

ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของพอล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

นายพิชญ์สวัสดิ์ แก้วมรกต



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROTREATING REACTION OF PALM OLEIN USING NICKEL MOLYBDENUM
PHOSPHORUS CATALYSTS

Mr. Pitsawat Kaewmorakot



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

ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของพอลิเมอร์โอเลฟินโดยใช้ตัวเร่ง

ปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

โดย

นายพิชญ์สวัสดิ์ แก้วมรกต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธารวัช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์วรรณ โชติพิภพ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

พิชญ์สวัสดิ์ แก้วมรกต : ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส (HYDROTREATING REACTION OF PALM OLEIN USING NICKEL MOLYBDENUM PHOSPHORUS CATALYSTS) อ.ที่ปริภษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.เจดศักดิ์ ไชยคณา, 86 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการทำปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกริยา (ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส) อุณหภูมิ (300, 320, 340, 360 และ 380 องศาเซลเซียส) และความดันแก๊สไฮโดรเจน (450, 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเกิลเบต กำหนดความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากับ 1.0 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้น คือ สารประกอบนอร์มอลอัลเคน และผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ได้แก่ น้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละผลได้ของสารประกอบอัลเคนทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิและความดันสูงขึ้น นอกจากนั้นอุณหภูมิและความดันยังส่งผลต่อการเลือกเกิดของปฏิกริยาในการกำจัดออกซิเจน การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้เกิดเส้นทางของปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ส่วนของการเพิ่มความดันส่งผลให้เกิดเส้นทางของปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน การใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสพบว่าเกือบจะไม่มี ความแตกต่างในการผลิตสารประกอบอัลเคนทั้งหมด อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสให้ปริมาณสารประกอบไอโซอัลเคนสูงกว่าตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัม จากงานวิจัยนี้ ตัวเร่งปฏิกริยาและภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกริยาไอโซเมอไรเซชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน คือ ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และความดันแก๊สไฮโดรเจน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริภษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570316721 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: HYDROTREATING REACTION / PALM OLEIN / ISOMERIZATION /
DEOXYGENATION

PITSAWAT KAEWMORAKOT: HYDROTREATING REACTION OF PALM OLEIN USING
NICKEL MOLYBDENUM PHOSPHORUS CATALYSTS. ADVISOR: JIRDSAK
TSCHEIKUNA, Ph.D., 86 pp.

This research studies the hydrotreating reaction of palm olein. The following parameters were investigated: catalyst (NiMo and NiMoP catalysts), temperature (300, 320, 340, 360 and 380 °C) and H₂ pressure (450, 750 and 1,050 psig). The experiments were carried out in a trickle-bed reactor at constant LHSV of 1 h⁻¹ and H₂/oil ratio of 500:1 by volume. The experimental results showed that main product was n-alkanes and by-products were water and carbondioxide gas. The yield of total alkanes increased with the increase in temperature and pressure. Moreover, temperature and pressure affected the selectivity of deoxygenation reaction. Increasing the temperature enhanced decarboxylation and decarbonylation pathways. Increasing the pressure increased hydrodeoxygenation pathway. NiMo and NiMoP catalysts showed almost no difference in producing total alkanes in product yield. However, NiMoP catalyst gave a higher amount of iso-alkanes than NiMo catalyst. Based on this research, the catalyst and conditions suggested for hydrotreating reaction and isomerization reaction of palm olein were NiMoP catalyst at 380 °C and 450 psig H₂ pressure.

Department: Chemical Engineering Student's Signature

Field of Study: Chemical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบ
ขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบโอกาส
ให้แก่ข้าพเจ้าได้มาศึกษาในสาขาวิชาที่ข้าพเจ้าสนใจ โดยให้คำปรึกษา คำสั่งสอน และช่วยข้าพเจ้า
แก้ไขปัญหาต่างๆ จนงานวิจัยสำเร็จลงด้วยดี รวมถึงสนับสนุนทุนการทำงานวิจัยและเครื่องมือ
อุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรมาธิช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.
ดร.อาทิวรรณ โชติพิภพ และ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ กรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้
ทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในห้องวิจัยโอเลโอเคมีคอล สำหรับกำลังใจและความช่วยเหลือต่างๆ
ตลอดมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้
ข้าพเจ้าได้ศึกษาเล่าเรียนจนจบการศึกษาระดับมหาบัณฑิต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติง.....	4
2.2 ปฏิกริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช.....	5
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน.....	6
2.3.1 งานวิจัยที่ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกริยาต่อปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน.....	6
2.3.2 งานวิจัยที่ศึกษาผลของภาวะการทดลองต่อปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน.....	9
2.4 งานวิจัยที่ศึกษาปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและไอโซเมอไรเซชัน.....	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมฟอสฟอรัสลงไปในตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	12
บทที่ 3 อุปกรณ์และขั้นตอนการวิจัย.....	14
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	14

3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส	16
3.4 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	16
3.4.1 เทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์	16
3.4.2 เทคนิคบีอีที	17
3.4.3 เทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ	17
3.5 วิธีการทดลอง.....	17
3.5.1 การเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปแบบซัลไฟด์.....	17
3.5.2 ภาวะในการทดลอง	18
3.5.3 การเก็บตัวอย่าง.....	18
3.6 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์	19
3.6.1 การแยกเฟสของเหลว.....	19
3.6.2 การวิเคราะห์น้ำมัน	19
3.6.2.1 ปริมาณน้ำมัน.....	19
3.6.2.2 ความหนาแน่นของน้ำมัน	19
3.6.2.3 ร้อยละกรดไขมัน.....	19
3.6.2.4 ปริมาณสารประกอบไอโซอัลเคนและสารประกอบนอร์มอลอัลเคน	20
3.6.2.5 คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ.....	21
3.6.3 การวิเคราะห์น้ำ.....	21
3.6.3.1 ปริมาณน้ำ.....	21
3.6.4 การวิเคราะห์แก๊ส	22
3.6.4.1 การตรวจหาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	22
3.7 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง.....	22
3.7.1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)	22

3.7.2 การคำนวณปริมาณสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี (%น้ำหนัก)...22	22
3.7.3 การคำนวณปริมาณร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น (Yields based on feedstock, wt %).....23	23
3.7.4 การคำนวณค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (LSHV)23	23
3.7.5 การคำนวณหาค่าร้อยละของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ (%Fatty Acids Oleic).....24	24
3.7.6 ค่าความคลาดเคลื่อน (Error bar).....24	24
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง26	26
4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำมันปาล์มโอเลอิน26	26
4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา27	27
4.2.1 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา27	27
4.2.2 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....28	28
4.2.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา28	28
4.3 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน29	29
4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน.....31	31
4.4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ31	31
4.4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-1833	33
4.4.3 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา35	35
4.4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15.....38	38
4.4.5 ผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน.....39	39

4.5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน	40
4.5.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ	41
4.5.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18	42
4.5.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา.....	43
4.5.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำ กว่า 15	44
4.5.5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์ มอลอัลเคน.....	45
4.6 ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อจุดชุน.....	46
4.6.1 ผลของอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนต่อจุด ชุน.....	47
4.6.2 ผลของอัตราส่วนสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ต่อ สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ต่อจุดชุน	48
4.6.3 ผลของอุณหภูมิ ความดันและตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อจุดชุน	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	51
รายการอ้างอิง	52
ภาคผนวก.....	55
ภาคผนวก ก ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว	56
ภาคผนวก ข ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว	61
ภาคผนวก ค ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อ ตารางนิ้ว	66

ภาคผนวก ง ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	71
ภาคผนวก จ ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	76
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส ที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	86



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	14
3.2 ภาวะในการทดลอง.....	18
3.3 ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ.....	20
3.4 ภาวะของคอลัมน์.....	21
4.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน	27
4.2 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
4.3 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	28
ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม	56
ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	57
ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	58
ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	59
ก-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	60
ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	61
ข-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	กราฟเปรียบเทียบจุดเยือกแข็งของสารประกอบอัลเคนในแต่ละคาร์บอนอะตอม.....2
2.1	แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....6
3.1	แผนผังเครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเกิลเบดที่มีการไหลต่อเนื่อง.....15
4.1	การคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส.....29
4.2	โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม29
4.3	แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....31
4.4	ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม32
4.5	ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม34
4.6	ผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนโดยโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 17 ต่อ 18 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม36
4.7	ผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนโดยโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม36
4.8	ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม38

- 4.9 ผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.....39
- 4.10 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส41
- 4.11 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส ...42
- 4.12 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 17 ต่อ 18 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส43
- 4.13 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส43
- 4.14 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส ...44
- 4.15 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบ นอร์มอลอัลเคน ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส ...45
- 4.16 ผลของอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ต่อจุดขุ่น อุณหภูมิ 340-380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส47

- 4.17 ผลของอัตราส่วนสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ต่อสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ต่อ จุดชุน อุณหภูมิ 340-380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส.....48
- 4.18 ผลของอุณหภูมิต่อจุดชุน ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส.....49
- 4.19 ผลของความดันต่อจุดชุน อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส.....50



บทที่ 1

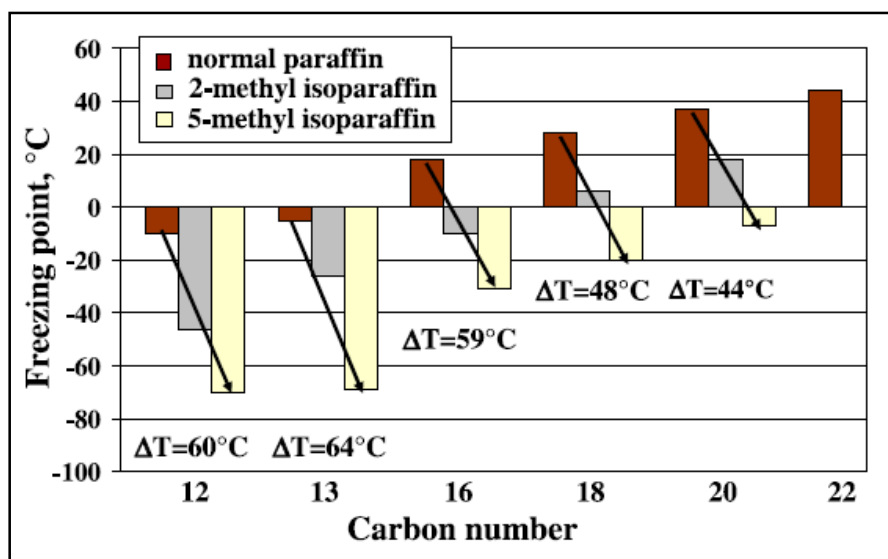
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไบโอดีเซลในยุคแรกเป็นพลังงานทางเลือกที่นำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลในยุคแรก คือ อัลคิลเอสเทอร์ (Alkyl ester) เช่น แพตตีแอซิด เมทิลเอสเทอร์ (Fatty Acid Methyl Ester, FAMES) เป็นต้น สามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันหรือปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ ใช้สารละลายกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืชกับแอลกอฮอล์ ใช้สารละลายเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันหรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันจะได้ผลิตภัณฑ์ประเภทเอสเทอร์ทำให้คุณสมบัติบางอย่างแตกต่างจากน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมซึ่งเป็นสารประกอบอัลเคน

ต่อมาในยุคที่สองได้พัฒนาไบโอดีเซลให้มีโครงสร้างและคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ไบโอดีเซลในยุคนี้เรียกกันอย่างแพร่หลายว่า กรีนดีเซล (Green diesel) เป็นสารประกอบอัลเคนเช่นเดียวกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมผลิตจากปฏิกิริยาไฮโดรทรिटติง (Hydrotreating reaction) ระหว่างน้ำมันพืชกับแก๊สไฮโดรเจน เริ่มจากไตรกลีเซอไรด์ที่มีโครงสร้างทั้งอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนทำให้กลายเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัว จากนั้นเกิดการแตกพันธะของไตรกลีเซอไรด์ได้เป็นกรดไขมันอิสระ การกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างกรดไขมันอิสระเป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนประกอบด้วย 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรिटติงโดยทั่วไป เช่น นิกเกิลโมลิบดีนัม โคบอลต์โมลิบดีนัม และนิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาหรือซิลิกา ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเตรียมได้ทั้งในรูปออกไซด์และซัลไฟด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรिटติงของน้ำมันพืช คือนิกเกิลโมลิบดีนัมเนื่องจากสามารถกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระได้เป็นผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนอย่างสมบูรณ์ [1] มีงานวิจัยเปรียบเทียบสมบัติของไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรिटติงกับไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน รายงานว่าไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรिटติงมีสมบัติใกล้เคียงน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมมากกว่าไบโอดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันและปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน [2, 3]

ไบโอดีเซลในยุคที่สองหรือกรีนดีเซลยังคงมีข้อเสีย คือ มีองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนซึ่งมีจุดเยือกแข็งสูง ทำให้สมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำไม่เหมาะต่อการใช้งานในบางสภาพอากาศ วิธีแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันด้วยการเปลี่ยนโครงสร้างของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนให้เป็นสารประกอบไอโซอัลเคนที่มีจุดเยือกแข็งลดต่ำลง สารประกอบไอโซอัลเคนจึงมีสมบัติการไหลที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 [4]



รูปที่ 1.1 กราฟเปรียบเทียบจุดเยือกแข็งของสารประกอบอัลเคนในแต่ละคาร์บอนอะตอม [4]

ปัจจุบันมักศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันไปพร้อมกับปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสารประกอบไอโซอัลเคนซึ่งมีความสามารถในการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันจำเป็นต้องเกิดบริเวณที่มีความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา [5] ดังนั้นการเพิ่มความเป็นกรดให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นแนวทางสำคัญในการศึกษาครั้งนี้โดยการเพิ่มฟอสฟอรัสลงในตัวเร่งปฏิกิริยา [6] และศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันไปพร้อมกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น
2. ทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส
3. ทดลองที่อุณหภูมิ 300, 320, 340, 360 และ 380 องศาเซลเซียส
4. ทดลองที่ความดัน 450, 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถบอกผลของอุณหภูมิและความดันต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและไอโซเมอไรเซชันของปาล์มโอเลอินที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติง

ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงเป็นปฏิกิริยาการกำจัดสารประกอบที่ไม่ต้องการ เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ออกซิเจน และโลหะ ออกจากน้ำมันเชื้อเพลิงเพื่อปรับปรุงคุณภาพ สารตั้งต้นทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจนที่ความดันสูงและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติงประกอบด้วยปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

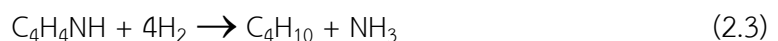
ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) คือ ปฏิกิริยาการเติมแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปที่พันธะคู่ของอะตอมคาร์บอนในสารตั้งต้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว ดังสมการที่ 2.1



ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (Hydrodesulphurization) คือ ปฏิกิริยาการกำจัดซัลเฟอร์ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิง ดังสมการที่ 2.2



ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation) คือ ปฏิกิริยาการกำจัดไนโตรเจนที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ดังสมการที่ 2.3

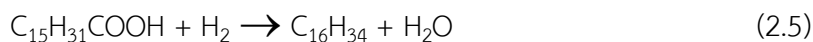


ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลเลชัน (Hydrodemetallation) คือ ปฏิกิริยาการกำจัดโลหะบางชนิดที่ไม่ต้องการโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.4



ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation) คือ ปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและเชื้อเพลิงชีวภาพ สำหรับน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งมีออกซิเจนอยู่น้อยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจึงไม่ใช่ปฏิกิริยาสำคัญ แต่มีความสำคัญมากกับน้ำมัน

เชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งมีออกซิเจนอยู่มากเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.5



2.2 ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช

การนำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงมาใช้กับน้ำมันพืชเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์โดยทำให้พันธะของไตรกลีเซอไรด์อิ่มตัว แยกโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ และกำจัดออกซิเจนออก ซึ่งทั้งสามขั้นตอนเป็นขั้นตอนของปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงดั้งเดิมที่ใช้กับน้ำมันปิโตรเลียม เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันพืชจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง คือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาร่วมของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง

ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) คือ ปฏิกิริยาข้างเคียงของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน เนื่องจากการสูญเสียคาร์บอนอะตอม 1 อะตอมไปกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจึงไม่เป็นที่ต้องการ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันแสดงดังสมการที่ 2.6



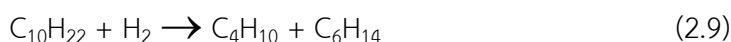
ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation) คือ ปฏิกิริยาข้างเคียงของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน เนื่องจากการสูญเสียคาร์บอนอะตอม 1 อะตอมไปกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจึงไม่เป็นที่ต้องการ ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันแสดงดังสมการที่ 2.7



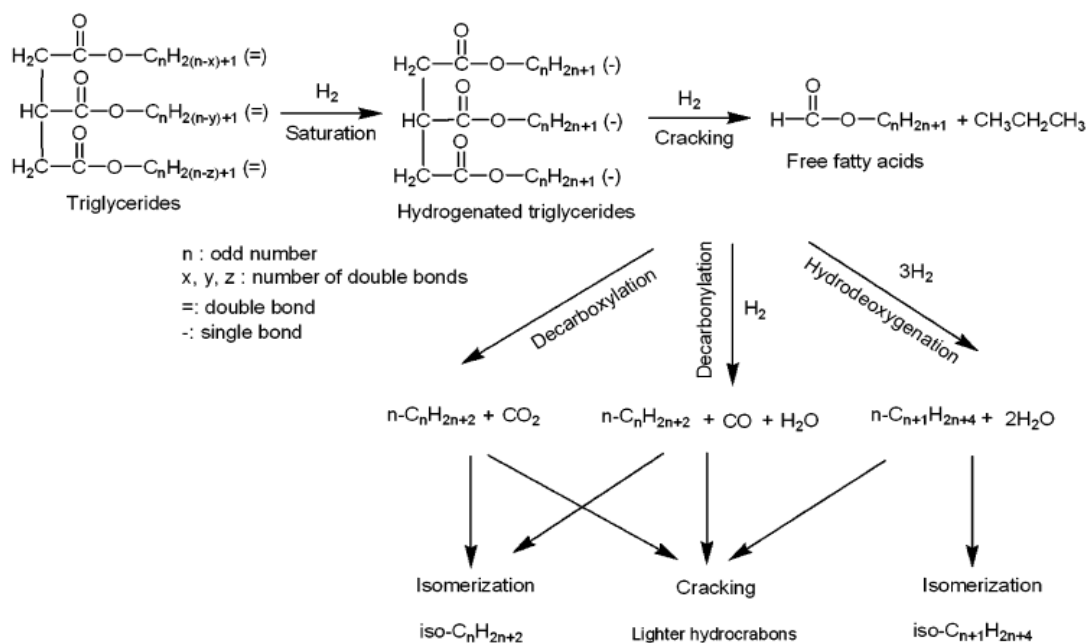
ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) คือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสาร แต่ยังมีสูตรโครงสร้างทางเคมีเหมือนเดิม (Isomer) การจัดเรียงโครงสร้างที่ต่างนั้นทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารต่างกัน ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 2.8



ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) คือ ปฏิกิริยาการสลายโมเลกุลใหญ่ให้แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง ดังสมการที่ 2.9



ปฏิกิริยาทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้มีนักวิจัยนำเสนอแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.1 [1]



รูปที่ 2.1 แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา [1]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน

2.3.1 งานวิจัยที่ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน

Senol, O. et al. (2005) [7] ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของเมทิลเอสเทอร์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาทั้งในรูปออกไซด์และซัลไฟด์ การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 250-300 องศาเซลเซียส ความดัน 1.5 เมกะปาสคาล อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 2 ลิตร (NTP)/ชั่วโมง อัตราการไหลของสารตั้งต้น 10 กรัม/ชั่วโมง จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปซัลไฟด์มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

Kubicka, D. et al. (2010) [8] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัม และนิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินาในการทำปฏิกิริยาต็อกซิเจเนชันของสารตั้งต้นน้ำมันเมล็ดเรพ การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 260-280 องศาเซลเซียส ความดัน 3.5 เมกะปาสคาล เวลาที่สารตั้งต้นสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 0.25-4 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยโมล

ระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและสารตั้งต้นเท่ากับ 50:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเหมาะสมที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลและตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัม แสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมที่มากที่สุด ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมที่มีอัตราส่วนโดยอะตอมของนิกเกิลต่อผลรวมนิกเกิลและโมลิบดีนัมเท่ากับ 0.2 ให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาสูงที่สุด

ภทร จิรเศวตกุล (2010) [9] ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมในรูปซัลไฟด์ต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนและสารตั้งต้นเท่ากับ 500:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากับ 0.5-1.5 ต่อชั่วโมง จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมให้ร้อยละการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าที่ทุกสภาวะการทดลอง อุณหภูมิที่เหมาะสมต้องไม่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส พิจารณาจากปริมาณสารประกอบอัลเคนในผลิตภัณฑ์ที่สูงขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ 250 องศาเซลเซียส

Tiwari, R. et al. (2011) [10] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันถั่วเหลือง ที่อุณหภูมิ 340-380 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2-4 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตนแสดงจากจำนวนสารประกอบอัลเคนรวมที่สูงกว่า

Hancsók, J. et al. (2012) [11] ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลทั้งสแตน และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดอยู่ในรูปรีดิวซ์ ใช้สารตั้งต้นน้ำมันเมล็ดเรพ และน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 280-380 องศาเซลเซียส ความดัน 20-100 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.75-3 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและสารตั้งต้น เท่ากับ 450 ลูกบาศก์เมตร (NTP) จากการศึกษาพบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 360-380 องศาเซลเซียส ความดันรวม 60-80 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0-2.0 ต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันตามลำดับ คือ นิกเกิลทั้งสแตน < นิกเกิลโมลิบดีนัม < โคบอลต์โมลิบดีนัม และในกรณีที่ดีที่สุดร้อยละผลได้ของการเกิดสารประกอบอัลเคนอยู่ที่ร้อยละ 75-85

Bezergianni, S. et al. (2010) [2] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันพีชใช้แล้ว ที่อุณหภูมิ 330-390 องศาเซลเซียส ความดัน 82.7-137.9 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโม

ลิวตินัมและโคบอลต์โมลลิบดินัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัมมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลลิบดินัมแสดงจากจำนวนสารประกอบอัลเคนรวมที่สูงกว่า

Veriansyah, B. et al. (2012) [1] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 92 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แพลทินัม พาราเดียม รูทีเนียม นิกเกิล นิกเกิลโมลลิบดินัมและโคบอลต์โมลลิบดินัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น พิจารณาจากจำนวนสารประกอบอัลเคนรวมที่สูงที่สุด

Chen, N. et al. (2013) [12] ศึกษาการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรินดิงของน้ำมันสบู่ดำ โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัมบนตัวรองรับแกมมาอะลูมินา ซิลิกา-อะลูมินา SAPO-11 และ ALSBA-15 ที่อยู่ในรูปซัลไฟด์และรีดิวซ์ การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อุณหภูมิ 375-425 องศาเซลเซียส ความดัน 3 เมกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและน้ำมันเท่ากับ 1000:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปซัลไฟด์และรูปรีดิวซ์ให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันใกล้เคียงกัน ในขณะที่ชนิดของตัวรองรับส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันเป็นหลัก การใช้ตัวรองรับที่เป็นกรดมากขึ้นสามารถส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันได้ดีขึ้น

Kubička, D. et al. (2014) [13] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดเรพ ที่อุณหภูมิ 260-300 องศาเซลเซียส ความดัน 3.5 เมกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2-8 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัมบนตัวรองรับที่ต่างชนิดกัน คือ แกมมาอะลูมินา ซิลิกา และไททานเนียมไดออกไซด์ จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวรองรับแต่ละชนิดทำให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีการกระจายตัวของโลหะแตกต่างกันโดยเรียงการกระจายตัวจากมากไปหาน้อย คือ ซิลิกา อะลูมินา และไททานเนียมออกไซด์ การเลือกใช้ตัวรองรับแต่ละชนิดส่งผลต่อการเลือกเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ตัวรองรับซิลิกาเลือกเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีคาร์บอนิลเลชัน ตัวรองรับไททานเนียมออกไซด์เลือกเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากที่สุด

2.3.2 งานวิจัยที่ศึกษาผลของภาวะการทดลองต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน

ภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์ (2010) [14] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 200-350 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5-1.5 ต่อชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันแบบไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความเป็นกรดสูงขึ้น แต่ไม่พบสารประกอบอัลเคนเป็นองค์ประกอบ แสดงว่าปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของน้ำมันปาล์มไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการศึกษาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เริ่มมีกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 250 องศาเซลเซียส มีปริมาณสารประกอบอัลเคนเล็กน้อย เพิ่มอุณหภูมิถึง 300 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณสารประกอบอัลเคนมากขึ้น และพบมากที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส สรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันเริ่มเกิดขึ้นที่ 250 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แสดงจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณสารประกอบอัลเคนมากขึ้น และค่าปริมาณกรดลดลง และเมื่อลดความเร็วเชิงสเปซของของเหลวลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสารประกอบอัลเคนเพิ่มมากขึ้น และค่าปริมาณกรดลดลงเนื่องมาจากมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น และยังพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาจะให้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนใกล้เคียงกัน

Krar, M. et al. (2010) [15] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่อุณหภูมิ 300-380 องศาเซลเซียส ความดัน 20-80 บาร์ อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 200-800:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0-3.0 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันจะเกิดได้ดีขึ้น แสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมทั้งสูงขึ้น แต่ปฏิกิริยาข้างเคียง (ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน) จะเกิดมากขึ้นด้วยที่อุณหภูมิตั้งแต่ 360 องศาเซลเซียสขึ้นไป เมื่อความดันสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันจะเกิดได้ดีขึ้นโดยมีความแตกต่างมากเมื่ออุณหภูมิต่ำและจะแตกต่างเพียงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูง และอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันอยู่ช่วงระหว่าง 500-600 ลูกบาศก์เมตร (NTP) แสดงจากปริมาณสารประกอบอัลเคนจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันจนถึง 500:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) และจะคงที่จนถึง 600:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) แล้วจะค่อย ๆ ลดลงเมื่ออัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันมากกว่า 600:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP)

ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว 2011 [16] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ที่อุณหภูมิ 300-380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดันส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ไตรกลีเซอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นกรดไขมันอิสระและเกิดปฏิกิริยาในขั้นต่อไปได้ช้า ทำให้พบปริมาณของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์สูง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 320-380 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันเกิดได้ดีขึ้น และเมื่อความดันสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันเกิดขึ้นได้ดีขึ้นเช่นกันเนื่องจากความสามารถในการละลายของไฮโดรเจนต่อน้ำมันมีค่ามากขึ้นและยังเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมัน

Yang, Y. et al. (2013) [17] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันของกรดไขมันอิสระ ที่อุณหภูมิ 300-375 องศาเซลเซียส ความดัน 2-8 เมกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซต่อน้ำมัน 4-18 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตนเลสและนิกเกิลในรูปซัลไฟด์บนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินา ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันมากที่สุด ในขณะที่อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันน้อยที่สุด เมื่ออัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันสูงกว่า 500:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) จะไม่ส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน

Bezergianni, S. et al. (2013) [18] ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติง โดยใช้สารตั้งต้นเป็นสารผสมระหว่างน้ำมันแก๊สออยล์หนักกับน้ำมันพีซีใช้แล้ว อัตราส่วนของสารตั้งต้นระหว่างน้ำมันแก๊สออยล์หนักต่อน้ำมันพีซีใช้แล้ว คือ 100:0 90:10 และ 70:30 ลูกบาศก์เมตร (NTP) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ที่อุณหภูมิ 310-350 องศาเซลเซียส ความดัน 1,200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 505.9:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิสามารถกำจัดอะตอมที่ไม่ต้องการได้ดีขึ้น ในขณะที่อัตราส่วนของน้ำมันพีซีใช้แล้วในสารตั้งต้นไม่มีผลต่อการกำจัดอะตอมที่ไม่ต้องการ แต่มีผลต่อค่าร้อยละการเกิดปฏิกิริยา การเพิ่มอัตราส่วนของน้ำมันพีซีใช้แล้วยังส่งผลให้จุดไหลเทต่ำลงเช่นเดียวกับการเพิ่มของอุณหภูมิ

2.4 งานวิจัยที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและไอโซเมอไรเซชัน

Krár, M. et al. (2011) [19] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและไอโซเมอไรเซชันของน้ำมันดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 330-380 องศาเซลเซียส ความดัน 20-80 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1-3 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 200-800:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและไอโซเมอไรเซชันจะเกิดได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 330-350 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 350-380 องศาเซลเซียส ความดันและอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและไอโซเมอไรเซชันในแนวโน้มที่ต่างกัน เมื่อความดันสูง ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันเกิดได้ดีขึ้น แต่ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเกิดได้ลดลง ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันในแนวโน้มเดียวกันคือเมื่อความเร็วเชิงสเปซมีค่าต่ำทั้งสองปฏิกิริยาจะเกิดได้ดี ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันได้ดีกว่าเพราะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมสูงกว่า แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมจะเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดีกว่าเพราะมีอัตราส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสูงกว่า และได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติการใช้งานอุณหภูมิต่ำที่ดีกว่า

Toba, M. et al. (2011) [20] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและไอโซเมอไรเซชันของน้ำมันพีซีแล้วที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส ความดัน 70 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 666:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2.8 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลทั้งสแตนและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันได้ดีที่สุดเนื่องจากมีปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมสูงสุด ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมจะเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดีที่สุดเนื่องจากอัตราส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสูงที่สุดและส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติการใช้งานอุณหภูมิต่ำที่ดีที่สุด

Kovács, S. et al. (2011) [5] ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและไอโซเมอไรเซชันของน้ำมันดอกทานตะวันที่อุณหภูมิ 280-380 องศาเซลเซียส ความดัน 20-80 บาร์ อัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 400-600:1 ลูกบาศก์เมตร (NTP) ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.75-3 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟลูออรีนบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่านิกเกิลโมลิบดีนัมฟลูออรีนจะเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันและไอ

ไอโซเมโรเซชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเนื่องจากทั้งปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมและอัตราส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสูงกว่า

Busto, M. et al. (2012) [21] ศึกษาการผลิตสารประกอบไอโซออกเทนด้วยปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันและไฮโดรแครกกิงของนอร์มอลเฮกซะเดคเคน ที่อุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ความดัน 20 บรรยากาศ อัตราการไหลของนอร์มอลเฮกซะเดคเคนคือ 0.2 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราส่วนความเข้มข้นไฮโดรเจนต่อนอร์มอลเฮกซะเดคเคนเท่ากับ 10 ความเร็วเชิงสเปซ 18.4 ต่อชั่วโมง ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยใช้การผสมของตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับทั้งสเตรนไตรออกไซด์-เซอร์โคเนีย (PtWZ) สำหรับปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันและตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับทั้งสเตรนซิลิเฟท-เซอร์โคเนีย (PtSZ) สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ร้อยละ 50 และ 75 ของ PtWZ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอโซบิวเทนและเนพทาสูงชัน

Gong, S. et al. (2013) [22] ศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่ได้จากน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับที่มีความเป็นกรด (SAPO-11, Al-SBA-15, Al₂O₃) และใช้ตัวรองรับ SAPO-11 กับโลหะแพลทินัม พาราเดียม นิกเกิล และรูทีเนียม เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง จากการศึกษาพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับที่มีความเป็นกรดจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันได้สูง อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมบนตัวรองรับ SAPO-11 ทำให้เกิดร้อยละผลได้ของไอโซไฮโดรคาร์บอนสูงมากกว่าร้อยละ 79.4 เนื่องจากไม่มีสตรองแอซิดไซต์ (Strong acid site) แต่ก็ยังคงทำให้อัตราส่วนระหว่างสารประกอบไอโซอัลเคนกับสารประกอบนอร์มอลอัลเคน และเมื่อใช้ตัวรองรับ SAPO-11 โดยเปลี่ยนโลหะ พบว่าโลหะแพลทินัมให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการเร่งปฏิกิริยา

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเติมฟอสฟอรัสลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

Sundaramurthy, V. et al. (2008) [6] ศึกษาการเติมฟอสฟอรัสลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ทดสอบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาด้วยปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชันและไฮโดรดีซิลิเฟอไรเซชันของน้ำมันเตา จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มฟอสฟอรัสลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ทำให้บริเวณที่มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เพิ่มบริเวณที่มีความเป็นกรดแก่และยังเพิ่มความแข็งแรงให้กับบริเวณที่มีความเป็นกรดกลางอีกด้วย

จากงานวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถเป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและไอโซเมโรเซชันของพาล์มโอเลอินดังนี้

1. ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและไอโซเมโรเซชันของพาล์มโอเลอินการเลือกใช้พาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีมากในประเทศไทยและนิยมมากที่สุดในการผลิตไบโอดีเซล

2. ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 300-380 องศาเซลเซียส เนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียสและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส

3. ศึกษาผลของความดันในช่วง 450-1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันและไอโซเมอไรเซชันมีผลของความดันที่แตกต่างกันการเปลี่ยนความดันจะทำให้ทราบว่าความดันค่าใดมีค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับทั้งสองปฏิกิริยา

4. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสที่มีต่อปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันและไอโซเมอไรเซชัน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันได้ดีที่สุด การเติมฟอสฟอรัสลงไปในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะเพิ่มความเป็นกรดให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันให้ดีขึ้นอีกด้วย



บทที่ 3 อุปกรณ์และขั้นตอนการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

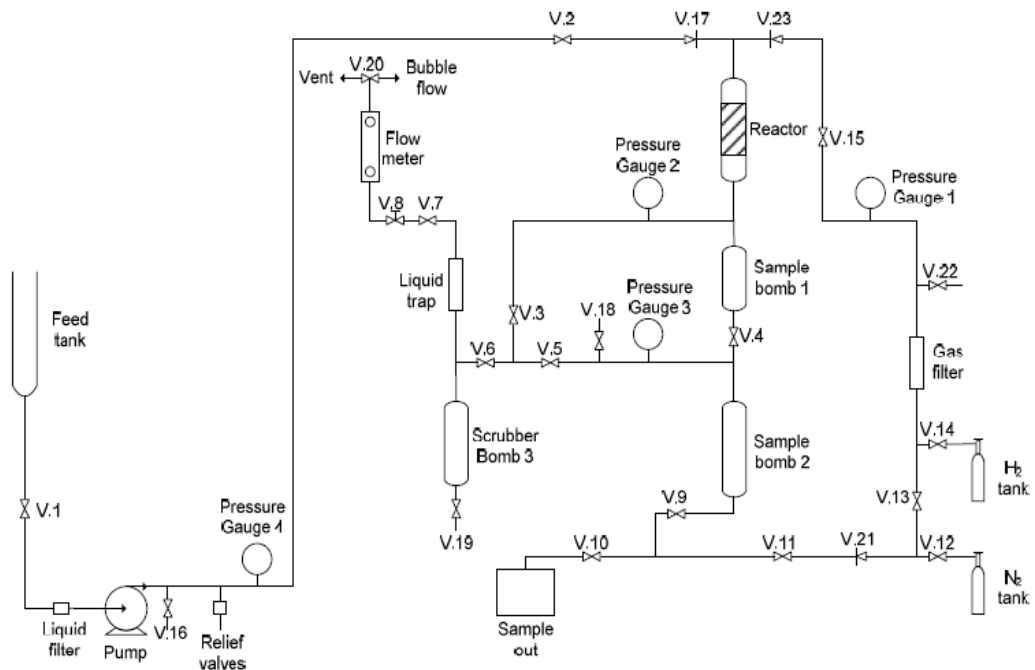
1. สารตั้งต้นปาล์มโอเลอินในงานวิจัยนี้ใช้ปาล์มโอเลอินสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร
2. สารเคมีในการทดลองและการวิเคราะห์ผลจะใช้สารเคมีหลายชนิดมาจากแหล่งผลิตและคุณภาพความบริสุทธิ์แตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	เกรด/ความบริสุทธิ์
Hydrogen	99.99%
Nitrogen	99.99%
Hexane	Commercial Grade
Iso-propanol	Commercial Grade
Carbon Disulfide	Analytical Grade
Methyl Octanoate	Analytical Grade
Mix Alkane ASTM D2886	99.9%
Nickel Molybdenum	Commercial Catalyst
Diammonium Hydrogen Phosphate	Analytical Grade

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

การศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของปาล์มโอเลอิน เลือกใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดแบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่องโดยแสดงแผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังเครื่องปฏิกรณ์แบบทริกเกิลเบตที่มีการไหลต่อเนื่อง

สารตั้งต้นที่เป็นของเหลวซึ่งถูกเก็บไว้ใน Feed tank ถูกป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยไหลผ่านวาล์วหมายเลข 1 ไหลผ่านตัวกรองขนาด 7 ไมโครเมตร กรองสิ่งสกปรกออกก่อนจะไหลเข้าสู่ปั๊มความดันสูงเพื่อเพิ่มความดันของของเหลว ปั๊มความดันสูงสามารถปรับอัตราการไหลได้ตามต้องการ ค่าความดันของของเหลวสามารถตรวจสอบได้จากมาตรวัดความดันหมายเลข 4 จากนั้นของเหลวจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 2 และเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ สารตั้งต้นที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนจะถูกส่งจากถังเก็บไหลผ่านวาล์วหมายเลข 14 ผ่านมาตรวัดความดันหมายเลข 1 และผ่านวาล์วหมายเลข 15 ตามลำดับ ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

สารตั้งต้นที่เป็นของเหลวและแก๊สจะพบกันที่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ และไหลทางเดียวกันเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 1.27 เซนติเมตร ความหนา 0.089 เซนติเมตร ความยาว 47.5 เซนติเมตร ภายในบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาตร 30 มิลลิลิตร ด้านบนและด้านล่างของชั้นตัวเร่งปฏิกิริยาบรรจุเม็ดแก้วขนาด 3 มิลลิเมตรเต็มปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความร้อนด้วยฮีตเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยประกับเหล็ก 2 ชั้นที่ประกบกับเครื่องปฏิกรณ์ ทำหน้าที่ส่งความร้อนจากฮีตเตอร์ขนาด 1,750 วัตต์จำนวน 2 ชั้น ชั้นส่วนทั้งหมดถูกหุ้มด้วยฉนวนใยเซรามิก อุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ถูกควบคุมโดยเทอร์โมคัปเปิล 4 ตัว ซึ่งถูกติดตั้งภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ 3 ตัว คือ ส่วนบน ส่วนกลาง ส่วนล่าง และภายในเครื่องปฏิกรณ์ 1 ตัว

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลวจะออกทางด้านล่างเครื่องปฏิกรณ์ และถูกแยกออกจากกัน โดยไหลผ่านถังเก็บตัวอย่างถังที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 5 วาล์วหมายเลข 6 และวาล์วหมายเลข 20 ซึ่งสามารถเลือกได้ระหว่างปล่อยสู่ภาชนะบรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนปล่อยทิ้งสู่บรรยากาศ หรือไหลผ่านมาตรวัดอัตราการไหล ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะไหลลงสู่ด้านล่างของถังเก็บตัวอย่าง

3.3 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมกับตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมใช้เกรดทางการค้า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสได้จากการเติมฟอสฟอรัสลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมโดยใช้วิธี Incipient Wetness Impregnation เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ไม่ยุ่งยากและได้รับความนิยมนำมาดำเนินการขั้นตอนในเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

1. หาปริมาณรุกรูพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม (Catalyst Commercial)
2. ใช้เกลือ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ และเตรียมปริมาณสารประกอบออกไซด์ 6.59 % โดยน้ำหนัก อ้างอิงปริมาณรุกรูพของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม
3. เคลือบฝังสารละลายลงบนตัวเร่งปฏิกิริยา
4. อบแห้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที
5. เผาภายใต้อากาศอัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาทีโดยเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง

3.4 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ($\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ($\text{NiMoP}/\text{Al}_2\text{O}_3$) นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆ เพื่อหาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนี้

3.4.1 เทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์

เทคนิครังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF, X-ray fluorescence) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง โดยวัดปริมาณรังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ปล่อยออกมา ธาตุแต่ละชนิดจะมีพลังงานเฉพาะทำให้สามารถระบุได้ว่ามีปริมาณธาตุแต่ละชนิดเท่าไร

3.4.2 เทคนิคบีอีที

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

3.4.3 เทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ

เทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ (NH_3 -TPD, Temperature-Programmed Desorption of Ammonia) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสามารถวิเคราะห์ได้การวัดปริมาณการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ

3.5 วิธีการทดลอง

3.5.1 การเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปแบบซัลไฟด์

ในปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีประสิทธิภาพสูงสุดในรูปแบบซัลไฟด์ ดังนั้นก่อนเริ่มทำการทดลองจะต้องทำการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปแบบออกไซด์ให้อยู่ในรูปแบบซัลไฟด์ก่อนทำการทดลอง ขั้นตอนการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาให้อยู่ในรูปแบบซัลไฟด์มีดังต่อไปนี้

1. ป้อนแก๊สไนโตรเจนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิห้อง 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 และแทนที่ด้วยแก๊สไฮโดรเจน ความดันไฮโดรเจนเท่ากับ 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อสารละลายไดเมทิลไดซัลไฟด์ในดีเซลเท่ากับ 500:1 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 ภาวะในการทดลอง

หลังจากตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปแบบซัลไฟด์จะทำการทดลองในสภาวะต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ภาวะในการทดลอง

ภาวะการทดลอง	
อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)	300 320 340 360 และ 380
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	450 750 และ 1,050
ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ต่อชั่วโมง)	1.0
อัตราส่วนแก๊สต่อน้ำมัน (โดยปริมาตร)	500:1
ระยะเวลาในการทดลองต่อภาวะ (ชั่วโมง)	12
ตัวเร่งปฏิกิริยา	นิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส
ปริมาตรเบตตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิลิตร)	30

3.5.3 การเก็บตัวอย่าง

ในการเก็บตัวอย่างของการทดลองจะทำการเก็บทุก 4 ชั่วโมง ระหว่างทำการทดลอง ถึงเก็บตัวอย่างถูกออกแบบมาเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดภาวะคั่งตัวในระบบถูกรบกวนระหว่างการเก็บตัวอย่าง การเก็บตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเกิดตัวอย่างจะทำโดยปีดวาล์วที่ 4 และ 5 เพื่อแยกถังเก็บตัวอย่างที่ 2 ออกจากระบบ ระหว่างการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์จะถูกเก็บที่ถังเก็บตัวอย่างที่ 1 และแก๊สจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 3 เพื่อออกสู่บรรยากาศและในส่วนของถังเก็บตัวอย่างที่ 2 แก๊สจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศผ่านวาล์วหมายเลข 18 ส่วนของเหลวจะไหลออกจากระบบด้วยแรงดันผ่านวาล์วหมายเลข 9 และ 10 สู่อ่างเก็บตัวอย่าง หลังจากการเก็บตัวอย่างเสร็จสิ้น ถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 จะเสียความดัน ดังนั้นจึงต้องป้อนแก๊สไนโตรเจนเพื่อปรับให้ความดันเท่ากับความดันระบบ แก๊สไนโตรเจนจะผ่านวาล์วหมายเลข 9 11 และ 12 เมื่อความดันเท่ากับความดันของระบบแล้ว ทำการปีดวาล์วหมายเลข 9 11 12 และเปิดวาล์วหมายเลข 4 5 เพื่อเชื่อมต่อกับถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 กับระบบ นำตัวอย่างที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป การเก็บตัวอย่างจะทำทั้งหมดสามครั้งต่อ 1 ภาวะการทดลองเพื่อนำผลวิเคราะห์มาหาค่าเฉลี่ย

3.6 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นจะถูกทำการแยกเฟสด้วยกรวยแยกเฟส เพื่อแยกน้ำและน้ำมัน ออกจากกัน เพื่อทำการวิเคราะห์คุณสมบัติดังต่อไปนี้ ปริมาณน้ำ ปริมาณน้ำมัน ความหนาแน่นของ น้ำมัน ร้อยละกรดไขมัน ปริมาณสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ปริมาณสารประกอบไอโซอัลเคนและ คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

3.6.1 การแยกเฟสของเหลว

ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นจะถูกทำการแยกเฟสด้วยกรวยแยกเฟส เพื่อแยกน้ำมันกับน้ำ ออกจากกัน ทำได้โดยนำผลิตภัณฑ์ตั้งไว้ภายในกรวยแยกเฟสระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้สารแยกตัวออก จากกัน น้ำที่ได้จะถูกชั่งน้ำหนักเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ ส่วนน้ำมันที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคต่าง ๆ

3.6.2 การวิเคราะห์น้ำมัน

3.6.2.1 ปริมาณน้ำมัน

ใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณปริมาณร้อยละผลได้

3.6.2.2 ความหนาแน่นของน้ำมัน

การวิเคราะห์ความหนาแน่นมีความสำคัญ เนื่องจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันมากเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยา ทำให้การวิเคราะห์ความหนาแน่น สามารถใช้ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ได้ โดยค่าความหนาแน่นจะถูก วิเคราะห์ด้วยขวดถ่วงจำเพาะแบบ Gay-Lussac Pycnometer

3.6.2.3 ร้อยละกรดไขมัน

การวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันซึ่งบ่งบอกถึงการกำจัดออกซิเจนออกจาก สารตั้งต้นที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้ออกซิเจนบางส่วนยังคงอยู่ในรูปของกรดไขมัน การวิเคราะห์ทำโดยการ ไทเทรตตามวิธีมาตรฐาน Ca 5a-40 การไทเทรตเริ่มต้นจากการคาดการณ์ปริมาณกรดไขมันอิสระใน ตัวอย่างจากภาวะที่ใช้ในการทดลอง สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นตามที่แสดงในตารางที่ 3.3 และใช้สารละลายฟีนอล์ฟทาลีน 1% โดยมวล เป็น อินดิเคเตอร์ในไอโซโพรพานอล

วิธีการไทเทรต

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

ตารางที่ 3.3 ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ

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

สารเคมีที่ใช้

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยความเข้มข้นขึ้นอยู่กับปริมาณกรดไขมันอิสระที่อยู่ในสารตัวอย่าง
2. เอทานอลความบริสุทธิ์ร้อยละ 95 โดยมวล มหาวิทยาลัย
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนในไอโซโพรพานอลความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล

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)

ภาวะคอแลมน์ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงในตารางที่ 3.4 สามารถระบุสารประกอบไอโซอัลเคนและสารประกอบนอร์มอลอัลเคนได้จากโครมาโตแกรมของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างโครมาโตแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.2

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

ตารางที่ 3.4 ภาวะของคอแลมน์

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

3.6.2.5 คุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

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

3.6.3 การวิเคราะห์น้ำ

3.6.3.1 ปริมาณน้ำ

หลังจากเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวแล้วนำไปใส่กรวยแยกเฟส น้ำจะถูกแยกออกมาจากน้ำมัน นำน้ำที่ได้ไปชั่งน้ำหนักเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณปริมาณร้อยละผลได้

3.6.4 การวิเคราะห์แก๊ส

3.6.4.1 การตรวจหาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ในส่วนของเฟสแก๊สจะทำการผ่านเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อตรวจสอบหาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่อาจจะเกิดขึ้น หากพบแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดขึ้น (น้ำปูนใสขุ่น) แสดงว่ามีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในสายแก๊ส เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้น้ำปูนใสขุ่น

3.7 การคำนวณที่เกี่ยวข้อง

3.7.1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

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

โดย R.F. คือ แฟกเตอร์ตอบสนอง

m_{alkane} คือ มวลของสารประกอบอัลเคนในตัวอย่าง

A_{alkane} คือ พื้นที่ของสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี

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

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

ตัวอย่างการคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของ C18 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

น้ำหนักของ C18 = 0.1081 กรัม

พื้นที่ของ C18 = 6,791,636

น้ำหนักของสารมาตรฐาน (เมทิลออกตะโนเอต) = 0.0571 กรัม

พื้นที่ของสารมาตรฐาน (เมทิลออกตะโนเอต) = 5,299,921

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการจะได้

$$R.F. = \frac{5,299,921 \times 0.1081}{6,791,636 \times 0.0571} = 1.476$$

3.7.2 การคำนวณปริมาณสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี (%น้ำหนัก)

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน} = \frac{m_{\text{alkane}} \times m_{\text{I.S.}} \times 100}{m_{\text{sample}} \times R.F. \times A_{\text{I.S.}}} \quad (3.2)$$

โดย R.F. คือ แฟกเตอร์ตอบสนอง

m_{alkane} คือ มวลของสารประกอบอัลเคนในตัวอย่าง

A_{alkane} คือ พื้นที่ของสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี

$m_{\text{i.s.}}$ คือ มวลของ Internal Standard ในตัวอย่าง

$A_{\text{i.s.}}$ คือ พื้นที่ของ Internal Standard จากผลแก๊สโครมาโทกราฟี

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณ C18 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

แฟกเตอร์ตอบสนองของ C18 = 1.476

น้ำหนักของตัวอย่าง = 0.1055 กรัม

พื้นที่ของ C18 จากผลแก๊สโครมาโทกราฟี = 6,522,407

น้ำหนักของสารมาตรฐานในตัวอย่าง = 0.02414 กรัม

พื้นที่ของสารมาตรฐานจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี = 2,903,488

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการจะได้

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน} = \frac{6,522,407 \times 0.02414 \times 100}{0.1055 \times 1.476 \times 2,903,488} = 34.82\% \text{wt}$$

3.7.3 การคำนวณปริมาณร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น (Yields based on feedstock, wt %)

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

โดย $\% \text{wt, alkanes}$ คือ ปริมาณสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟี (%wt)

$\text{g, oil phase, product}$ คือ น้ำหนักของเฟสน้ำมันในผลิตภัณฑ์

$\text{g, olein, reactants}$ คือ น้ำหนักของสารตั้งต้น

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณร้อยละผลได้เทียบกับสารตั้งต้น C18 ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

ปริมาณสารประกอบอัลเคนจากผลแก๊สโครมาโทกราฟีของ C18(%wt) = 34.82

น้ำหนักของเฟสน้ำมันในผลิตภัณฑ์ = 96.13 กรัม

น้ำหนักของสารตั้งต้น = 107.52 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.3 จะได้

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

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

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความเร็วเชิงสเปซของเหลวที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของเหลวเท่ากับ 1 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 การคำนวณหาคร่าวร้อยละของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์

(%Fatty Acids Oleic)

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

โดย N คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างการคำนวณหาคร่าวร้อยละของกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์มีค่าดังต่อไปนี้

ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 1.2 มิลลิลิตร

ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 0.001

ปริมาณน้ำหนักตัวอย่าง = 10.0212 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.5 จะได้

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

3.7.6 ค่าความคลาดเคลื่อน (Error bar)

ค่าความคลาดเคลื่อนจะแบ่งเป็นสองค่าคือ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดและค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

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

โดย Max error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด

Min error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

Max Value คือ ค่าสูงสุด

Min Value คือ ค่าต่ำสุด

Avg Value คือ ค่าเฉลี่ย

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าสูงสุด} = 21.202$$

$$\text{ค่าต่ำสุด} = 20.570$$

$$\text{ค่าเฉลี่ย} = 20.786$$

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

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของพาล์มโอเลอิน ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของพาล์มโอเลอิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500:1 โดยปริมาตร ผลการทดลองจะถูกนำเสนอและอภิปราย ตามลำดับต่อไปนี้

- 4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำมันพาล์มโอเลอิน
- 4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา
- 4.3 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพาล์มโอเลอิน
- 4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน
- 4.5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน
- 4.6 ผลของภาวะในการทดลองและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ

4.1 ผลการวิเคราะห์น้ำมันพาล์มโอเลอิน

น้ำมันพาล์มโอเลอินเป็นส่วนหนึ่งของน้ำมันพาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการแยกกรดไขมันอิสระและไขพาล์มสเตอรินออก น้ำมันพาล์มโอเลอินมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องซึ่งประกอบด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่มีกิ่งของกรดไขมันหลายชนิด โดยองค์ประกอบของน้ำมันพาล์มโอเลอินจะแตกต่างกันเล็กน้อยตามแหล่งที่ผลิต ทำให้จำเป็นต้องวิเคราะห์องค์ประกอบก่อนทำการทดลองเพื่อให้สามารถอภิปรายผลการทดลองได้อย่างถูกต้อง องค์ประกอบของกรดไขมันในโมเลกุลน้ำมันพาล์มโอเลอินสามารถวิเคราะห์ได้ในรูปแบบเอสเทอร์ของกรดไขมันโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งน้ำหนักโมเลกุลสามารถคำนวณจากค่าของกรด ค่าองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพาล์มโอเลอินแสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน

องค์ประกอบ	โครงสร้าง	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Lauric acid	C12:0	0.41
Myristic acid	C14:0	0.22
Palmitic acid	C16:0	37.56
Palmitoleic acid	C16:1	0.18
Stearic acid	C18:0	4.04
Oleic acid	C18:1	44.96
Linoleic acid	C18:2	12.38
Linolenic acid	C18:3	0.24

ผลการวิเคราะห์วัตถุดิบในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มโอเลอินมีทั้งองค์ประกอบของกรดไขมันที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ซึ่งมีช่วงจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 12 ถึง 18 โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 ผลการวิเคราะห์น้ำมันปาล์มโอเลอินสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่เลือกใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น [9], [14]

4.2 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ($\text{NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$) และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ($\text{NiMoP}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray fluorescence (XRF), BET และ NH_3 -TPD เพื่อหาคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงดังต่อไปนี้

4.2.1 ผลวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF, X-ray fluorescence) ในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ได้ถูกเติมลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมในปริมาณร้อยละ 6.59 โดยน้ำหนัก การเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต้องการควบคุมน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ให้เท่ากันทุกครั้งเพื่อตัดผลของน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาออก การเติมฟอสฟอรัสเพนตะออกไซด์ลงในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสมีปริมาณนิกเกิลออกไซด์และโมลิบดีนัมออกไซด์ที่เป็น

โลหะสำคัญที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณโลหะระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสพบว่าต่างกันเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.2 ปริมาณธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

องค์ประกอบ	NiMo ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	NiMoP ปริมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
Al ₂ O ₃	71.6	67.2
MoO ₃	21.24	19.10
NiO	6.63	6.43
P ₂ O ₅	0.00	6.59

4.2.2 ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

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

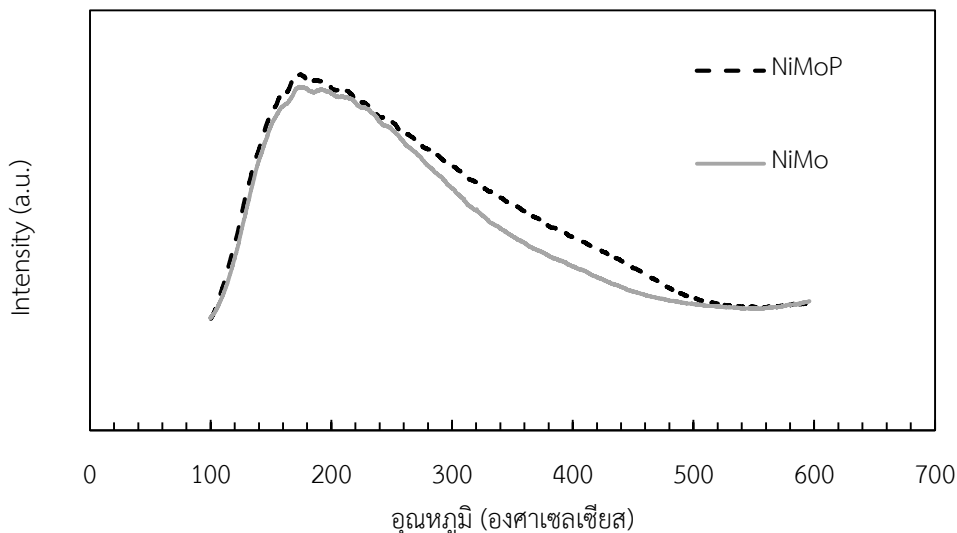
ตารางที่ 4.3 ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว (m ² /g)	ปริมาตรรูพรุน (cm ³ /g)	เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ย (nm)
NiMo/Al ₂ O ₃	87.566	0.1224	1.21
NiMoP/Al ₂ O ₃	80.287	0.1036	1.20

4.2.3 ผลวิเคราะห์ปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคการคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิ (NH₃-TPD, Temperature-Programmed Desorption of Ammonia) ดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบบนตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยา โดยที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสจะมีปริมาณและความแรงของกรดสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ปริมาณของกรดที่สูงกว่าแสดงจากปริมาณของแอมโมเนียที่คายออกมามีปริมาณมากกว่าและความแรงของกรดแสดงจากอุณหภูมิที่ใช้ในการคายแอมโมเนีย เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสมีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบซึ่งมีความเป็นกรด

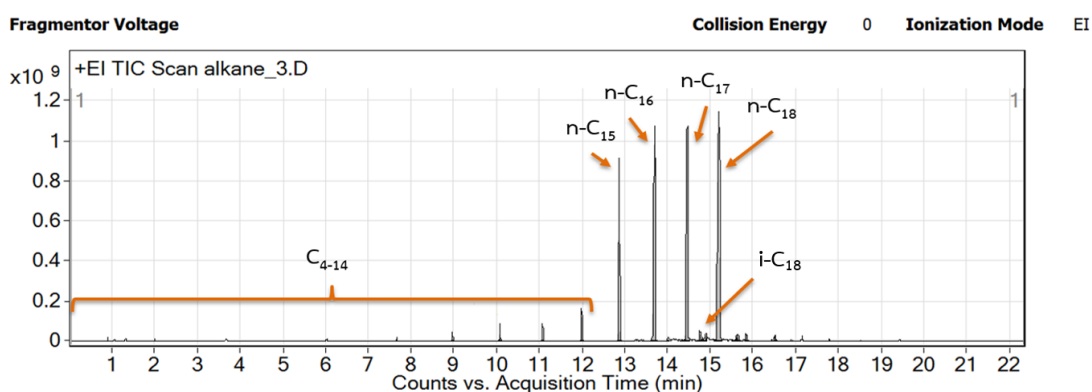
โดยปริมาณและความแรงของกรดบนพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาจะส่งผลต่อความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาที่ต้องอาศัยความเป็นกรดในการเร่งปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน



รูปที่ 4.1 การคายแอมโมเนียตามโปรแกรมอุณหภูมิของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

4.3 เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรินดิ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน

การศึกษาเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรินดิ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ทำโดยวิเคราะห์ตัวอย่างที่ได้จากการทำการทดลองเพื่อหาลำดับประกอบของสารที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออนไนเซชัน โดยการเทียบรีเทนชันไทม์ (Retention time) ของผลิตภัณฑ์กับสารมาตรฐาน ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.2



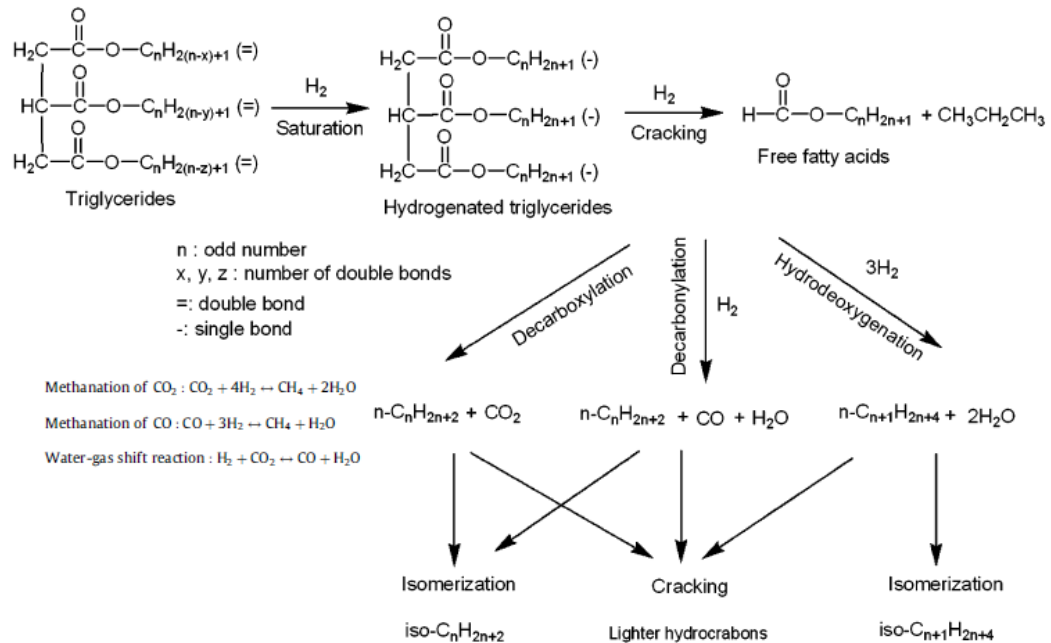
รูปที่ 4.2 โครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของเหลวคือสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 4-18 โดยองค์ประกอบหลักคือสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 การระบุชนิดของสารที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบของสารตั้งต้นปาล์มโอเลอินแสดงดังตารางที่ 4.1 ทำให้สามารถนำกลไกการเกิดปฏิกิริยาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาประยุกต์ใช้และช่วยในการอธิบายกลไกการเกิดปฏิกิริยาของงานวิจัยนี้ โดยแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.3 มีความสอดคล้องกับชนิดของสารที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

Veriansyah, B. et al. (2012) [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันถั่วเหลืองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 92 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัม พาราเดียม รูทีเนียม นิกเกิล นิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ได้เสนอแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยองค์ประกอบสารตั้งต้นน้ำมันถั่วเหลืองประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัวและไม่อิ่มตัว ไตรกลีเซอไรด์ที่ไม่อิ่มตัวจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันกลายเป็นไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัว จากนั้นไตรกลีเซอไรด์ที่อิ่มตัวจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงกลายเป็นกรดไขมันอิสระกับโพรเพน กรดไขมันอิสระจะถูกกำจัดออกซิเจนให้กลายเป็นสารประกอบอัลเคน โดยการกำจัดออกซิเจนสามารถเกิดขึ้นได้สามปฏิกิริยา คือ 1. ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน โดยได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนและมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นน้ำ 2. ปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชัน โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนและมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำ 3. ปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน โดยได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนและมีผลิตภัณฑ์ข้างเคียงเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเป็นปฏิกิริยาหลักในการกำจัดออกซิเจน และไม่เสียคาร์บอนอะตอมออกไปจากสารประกอบอัลเคน โดยปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงในการกำจัดออกซิเจน ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่สูงเสียคาร์บอนอะตอมจำนวน 1 อะตอม ไปกับคาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นหากเกิดในภาวะที่เหมาะสม สารประกอบนอร์มอลอัลเคนสามารถเกิดปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชัน และไฮโดรแครกกิงขึ้นได้

Huber, G.W. et al. (2007) [23] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดทานตะวันพบว่า ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช มีปฏิกิริยาในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระเพื่อนเปลี่ยนเป็นสารประกอบอัลเคนเกิดขึ้นพร้อมกันสามปฏิกิริยา คือ 1. ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน เป็นปฏิกิริยาหลักในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ ผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง 2. ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ผลิตภัณฑ์หลักคือสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ และมีน้ำ และคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง 3. ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน โดยการ

เกิดปฏิกิริยานี้ไม่จำเป็นต้องใช้แก๊สไฮโดรเจนในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่และมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ข้างเคียง ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 4.3

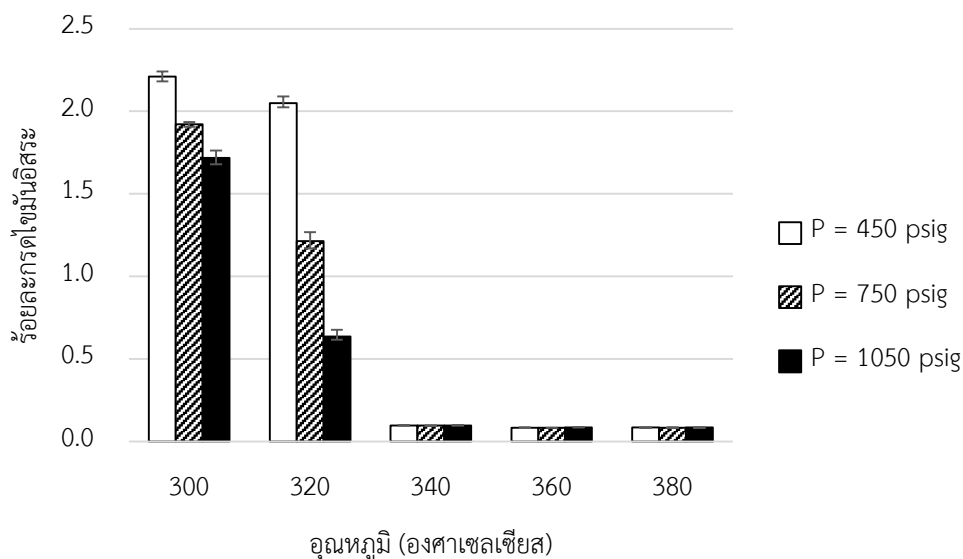


รูปที่ 4.3 แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

4.4.1 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ

ปริมาณของกรดไขมันอิสระที่พบในผลิตภัณฑ์บ่งบอกถึงความสามารถของปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ หากพบปริมาณกรดไขมันอิสระเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์สูงแสดงว่าปฏิกิริยาในขั้นการกำจัดออกซิเจนเกิดได้ไม่ดีส่งผลให้ออกซิเจนบางส่วนยังคงเหลืออยู่ในรูปของกรดไขมันอิสระ ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถตรวจหาได้จากวิธีไทเทรตมาตรฐาน AOCS Ca-5a-40



รูปที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ในช่วงอุณหภูมิ 300-320 องศาเซลเซียส พบปริมาณกรดไขมันอิสระสูงเนื่องจากปฏิกิริยากำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระเกิดได้ดี เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 340-380 องศาเซลเซียสพบว่าเหลือปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำจนมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยากำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระได้ดีในช่วงอุณหภูมินี้ ดังนั้นผลของอุณหภูมิจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณของกรดไขมันอิสระตั้งแต่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไป การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นเนื่องจากทฤษฎีของจลนพลศาสตร์เคมีกล่าวไว้ว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีผลขึ้นกับตัวแปรคือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าคงที่ของปฏิกิริยาโดยค่าคงที่ของปฏิกิริยามีผลขึ้นกับอุณหภูมิตามสมการของ Arrhenius คือการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสูงขึ้น และมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ นายภทร จิรเสวตกุล (2010) [9] ได้ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัม ที่มีต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ที่อุณหภูมิ 250-350 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการจะต้องไม่ต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส และเกิดการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับงานวิจัยของ ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว (2011) [15] ที่ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช ผลการศึกษาพบว่าปริมาณของกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิต่ำ (300 และ 320

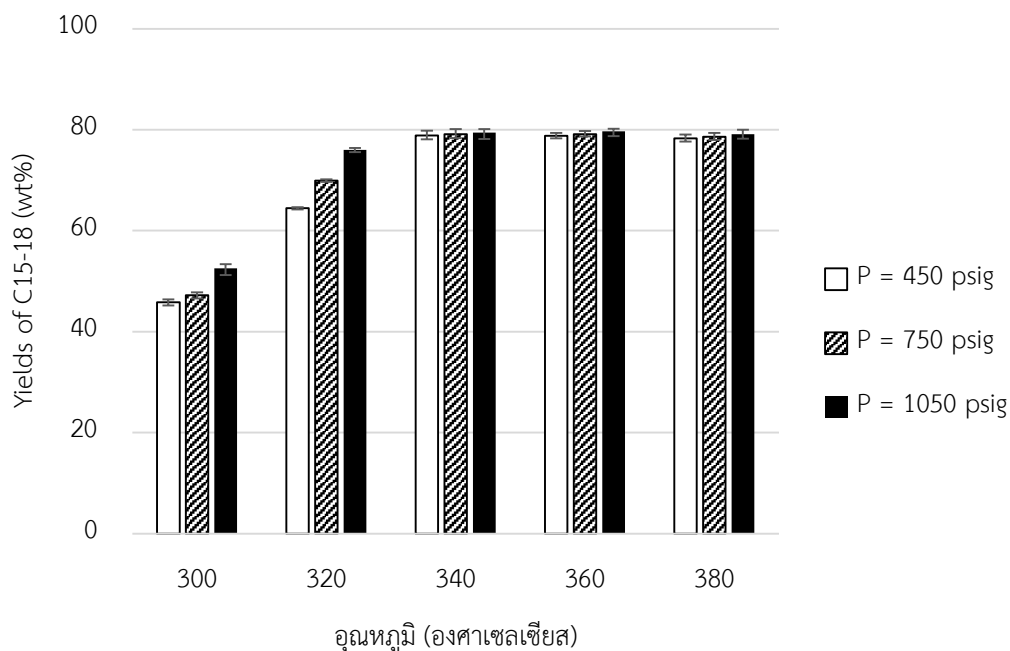
องศาเซลเซียส) จะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณของกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิสูง (ตั้งแต่ 340 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป) เนื่องจากที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาที่ใช้กำจัดออกซิเจนเกิดได้เร็ว ทำให้พบปริมาณกรดไขมันอิสระเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อย

การเพิ่มความดันทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณกรดไขมันอิสระลดลง เนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนสามารถละลายลงในสารตั้งต้นได้ดี ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยาจึงสูงขึ้น โดยความดันจะส่งผลต่อปริมาณกรดไขมันอิสระอย่างชัดเจนเฉพาะช่วงอุณหภูมิ 300-320 องศาเซลเซียส เนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้ปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระเกิดได้ไม่ดี เมื่ออุณหภูมิถึง 340 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป ความดันจะไม่ส่งผลต่อความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวปฏิกิริยาในการกำจัดออกซิเจนสามารถเกิดได้ดี สอดคล้องกับงานวิจัยของ ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว (2011) [16] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 300-380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความดันส่งผลให้เกิดการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระได้สูงขึ้น

4.4.2 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน

อะตอม 15-18

แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น และผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์อธิบายได้ว่า การกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นในปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงสามารถเกิดผ่านสามปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรตีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สารประกอบอัลเคนที่มาจากปฏิกิริยาไฮโดรตีออกซิจีเนชันจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 เท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันในสารตั้งต้น ส่วนของสารประกอบอัลเคนที่มาจากปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 ซึ่งน้อยกว่าจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันในสารตั้งต้น 1 อะตอมเนื่องจากสูญเสียคาร์บอนไปกับผลิตภัณฑ์ข้างเคียง



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

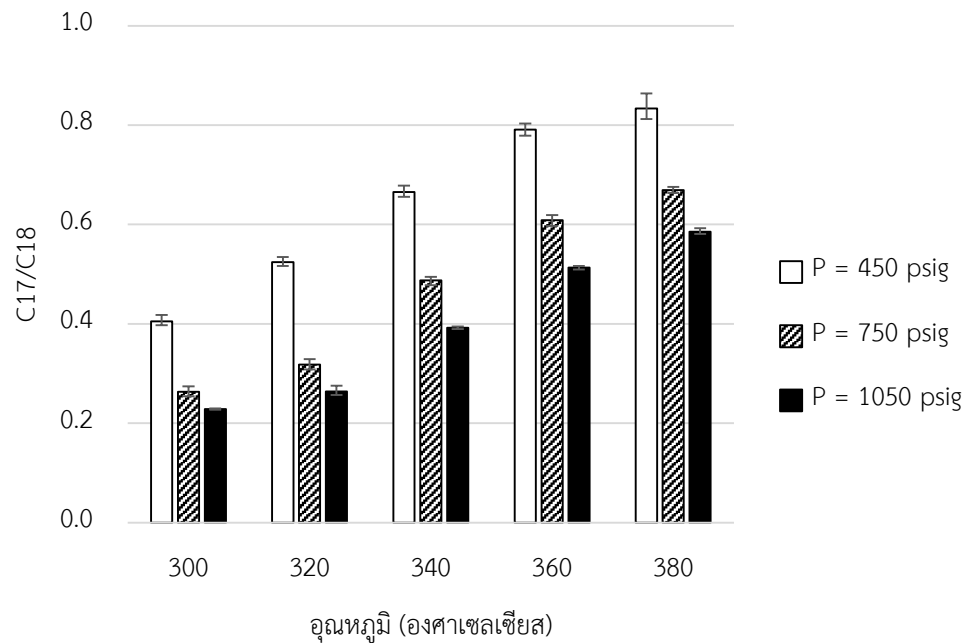
ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของสารประกอบอัลเคนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (300-340 องศาเซลเซียส) เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสามารถเกิดขึ้นได้ดี แต่การกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระเกิดได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไป ดังนั้นปริมาณสารประกอบอัลเคนจึงไม่แตกต่างกันที่อุณหภูมิสูง (340-380 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kwon, K.C. et al. (2011) [24] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันคาโนลาบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส ความดัน 18.25-85.13 บาร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชันสูงขึ้น อุณหภูมิจะส่งผลอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิต่ำ (300-340 องศาเซลเซียส) และผลของอุณหภูมิจะส่งผลลดลงในช่วงอุณหภูมิสูง (340-400 องศาเซลเซียส)

การเพิ่มความดันทำให้ปริมาณสารประกอบอัลเคนสูงขึ้นในทุกอุณหภูมิ เนื่องจากการละลายของแก๊สไฮโดรเจนลงในสารตั้งต้นได้ดีและเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยา ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kwon, K.C. et al. (2011) [24] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันคาโนลาบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ที่อุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส ความดัน 18.25-85.13 บาร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยเพิ่มการ

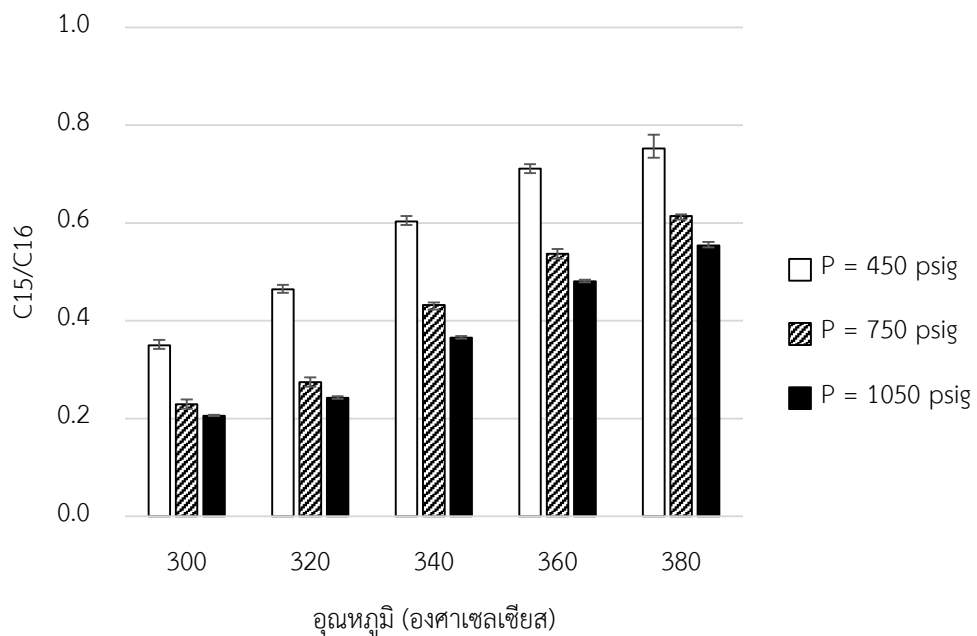
เกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันได้ดีขึ้นโดยที่จะส่งผลอย่างชัดเจนในช่วงอุณหภูมิต่ำ (300-340 องศาเซลเซียส) และจะส่งผลลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (340-400 องศาเซลเซียส) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Krár, M. et al. (2011) [19] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันดอกทานตะวัน อุณหภูมิ 300-380 องศาเซลเซียส ความดัน 20-80 บาร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันสูงขึ้น ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันจะสามารถเกิดได้ดีขึ้นโดยจะมีความแตกต่างมากที่อุณหภูมิต่ำและความแตกต่างจะลดลงที่อุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Sankaranarayanan, T.M. et al. (2011) [25] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมที่อุณหภูมิ 320-350 องศาเซลเซียส ความดัน 30-50 บาร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความดันส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันได้ดีขึ้นในทุกช่วงอุณหภูมิ

4.4.3 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้นและแผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชแสดงเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ ในรูปแบบอัตราส่วนโดยโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ อัตราส่วนนี้แสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระซึ่งประกอบด้วยสามปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน เมื่อพิจารณากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 18 หากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชัน สารประกอบอัลเคนที่ได้จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 18 หากเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สารประกอบอัลเคนที่ได้จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 17 เมื่อพิจารณาของกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 หากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชัน ผลิตภัณฑ์อัลเคนที่ได้จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 หากเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ผลิตภัณฑ์อัลเคนที่ได้จะมีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนเนชันจะไม่มี การสูญเสียจำนวนคาร์บอนอะตอมออกไปจากโครงสร้าง แต่ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน จะมีการสูญเสียคาร์บอนอะตอมไปในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนโดยโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 17 ต่อ 18 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนโดยโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

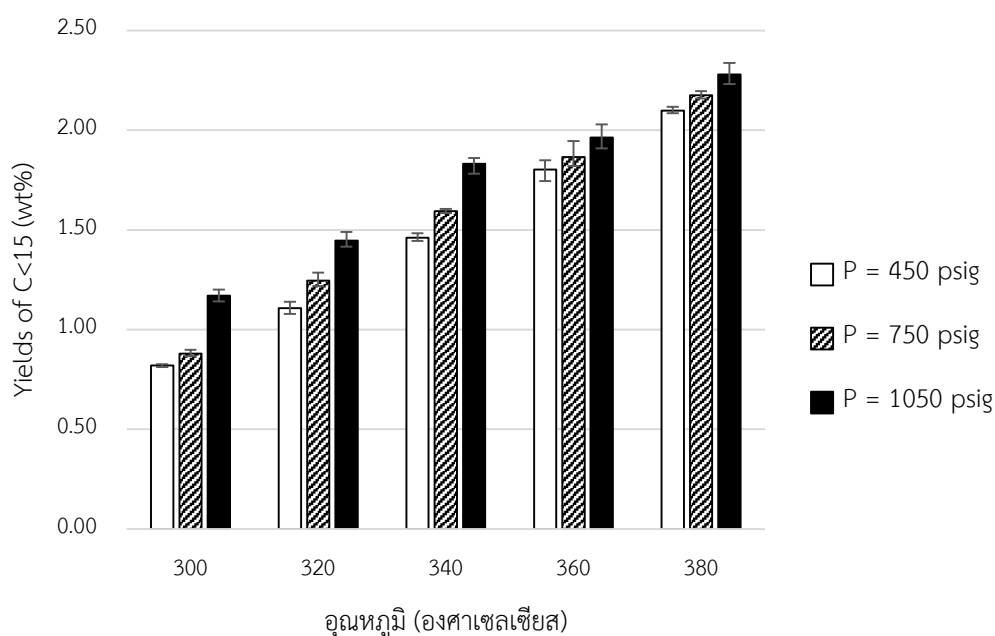
ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 และ 17 ต่อ 18 มีค่าน้อยกว่า 1 ในทุกภาวะการทดลองแสดงว่าปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระคือ ปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชัน มีปฏิกิริยาร่วมคือปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลสูงขึ้น เนื่องจากเกิดการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระในเส้นทางของปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสูงขึ้น แสดงจากแนวโน้มของอัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 และ 17 ต่อ 18 ที่สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว (2011) [16] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรท็อกซิเจนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 300-380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น การกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระในเส้นทางของปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสูงขึ้น และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันลดลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kovács, S. et al. (2011) [5] ที่ศึกษาปฏิกิริยาของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ที่อุณหภูมิ 280-380 องศาเซลเซียส และความดัน 20-80 บาร์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนขององค์ประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 18 ต่อ 17 มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสูงขึ้น

การเพิ่มความดันส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลลดลง เนื่องจากเกิดการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระในเส้นทางของปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันสูงขึ้น ที่ความดันสูงจะเพิ่มค่าการละลายของแก๊สไฮโดรเจนและเพิ่มความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยาซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันนั้นใช้แก๊สไฮโดรเจนในการเกิดปฏิกิริยา แสดงจากแนวโน้มของอัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 และ 17 ต่อ 18 ที่ต่ำลง ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang, Y. et al. (2013) [17] ที่ศึกษาผลของความดันต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจนชันต้องการจำนวนโมลแก๊สไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยามากกว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ส่งผลให้เมื่อลดความดันการกำจัดออกซิเจนจะเกิดผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสูงขึ้น

4.4.4 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15

ผลจากการวิเคราะห์สารตั้งต้นแสดงให้เห็นว่ากรดไขมันอิสระในสารตั้งต้นจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมหลักคือ 16 และ 18 เมื่อนำมาทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติง องค์กรประกอบหลักของผลิตภัณฑ์จึงเป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 เป็นหลัก แต่จากผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-เฟรมไอออนไนซ์สามารถพบสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งต่อกลายเป็นสารประกอบนอร์มอลอัลเคนโมเลกุลเล็กได้



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

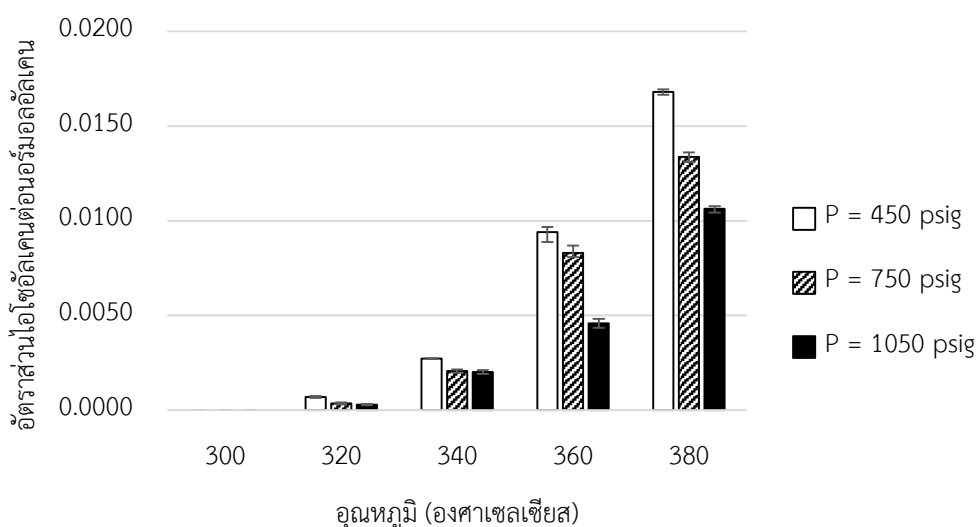
ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 มีปริมาณมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งต้องการพลังงานที่มากพอสำหรับการแตกพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอม การเพิ่มอุณหภูมิเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มพลังงานในการแตกพันธะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งได้สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว (2011) [16] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 300-380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโม

ลิปตินัม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ่งสูงขึ้น จึงทำให้สารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลใหญ่กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง

การเพิ่มความดันส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ่งเกิดได้ดีขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ่งต้องการแก๊สไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มความดันเป็นการเพิ่มค่าการละลายและช่วยเพิ่มความสามารถของแก๊สไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยา ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gong, S. et al. (2012) [26] ที่ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนสารประกอบอัลเคนโมเลกุลใหญ่ และโมเลกุลเล็กที่เปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ หรือเพิ่มความดัน อัตราส่วนของสารประกอบอัลเคนโมเลกุลเล็กจะเพิ่มมากขึ้น แต่อัตราส่วนของสารประกอบอัลเคนโมเลกุลใหญ่จะลดลงเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ่งเกิดได้ดีขึ้น โดยที่ปฏิกิริยาจะเกิดได้นั้นต้องการพลังงานมากพอที่จะสลายพันธะ C-C ซึ่งต้องการอุณหภูมิ และความดันที่สูงในการสลายพันธะ

4.4.5 ผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน

สารประกอบนอร์มอลอัลเคนสามารถเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันต่อได้ทำให้สารประกอบนอร์มอลอัลเคนกลายเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน สารประกอบไอโซอัลเคนช่วยให้ผลิตภัณฑ์กรีนดีเซลมีความสามารถในการใช้ที่อุณหภูมิต่ำได้ดีขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจในการหาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน



รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิและความดันต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิปตินัม

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสามารถทำปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันต่อเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน อัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และความดันต่ำลง

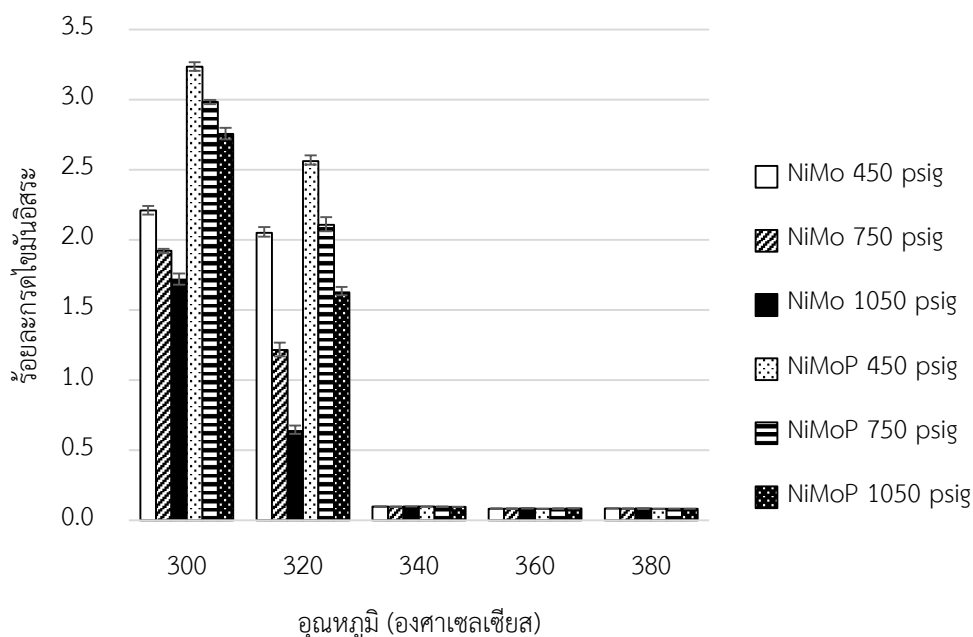
การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันต้องเกิดผ่านคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งจะเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงเป็นการเพิ่มจำนวนคาร์บอนเนียมไอออนทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Toba, M. et al. (2011) [20] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันของน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่อุณหภูมิ 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 70 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลทังสแตน และโคบอลต์โมลิบดีนัม ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน

การเพิ่มความดันทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันเกิดได้ลดลง เมื่อเพิ่มความดันส่งผลให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายลงในน้ำมันพืชมากขึ้น คาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นมีโอกาสไปทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรเจน และลดโอกาสที่คาร์บอนเนียมไอออนจะไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนเนียมไอออนด้วยตัวเอง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kovács, S. et al. (2011) [5] ที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติง และปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่อุณหภูมิ 280 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ถึง 80 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และนิกเกิลโมลิบดีนัมฟลูออรีน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความดันจะลดความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน

4.5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชัน

งานวิจัยนี้เป็นการเปรียบเทียบผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส เพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอร์ไรเซชันร่วมกัน

4.5.1 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ

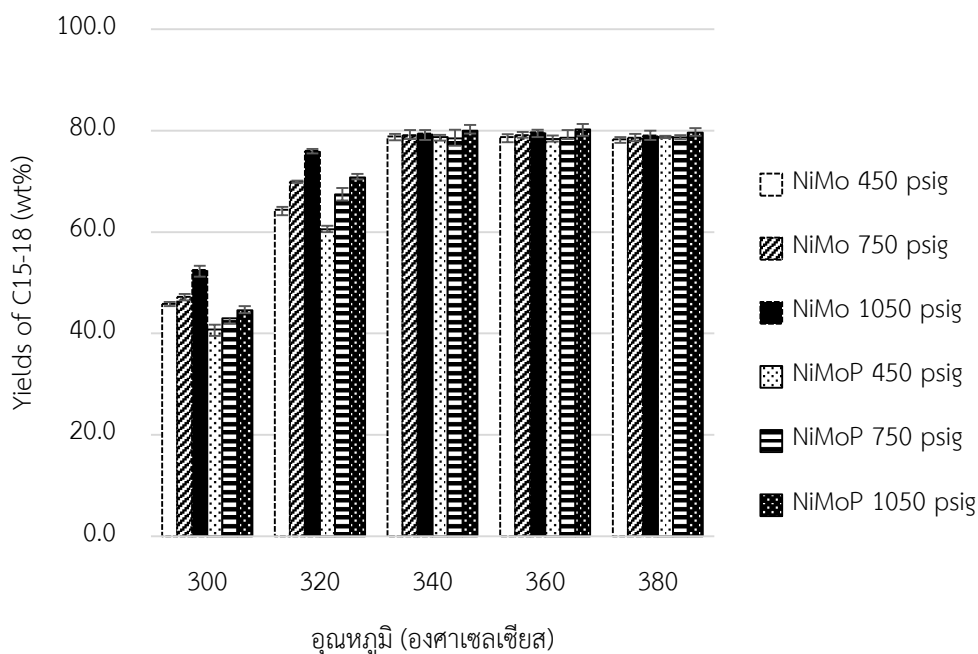


รูปที่ 4.10 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันส่งผลต่อการกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นและปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ หากเปรียบเทียบในภาวะการทดลองเดียวกันการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะพบปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์น้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส เนื่องจากการเติมฟอสฟอรัสลงไปบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะลดความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิต่ำ (300-320 องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาไม่สามารถกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นได้อย่างสมบูรณ์ทำให้เห็นผลของตัวเร่งปฏิกิริยา แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 340 องศาเซลเซียส จะไม่เห็นผลของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาสามารถกำจัดออกซิเจนออกได้อย่างสมบูรณ์ ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bezerghianni, S. et al. (2012) [27] ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิซิเจนชันของน้ำมันพืชใช้แล้ว ที่อุณหภูมิ 330 ถึง 390 องศาเซลเซียส ความดัน 82.7 ถึง 137.9 บาร์ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์แสดงให้เห็นว่าในภาวะการทดลองเดียวกันตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมพบปริมาณกรดไขมันอิสระเหลือน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.5.2 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม

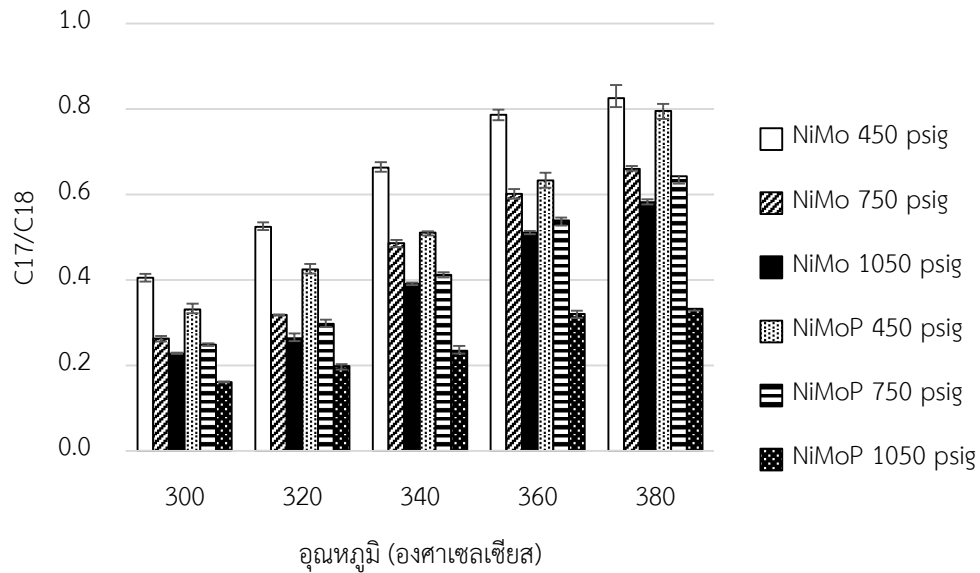
15-18



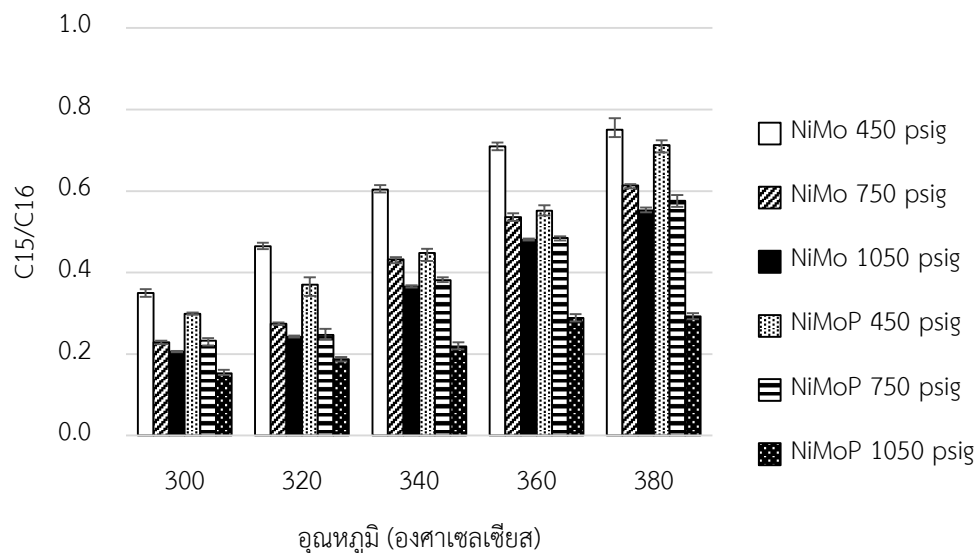
รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิและความดันต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะได้ปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ในผลิตภัณฑ์สูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมมีความสามารถในการกำจัดออกซิเจนสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส ผลการทดลองสอดคล้องกับปริมาณกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าการเติมฟอสฟอรัสลงบนตัวเร่งปฏิกิริยาลดความสามารถในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ โดยผลของตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ที่อุณหภูมิต่ำ (300-320 องศาเซลเซียส) เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำเกิดปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระได้ไม่ดี แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 340 องศาเซลเซียสทำให้ไม่เห็นผลของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระเกิดได้ดี

4.5.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อเส้นทางการเกิดปฏิกิริยา



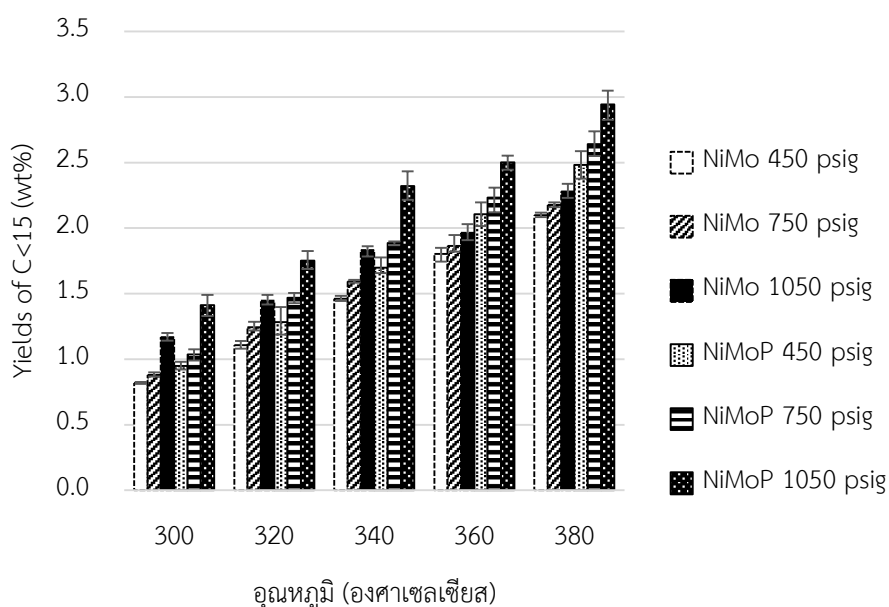
รูปที่ 4.12 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 17 ต่อ 18 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์ม โอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัม ฟอสฟอรัส



รูปที่ 4.13 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์ม โอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัม ฟอสฟอรัส

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 และ 17 ต่อ 18 มีค่าน้อยกว่า 1 ทุกภาวะการทดลอง เนื่องจากปฏิกิริยาหลักที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชัน มีปฏิกิริยาร่วมในการกำจัดออกซิเจนออกคือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดไม่ส่งผลต่อเส้นทางของปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสส่งผลต่อแนวโน้มอัตราส่วนโดยโมลสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 ต่อ 16 และ 17 ต่อ 18 ในทิศทางเดียวกันคือ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลสูงขึ้นและการเพิ่มความดันส่งผลให้อัตราส่วนโดยโมลต่ำลง

4.5.4 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15



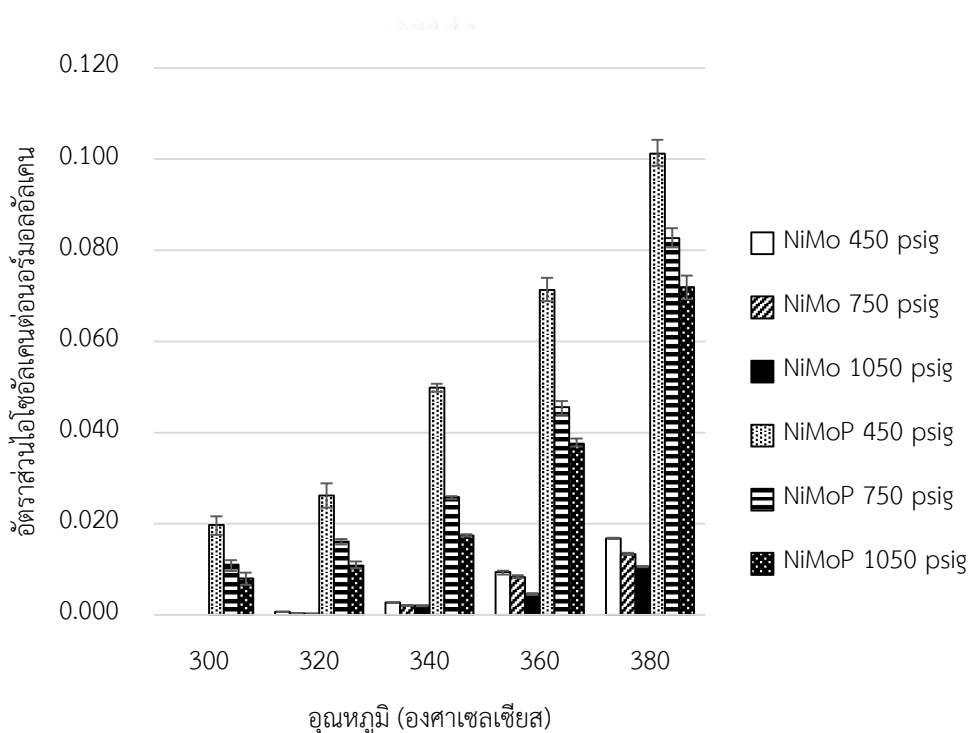
รูปที่ 4.14 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ในผลิตภัณฑ์เพียงเล็กน้อย โดยมีแนวโน้ม

เดียวกันคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความดันสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 สูงขึ้น

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสมีความเป็นกรดสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมแสดงจากรูปที่ 4.1 ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ่งเกิดได้ดีเมื่อมีความเป็นกรดสูง ดังนั้นความเป็นกรดที่สูงกว่าทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ่งได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม โดยเปลี่ยนสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 แตกตัวกลายเป็นสารประกอบอัลเคนโมเลกุลเล็กที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15

4.5.5 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน



รูปที่ 4.15 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

ผลการทดลองในรูปที่ 4.15 แสดงถึงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสจะส่งผลให้เกิดอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนในผลิตภัณฑ์สูงกว่าปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโม

ลิวตินัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัมฟอสฟอรัสมีความเป็นกรดสูงสามารถเกิดคาร์บอเนียมไอออนได้ดีจึงเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัม อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัมฟอสฟอรัสส่งผลต่อแนวโน้มอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนในทิศทางเดียวกันคือ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราส่วนสูงขึ้นและการเพิ่มความดันส่งผลให้อัตราส่วนต่ำลง ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kovács, S. et al. (2011) [5] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชัน และไอโซเมอไรเซชันของน้ำมันดอกทานตะวัน ที่อุณหภูมิ 280-380 องศาเซลเซียส ความดัน 20-80 บาร์ อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 400-600 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.75-3 ต่อชั่วโมง ทำการเติมฟลูออรีนลงบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลลิบดินัมเพื่อเพิ่มความเป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำการเติมฟลูออรีนเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้เติมฟลูออรีน

ผลการทดลองในรูปที่ 4.14 และ 4.15 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันจะเกิดควบคู่กัน โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากทั้งสองปฏิกิริยาต้องการความเป็นกรดและอุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกัน ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gong, S. et al. (2013) [22] ที่ได้ศึกษาปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่ได้จากน้ำมันสบู่ดำ ที่อุณหภูมิ 275-400 องศาเซลเซียส ความดัน 3 เมกกะปาสคาล อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 1200 ต่อ 1 ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทตินัม พาราเดียม นิกเกิล และรูทีเนียมบนตัวรองรับที่มีความเป็นกรดแตกต่างกันคือ SAPO-11 Al-SBA-15 และ Al_2O_3 จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าตัวรองรับที่มีความเป็นกรดสูงกว่าจะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้มากกว่าตัวรองรับที่มีความเป็นกรดต่ำ นอกจากนี้ในภาวะที่เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันมากก็จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงมากด้วยเช่นกัน

4.6 ผลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อจุดขุ่น

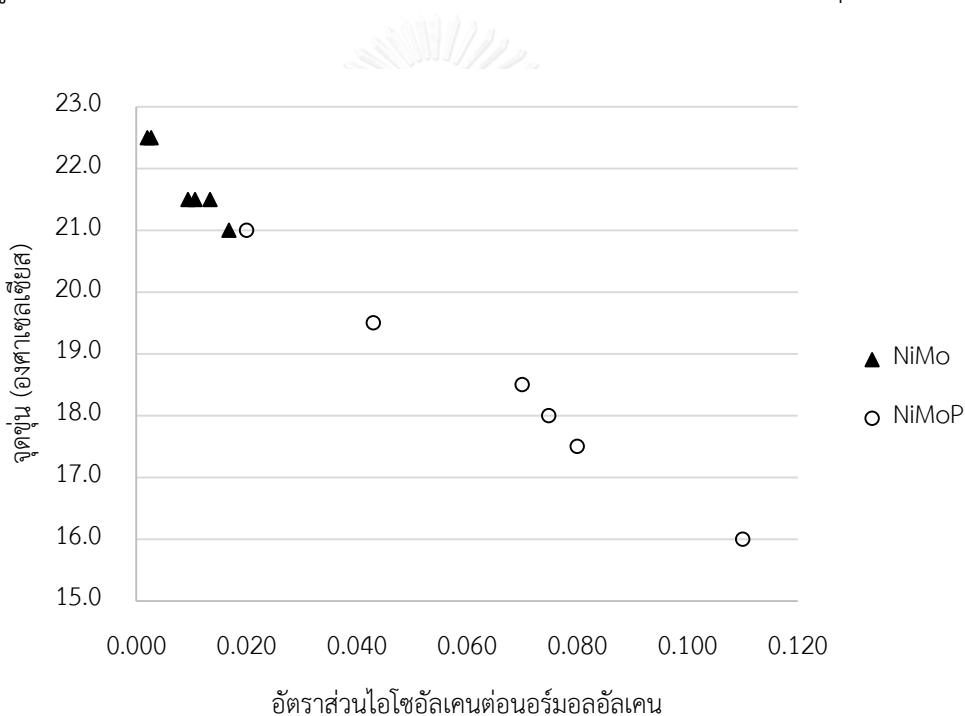
สารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงจะมีปัญหาด้านการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากมีจุดเยือกแข็งที่สูง จุดเยือกแข็งมีสัมพันธ์กับคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ โดยคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำในงานวิจัยนี้ระบุเป็นจุดขุ่น (Cloud point) ซึ่งคือจุดที่น้ำมันเป็นฝ้าขุ่น อุณหภูมิแรกที่ไขเริ่มตกผลึกเป็นฝ้าทำให้หม้อกรองตันอย่างรวดเร็วและไม่สามารถสูบน้ำมันได้สามารถวิเคราะห์จุดขุ่นได้จากวิธีมาตรฐาน ASTM D2500

4.6.1 ผลของอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนต่อจุด

จุด

แผนผังปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า หากต้องการปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำสามารถทำได้จากสองปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันและปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน

ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเปลี่ยนสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเป็นสารประกอบไอโซอัลเคน ส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพของสารประกอบอัลเคนเปลี่ยนไป ทำให้จุดเยือกแข็งและจุดจุดต่ำลง โดยปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาที่ต้องการให้เกิดขึ้นเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนคาร์บอนอะตอมที่จะส่งผลต่อคุณภาพของน้ำมันดีเซล



รูปที่ 4.16 ผลของอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคน ต่อจุดจุด อุณหภูมิ 340-380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

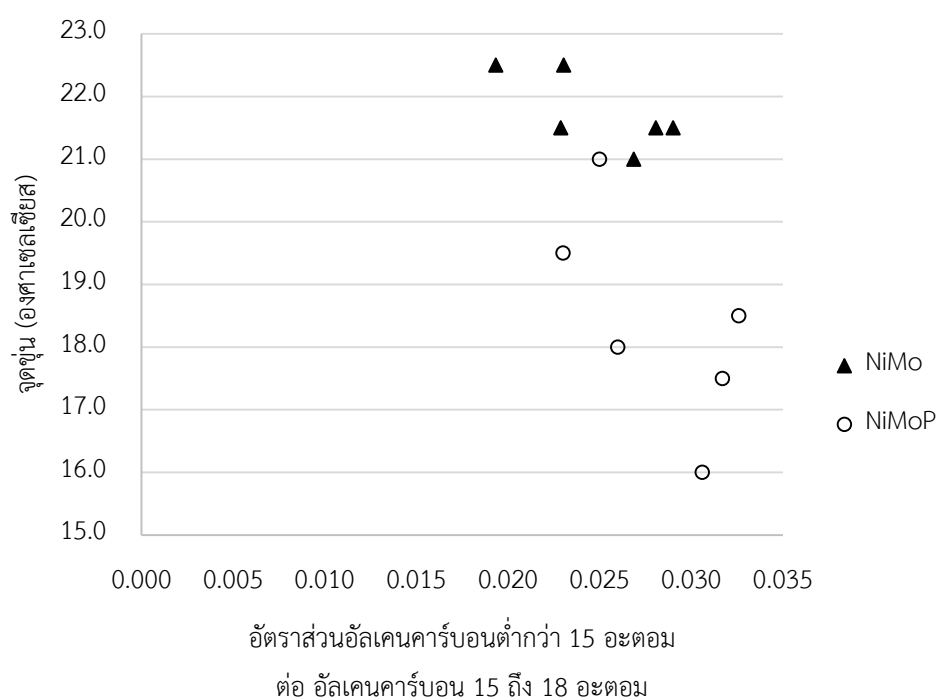
ผลการทดลองดังรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนส่งผลต่อจุดจุดของผลิตภัณฑ์อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่ออัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนสูงขึ้นจุดจุดจะต่ำลง เนื่องจากสารประกอบ

ไอโซอัลเคนจะมีจุดเยือกแข็งต่ำกว่าสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากัน ดังนั้นจุดขุ่นซึ่งสัมพันธ์กับจุดเยือกแข็งในทิศทางเดียวกันจึงต่ำลงด้วยเช่นกัน

4.6.2 ผลของอัตราส่วนสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ต่อสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ต่อจุดขุ่น

อีกหนึ่งปฏิกิริยาที่จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้คือ ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารประกอบอัลเคน การแตกตัวของสารประกอบอัลเคนจากโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็กส่งผลให้จุดเยือกแข็งต่ำลงซึ่งส่งผลให้จุดขุ่นลดต่ำลงด้วยเช่นกัน

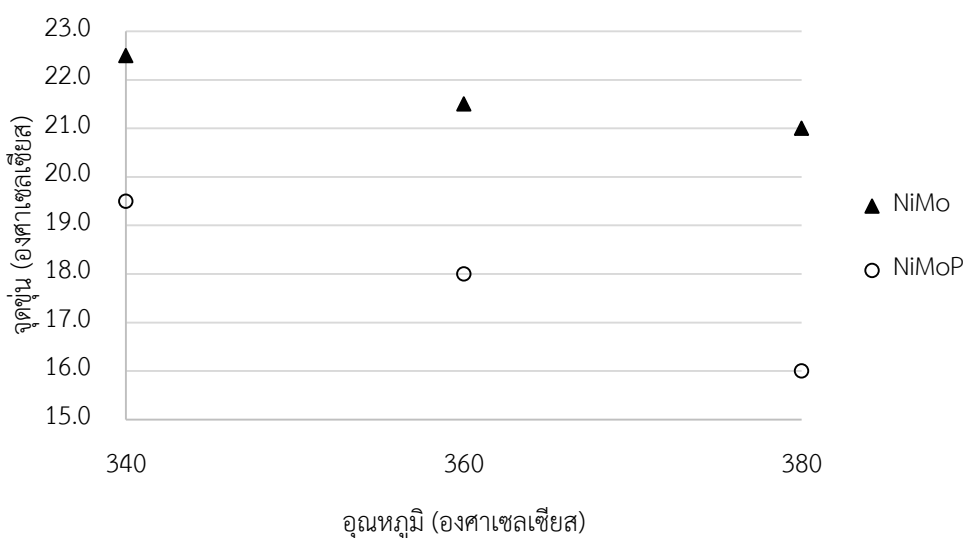
ถึงแม้ว่าปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลสารประกอบอัลเคนจะสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ แต่การเปลี่ยนจำนวนคาร์บอนอะตอมให้ลดลงจะส่งผลต่อคุณภาพน้ำมันดีเซลให้ลดต่ำลง (มีค่าซีเทนที่ลดลง) จึงทำให้เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น



รูปที่ 4.17 ผลของอัตราส่วนสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ต่อสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ต่อ จุดขุ่น อุณหภูมิ 340-380 องศาเซลเซียส ความดัน 450-1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

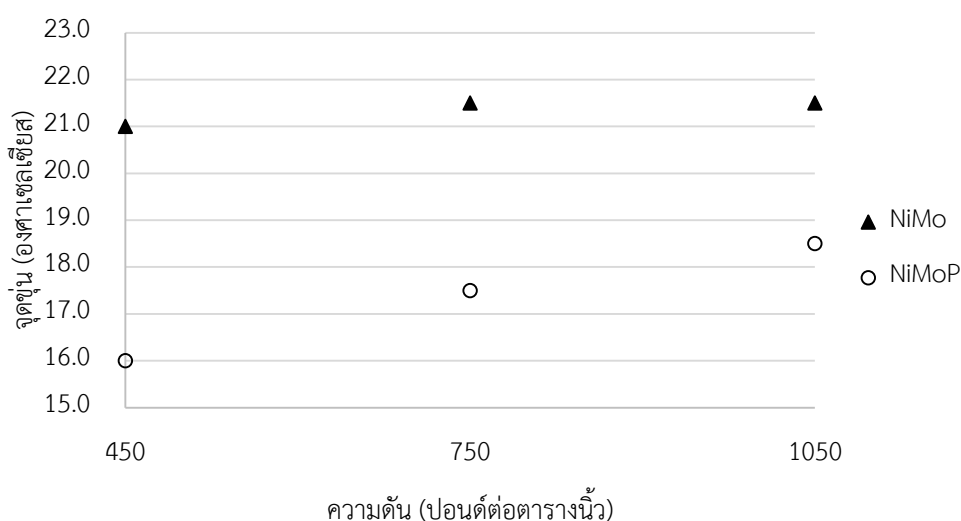
อัตราส่วนสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ต่อสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 แสดงถึงอัตราส่วนสารประกอบอัลเคนที่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว ต่อสารประกอบอัลเคนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว แต่จากผลการทดลองในรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ต่อสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 ไม่ส่งผลกระทบต่อจุดชุนของผลิตภัณฑ์อย่างมีแนวโน้ม เนื่องจากเมื่อเปลี่ยนภาวะในการทดลองอัตราส่วนสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 15 ต่อสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15-18 จะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.6.3 ผลของอุณหภูมิ ความดันและตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อจุดชุน



รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิต่อจุดชุน ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

ผลการทดลองในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจุดชุนจะต่ำลง เนื่องจากการเกิดคาร์บอนเนียมไอออนคือสารอินเทอร์มีเดียทในปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันต้องการพลังงานสูง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิคาร์บอนเนียมไอออนเกิดได้ดีขึ้นจึงทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันเกิดได้ดีขึ้น สามารถพิจารณาได้จากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้อัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.15 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนส่งผลให้จุดชุนลดลงแสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.19 ผลของความดันต่อจุดชุ่น อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 1 ต่อชั่วโมง อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันปาล์มโอเลอิน 500:1 โดยปริมาตร ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

ผลการทดลองในรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อลดความดันส่งผลให้จุดชุ่นลดต่ำลง เนื่องจากปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ละลายในน้ำมันลดลงโอกาสที่คาร์บอนเนียมไอออนไปจับกับแก๊สไฮโดรเจนจึงลดลงด้วย คาร์บอนเนียมไอออนสามารถจับกันเองมากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันเกิดได้ดีพิจารณาได้จากอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.15 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนส่งผลให้จุดชุ่นลดลงแสดงดังรูปที่ 4.16

นอกจากอุณหภูมิและความดันที่ส่งผลกระทบต่อจุดชุ่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อจุดชุ่น รูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าในภาวะการทดลองเดียวกันผลิตภัณฑ์ที่ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสมีจุดชุ่นที่ต่ำกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม สอดคล้องกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสทำให้ผลของอัตราส่วนสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนที่สูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมดังรูปที่ 4.15

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลของอุณหภูมิ ความดันและตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของปาล์มโอเลอินสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ประกอบด้วยหลายปฏิกิริยา ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของไตรกลีเซอไรด์ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของสารประกอบนอร์มอลอัลเคน และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

2. การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของสารประกอบนอร์มอลอัลเคน และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเกิดได้สูงขึ้น และส่งผลต่อเส้นทางการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ อัตราส่วนการเกิดผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันต่อการเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันสูงขึ้น

3. การเพิ่มความดันส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงของสารประกอบนอร์มอลอัลเคนเกิดได้สูงขึ้น แต่ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันเกิดได้ต่ำลง และส่งผลต่อเส้นทางการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดไขมันอิสระ อัตราส่วนการเกิดผ่านปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันต่อการเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันต่ำลง

4. จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสส่งผลให้ร้อยละของสารประกอบอัลเคนใกล้เคียงกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัสส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชันได้ดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

5. การเพิ่มอัตราส่วนของสารประกอบไอโซอัลเคนต่อสารประกอบนอร์มอลอัลเคนในผลิตภัณฑ์ส่งผลให้คุณสมบัติในการใช้ที่อุณหภูมิต่ำดีขึ้น

6. ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส เป็นภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดทั้งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงและปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

รายการอ้างอิง

1. Veriansyah, B., et al., *Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts*. Fuel, 2012. **94**: p. 578-585.
2. Bezergianni, S., et al., *Hydrotreating of waste cooking oil for biodiesel production. Part I: Effect of temperature on product yields and heteroatom removal*. Bioresour Technol, 2010. **101**(17): p. 6651-6.
3. Bezergianni, S., et al., *Hydrotreating of waste cooking oil for biodiesel production. Part II: effect of temperature on hydrocarbon composition*. Bioresour Technol, 2010. **101**(19): p. 7658-60.
4. Guzman, A., et al., *Hydroprocessing of crude palm oil at pilot plant scale*. Catalysis Today, 2010. **156**(1-2): p. 38-43.
5. Kovács, S., et al., *Fuel production by hydrotreating of triglycerides on NiMo/Al₂O₃/F catalyst*. Chemical Engineering Journal, 2011. **176-177**: p. 237-243.
6. Sundaramurthy, V., A.K. Dalai, and J. Adjaye, *The effect of phosphorus on hydrotreating property of NiMo/V-Al₂O₃ nitride catalyst*. Applied Catalysis A: General, 2008. **335**(2): p. 204-210.
7. Şenol, O.İ., T.R. Viljava, and A.O.I. Krause, *Hydrodeoxygenation of aliphatic esters on sulphided NiMo/V-Al₂O₃ and CoMo/V-Al₂O₃ catalyst: The effect of water*. Catalysis Today, 2005. **106**(1-4): p. 186-189.
8. Kubička, D. and L. Kaluža, *Deoxygenation of vegetable oils over sulfided Ni, Mo and NiMo catalysts*. Applied Catalysis A: General, 2010. **372**(2): p. 199-208.
9. ภัทร จิระเศวตกุล, ไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัม. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
10. Tiwari, R., et al., *Hydrotreating and hydrocracking catalysts for processing of waste soya-oil and refinery-oil mixtures*. Catalysis Communications, 2011. **12**(6): p. 559-562.

11. Hancsók, J., et al., *Production of bioparaffins by the catalytic hydrogenation of natural triglycerides*. Journal of Cleaner Production, 2012. **34**: p. 76-81.
12. Chen, N., S. Gong, and E.W. Qian, *Single-step Hydroconversion of Jatropha Oil to High Quality Fuel Oil over Reduced Nickel-Molybdenum Catalysts*. Journal of Japan Petroleum Institute, 2013. **56**: p. 249-252.
13. Kubička, D., et al., *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.
14. ภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์, การไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
15. Krar, M., et al., *Fuel purpose hydrotreating of sunflower oil on CoMo/Al₂O₃ catalyst*. Bioresour Technol, 2010. **101**(23): p. 9287-93.
16. ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว, ไฮโดรต้ออกซิเจนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
17. Yang, Y., et al., *Hydrotreating of C18 fatty acids to hydrocarbons on sulphided NiW/SiO₂-Al₂O₃*. Fuel Processing Technology, 2013. **116**: p. 165-174.
18. Bezergianni, S. and 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.
19. Krár, M., et al., *Bio gas oils with improved low temperature properties*. Fuel Processing Technology, 2011. **92**(5): p. 886-892.
20. Toba, M., et al., *Hydrodeoxygenation of waste vegetable oil over sulfide catalysts*. Catalysis Today, 2011. **164**(1): p. 533-537.
21. Busto, M., et al., *Composite catalysts of Pt/SO₄²⁻-ZrO₂ and Pt/WO₃-ZrO₂ for producing high octane isomerizate by isomerization-cracking of long paraffins*. Fuel Processing Technology, 2012. **104**: p. 128-135.

22. Gong, S., et al., *Isomerization of n-alkanes derived from jatropha oil over bifunctional catalysts*. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 2013. **370**: p. 14-21.
23. Huber, G.W., P. O'Connor, and A. Corma, *Processing biomass in conventional oil refineries: Production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures*. Applied Catalysis A: General, 2007. **329**: p. 120-129.
24. Kwon, K.C., et al., *Catalytic deoxygenation of liquid biomass for hydrocarbon fuels*. Renewable Energy, 2011. **36**(3): p. 907-915.
25. Sankaranarayanan, T.M., et al., *Hydroprocessing of sunflower oil-gas oil blends over sulfided Ni-Mo-Al-zeolite beta composites*. Bioresour Technol, 2011. **102**(22): p. 10717-23.
26. Gong, S., et al., *Hydrotreating of Jatropha Oil over Alumina Based Catalysts*. Energy & Fuels, 2012. **26**(4): p. 2394-2399.
27. Bezergianni, S., A. Kalogianni, and A. Dimitriadis, *Catalyst evaluation for waste cooking oil hydroprocessing*. Fuel, 2012. **93**: p. 638-641.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดินัม
ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดินัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาทีก)	0.500	0.503	0.501	0.501	0.33	0.27
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาทีก)	255.50	255.52	253.51	254.84	0.27	0.52
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	108.17	107.74	107.81	0.33	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.71	95.00	95.53	95.41	0.31	0.43
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	92.19	91.96	92.35	92.17	0.20	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	3.51	3.04	3.18	3.25	8.26	6.31
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	3.27	2.83	2.96	3.02	8.26	6.31
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	45.40	46.83	45.29	45.84	2.17	1.20
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	4.18	4.34	4.14	4.22	2.79	1.83
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	12.75	13.14	12.73	12.87	2.09	1.13
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	7.88	8.15	7.85	7.96	2.38	1.42
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	20.59	21.20	20.57	20.79	2.00	1.04
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	0.81	0.87	0.78	0.82	5.99	5.03
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.018	0.019	0.017	0.018	3.79	3.83
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.350	0.352	0.347	0.350	0.69	0.70
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.405	0.407	0.404	0.405	0.37	0.38
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.498	0.500	0.499	0.13	0.27
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาที)	252.00	253.48	256.50	253.99	0.99	0.79
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.09	107.52	107.38	0.13	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.18	95.02	96.42	95.87	0.57	0.89
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.85	89.87	90.56	90.43	0.47	0.62
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	5.33	5.15	5.86	5.44	7.63	5.49
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	4.96	4.79	5.45	5.06	7.63	5.49
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	64.96	63.37	64.99	64.44	0.86	1.66
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	7.38	7.39	7.44	7.40	0.46	0.35
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	17.20	16.65	17.15	17.00	1.17	2.05
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	13.35	13.20	13.26	13.27	0.61	0.52
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	27.03	26.12	27.15	26.77	1.43	2.42
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.10	1.14	1.08	1.11	2.87	2.54
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.017	0.018	0.017	0.017	4.57	3.40
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.457	0.473	0.462	0.464	1.96	1.52
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.523	0.535	0.517	0.525	1.92	1.53
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ไหลของเหลว (มล/นาทีก)	0.502	0.500	0.501	0.501	0.20	0.20
อัตราการใช้ไหลของแก๊ส (มล/นาทีก)	254.01	251.00	254.51	253.17	0.53	0.86
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.95	107.52	107.74	107.74	0.20	0.20
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	94.99	94.32	94.31	94.54	0.48	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.70	87.95	88.13	88.26	0.50	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.29	6.37	6.18	6.28	1.43	1.58
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	5.85	5.93	5.75	5.84	1.43	1.58
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	79.37	79.06	78.14	78.86	0.65	0.91
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	10.97	10.66	10.57	10.74	2.18	1.50
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	19.03	19.07	18.80	18.97	0.53	0.89
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	19.23	18.82	18.72	18.93	1.62	1.08
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	30.13	30.51	30.04	30.23	0.93	0.61
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.48	1.45	1.45	1.46	1.55	1.06
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.019	0.018	0.018	0.019	0.90	0.74
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.614	0.596	0.600	0.603	1.81	1.21
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.676	0.653	0.660	0.663	1.94	1.46
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.498	0.498	0.500	0.499	0.27	0.13
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาท)	249.50	250.99	252.50	251.00	0.60	0.60
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.09	107.09	107.52	107.23	0.27	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	94.23	94.20	94.61	94.34	0.28	0.16
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	87.84	88.02	88.30	88.05	0.28	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.28	6.06	6.19	6.18	1.61	1.83
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	5.84	5.64	5.76	5.75	1.61	1.83
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	77.72	79.35	79.26	78.78	0.72	1.34
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	12.02	11.93	12.08	12.01	0.57	0.66
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	17.82	18.16	18.16	18.05	0.63	1.24
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	20.59	20.81	20.90	20.77	0.65	0.85
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	27.29	28.45	28.13	27.96	1.76	2.38
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.85	1.74	1.82	1.80	2.57	3.26
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.024	0.022	0.023	0.023	3.93	3.98
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.719	0.700	0.709	0.709	1.35	1.30
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.798	0.774	0.786	0.786	1.54	1.54
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาที)	0.502	0.502	0.500	0.501	0.13	0.27
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาที)	253.01	256.02	257.00	255.34	0.65	0.91
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.95	107.95	107.52	107.81	0.13	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	94.22	94.17	93.99	94.13	0.10	0.14
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	87.94	88.11	87.80	87.95	0.18	0.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.02	5.81	5.94	5.92	1.68	1.91
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	5.60	5.40	5.52	5.51	1.68	1.91
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	78.76	77.64	78.51	78.30	0.59	0.85
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	12.89	12.40	12.42	12.57	2.58	1.36
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	17.66	17.82	18.07	17.85	1.23	1.08
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	21.56	20.65	20.74	20.98	2.73	1.59
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	26.65	26.77	27.28	26.90	1.41	0.92
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.09	2.08	2.12	2.10	0.91	0.66
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.027	0.027	0.027	0.027	0.65	0.84
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.778	0.742	0.733	0.751	3.68	2.44
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.856	0.816	0.805	0.826	3.66	2.53
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดินัม
ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดินัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.502	0.498	0.501	0.500	0.33	0.47
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาท)	256.02	257.96	254.51	256.16	0.70	0.65
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.95	107.09	107.74	107.59	0.33	0.47
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.52	97.91	97.35	97.59	0.33	0.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	92.68	93.05	92.54	92.76	0.32	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.84	4.86	4.80	4.83	0.59	0.62
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	4.50	4.52	4.47	4.497	0.59	0.62
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	47.80	46.66	47.21	47.225	1.21	1.19
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	3.18	3.21	3.22	3.202	0.52	0.82
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	15.12	14.72	14.86	14.899	1.46	1.19
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	5.87	5.73	5.82	5.806	1.11	1.33
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	23.63	23.00	23.32	23.319	1.35	1.35
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	0.87	0.90	0.87	0.880	2.61	1.65
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.018	0.019	0.018	0.019	3.82	2.85
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.224	0.233	0.231	0.229	1.49	2.27
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.263	0.264	0.264	0.264	0.22	0.24
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.501	0.503	0.498	0.501	0.47	0.53
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	255.51	254.52	251.49	253.84	0.66	0.93
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.74	108.17	107.09	107.66	0.47	0.53
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.16	97.11	96.92	97.06	0.10	0.15
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.60	90.73	90.22	90.52	0.24	0.33
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.56	6.38	6.70	6.55	2.27	2.53
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.11	5.94	6.23	6.09	2.27	2.53
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	69.75	70.34	69.73	69.94	0.57	0.30
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	5.55	5.50	5.49	5.51	0.62	0.36
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	21.33	21.60	21.37	21.43	0.76	0.46
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	9.94	9.97	9.91	9.94	0.33	0.32
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	32.93	33.27	32.95	33.05	0.67	0.37
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.22	1.29	1.23	1.25	3.58	2.09
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.017	0.018	0.018	0.018	3.00	1.81
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.277	0.271	0.274	0.274	1.09	1.01
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.320	0.317	0.318	0.318	0.36	0.34
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	6.94	9.87
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

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.499	0.497	0.502	0.499	0.53	0.47
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	257.48	254.96	254.01	255.49	0.78	0.58
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.30	106.87	107.95	107.38	0.53	0.47
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.34	95.47	95.66	95.82	0.54	0.37
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.12	88.17	88.55	88.61	0.57	0.50
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.22	7.30	7.11	7.21	1.25	1.38
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.71	6.79	6.61	6.70	1.25	1.38
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	80.58	78.53	78.32	79.14	1.82	1.04
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	8.65	8.25	8.40	8.43	2.61	2.24
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	21.09	20.77	20.54	20.80	1.41	1.26
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	16.17	15.38	15.60	15.72	2.88	2.11
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	34.67	34.13	33.78	34.19	1.38	1.21
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.61	1.58	1.58	1.59	1.34	0.67
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.38	0.47
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.437	0.423	0.436	0.432	1.19	2.09
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.494	0.477	0.489	0.486	1.48	1.93
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาท)	0.501	0.501	0.505	0.502	0.53	0.27
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาท)	255.51	254.01	255.53	255.02	0.20	0.40
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.74	107.74	108.60	108.02	0.53	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.25	95.37	95.85	95.49	0.38	0.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.15	88.33	88.91	88.46	0.51	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.10	7.04	6.94	7.03	1.04	1.23
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.61	6.55	6.46	6.54	1.04	1.23
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	79.47	78.53	79.43	79.14	0.41	0.78
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	9.93	9.50	9.72	9.72	2.20	2.19
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	19.41	19.25	19.33	19.33	0.41	0.40
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	18.39	17.83	18.27	18.16	1.25	1.83
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	31.74	31.94	32.12	31.93	0.59	0.61
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.94	1.82	1.84	1.86	4.03	2.55
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.024	0.023	0.023	0.024	3.61	1.84
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.545	0.526	0.536	0.536	1.78	1.80
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.613	0.591	0.602	0.602	1.87	1.86
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.503	0.501	0.495	0.500	0.67	0.93
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	254.52	251.50	255.42	253.81	0.63	0.91
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	108.17	107.74	106.44	107.45	0.67	0.93
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	95.06	95.65	94.81	95.17	0.50	0.38
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.27	88.64	88.13	88.35	0.33	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.79	7.01	6.68	6.83	2.67	2.18
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.32	6.52	6.21	6.35	2.67	2.18
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	78.44	78.21	79.18	78.61	0.73	0.51
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	10.83	10.68	10.91	10.81	0.96	1.19
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	18.71	18.77	18.86	18.78	0.42	0.35
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	18.90	18.65	18.96	18.83	0.65	1.00
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	29.99	30.12	30.46	30.19	0.89	0.65
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.16	2.20	2.17	2.18	1.24	0.85
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.028	0.028	0.027	0.028	1.75	1.11
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.617	0.607	0.617	0.614	0.58	1.12
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.667	0.655	0.659	0.660	1.01	0.77
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดินัม

ที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดินัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาท)	0.501	0.504	0.500	0.502	0.47	0.33
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาท)	253.51	258.05	255.00	255.52	0.99	0.79
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.74	108.38	107.52	107.88	0.47	0.33
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	102.44	102.64	102.97	102.68	0.28	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	96.59	96.96	97.15	96.90	0.26	0.32
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	5.85	5.67	5.81	5.78	1.18	1.81
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	5.44	5.28	5.41	5.375	1.18	1.81
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	51.20	53.35	53.15	52.565	1.49	2.60
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	3.23	3.30	3.28	3.268	0.87	1.30
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	16.55	17.10	17.09	16.916	1.09	2.13
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	5.61	5.82	5.81	5.745	1.26	2.36
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	25.81	27.13	26.96	26.636	1.87	3.10
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.142	1.200	1.167	1.170	2.63	2.38
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.022	0.023	0.022	0.022	1.12	1.35
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.208	0.205	0.205	0.206	0.84	0.61
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.230	0.227	0.228	0.228	0.75	0.61
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาที)	0.502	0.505	0.501	0.503	0.46	0.33
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาที)	252.00	256.04	253.01	253.68	0.93	0.66
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.95	108.60	107.74	108.09	0.46	0.33
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	100.95	101.14	101.34	101.14	0.20	0.19
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	93.77	94.14	93.63	93.85	0.31	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.18	6.99	7.71	7.29	5.70	4.10
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.68	6.51	7.17	6.78	5.70	4.10
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	75.54	76.18	76.38	76.03	0.46	0.65
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	5.43	5.33	5.37	5.37	0.95	0.78
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	23.57	23.54	23.78	23.63	0.63	0.39
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	9.61	9.24	9.29	9.38	2.44	1.46
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	36.93	38.06	37.95	37.65	1.10	1.90
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.49	1.42	1.43	1.45	3.02	2.01
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.020	0.019	0.019	0.019	3.69	2.21
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.245	0.242	0.241	0.242	1.20	0.80
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.275	0.257	0.259	0.264	4.38	2.57
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.000	0.000	0.000	0.000	7.89	4.67
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

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.501	0.498	0.500	0.27	0.33
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	251.00	253.51	252.98	252.50	0.40	0.59
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.74	107.09	107.45	0.27	0.33
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.24	96.67	96.86	96.92	0.33	0.26
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.49	88.84	89.22	89.19	0.34	0.39
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.75	7.83	7.64	7.74	1.16	1.28
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	7.21	7.28	7.10	7.20	1.16	1.28
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	80.02	78.19	80.11	79.44	0.84	1.57
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	7.66	7.53	7.78	7.65	1.62	1.64
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	22.45	21.98	22.51	22.31	0.87	1.49
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	13.40	13.13	13.51	13.35	1.24	1.63
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	36.51	35.55	36.31	36.13	1.07	1.58
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.78	1.85	1.86	1.83	1.57	2.71
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.022	0.024	0.023	0.023	2.73	3.43
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.363	0.365	0.368	0.366	0.74	0.60
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.388	0.391	0.394	0.391	0.71	0.66
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาท)	0.501	0.497	0.498	0.499	0.47	0.33
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาท)	252.00	250.99	253.48	252.16	0.53	0.46
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.74	106.87	107.09	107.23	0.47	0.33
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.37	96.59	96.81	96.59	0.23	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.84	89.02	89.30	89.05	0.28	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.53	7.57	7.51	7.54	0.44	0.35
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	7.00	7.04	6.99	7.01	0.44	0.35
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	80.08	78.76	80.17	79.67	0.63	1.15
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	9.42	9.21	9.38	9.34	0.95	1.38
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	20.77	20.51	20.87	20.72	0.73	0.99
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	16.32	15.89	16.27	16.16	0.99	1.65
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	33.56	33.14	33.66	33.45	0.62	0.94
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.91	1.95	2.03	1.96	3.33	2.83
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.024	0.025	0.025	0.025	2.67	3.33
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.484	0.479	0.479	0.480	0.68	0.39
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.515	0.508	0.511	0.511	0.67	0.71
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.496	0.498	0.498	0.40	0.40
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	253.00	255.94	251.49	253.48	0.97	0.78
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	106.66	107.09	107.09	0.40	0.40
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.19	96.07	96.13	96.13	0.06	0.06
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.00	88.67	89.06	88.91	0.17	0.27
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.19	7.40	7.07	7.22	2.53	2.06
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.69	6.89	6.58	6.72	2.53	2.06
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	79.07	78.20	80.01	79.09	1.17	1.13
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	10.28	10.21	10.56	10.35	1.99	1.33
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	19.94	19.86	20.10	19.97	0.66	0.52
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	17.28	16.98	17.65	17.30	1.99	1.87
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	31.56	31.14	31.71	31.47	0.76	1.05
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.34	2.27	2.23	2.28	2.50	2.14
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.030	0.029	0.028	0.029	2.52	3.28
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.550	0.548	0.560	0.553	1.33	0.81
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.580	0.577	0.589	0.582	1.23	0.83
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน 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

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส
ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.500	0.499	0.500	0.07	0.13
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	252.50	256.00	255.99	254.83	0.46	0.91
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.52	107.30	107.45	0.07	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.71	97.41	97.02	97.38	0.34	0.37
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	93.70	93.37	93.04	93.37	0.35	0.36
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.01	4.04	3.99	4.01	0.59	0.62
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	3.73	3.75	3.71	3.73	0.59	0.62
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	42.96	42.10	43.90	42.99	2.11	2.06
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	3.14	2.91	3.25	3.10	4.69	6.06
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	14.13	14.03	14.46	14.21	1.78	1.22
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	4.94	4.75	4.99	4.89	2.01	2.93
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	20.76	20.41	21.20	20.79	1.99	1.83
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.07	1.00	1.04	1.04	3.60	3.93
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.025	0.024	0.024	0.024	3.66	1.91
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.237	0.221	0.239	0.233	2.90	4.87
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.252	0.246	0.249	0.249	1.08	1.11
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.005	0.006	0.007	0.006	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.985	2.897	2.992	2.958	1.15	2.06
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.788	0.789	0.788	0.788	0.08	0.04

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาที)	0.501	0.500	0.501	0.501	0.07	0.13
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาที)	256.51	256.00	259.52	257.34	0.85	0.52
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.74	107.52	107.74	107.66	0.07	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.96	96.47	96.99	96.80	0.19	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.86	90.53	90.76	90.72	0.15	0.20
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.10	5.93	6.23	6.09	2.27	2.53
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	5.68	5.52	5.79	5.66	2.27	2.53
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	69.09	67.03	66.58	67.57	2.26	1.46
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	5.08	5.20	4.76	5.01	3.65	4.99
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	22.30	21.19	21.45	21.65	3.01	2.09
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	8.92	9.00	8.53	8.82	2.09	3.29
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	32.79	31.63	31.84	32.09	2.19	1.42
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.43	1.47	1.50	1.47	2.12	0.16
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.021	0.022	0.022	0.022	3.58	0.91
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.243	0.261	0.237	0.247	5.82	4.15
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.288	0.301	0.283	0.291	3.53	2.55
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.011	0.012	0.011	0.011	5.09	5.44
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.054	2.248	2.024	2.109	6.61	4.02
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.785	0.786	0.784	0.785	0.13	0.13

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.499	0.501	0.500	0.20	0.20
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	257.50	255.49	259.52	257.50	0.78	0.78
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.30	107.74	107.52	0.20	0.20
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.39	96.94	96.96	97.10	0.30	0.16
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.07	88.85	88.73	88.88	0.20	0.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.32	8.08	8.23	8.21	1.38	1.57
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	7.74	7.52	7.65	7.64	1.38	1.57
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	78.06	80.35	78.92	79.11	1.57	1.33
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	8.15	8.15	8.10	8.13	0.22	0.39
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	22.45	23.14	22.82	22.81	1.47	1.55
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	13.44	13.75	13.31	13.50	1.83	1.42
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	34.01	35.31	34.68	34.67	1.85	1.89
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.90	1.87	1.89	1.89	0.74	0.72
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.024	0.023	0.024	0.024	2.07	2.28
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.387	0.375	0.378	0.380	1.73	1.25
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.418	0.412	0.406	0.412	1.50	1.47
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.017	0.017	0.017	0.017	1.39	2.16
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.090	0.094	0.092	0.092	2.17	2.17
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.769	0.770	0.769	0.769	0.09	0.04

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.499	0.501	0.501	0.500	0.13	0.27
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	258.48	261.52	262.02	260.68	0.52	0.84
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.30	107.74	107.74	107.59	0.13	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.85	97.45	97.13	97.15	0.31	0.30
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.97	89.63	89.43	89.34	0.32	0.42
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.88	7.82	7.71	7.80	1.04	1.23
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	7.33	7.27	7.17	7.26	1.04	1.23
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	78.99	80.18	79.42	79.53	0.82	0.68
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	9.71	9.78	9.71	9.73	0.46	0.25
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	21.09	21.21	21.50	21.27	1.12	0.85
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	16.39	16.75	16.04	16.39	2.17	2.14
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	31.80	32.44	32.16	32.14	0.95	1.03
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.25	2.15	2.30	2.23	3.00	3.79
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.028	0.027	0.029	0.028	3.13	4.59
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.491	0.491	0.481	0.488	0.72	1.32
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.545	0.546	0.528	0.540	1.21	2.22
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.040	0.042	0.043	0.041	3.15	4.17
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.088	0.086	0.082	0.085	3.17	3.99
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.768	0.770	0.769	0.17	0.09

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาที)	0.498	0.501	0.499	0.499	0.33	0.27
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาที)	260.45	259.52	263.47	261.15	0.89	0.62
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.09	107.74	107.30	107.38	0.33	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.92	97.21	96.88	97.00	0.21	0.13
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.06	90.13	90.13	90.11	0.03	0.05
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.86	7.08	6.75	6.90	2.67	2.18
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.38	6.59	6.28	6.42	2.67	2.18
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	79.13	78.97	79.62	79.24	0.48	0.34
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	11.10	10.70	11.00	10.93	1.51	2.10
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	20.21	20.51	20.49	20.40	0.53	0.95
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	18.24	17.55	17.96	17.92	1.81	2.03
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	29.58	30.21	30.18	29.99	0.73	1.36
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.78	2.52	2.63	2.64	5.22	4.77
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.035	0.032	0.033	0.033	5.37	4.45
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.586	0.556	0.572	0.571	2.47	2.63
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.653	0.615	0.630	0.632	3.19	2.76
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.076	0.078	0.080	0.078	2.77	2.62
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.087	0.083	0.085	2.76	1.97
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.770	0.769	0.769	0.13	0.13

ภาคผนวก จ

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส
ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.500	0.500	0.499	0.500	0.07	0.13
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาท)	255.00	256.00	258.98	256.66	0.90	0.65
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.52	107.30	107.45	0.07	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.71	97.41	97.02	97.38	0.34	0.37
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	93.70	93.37	93.04	93.37	0.35	0.36
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.01	4.04	3.99	4.01	0.59	0.62
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	3.73	3.75	3.71	3.73	0.59	0.62
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	42.96	42.10	43.90	42.99	2.11	2.06
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	3.14	2.91	3.25	3.10	4.69	6.06
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	14.13	14.03	14.46	14.21	1.78	1.22
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	4.94	4.75	4.99	4.89	2.01	2.93
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	20.76	20.41	21.20	20.79	1.99	1.83
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.07	1.00	1.04	1.04	3.60	3.93
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.025	0.024	0.024	0.024	3.66	1.91
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.237	0.221	0.239	0.233	2.90	4.87
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.252	0.246	0.249	0.249	1.08	1.11
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.005	0.006	0.007	0.006	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.985	2.897	2.992	2.958	1.15	2.06
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.788	0.789	0.788	0.788	0.08	0.04

ตารางที่ จ-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ไหลของเหลว (มล/นาท)	0.501	0.500	0.501	0.501	0.07	0.13
อัตราการใช้ไหลของแก๊ส (มล/นาท)	258.02	256.00	260.52	258.18	0.91	0.84
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.74	107.52	107.74	107.66	0.07	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.96	96.47	96.99	96.80	0.19	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.86	90.53	90.76	90.72	0.15	0.20
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.10	5.93	6.23	6.09	2.27	2.53
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	5.68	5.52	5.79	5.66	2.27	2.53
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	69.09	67.03	66.58	67.57	2.26	1.46
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	5.08	5.20	4.76	5.01	3.65	4.99
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	22.30	21.19	21.45	21.65	3.01	2.09
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	8.92	9.00	8.53	8.82	2.09	3.29
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	32.79	31.63	31.84	32.09	2.19	1.42
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.43	1.47	1.50	1.47	2.12	2.28
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.021	0.022	0.022	0.022	3.58	4.49
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.243	0.261	0.237	0.247	5.82	4.15
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.288	0.301	0.283	0.291	3.53	2.55
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.011	0.012	0.011	0.011	5.09	5.44
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.054	2.248	2.024	2.109	6.61	4.02
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.785	0.786	0.784	0.785	0.13	0.13

ตารางที่ จ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.499	0.501	0.500	0.20	0.20
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	257.50	259.48	262.02	259.67	0.91	0.83
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.30	107.74	107.52	0.20	0.20
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	97.39	96.94	96.96	97.10	0.30	0.16
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	89.07	88.85	88.73	88.88	0.20	0.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.32	8.08	8.23	8.21	1.38	1.57
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	7.74	7.52	7.65	7.64	1.38	1.57
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	78.06	80.35	78.92	79.11	1.57	1.33
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	8.15	8.15	8.10	8.13	0.22	0.39
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	22.45	23.14	22.82	22.81	1.47	1.55
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	13.44	13.75	13.31	13.50	1.83	1.42
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	34.01	35.31	34.68	34.67	1.85	1.89
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.90	1.87	1.89	1.89	0.74	0.72
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.024	0.023	0.024	0.024	2.07	2.28
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.387	0.375	0.378	0.380	1.73	1.25
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.418	0.412	0.406	0.412	1.50	1.47
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.017	0.017	0.017	0.017	1.39	2.16
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.090	0.094	0.092	0.092	2.17	2.17
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.769	0.770	0.769	0.769	0.09	0.04

ตารางที่ จ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ไหลของเหลว (มล/นาที)	0.499	0.501	0.501	0.500	0.13	0.27
อัตราการใช้ไหลของแก๊ส (มล/นาที)	258.48	255.51	260.02	258.00	0.78	0.97
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.30	107.74	107.74	107.59	0.13	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.85	97.45	97.13	97.15	0.31	0.30
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	88.97	89.63	89.43	89.34	0.32	0.42
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.88	7.82	7.71	7.80	1.04	1.23
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	7.33	7.27	7.17	7.26	1.04	1.23
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	78.99	80.18	79.42	79.53	0.82	0.68
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	9.71	9.78	9.71	9.73	0.46	0.25
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	21.09	21.21	21.50	21.27	1.12	0.85
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	16.39	16.75	16.04	16.39	2.17	2.14
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	31.80	32.44	32.16	32.14	0.95	1.03
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.25	2.15	2.30	2.23	3.00	3.79
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.028	0.027	0.029	0.028	3.13	4.59
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.491	0.491	0.481	0.488	0.72	1.32
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.545	0.546	0.528	0.540	1.21	2.22
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.040	0.042	0.043	0.041	3.15	4.17
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.088	0.086	0.082	0.085	3.17	3.99
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.768	0.770	0.769	0.17	0.09

ตารางที่ จ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ไหลของเหลว (มล/นาท)	0.498	0.501	0.499	0.499	0.33	0.27
อัตราการใช้ไหลของแก๊ส (มล/นาท)	252.98	256.51	254.99	254.83	0.66	0.72
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.09	107.74	107.30	107.38	0.33	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	96.92	97.21	96.88	97.00	0.21	0.13
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	90.06	90.13	90.13	90.11	0.03	0.05
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.86	7.08	6.75	6.90	2.67	2.18
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.38	6.59	6.28	6.42	2.67	2.18
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	79.13	78.97	79.62	79.24	0.48	0.34
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	11.10	10.70	11.00	10.93	1.51	2.10
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	20.21	20.51	20.49	20.40	0.53	0.95
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	18.24	17.55	17.96	17.92	1.81	2.03
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	29.58	30.21	30.18	29.99	0.73	1.36
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.78	2.52	2.63	2.64	5.22	4.77
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.035	0.032	0.033	0.033	5.37	4.45
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.586	0.556	0.572	0.571	2.47	2.63
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.653	0.615	0.630	0.632	3.19	2.76
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.076	0.078	0.080	0.078	2.77	2.62
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.087	0.083	0.085	2.76	1.97
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.770	0.769	0.769	0.13	0.13

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดินนัมฟอสฟอรัส

ที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดินนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาทีก)	0.500	0.501	0.501	0.501	0.07	0.13
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาทีก)	255.00	258.02	254.51	255.84	0.85	0.52
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.74	107.74	107.66	0.07	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	101.74	101.44	102.07	101.75	0.31	0.31
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	96.97	97.11	97.13	97.07	0.06	0.10
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.77	4.32	4.94	4.68	5.65	7.60
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	4.44	4.02	4.60	4.35	5.65	7.60
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	46.53	47.59	46.36	46.83	1.64	1.01
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	2.29	2.39	2.47	2.38	3.81	3.97
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	16.39	17.14	16.34	16.62	3.10	1.71
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	3.69	3.69	3.68	3.69	0.21	0.25
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	24.17	24.38	23.87	24.14	0.99	1.11
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.33	1.48	1.41	1.41	5.06	5.38
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.029	0.031	0.030	0.030	3.39	4.76
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.149	0.148	0.161	0.153	5.56	2.90
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.162	0.160	0.163	0.162	0.86	0.77
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.007	0.009	0.008	0.008	0.00	0.00
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	2.801	2.788	2.758	2.782	0.67	0.87
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.785	0.782	0.783	0.783	0.21	0.17

ตารางที่ ฉ-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.500	0.502	0.501	0.27	0.13
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	255.00	259.00	258.53	257.51	0.58	0.97
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.52	107.95	107.66	0.27	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	100.75	100.94	101.14	100.94	0.20	0.19
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	93.93	94.29	93.82	94.01	0.30	0.21
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	6.82	6.65	7.32	6.93	5.70	4.10
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	6.34	6.18	6.81	6.45	5.70	4.10
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	71.66	72.87	71.63	72.05	1.13	0.59
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	4.33	4.28	4.12	4.24	2.00	2.91
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	23.99	24.27	24.21	24.16	0.47	0.69
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	6.97	7.10	6.61	6.89	2.97	4.13
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	36.36	37.22	36.69	36.76	1.25	1.07
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	1.69	1.75	1.81	1.75	3.44	3.34
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.024	0.024	0.025	0.024	4.04	2.82
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.192	0.188	0.181	0.187	2.70	3.13
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.203	0.202	0.191	0.199	2.25	3.95
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.010	0.012	0.010	0.011	8.84	5.15
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	1.621	1.598	1.658	1.626	1.99	1.70
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.779	0.781	0.784	0.781	0.34	0.30

ตารางที่ ฉ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.501	0.500	0.500	0.13	0.07
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	255.00	253.01	256.50	254.84	0.65	0.72
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.52	107.74	107.52	107.59	0.13	0.07
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	102.06	102.20	102.10	102.12	0.08	0.06
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	92.35	92.75	92.50	92.53	0.23	0.20
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	9.71	9.45	9.61	9.59	1.29	1.46
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	9.03	8.79	8.93	8.92	1.29	1.46
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	81.05	79.56	79.76	80.13	1.16	0.70
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	5.53	5.09	5.19	5.27	4.91	3.37
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	25.72	25.64	25.69	25.69	0.13	0.17
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	9.39	8.66	8.75	8.93	5.10	3.07
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	40.41	40.17	40.12	40.24	0.44	0.27
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.22	2.24	2.50	2.32	7.70	4.12
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.027	0.028	0.031	0.029	8.16	5.24
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.229	0.212	0.215	0.219	4.78	3.21
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.246	0.228	0.231	0.235	4.65	2.89
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.017	0.017	0.018	0.017	1.77	1.30
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.090	0.091	0.089	0.090	1.11	1.11
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.770	0.769	0.768	0.769	0.13	0.13

ตารางที่ ฉ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาที)	0.501	0.501	0.501	0.501	0.00	0.00
อัตราการใช้ของแก๊ส (มล/นาที)	253.51	255.51	258.02	255.68	0.91	0.85
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.74	107.74	107.74	107.74	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	100.51	100.78	100.96	100.75	0.21	0.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	92.00	92.23	92.47	92.23	0.26	0.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.51	8.55	8.49	8.52	0.44	0.35
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	7.91	7.96	7.89	7.92	0.44	0.35
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	80.13	80.92	79.25	80.10	1.03	1.06
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	6.84	6.78	6.46	6.70	2.23	3.45
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	24.48	25.03	24.65	24.72	1.23	0.97
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	11.55	11.49	10.93	11.32	2.01	3.49
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	37.25	37.63	37.20	37.36	0.71	0.43
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.45	2.51	2.55	2.50	1.97	2.21
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.031	0.031	0.032	0.031	3.05	2.26
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.298	0.289	0.280	0.289	3.22	3.20
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.328	0.323	0.311	0.321	2.30	3.08
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.037	0.037	0.039	0.038	3.04	1.64
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.084	0.085	0.085	0.085	0.39	0.79
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.768	0.769	0.770	0.769	0.13	0.13

ตารางที่ ฉ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมฟอสฟอรัส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.501	0.500	0.500	0.500	0.13	0.07
อัตราการไหลของแก๊ส (มล/นาที)	260.02	259.00	261.50	260.17	0.51	0.45
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	107.74	107.52	107.52	107.59	0.13	0.07
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	101.01	100.98	100.87	100.95	0.06	0.08
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	92.39	92.09	92.39	92.29	0.11	0.21
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.63	8.88	8.49	8.67	2.53	2.06
ปริมาณน้ำ (ร้อยละผลได้)	8.02	8.26	7.89	8.06	2.53	2.06
ปริมาณอัลเคน C15-18 (ร้อยละผลได้)	79.07	80.10	79.48	79.55	0.69	0.61
ปริมาณอัลเคน C15 (ร้อยละผลได้)	6.96	6.81	6.72	6.83	1.89	1.56
ปริมาณอัลเคน C16 (ร้อยละผลได้)	24.67	24.91	25.11	24.89	0.86	0.92
ปริมาณอัลเคน C17 (ร้อยละผลได้)	11.43	11.61	11.28	11.44	1.50	1.39
ปริมาณอัลเคน C18 (ร้อยละผลได้)	36.02	36.78	36.37	36.39	1.07	1.01
ปริมาณอัลเคน C<15 (ร้อยละผลได้)	2.93	2.81	3.06	2.93	4.30	4.23
อัตราส่วนอัลเคน (C<15)/(C15-18)	0.037	0.035	0.039	0.037	4.37	4.90
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C15/C16	0.301	0.291	0.285	0.292	2.83	2.42
อัตราส่วนอัลเคนโดยโมล C17/C18	0.336	0.334	0.328	0.333	0.91	1.33
อัตราส่วนปริมาณอัลเคน i/n-C	0.067	0.074	0.074	0.072	3.56	6.45
ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก)	0.085	0.083	0.087	0.085	2.35	2.35
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.770	0.768	0.768	0.769	0.17	0.09

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิชญ์สวัสดิ์ แก้วมรกต เกิดเมื่อวันที่ 19 สิงหาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมปลายที่โรงเรียนอัสสัมชัญ สมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ ในปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2554 และได้ศึกษาต่อหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2557

