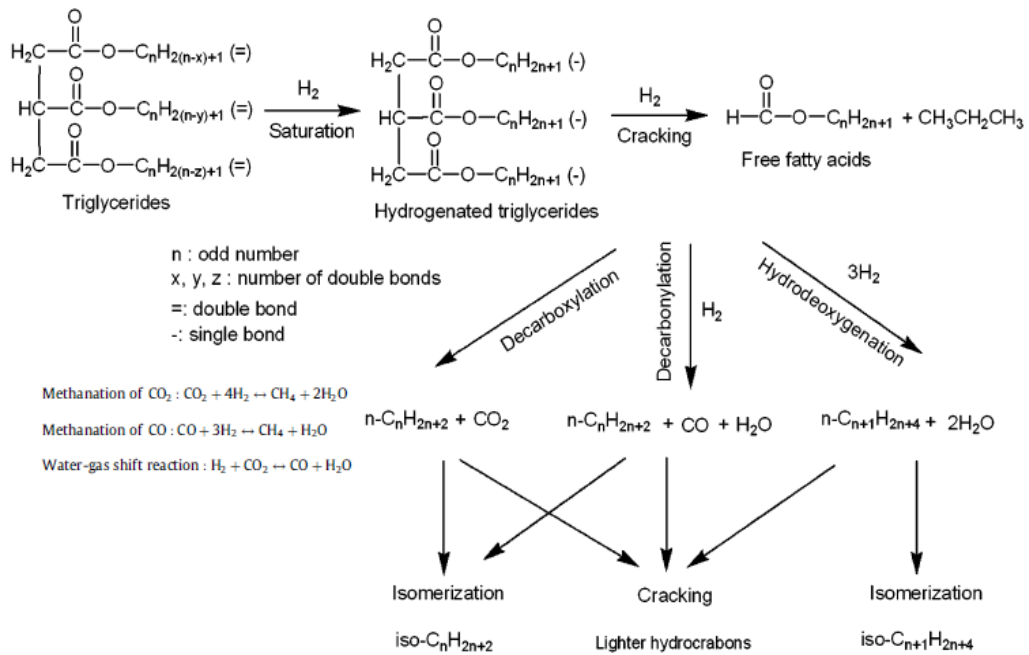
สารตั้งต้นที่เลือกใช้คือ น้ำมันถั่วเหลืองซึ่งประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชมีกลไกการเกิดปฏิกริยาขั้นตอนแรกคือ ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันทำหน้าที่เปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ที่ไม่อิ่มตัวเป็นไตรกลีเซอไรด์อิ่มตัว ไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัวจะเกิดปฏิกริยาไฮโดรแครกกิงต่อ แตกตัวได้เป็นกรดไขมันอิสระและโพรเพน กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกซิเจนออกเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบอัลเคนผ่านสามปฏิกริยา คือ

1. ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน เป็นการกำจัดออกซิเจนออกโดยใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกริยา ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นน้ำ

2. ปฏิกริยาตีคาร์บอนิลเลชัน เป็นการกำจัดออกซิเจนออกโดยใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกริยา ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นน้ำและคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้สูญเสียคาร์บอนหนึ่งอะตอมไปกับการทำปฏิกริยา
3. ปฏิกริยาตีคาร์บอกซิเลชัน เป็นการกำจัดออกซิเจนออกโดยไม่ใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกริยา ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้สูญเสียคาร์บอนหนึ่งอะตอมไปกับการทำปฏิกริยาเช่นเดียวกับปฏิกริยาตีคาร์บอนิลเลชัน

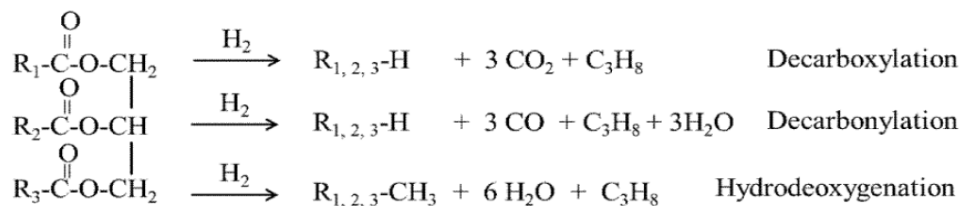
จากผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นต่างกันทำให้สามารถระบุได้ว่าสารประกอบอัลเคนที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกริยาใด หากสารประกอบอัลเคนที่ได้มาจากปฏิกริยาไฮโดรตีออกซิเจชันจะมีจำนวนคาร์บอนเท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันในสารตั้งต้น แต่หากสารประกอบอัลเคนที่มาจากปฏิกริยาตีคาร์บอนิลเลชันหรือปฏิกริยาตีคาร์บอกซิเลชัน จะมีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่าจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันในสารตั้งต้นหนึ่งอะตอม เนื่องจากสูญเสียคาร์บอนไปกับผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือ คาร์บอนมอนอกไซด์หรือคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำจะไม่สามารถใช้ในการระบุเส้นทางการเกิดปฏิกริยาได้ เนื่องจากจะมีปฏิกริยามีเทนเนชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ ปฏิกริยามีเทนเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์และปฏิกริยาออกเตอ์แก๊สซิฟต์ ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำมาจากปฏิกริยาใด

นอกจากนั้น Veriansyah และคณะ ยังได้เสนออีกว่าหากสารประกอบอัลเคนอยู่ในสถานะที่เหมาะสมอาจเกิดปฏิกริยาอื่นต่อได้เช่น ปฏิกริยาไฮโดรแครกกิงเปลี่ยนสารประกอบอัลเคนโมเลกุลใหญ่เป็นสารประกอบอัลเคนโมเลกุลเล็กซึ่งเป็นปฏิกริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดเนื่องจากจะสูญเสียช่วงคาร์บอนอะตอมที่เหมาะสมต่อการผลิตดีเซล หรือปฏิกริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเปลี่ยนสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคนเป็นปฏิกริยาที่ต้องการให้เกิดเนื่องจากสามารถช่วงปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้

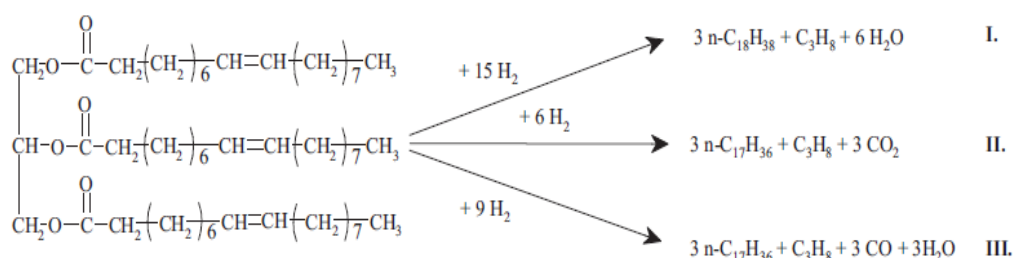


รูปที่ 2.1 แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา [7]

นอกจาก Veriansyah 2012 [7] ที่ได้เสนอแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงที่เป็นไปได้ของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา ยังมีนักวิจัยท่านอื่นที่ได้เสนอแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงที่เป็นไปได้ของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะเดียวกันเช่น Chan 2013 [11] ดังรูปที่ 2.2 และ Kovacs 2011 [17] ดังรูปที่ 2.3 ทำให้แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาในลักษณะนี้เป็นที่ยอมรับและได้รับความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 2.2 แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดย Chan [11]



รูปที่ 2.3 แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดย Kovacs [17]

## 2.3 งานวิจัยที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจน

### 2.3.1 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจน

Senol และคณะ 2005 [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนของเมทิลเฮปตะโนเอต และเมทิลเฮกซะโนเอต ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์และที่อยู่ในรูปออกไซด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 120 ถึง 390 องศาเซลเซียส ความดัน 3 เมกะปาสคาล ผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปซัลไฟด์และรูปออกไซด์แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปซัลไฟด์จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปออกไซด์ แสดงจากค่าร้อยละผลได้ (%Yield) ที่สูงกว่า

Kubicka และคณะ 2010 [3] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนของน้ำมันเมล็ดเรพ ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดัน 35 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.25 ถึง 4 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลและโมลิบดีนัม โดยแสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมมากที่สุด ในขั้นตอนการกำจัดออกซิเจนออกตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมจะกำจัดออกซิเจนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลจะกำจัดออกซิเจนผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีคาร์บอนิลเลชัน ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมกำจัดออกซิเจนผ่านทั้งสามปฏิกิริยา คือ ไฮโดรต็อกซิเจน ดีคาร์บอกซิเลชัน และดีคาร์บอนิลเลชัน

ภทร จิรเสวตกุล 2010 [4] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนของปาล์มโอเลอิน ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซของ

ของเหลว 0.5 ถึง 1.5 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม โดยแสดงจากจำนวนสารประกอบอัลเคนรวมที่สูงกว่าในสภาวะการทดลองเดียวกัน

Tiwari และคณะ 2011 [5] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ถึง 4 ต่อชั่วโมงอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตน โดยแสดงจากจำนวนสารประกอบอัลเคนรวมที่สูงกว่าในสภาวะการทดลองเดียวกัน

Bezergianni และคณะ 2012 [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นของน้ำมันพืชใช้แล้วที่อุณหภูมิ 330 ถึง 390 องศาเซลเซียส ความดัน 82.7 ถึง 137.9 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม โดยแสดงจากจำนวนสารประกอบอัลเคนรวมที่สูงกว่าในสภาวะการทดลองเดียวกัน

Veriansyah และคณะ 2012 [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 92 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม พาราเดียม รูทีเนียม นิกเกิล นิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น โดยแสดงจากจำนวนสารประกอบอัลเคนรวมที่สูงที่สุดในสภาวะการทดลองเดียวกัน

Chan และคณะ 2013 [11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นของน้ำมันสุปุด้าที่อุณหภูมิ 375 ถึง 425 องศาเซลเซียส ความดัน 3 เมกกะปาสคาล อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 1000 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ซิลิกา-อะลูมินา SAPO-11 และ ALSBA-15 ทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปซัลไฟด์และรูปรีดิวซ์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง ผลการทดลอง

แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปซัลไฟด์จะให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันดีกว่าในรูปรีดิวซ์

Kubiccka และคณะ 2014 [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของน้ำมันเมล็ดเรพ ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 300 องศาเซลเซียส ความดัน 3.5 เมกกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ถึง 8 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับที่ต่างชนิดกันคือ แกมมาอะลูมินา ซิลิกา และไททาเนียมไดออกไซด์ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวรองรับแต่ละชนิดจะทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวของโลหะที่แตกต่างกันโดยเรียงการกระจายตัวจากมากไปหาน้อยคือ ซิลิกา อะลูมินา และไททาเนียมไดออกไซด์ การเลือกใช้ตัวรองรับแต่ละชนิดจะส่งผลต่อการเลือกเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน โดยตัวรองรับซิลิกาจะส่งผลให้เลือกเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีคาร์บอนิลเลชัน ตัวรองรับไททาเนียมออกไซด์จะส่งผลให้เลือกเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันมากที่สุด

### 2.3.2 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของสภาวะการทดลองต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน

ภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์ 2010 [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีนและกรดไขมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ถึง 1.5 ต่อชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทดลอง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันแบบไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าความเป็นกรดสูงขึ้นแต่ไม่พบปริมาณสารประกอบอัลเคนเป็นองค์ประกอบ แสดงว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของน้ำมันปาล์มจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมพบว่า เมื่ออุณหภูมิถึง 200 องศาเซลเซียส จะเริ่มพบกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ เมื่ออุณหภูมิถึง 250 องศาเซลเซียส จะเริ่มพบปริมาณสารประกอบอัลเคนเล็กน้อย เมื่ออุณหภูมิถึง 300 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณสารประกอบอัลเคนมากขึ้น และจะพบมากที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันจะเริ่มเกิดขึ้นที่ 250 องศาเซลเซียส และการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันเกิดขึ้นดีขึ้น โดยแสดงจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณสารประกอบอัลเคนเพิ่มมากขึ้นและค่าปริมาณกรดลดลง และเมื่อลดความเร็วเชิงสเปซของของเหลวให้ต่ำลงผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณสารประกอบอัลเคนเพิ่มมากขึ้นและค่าปริมาณกรดลดลงเนื่องมาจากสารตั้งต้นมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น และจากผลการทดลองยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีนและกรดไขมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยา จะให้ปริมาณสารประกอบอัลเคนใกล้เคียงกัน

Krár และคณะ 2010 [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ถึง 80 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 200 ถึง 800 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ถึง 3.0 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันจะสามารถเกิดได้ดีขึ้น โดยแสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมทั้งสูงขึ้น แต่ปฏิกิริยาข้างเคียง (ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน) จะยิ่งเกิดมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ขณะที่ความดันสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันจะสามารถเกิดได้ดีขึ้นโดยผลกระทบของความดันจะชัดเจนที่อุณหภูมิต่ำและผลกระทบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันอยู่ช่วงระหว่าง 500 ถึง 600 โดยแสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันจนถึง 500 และจะคงที่จนถึง 600 แล้วจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันมากกว่า 600

ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว 2011 [15] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชัน ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันพบว่าที่อุณหภูมิ 300 ถึง 320 องศาเซลเซียส ไตรกลีเซอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นกรดไขมันอิสระและเกิดปฏิกิริยาในขั้นต่อไปได้ช้า ทำให้พบปริมาณของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์สูง และพบว่าที่อุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส เกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลกระทบของความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันพบว่าเมื่อความดันสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันจะสามารถเกิดขึ้นได้ดีขึ้น เนื่องจากความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนต่อน้ำมันมีค่ามากขึ้นและเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมัน

Yang และคณะ 2013 [16] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันของกรดไขมันอิสระ ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 375 องศาเซลเซียส ความดัน 2 ถึง 8 เมกกะปาสกาล ความเร็วเชิงสเปซต่อน้ำมัน 4 ถึง 18 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตนในรูปซัลไฟด์บนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันมากที่สุด ในขณะที่อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันจะเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันน้อยที่สุด โดยเมื่ออัตราส่วนมีค่ามากกว่า 500 ต่อ 1 จะไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันอีก

Bezergianni และคณะ 2013 [19] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วผสมกับไฮโดรคาร์บอนหนักในอัตราส่วนที่ต่างกัน ที่อุณหภูมิ 310 ถึง 350 องศาเซลเซียส



ความดัน 1200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซต่อน้ำหนัก 1.0 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อการศึกษาโดยคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อัตราส่วนการผสมของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วกับไฮโดรคาร์บอนหนักจะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการเกิดปฏิกิริยา แต่จะส่งผลกระทบต่อปริมาณการใช้ไฮโดรเจนในปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อสัดส่วนน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมากขึ้นปฏิกิริยาจะใช้ไฮโดรเจนในปริมาณที่มากขึ้นตามสัดส่วน

### 2.3.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจน

#### 2.3.3.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียริน กรดไขมันปาล์ม มันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำมันพืชที่ใช้แล้วผสมกับไฮโดรคาร์บอนหนัก

#### 2.3.3.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม พาราเดียม รูทีเนียม นิกเกิล โมลิบดีนัม นิกเกิลโมลิบดีนัม โคบอลต์โมลิบดีนัม และนิกเกิลทั้งสแตน โดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม สามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น แสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น

#### 2.3.3.3 สภาวะการทดลอง มหาวิทยาลัย

##### 2.3.3.3.1 อุณหภูมิ

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 200 ถึง 380 องศาเซลเซียส ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250 องศาเซลเซียส จะไม่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจน และจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนได้เพียงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนจะเริ่มเกิดได้มากขึ้นแต่เนื่องจากการแตกตัวออกเป็นกรดไขมันอิสระยังเป็นไปได้ช้า ทำให้การเกิดปฏิกิริยาในขั้นต่อไปได้ช้า ทำให้พบปริมาณของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์สูง ที่อุณหภูมิ 320 ถึง 380 องศาเซลเซียส การแตกตัวของกรดไขมันอิสระเป็นไปได้เร็ว ทำให้พบปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่น้อยลง และพบปริมาณสารประกอบอัลเคนในปริมาณที่มากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น

### 2.3.3.3.2 ความดันไฮโดรเจน

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองที่ความดันไฮโดรเจนตั้งแต่ 30 ถึง 137.9 บาร์ ผลกระทบของความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นพบว่า เมื่อความดันสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นจะสามารถเกิดขึ้นได้ดีขึ้น เนื่องมาจากความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนต่อน้ำมันมีค่ามากขึ้น และเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมัน

### 2.3.3.3.3 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองโดยใช้ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวตั้งแต่ 0.5 ถึง 4 ต่อชั่วโมง เมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่ำลงผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณสารประกอบอัลเคนเพิ่มมากขึ้นและค่าปริมาณกรดลดลงเนื่องมาจากมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

### 2.3.3.3.4 อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันตั้งแต่ 200 ถึง 800 ต่อ 1 โดยอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นอยู่ช่วงระหว่าง 500 ถึง 600 แสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันจนถึง 500 และจะคงที่จนถึง 600 แล้วจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันมากกว่า 600

## 2.4 งานวิจัยที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นและไอโซเมอร์ไรเซชัน

### 2.4.1 งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะการทดลองต่อปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นและไอโซเมอร์ไรเซชัน

Krár และคณะ 2011 [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นและไอโซเมอร์ไรเซชันของน้ำมันดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 330 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ถึง 80 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ถึง 3 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 200 ถึง 800 ต่อ 1 ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นและไอโซเมอร์ไรเซชันไปในแนวโน้มนเดียวกัน โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นและไอโซเมอร์ไรเซชันจะเกิดได้ดีขึ้น แต่ช่วงของอุณหภูมิของแต่ละปฏิกิริยาจะแตกต่างกันโดยปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นจะเกิดขึ้นได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 330 ถึง 350

องศาเซลเซียส แต่ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันแต่เกิดขึ้นได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 350 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดันและอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันและไอโซเมอร์ไรเซชันในแนวโน้มที่ต่างกันโดยเมื่อมีค่าสูงจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันเกิดได้ดีขึ้น แต่ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ลดลง ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันและไอโซเมอร์ไรเซชันไปในแนวโน้มเดียวกันคือ เมื่อมีค่าต่ำทั้งสองปฏิกิริยาจะเกิดได้ดี และในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันได้ดีกว่า เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมสูงกว่า แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมจะเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่าเนื่องจากมีสัดส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่สูงกว่า

Toba และคณะ 2011 [9] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันและไอโซเมอร์ไรเซชันของน้ำมันพืชใช้แล้วที่อุณหภูมิ 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 70 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 666 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2.8 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลทั้งสแตนและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันได้ดีที่สุดเนื่องจากมีปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมสูงสุด ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมจะเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันได้ดีที่สุดเนื่องจากสัดส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสูงที่สุด

Sandor Kovacs และคณะ 2011 [17] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันและไอโซเมอร์ไรเซชันของน้ำมันดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 280 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ถึง 80 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 400 ถึง 600 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.75 ถึง 3 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟลูออรีนบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่านิกเกิลโมลิบดีนัมฟลูออรีนจะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันและไอโซเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม เนื่องจากทั้งปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมและสัดส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสูงกว่า และผลการเปรียบเทียบความเร็วเชิงสเปซของของเหลวแสดงให้เห็นว่า ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.0 ต่อชั่วโมง เนื่องจากที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวสูงกว่า 1.0 ต่อชั่วโมงจะมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย ส่งผลให้ร้อยละผลได้ในส่วนดีเซลน้อยลง และที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.75 ต่อชั่วโมง สารตั้งต้นจะมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามาก ส่งผลให้สารประกอบนอร์มอลอัลเคนเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวต่อทำให้ร้อยละผลได้ในส่วนดีเซลน้อยลง

Gong และคณะ 2012 [18] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชันและไอโซเมอร์ไรเซชันของน้ำมันสบู่ดำ ที่อุณหภูมิ 330 ถึง 390 องศาเซลเซียส ความดัน 30 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 600 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2.0 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ฟอสฟอรัสและแพลทินัมพาลาเดียมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า นิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสจะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและไอโซเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมพาลาเดียม เนื่องจากมีทั้งปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมและสัดส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสูงกว่า และการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสจะยิ่งทำให้ทั้งสองปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น

Gong และคณะ 2013 [20] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่ได้จากน้ำมันสบู่ดำที่อุณหภูมิ 275 ถึง 400 องศาเซลเซียส ความดัน 3 MPa เมกกะปาสคาล อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 1200 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม พาราเดียม นิกเกิล และรูทีเนียมบนตัวรองรับที่มีความเป็นกรดแตกต่างกันคือ SAPO-11 Al-SBA-15 และ  $Al_2O_3$  ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันจะเกิดได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาจะเริ่มเกิดที่ได้เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส และตัวรองรับที่มีความเป็นกรดที่ต่างกันจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน โดยตัวรองรับที่มีความเป็นกรดที่สูงจะสามารถเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันได้ดีกว่าตัวรองรับที่มีความเป็นกรดที่ต่ำ

## 2.4.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและไอโซเมอร์ไรเซชัน

### 2.4.2.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

น้ำมันดอกทานตะวัน น้ำมันพืชใช้แล้ว น้ำมันสบู่ดำ สารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่ได้จากน้ำมันสบู่ดำ

### 2.4.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เคยใช้ในการวิจัยเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและไอโซเมอร์ไรเซชันคือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลทั้งสเดน โคบอลต์โมลิบดีนัม แพลทินัมพาลาเดียม นิกเกิล รูทีเนียม นิกเกิลโมลิบดีนัมฟลูออรีน และนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน คือตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นที่ใช้โลหะไม่เกินสองชนิด (Bimetallic) แสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมที่สูงที่สุด ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมจะสามารถเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นที่เป็นโลหะสองชนิดเหมือนกัน แสดงจากสัดส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่สูงที่สุด และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดโลหะสามชนิด (Trimetallic) ที่ทำการเติมฟลูออรีนหรือฟอสฟอรัสจะทำให้เร่งปฏิกิริยาทั้งไฮโดรดีออกซิจีเนชันและ

ไอโซเมอร์ไรเซชันได้ดีขึ้น แสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมทั้งสูงขึ้นและสัดส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่สูงขึ้น

#### 2.4.2.3 สภาวะการทดลอง

##### 2.4.2.3.1 อุณหภูมิ

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองอุณหภูมิตั้งแต่ 250 ถึง 390 องศาเซลเซียสพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 320 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 350 องศาเซลเซียส โดยทั้งสองปฏิกิริยาจะเกิดได้ดียิ่งขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

##### 2.4.2.3.2 ความดันไฮโดรเจน

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองความดันไฮโดรเจนตั้งแต่ 20 ถึง 80 บาร์ พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อความดันไฮโดรเจนสูงขึ้น ตรงข้ามกับปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่อความดันไฮโดรเจนต่ำลง

##### 2.4.2.3.3 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองความเร็วเชิงสเปซของของเหลวตั้งแต่ 0.75 ถึง 3 ต่อชั่วโมง พบว่าทั้งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นและไอโซเมอร์ไรเซชันจะยิ่งเกิดขึ้นได้ดีเมื่อความเร็วเชิงสเปซต่ำลง เนื่องมาจากมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น

##### 2.4.2.3.4 อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน

ได้มีผู้วิจัยทำการทดลองอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันตั้งแต่ 200 ถึง 1200 ต่อ 1 พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชั้นจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันสูงขึ้นตรงข้ามกับปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันต่ำลง

## 2.5 การกำหนดขอบเขตงานวิจัย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันและไอโซเมอไรเซชันซึ่งได้กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปเป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตงานวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันและไอโซเมอไรเซชันของพาล์มโอเลอินเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันเป็นปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้น และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาที่สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งเป็นปัญหาหลักของไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง
2. การเลือกใช้พาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้นเนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีมากในประเทศไทยและมีช่วงคาร์บอนอะตอมที่เหมาะสมต่อการผลิตไบโอดีเซล
3. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิในช่วง 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันและไอโซเมอไรเซชัน โดยที่ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส
4. ศึกษาผลกระทบของความดันในช่วง 450 ถึง 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันและไอโซเมอไรเซชัน มีแนวโน้มของผลกระทบของความดันที่ต่างกัน การเปลี่ยนแปลงความดันทำให้ทราบว่าความดันค่าใดที่มีความเหมาะสมต่อทั้งสองปฏิกิริยา
5. ศึกษาผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันและไอโซเมอไรเซชัน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันได้ดีที่สุด และการเติมโลหะบางชนิดที่เหมาะสมไปบนตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันให้ดีขึ้นได้ โดยโลหะที่เลือกเติมเข้าไปบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมคือ โคบอลต์เนื่องจากโคบอลต์โมลิบดีนัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดี จึงคาดว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันได้ดี และช่วยเพิ่มปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันให้สูงขึ้น เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

### บทที่ 3

#### การทดลองและการวิเคราะห์

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรिटติ้งของปาล์มโอเลอินบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

#### 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

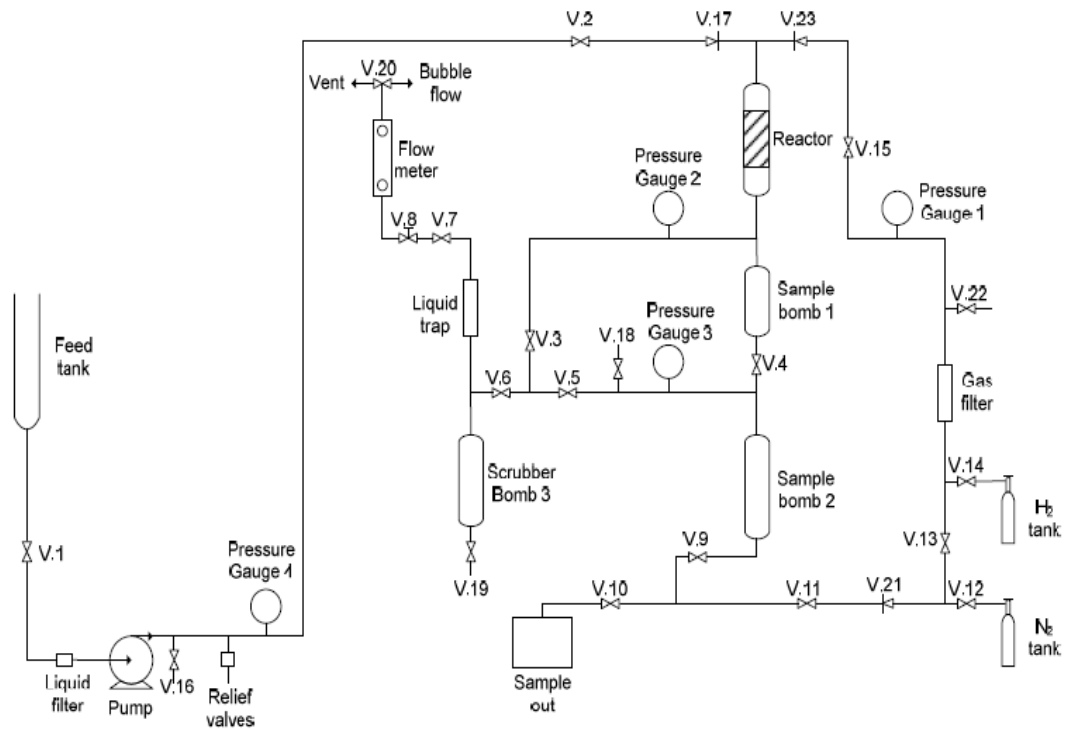
สารเคมีในการทดลองและการวิเคราะห์ผล ความบริสุทธิ์แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	เกรด/ ความบริสุทธิ์
Palm Olein	Commercial Grade
Hydrogen	99.99 %
Nitrogen	99.99 %
Iso-propanol	Commercial Grade
Methyl Octanoate	Analytical Grade
Mix Alkane ASTM D2886	99.9 %
Dimethyl Disulfide	Analytical Grade
Nickel Molybdenum	Commercial Catalyst
Cobalt Nitrate	Analytical Grade

#### 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรिटติ้งของปาล์มโอเลอิน เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดแบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่องโดยแสดงแผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง

จากรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าระบบแบ่งสารตั้งต้นออกเป็นสองสายคือ สายของของเหลวและสายของก๊าซ ทั้งสองสายจะถูกป้อนเข้าด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ สายของเหลวจะทำหน้าที่ในการป้อนสารตั้งต้นหรือสารที่ใช้ในการพริชล์ไฟต์เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยผ่านวาล์วหมายเลข 1 ก่อนเข้าสู่ปั๊มแล้วผ่านมาตรวัดความดันหมายเลข 4 เพื่อตรวจสอบความดันในส่วนของเหลวก่อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ถ้าหากความดันมีค่าสูงกว่า 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของเหลวจะถูกปล่อยออกทางวาล์วนิรภัยเพื่อความปลอดภัย ส่วนของสายก๊าซจะทำหน้าที่ป้อนก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไนโตรเจนโดยสามารถเลือกชนิดของก๊าซได้จากการเปิดปิดวาล์วหมายเลข 12 13 14 ก๊าซจะไหลผ่านตัวกรองก๊าซผ่านมาตรวัดความดันหมายเลข 1 เพื่อตรวจสอบความดันในส่วนของก๊าซและผ่านวาล์วหมายเลข 15 เพื่อเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

เครื่องปฏิกรณ์มีความยาว 47 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร และความหนา 0.089 เซนติเมตรภายในเครื่องปฏิกรณ์บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาตร 30 มิลลิตรอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของลูกแก้ว โดยเครื่องปฏิกรณ์จะถูกหุ้มด้วยแผ่นเหล็กนำความร้อนต่อกับฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์สองเครื่องและทั้งหมดจะถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่และเพื่อความปลอดภัย อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะทำการวัดทั้งหมด 3 จุด



ภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ ส่วนบน ส่วนกลาง ส่วนล่างและ 1 จุดภายในเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่ง ศูนย์กลาง

เมื่อทำปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์เสร็จ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีทั้งของเหลวและก๊าซทั้งหมด จะไหลผ่านถังเก็บตัวอย่างที่ 1 และถูกส่งไปเก็บที่ถังเก็บตัวอย่างที่ 2 เพื่อทำการแยกของเหลวและ ก๊าซออกจากกัน โดยมีมาตรวัดความดันหมายเลข 3 ทำหน้าที่วัดความดันของถังเก็บตัวอย่าง ก๊าซจะ ไหลย้อนผ่านวาล์วปรับละเอียดหมายเลข 8 ผ่านมาตรวัดอัตราการไหลหลัง จากนั้นจะเข้าสู่ภาชนะที่ บรรจุด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ

### 3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โคบอลต์โมลิบดีนัม โดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมใช้เกรดทางการค้า ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โคบอลต์โมลิบดีนัมได้จากการเติมโลหะโคบอลต์ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมโดยใช้วิธี Incipient Wetness Impregnation เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ไม่ยุ่งยากและได้รับความนิยม มีลำดับขั้นตอนในเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้

1. หาปริมาณรพูนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม (Commercial Catalyst)
2. ใช้เกลือ  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  และเตรียมปริมาณโลหะออกไซด์ 4.14 % โดยน้ำหนัก อ้างอิง ปริมาตรรพูนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม
3. เคลือบฝังสารละลายลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา
4. อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศา เซลเซียสต่อนาที
5. เผาภายใต้อากาศอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ต่อนาทีโดยเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

### 3.4 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

การทดลองทำการเปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ( $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์ โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ( $\text{NiCoMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัว รองรับอลูมินาออกไซด์เป็นเกรดทางการค้า และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัว รองรับอลูมินาออกไซด์ทำการเตรียมจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินา ออกไซด์เกรดทางการค้าจากวิธี Incipient Wetness Impregnation โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสอง

ชนิดถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ เทคนิคบีอีที และเทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิเพื่อหาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

### 3.4.1 เทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์

เทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF, X-ray fluorescence) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ปลดปล่อยออกมา โดยธาตุแต่ละชนิดจะมีพลังงานเฉพาะ ทำให้สามารถระบุได้ว่ามีปริมาณธาตุแต่ละชนิดเท่าไร

### 3.4.2 เทคนิคบีอีที

เทคนิคบีอีที (BET, Brunauer-Emmett-Teller) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาคุณสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา คือ พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย

### 3.4.3 เทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ

เทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ ( $\text{NH}_3$ -TPD, Temperature-Programmed Desorption of Ammonia) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสามารถวิเคราะห์ได้การวัดปริมาณการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ

## 3.5 วิธีการทดลอง

### 3.5.1 การซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ในปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในรูปซัลไฟด์ ดังนั้นก่อนเริ่มทำการทดลองจะต้องทำการซัลไฟด์ (Sulfidation) เพื่อเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมที่อยู่ในรูปออกไซด์ให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ก่อนทำการทดลอง ขั้นตอนการซัลไฟด์มีดังต่อไปนี้

1. ป้อนก๊าซไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิห้อง เพิ่มอุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์เป็น 110 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ต่อ 10 นาที และคงอุณหภูมิไว้เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากระบบ
2. ป้อนสารละลายไดเมทิลไดซัลไฟด์ในดีเซลปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 2 ต่อชั่วโมง ด้วยปริมาตร 60 มิลลิลิตร

3. ปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกจากระบบ และแทนที่แก๊สไฮโดรเจน ปรับความดันไฮโดรเจน เท่ากับ 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อสารละลายเท่ากับ 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร
4. เพิ่มอุณหภูมิเป็น 260 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ต่อ 10 นาที และคงไว้เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
5. เพิ่มอุณหภูมิเป็น 320 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ต่อ 10 นาที และคงไว้เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

### 3.5.2 สภาวะในการทดลอง

หลังจากซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาเสร็จสิ้นจะทำการทดลองในสภาวะต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่

3.2

ตารางที่ 3.2 สภาวะในการทดลอง

สภาวะการทดลอง	
อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)	300, 320, 340, 360, 380
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	450, 750, 1050
ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ต่อชั่วโมง)	1.0
อัตราส่วนแก๊สต่อน้ำมัน (โดยปริมาตร)	500 : 1
ระยะเวลาในการทดลอง (ชั่วโมง)	12
เวลาในการเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง)	4
ตัวเร่งปฏิกิริยา	NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , NiCoMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ปริมาตรเบดตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิลิตร)	30

### 3.5.3 การเก็บตัวอย่าง

ในการเก็บตัวอย่างของการทดลองจะทำการเก็บทุก 4 ชั่วโมง ระหว่างทำการทดลอง ถึงเก็บตัวอย่างถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิในตัวในระบบถูกรบกวนระหว่างการเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเกิดตัวอย่างจะทำโดยปิวาล์วที่ 4 และ 5 เพื่อแยกถึงเก็บตัวอย่างที่ 2 ออกจากระบบ ระหว่างการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์จะถูกเก็บที่ถังเก็บตัวอย่างที่ 1 และก๊าซจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 3 เพื่อออกสู่บรรยากาศและในส่วนของถังเก็บตัวอย่างที่ 2 ก๊าซจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศผ่านวาล์วหมายเลข 18 ส่วนของเหลวจะไหลออกจากระบบด้วยแรงดันผ่านวาล์วหมายเลข 9 และ 10 สู่อ่างเก็บตัวอย่าง หลังจากการเก็บตัวอย่างเสร็จสิ้น ถึงเก็บตัวอย่างอย่างหมายเลข 2 จะเสียความดัน ดังนั้นจึงต้องป้อนก๊าซไนโตรเจนเพื่อปรับให้ความดันเท่ากับ

ความดันระบบ ก๊าซไนโตรเจนจะผ่านวาล์วหมายเลข 9 11 และ 12 เมื่อความดันเท่ากับความดันของระบบแล้ว ทำการปิดวาล์วหมายเลข 9 11 12 และเปิดวาล์วหมายเลข 4 5 เพื่อเชื่อมต่อกับถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 กับระบบ นำตัวอย่างที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป การเก็บตัวอย่างจะทำการทั้งหมดสามครั้งต่อ 1 สภาวะการทดลองเพื่อนำผลวิเคราะห์มาหาค่าเฉลี่ย

### 3.6 การวิเคราะห์ผล

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นจะถูกทำการแยกเฟสด้วยกรวยแยกเฟส เพื่อแยกน้ำและน้ำมันออกจากกัน เพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติดังต่อไปนี้ ปริมาณน้ำ ปริมาณน้ำมัน ความหนาแน่นของน้ำมัน ร้อยละกรดไขมัน ปริมาณสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ปริมาณสารประกอบไอโซอัลเคนและคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

#### 3.6.1 การแยกเฟสของเหลว

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นจะถูกทำการแยกเฟสด้วยกรวยแยกเฟส เพื่อแยกน้ำมันกับน้ำออกจากกัน ทำได้โดยนำผลิตภัณฑ์ตั้งไว้ภายในกรวยแยกเฟสระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้สารแยกตัวออกจากกัน น้ำที่ได้จะถูกชั่งน้ำหนักเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ ส่วนน้ำมันที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ

#### 3.6.2 การวิเคราะห์น้ำมัน

##### 3.6.2.1 ปริมาณน้ำมัน

ใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณปริมาณร้อยละผลได้

##### 3.6.2.2 ความหนาแน่นของน้ำมัน

การวิเคราะห์ความหนาแน่นมีความสำคัญ เนื่องจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันมากเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยา ทำให้การวิเคราะห์ความหนาแน่นสามารถใช้ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ได้ โดยค่าความหนาแน่นจะถูกวิเคราะห์ด้วยขวดถ่วงจำเพาะแบบ Gay-Lussac Pycnometer ทำโดยเติมผลิตภัณฑ์ของเหลวสู่ขวดถ่วงจำเพาะจนเต็มแล้วปิดฝาเพื่อให้ได้ปริมาตรที่แน่นอน ปรับปริมาตรของเหลวให้เท่ากับ 10.00 มิลลิลิตร เช็ดผิวภายนอกขวดให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปชั่งเพื่อหาน้ำหนักและคำนวณหาค่าความหนาแน่น

### 3.6.2.3 ร้อยละกรดไขมัน

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันซึ่งบ่งบอกถึงการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ออกซิเจนบางส่วนยังคงอยู่ในรูปของกรดไขมัน การวิเคราะห์ทำโดยการไทเทรตตามวิธีมาตรฐาน Ca 5a-40 การไทเทรตเริ่มต้นจากการคาดการณ์ปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่างจากสภาวะที่ใช้ในการทดลอง สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นตามที่แสดงในตารางที่ 3.3 และใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1% โดยมวล เป็นอินดิเคเตอร์ในไอโซโพรพานอล

#### วิธีการไทเทรต

1. เตรียมสารตัวอย่างให้มีปริมาณตามที่แสดงในตารางที่ 3.3 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่
2. เติมไอโซโพรพานอลในปริมาณที่แสดงในตารางที่ 3.3 ลงในตัวอย่าง
3. ไทเทรตตัวอย่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยในการหยดสารแต่ละหยดจะต้องเขย่าและสังเกตว่าสีชมพูของฟีนอล์ฟทาลีนยังคงอยู่หลังจากหยุดเป็นเวลา 30 วินาที

**ตารางที่ 3.3** ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ

กรดไขมันอิสระ (%)	สารตัวอย่าง (g)	แอลกอฮอล์ (ml)	ความเข้มข้นของสารละลายเบส (N)
0.0 to 0.2	56.4 ± 0.2	50	0.1
0.2 to 1.0	28.2 ± 0.2	50	0.1
1.0 to 30.0	7.05 ± 0.05	75	0.25
30.0 to 50.0	7.05 ± 0.05	100	0.25 or 0.1
50.0 to 100	3.525 ± 0.001	100	0.1

#### สารเคมีที่ใช้

1. ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่กับปริมาณกรดไขมันอิสระที่อยู่ในสารตัวอย่าง
2. เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนในไอโซโพรพานอลความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

### 3.6.2.4 ปริมาณสารประกอบไอโซอัลเคนและสารประกอบนอร์มอลอัลเคน

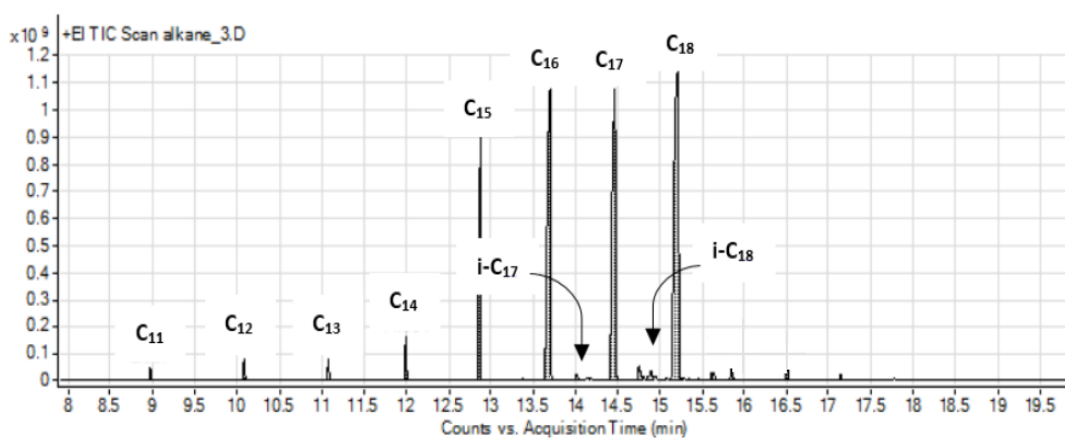
ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในส่วนของเหลวหลังจากแยกน้ำออกจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อดูค่าแมสสเปคที่เป็นไปได้มากที่สุดขององค์ประกอบภายในเฟสน้ำมัน หลังจากทราบค่าความเป็นไปได้แล้วนำสารมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-เฟรมไอออนไนซ์ เพื่อทำการเทียบเวลา (retention time) กับสารมาตรฐาน ทำให้สามารถระบุชนิดของสารที่มีในผลิตภัณฑ์ได้

เครื่องโครมาโตกราฟีใช้ Varian รุ่น 3800 ชนิดคอลัมน์แบบคาปิลารี Agilent HP-5 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร และความหนาชั้นฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร ใช้ตัวตรวจวัดชนิดเฟรมไอออนไนซ์ (Flame Ionization Detector) ใช้ไอโซโพรพานอลเป็นตัวทำละลายและเมทิลออกตะโนเอตเป็นสารมาตรฐานภายใน (Internal Standard) สภาวะคอลัมน์ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงในตารางที่ 3.4 สามารถระบุสารประกอบไอโซอัลเคนและสารประกอบนอร์มอลอัลเคนได้จากโครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างโครมาโตแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.2

การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีทำโดยผสมด้วยตัวทำละลาย (ไอโซโพรพานอล) กับสารมาตรฐาน (เมทิลออกตะโนเอต) ในอัตราส่วน 20 : 1 และนำสารที่ผสมได้ไปผสมกับตัวอย่างในอัตราส่วน 5 : 1 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสารที่ผสมปริมาณ 1 ไมโครลิตรไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี

**ตารางที่ 3.4** สภาวะของคอลัมน์

สภาวะ	
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	40
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิเริ่มต้น (นาที)	4
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิถึง 230 องศาเซลเซียส (องศาเซลเซียสต่อนาที)	15
อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	230
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิสุดท้าย (นาที)	10
อุณหภูมิหัวฉีดสาร (องศาเซลเซียส)	230
อุณหภูมิตัวตรวจวัด (องศาเซลเซียส)	250



รูปที่ 3.2 โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์

### 3.6.2.5 คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำสามารถระบุได้โดยใช้จุดขุ่น (Cloud point) ทดลองหาจุดขุ่นโดยใช้ชุดเครื่องมือตามมาตรฐาน ASTM D2500 ทำการทดลองโดยลดอุณหภูมิน้ำมันลง 1 องศาเซลเซียส ต่อหน้าที่ สังเกตหาอุณหภูมิแรกที่เกิดการขุ่นขึ้น

### 3.6.3 การวิเคราะห์น้ำ

#### 3.6.3.1 ปริมาณน้ำ

หลังจากเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวแล้วนำไปใส่กรวยแยกเฟส น้ำจะถูกแยกออกจากรือน้ำมัน นำน้ำที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณปริมาณร้อยละผลได้

### 3.6.4 การวิเคราะห์ก๊าซ

#### 3.6.4.1 การตรวจหาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในส่วนของเฟสก๊าซจะทำการผ่านเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อตรวจสอบหาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้น หากพบแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้น (น้ำปูนใสขุ่น) แสดงว่ามีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสายก๊าซ เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้น้ำปูนใสขุ่น

### 3.7 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

#### 3.7.1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง มีนิยามดังนี้

$$R.F. = \frac{(A_{I.S.})(m_{Product})}{(A_{Product})(m_{I.S.})} \quad (3.1)$$

โดย R.F. คือ แฟกเตอร์ตอบสนอง

$m_{Alkane}$  คือ มวลของสารประกอบอัลเคนในตัวอย่าง

$A_{Alkane}$  คือ พื้นที่ของสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี

$m_{I.S.}$  คือ มวลของ Internal Standard ในตัวอย่าง

$A_{I.S.}$  คือ พื้นที่ของ Internal Standard จากผลแก๊สโครมาโทกราฟี

ตัวอย่างการคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของ C18 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- น้ำหนักของ C18 = 0.1081 กรัม
- พื้นที่ของ C18 = 6791636
- น้ำหนักของสารมาตรฐาน (เมทิลออกตะโนเอต) = 0.0571 กรัม
- พื้นที่ของสารมาตรฐาน (เมทิลออกตะโนเอต) = 5299921

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.1 จะได้

$$1.476 = \frac{(5299921)(0.1081)}{(6791636)(0.0571)}$$

#### 3.7.2 การคำนวณปริมาณสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี (%wt)

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน(\%wt)} = \frac{(m_{Alkane})(m_{I.S.})(100)}{(m_{Sample})(R.F.)(A_{I.S.})} \quad (3.2)$$

โดย R.F. คือ แฟกเตอร์ตอบสนอง

$m_{Alkane}$  คือ มวลของสารประกอบอัลเคนในตัวอย่าง

$A_{Alkane}$  คือ พื้นที่ของสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี

$m_{I.S.}$  คือ มวลของ Internal Standard ในตัวอย่าง

$A_{I.S.}$  คือ พื้นที่ของ Internal Standard จากผลแก๊สโครมาโทกราฟี



ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณ C18 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- แฟกเตอร์ตอบสนองของ C18 = 1.476
- น้ำหนักของตัวอย่าง = 0.1055 กรัม
- พื้นที่ของ C18 จากผลแก๊สโครมาโทกราฟี = 6522407
- น้ำหนักของสารมาตรฐานในตัวอย่าง = 0.02414 กรัม
- พื้นที่ของสารมาตรฐานจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี = 2903488

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.2 จะได้

$$34.82\%wt = \frac{(6522407)(0.02414)(100)}{(0.1055)(1.476)(2903488)}$$

### 3.7.3 การคำนวณปริมาณร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

(Yields based on feedstock, wt %)

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน(\%wt)} = \frac{(\%wt, \text{alkanes})(g, \text{oil, product})}{(g, \text{olein, reactants})} \quad (3.3)$$

โดย %wt, alkanes คือ ปริมาณสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี (%wt)  
 g, oil phase, product คือ น้ำหนักของเฟสน้ำมันในผลิตภัณฑ์  
 g, olein, reactants คือ น้ำหนักของสารตั้งต้น

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น C18 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- ปริมาณสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟีของ C18(%wt) = 34.82
- น้ำหนักของเฟสน้ำมันในผลิตภัณฑ์ = 96.13 กรัม
- น้ำหนักของสารตั้งต้น = 107.52 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.3 จะได้

$$31.131\%wt = \frac{(34.82)(96.13)}{(107.52)}$$

### 3.7.4 การคำนวณค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (LSHV)

$$\text{LSHV} = \frac{F_{\text{Feed}}}{\text{Volume of Catalyst of Bed}} \quad (3.4)$$

โดย LSHV คือ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว

$F_{Feed}$  คือ อัตราการไหลของสารตั้งต้น

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วเชิงสเปซของเหลวที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ  $1 \text{ ชั่วโมง}^{-1}$  มีค่าดังต่อไปนี้

- อัตราการไหลของสารตั้งต้น = 30 มล./ชม
- ปริมาตรของเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา = 30 มล.

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.4 จะได้

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ชม}^{-1}\text{)} = \frac{30}{30} = 1 \text{ ชม.}^{-1}$$

### 3.7.5 การคำนวณหาร้อยละของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ (%Fatty Acids Oleic)

ค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระ ในรูปของกรดโอเลอิกสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\% \text{ Fatty Acid As Oleic} = \frac{(\text{ml of alkali})(N)(28.2)}{(\text{gram of sample})} \quad (3.5)$$

โดย N คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างการคำนวณหาร้อยละของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์มีค่าดังต่อไปนี้

- ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 1.2 มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 0.001
- ปริมาณน้ำหนักตัวอย่าง = 10.0212 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.5 จะได้

$$\% \text{FFA} = 0.082 = \frac{(1.2)(0.02414)(28.2)}{(10.0212)}$$

### 3.7.6 ค่าความคลาดเคลื่อน (Error bar)

ค่าความคลาดเคลื่อนจะแบ่งเป็นสองค่าคือ

ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดและค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\text{Max error} = (\text{Max Value} - \text{Avg Value}) \quad (3.6)$$

$$\text{Min error} = (\text{Avg Value} - \text{Min Value}) \quad (3.7)$$

โดย Max error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด

Min error	คือ ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด
Max Value	คือ ค่าสูงสุด
Min Value	คือ ค่าต่ำสุด
Avg Value	คือ ค่าเฉลี่ย

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- ค่าสูงสุด = 21.202
- ค่าต่ำสุด = 20.570
- ค่าเฉลี่ย = 20.786

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.6 และ 3.7 จะได้

$$\text{Max error} = ( \text{Max Value} - \text{Avg Value} ) = ( 21.202 - 20.786 ) = 0.416$$

$$\text{Min error} = ( \text{Avg Value} - \text{Min Value} ) = ( 20.786 - 20.570 ) = 0.216$$



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของพาล์มโอเลอิน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่องเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความดัน และตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ผลการทดลองจะถูกนำเสนอและอภิปราย ตามลำดับต่อไปนี้

- 4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น
- 4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา
- 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชิงคุณภาพและแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติง
- 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน
- 4.5 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน
- 4.6 ผลกระทบของสภาวะในการทดลองและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น

น้ำมันพาล์มโอเลอินเป็นส่วนหนึ่งของน้ำมันพาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการแยกกรดไขมันอิสระและไซพาล์มสเตอรินออก โดยน้ำมันพาล์มโอเลอินมีสีเหลืองและมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งประกอบด้วยกิ่งของกรดไขมันหลายชนิด โดยองค์ประกอบของน้ำมันพาล์มโอเลอินจะเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไปตามแหล่งที่ผลิต ทำให้จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบก่อนทำการทดลองเพื่อให้สามารถอภิปรายผลการทดลองได้อย่างถูกต้อง องค์ประกอบของกรดไขมันในโมเลกุลน้ำมันพาล์มโอเลอินสามารถวิเคราะห์ได้ในรูปแบบเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้เทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี (โดยให้น้ำมันพาล์มโอเลอินทำปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันกับกรดแก่สองครั้งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์) ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลสามารถคำนวณจากค่าของกรด ค่าองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพาล์มโอเลอินแสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน

ชนิดของกรดไขมัน	โครงสร้างของกรดไขมัน	มวลโมเลกุล		องค์ประกอบ
		กรดไขมัน	ไตรกลีเซอไรด์	
Lauric acid	C12:0	200.3	639.00	0.41
Myristic acid	C14:0	228.4	723.20	0.22
Palmitic acid	C16:0	256.4	807.30	37.56
Palmitoleic acid	C16:1	254.4	801.30	0.18
Stearic acid	C18:0	284.5	891.50	4.04
Oleic acid	C18:1	282.5	885.40	44.96
Linoleic acid	C18:2	280.4	879.40	12.38
Linolenic acid	C18:3	278.4	873.30	0.24
ผลรวมองค์ประกอบอิ่มตัว				42.24
ผลรวมองค์ประกอบไม่อิ่มตัว				57.76
ผลรวมองค์ประกอบที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม				37.74
ผลรวมองค์ประกอบที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม				61.63
น้ำหนักโมเลกุล (กรัม/โมล)				853.93
ปริมาณกรดไขมันอิสระ (ร้อยละโดยมวล)				0.05
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)				0.895

ผลการวิเคราะห์วัตถุบในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของกรดไขมันที่อยู่ในน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้เทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟฟี แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มโอเลอินมีองค์ประกอบของกรดไขมันที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัวปนกัน ซึ่งมีช่วงคาร์บอนตั้งแต่ 12 ถึง 18 อะตอม โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอม ซึ่งเป็นช่วงคาร์บอนของน้ำมันปาล์มโอเลอินมีเหมาะสมต่อการนำไปผลิตเป็นดีเซลที่มีคุณภาพสูง (มีค่าซีเทนที่สูง) ผลการวิเคราะห์น้ำมันปาล์มโอเลอินสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่เลือกใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น [4], [13]

## 4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ( $\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ( $\text{NiCoMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ เทคนิคบีอีที และเทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอนุกรมมีเพื่อหาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

### 4.2.1 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF, X-ray fluorescence) ในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าโคบอลต์ออกไซด์ได้ถูกเติมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมในปริมาณ 4.14 ร้อยละโดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณโลหะอื่นๆ เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

การเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต้องทำการควบคุมน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้เท่ากันทุกครั้งเพื่อตัดผลกระทบของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาออก แต่การที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีโลหะโคบอลต์ออกไซด์เพิ่มขึ้นมา ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีปริมาณนิกเกิลออกไซด์และโมลิบดีนัมออกไซด์ที่เป็นโลหะสำคัญที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาลดลง แต่หากคำนวณปริมาณโลหะที่ลดลง พบว่ามีปริมาณโลหะลดลงเพียงร้อยละ 0.94 เท่านั้นซึ่งถือว่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ดังนั้นหากผลการทดลองเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าร้อยละ 0.94 จะเป็นผลกระทบมาจากผลของโลหะโคบอลต์ออกไซด์ที่ถูกเติมลงไปแทนที่จะเป็นผลของโลหะนิกเกิลออกไซด์และโมลิบดีนัมออกไซด์ที่ลดลง

**ตารางที่ 4.2** ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

องค์ประกอบ	NiMo (ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก)	NiMoCo (ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	71.60	68.42
MoO <sub>3</sub>	21.24	20.66
NiO	6.63	6.27
CoO	0.00	4.14
K <sub>2</sub> O	0.11	0.11
CaO	0.15	0.14
SeO <sub>2</sub>	0.27	0.26

#### 4.2.2 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคบีอีที (BET, Brunauer-Emmett-Teller) ในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าผลการเติมโลหะโคบอลต์ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเพื่อเปลี่ยนให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างมีนัยสำคัญ

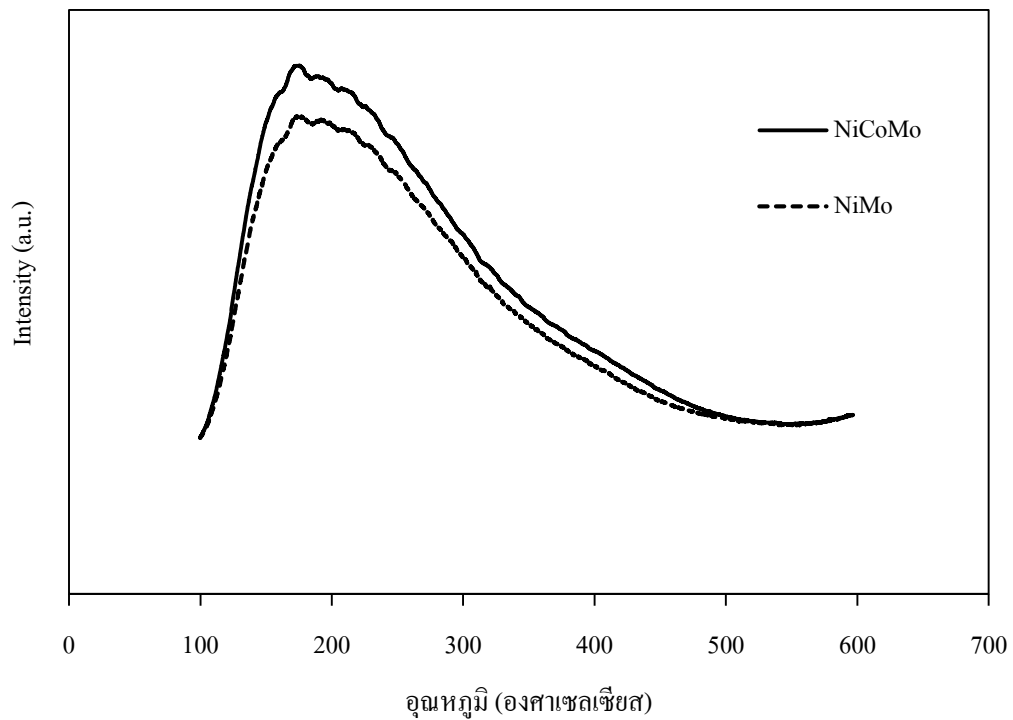
**ตารางที่ 4.3** ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm <sup>3</sup> /g)	เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (nm)
NiMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	87.566	0.1224	1.21
NiCoMo/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	75.045	0.0912	1.21

#### 4.2.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ (NH<sub>3</sub>-TPD, Temperature-Programmed Desorption of Ammonia) ในรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงชนิดโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลกระทบต่อปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมจะมีทั้งปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ปริมาณของกรดบนพื้นผิวที่มากกว่าแสดงจากปริมาณของแอมโมเนียที่คายออกมามีปริมาณมากกว่า และความแรงของกรดที่บนพื้นผิวที่สูงกว่าแสดงจาก

อุณหภูมิที่ใช้ในการคายแอมโมเนียที่สูงกว่า เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีโลหะโคบอลต์ซึ่งโลหะโคบอลต์มีความเป็นกรดที่สูงกว่าโลหะนิกเกิลและโลหะโมลิบดีนัม โดยปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่ต้องอาศัยความเป็นกรดในการเร่งปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน



**รูปที่ 4.1** การคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม



### 4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์เชิงคุณภาพและแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง

การศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของพาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม ผลิตภัณฑ์ถูกวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบของสารด้วยเทคนิคต่างๆ ดังต่อไปนี้คือ เทคนิคการใช้กรวยแยกเฟส เทคนิคการไทเทรตตามวิธีการมาตรฐาน Ca-5a-40 เทคนิคการใช้แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์ แก๊สโครมาโทกราฟี-เฟรมไอออนไนซ์ และเทคนิคการผ่านก๊าซเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลวิเคราะห์เชิงคุณภาพซึ่งเป็นผลวิเคราะห์เบื้องต้นก่อนนำไปวิเคราะห์และอภิปรายผลวิเคราะห์เชิงปริมาณต่อไป

#### 4.3.1 เทคนิคการใช้กรวยแยกเฟส

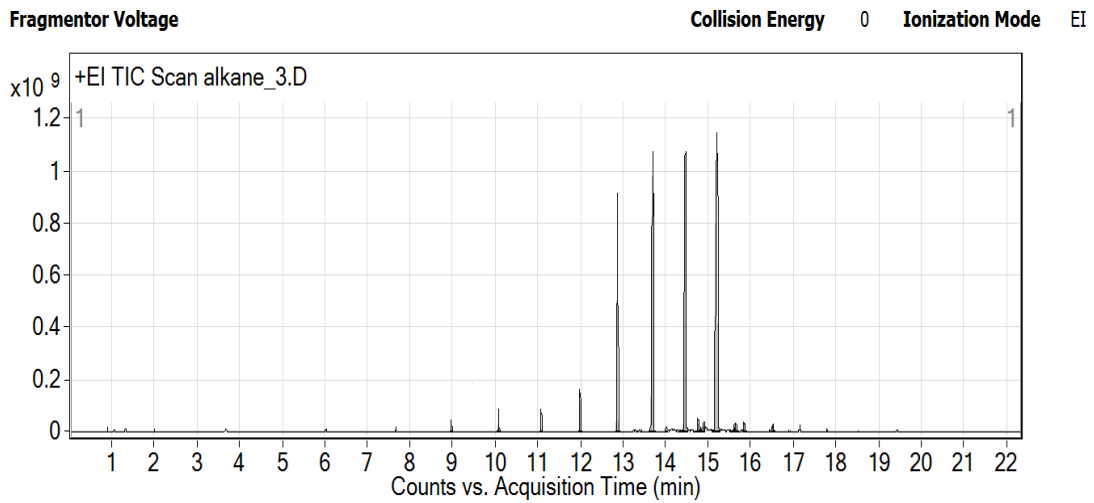
ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่ามีเฟสน้ำแยกออกจากเฟสน้ำมันในทุกสภาวะการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการกำจัดออกซิเจนจะต้องวิ่งผ่านปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน หรือปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเนื่องจากจะได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง

#### 4.3.2 เทคนิคการไทเทรตตามวิธีการมาตรฐาน Ca-5a-40

ผลการไทเทรตพบว่ามีกรดไขมันอิสระอยู่ในผลิตภัณฑ์ในทุกสภาวะการทดลอง สอดคล้องกับแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้บอกไว้ว่าการเกิดเป็นสารประกอบอัลเคนจากไตรกลีเซอไรด์ต้องเกิดผ่านกรดไขมันอิสระ

#### 4.3.3 เทคนิคการใช้แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์และแก๊สโครมาโทกราฟี-เฟรมไอออนไนซ์

ผลการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปคโตรมิเตอร์และแก๊สโครมาโทกราฟี-เฟรมไอออนไนซ์แสดงตัวอย่างโครมาโตแกรมแสดงดังรูปที่ 4.2 จากผลการวิเคราะห์ทำให้ระบุได้ว่าสารในผลิตภัณฑ์คือ สารประกอบอัลเคนโดยมีคาร์บอนอะตอมอยู่ในช่วง 4 ถึง 18 อะตอม โดยมีทั้งสารประกอบนอร์มอลอัลเคนและสารประกอบไอโซอัลเคนอยู่ในผลิตภัณฑ์



**รูปที่ 4.2** โครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

#### 4.3.4 เทคนิคการผ่านก๊าซเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์

ผลการวิเคราะห์การผ่านเฟสก๊าซเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่าเกิดแคลเซียมคาร์บอเนต (น้ำปูนใสขุ่น) ในทุกสภาวะการทดลองแสดงว่ามีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในทุกสภาวะการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการกำจัดออกซิเจนต้องวิ่งผ่านปฏิกิริยาปฏิกิริยาดีคาร์บอเนชันที่ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ หรือปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์แต่อาจจะเกิดปฏิกิริยาออกเตอรแก์ซิสฟัดต่อเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ได้

ผลวิเคราะห์ต่างๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถระบุชนิดของสารที่เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์ได้ดังต่อไปนี้คือ น้ำ กรดไขมันอิสระ สารประกอบอัลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมในช่วง 4 ถึง 18 อะตอม และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

#### 4.3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยา

การระบุชนิดของสารที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ ผลวิเคราะห์สารตั้งต้น สภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง ทำให้สามารถเลือกนำแผนผังการปฏิกิริยาของงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องและมีลักษณะใกล้เคียงกันมาประยุกต์ใช้ในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของงานวิจัยนี้ โดยที่แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.3 (Veriansyah และคณะ 2012 [7]) มีความสอดคล้องกับชนิดของสารที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

Veriansyah และคณะ 2012 [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 92 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม พาราเดียม รูทีเนียม นิกเกิล นิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ได้เสนอแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยได้อธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังต่อไปนี้

สารตั้งต้นที่เลือกใช้คือ น้ำมันถั่วเหลืองซึ่งจะประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว โดยปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชมีกลไกการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรกคือปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันทำหน้าที่เปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ที่ไม่อิ่มตัวเป็นไตรกลีเซอไรด์อิ่มตัว ไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัวจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงต่อแตกตัวได้เป็นกรดไขมันอิสระและโพรเพน กรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดออกซิเจนออกเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบอัลเคนผ่านสามปฏิกิริยาคือ

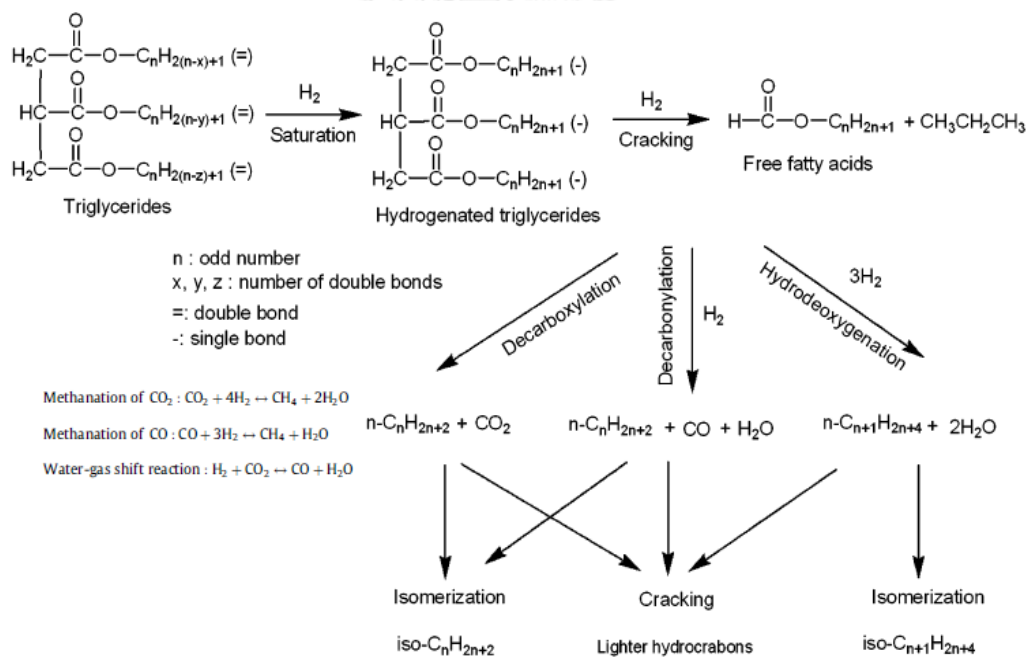
1. ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน เป็นการกำจัดออกซิเจนออกโดยใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นน้ำ
2. ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เป็นการกำจัดออกซิเจนออกโดยใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นน้ำ และคาร์บอนมอนอกไซด์ทำให้สูญเสียคาร์บอนหนึ่งอะตอมไปกับการทำปฏิกิริยา
3. ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน เป็นการกำจัดออกซิเจนออกโดยไม่ใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้สูญเสียคาร์บอนหนึ่งอะตอมไปกับการทำปฏิกิริยา เช่นเดียวกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นต่างกันทำให้สามารถระบุได้ว่าสารประกอบอัลเคนที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาใด โดยหากสารประกอบอัลเคนที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันจะมีจำนวนคาร์บอนเท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันในสารตั้งต้น แต่หากสารประกอบอัลเคนที่มา

จากปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน หรือปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะมีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่าจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันในสารตั้งต้นหนึ่งอะตอม เนื่องจากสูญเสียคาร์บอนไปกับผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือ คาร์บอนมอนอกไซด์หรือคาร์บอนไดออกไซด์

ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำไม่สามารถใช้ในการระบุเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาได้ เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงอื่นต่อได้เช่น ปฏิกิริยามีเทนเนชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ ปฏิกิริยามีเทนเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาออกซิเดชันแก๊สซิฟิเคชัน ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่าคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำมาจากปฏิกิริยาใด

นอกจากนั้น Veriansyah และคณะ ยังได้เสนอว่าถ้าหากสารประกอบอัลเคนอยู่ในสภาวะเหมาะสมอาจเกิดปฏิกิริยาอื่นต่อได้เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเปลี่ยนสารประกอบอัลเคนโมเลกุลใหญ่เป็นสารประกอบอัลเคนโมเลกุลเล็กซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดเนื่องจากจะสูญเสียช่วงคาร์บอนอะตอมที่เหมาะสมต่อการผลิตดีเซล หรือปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเปลี่ยนสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคนเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิดต่อเนื่องจากช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้



รูปที่ 4.3 แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดย Veriansyah [7]

สารประกอบอัลเคนที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์หลักจากการทำปฏิกิริยา โดยมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นจากการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ

#### 4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

##### 4.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ

แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีกรดไขมันอิสระเป็นสารตัวกลาง (Intermediate) ของปฏิกิริยา ปริมาณของกรดไขมันอิสระที่พบในผลิตภัณฑ์บ่งบอกถึงความสามารถของปฏิกิริยาในขั้นการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ หากพบปริมาณกรดไขมันอิสระเหลืออยู่มากแสดงว่าปฏิกิริยาในขั้นการกำจัดออกซิเจนเกิดได้ไม่ดีทำให้ออกซิเจนบางส่วนยังคงเหลืออยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระ ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถวิเคราะห์ได้จากวิธีไทเทรตมาตรฐาน AOCS Ca-5a-40 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลือในผลิตภัณฑ์แสดงในรูปที่ 4.4

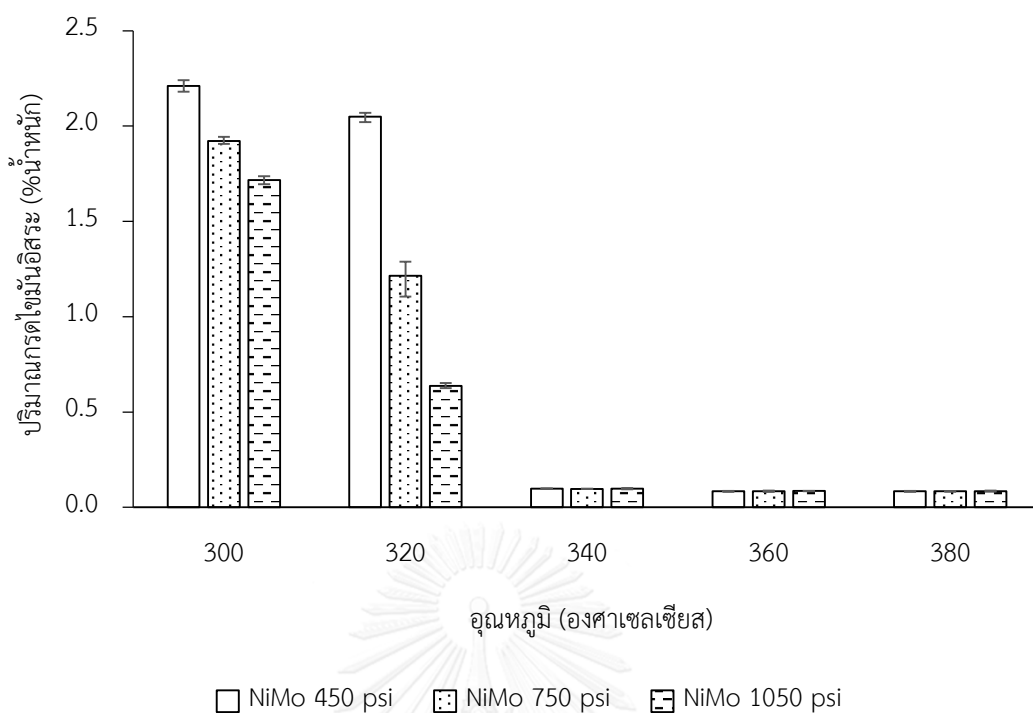
ผลการทดลองในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าทั้งอุณหภูมิ และความดันส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้น ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ช่วงที่อุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) ปริมาณกรดไขมันอิสระที่พบมีปริมาณสูงแสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาในขั้นการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระเกิดได้ไม่ดี ทำให้ออกซิเจนบางส่วนยังคงเหลืออยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระ (ปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 0.1% ) ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 340 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณของกรดไขมันอิสระต่ำลงจนมีค่าใกล้เคียงศูนย์ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงมากกว่า 340 องศาเซลเซียส ปริมาณของกรดไขมันอิสระที่พบในผลิตภัณฑ์จะแทบไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากปฏิกิริยาสามารถกำจัดออกซิเจนออกได้เกือบสมบูรณ์ทำให้แทบจะไม่เห็นผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาอีก

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาเกิดดีขึ้น เนื่องจากทฤษฎีของจลนพลศาสตร์เคมีกล่าวไว้ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีผลขึ้นกับตัวแปรคือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าคงที่ของปฏิกิริยา โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยามีผลขึ้นกับอุณหภูมิตามสมการของ Arrhenius คือการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสูงขึ้น และมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์ [13] ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช ผลการศึกษาพบว่าการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระเริ่มต้นที่ 300 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนจะเกิดได้เกือบสมบูรณ์ที่ 350 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับงานวิจัยของ ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว [15] ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิต่ำ (300 และ 320 องศาเซลเซียส) จะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณของกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิสูง (ตั้งแต่ 340 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส อัตราการ

เกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาที่ใช้กำจัดออกซิเจนเกิดได้เร็วมาก จึงทำให้แทบไม่พบปริมาณกรดไขมันอิสระเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์อีก

ความดันเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ การกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระสามารถทำได้โดยให้กรดไขมันอิสระทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจน การเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มค่าการละลายของไฮโดรเจนและเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มความดันจึงช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ โดยจากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความดันจะช่วยเพิ่มความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระโดยแสดงจากปริมาณกรดไขมันอิสระที่พบในผลิตภัณฑ์ลดลง โดยความดันจะส่งผลกระทบต่อปริมาณกรดไขมันอิสระชัดเจนเฉพาะช่วงอุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) เนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้ปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระยังไม่สามารถเกิดได้ดี ทำให้เห็นผลกระทบของความดันอย่างชัดเจนแต่เมื่ออุณหภูมิถึง 340 องศาเซลเซียสเป็นต้นไปความดันจะแทบไม่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระอีก เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิตั้งกล่าวปฏิกิริยาในการกำจัดออกซิเจนสามารถเกิดได้อย่างดีอยู่แล้ว ทำให้การเพิ่มความดันจึงไม่ช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นไปอีก



**รูปที่ 4.4** ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

#### 4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม

แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพีชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.3 ได้ระบุไว้ว่าการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งสามารถเกิดผ่านได้ทั้งสามปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน เนื่องจากทั้งสามปฏิกิริยาจะมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่แตกต่างกันทำให้สามารถระบุได้ว่าสารประกอบอัลเคนที่เกิดขึ้นผ่านปฏิกิริยาใด สารประกอบอัลเคนที่มาจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีจำนวนคาร์บอนเท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันในสารตั้งต้นซึ่งคือ คาร์บอน 16 อะตอมและคาร์บอน 18 อะตอม แต่สารประกอบอัลเคนที่มาจากปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันหรือปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะมีจำนวนคาร์บอนน้อยกว่าจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันในสารตั้งต้น 1 อะตอมเนื่องจากสูญเสียคาร์บอนไปกับผลิตภัณฑ์ข้างเคียงทำให้สารประกอบอัลเคนที่ได้จะมีคาร์บอน 15 อะตอม และคาร์บอน 17 อะตอม

ผลการทดลองในรูปที่ 4.5 เป็นผลรวมปริมาณของสารประกอบอัลเคนที่เกิดจากทั้งสามปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

(C15-18 wt%) ในสภาวะการทดลองที่แตกต่างกัน โดยผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทั้งสามปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้นตามกฎของ Arrhenius โดยมีปริมาณสารประกอบอัลเคนสูงสุดที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส และลดลงเล็กน้อยที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากสารประกอบอัลเคนบางส่วนเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวต่อกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kwon และคณะ [21] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันคาโนลาบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิตินัม ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ความดัน 18.25 ถึง 85.13 บาร์ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชัน อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่ออย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิต่ำ (300-340 องศาเซลเซียส) และผลกระทบของอุณหภูมิจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงช่วง 340 ถึง 400 องศาเซลเซียส

ผลกระทบของความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนพบว่าเมื่อความดันสูงขึ้นปริมาณสารประกอบอัลเคนจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจะเพิ่มค่าการละลายของไฮโดรเจน และเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันทำให้ปฏิกิริยาที่ใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยาสามารถเกิดได้ดีขึ้น ในขั้นตอนการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชันต้องใช้ 3 โมลไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยาซึ่งต่างจากปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันซึ่งใช้ 1 โมลไฮโดรเจนเข้าทำปฏิกิริยา และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ไม่ใช่ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยาดังนั้นการเพิ่มความดันส่งผลให้การกำจัดออกซิเจนเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชันมากขึ้น และช่วยลดการสูญเสียคาร์บอนไปกับผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่มาจากเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันส่งผลให้ปริมาณสารประกอบอัลเคนเพิ่มสูงขึ้น

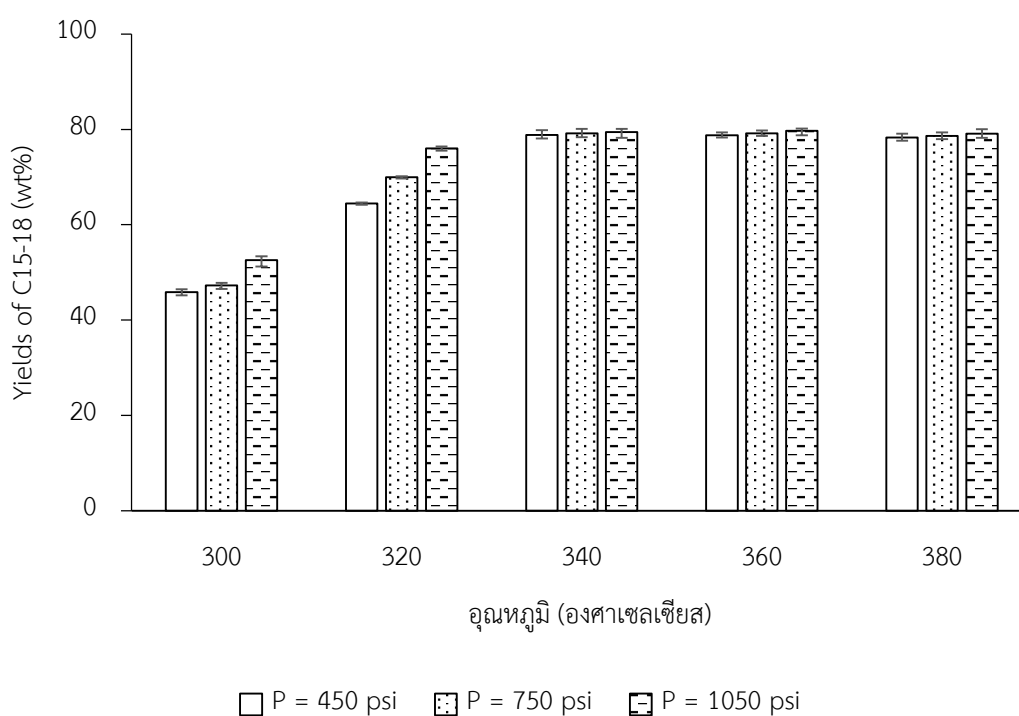
ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Krár และคณะ [14] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ถึง 80 บาร์ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อความดันสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชันจะสามารถเกิดได้ดีขึ้น ผลกระทบของความดันจะมีมากที่อุณหภูมิต่ำ และผลกระทบค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sankaranarayanan และคณะ [22] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิตินัม ที่อุณหภูมิ 320 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 30 ถึง 50 บาร์ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความดันจะช่วยเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชันได้ดีขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิ

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Marton และคณะ [14] ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อสัดส่วนปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มาจากขั้นตอนการกำจัดออกซิเจนต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมทั้งหมด ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิและความดันจะส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มาจากขั้นตอนการกำจัดออกซิเจน



ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 320 องศาเซลเซียสเท่านั้น การเพิ่มอุณหภูมิหรือความดันในช่วงอุณหภูมิที่มากกว่า 340 องศาเซลเซียส จะไม่ส่งผลกระทบต่อขั้นตอนการกำจัดออกซิเจนอีกแต่จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของสารประกอบอัลเคนแทน ทำให้สัดส่วนปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มาจากขั้นตอนการกำจัดออกซิเจนต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมทั้งหมดลดลงที่อุณหภูมิมากกว่า 340 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองในรูปแบบที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันมากกว่าความดัน ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang และคณะ [16] ที่กล่าวว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งมากที่สุด



**รูปที่ 4.5** ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

#### 4.4.3 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้นและแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบอัลเคนที่เกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และคาร์บอน 18 อะตอม ส่วนสารประกอบอัลเคนที่เกิดผ่านปฏิกิริยาปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และ

ดีคาร์บอกซิเลชันจะมีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม และคาร์บอน 17 อะตอม ดังนั้นเมื่อนำโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 อะตอมหารด้วยคาร์บอน 16 อะตอม และนำโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 หารด้วยคาร์บอน 18 อะตอม ได้สัดส่วนโดยโมลที่สามารถระบุเส้นทางปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระได้ โดยหากสัดส่วนโดยโมลมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าสารประกอบอัลเคนที่เกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันมากกว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันและดีคาร์บอกซิเลชัน แต่หากสัดส่วนโดยโมลมีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าสารประกอบอัลเคนที่ได้ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันน้อยกว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันและดีคาร์บอกซิเลชัน

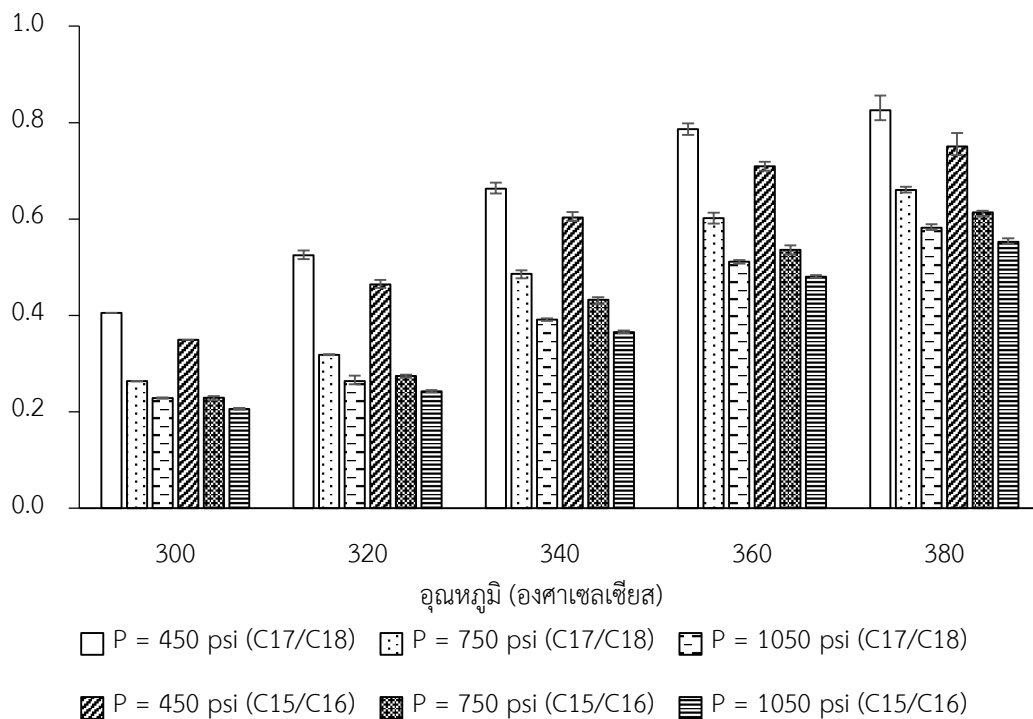
ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 จะแสดงให้เห็นว่าสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม และสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม มีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกสภาวะการทดลองแสดงว่าปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระคือปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชัน มีปฏิกิริยาร่วมในการกำจัดออกซิเจนออกคือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน โดยเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดออกซิเจนเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนสภาวะในการทดลองโดยแสดงจากสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม และสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเปลี่ยนสภาวะในการทดลอง

ผลการทดลองในรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสารประกอบอัลเคนที่ได้จะเกิดผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันมากขึ้น แต่เกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันลดลงแสดงจากแนวโน้มของสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอมและสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ความดันเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาในการกำจัดออกซิเจน เมื่อความดันสูงขึ้นสารประกอบอัลเคนจะเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันมากขึ้น แต่เกิดผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันลดลงเพราะการเพิ่มความดันจะเพิ่มค่าการละลายของไฮโดรเจน และเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยา ทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันเกิดได้ดีขึ้นแสดงจากแนวโน้มของสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม และสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์ [13] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของพาล์มโอเลอิน พาล์มสเตयरิน และกรดไขมันพาล์มที่อุณหภูมิ 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระคือ ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและมีปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นปฏิกิริยาร่วมในการกำจัดออกซิเจนออก

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gong และคณะ 2013 [20] ที่ศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์ของปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้น ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน โดยพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน แต่ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่เป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อนส่งผลให้การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันมากกว่าการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้น

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yuhan Yang และคณะ [16] ที่ศึกษาผลกระทบของความดันต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจน พบการศึกษาพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจนชั้นต้องการจำนวนโมลไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยามากกว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันนั้น ส่งผลให้เมื่อลดความดันจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดผ่านเส้นทางที่ต้องการจำนวนโมลไฮโดรเจนน้อยกว่า ทำให้ยิ่งความดันต่ำเส้นทางปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนยิ่งเกิดผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันยิ่งมากขึ้น



**รูปที่ 4.6** ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อสัดส่วนโดยโมลของสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอมและสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัม

#### 4.4.4 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม

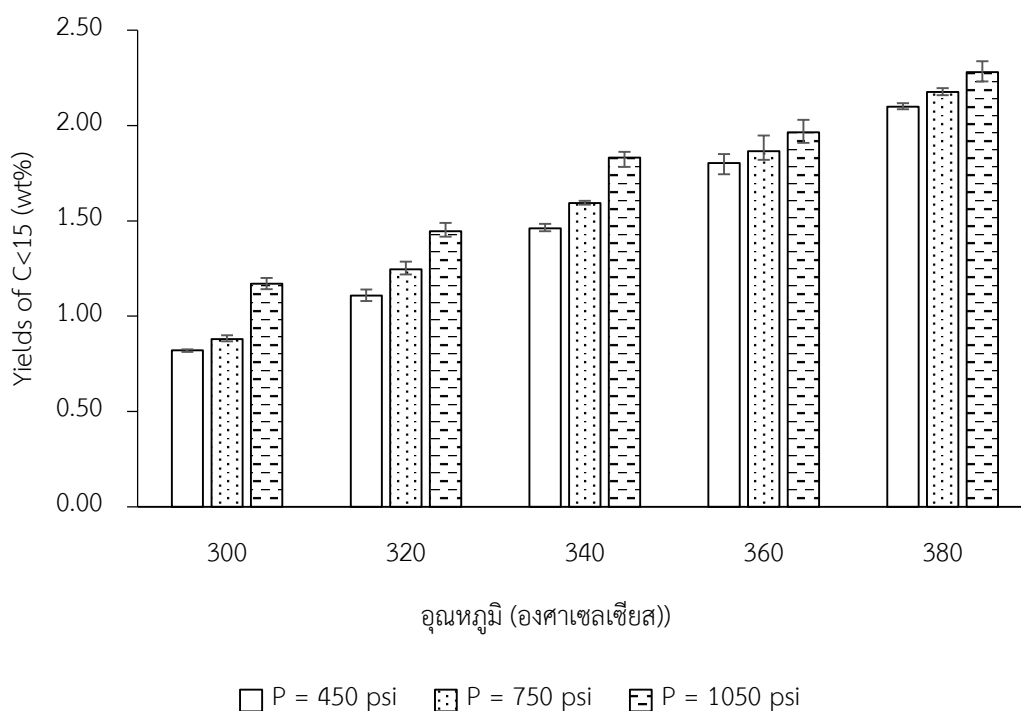
หากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของพาล์มโอเลอินสิ้นสุดที่ขั้นตอนการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระผ่าน 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน สารประกอบอัลเคนที่พบในผลิตภัณฑ์ต้องมีคาร์บอนอะตอมอยู่ในช่วง 15 อะตอมถึง 18 อะตอมเท่านั้น แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้กลับพบจำนวนคาร์บอนอะตอมที่ต่ำกว่า 15 อะตอม ดังรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบอัลเคนบางส่วนยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อได้ เนื่องจากสารประกอบอัลเคนอื่น (มีคาร์บอนอะตอมนอกเหนือช่วง 15 ถึง 18 อะตอม) ที่พบเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลที่เล็กลง ดังนั้นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจึงเป็นปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงต่อเปลี่ยนสารโมเลกุลใหญ่ให้แตกตัวกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง

ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเป็นปฏิกิริยาที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนสารโมเลกุลใหญ่ให้แตกตัวกลายเป็นสารโมเลกุลที่เล็กลงจะส่งผลให้ช่วงคาร์บอนของผลิตภัณฑ์ที่ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตน้ำมันดีเซล ช่วงคาร์บอนอะตอมที่เหมาะสมไม่ควรต่ำกว่า 15 อะตอม เนื่องจากทำให้น้ำมันดีเซลมีค่าซีเทนต่ำ ทำให้คุณภาพการใช้งานในเครื่องยนต์ไม่ดี

ผลการทดลองในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิ และความดันส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเกิดได้ดีขึ้นที่อุณหภูมิสูงแสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 อะตอมมีปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงต้องการพลังงานที่มากพอสำหรับการแตกพันธะระหว่างคาร์บอนตอม (C-C bond) การเพิ่มอุณหภูมิถือเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มพลังงานที่ใช้ในการแตกพันธะนอกเหนือจากการเพิ่มอุณหภูมิแล้วการเพิ่มความดันยังเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงต้องการใช้ไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มค่าการละลายและเพิ่มความสามารถของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเกิดได้ดีขึ้น ผลการทดลองในรูปที่ 4.7 สอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 4.5 ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส สารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอมจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากสารประกอบอัลเคนบางส่วนเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงต่อแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลง

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shaofeng และคณะ [20] ที่ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อสัดส่วนสารประกอบอัลเคนโมเลกุลใหญ่ และโมเลกุลเล็กที่เปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ หรือเพิ่มความดัน สัดส่วนของสารประกอบอัลเคนโมเลกุลเล็กจะเพิ่มมากขึ้น แต่สัดส่วนของสารประกอบอัลเคนโมเลกุลใหญ่จะลดลงแทนเป็นผลมาจากปฏิกิริยา

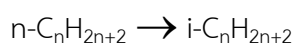
ไฮโดรแครกกิงเกิดได้ดีขึ้น โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดได้นั้นต้องการพลังงานมากพอที่จะสลายพันธะ C-C ซึ่งต้องการอุณหภูมิ และความดันที่สูงในการสลายพันธะ



**รูปที่ 4.7** ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

#### 4.4.5 ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน

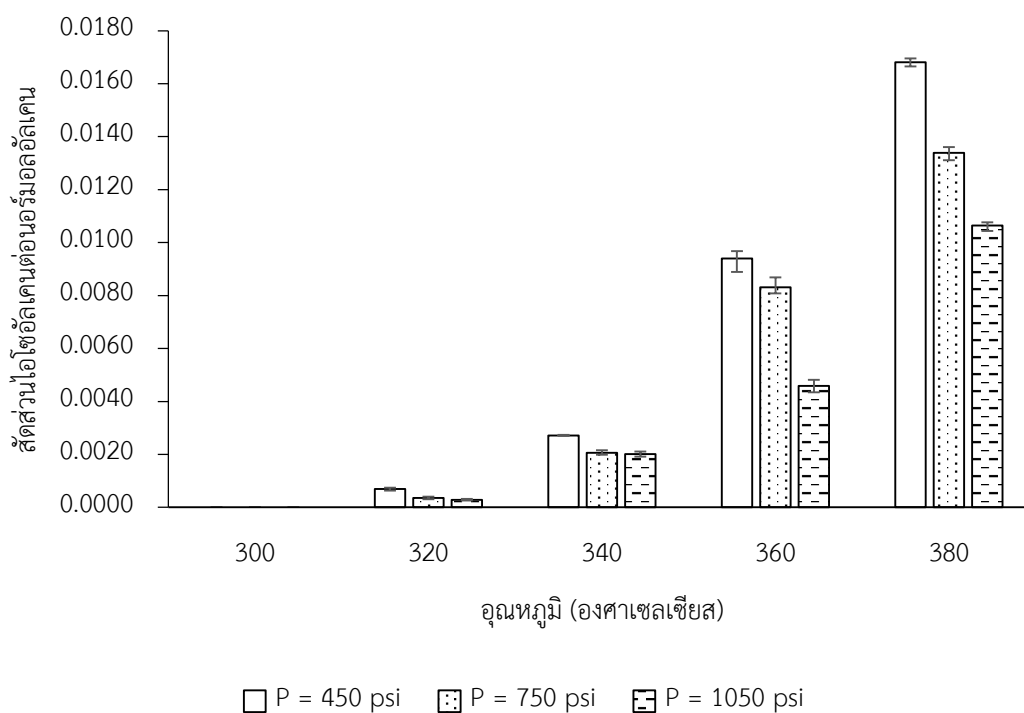
สารประกอบอัลเคนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคน สารประกอบนอร์มอลอัลเคนพบปัญหาด้านการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงต้องการให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อให้มากที่สุดเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น จากรูปที่ 4.8 เป็นรูปปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันแสดงการเปลี่ยนโครงสร้างจากสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน



**รูปที่ 4.8** ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

ผลการทดลองในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบอัลเคนบางส่วนสามารถทำปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันต่อเปลี่ยนโครงสร้างจากสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน สัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ และลดความดันซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง และความดันต่ำ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันต้องเกิดผ่านคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งคาร์บอนเนียมไอออนจะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มจำนวนคาร์บอนเนียมไอออนจึงช่วยทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น แต่การเพิ่มความดันกลับทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนที่ละลายลงในน้ำมันส่งผลให้คาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นมีโอกาสไปจับกับไฮโดรเจนแทน และลดโอกาสที่คาร์บอนเนียมไอออนไปจับกับคาร์บอนเนียมไอออนด้วยตัวเอง

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Toba และคณะ [9] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งและปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันของน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่อุณหภูมิ 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 70 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลทังสเตน และโคบอลต์โมลิบดีนัม ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sandor และคณะ [17] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่อุณหภูมิ 280 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ถึง 80 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และนิกเกิลโมลิบดีนัมฟลูออรีน ผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มความดันจะลดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน



**รูปที่ 4.9** ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

#### 4.5 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

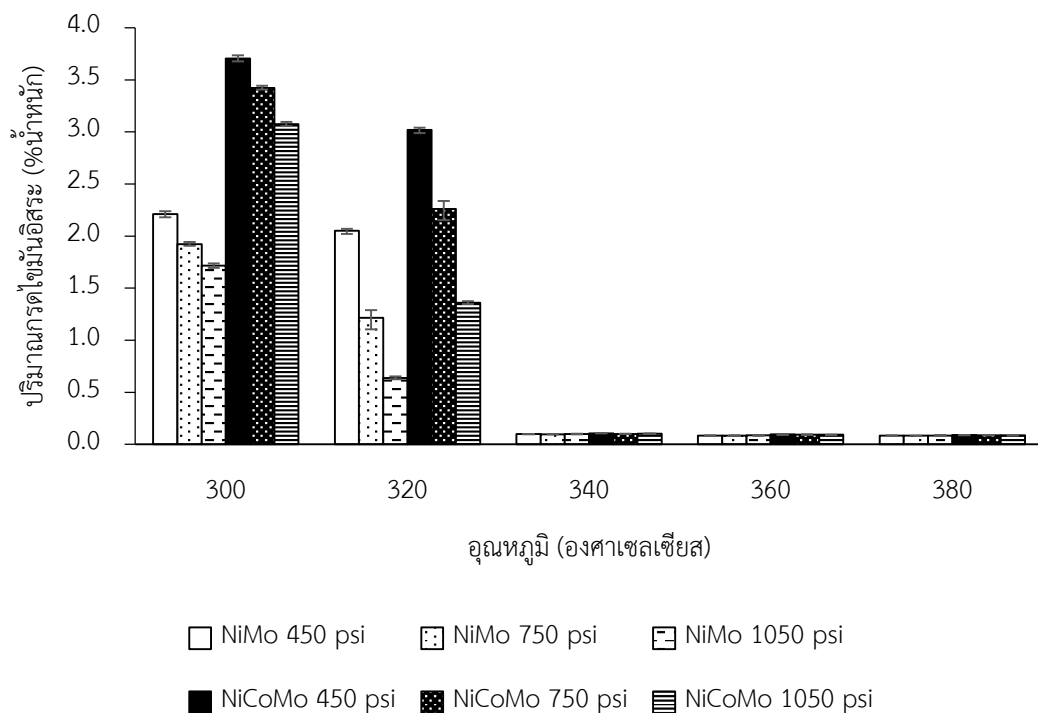
ในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม เพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง (เปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคน) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (เปลี่ยนสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน)

##### 4.5.1 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ

ผลการทดลองในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่ออัตราการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นและปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ หากทำการเปรียบเทียบในสถานะการทดลองเดียวกันตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะพบปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์น้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสามารถในการกำจัดออกซิเจนสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงว่าการเติมโคบอลต์จะหน่วงความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นที่อุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) เห็นผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างมีนัยสำคัญ

เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาจะไม่สามารถกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นได้อย่างสมบูรณ์ทำให้เห็นผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างชัดเจน แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 340 องศาเซลเซียส จะเห็นผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาสามารถกำจัดออกซิเจนออกได้อย่างสมบูรณ์ส่งผลให้ไม่เห็นผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาอีก

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bezergianni และคณะ 2012 [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันของน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่อุณหภูมิ 330 ถึง 390 องศาเซลเซียส ความดัน 82.7 ถึง 137.9 บาร์ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์พบว่าในสภาวะการทดลองเดียวกันตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมพบปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม



**รูปที่ 4.10** ผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

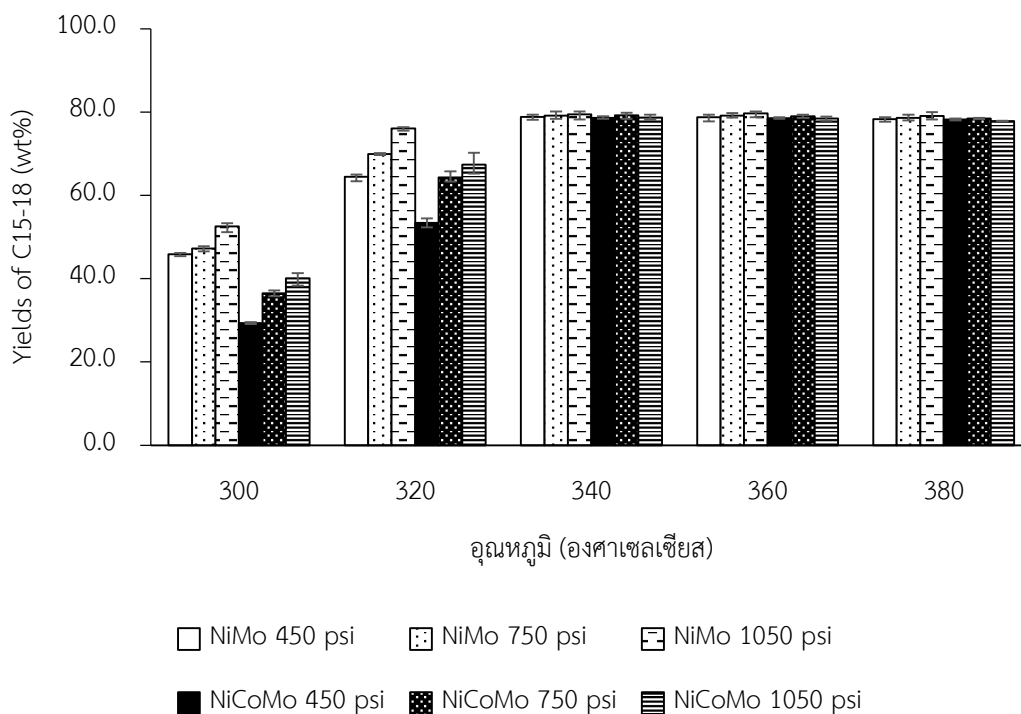


#### 4.5.2 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18

##### อะตอม

ผลการทดลองในรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม (C15-18 wt%) ที่เกิดขึ้นจากทั้งสามปฏิกิริยา (ปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน) ในผลิตภัณฑ์ต่างกัน โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะมีปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ในผลิตภัณฑ์สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสามารถในการกำจัดออกซิเจนสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม ผลการทดลองสอดคล้องกับผลของปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ในรูปที่ 4.10 แสดงว่าการเติมโคบอลต์ลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาหน่วงความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้น ทำให้พบปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอมลดลง

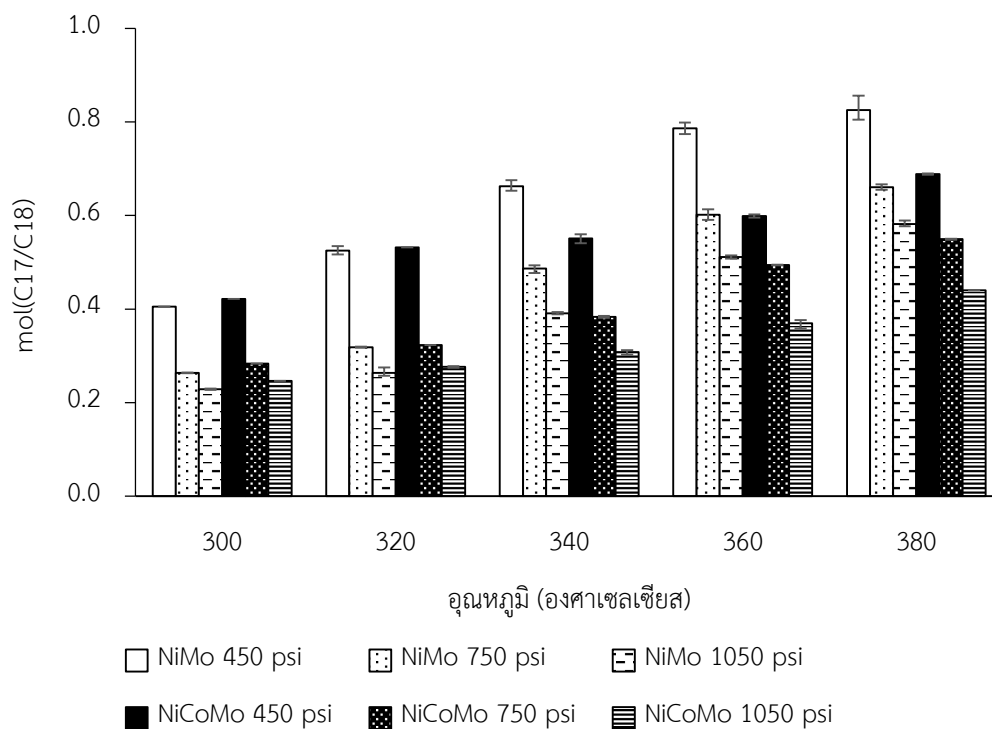
โดยผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม จะส่งผลอย่างมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำทั้งสามปฏิกิริยา (ปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน) ยังไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 340 องศาเซลเซียส จะเห็นผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเนื่องจากทั้งสามปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีทำให้เห็นความแตกต่างของปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอมเพียงเล็กน้อย



**รูปที่ 4.11** ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

#### 4.5.3 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา

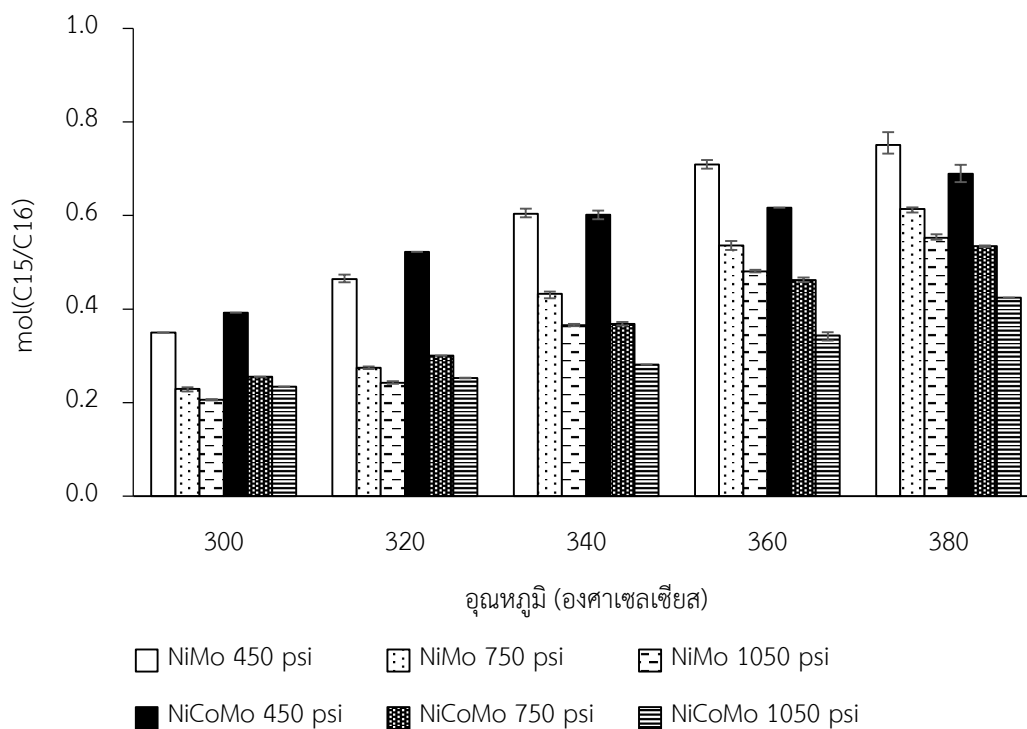
ผลการทดลองในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าไม่ว่าจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม หรือตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม สัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม และสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม มีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกสภาวะการทดลอง แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ ปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนยังคงเป็นปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชัน มีปฏิกิริยาร่วมในการกำจัดออกซิเจนออกคือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน แต่การเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลกระทบต่อสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม และสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม โดยมีแนวโน้มที่แตกต่างกันในสองช่วงอุณหภูมิคือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) และช่วงอุณหภูมิสูง (340 ถึง 380 องศาเซลเซียส)



**รูปที่ 4.12** ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม และสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงว่าในช่วงอุณหภูมินี้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะกำจัดออกซิเจนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

แต่ในช่วงอุณหภูมิสูง (340 ถึง 380 องศาเซลเซียส) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะมีสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม และสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 17 ต่อ 18 อะตอม ที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงว่าในช่วงอุณหภูมินี้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะกำจัดออกซิเจนผ่านปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม



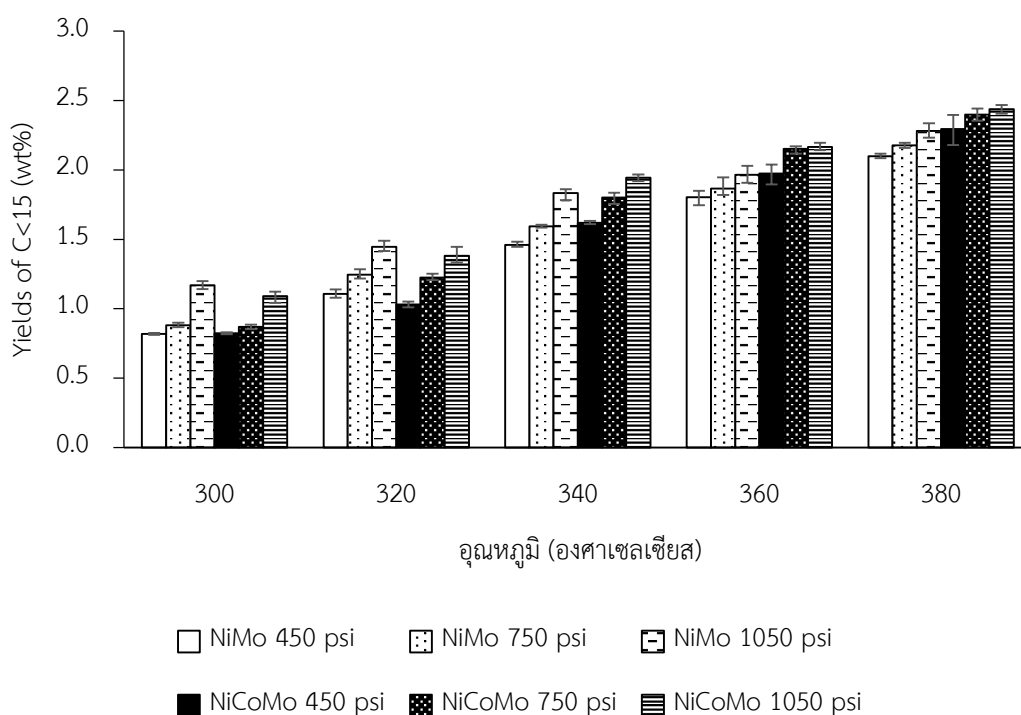
**รูปที่ 4.13** ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสัดส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ต่อ 16 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

#### 4.5.4 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม

สารประกอบอัลเคนโมเลกุลเล็กคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ( $C < 15$  wt%) เกิดจากสารประกอบอัลเคนโมเลกุลใหญ่คาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ( $C_{15-18}$  wt%) บางส่วนทำปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงต่อแตกโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลงคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม จากรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันส่งผลกระทบต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอมในผลิตภัณฑ์ที่ต่างกันเล็กน้อย โดยมีแนวโน้มที่แตกต่างกันในสองช่วงอุณหภูมิคือ ช่วงอุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) และช่วงอุณหภูมิสูง (340 ถึง 380 องศาเซลเซียส)

ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะพบปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอมมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม เนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะสามารถกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงจากปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปที่ 4.10 ในช่วงอุณหภูมิต่ำ (300 ถึง 320 องศาเซลเซียส) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมพบ

ปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าในช่วงอุณหภูมินี้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีปริมาณสารประกอบอัลเคนที่เกิดขึ้นมากกว่า ส่งผลให้มีปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มากกว่าในการทำปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงต่อ ทำให้พบปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอมสูงกว่า แต่ในช่วงอุณหภูมิสูง (340 ถึง 380 องศาเซลเซียส) ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมกลับพบปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอมต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม หากพิจารณาความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นในช่วงอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดมีความสามารถในการกำจัดออกซิเจนใกล้เคียงกัน แสดงจากปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่ามีปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีความเป็นกรดที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงจากรูปที่ 4.1 ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงจะเกิดได้ดีเมื่อมีความเป็นกรดสูง ดังนั้นจากความเป็นกรดที่สูงกว่าทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม โดยเปลี่ยนสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอมบางส่วนจากสารโมเลกุลใหญ่ให้แตกตัวกลายเป็นโมเลกุลเล็กลงที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม



**รูปที่ 4.14** ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

#### 4.5.5 ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน

สารประกอบไอโซอัลเคนที่พบในผลิตภัณฑ์เกิดจากสารประกอบนอร์มอลอัลเคนบางส่วนทำปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อเปลี่ยนโครงสร้างจากสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน หากสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนมีค่ามากจะสามารถช่วยปรับปรุงปัญหาการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากสารประกอบไอโซอัลเคนมีจุดเยือกแข็งที่ต่ำกว่าสารประกอบนอร์มอลอัลเคนอย่างมีนัยสำคัญ

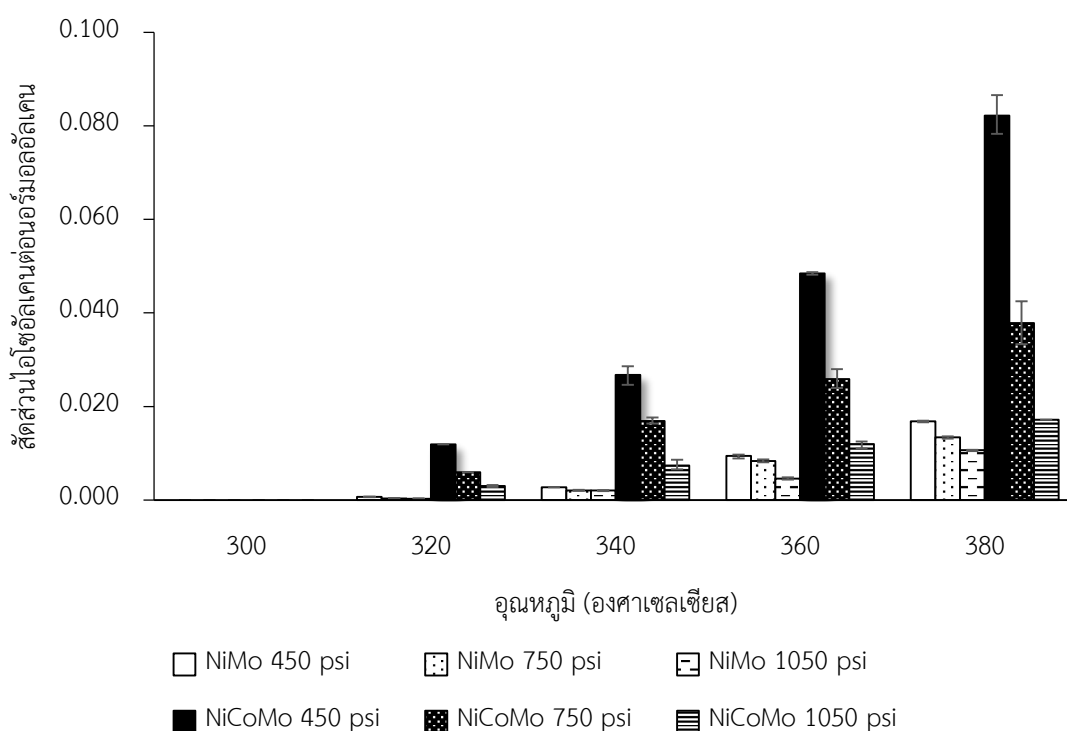
ผลการทดลองในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกันส่งผลกระทบต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีความเป็นกรดที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม แสดงจากรูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเกิดขึ้นได้ดีบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรดสูงภายใต้อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ จึงทำให้เห็นผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาและความแตกต่างของสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทดลองสูงขึ้นและความดันต่ำลง

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sandor และคณะ [17] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และไอโซเมอไรเซชันของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่อุณหภูมิ 280 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ถึง 80 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 400 ถึง 600 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.75 ถึง 3 ต่อชั่วโมง ทำการเติมฟลูออรีนลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเพื่อเพิ่มความเป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการเติมฟลูออรีนเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้เติมฟลูออรีน

ผลการทดลองในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันจะเกิดควบคู่กัน โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันเสมอไม่ว่าจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใด เนื่องจากทั้งสองปฏิกิริยาต้องการความเป็นกรด และอุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน ดังนั้นหากต้องการเพิ่มปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสิ่งที่ควรควบคู่มาเสมอคือ ปริมาณสารประกอบอัลเคนโมเลกุลต่ำคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ( $C < 15$  wt%) ที่จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน

ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gong และคณะ [20] ที่ได้ศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่ได้จากน้ำมันสบู่ดำ ที่อุณหภูมิ 275 ถึง 400

องศาเซลเซียส ความดัน 3 เมกกะปาสคาล อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 1200 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทตินัม พาราเดียม นิกเกิล และรูทีเนียมบนตัวรองรับที่มีความเป็นกรดแตกต่างกันคือ SAPO-11 Al-SBA-15 และ  $Al_2O_3$  จากผลการศึกษาพบว่าตัวรองรับที่มีความเป็นกรดที่สูงกว่าจะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้มากกว่าตัวรองรับที่มีความเป็นกรดที่ต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันมากจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงมากด้วยเช่นกัน



**รูปที่ 4.15** ผลกระทบของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ที่ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

#### 4.6 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่าสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งจะมีปัญหาการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากมีจุดเยือกแข็งที่สูง จุดเยือกแข็งมีสัมพันธ์กับคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำโดยคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำในงานวิจัยนี้ระบุเป็นจุดขุ่น (Cloud point) จุดขุ่นคือ จุดที่น้ำมันเป็นฝ้าขุ่นอุณหภูมิแรกที่เริ่มตกลึกเห็นเป็นฝ้าเป็นจุดที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากการที่ไขมันตกลึกออกมานั้นทำให้หม้อกรองตันอย่างรวดเร็วและไม่สามารถสูบน้ำมันได้ สามารถวิเคราะห์จุดขุ่นได้จากวิธีมาตรฐาน ASTM D2500

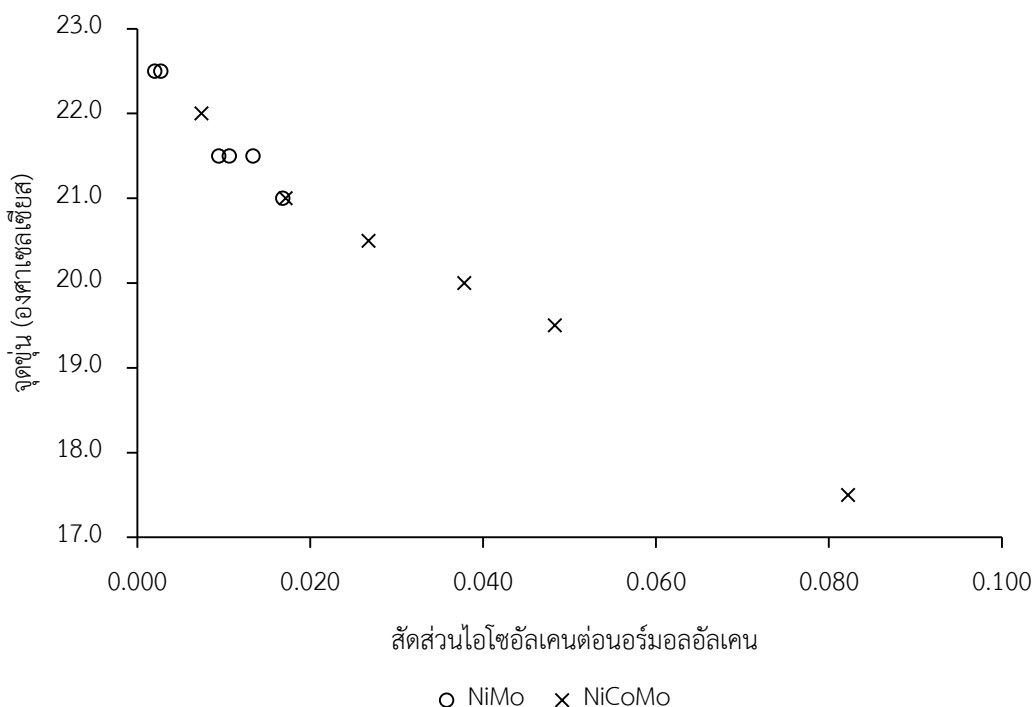
#### 4.6.1 ผลกระทบของสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนต่อจุดขุ่น

แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า หากต้องการปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำสามารถทำได้จากสองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน และปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน

ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเปลี่ยนสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน ส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพของสารประกอบอัลเคนเปลี่ยนไป ทำให้จุดเยือกแข็งลดต่ำลงส่งผลให้จุดขุ่นลดต่ำลงด้วย โดยที่ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิดขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนคาร์บอนอะตอมที่จะส่งผลต่อคุณภาพของน้ำมันดีเซล

สัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนแสดงถึงสัดส่วนสารประกอบอัลเคนที่เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน ต่อสารประกอบอัลเคนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน จากผลการทดลองในรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนส่งผลกระทบต่อจุดขุ่นของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสูงขึ้นจุดขุ่นจะลดต่ำลง





**รูปที่ 4.16** ผลกระทบของสัสด่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบอนอร์มอลอัลเคน ต่อจุดขุ่น อุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ถึง 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

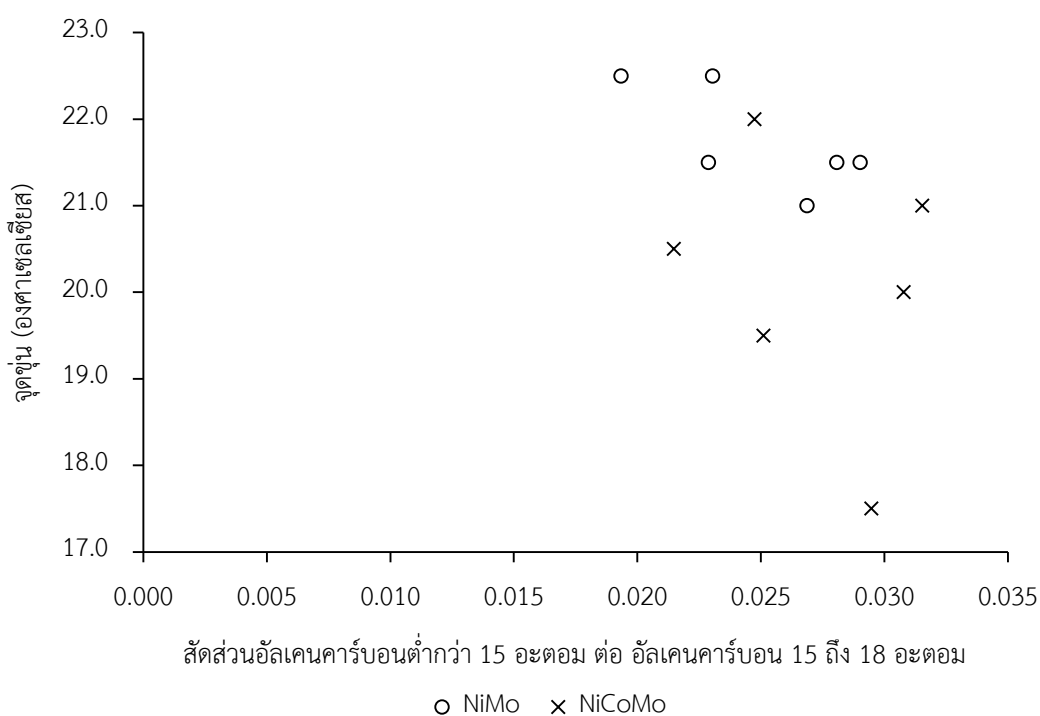
#### 4.6.2 ผลกระทบของสัสด่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอมต่อ สารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ต่อจุดขุ่น

อีกหนึ่งปฏิกิริยาที่จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้คือ ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน การแตกตัวของสารประกอบอัลเคนจากโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็ก ส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของสารประกอบอัลเคนนั้นคือ การลดจุดเยือกแข็งซึ่งส่งผลให้จุดขุ่นลดต่ำลง

ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลสารประกอบอัลเคนจะสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ แต่การเปลี่ยนจำนวนคาร์บอนอะตอมให้ลดลงจะส่งผลต่อคุณภาพน้ำมันดีเซลให้ลดต่ำลง (มีค่าซีเทนที่ลดลง) จึงทำให้เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น

สัสด่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ต่อสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ((C<15)/(C15-18)) แสดงถึงสัสด่วนสารประกอบอัลเคนที่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว ต่อสารประกอบอัลเคนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว แต่จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่า

สัดส่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ต่อสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ไม่ส่งผลกระทบต่อจุดขุ่นของผลิตภัณฑ์อย่างมีแนวโน้ม เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนสภาวะในการทดลองสัดส่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอมต่อสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทำให้ผลกระทบจากสัดส่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ต่อสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ไม่ส่งผลต่อจุดขุ่นที่เปลี่ยนแปลง



**รูปที่ 4.17** ผลกระทบของสัดส่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ต่อ สารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ต่อ จุดขุ่น อุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

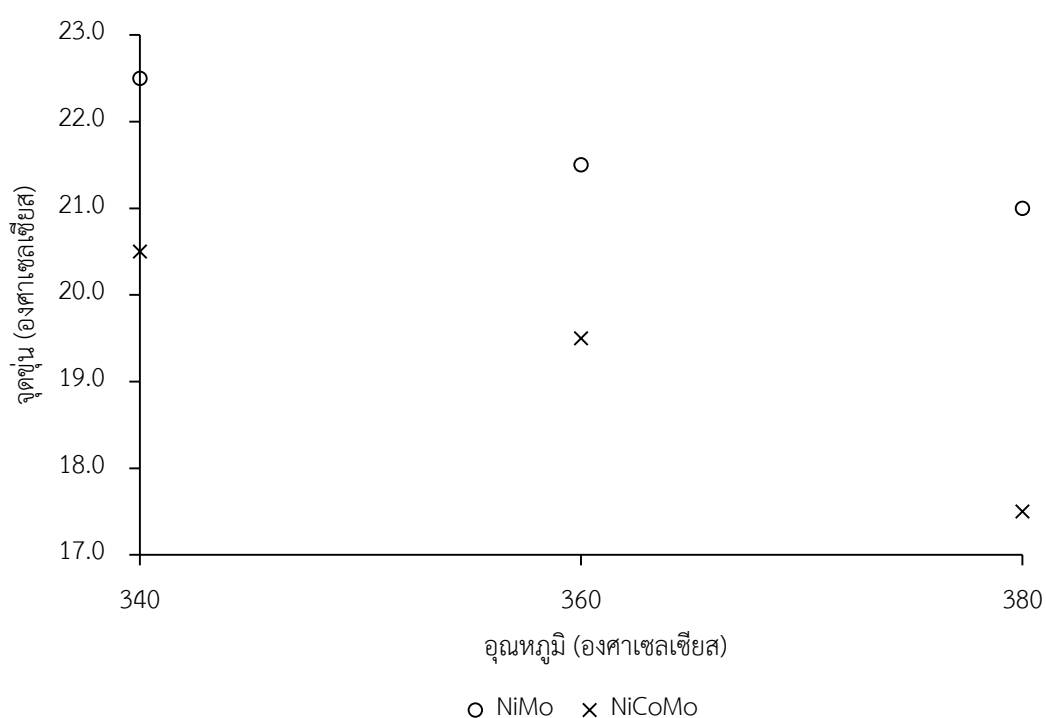
ผลการทดลองในรูปที่ 4.16 และรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าการที่ผลิตภัณฑ์มีจุดขุ่นที่ลดลงเป็นผลกระทบมาจากสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่ได้เกิดจากสัดส่วนสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอม ต่อสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอม ( $(C_{<15>})/(C_{15-18})$ ) ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้สามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำของงานวิจัยนี้มาจากปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันไม่ใช่มาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน

ถึงแม้ว่าจะมีสองปฏิกิริยาที่สามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ แต่ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเป็นปฏิกิริยาเราต้องการให้เกิดขึ้นมากกว่าปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน เนื่องจากปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคนจะเปลี่ยนจำนวนคาร์บอนอะตอม ส่งผลให้ช่วงคาร์บอนอะตอมไม่เหมาะสมต่อการไปใช้งานเป็นดีเซลซึ่งแตกต่างจากปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันที่จะไม่เปลี่ยนจำนวนคาร์บอนอะตอมของสารประกอบอัลเคน

#### 4.6.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ ความดันและตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อจุดขุ่น

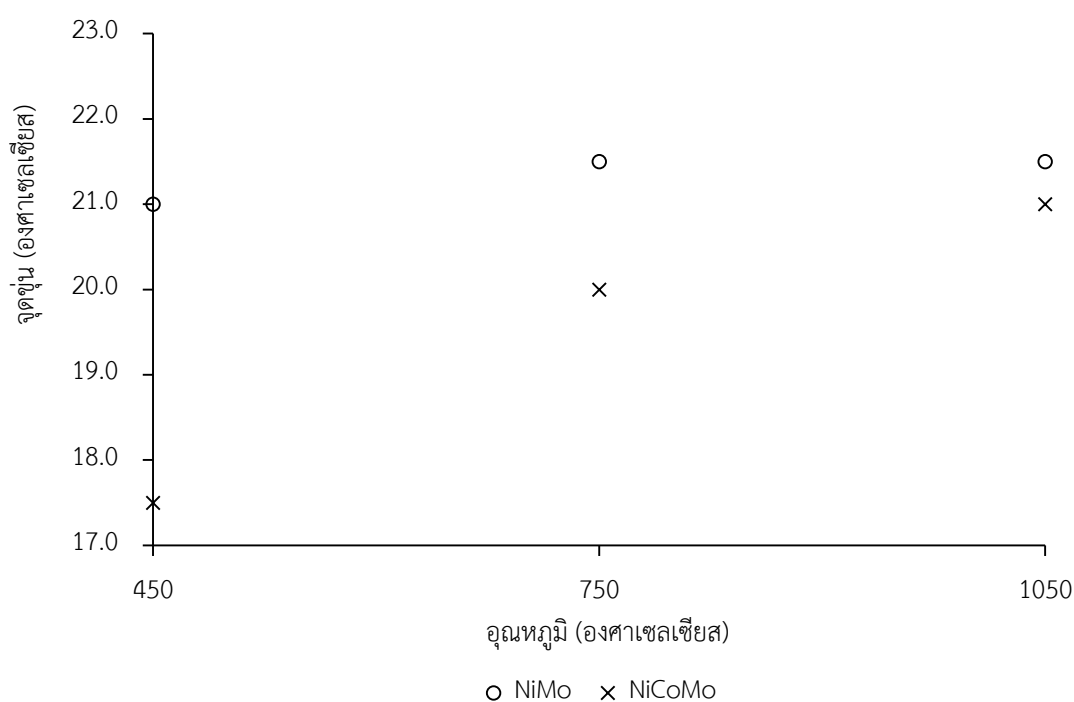
ผลการทดลองในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อจุดขุ่นของผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจุดขุ่นจะลดต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้นเพราะปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันต้องเกิดผ่านคาร์บอนเนียมไอออนและคาร์บอนเนียมไอออนจะต้องใช้พลังงานสูงในการเกิด

การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้สัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.15 และสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จุดขุ่นลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.16



**รูปที่ 4.18** ผลกระทบของอุณหภูมิต่อจุดขุ่น ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการทดลองในรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าความดันเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของจุดชุนของผลิตภัณฑ์ เมื่อลดความดันจุดชุนลดต่ำลงเนื่องจากการลดความดันทำให้ ปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันเกิดได้ดีขึ้นเพราะการลดความดันจะลดปริมาณไฮโดรเจนที่ละลายในน้ำมัน และจะลดโอกาสที่คาร์บอนเนียมไอออนจะไปจับกับไฮโดรเจน ซึ่งเพิ่มโอกาสที่คาร์บอนเนียมไอออนจะ จับกันเองมากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเพิ่มขึ้นดัง แสดงในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.15 และสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัล เคนเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จุดชุนลดลงดังแสดงในรูปที่ 4.16



**รูปที่ 4.19** ผลกระทบของความดันต่อจุดชุน อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อ ชั่วโมง อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500 ต่อ 1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมและนิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

นอกจากอุณหภูมิและความดันที่ส่งผลกระทบต่อจุดชุน ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผล กระทบต่อจุดชุน รูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าในสภาวะการทดลองเดียวกันผลิตภัณฑ์ที่ ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีจุดชุนที่ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัมมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยา ไอโซเมโรเซชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม สอดคล้องกับผลสัดส่วนสารประกอบ ไอโซอัลเคนต่อนอร์มอลที่สูงกว่าดังรูปที่ 4.15

จากผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจึงสามารถแนะนำ อุณหภูมิ ความดัน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อทั้งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง (เปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคน) และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน (เปลี่ยนสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน) ได้ดังต่อไปนี้คือ ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม เนื่องจากในสภาวะการทดลองดังกล่าวทั้งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันสามารถเกิดได้ดี แสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนคาร์บอน 15 ถึง 18 และสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่สูงตามลำดับ และปริมาณสารประกอบอัลเคนที่สูญเสียไปกับสารประกอบอัลเคนคาร์บอนต่ำกว่า 15 อะตอมน้อยมากสามารถถือได้ว่าไม่มีนัยสำคัญ



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความดันและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของพาล์มโอเลอินสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของพาล์มโอเลอินจะเกิดปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาซ้อนกันทั้งแบบอนุกรมและแบบขนานได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของสารประกอบนอร์มอลอัลเคน และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน

2. การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของสารประกอบนอร์มอลอัลเคน และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิทำให้การกำจัดออกซิเจนเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันลดลง แต่จะเกิดผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันมากขึ้น

3. การเพิ่มความดันจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเกิดได้ดีขึ้นแต่ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ลดลง และการเพิ่มความดันทำให้การกำจัดออกซิเจนเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากขึ้นแต่จะเกิดผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันลดลง

4. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

5. การเพิ่มสัดส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้

## รายการอ้างอิง

- [1] S. Bezergianni, A.D., A. Kalogianni, P.A. Pilavachi, *Hydrotreating of waste cooking oil for biodiesel production Part I: Effect of temperature on product yields and heteroatom removal*. Bioresource Technology, 2010. **101**: p. 6651-6656.
- [2] A. Guzman, J.E.T., L.P. Prada, M.L. Nunez, *Hydroprocessing of crude palm oil at pilot plant scale*. Catalysis Today, 2010. **156**: p. 38-43.
- [3] D. Kubicka, L.K., *Deoxygenation of vegetable oils over sulfided Ni, Mo and NiMo catalysts*. Applied Catalysis A, 2010. **372**: p. 199–208.
- [4] จิรเศวตกุล, ภ., ไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัม. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [5] R. Tiwari, B.R., R. Kumar, D. Verma, R. Kumar, R. Joshi, M. Garg, A. Sinha, *Hydrotreating and hydrocracking catalysts for processing of waste soya-oil and refinery-oil mixtures*. Catalysis Communications, 2011. **12**: p. 559–562.
- [6] S. Bezergianni, A.K., A, *Catalyst evaluation for waste cooking oil hydroprocessing*. Fuel, 2012. **93**: p. 638–641.
- [7] B. Veriansyah, J.H., S. Kim, S. Hong, Y. Kim, J. Lim, Y. Shu, S. Ohc, J. Kim,, *Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts*. Fuel, 2012. **94**: p. 578–585.
- [8] M. Krár, T.K., S. Kovács, D. Kalló, J. Hancsók, *Bio gas oils with improved low temperature properties*. Fuel Processing Technology 2011. **92**: p. 886–892.
- [9] M. Tobaa, Y.A., H. Kuramochib, M. Osakob, T, *Hydrodeoxygenation of waste vegetable oil over sulfide catalysts*. Catalysis Today 2011. **164**: p. 533–537.
- [10] O. Senol, T.V., A. Krause, *Hydrodeoxygenation of methyl esters on sulphided NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts*. Catalysis Today, 2005. **100**: p. 331-335.
- [11] N. Chen, S.G., E. W. Qian., *Single-Step Hydroconversion of Jatropha Oil to High Quality Fuel over Reduced Nickel-Molybdenum Catalysts*. Journal of Japan Petroleum Institute, 2013. **56**: p. 249-252.
- [12] D. Kubicka, J.H., M. Setnicka, R. Bulanek, A. Zukal, I. Kubickova, *Effect of support-active phase interactions on the catalyst activity and selectivity in*

- deoxygenation of triglycerides*. Applied Catalysis B: Environmental, 2014. **145**: p. 101– 107.
- [13] เจริญวงศ์, ภ., การไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [14] M. Krar, S.K., D. Kallo, J. Hancsok, *Fuel purpose hydrotreating of sunflower oil on CoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst*. Bioresource Technology, 2010. **101**: p. 9287–9293.
- [15] เจ้าแก้วแก้ว, ณ., ไฮโดรทรีตติ้งออกซิเจนชั้นของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [16] Y. Yang, Q.W., X. Zhang, L. Wang, G. Li, *Hydrotreating of C18 fatty acids to hydrocarbons on sulphided NiW/SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Fuel Processing Technology 2013. **116**: p. 165–174.
- [17] S. Kovacs, T.K., A. Thernesz, I. e Horvath, J. Hancsok, *Fuel production by hydrotreating of triglycerides on NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/F catalyst*. Chemical Engineering Journal, 2011: p. 237– 243.
- [18] S. Gong, A.S., M. Shi, E. W. Qian, *Hydrotreating of Jatropha Oil over Alumina Based Catalysts*. Energy Fuels, 2012. **26**: p.2394-2399.
- [19] S. Bezergianni, A. Dimitriadis, *Temperature effect on co-hydroprocessing of heavy gas oil–waste cooking oil mixtures for hybrid diesel production*. Fuel, 2013. **103**: p. 579–584.
- [20] S. Gong, N. Chen, S. Nakayama, E.Qian, *Isomerization of n-alkanes derived from jatropha oil over bifunctional catalysts*. Journal of Molecular Catalysis A : Chemical , 2013. **370**: p. 14– 21.
- [21] K. Kwon, H. Mayfield, T. Marolla, B. Nichols, and M. Mashburn, *Catalytic deoxygenation of liquid biomass for hydrocarbon fuels*. Renewable Energy, 2012. **36**: p. 907-915.
- [22] T.M. Sankaranarayanan, M. Banu, A. Pandurangan, S. Sivasanker, *Hydroprocessing of sunflower oil-gas oil blends over sulfide Ni-Mo-Al-zeolite beta composites*. Bioresource Technology, 2011. **102**: p. 10717-10723.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลการทดลองที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.500	0.503	0.501	0.501	0.33	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาท)	255.500	255.524	253.506	254.843	0.27	0.52
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.520	108.165	107.735	107.807	0.33	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.706	95.001	95.534	95.414	0.31	0.43
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	92.191	91.960	92.351	92.167	0.20	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	3.515	3.042	3.183	3.247	8.26	6.31
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	3.270	2.830	2.961	3.020	8.26	6.31
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	45.398	46.832	45.288	45.839	2.17	1.20
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	4.181	4.340	4.144	4.222	2.79	1.83
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	12.749	13.142	12.727	12.873	2.09	1.13
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	7.882	8.148	7.846	7.959	2.38	1.42
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	20.586	21.202	20.570	20.786	2.00	1.04
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	0.812	0.869	0.779	0.820	5.99	5.03
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.018	0.019	0.017	0.018	3.79	3.83
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.350	0.350	0.350	0.350	0.00	0.00
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.405	0.405	0.405	0.405	0.00	0.00
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.210	2.180	2.240	2.210	1.36	1.36
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.804	0.803	0.801	0.803	0.17	0.21

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.500	0.498	0.500	0.499	0.13	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	252.000	253.482	256.500	253.994	0.99	0.79
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.520	107.090	107.520	107.377	0.13	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.180	95.017	96.422	95.873	0.57	0.89
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.853	89.871	90.562	90.429	0.47	0.62
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	5.327	5.145	5.860	5.444	7.63	5.49
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	4.956	4.786	5.451	5.064	7.63	5.49
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	64.957	63.366	64.993	64.439	0.86	1.66
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	7.377	7.395	7.436	7.402	0.46	0.35
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	17.198	16.651	17.148	16.999	1.17	2.05
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	13.349	13.199	13.256	13.268	0.61	0.52
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	27.033	26.122	27.153	26.769	1.43	2.42
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.104	1.139	1.079	1.108	2.87	2.54
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.017	0.018	0.017	0.017	4.57	3.40
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.457	0.473	0.462	0.464	1.96	1.52
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.523	0.535	0.517	0.525	1.92	1.53
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.001	0.001	0.001	0.001	6.64	7.91
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.020	2.060	2.070	2.050	0.98	1.46
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.796	0.796	0.792	0.795	0.18	0.32

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.502	0.500	0.501	0.501	0.20	0.20
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	254.012	251.000	254.508	253.173	0.53	0.86
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.950	107.520	107.735	107.735	0.20	0.20
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	94.988	94.317	94.311	94.539	0.48	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.697	87.946	88.129	88.257	0.50	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.291	6.371	6.182	6.281	1.43	1.58
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	5.852	5.927	5.751	5.843	1.43	1.58
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	79.369	79.059	78.138	78.855	0.65	0.91
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	10.969	10.661	10.575	10.735	2.18	1.50
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	19.035	19.066	18.796	18.966	0.53	0.89
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	19.234	18.825	18.724	18.928	1.62	1.08
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	30.130	30.507	30.043	30.227	0.93	0.61
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.484	1.454	1.445	1.461	1.55	1.06
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.019	0.018	0.018	0.019	0.90	0.74
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.614	0.596	0.600	0.603	1.81	1.21
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.676	0.653	0.660	0.663	1.94	1.46
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.003	0.003	0.003	0.003	0.47	0.61
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.098	0.096	0.099	0.098	1.37	1.71
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.770	0.770	0.769	0.09	0.17

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.498	0.498	0.500	0.499	0.27	0.13
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	249.498	250.992	252.500	250.997	0.60	0.60
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.090	107.090	107.520	107.233	0.27	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	94.232	94.197	94.606	94.345	0.28	0.16
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	87.840	88.017	88.300	88.052	0.28	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.276	6.064	6.190	6.176	1.61	1.83
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	5.838	5.641	5.758	5.745	1.61	1.83
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	77.725	79.347	79.264	78.779	0.72	1.34
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	12.021	11.929	12.077	12.009	0.57	0.66
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	17.824	18.162	18.158	18.048	0.63	1.24
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	20.589	20.809	20.900	20.766	0.65	0.85
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	27.292	28.447	28.129	27.956	1.76	2.38
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.850	1.745	1.816	1.804	2.57	3.26
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.024	0.022	0.023	0.023	3.93	3.98
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.719	0.700	0.709	0.709	1.35	1.30
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.798	0.774	0.786	0.786	1.54	1.54
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.009	0.010	0.010	0.009	2.86	5.50
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.081	0.086	0.084	2.79	3.19
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.769	0.768	0.770	0.769	0.13	0.13

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.502	0.502	0.500	0.501	0.13	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	253.008	256.020	257.000	255.343	0.65	0.91
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.950	107.950	107.520	107.807	0.13	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	94.217	94.173	93.990	94.127	0.10	0.14
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	87.938	88.106	87.798	87.947	0.18	0.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.022	5.809	5.935	5.922	1.68	1.91
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	5.601	5.404	5.521	5.509	1.68	1.91
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	78.762	77.638	78.508	78.303	0.59	0.85
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	12.895	12.398	12.416	12.570	2.58	1.36
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	17.658	17.823	18.070	17.850	1.23	1.08
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	21.555	20.648	20.743	20.982	2.73	1.59
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	26.653	26.769	27.279	26.901	1.41	0.92
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	2.093	2.085	2.118	2.099	0.91	0.66
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.027	0.027	0.027	0.027	0.65	0.84
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.778	0.742	0.733	0.751	3.68	2.44
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.856	0.816	0.805	0.826	3.66	2.53
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.017	0.017	0.017	0.017	0.86	0.91
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.082	0.087	0.086	0.085	2.35	3.53
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.769	0.768	0.768	0.09	0.04

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลการทดลองที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาทีก)	0.502	0.498	0.501	0.500	0.33	0.47
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาทีก)	256.020	257.964	254.508	256.164	0.70	0.65
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.950	107.090	107.735	107.592	0.33	0.47
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.517	97.913	97.345	97.592	0.33	0.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	92.681	93.050	92.541	92.758	0.32	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.836	4.863	4.804	4.834	0.59	0.62
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	4.499	4.524	4.469	4.497	0.59	0.62
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	47.797	46.665	47.214	47.225	1.21	1.19
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	3.175	3.211	3.218	3.202	0.52	0.82
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	15.116	14.722	14.858	14.899	1.46	1.19
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	5.870	5.729	5.818	5.806	1.11	1.33
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	23.635	23.003	23.319	23.319	1.35	1.35
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	0.866	0.903	0.872	0.880	2.61	1.65
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.018	0.019	0.018	0.019	3.82	2.85
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.224	0.233	0.231	0.229	1.49	2.27
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.263	0.264	0.264	0.264	0.22	0.24
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	1.943	1.916	1.906	1.922	1.12	0.83
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.795	0.794	0.801	0.797	0.54	0.33

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.501	0.503	0.498	0.501	0.47	0.53
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.510	254.518	251.490	253.839	0.66	0.93
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.735	108.165	107.090	107.663	0.47	0.53
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.162	97.110	96.915	97.062	0.10	0.15
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.598	90.729	90.220	90.516	0.24	0.33
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.563	6.381	6.696	6.547	2.27	2.53
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.105	5.936	6.228	6.090	2.27	2.53
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	69.751	70.341	69.727	69.940	0.57	0.30
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	5.548	5.500	5.494	5.514	0.62	0.36
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	21.334	21.596	21.371	21.434	0.76	0.46
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	9.941	9.974	9.910	9.942	0.33	0.32
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	32.928	33.271	32.952	33.050	0.67	0.37
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.219	1.290	1.227	1.245	3.58	2.09
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.017	0.018	0.018	0.018	3.00	1.81
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.277	0.271	0.274	0.274	1.09	1.01
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.320	0.317	0.318	0.318	0.36	0.34
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	14.20	13.26
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	1.325	1.286	1.142	1.251	5.92	8.71
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.788	0.785	0.784	0.786	0.30	0.21

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น



ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.499	0.497	0.502	0.499	0.53	0.47
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	257.484	254.961	254.012	255.486	0.78	0.58
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.305	106.875	107.950	107.377	0.53	0.47
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.337	95.466	95.659	95.821	0.54	0.37
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.121	88.170	88.553	88.615	0.57	0.50
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.215	7.296	7.107	7.206	1.25	1.38
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.712	6.787	6.611	6.703	1.25	1.38
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	80.580	78.531	78.315	79.142	1.82	1.04
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	8.654	8.245	8.403	8.434	2.61	2.24
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	21.091	20.767	20.536	20.798	1.41	1.26
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	16.169	15.385	15.596	15.717	2.88	2.11
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	34.666	34.134	33.781	34.193	1.38	1.21
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.615	1.583	1.583	1.594	1.34	0.67
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.38	0.47
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.437	0.423	0.436	0.432	1.19	2.09
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.494	0.477	0.489	0.486	1.48	1.93
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.002	0.002	0.002	0.002	4.34	3.86
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.097	0.096	0.098	0.097	1.03	1.03
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.764	0.767	0.769	0.767	0.30	0.35

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.501	0.501	0.505	0.502	0.53	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.510	254.007	255.530	255.016	0.20	0.40
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.735	107.735	108.595	108.022	0.53	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.253	95.370	95.854	95.492	0.38	0.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.150	88.327	88.910	88.462	0.51	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.103	7.043	6.944	7.030	1.04	1.23
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.608	6.552	6.460	6.540	1.04	1.23
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	79.467	78.527	79.430	79.141	0.41	0.78
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	9.931	9.504	9.716	9.717	2.20	2.19
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	19.409	19.252	19.326	19.329	0.41	0.40
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	18.389	17.829	18.266	18.161	1.25	1.83
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	31.738	31.941	32.122	31.934	0.59	0.61
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.940	1.817	1.837	1.865	4.03	2.55
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.024	0.023	0.023	0.024	3.61	1.84
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.545	0.526	0.536	0.536	1.78	1.80
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.613	0.591	0.602	0.602	1.87	1.86
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.008	0.008	0.009	0.008	4.63	2.67
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.088	0.082	0.082	0.084	4.97	2.66
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.761	0.763	0.764	0.52	0.39

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.503	0.501	0.495	0.500	0.67	0.93
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	254.518	251.502	255.420	253.813	0.63	0.91
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	108.165	107.735	106.445	107.448	0.67	0.93
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.063	95.648	94.808	95.173	0.50	0.38
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.269	88.638	88.129	88.345	0.33	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.794	7.011	6.679	6.828	2.67	2.18
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.320	6.521	6.213	6.352	2.67	2.18
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	78.438	78.209	79.184	78.610	0.73	0.51
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	10.833	10.680	10.912	10.808	0.96	1.19
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	18.711	18.765	18.856	18.777	0.42	0.35
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	18.901	18.645	18.958	18.835	0.65	1.00
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	29.993	30.118	30.458	30.190	0.89	0.65
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	2.158	2.203	2.168	2.176	1.24	0.85
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.028	0.028	0.027	0.028	1.75	1.11
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.617	0.607	0.617	0.614	0.58	1.12
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.667	0.655	0.659	0.660	1.01	0.77
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.014	0.013	0.013	0.013	1.65	2.04
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.082	0.082	0.083	1.61	0.81
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.769	0.769	0.769	0.04	0.09

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลการทดลองที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.501	0.504	0.500	0.502	0.47	0.33
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาท)	253.506	258.048	255.000	255.518	0.99	0.79
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.735	108.380	107.520	107.878	0.47	0.33
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	102.440	102.636	102.968	102.681	0.28	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	96.594	96.963	97.154	96.903	0.26	0.32
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	5.846	5.673	5.815	5.778	1.18	1.81
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	5.438	5.277	5.409	5.375	1.18	1.81
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	51.199	53.349	53.147	52.565	1.49	2.60
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	3.225	3.296	3.282	3.268	0.87	1.30
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	16.555	17.101	17.092	16.916	1.09	2.13
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	5.609	5.818	5.808	5.745	1.26	2.36
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	25.810	27.134	26.965	26.636	1.87	3.10
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.142	1.200	1.167	1.170	2.63	2.38
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.022	0.023	0.022	0.022	1.12	1.35
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.208	0.205	0.205	0.206	0.84	0.61
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.230	0.227	0.228	0.228	0.75	0.61
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	1.718	1.696	1.738	1.717	1.20	1.24
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.796	0.794	0.798	0.796	0.25	0.25

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.502	0.505	0.501	0.503	0.46	0.33
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	252.004	256.035	253.005	253.681	0.93	0.66
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.950	108.595	107.735	108.093	0.46	0.33
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	100.949	101.136	101.341	101.142	0.20	0.19
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	93.772	94.141	93.632	93.848	0.31	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.177	6.995	7.709	7.293	5.70	4.10
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.676	6.507	7.171	6.785	5.70	4.10
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	75.539	76.178	76.381	76.033	0.46	0.65
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	5.426	5.333	5.365	5.375	0.95	0.78
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	23.573	23.538	23.779	23.630	0.63	0.39
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	9.609	9.243	9.288	9.380	2.44	1.46
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	36.931	38.064	37.949	37.648	1.10	1.90
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.489	1.417	1.431	1.446	3.02	2.01
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.020	0.019	0.019	0.019	3.69	2.21
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.245	0.242	0.241	0.242	1.20	0.80
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.275	0.257	0.259	0.264	4.38	2.57
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	14.79	8.09
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.652	0.634	0.625	0.637	2.35	1.88
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.775	0.773	0.776	0.775	0.17	0.22

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

**ตารางที่ ค-3** ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.500	0.501	0.498	0.500	0.27	0.33
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	251.000	253.506	252.984	252.497	0.40	0.59
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.520	107.735	107.090	107.448	0.27	0.33
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.238	96.667	96.861	96.922	0.33	0.26
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.493	88.841	89.224	89.186	0.34	0.39
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.746	7.826	7.637	7.736	1.16	1.28
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	7.205	7.280	7.104	7.196	1.16	1.28
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	80.019	78.191	80.111	79.441	0.84	1.57
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	7.655	7.528	7.777	7.653	1.62	1.64
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	22.451	21.979	22.506	22.312	0.87	1.49
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	13.402	13.131	13.514	13.349	1.24	1.63
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	36.511	35.554	36.314	36.126	1.07	1.58
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.783	1.853	1.861	1.832	1.57	2.71
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.022	0.024	0.023	0.023	2.73	3.43
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.363	0.365	0.368	0.366	0.74	0.60
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.388	0.391	0.394	0.391	0.71	0.66
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.002	0.002	0.002	0.002	5.06	4.46
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.103	0.096	0.098	0.099	4.04	3.03
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.771	0.769	0.767	0.769	0.26	0.26

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

**ตารางที่ ค-4** ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.501	0.497	0.498	0.499	0.47	0.33
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	252.003	250.985	253.482	252.157	0.53	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.735	106.875	107.090	107.233	0.47	0.33
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.370	96.587	96.811	96.590	0.23	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.841	89.019	89.302	89.054	0.28	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.529	7.569	7.510	7.536	0.44	0.35
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	7.004	7.041	6.986	7.010	0.44	0.35
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	80.077	78.755	80.174	79.669	0.63	1.15
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	9.425	9.208	9.376	9.336	0.95	1.38
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	20.774	20.513	20.870	20.719	0.73	0.99
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	16.319	15.894	16.266	16.160	0.99	1.65
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	33.560	33.140	33.662	33.454	0.62	0.94
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.908	1.954	2.029	1.964	3.33	2.83
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.024	0.025	0.025	0.025	2.67	3.33
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.484	0.479	0.479	0.480	0.68	0.39
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.515	0.508	0.511	0.511	0.67	0.71
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.005	0.004	0.005	0.005	5.00	5.22
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.087	0.085	0.086	0.086	1.16	1.16
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.769	0.767	0.768	0.13	0.13

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.500	0.496	0.498	0.498	0.40	0.40
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	253.000	255.936	251.490	253.475	0.97	0.78
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.520	106.660	107.090	107.090	0.40	0.40
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.188	96.073	96.132	96.131	0.06	0.06
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.000	88.669	89.060	88.910	0.17	0.27
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.188	7.404	7.072	7.221	2.53	2.06
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.686	6.887	6.579	6.717	2.53	2.06
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	79.066	78.197	80.014	79.092	1.17	1.13
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	10.282	10.213	10.557	10.351	1.99	1.33
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	19.940	19.864	20.100	19.968	0.66	0.52
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	17.282	16.979	17.648	17.303	1.99	1.87
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	31.562	31.140	31.709	31.470	0.76	1.05
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	2.337	2.272	2.231	2.280	2.50	2.14
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.030	0.029	0.028	0.029	2.52	3.28
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.550	0.548	0.560	0.553	1.33	0.81
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.580	0.577	0.589	0.582	1.23	0.83
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.011	0.011	0.010	0.011	1.16	1.94
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.083	0.087	0.085	2.76	1.97
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.765	0.764	0.766	0.765	0.13	0.13

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น



ภาคผนวก ง

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการทดลองที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาทีก)	0.501	0.500	0.499	0.500	0.16	0.21
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาทีก)	255.285	252.500	254.831	254.205	0.42	0.67
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.640	107.520	107.238	107.466	0.16	0.21
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.216	95.230	95.194	95.214	0.02	0.02
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	92.692	92.588	92.277	92.519	0.19	0.26
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	2.525	2.642	2.617	2.595	1.82	2.70
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	2.349	2.458	2.435	2.414	1.82	2.70
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	29.597	30.003	28.385	29.328	2.30	3.22
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	3.217	3.268	3.079	3.188	2.51	3.42
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	8.740	8.833	8.408	8.660	1.99	2.91
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	5.028	5.128	4.791	4.982	2.92	3.83
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	12.612	12.775	12.106	12.498	2.22	3.13
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	0.831	0.839	0.801	0.824	1.90	2.81
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.028	0.028	0.028	0.028	0.41	0.40
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.392	0.394	0.390	0.392	0.51	0.52
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.422	0.425	0.419	0.422	0.70	0.71
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.210	2.180	2.240	2.210	1.36	1.36
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.804	0.803	0.801	0.803	0.17	0.21

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.500	0.500	0.501	0.500	0.18	0.09
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.000	254.500	251.168	253.556	0.57	0.94
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.520	107.520	107.807	107.616	0.18	0.09
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.467	95.738	95.815	95.673	0.15	0.22
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.135	90.890	91.132	90.719	0.46	0.64
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.932	4.848	4.682	4.821	2.31	2.87
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	4.588	4.510	4.356	4.484	2.31	2.87
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	52.311	54.145	53.628	53.361	1.47	1.97
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	6.711	6.937	6.889	6.846	1.33	1.97
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	13.703	14.211	14.020	13.978	1.67	1.97
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	10.671	11.038	10.947	10.885	1.41	1.97
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	20.611	21.331	21.131	21.024	1.46	1.97
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.011	1.063	1.019	1.031	3.13	1.97
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.019	0.020	0.019	0.019	1.65	1.65
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.522	0.520	0.524	0.522	0.33	0.33
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.532	0.532	0.532	0.532	0.01	0.01
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.012	0.012	0.012	0.012	1.62	1.62
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.020	2.060	2.070	2.050	0.98	1.46
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.796	0.796	0.792	0.795	0.18	0.32

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.500	0.503	0.498	0.500	0.56	0.48
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	252.000	257.146	252.984	254.043	1.22	0.80
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.520	108.212	107.090	107.607	0.56	0.48
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.726	96.382	95.425	95.844	0.56	0.44
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.269	88.837	88.086	88.397	0.50	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.457	7.544	7.338	7.447	1.31	1.45
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.937	7.018	6.826	6.927	1.31	1.45
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	78.508	78.967	78.377	78.617	0.44	0.31
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	10.486	10.450	10.533	10.490	0.41	0.38
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	18.543	18.824	18.398	18.589	1.27	1.02
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	16.703	16.572	16.826	16.701	0.75	0.77
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	30.711	31.220	30.441	30.791	1.39	1.13
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.617	1.632	1.611	1.620	0.74	0.57
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.021	0.021	0.021	0.021	0.30	0.26
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.603	0.592	0.610	0.602	1.44	1.64
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.552	0.541	0.560	0.551	1.65	1.88
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.027	0.025	0.029	0.027	6.84	7.81
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.098	0.096	0.099	0.098	1.37	1.71
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.770	0.770	0.769	0.09	0.17

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

**ตารางที่ ง-4** ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.500	0.500	0.502	0.501	0.21	0.11
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	253.500	252.500	255.818	253.939	0.74	0.57
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.520	107.520	107.865	107.635	0.21	0.11
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.433	95.360	95.792	95.529	0.28	0.18
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.028	88.205	88.488	88.240	0.28	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.406	7.155	7.304	7.288	1.61	1.83
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.889	6.656	6.794	6.780	1.61	1.83
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	78.366	78.721	78.465	78.517	0.26	0.19
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	10.763	10.802	10.793	10.786	0.14	0.21
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	18.611	18.674	18.669	18.651	0.12	0.21
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	17.102	17.247	17.018	17.122	0.73	0.61
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	28.272	28.379	28.340	28.330	0.17	0.21
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.989	1.896	2.040	1.975	3.28	3.97
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.025	0.024	0.026	0.025	3.34	4.23
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.617	0.617	0.616	0.616	0.02	0.02
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.600	0.603	0.595	0.599	0.57	0.66
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.048	0.048	0.049	0.048	0.59	0.51
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.081	0.086	0.084	2.79	3.19
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.769	0.768	0.770	0.769	0.13	0.13

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

**ตารางที่ ง-5** ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.501	0.499	0.500	0.500	0.18	0.17
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	253.484	251.100	255.000	253.195	0.71	0.83
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.726	107.349	107.520	107.532	0.18	0.17
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.019	94.856	95.095	94.990	0.11	0.14
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.339	88.030	88.170	88.180	0.18	0.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.681	6.826	6.925	6.810	1.68	1.91
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.215	6.350	6.442	6.335	1.68	1.91
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	78.356	78.440	77.947	78.247	0.25	0.38
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	11.347	11.530	11.163	11.347	1.62	1.62
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	17.612	17.343	17.729	17.561	0.95	1.24
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	17.503	17.626	17.335	17.488	0.79	0.87
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	25.971	25.690	26.060	25.907	0.59	0.84
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	2.311	2.179	2.396	2.295	4.38	5.06
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.029	0.028	0.031	0.029	4.78	5.30
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.687	0.709	0.671	0.689	2.87	2.57
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.689	0.687	0.690	0.689	0.21	0.23
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.082	0.087	0.078	0.082	5.31	4.77
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.082	0.087	0.086	0.085	2.35	3.53
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.769	0.768	0.768	0.09	0.04

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการทดลองที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.502	0.500	0.502	0.501	0.13	0.27
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาท)	252.004	253.500	256.020	253.841	0.86	0.72
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.950	107.520	107.950	107.807	0.13	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.195	97.290	97.690	97.392	0.31	0.20
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	93.062	93.207	93.580	93.283	0.32	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.134	4.084	4.111	4.109	0.59	0.62
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	3.845	3.799	3.824	3.823	0.59	0.62
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	37.143	37.104	35.249	36.499	1.76	3.42
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	2.843	2.887	2.651	2.794	3.34	5.11
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	11.872	11.796	11.331	11.667	1.76	2.88
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	4.741	4.829	4.406	4.659	3.65	5.42
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	17.687	17.592	16.861	17.380	1.76	2.99
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	0.885	0.895	0.829	0.870	2.92	4.68
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.024	0.024	0.024	0.024	1.26	1.28
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.255	0.261	0.249	0.255	2.23	2.27
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.284	0.290	0.277	0.284	2.43	2.47
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	1.943	1.916	1.906	1.922	1.12	0.83
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.795	0.794	0.801	0.797	0.54	0.33

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

**ตารางที่ จ-2** ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.497	0.501	0.500	0.499	0.31	0.43
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	250.149	253.506	249.500	251.052	0.98	0.62
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	106.942	107.735	107.520	107.399	0.31	0.43
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.715	96.962	96.910	96.862	0.10	0.15
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.455	90.825	90.943	90.741	0.22	0.32
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.260	6.137	5.967	6.121	2.27	2.53
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	5.824	5.709	5.550	5.694	2.27	2.53
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	63.672	64.060	65.156	64.296	1.34	0.97
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	5.437	5.532	5.502	5.490	0.76	0.97
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	19.282	19.339	19.793	19.471	1.65	0.97
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	9.108	9.266	9.218	9.197	0.75	0.97
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	29.467	29.548	30.253	29.756	1.67	0.97
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.213	1.248	1.214	1.225	1.90	0.97
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.019	0.019	0.019	0.019	2.26	2.25
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.301	0.305	0.296	0.301	1.44	1.43
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.323	0.328	0.318	0.323	1.45	1.44
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.006	0.006	0.006	0.006	1.18	1.19
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	1.325	1.286	1.142	1.251	5.92	8.71
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.788	0.785	0.784	0.786	0.30	0.21

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ จ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.504	0.499	0.501	0.501	0.57	0.50
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.126	250.918	251.001	252.349	1.10	0.57
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	108.424	107.271	107.735	107.810	0.57	0.50
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.940	97.117	97.595	97.551	0.40	0.44
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.511	88.560	88.943	89.005	0.57	0.50
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.429	8.557	8.653	8.546	1.25	1.38
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	7.840	7.960	8.049	7.950	1.25	1.38
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	79.824	77.991	79.740	79.185	0.81	1.51
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	7.748	7.658	7.702	7.703	0.59	0.58
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	22.510	21.944	22.508	22.321	0.85	1.69
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	13.157	12.918	13.116	13.063	0.71	1.11
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	35.096	34.118	35.134	34.783	1.01	1.91
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.821	1.746	1.834	1.801	1.85	3.00
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.023	0.022	0.023	0.023	1.15	1.51
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.367	0.372	0.365	0.368	1.12	0.85
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.382	0.385	0.381	0.383	0.63	0.48
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.017	0.018	0.016	0.017	4.52	3.44
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.097	0.096	0.098	0.097	1.03	1.03
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.764	0.767	0.769	0.767	0.30	0.35

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น



ตารางที่ จ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.501	0.497	0.498	0.498	0.51	0.35
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	253.005	249.852	248.363	250.407	1.04	0.82
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.735	106.816	107.030	107.194	0.51	0.35
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.402	96.571	96.633	96.869	0.55	0.31
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.098	88.338	88.515	88.650	0.51	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.304	8.233	8.118	8.218	1.04	1.23
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	7.724	7.659	7.551	7.645	1.04	1.23
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	79.330	79.087	78.509	78.975	0.45	0.59
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	9.166	9.221	9.014	9.134	0.96	1.32
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	21.165	21.039	20.989	21.064	0.48	0.36
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	15.257	15.226	15.088	15.190	0.44	0.67
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	31.759	31.446	31.581	31.595	0.52	0.47
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	2.180	2.110	2.164	2.151	1.33	1.91
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.027	0.027	0.028	0.027	1.17	2.05
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.462	0.467	0.458	0.462	1.08	0.96
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.494	0.495	0.493	0.494	0.17	0.15
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.026	0.028	0.024	0.026	8.29	7.36
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.088	0.082	0.082	0.084	4.97	2.66
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.761	0.763	0.764	0.52	0.39

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ จ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.498	0.500	0.497	0.498	0.33	0.24
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	249.460	252.500	253.538	251.833	0.68	0.94
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.074	107.520	106.904	107.166	0.33	0.24
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.969	96.468	96.203	96.213	0.26	0.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.435	88.804	88.295	88.511	0.33	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.534	7.664	7.908	7.702	2.67	2.18
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	7.008	7.129	7.356	7.165	2.67	2.18
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	78.345	78.514	78.405	78.421	0.12	0.10
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	9.995	10.027	9.990	10.004	0.23	0.14
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	19.948	20.075	19.865	19.962	0.56	0.49
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	16.041	16.070	16.059	16.057	0.09	0.10
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	29.526	29.808	29.294	29.543	0.90	0.84
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	2.393	2.363	2.437	2.398	1.63	1.45
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.031	0.030	0.031	0.031	1.65	1.57
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.534	0.532	0.536	0.534	0.35	0.33
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.549	0.550	0.548	0.549	0.18	0.19
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.038	0.033	0.043	0.038	12.46	11.79
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.082	0.082	0.083	1.61	0.81
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.769	0.769	0.769	0.04	0.09

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการทดลองที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.500	0.501	0.498	0.500	0.26	0.31
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาท)	252.500	251.536	253.591	252.542	0.42	0.40
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.520	107.749	107.136	107.469	0.26	0.31
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	102.436	102.768	102.240	102.481	0.28	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	97.443	97.651	97.095	97.397	0.26	0.31
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.992	5.117	5.145	5.085	1.18	1.81
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	4.644	4.760	4.786	4.730	1.18	1.81
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	41.312	41.524	37.410	40.082	3.60	6.67
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	2.947	3.050	2.581	2.859	6.66	9.72
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	13.410	13.411	12.210	13.011	3.08	6.15
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	4.709	4.881	4.117	4.569	6.82	9.89
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	20.247	20.183	18.501	19.643	3.07	5.82
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.124	1.159	0.989	1.090	6.26	9.32
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.027	0.028	0.026	0.027	2.66	2.75
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.234	0.242	0.225	0.234	3.59	3.70
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.246	0.256	0.236	0.246	4.10	4.21
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	1.718	1.696	1.738	1.717	1.20	1.24
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.796	0.794	0.798	0.796	0.25	0.25

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ จ-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.501	0.503	0.500	0.501	0.27	0.23
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	254.508	253.261	249.500	252.423	0.83	1.16
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.735	108.058	107.520	107.771	0.27	0.23
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	100.577	101.611	100.638	100.942	0.66	0.36
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	93.967	94.326	93.856	94.050	0.29	0.21
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.610	6.828	6.782	6.740	1.31	1.93
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.149	6.352	6.309	6.270	1.31	1.93
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	66.732	70.248	65.262	67.414	4.20	3.19
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	5.039	5.296	4.932	5.089	4.07	3.09
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	21.248	22.433	20.752	21.478	4.45	3.38
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	8.389	8.754	8.238	8.460	3.47	2.63
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	31.851	33.572	31.131	32.184	4.31	3.27
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.367	1.447	1.334	1.382	4.64	3.53
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.020	0.021	0.020	0.021	0.43	0.34
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.253	0.252	0.253	0.253	0.29	0.37
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.277	0.274	0.278	0.277	0.60	0.77
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.003	0.003	0.003	0.003	6.60	8.46
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.652	0.634	0.625	0.637	2.35	1.88
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.775	0.773	0.776	0.775	0.17	0.22

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ๓-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.498	0.498	0.501	0.499	0.40	0.20
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	249.996	251.988	254.508	252.164	0.93	0.86
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.090	107.090	107.735	107.305	0.40	0.20
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	98.208	98.688	98.727	98.541	0.19	0.34
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.235	88.618	88.887	88.580	0.35	0.39
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	9.972	10.069	9.841	9.961	1.09	1.21
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.276	9.367	9.154	9.266	1.09	1.21
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	78.119	79.360	78.470	78.650	0.90	0.67
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	6.344	6.425	6.378	6.382	0.67	0.60
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	24.029	24.374	24.145	24.183	0.79	0.64
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	10.818	10.792	10.917	10.842	0.69	0.47
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	36.386	37.091	36.517	36.665	1.16	0.76
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	1.945	1.920	1.968	1.944	1.22	1.27
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.025	0.024	0.025	0.025	1.44	2.16
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.281	0.281	0.282	0.281	0.08	0.12
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.310	0.302	0.312	0.308	1.25	1.87
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.007	0.009	0.007	0.007	16.40	10.96
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.102	0.096	0.098	0.099	3.38	2.70
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.771	0.769	0.767	0.769	0.26	0.26

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ฉ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.501	0.503	0.498	0.501	0.47	0.53
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	255.510	256.027	250.992	254.176	0.73	1.25
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.735	108.165	107.090	107.663	0.47	0.53
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	98.096	97.560	97.762	97.806	0.30	0.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.408	87.947	88.125	88.160	0.28	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	9.688	9.612	9.637	9.646	0.44	0.35
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.012	8.942	8.965	8.973	0.44	0.35
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	78.400	77.907	78.920	78.409	0.65	0.64
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	7.530	7.512	7.316	7.453	1.04	1.83
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	23.038	22.863	23.458	23.120	1.46	1.11
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	12.356	12.320	12.061	12.246	0.90	1.51
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	34.519	34.249	35.223	34.664	1.61	1.20
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	2.158	2.141	2.195	2.165	1.41	1.08
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.028	0.027	0.028	0.028	0.76	0.44
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.348	0.350	0.332	0.344	1.90	3.27
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.375	0.376	0.359	0.370	1.75	3.01
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.012	0.013	0.011	0.012	4.52	7.79
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.087	0.085	0.086	0.086	1.16	1.16
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.769	0.767	0.768	0.13	0.13

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

ตารางที่ ๑-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว  
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.502	0.501	0.501	0.501	0.13	0.07
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	252.506	249.498	253.005	251.670	0.53	0.86
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.950	107.735	107.735	107.807	0.13	0.07
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.612	97.271	96.800	96.894	0.39	0.29
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	87.699	88.090	88.030	87.940	0.17	0.27
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.913	9.181	8.770	8.954	2.53	2.06
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	8.291	8.540	8.158	8.330	2.53	2.06
ปริมาณอัลเคนรวม C15-18 (%โดยน้ำหนัก)	77.809	77.836	77.875	77.840	0.04	0.04
ปริมาณอัลเคน n-C15 (%โดยน้ำหนัก)	8.597	8.601	8.605	8.601	0.05	0.05
ปริมาณอัลเคน n-C16(%โดยน้ำหนัก)	21.608	21.615	21.626	21.616	0.04	0.04
ปริมาณอัลเคน n-C17 (%โดยน้ำหนัก)	13.758	13.763	13.770	13.764	0.05	0.04
ปริมาณอัลเคน n-C18 (%โดยน้ำหนัก)	32.535	32.545	32.561	32.547	0.04	0.04
ปริมาณอัลเคน n-C<15 (%โดยน้ำหนัก)	2.468	2.405	2.440	2.438	1.22	1.33
สัดส่วนปริมาณอัลเคน (C<15)/(C15-C18)	0.032	0.031	0.031	0.031	1.27	1.33
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.424	0.424	0.424	0.424	0.01	0.01
สัดส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.440	0.440	0.440	0.440	0.00	0.00
สัดส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.017	0.017	0.017	0.017	0.01	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.083	0.087	0.085	2.76	1.97
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.765	0.764	0.766	0.765	0.13	0.13

หมายเหตุ : %โดยน้ำหนักคือ ร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น

**ภาคผนวก ข**  
**ผลการวิเคราะห์จุดขุ่น**

**ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์จุดขุ่น**

ตัวเร่งปฏิกิริยา	จุดขุ่น (องศา เซลเซียส)	สภาวะการทดลอง		สัดส่วน ปริมาณอัลเคน i/n-C	สัดส่วน ปริมาณอัลเคน (C<15)/ (C15-C18)
		อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	ความดัน (ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว)		
นิกเกิลโมลิบดีนัม	22.50	340	1050	0.002	0.023
นิกเกิลโมลิบดีนัม	22.50	340	450	0.003	0.019
นิกเกิลโมลิบดีนัม	21.50	360	450	0.009	0.023
นิกเกิลโมลิบดีนัม	21.00	380	450	0.017	0.027
นิกเกิลโมลิบดีนัม	21.50	380	750	0.013	0.028
นิกเกิลโมลิบดีนัม	21.50	380	1050	0.011	0.029
นิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	22.00	340	1050	0.007	0.025
นิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	20.50	340	450	0.027	0.021
นิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	19.50	360	450	0.048	0.025
นิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	17.50	380	450	0.082	0.029
นิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	20.00	380	750	0.038	0.031
นิกเกิลโคบอลต์โมลิบดีนัม	21.00	380	1050	0.017	0.032



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ศิรชาติ ชูโต เกิดเมื่อวันที่ 16 กรกฎาคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตจุฬาฯ ฝ่ายประถม ในปีการศึกษา 2544 สำเร็จการศึกษาในระดับประถมมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสาธิตจุฬาฯ ฝ่ายมัธยม ในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 และในปีการศึกษา 2555 ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จนสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2557

