ผลของปริมาณนิกเกิลและโมลิบดินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

นายกันต์ เจริญเศรษฐศิลป์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Effect of Ni and Mo contents on catalyst on hydrodeoxygenation reaction of palm kernel oil

Mr. Kant Charoensedtasin

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2020
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของปริมาณนิกเกิลและโมลิบดินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม
โดย	นายกันต์ เจริญเศรษฐศิลป์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารวี วาศน์อำนวย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปารวี วาศน์อำนวย)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นริศรา อินทรจันทร์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กันต์ เจริญเศรษฐศิลป์ : ผลของปริมาณนิกเกิลและโมลิบดินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยาต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม. (Effect of Ni and Mo contents on catalyst on hydrodeoxygenation reaction of palm kernel oil) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.ปารวี วาศน์อำนวย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันโดยใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์ม ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่องที่สภาวะอุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมที่มีโลหะต่างกัน 3 ตัว จากผลการวิจัยพบว่าแอลเคนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำเมล็ดในปาล์มเป็นแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมตั้ง 7 ถึง 18 การเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันน้อยลง ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มความดันทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้น้อยลง ผลของเพิ่มปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมของตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้มากขึ้น ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากที่สุด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของโลหะนิกเกิล 3.81 เปอร์เซนต์ และปริมาณของโลหะโมลิบดินัม 8.68 เปอร์เซนต์ ซึ่งสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้มากที่สุดของตัวเร่งปฏิกิริยานี้ คือ ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส และความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี	ลายมือชื่อนิสิต	....
ปีการศึกษา	2563	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....

6170112921 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEYWORD: Hydrodeoxygenation, palm kernel oil, NiMo catalyst, Ni and Mo content

Kant Charoensedtasin : Effect of Ni and Mo contents on catalyst on hydrodeoxygenation reaction of palm kernel oil. Advisor: Paravee Vas-Umnuay

The Objective of this is to study the effect of Ni and Mo content on catalyst on hydrodeoxygenation reaction of palm kernel oil. The reaction was carried out in fix bed reactor at reaction temperature of 300, 320, 340, 360, and 380 °C, pressure of 450, 750, and 1050 psi. The nickel molybdenum catalyst using in this experiment was 3 different metal content nickel molybdenum catalyst. The experimental results showed that the product contains alkane with carbon atoms ranging from 7 - 18 carbon atom. The increasing temperature led to the decreasing of hydrodeoxygenation. In contrast, the increasing pressure enhanced hydrodeoxygenation reaction. The effect of increasing Ni and Mo content on catalyst was the enhancement of hydrodeoxygenation reaction. The optimum catalyst (3.81 %wt of Ni, 8.68 %wt of Mo) performed the best at temperature of 320 °C and pressure of 1050 psi.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study:	Chemical Engineering	Student's Signature ....
Academic Year:	2020	Advisor's Signature ....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.ปารวี วาศน์อำนวย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพธ์ และอาจารย์ ดร.เจิดศักดิ์ ไชยคุนา ที่กรุณาให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานวิจัย และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ระหว่างทำงานวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัยตระหนักถึงความตั้งใจและทุ่มเทของอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตรจารย์ ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช ประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร.พงศ์ธร เจริญศุภนิมิตร กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยทำให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง สำหรับความช่วยเหลือและกำลังใจในการทำงานวิจัยนี้

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนที่ดีตลอดจนจบการศึกษา

กันต์ เจริญเศรษฐศิลป์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

....ค
บทคัดย่อภาษาไทย...ค
....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ....ง
กิตติกรรมประกาศ .... จ
สารบัญ.. ฉ
สารบัญตาราง.. ซ
สารบัญภาพ...ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมา.. 1
1.1.1 สารเปลี่ยนสถานะ (Phase change material) 1
1.1.2 การประยุกต์ใช้ของพาราฟินในรูปแบบอื่นๆ.. 2
1.1.3 น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil) 3
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.. 4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.. 4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าน่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.. 5
2.1 กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง 5
2.2 รายละเอียดของปฏิกิริยาทั้งหมด 5
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง.. 7
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน ... 19

2.5.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน ... 19

2.5.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง ... 19

2.5.3 ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในงานวิจัย ... 19

3.1 ขั้นตอนการทดลอง ... 20

3.2 ขั้นตอนการทำซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา ... 21

3.3 สภาวะในการทดลอง ... 22

3.4 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ... 23

3.5 การวิเคราะห์ ... 23

3.6 การคำนวณค่าต่าง ๆ ในงานวิจัย ... 27

บทที่ 4 ผลการการทดลองและอภิปราย ... 31

4.1 กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง ... 31

4.2 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 ... 34

4.3 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2 ... 53

4.4 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3 ... 69

4.5 ผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมต่างกัน ... 84

บทที่ 5 สรุปผลการการทดลอง ... 90

ภาคผนวก ... 91

ภาคผนวก ก ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 ... 91

ภาคผนวก ข ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2 ... 106

ภาคผนวก ค ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3 ... 121

บรรณานุกรม ... 136

ประวัติผู้เขียน ... 139

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.3.1 สภาวะในการทดลอง 22

ตารางที่ 3.4.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 23

ตารางที่ 3.5.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด 24

ตารางที่ 3.5.2 สภาวะของคอลัมน์ในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของแอลเคน 25

ตารางที่ 3.5.3 สภาวะของคอลัมน์ในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ 26

ตารางที่ 3.5.4 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ ความเข้มข้นที่ใช้ในการหาร้อยละของกรดไขมัน 27

ตารางที่ 4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 32

ตารางที่ 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 1 ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 35

ตารางที่ 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 1 ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 36

ตารางที่ 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 1 ที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 37

ตารางที่ 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 38

ตารางที่ 4.2.5 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 42

ตารางที่ 4.2.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 45

ตารางที่ 4.2.7 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 48

ตารางที่ 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 2 ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 2 ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 54

ตารางที่ 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 2 ที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 55

ตารางที่ 4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 56

ตารางที่ 4.3.5 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 59

ตารางที่ 4.3.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 62

ตารางที่ 4.3.7 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส 65

ตารางที่ 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 3 ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 69

ตารางที่ 4.4.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 3 ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 70

ตารางที่ 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 3 ที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 71

ตารางที่ 4.4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 72

ตารางที่ 4.4.5 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 75

ตารางที่ 4.4.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 78

ตารางที่ 4.4.7 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 80

ตารางที่ 4.5.1 รายละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง 84

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5.2 ผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณโลหะต่างกัน ที่สภาวะความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว 85

ตารางที่ 4.5.3 ผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณโลหะต่างกัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียส 86

ตารางที่ 4.5.4 ผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณโลหะต่างกัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส 87

ตารางที่ 4.5.5 สภาวะที่ดีที่สุดในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมแตกต่างกัน 89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.2.1 ตัวอย่างการเปลี่ยนโครงสร้างสารของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน 7
รูปที่ 2.4.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช 10
รูปที่ 3.1.1 แผนผังของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 20
รูปที่ 4.1.1 โครโมโตแกรมของการวิเคราะห์แอลเคนในวัฏภาคน้ำมัน 33
รูปที่ 4.2.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 40
รูปที่ 4.2.2 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 41
รูปที่ 4.2.3 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 43
รูปที่ 4.2.4 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 43
รูปที่ 4.2.5 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 44
รูปที่ 4.2.6 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณกรดไขมันของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 46
รูปที่ 4.2.7 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 47
รูปที่ 4.2.8 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 49
รูปที่ 4.2.9 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 50
รูปที่ 4.2.10 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 50

รูปที่ 4.2.11 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 51

รูปที่ 4.2.12 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 51

รูปที่ 4.3.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 57

รูปที่ 4.3.2 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 58

รูปที่ 4.3.3 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 60

รูปที่ 4.3.4 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 60

รูปที่ 4.3.5 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 61

รูปที่ 4.3.6 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณกรดไขมันของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 63

รูปที่ 4.3.7 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 .. 64

รูปที่ 4.3.8 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 66

รูปที่ 4.3.9 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 66

รูปที่ 4.3.10 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 67

รูปที่ 4.3.11 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 67

รูปที่ 4.3.12 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2...... 68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.4.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 73

รูปที่ 4.4.2 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 74

รูปที่ 4.4.3 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 76

รูปที่ 4.4.4 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 76

รูปที่ 4.4.5 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 77

รูปที่ 4.4.6 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณกรดไขมันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 79

รูปที่ 4.4.7 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 81

รูปที่ 4.4.8 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 81

รูปที่ 4.4.9 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 82

รูปที่ 4.4.10 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 82

รูปที่ 4.4.11 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมา

ผลิตภัณฑ์และเชื้อเพลิงที่ได้จากปิโตรเลียมเป็นทรัพยากรที่สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันเตา เป็นต้น เนื่องจากทรัพยากรปิโตรเลียมเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด และการผลิตเชื้อเพลิง หรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียมทำให้เกิดมลพิษขึ้นอย่างมากจากกระบวนการผลิต รวมไปถึงในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียมเป็นที่ต้องการอย่างมากในชีวิตประจำวัน ซึ่งการสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติเดียวกันกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมโดยใช้วัตถุดิบที่หาได้ง่ายในประเทศ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการช่วยลดการใช้ทรัพยากรปิโตรเลียม

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียมส่วนมากมีส่วนประกอบของพาราฟิน ดังนั้นการผลิตพาราฟินขึ้นมาโดยไม่ได้ใช้สารตั้งต้นที่มาจากปิโตรเลียมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น นอมอลพาราฟินที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 14 - 20 สามารถนำมาใช้เป็นสารเปลี่ยนสถานะ (Phase change material)

1.1.1 สารเปลี่ยนสถานะ (Phase change material)

สารเปลี่ยนสถานะ เป็นสารที่สามารถดูดหรือคายความร้อนในปริมาณที่มากเพียงพอเพื่อใช้ในการให้ความร้อนและรับความร้อนในขณะที่สารเปลี่ยนสถานะทั้งจากของเหลวเป็นของแข็ง และของแข็งเป็นของเหลว ซึ่งความร้อนที่ดูดหรือคายในระหว่างการเปลี่ยนสถานะ (Latent heat) จะมีค่ามากกว่า ความร้อนดูดหรือคายในระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสาร (Sensible heat) เช่น ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 333.55 จูลต่อกรัม ในขณะที่ค่าความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ของน้ำแข็งมีค่าเท่ากับ 4.18 จูลต่อกรัม ซึ่งค่าความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนถานะของน้ำแข็งมีค่ามากกว่าค่าความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแข็งอยู่มาก เป็นต้น [1]

สารเปลี่ยนสถานะแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งกับของเหลว (Phase change material temperature) ไม่เท่ากัน ซึ่งการนำสารเปลี่ยนสถานะไปใช้งานจะขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่ต้องการนำไปใช้ และอุณหภูมิของสารเปลี่ยนสถานะ โดยสารเปลี่ยนสถานะจะการแบ่งตามชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

1. สารเปลี่ยนสถานะอินทรีย์ (Organic phase change material) เป็นสารเปลี่ยนสถานะที่เป็นสารจำพวกพาราฟิน (C_nH_{2n+2}) หรือไขมัน โดยข้อดีของสารเปลี่ยนสถานะอินทรีย์ คือ

สามารถให้ความเย็นในปริมาณที่เหมาะสม มีความเสถียรทางเคมี ปลอดภัยและไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีชนิดอื่น ในส่วนของข้อเสียของสารเปลี่ยนสถานะอินทรีย์ คือ นำความร้อนได้ไม่ดีในขนณะที่อยู่ในสถานะของแข็ง มีปริมาณของความร้อนของสารเปลี่ยนสถานะน้อย และสามารถติดไฟได้ ซึ่งจะต้องเก็บในอุปกรณ์ที่ทำขึ้นมาเป็นพิเศษสำหรับเก็บสารเปลี่ยนสถานะอินทรีย์

2. สารเปลี่ยนสถานะอนินทรีย์ (Inorganic phase change material) เป็นสารเปลี่ยนสถานะที่อยู่ในรูปของเกลือไฮเดรต ($M_xN_yH_2O$) ซึ่งข้อดีของสารเปลี่ยนสถานะที่ชนิดนี้ คือ เป็นสารที่มีความร้อนในการเปลี่ยนสถานะสูง ทำให้สามารถกักเก็บหรือคายความร้อนได้ในปริมาณมาก ราคาถูก มีอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะที่ชัดเจน และไม่ติดไฟ ในส่วนของข้อเสียของสารเปลี่ยนสถานอนินทรีย์ คือ สารสามารถเกิดการละลายที่ควบคุมไม่ได้และเกิดการแยกวัฏภาคขึ้น ทำให้เสียปริมาณที่สามารถกักเก็บไว้ได้ และเป็นสารที่กัดกร่อนต่อวัสดุชนิดอื่นๆ
3. สารเปลี่ยนสถานะดูดความชื้น (Hygroscopic material) เป็นสารเปลี่ยนสถานะที่สามารถดูดความชื้น (น้ำควบแน่น) และปล่อยน้ำออกจากสาร (น้ำในสารระเหยออกไป) โดยเมื่อเกิดการควบแน่นของน้ำขึ้น สารเปลี่ยนสถานะจะปล่อยความร้อนออกมา และเมื่อเกิดการระเหยของน้ำ สารเปลี่ยนสถานะจะดูดความร้อนเข้าไปในสารเปลี่ยนสาถนะ กระบวนการการทำงานของสารเปลี่ยนสถานะชนิดนี้ มีพลังงานที่อยู่ในกระบวนการในปริมาณน้อย ดังนั้นการใช้งานของสารเปลี่ยนสถานะในชนิดนี้ต้องมีพื้นผิวในปริมาณมาก เช่น การใช้งานในการให้ความร้อน หรือลดความร้อนของตึก เป็นต้น
4. สารเปลี่ยนสถานะของแข็ง-ของแข็ง (Solid-Solid phase change material) เป็นสารเปลี่ยนสถานะที่เป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างของแข็งที่มีโครงสร้างรูปแบบหนึ่งไปเป็นโครงสร้างอีกรูปแบบหนึ่ง โดยสารเปลี่ยนสถานะชนิดนี้จะให้ความร้อนหรือดูดความร้อนได้ดีกว่า สารเปลี่ยนสถานะแบบของแข็ง-ของเหลว และข้อดีของสารเปลี่ยนสถานะชนิดนี้ คือ ไม่ต้องจัดการกับของเหลวที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ

1.1.2 การประยุกต์ใช้ของพาราฟินในรูปแบบอื่นๆ

พาราฟินเป็นสารประกอบไฮโดรคาบอนประเภทแอลเคน ซึ่งมีการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมการเกษตร ในด้านของการใช้งานของพาราฟินในลักษณะของการใช้เป็นเชื้อเพลิง สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของเครื่องบินเจ็ต จรวด และใช้เป็นส่วนประกอบของน้ำมันชนิดต่างๆ โดยรายละเอียดของพาราฟินในช่วงต่างๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยนอมอลพาราฟินที่มีจำนวนคาร์บอน 12 เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเครื่องบินเจ็ต (jet fuel) และยังสามารถนำมาใช้เป็นสารเจือจาง (diluent) ของสารไตรบิวทิวฟอสเฟตในกระบวนแปรรูปเชื้อเพลิงใช้แล้ว (reprocessing plant) นอมอลพาราฟินคาร์บอนตั้งแต่

10 – 16 ยังเป็นส่วนประกอบของน้ำมันก๊าด (kerosene) นอมอลพาราฟินคาร์บอน 5 – 10 เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเบนซิน (gasoline) และ นอมอลพาราฟินคาร์บอน 14 – 20 เป็นองค์ประกอบของน้ำมันดีเซลได้ [2] , [3]

1.1.3 น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil)

น้ำมันเมล็ดในปาล์ม เป็นน้ำมันที่สามารถสกัดได้จากเมล็ดในของปาล์ม โดยน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันมะพร้าว ซึ่งน้ำมันมะพร้าวเป็นน้ำมันที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากกว่าที่จะใช้ในการบริโภค และมีปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อการต้องการ ดังนั้นน้ำมันเมล็ดในปาล์มจึงเป็นสามารถนำไปใช้แทนน้ำมันมะพร้าวได้ โดยทั่วไปน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นน้ำมันที่นำไปใช้ในลักษณะเดียวกันกับน้ำมันมะพร้าว คือ นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ เช่น การนำไปใช้ผลิตครีมเทียม เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสากรรมที่ไม่ใช่อุตสาหกรรมอาหารได้ด้วยเช่นกัน เช่น อุตสาหกรรมการทำสบู่ เป็นต้น และการนำไปใช้ในครัวเรือน โดยน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่นำไปใช้ในครัวเรือน และอุตสาหกรรมอาหารจะต้องมีการนำน้ำมันเมล็ดในปาล์มดิบไปทำการกลั่นเพื่อเพิ่มความบริสุทธิ์ของน้ำมันปาล์มก่อนการนำไปใช้

กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง (Hydrotreating) เดิมทีเป็นกระบวนการที่ใช้ในกำจัดสารเจือปนในน้ำมันดิบ เช่น ไนโตรเจน กำมะถัน ออกซิเจน เป็นต้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันดิบ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตน โดยแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน

จากการศึกษางานวิจัยของ Panuwich Charoenwong [4] ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียริน และกรดไขมันปาล์ม พบว่าการทำปฏิกิริยาของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สไฮโดรเจนกับสารตั้งต้นโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณของกรดไขมันมากขึ้นในผลิตภัณฑ์แต่ ไม่พบสารประกอบแอลเคนและน้ำในผลิตภัณฑ์ ในส่วนของการทำปฏิกิริยาโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาสเซลเซียส พบว่ามีปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจิเนชันเกิดขึ้น จึงมีสารแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่และน้ำเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีคาบอนิเลชันเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากมีแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคี่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ด้วย ซึ่งปริมาณของแอลเคนที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณมากขึ้น เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ และลดความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์

จากการศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถใช้สำหรับผลิตแอลเคนมีหลายชนิด โดยจากงานวิจัยของ Bambang et.al [5] พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น

(conversion) มากที่สุด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินา นอกจากนี้ช่วงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 270 - 330 องศาสเซลเซียส

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันพืชบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาสมในการทำปฏิกิริยาสำหรับการผลิตพาราฟิน โดยน้ำมันพืชที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มซึ่งเป็นน้ำมันที่หาได้ง่าย และราคาถูก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยจะมีปริมาณของโลหะนิกเกิล และโมลิบดินัมที่ไม่เท่ากันเพื่อศึกษาหาผลของปริมาณโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตขึ้นมา ซึ่งไม่เคยมีใครศึกษาในเรื่องนี้มาก่อน โดยสภาวะที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำที่สภาวะอุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาสเซลเซียส ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าความเร็วเชิงสเปซที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณโลหะนิกเกิล และโมลิบดินัมในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม อุณหภูมิ และความดันของการทำปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น และค่าร้อยละผลที่ได้ของสารประกอบแอลเคน โดยมีน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะซัลไฟด์ชนิดนิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณของโลหะนิกเกิล และโมลิบดินัมที่แตกต่างกัน 3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

1.3.2 ทำการทดลองโดยใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้น

1.3.3 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส

1.3.4 ทำการทดลองที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าน่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถอธิบายผลกระทบของปริมาณโลหะนิกเกิล และโมลิบดินัมของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

1.4.2 สามารถอธิบายถึงผลกระทบและสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจิเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม

1.4.3 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยไปพัฒนาปฏิกิริยาดีออกซีจิเนชัน เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตพาราฟินจากน้ำมันพืชต่อไป

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการที่ใช้ในการผลิตพาราฟิน จากน้ำมันที่มาจากพืชซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันเป็นส่วนมาก โดยปฏิกิริยาที่เกิดส่วนมากจะเป็นปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหนึ่งในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง ซึ่งเดิมทีกระบวนไฮโดรทรีตติ้งเป็นกระบวนการสำหรับเพิ่มความบริสุทธิ์ของน้ำมันมปิโตรเลียม โดยการกำจัดสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมันดิบออกไป ดังนั้นการผลิตพาราฟินจากน้ำมันเป็นกระบวนการที่เป็นการประยุกต์จากการใช้ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งสำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำมันปิโตรเลียม เป็นการใช้ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งเพื่อทำการสร้างสารใหม่ขึ้นมาแทน โดนปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชจะเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดออกซิเจนออกจากสาร เนื่องจากในน้ำมันพืชจะมีองค์ประกอบของออกซิเจนอยู่ในปริมาณมาก

2.1 กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง

กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งเป็นกระบวนการสำหรับกำจัดสารปนเปื้อนที่ติดมากับน้ำมันปิโตรเลียม โดยน้ำมันดิบที่มาจากที่ต่าง ๆ ก็จะมีปริมาณของสารปนเปื้อนไม่เท่ากับอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปน้ำมันดิบในส่วนเบาจะมีสารปนเปื้อนเพียงไม่กี่ชนิด และมีในปริมาณที่น้อย ในส่วนของน้ำมันดิบส่วนหนักจะมีสารปนเปื้อนที่มากกว่า และมีความซับซ้อนของโครงสร้างและการทำปฏิกิริยามากกว่าในน้ำมันดิบส่วนเบา สารปนเปื้อนที่สามารถพบเจอได้ในน้ำมันดิบ ได้แก่ กำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน และโลหะ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปิโตรเลียมต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและมีการเติมแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ขึ้นโดยปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นประกอบด้วยปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (Hydrodesulfurization) ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation) ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation) ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลไรเซชัน (Hydrodemetallization) และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) นอกจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นข้างต้นแล้ว ยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงอื่น ๆ ที่สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ดังนี้ ปฏิกิริยาดีคาบอกซิเลชัน (Decarboxylation) ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชัน (Decarbonylation) ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง (Hydrocracking) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) [6]

2.2 รายละเอียดของปฏิกิริยาทั้งหมด

2.2.1. ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน (Hydrodesulfurization) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดกำมะถันในน้ำมันดิบออกไป โดยกำมะถันจะถูกกำจัดออกไปจากน้ำมันดิบในรูปแบบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยตัวอย่างสมการเคมีเป็นไปดังสมการที่ (2.1)

$$R\text{-}SH + H_2 \rightarrow RH + H_2S \tag{2.1}$$

2.2.2. ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำมันดิบออก โดยไนโตรเจนจะถูกกำจัดออกจากน้ำมันดิบในรูปของแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) โดยตัวอย่างสมการเคมีเป็นไปดังสมการที่ (2.2)

$$C_5H_5N + 5H_2 \rightarrow C_5H_{12} + NH_3 \tag{2.2}$$

2.2.3. ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation, HDO) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับการกำจัดออกซิเจนออกจากน้ำมันดิบ การกำจัดออกซิเจนจะกำจัดในรูปของน้ำ (H_2O) โดยตัวอย่างสมการเคมีเป็นไปดังสมการที่ (2.3)

$$C_6H_5OH + H_2 \rightarrow C_6H_6 + H_2O \tag{2.3}$$

2.2.4. ปฏิกิริยาดีเมทัลไรเซชัน (Demetallization) เป็นปฏิกิริยาการกำจัดโลหะออกจากน้ำมันดิบ ซึ่งตัวอย่างสมการเคมีเป็นไปดังสมการเคมีที่ (2.4)

$$R\text{-metal} + H_2 + \text{catalyst} \rightarrow \text{Catalyst-metal} + RH \tag{2.4}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.5. ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เป็นปฏิกิริยาสำหรับการทำให้สารโอเลฟิน และอะโรมาติกที่อยู่ในน้ำมันดิบอิ่มตัวสำหรับการนำไปทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ต่อไป ซึ่งตัวอย่างสมการเคมีเป็นไปดังสมการที่ (2.5) และ (2.6)

Saturation of olefin : $$C_5H_{10} + H_2 \rightarrow C_5H_{12} \tag{2.5}$$

Saturation of aromatic : $$C_6H_6 + 3H_2 \rightarrow C_6H_{12} \tag{2.6}$$

2.2.6. ปฏิกิริยาไฮโดรแคร๊กกิ้ง (Hydrocracking) เป็นปฏิกิริยาที่สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลสายโซ่ยาวถูกตัดออกทำให้เกิดสารไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่สั้นลง ตัวอย่างสมการเคมีเป็นไปดังสมการที่ (2.7)

$$C_{10}H_{22} + H_2 \rightarrow C_4H_{10} + C_6H_{14} \quad (2.7)$$

2.2.7. ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation, DCO_2) เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยไม่ใช้แก๊สไฮโดรเจน เป็นปฏิกิริยาที่เป็นการกำจัดออกซิเจนออกจากกรดอินทรีย์ในรูปของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีจำนวนของคาร์บอนอะตอมลดลง 1 ตัว โดยตัวอย่างสมการเคมีเป็นไปดังสมการที่ (2.8)

$$R\text{-}CH_2\text{-}COOH \rightarrow R\text{-}CH_3 + CO_2 \quad (2.8)$$

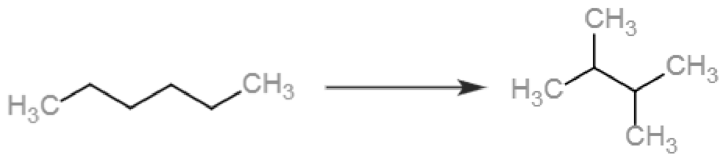
2.2.8. ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation, DCO) เป็นปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นพร้อมกับทุกปฏิกิริยา ในการเกิดปฏิกิริยากรดอินทรีย์จะรวมตัวกับไฮโดรเจน และเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ น้ำ และผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอมลดลง 1 ตัว ซึ่งตัวอย่างปฏิกิริยาเป็นไปดังสมการที่ (2.9)

$$R\text{-}CH_2\text{-}COOH + H_2 \rightarrow R\text{-}CH_3 + CO + H_2O \quad (2.9)$$

2.2.9. ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนโครงสร้างของสารตั้งต้นเป็นรูปแบบอื่น โดนมีจำนวนอะตอมของธาตุต่าง ๆ ในปริมาณเท่าเดิม ตัวอย่างปฏิกิริยาเป็นไปดังสมการที่ (2.10) และรูปที่ 2.2.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$n\text{-}C_6H_{14} \rightarrow iso\text{-}C_6H_{14} \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.2.1 ตัวอย่างการเปลี่ยนโครงสร้างสารของปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน

2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง

ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งต้องมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโลหะทรานซิชันเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตน โดยตัวเร่ง

ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งจะผลิตโดยการเคลือบโลหะทรานซิชันข้างต้นบนตัวรองรับอะลูมินา ตัวเร่งปฏิกิริยาของไฮโดรทรีตติ้งส่วนมากจะอยู่ในรูปของออกไซด์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งจะสามารถทำงานได้อย่างประสิทธิภาพเมื่ออยู่ในรูปของซัลไฟด์ [7] ดังนั้นก่อนที่จะใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งต้องทำการซัลไฟด์ก่อนเสมอ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และยืดอายุของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาการทำซัลไฟด์ของโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นไปดังสมการเคมีที่ (2.11) - (2.14)

$$MoO_3 + 2H_2S + H_2 \rightarrow MoS_2 + 3H_2O \tag{2.11}$$

$$Co_8O_9 + 8H_2S + H_2 \rightarrow 8CoS + 9H_2O \tag{2.12}$$

$$NiO_2 + H_2S + H_2 \rightarrow NiS + H_2O \tag{2.13}$$

$$WO_3 + 2H_2S + H_2 \rightarrow WS_2 + 3H_2O \tag{2.14}$$

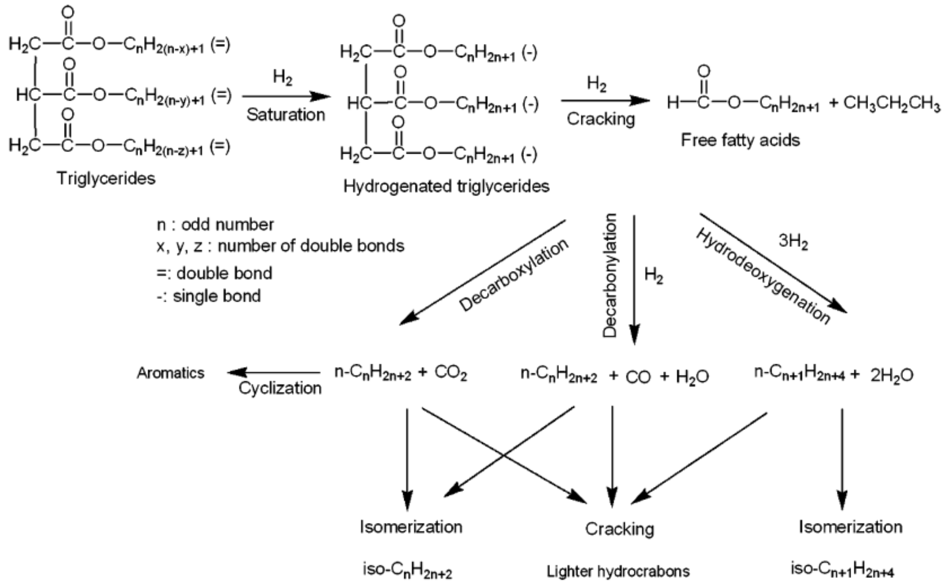
ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ จะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ ของไฮโดรทรีตติ้งที่ไม่เท่ากัน ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัมจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอไรเซชัน ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตนจะเหมาะสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของโอเลฟินและวงอะโรมาติก

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

[8] David Kubica, Ludek Kaluza (2010) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชันของน้ำมันเมล็ดเรพซึ่งมีองค์ประกอบของน้ำมันส่วนมากเป็นกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 18 เพื่อใช้ผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิกเกิล โมลิบดินัม และนิกเกิลโมลิบดินัม ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่สภาวะ 260 - 280 องศาเซลเซียส ความดัน 3.5 เมกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.25 - 4 ต่อชั่วโมง โดยจากการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความสามารถมากที่สุดจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตามด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมและตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมจะมีผลิตภัณฑ์ส่วนมากมาจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลจะให้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็นผลผลิตของปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มาจากทั้งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันและดีคาร์บอกซิเลชัน ที่ให้ผลที่ได้ของไฮโดรคาร์บอนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะชนิดเดียว นอกจากนี้ผลของการปรับสัดส่วนระหว่างโลหะนิกเกิลต่อผลรวมของโลหะนิกเกิลกับโมลิบดินัมที่มีค่าตั้งแต่ 0.2 - 0.4 ต่อค่าของความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาและการเลือกเกิดของผลิตภัณฑ์ไม่มีผลอย่างเป็นนัยสำคัญ

[5] Bambang et.al (2012) ทำการศึกษาผลตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับการผลิตดีเซลทดแทน สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำมันถั่วเหลืองและไฮโดรเจน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความดัน 9.2 เมกะปาสคาล ในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินา ช่วงอุณหภูมิ 100 - 130 องศาสเซลเซียส เป็นช่วงที่แก๊สไฮโดรเจนมีความดันลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไตรกลีเซอไรด์ไม่อิ่มตัวให้กลายเป็นไตรกลีเซอไรด์อิ่มตัว ต่อมามีการลดลงของแก๊สไฮโดรเจนอีกครั้งในช่วงอุณหภูมิ 270 - 330 องศาเซลเซียส ในช่วงนี้เป็นเกิดการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์เป็นสารโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ จากนั้นจึงเกิดการสร้างแอลเคนจากกรดไขมันอิสระจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชัน เนื่องจากมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์เกิดขึ้นด้วยในระบบจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชัน จึงเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงนอกเหนือจากปฏิกิริยาข้างต้นอีกได้แก่ ปฏิกิริยาเมทาเนชันของคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนออกไซด์ และปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นแก๊ส (Water gas shift) โดยสรุปปฏิกิริยาทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบจะเป็นไปดังรูปที่ 2.4.1 และสมการเคมีที่ (2.15) - (2.17) นอกจากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินา ยังมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวอื่นๆ และทำการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น โดยเมื่อเรียงลำดับค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นของแต่ละตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ลำดับดังนี้ คือ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนตัวรองรับแกมม่าอะลูมินาที่ถูกซัลไฟด์ > ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียมบนตัวรองรับแกมม่าอะลูมินา > ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัมบนตัวรองรับแกมม่าอะลูมินาที่ถูกซัลไฟด์ > ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินา > ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลททินัมบนตัวรองรับแกมม่าอะลูมินา > ตัวเร่งปฏิกิริยารูทีเนียมบนตัวรองรับอะลูมินา

CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.4.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

Methanation of CO_2 : $CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$ (2.15)

Methanation of CO : $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$ (2.16)

Water-gas shift : $H2 + CO2 \leftrightarrow CO + H_2O$ (2.17)

[9] Rashmi Tiwari et.al (2010) ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งสำหรับสารผสมระหว่างน้ำมันถั่วเหลืองใช้แล้วกับน้ำมันกลั่น โดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ได้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตนบนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินา ในการทดลองทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 340 – 380 องศาสเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 และ 4 ต่อชั่วโมง และมีอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อสายป้อนเท่ากับ 1500 มิลลิลิตรของแก๊สไฮโดรเจนต่อมิลลิตรของของเหลวสายป้อน ซึ่งจากผลการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินามีสามารถในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งได้ต่ำและปฏิกิริยาที่เกิดส่วนมากเป็นปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน จึงให้ผลิตภัณฑ์ในช่วงที่มีคาร์บอน 15 - 18 ตัวได้มาก ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตนบนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินาจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีคาร์บอนิเลชันมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม

[4] Panuwich Charoenwong (2010) ทำการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันโอเลอิน ปาล์มสเตียริน และกรดไขมันปาล์ม โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งใช้สภาวะในการทดลองที่อุณหภูมิ 200 250 300 และ 350 องศาสเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 1 และ 1.5 ต่อชั่วโมง ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิหรือลดความเร็วเชิงสเปซของของเหลวจะทำให้เกิดแอลเคนและน้ำมากขึ้น นอกจากนี้ที่สภาวะในการทดลองเดียวกัน สารตั้งต้นทั้ง 3 ชนิด จะให้ปริมาณสัดส่วนของแอลเคนที่เกิดขึ้นไม่เท่ากัน และเมื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาพบว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรดที่สูงกว่าสารตั้งต้น ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดแต่ปฏิกิริยาการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมัน แต่ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันไม่เกิดขึ้น จึงทำให้ยังมีกรดไขมันเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ในส่วนของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรดที่ลดลงอย่างมาก และมีค่าปริมาณของแอลเคน และน้ำเพิ่มขึ้น

[10] Patara Jirasavetakul (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิกเกิลโมลิบดินัม และโคบอลต์โมลิบดินัม โดยการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง ซึ่งสภาวะในการทดลองจะทำที่อุณหภูมิ 200 250 300 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 0.5 1 และ 1.5 ต่อชั่วโมง โดยทำที่ความดันคงที่ที่ 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยจากผลการศึกษาเกี่ยวจากการปรับอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์พบว่า ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่พบสารประกอบประเภทแอลเคนและน้ำ แต่มีปริมาณกรดไขมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็นผลที่แสดงให้เห็นถึงการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์กลายเป็นกรดไขมัน ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส มีการพบแอลเคนในผลิตภัณฑ์โดยพบทั้งแอลเคนคาร์บอนเลขคู่ และเลขคี่ ซึ่งหมายถึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีแนชัน ดีคาร์บอกซิเลชัน และดีคาร์บอนิเลชันเกิดขึ้น และที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส มีการเกิดปฏิกิริยาเหมือนกับที่ 250 องศาเซลเซียส โดยมีการเกิดปฏิกิริยาทั้ง 3 ปฏิกิริยาที่มากขึ้นด้วยเนื่องจากมีปริมาณของแอลเคนเกิดมากขึ้นในผลิตภัณฑ์ ในส่วนของความเร็วเชิงสเปซของของเหลว จะส่งผลโดยถ้าเพิ่มความเร็วเชิงสเปซของของเหลว จะส่งผลให้ปฏิกิริยาทั้งหมดเกิดลดลง และเมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม และโคบอลต์โมลิบดินัม พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าโคบอลต์โมลิบดินัมในทุกสภาวะการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[11] Sudakhara Reddy Yenumala et.al (2019) ได้ทำการศึกษาการผลิตกรีนดีเซลจากน้ำมันคารันจา (Karanja oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณโลหะนิกเกิล และปริมาณโลหะโมลิบดินัม ซึ่งปริมาณโลหะรวมในตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมจะคงที่ที่ 4.3 มิลลิโมล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองจะทำการปรับปริมาณโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเพิ่มโลหะโมลิบดินัมขึ้นเริ่มจาก 1.7 มิลลิโมลของโมลิบดินัม และลดปริมาณของโลหะนิกเกิลลง ปฏิกิริยาทั้งหมดจะเกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่สภาวะความดัน 30 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 280 300 320 340 และ 360 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำมันคารันจาเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอนเท่ากับ 18 ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเป็นแอลเคนที่มีคาร์บอนเท่ากับ 18 โดยเมื่อทำการปรับเปลี่ยนปริมาณของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมจะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของออกซิเจนเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเลือกเกิดของแอลเคนที่มีคาร์บอนเท่ากับ 17 ลดลง ในการทดลองตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองได้ทำการปรับปริมาณของโลหะโมลิบดินัมตั้งแต่ 0 0.9 1.7 2.6 3.4 และ 3.9 มิลลิโมล ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณโลหะนิกเกิล และโลหะโมลิบดินัมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันสำหรับน้ำมันคารันจา คือ ตัวเร่งปฏิกิริยามีโลหะนิกเกิล 0.9 มิลลิโมล และโลหะโมลิบดินัม 3.4 มิลลิโมล

[12] Mariam Ameen et.al (2019) ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันของน้ำมันเมล็ดยาง (Rubber seed oil) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอนจำนวน 16 และ 18 ตัว โดยมีค่าเท่ากับ 39 และ 55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์เป็นท่อแบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง ในสภาวะอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 3.5 เมกะปาสคาล ของแก๊สไฮโดรเจน (20 เปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจนในแก๊สไนโตรเจน) ค่าความเร็วเชิงสเปซของน้ำหนักเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง และมีอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันเท่ากับ 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีการศึกษาผลของปริมาณโลหะในตังเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดเดียว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล และตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินา ในการทดลองนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะใช้การกระตุ้นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้การซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะทำการกระตุ้นโดยการรีดิวซ์ตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากการซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดสารปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยผลจากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทุกตัวสามารถทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นได้สูงถึง 99.9 เปอร์เซ็นต์ ในการทดลองของการปรับเปลี่ยนปริมาณของโลหะนิกเกิล ค่าผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโลหะมากขึ้น เช่นเดียวกันกับการปรับเปลี่ยนปริมาณโลหะโมลิบดินัม โดยร้อยละของผลที่ได้ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาให้ค่าร้อยละของผลที่ได้ 55.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และร้อยละของผลที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินาให้ค่าร้อยละของผลที่ได้มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัว

รองรับอะลูมินา โดยมีค่าเท่ากับ 61.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นคาร์บอนจำนวน 15 และคาร์บอนจำนวน 17 เป็นส่วนมาก ซึ่งสามารถระบุได้ว่าปฏิกิริยาจะเกิดเป็นปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชันในปริมาณมาก และการเพิ่มปริมาณของโลหะนิกเกิลในตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ค่าการเลือกเกิดของคาร์บอนจำนวน 15 ต่อคาร์บอนจำนวน 17 มีค่าน้อยลง นอกจากนี้ผลของการเพิ่มปริมาณโลหะนิกเกิลจะทำให้ปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และอัตราส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ต่อแก๊สมีเทนลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มโลหะนิกเกิลจะส่งผลสำคัญต่อปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิส และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไตรกลีเซอไรด์ ในกรณีของตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินา เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของโลหะโมลิบดินัมจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากขึ้น ทำให้เกิดแอลเคนที่เป็นผลิตภัณฑ์สูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา แต่จะมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนมากกว่า และเกิดโค้กขึ้นบนตัวเร่งปฏิกิริยามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินา

[13] Booyawan Yoosuk et.al (2019) ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันของกรดโอเลอิก และกรดปาล์มิติก โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซัลไฟด์นิกเกิลโมลิบดินัม และโคบอลต์โมลิบดินัมที่ไม่มีตัวรองรับ ซึ่งในการทดลองจะทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง (Parr reactor) และมีการปรับตัวแปรต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปร สภาวะที่ใช้ในการทดลองที่อุณหภูมิ 250 - 320 องศาเซลเซียส ในความดันแก๊สไฮโดนเจน 20 - 80 บาร์ เมื่อใช้สารตั้งต้นเป็นกรดโอเลอิก และอุณหภูมิ 300 - 360 องศาเซลเซียส ในความแก๊สไฮโดรเจน 30 - 90 บาร์ เมื่อใช้สารตั้งต้นเป็นกรดปาล์มิติก นอกจากนี้ยังมีการปรับอัตราส่วนระหว่างโลหะนิกเกิลหรือโลหะโคบอลต์ต่อผลรวมของโลหะนิกเกิลหรือโคบอลต์กับโมลิบดินัม อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองนี้จะมีค่าตั้งแต่ 0.1 - 1 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 4 ชั่วโมง การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเตรียมโดยการใช้สารแอมโมเนียมเตเตระไธโอโมลิบดินัมผสมกับนิกเกิลไนเตรตเฮกซะไฮเดรตหรือโคบอลต์ไนเตรตเฮกซะไฮเดรตให้ได้ตามอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง ในส่วนของแหล่งของกำมะถันที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาจะมาจากคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่เติมเพิ่มเข้าไป และนำเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ความดันสูง ซึ่งจากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกรดโอเลอิกจะอยู่ที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส ในความดัน 60 บาร์แก๊สไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมมีอัตราส่วนของโลหะนิกเกิลต่อปริมาณรวมของโลหะนิกเกิลกับโมลิบดินัมอยู่ที่ 0.2 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ให้ค่าร้อยละการเลือกมากที่สุด (78.8%) และมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมจะให้ประสิทธิภาพมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัม ในกรณีของสภาวะที่เหมาสมของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกรดปาล์มิติกจะอยู่ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ใน

ความดัน 70 บาร์แก๊สไฮโดรเจน และตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมจะเหมือนกับการที่สารตั้งต้นเป็นกรดโอเลอิก โดยอยู่ที่ 0.2 และให้ค่าร้อยละการเลือกเกิดมากที่สุด (78.5%) เช่นเดียวกัน

[14] Salwa A. El et.al (2018) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันรำข้าวดิบ ซึ่งเป็นน้ำมันที่กินไม่ได้ โดยในการศึกษาจะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยในการทดลองจะทำที่สภาวะอุณหภูมิ 350 - 450 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 - 5 ต่อชั่วโมง ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 1 - 5 เมกะปาสคาล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่ถูกซัลไฟด์ ผลกระทบของความดันของแก๊สไฮโดรเจนศึกษาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากับ 5 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนไฮโดรเจนต่อน้ำมันเท่ากับ 1600 ลิตรต่อลิตร พบว่าถ้าหากเพิ่มความของแก๊สไฮโดรเจนขึ้น จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเสียทำสูญเสียปริมาณของผลิตภัณฑ์ไป โดยจะสามารถเห็นได้ชัดที่ความดัน 5 เมกะปาสคาลมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สถึง 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับที่ 1 เมกะปาสคาล และ 2.5 เมกะปาสคาลที่มีปริมาณแก๊สที่เป็นผลิตภัณฑ์เพียง 0.8 และ 3.4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งที่ความดันเท่ากับ 2.5 เมกะปาสคาล เป็นความดันที่ดีที่สุดในการทำปฏิกิรยาเนื่องจากให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สในปริมาณน้อยและมีร้อยละของผลที่ได้ในปริมาณที่สูง ในส่วนของผลกระทบของอุณหภูมิศึกษาที่สภาวะความดัน 2.5 เมกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 5 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนแก๊สไฮโตรเจนต่อน้ำมันเท่ากับ 1600 ลิตรต่อลิตร พบว่าที่อุณหภุมิ 350 องศาเซลเซียสมีค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นที่ต่ำกว่า อุณหภูมิ 400 กับ 450 องศาเซลเซียสอย่างมาก เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่อุณหภูมิต่ำจึงเกิดได้ดีกว่า และที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งได้ดีสำหรับน้ำมันรำข้าวดิบ โดยสังเกตได้จากค่าร้อยละของผลที่ได้ของเชื้อเพลิงชีวภาพที่เป็นของเหลวมีปริมาณมาก และมีค่าการเลือกเกิดที่สูง ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซต่อผลิตภัณฑ์ ที่สภาวะความดัน 2.5 เมกะปาสคาล อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนแก๊สไอโดรเจนต่อน้ำมันเป็น 1600 ลิตรต่อลิตร พบว่าที่ความเร็วเชิงสเปซ 2.5 - 5 ต่อชั่วโมง ไม่พบความแตกต่างของปริมาณแก๊ส น้ำ และน้ำมัน แต่ที่ความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง แก๊สที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้นอย่างมาก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการสลายตัว และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมากขึ้นอย่างมากด้วย ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันขึ้น ดังนั้นที่ความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง จะให้ค่าของผลิตภัณฑ์ในส่วนของน้ำมันเบนซินมากที่สุด (40%) และที่ความเร็วเชิงสเปซเท่ากับ 5 ต่อชั่วโมงจะให้ปริมาณของน้ำมันเชื้อเพลิงหนักมากที่สุด (70%) เมื่อพิจารณาผลกระทบทั้งหมดแล้ว สามารถสรุปได้ว่าการใช้น้ำมันรำข้าวดิบสำหรับปฏิกิริไฮโดรทรีตติ้งจะให้เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีคุณภาพดีที่สุดที่สภาวะ 450 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เท่ากับ 5 ต่อชั่วโมง ในความดันแก๊สไฮโดรเจน 2.5 เมกะปาสคาล ซึ่งผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติคล้ายกับเชื้อเพลิงที่ได้มาจากปิโตรเลียม

[15] Vorranutch Itthibenchapong et.al (2016) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เพื่อผลิตน้ำมันที่มีลักษณะคล้ายน้ำมันเครื่องบินเจ็ต โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมซัลไฟด์บนตัวรองรับแกมม่าอะลูมินา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สังเคราะห์ขึ้น และได้ทำการใส่สารอินทรีย์ไธโอยูเรียลงไปในการสังเคราะห์ ทำให้เกิดตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดินัมที่อยู่ในรูปซัลไฟด์แล้ว ในการทดลองจะใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มและทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 270 - 330 องศาเซลเซียส ความดัน 30 - 50 บาร์ไฮโดรเจน ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 - 5 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยในการทดลองจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ทุกครั้งเพื่อลดผลของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Deactivation of catalyst) ผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้มากที่ความดันของแก๊สไฮโดรเจนสูง และอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีค่าน้อย (สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลานาน) ในส่วนของปฏิกิริยาข้างเคียงดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชันจะเกิดมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง และมีเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย (ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมาก) นอกจากนี้ยังมีปฏิกิริยาข้างเคียงได้แก่ปฏิกิริยาแคร๊กกิ้ง และปฏิกิริยาเมทาเนชันจะเกิดมากขึ้นที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส จากการศึกษาผลทั้งหมดพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ และความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง โดยให้ร้อยละของผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์ประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนอะตอม 10 - 12 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะคล้ายน้ำมันเครื่องบินเจ็ตอยู่ร้อยละ 58 เปอร์เซ็นต์

[16] Pavel Simacek et.al (2009) ได้ทำการศึกษากระบวนการไฮโดรของน้ำมันเมล็ดเรพสำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่อยู่ในช่วงของน้ำมันดีเซล โดยในการทดลองจะมีสภาวะของการทดลองอยู่ที่อุณหภูมิ 260 - 340 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 7 เมกะปาสคาล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหล โดยมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมทั้งหมด 3 ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ต่างกันที่ปริมาณของโลหะนิกเกิล และโมลิบดินัม โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการทำปฏิกิริยาจะเป็นแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอม 17 และ 18 โดยพบทั้งนอมอลแอลเคน และไอโซแอลเคน จากการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิต่ำผลิตภัณฑ์จะพบกรดไขมันอิสระ และไตรกลีเซอไรด์ แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 310 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ของเหลวจะพบแต่ไฮโดรคาร์บอนที่เหมือนกับที่อยู่ในน้ำมันดีเซล และไม่พบสาร

ตั้งต้น หรือสารมัธยันต์เหลือในผลิตภัณฑ์ และจากการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าทั้ง 3 ตัวเร่งปฏิกิริยาให้แนวโน้มของปริมาณแอลเคนผลิตภัณฑ์ไปในทิศทางเดียวกัน

[17] Mahesh R. Nimkarade, Prakash D. Vaidya (2016) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตน้ำมันพืชที่ถูกไฮโดรทรีตจากน้ำมันคารันจา บนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัม โดยในการทดลองปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งจะทำที่อุณหภูมิ 300 - 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1.5 - 3.5 เมกะปาสคาล อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 400 - 600 ปริมาตรต่อปริมาตร และความเร็วเชิงสเปซของน้ำหนัก 1.1 - 5 ต่อชั่วโมง บนตัวเร่งปฏิกิริยาซัลไฟด์นิกเกิลโมลิบดินัม และซัลไฟด์โคบอลต์โมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินา ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นพาราฟินหลักที่มีคาร์บอนอะตอม 15 - 18 อะตอม และผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้น ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็ก น้ำ โพรเพน มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์กับคาบอนมอนออกไซด์ โดยผลของการเพิ่มความดันส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นในทุกค่าอุณหภูมิเช่นเดียวกับผลของอุณหภูมิต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นที่เพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน แต่ผลของการเพิ่มความดันจะส่งผลในทิศทางตรงข้ามกับค่าผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์ โดยเมื่อทำการเพิ่มความดันของไฮโดรเจนจะช่วยส่งเสริมการเกิดของผลิตภัณฑ์เบามากขึ้น นอกจากนี้ผลของความเร็วเชิงสเปซของน้ำหนัก เมื่อเพิ่มความเร็วเชิงสเปซของน้ำหนักขึ้นจะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นลดลง แต่เพิ่มค่าร้อยละของผลที่ได้เพิ่มขึ้น ในส่วนของผลจากการปรับอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน เมื่อเพิ่มอัตราส่วนขึ้นจะทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น แต่ลดค่าผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์ลง โดยค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น และค่าผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมมีค่ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัมทุกสภาวะการทดลอง โดยสรุปสภาวะการทดลองที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นมากที่สุด (90.5 %) เป็นสภาวะที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นนิกเกิลโมลิบดินัม

[18] Atthapon Srifa et.al. (2014) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตน้ำมันดีเซลไบโอไฮโดรจีเนตด้วยการไฮโดรทรีตติ้งน้ำมันปาล์มบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมซัลไฟด์บนตัวรองรับแกมม่าอะลูมินา ซึ่งศึกษาโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องแบบเบดนิ่ง โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 270 - 420 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 15 - 80 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.25 - 5 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันที่สัดส่วน 250 - 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ส่งผลต่อค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น ค่าผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์ และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชัน โดยผลจากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมกับการทำปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มให้เป็นน้ำมันดีเซลไบโอ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ไฮโดรจีเนตอยู่ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 30 - 50 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 - 2 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันอยู่ที่ 700 - 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยให้ค่าผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์มีค่า 90 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณของนอมอลแอลเคนมากกว่า 95.5 เปอร์เซนต์ โดยเมื่อเพิ่มความดันขึ้น จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเพิ่มมากขึ้น ในส่วนของอุณหภูมิจะส่งผลอย่างมากกับการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ (ไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ดีคาร์บอกซิเลชัน ดีคาร์บอนิเลชัน แคร๊กกิ้ง และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน)

[19] David Kubicka and Jan Horacek (2011) ศึกษาการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันของน้ำมันพืช โดยการใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมันเมล็ดเรพที่อยู่ในลักษณะที่แตกต่างกัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นโคบอลต์โมลิบดินัมบนตัวรองรับแกมม่าอะลูมินา โดยในน้ำมันเมล็ดเรพต่าง ๆ จะมีปริมาณของสารปนเปื้อนที่ไม่เป็นสารอินทรีย์ น้ำ กรดไขมันอิสระ และฟอสโฟลิปิดที่แตกต่างกันออกไป โดยการทำปฏิกิริยาจะทำที่สภาวะคงที่ที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของน้ำหนักเท่ากับ 2 ต่อชั่วโมง และความดัน 3.5 เมกะปาสคาลของแก๊สไฮโดรเจน จากผลการศึกษาพบว่าการที่ในสารตั้งต้นมีโลหะแอลคาไลน์อยู่จะทำให้การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีโลหะแอลคาไลน์ไปเคลือบอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเป็นพิษหรือการบังพื้นที่ทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้การมีฟอสโฟลิปิดก็ทำให้ค่อย ๆ เกิดการเสื่อมสภาพเช่นเดียวกันกับโลหะแอลคาไลน์ และถึงแม้จะไม่มีการเคลือบผิวของโลหะแอลคาไลน์หรือฟอสโฟลิปิดก็ยังเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจากการเคลือบผิวของสารจำพวกคาร์บอน ในส่วนของการมีกำมะถันอยู่ในสารตั้งต้นโดยการเติมไดเมทิลไดซัลไฟด์ลงไปในสารตั้งต้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ในขณะที่การไม่เติมไดเมทิลไดซัลไฟด์ลงไปในสารตั้งต้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาค่อย ๆ เสื่อมสภาพลง ดังนั้นการเติมไดเมทิลไดซัลไฟด์ลงไปในสารตั้งต้นทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความเสถียรมากขึ้นด้วย

[20] Rohit Kumar et.al (2010) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนกับน้ำมันสบู่ดำ (Jatropha) ที่ผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิง (Gas oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซัลไฟด์นิกเกิลทังสเตนบนตัวรองรับซิลิกา-อะลูมินา และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินา การทำปฏิกิริยาจะศึกษาที่อุณหภูมิ 340 - 380 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 และ 2 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อสายป้อนเท่ากับ 1500 มิลลิลิตรแก๊สไฮโดรเจนต่อมิลลิลิตรของของเหลวสายป้อน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ออกได้จากการทำปฏิกิริยาที่สนใจจะเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการขนส่ง ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคาร์บอนอะตอม 15 - 18 (ช่วงของเชื้อเพลิงดีเซล) ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมให้ผลที่ได้ของ

ผลิตภัณฑ์มากที่สุดอยู่ที่ 97.9 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตนจะให้ผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์อยู่ที่ 80.8 เปอร์เซ็นต์ และการทำปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัมจะให้ผลที่ต่ำที่สุดอยู่ที่ 49.2 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้อัตราส่วนของไอโซเมอต่อนอมอลพาราฟินมีค่าต่ำสำหรับทั้ง 3 ตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ค่าอัตราส่วนผลิตภัณฑ์ไอโซเมอต่อนอมอลพาราฟินของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตนมีค่ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมประมาณ 22 - 36 เท่า ในส่วนของเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันสบู่ดำ จะสามารถเกิดได้ดีบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัม ในขณะที่การเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน จะสามารถเกิดได้ดีบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตน

[21] Shaofeng Gong et.al (2012) ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันสบู่ดำบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอะลูมินาเป็นพื้นฐาน โดยจะทำการศึกษาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลททินัมแพลเลเดียมบนตัวรองรับอะลูมินา และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมฟอสเฟตบนตัวรองรับอะลูมินา โดยสภาวะที่ใช้ในการทดลองอยู่ที่ 330 - 390 องศาเซลเซียส ความดัน 3 เมกะปาสคาล และความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมงในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยทั้ง 3 ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ค่าผลที่ได้ของผลิตภัณฑ์ประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าของความหนาแน่น ความหนืด และเลขซีเทนที่สูง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถใช้เป็นสารแต่งเติมสำหรับน้ำมันดีเซลได้ และจากผลการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้มีปริมาณของไนโตรเจนกำมะถัน กรดอินทรีย์ และปริมาณของไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวในปริมาณน้อย และผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแพลททินัมแพลเลเดียมใช้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนน้อยกว่า โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเป็นปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและดีคาร์บอนิเลชัน ในส่วนของตัวเร่งนิกเกิลโมลิบดินัมจะเกิดปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันขึ้นเป็นส่วนมาก ในส่วนของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซัลไฟด์จะเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปแบบของออกไซด์

[22] Narongwut Jaokaenkaew (2011) ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 - 380 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 31 - 72 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากับ 1 ต่อชั่วโมง โดยจากการทดลองพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดได้ดีขึ้น และเมื่ออุณหภูมิสูงถึงค่าหนึ่งจะทำให้เกิดสารประกอบที่มีขนาดเล็กในปริมาณมากขึ้น เนื่องจากเกิดการสลายตัวขึ้น และผลกระทบของความดันพบว่า เมื่อเพิ่มความดันขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดียิ่งขึ้น

2.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน

2.5.1 สารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องการทำปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน สารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันมีการศึกษากับน้ำมันชนิดและกรดไขมันชนิดต่าง ๆ มากมาย เช่น น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันลูกยาง น้ำมันเมล็ดสบู่ดำ กรดโอเลอิก กรดปาล์มิติก เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นพบว่า การศึกษาปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันโดยใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นสารตั้งต้นนั้น มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับน้ำมันเมล็ดในปาล์มในจำนวนน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจในการศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน โดยใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์ม

2.5.2 สภาวะที่ใช้ในการทดลอง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของปฏิกิริยายดีออกซิจีเนชันของน้ำมันพืชมีการใช้เครื่องปฏิกิรณ์ส่วนมากที่ใช้ในการทดลองจะเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลต่อเนื่อง และมีช่วงในการศึกษาอุณหภูมิของปฏิกิริยาตั้งแต่ 200 - 450 องศาเซลเซียส ที่มีความดันในช่วง 1 - 9 เมกะปาสคาล และค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีค่าตั้งแต่ 0.25 - 5 ต่อชั่วโมง

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิรยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

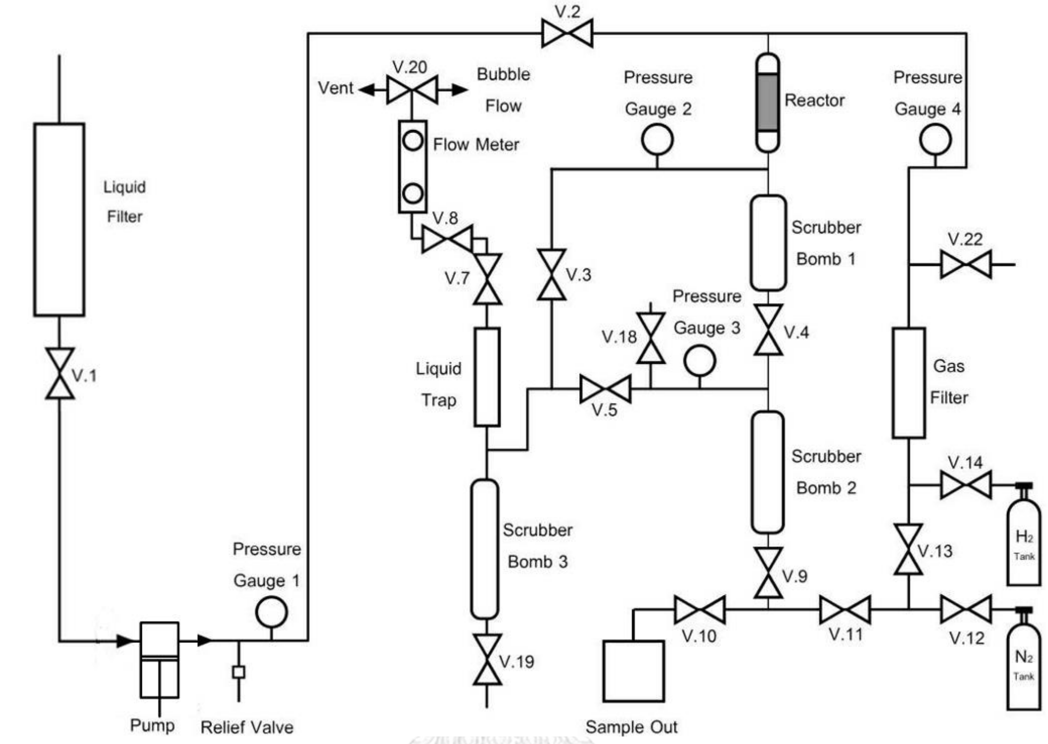
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมีด้วยกันหลากหลายชนิด ทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในกลุ่มของโลหะมีตระกูล (Noble metal) เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลททินัม ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลเลเดียม เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของปิโตรเลียม ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทังสเตน

2.5.3 ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในงานวิจัย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นปฏิกิริยาหลักที่สนใจนั้นจะ ได้แก่ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน โดยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทั้งหมดนั้นจากงานวิจัยส่วนมากจะทำการศึกษา โดยการปรับค่าสภาวะในการทดลอง และศึกษาการเกิดปฏิกิริยาจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง โดยถ้าหากในผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ในปริมาณมาก จะแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงมาก (ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน) โดยปฏิกิริยาทั้ง 2 ปฏิกิริยาจะมีสมการเคมีในลักษณะเดียวกันกับสมการเคมีที่ใช้ในในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปิโตรเลียม ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8) ในทางตรงกันข้ามถ้าหากผลิตภัณฑ์มีปริมาณของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ในปริมาณมาก จะแสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้นในปริมาณมาก และสมการเคมีของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันก็มีลักษะเดียวกันกับสมการเคมีของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปิโตรเลียมเช่นกัน

บทที่ 3
การทดลอง

3.1 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.1.1 แผนผังของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องที่มีแผนผังดังรูปที่ 3.1.1 โดยการป้อนน้ำมันเข้าเครื่องปฏิกรณ์จะถูกป้อนโดนผ่านตัวกรองของเหลวเพื่อกันฝุ่นละอองเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ จากนั้นน้ำมันจะผ่านวาล์วตัวที่ 1 ก่อนจะเข้าไปยังปั้มและเกจวัดความดันตัวที่ 1 จากนั้นน้ำมันจึงผ่านวาล์วตัวที่ 2 และเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ที่เป็นท่อสแตนเลส ในส่วนของแก๊สไฮโดนเจนที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะถูกป้อนโดยผ่านวาล์วตัวที่ 14 และเกจวัดความดันตัวที่ 4 ก่อนเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์ ในกรณีที่มีการป้อนไนโจนเจนเข้าสู่ระบบ แก๊สในโตรเจนจะถูกป้อนผ่านทางวาล์วตัวที่ 12 และ 13 และผ่านเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์

น้ำมันและแก๊สที่ผ่านตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์จะได้ออกมาเป็นเป็นผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะถูกส่งไปยังถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 1 และผ่านวาล์วตัวที่ 4 ก่อนจะถูกส่งไปยังถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 ในส่วนของแก๊สที่ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกส่งออกจากระบบ 2 ทางโดยทางแรกแก๊สจะผ่านเกจวัดความดันตัวที่ 2 และวาล์วตัวที่ 3 ทางที่ 2 แก๊สจะถูกส่งผ่านเกจวัดความดันตัวที่ 3 และวาล์วตัวที่ 5 ซึ่งแก๊สทั้ง 2 ทางจะรวมกันและผ่านไปยังวาล์วตัวที่ 7

และ 8 ซึ่งเป็นวาล์วตัวที่ 8 เป็นวาล์วที่ใช้ในการปรับอัตราการไหลของแก๊สก่อนจะผ่านตัววัดอัตราการไหลของแก๊สแบบฟอง และแก๊สจะออกจากระบบทางวาล์วตัวที่ 20

การเก็บตัวอย่างจะทำการเก็บตัวอย่างโดยการแยกระบบของถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 โดยการปิดวาล์วตัวที่ 4 และตัวที่ 5 ซึ่งในระหว่างเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกเก็บในถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 1 แทน หลังจากทำการแยกระบบแล้วจึงค่อยๆ เปิดวาล์วตัวที่ 9 และ 10 เพื่อทำการเก็บตัวอย่างของเหลวออกจากระบบ โดยหลังจากที่เก็บตัวอย่างเรียบร้อยแล้วจะต้องทำการปรับความดันของถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 โดยการใส่แก๊สไนโตรเจนไปในระบบโดยการปิดวาล์ตัวที่ 10 และเปิดวาล์วตัวที่ 12 และ 11 เพื่อให้ถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 มีความดันเท่ากับความดันในเครื่องปฏิกรณ์ โดยสังเกตจากเกจวัดความดันตัวที่ 3 เมื่อความดันมีค่าเท่ากับความดันในถังปฏิกรณ์แล้วจึงทำการปิดวาล์วตัวที่ 12 และ 11 เพื่อปิดแก๊สไนโตรเจน จากนั้นจึงเปิดวาล์วตัวที่ 4 และ 5 เพื่อปรับให้ระบบกลับไปเป็นดังเดิม

ก่อนการทดลองจะต้องมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการไล่ความชื้นก่อนที่จะนำไปยังใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ โดยปริมาตรของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จะเป็น 30 มิลลิลิตร โดยใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมดลงตรงกลางเครื่องปฏิกรณ์ที่มีความยาว 47 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/2 นิ้ว และมีความหนา 0.089 เซนติเมตร โดยเครื่องปฏิกรณ์จะถูกครอบด้วยเหล็กฮีตเตอร์ขนาด 2000 วัตต์ และฉนวนใยเซรามิกกันความร้อน ซึ่งการวัดอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะวัดด้วยกัน 4 จุด คือ ส่วนบน ส่วนกลาง ส่วนล่าง และจุดศูนย์กลางภายของเครื่องปฏิกรณ์ หลังจากประกอบเครื่องปฏิกรณ์เรียบร้อยแล้ว จะทำการตรวจสอบการรั่วของแก๊สโดยการปล่อยให้ความดันของแก๊สไนโตรเจนค้างในระบบเพื่อสังเกตการรั่วซึมของเครื่องปฏิกรณ์

ก่อนที่จะทำการซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเสริมประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องทำการไล่ความชื้นอีกครั้งโดยการให้ความร้อนจากฮีตเตอร์ด้วยการเพิ่มอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนระบบเพิ่มขึ้นเป็น 150 องศาเซลเซียส ภายใต้การป้อนแก๊สไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 1.5 ชั่วโมง โดยแก๊สไนโตรเจนจะถูกป้อนเข้ามาผ่านทางวาล์วตัวที่ 12 และ 13 จากนั้นจึงผ่านเกจวัดความดันตัวที่ 4 และเข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์

หลังจากทำการไล่ความชื้นด้วยไนโตรเจนเรียบร้อย จะทำการเปลี่ยนการป้อนแก๊สเป็นไฮโดรเจนแทนแก๊สไนโตรเจน จากนั้นจึงป้อนสำหรับการทำการซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม โดยสารที่ใช้สำหรับการซัลไฟด์เป็นการผสมกันระหว่างเฮปเทนกับไดเมทิลไดซัลไฟด์ โดยมีปริมาณของไดเมทิลไดซัลไฟด์เป็น 1 %โดยน้ำหนัก

3.2 ขั้นตอนการทำซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.2.1. ป้อนสารที่ผสมไว้เข้าไปยังเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.2. หลังจากเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง จะทำการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาสเซลเซียส ทุก 10 นาที เป็นเวลา 7 ชั่วโมง จนได้อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส และป้อนสารอย่างต่อเนื่องอีกเป็นเวลา 7 ชั่วโมง

3.2.3. หลังจากเวลาผ่านไป 7 ชั่วโมง จะทำการเพิ่มอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ทุก 10 นาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส และป้อนสารทิ้งไว้อีก 5 ชั่วโมง จึงเป็นการเสร็จการทำซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3 สภาวะในการทดลอง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสภาวะการทดลองที่ใช้ในงานวิจัยเป็นไปดังตารางที่ 3.3.1

ตารางที่ 3.3.1 สภาวะในการทดลอง

สภาวะในการทดลอง	
ตัวเร่งปฏิกิริยา	นิกเกิลโมลิบดินัม
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	300, 320, 340, 360, 380
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	450, 750, 1050
ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ต่อชั่วโมง)	1
อัตราส่วน แก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน (โดยปริมาตร)	500 : 1
ปริมาตรเบดที่บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิลิตร)	30
สารตั้งต้น	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.4 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.4.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสาร	เกรด/ความบริสุทธ์
Hydrogen	industial
Nitrogen	99.99%
Phenolpthalein	Analyical grade
Sodium Hydroxide	Analyical grade
Heptane	Analyical grade
Dimethyl disulfide (DMDS)	Industial
Palm kernel oil	Food grade
Nickel Molybdenum	Commercial

3.5 การวิเคราะห์

การวิเคราะห์จะมีส่วนต่างๆ หลายส่วนโดยก่อนการทำการทดลองจะต้องทำการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำไปใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ ในส่วนของการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะมีการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของสารประกอบแอลเคนในผลิตภัณฑ์ ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์ ร้อยละของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ และปริมาณร้อยละของน้ำที่เป็นผลิตภัณฑ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิครังสีเอ็กซ์ (XRF) เพื่อหาธาตุองค์ประกอบตัวเร่งปฏิกิริยา และนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคบีอีที (BET) เพื่อหาพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นไปดังตารางที่ 3.5.1

ตารางที่ 3.5.1 ผลการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งหมด

องค์ประกอบธาตุ (%)	ตัวเร่งปฏิกิริยา 1	ตัวเร่งปฏิกิริยา 2	ตัวเร่งปฏิกิริยา 3
Na	0.03	0.04	-
MgO	0.05	-	-
Al_2O_3	84.18	80.94	64.56
SiO_2	1.10	0.90	1.51
SO_3	-	-	0.22
P_2O_5	-	-	6.29
Cl	0.05	0.06	0.09
K	0.01	0.02	-
Ca	0.03	0.05	0.01
Ti	-	-	0.04
NiO	3.64	4.84	6.52
Ga	0.01	-	-
Nb	0.03	0.04	0.16
MoO_3	10.82	13.02	19.26
Rh	0.04	0.09	0.18
Eu	-	-	0.02
Au	0.01	0.01	-
Ru	-	-	0.85
CoO	-	-	0.19
ZnO	-	-	0.09
รายละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยา			
ปริมาณธาตุ Ni (%)	2.86	3.81	5.13
ปริมาณธาตุ Mo (%)	7.21	8.68	12.84
อัตราส่วนของ Ni : Mo	0.40	0.44	0.40
พื้นที่ผิวบีอีที (ตารางเมตรต่อกรัม)	168.83	237.64	225.27
ปริมาตรของรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.82	0.65	0.35
รัศมีของรูพรุน (อังสตรอม)	87.30	61.89	39.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5.2 การวิเคราะห์หาการกระจายตัวของแอลเคนในผลิตภัณฑ์

การกระจายตัวของแอลเคนในผลิตภัณฑ์สามารถหาได้โดยการใช้เทคนิคแก๊สโครโมโตกราฟฟี โดยใช้เครื่องแก๊สโครโมโตกราฟฟี varian รุ่น 3800 โดยใช้คอลัมน์แบบคาปิลารีรุ่น ZB-1 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร ซึ่งเครื่องโครโมโตกราฟฟีจะมีใช้เครื่องตรวจจับแบบเฟรมไอออนไนซ์ โดยสภาวะของคอลัมน์เป็นไปดังตารางที่ 3.5.2

ตารางที่ 3.5.2 สภาวะของคอลัมน์ในการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของแอลเคน

สภาวะ	
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	35
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิ (นาที)	10
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิชั้นที่ 1 เพิ่มถึง 50 (องศาเซลเซียสต่อนาที)	1
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิชั้นที่ 2 เพิ่มถึง 80 (องศาเซลเซียสต่อนาที)	2
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิชั้นที่ 3 เพิ่มถึง 230 (องศาเซลเซียสต่อนาที)	3
อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	230
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิสุดท้าย (นาที)	10
อุณหภูมิหัวฉีดสาร (องศาเซลเซียส)	230
อุณหภูมิตรวจวัด (องศาเซลเซียส)	250

3.5.3 การวิเคราะห์หาปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์

การวิเคราะห์หาปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์จะทำวิเคราะห์โดยใช้เครื่องโครโมโตกราฟฟี ตามมาตราฐาน EN14105 โดยสภาวะของคอลัมน์ในการวิเคราะห์เป็นไปดังตารางที่ 3.5.3

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3.5.3 สภาวะของคอลัมน์ในการวิเคราะห์ไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์

สภาวะ	
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	50
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิ (นาที)	1
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิชั้นที่ 1 เพิ่มถึง 180 (องศาเซลเซียสต่อนาที)	15
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิชั้นที่ 2 เพิ่มถึง 230 (องศาเซลเซียสต่อนาที)	7
อัตราการเพิ่มอุณหภูมิชั้นที่ 3 เพิ่มถึง 370 (องศาเซลเซียสต่อนาที)	10
อุณหภูมิสุดท้าย (องศาเซลเซียส)	370
ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิสุดท้าย (นาที)	15
อุณหภูมิตรวจวัด (องศาเซลเซียส)	380

3.5.4 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์หาความหนาแน่น โดยการใช้ขวดถ่วงจำเพาะแบบ Gay-Lussac pycnometer โดยการใช้งานขวดถ่วงจำเพาะสามารถใช้โดยการชั่งน้ำหนักของขวดเปล่า จากนั้นใส่ของเหลวในขวดให้เต็มจากนั้นปิดฝาและชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่แน่นอนของสาร จากนั้นจึงนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อหาค่าความหนาแน่น

3.5.5 การวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของกรดไขมัน

การวิเคราะห์หาปริมาณร้อยละของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถทำได้โดยวิธีการไทเทรตผลิตภัณฑ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยมีสารละลายฟีนอฟทาลีนเป็นอินดิเคเตอร์ ซึ่งการวิเคราะห์จะคล้ายกับตามมาตรฐาน AOCs Ca 5a-40 แต่เนื่องจากปริมาณของสารที่ใช้ในมาตรฐานมีค่ามาก จึงใช้วิธีการดัดแปลงจากมาตรฐานโดยใช้ตัวอย่างเป็น 10 เปอเซ็นต์ของมาตรฐาน [23] โดยปริมาณของสารที่ใช้เป็นไปดังตารางที่ 3.5.4

ตารางที่ 3.5.4 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ ความเข้มข้นที่ใช้ในการหาร้อยละของกรดไขมัน

ช่วงของกรดไขมันอิสระ (%)	น้ำหนักของน้ำมัน (กรัม)	ปริมาตรของเอทิลแอลกอฮอล์ (มิลลิลิตร)	นอมอลลิตีของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (นอมอล)
0.01 - 0.2	5.64	5	0.013
0.20 - 1.0	2.82	5	0.013
1.00 - 30.0	0.7	7.5	0.031
30.00 - 50.0	0.7	10	0.13
50.00 - 100.0	0.35	10	0.125

3.5.6 การวิเคราะห์ปริมาณร้อยละของน้ำ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองจะแยกออกเป็น 2 วัฏภาค โดยน้ำมีความหนาแน่นมากกว่าผลิตภัณฑ์จึงทำให้สามารถแยกน้ำออกมาจากผลิตภัณฑ์ได้ และทำการชั่งน้ำหนักของน้ำเพื่อทำการหาปริมาณของน้ำ ในส่วนของการพิสูจน์น้ำจะทำได้โดยการหยดน้ำลงบนสารคอปเปอร์ซัลเฟต โดยทั่วไปสารคอปเปอร์ซัลเฟตจะมีลักษณะเป็นผงสีขาว และเมื่อหยดน้ำลงบนสารคอปเปอร์ซัลเฟตจะทำให้สารเปลี่ยนเป็นสีฟ้า ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่าสารที่แยกออกมาได้เป็นน้ำ

3.5.7 การวิเคราะห์หาปริมาณของค่าไอโอดีน

ผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคน้ำมันที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของกรดไขมันหรือไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ โดยการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน EN14111 โดยการวิเคราะห์นั้นจะนำผลิตภัณฑ์ไปทำปฏิกิริยากับสารละลาย wijs และใส่สารละลายโพแทสเซียมไอโอไดร์ลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนที่เหลืออยู่จากการทำปฏิกิริยาจากนั้นจึงเกิดเป็นสารไดไอโอไดร์ซึ่งสามารถทำการไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตได้ โดยในการไทเทรตนี้จะใช้สารละลายแป้งเป็นอินดิเคเตอร์

3.6 การคำนวณค่าต่าง ๆ ในงานวิจัย

3.6.1 การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระของผลิตภัณฑ์ (Free fatty acaid)

$$\text{ปริมาณกรดไขมันอิสระ (\%)} = \frac{\text{Alkali normality} \times \text{alkali volume} \times 20}{\text{ปริมาณของตัวอย่าง (กรัม)}} \qquad (3.1)$$

เนื่องจากองค์ประกอบที่อยู่ในน้ำมันเมล็ดในปาล์มประกอบด้วยกรดลอริก (Lauric acid) ดังนั้นในการทดลองนี้จะคำนวณปริมาณของกรดไขมันอิสระในปริมาณของกรดลอริก

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในตัวอย่าง

- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.00909 N
- ปริมาณตัวอย่าง 5.62 กรัม
- ปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮโดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต 1 มิลลิลิตร

นำค่าดังกล่าวมาแทนค่าลงในสมการ (3.1);

$$\text{ปริมาณกรดไขมันอิสระ (\%)} = \frac{0.00909 \times 1 \times 20}{5.62} = 0.03$$

3.6.2 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond factor)

$$RF = \frac{\text{พื้นที่ของแอลเคน} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{น้ำหนักแอลเคน}} \quad (3.2)$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 16

- น้ำหนักของแอลเคน C16 = 0.2574 กรัม
- พื้นที่ของแอลเคน C16 = 6783241
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง (โทลูอีน) = 0.2063 กรัม
- พื้นที่ของสารตัวอย่าง (โทลูอีน) = 3443189

นำค่าดังกล่าวมาแทนค่าลงในสมการ (3.2);

$$RF\ C16 = \frac{6783241 \times 0.2063}{3443189 \times 0.2574} = 1.58$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6.3 การคำนวณสารประกอบแอลเคน

$$\text{ปริมาณสารประกอบแอลเคน (\%wt)} = \frac{A_{Alkane} \times m_{IS} \times 100}{m_{sample} \times RF \times A_{IS}} \quad (3.3)$$

โดย	A_{Alkane}	คือ พื้นที่ของสารประกอบแอลเคนในช่วง
	m_{IS}	คือ มวลของสารมาตรฐาน (โทลูอีน)
	m_{sample}	คือ มวลของสารตัวอย่าง
	RF	คือ ค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของสารประกอบแอลเคน
	A_{IS}	คือ พื้นที่ของสารมาตรฐาน (โทลูอีน)

ตัวอย่างการคำนวณของสารประกอบแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 16

- A_{Alkane} = 5195022
- m_{IS} = 0.2096
- m_{sample} = 0.5173
- RF = 1.58
- AIS = 3987790

นำค่าดังกล่าวมาแทนค่าลงในสมการ (3.3);

$$\text{ปริมาณสารประกอบแอลเคน (\%wt)} = \frac{5195022 \times 0.2096 \times 100}{0.5173 \times 1.58 \times 3987790} = 33.43$$

3.6.4 การคำนวณปริมาณไตรกลีเซอไรด์

การคำนวณปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในการทดลองนี้เป็นการคำนวณใช้วิธีการทำกราฟมาตรฐาน (calibration curve) โดยจากการทำกราฟมาตรฐานพบว่ากราฟมาตรฐานมีสมการเป็นดังนี้

ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในผลิตภัณฑ์ (%wt) = 0.002 x พื้นที่ของไตรกลีเซอไรด์ (3.4)

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในผลิตภัณฑ์

- พื้นที่ของไตรกลีเซฮไรด์ = 117.41

นำค่าดังกล่าวมาแทนค่าลงในสมการ (3.4);

ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ในผลิตภัณฑ์ (%wt) = 0.002 x 117.41 = 0.23

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.6.5 การคำนวณปริมาณร้อยละของผลที่ได้เทียบกับสารตั้งต้น (%yield)

$$\text{ปริมาณสารประกอบแอลเคน (\%yield)} = \frac{\text{ปริมาณแอลเคน (\%wt)} \times \text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์}}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}} \quad (3.5)$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 16

- น้ำหนักผลิตภัณฑ์ = 101.99 กรัม
- ปริมาณแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 12 = 33.38 %wt
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง (โทลูอีน) = 164.41 กรัม

นำค่าดังกล่าวมาแทนค่าลงในสมการ (3.5);

$$\text{ปริมาณแอลเคน C12 (\%yield)} = \frac{33.38 \times 101.99}{164.41} = 34.04$$

3.6.6 การคำนวณอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนเลขคู่ต่อเลขคี่ (selectivity)

$$\text{อัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคน C12 ต่อ C11} = \frac{\text{โมลของแอลเคนที่มีคาร์บอนเท่ากับ 12}}{\text{โมลของแอลเคนที่มีคาร์บอนเท่ากับ 11}} \qquad (3.6)$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนองของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 16

- โมลของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 18 = 0.200 โมล
- โมลของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 17 = 0.067 โมล

นำค่าดังกล่าวมาแทนค่าลงในสมการ (3.6);

$$\text{อัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคน C12 ต่อ C11} = \frac{0.200}{0.067} = 3.00$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4
ผลการการทดลองและอภิปราย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตแอลเคนจากปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม โดยจะทำการศึกษาผลของปริมาณนิกเกิลและโมลิบดินัมบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ต่อปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในสภาวะของอุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในเตาปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง โดยอภิปรายผลตามลำดับดังต่อไปนี้

4.1 กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง

4.2 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1

4.3 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2

4.4 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3

4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

4.1 กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง

การทดลองทั้ง 3 การทดลองเกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม โดยทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิและความดันที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ใช้ในการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรตเพื่อหาปริมาณของกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำมันพืช และถูกเปลี่ยนเป็นเมทิลเอสเทอร์ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี ซึ่งองค์ประกอบที่ได้จากการไทเทรตหาค่ากรดไขมันอิสระในน้ำมันเมล็ดในปาล์ม และผลจากเครื่องแก๊สโครโมโตกราฟฟีเป็นไปตามตารางที่ 4.1.1 จากผลการวิเคราะห์ โดยจากการผลการวิเคราะห์พบว่า น้ำมันเมล็ดในปาล์มมีกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 12 อะตอม เป็นองค์ประกอบหลัก และมีปริมาณขององค์ประกอบที่เป็นพันธะคู่ค่อนข้างน้อย เมื่อเทียบกับน้ำมันชนิดอื่น ๆ

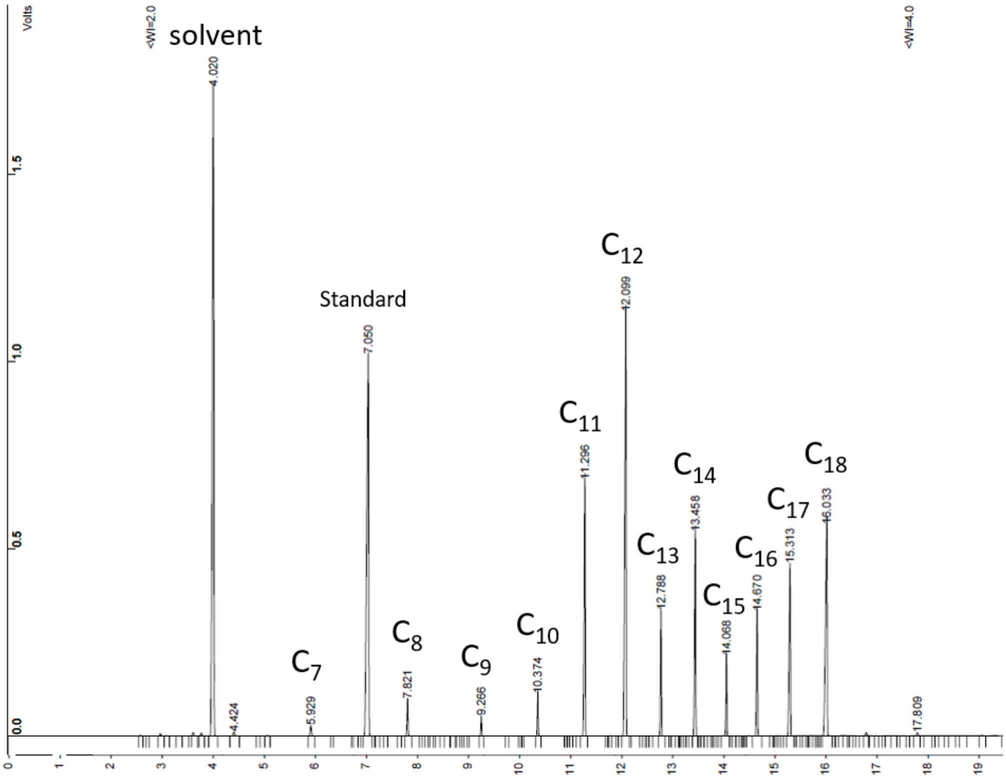
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม

องค์ประกอบ	สูตรโมเลกุล	wt%
Capryic acid	C8	0.62
Caprynic acid	C10	1.85
Lauric acid	C12	45.85
Myristic acid	C14	18.84
Palmitic acid	C16	10.28
Stearic acid	C18:0	1.63
Oleic acid	C18:1	18.21
Linoleic acid	C18:2	2.71
ปริมาณกรดไขมันอิสระ		0.03
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)		0.91

จากตัวอย่างที่เก็บจากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง พบว่าผลิตภัณฑ์แยกตัวออกเป็น 2 วัฏภาค อย่างชัดเจน ซึ่งพบว่าวัฏภาคล่างของผลิตภัณฑ์เป็นน้ำซึ่งสามารถเปลี่ยนสีของคอปเปอร์ซัลเฟตจากสีขาวเป็นสีน้ำเงิน และวัฏภาคด้านบนนำไปวิเคราะห์โดยวิธีการไทเทรตเพื่อหาปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ และนำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่องแก๊สโครโมโตกราฟฟี เพื่อนำไปหาปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในวัฏภาคน้ำมัน และวิเคราะห์หาแอลเคนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในวัฏภาคน้ำมัน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครโมโตกราฟฟีเป็นไปดังรูปที่ 4.1.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.1.1 โครโมโตแกรมของการวิเคราะห์แอลเคนในวัฏภาคน้ำมัน

จากผลการวิเคราะห์จากเครื่องแก๊สโครโมโตกราฟฟีพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งประกอบด้วยแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 7 อะตอม จนถึงแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม โดยแอลเคนที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นแอลเคนที่เป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับผลวิเคราะห์จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรตหาค่าไอโอดีนของผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคน้ำมัน ซึ่งผลที่ได้คือค่าไอโอดีนของผลิตภัณฑ์ทั้งหมดมีค่าเท่า 0 หรือไม่มีสารที่เป็นพันธะคู่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์

นอกจากนี้ยังมีการพบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นจากการทดลองด้วย ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันถั่วเหลือง โดย [5] Bambang et.al (2012) โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีหลายปฏิกิริยา ภาพรวมของปฏิกิริยาเป็นไปดังรูปที่ 2 ปฏิกิริยาจะเริ่มจากการไฮโดรจีเนตของน้ำมันพืชเป็นการเปลี่ยนกรดไขมันในไตรกลีเซอไรด์ที่เป็นพันธะคู่เป็นพันธะเดี่ยว จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเปลี่ยนจากไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมัน และแก๊สโพรเพนดังสมการที่ (4.1.1)

ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง :

$$\begin{array}{l} CH_2\text{-}COO\text{-}R \\ | \\ CH\text{-}COO\text{-}R + 3H_2 \rightarrow 3R\text{-}COOH + C_3H_8 \\ | \\ CH_2\text{-}COO\text{-}R \end{array} \qquad (4.1.1)$$

ต่อจากนั้นกรดไขมันจะเกิดปฏิกิริยาต่อและเปลี่ยนไปเป็นแอลเคน โดยปฏิกิริยาที่เปลี่ยนจากกรดไขมันเป็นแอลเคนมีด้วยกัน 3 ปฏิกิริยา ได้แก่ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันเป็นไปดังสมการที่ (4.1.2) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชันเป็นไปดังสมการที่ (4.1.3) และ (4.1.4) ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันจะเปลี่ยนกรดไขมันให้กลายเป็นแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากัน และได้น้ำมาเป็นผลิตภัณฑ์ด้วย ในส่วนของปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชันจะเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนที่ลดจำนวนคาร์บอนลง 1 อะตอม พร้อมทั้งได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สออกมาด้วยโดยปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะได้แก๊สเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชันจะได้แก๊สเป็นคาร์บอนมอนออกไซด์

ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชัน : $CH_2\text{-}COOH + 3H_2 \rightarrow R\text{-}CH_2\text{-}CH_3 + 2H_2O$ (4.1.2)

ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน : $CH_2\text{-}COOH + H_2 \rightarrow R\text{-}CH_3 + CO_2$ (4.1.3)

ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชัน : $R\text{-}CH_2\text{-}COOH \rightarrow R\text{-}CH_3 + CO + H_2O$ (4.1.4)

เนื่องจากปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณที่มาก (อัตราส่วนแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมัน = 500) ทำให้แก๊สที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์มีปริมาณมาก ทำให้การตรวจปริมาณของแก๊สขาออกเป็นไปได้ยาก รวมถึงไม่มีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สที่เหมาะสม ในการหาปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนออกไซด์ได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชันขึ้นหรือไม่ แต่เนื่องจากในผลิตภัณฑ์มีแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่เกิดขึ้น ดังนั้นจึงคาดว่าแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่นั้นเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเท่านั้น

4.2 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1

ผลการวิเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 ซึ่งเป็นตัวที่มีปริมาณของนิกเกิล 2.86% และปริมาณของโลหะโมลิบดินัม 7.21% เป็นไปตามตางรางที่ 4.2.1 ถึง ตารางที่ 4.2.3 โดยเป็นผลจากการทำการทดลองที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ 4.2.1 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	52.62	75.29	77.60	77.28	76.61
C7	0.56	0.84	1.06	1.25	1.04
C8	0.99	1.42	1.21	1.13	0.93
C9	0.38	0.65	0.74	0.88	0.90
C10	1.26	1.79	1.52	1.43	1.30
C11	7.24	12.15	13.90	16.26	17.14
C12	15.14	20.54	18.25	16.47	15.21
C13	2.85	4.51	5.43	6.17	6.76
C14	6.56	8.72	8.11	7.08	6.67
C15	1.49	2.40	3.12	3.61	3.92
C16	3.23	4.45	4.51	4.12	3.56
C17	4.29	6.67	8.57	9.43	10.49
C18	8.63	11.15	11.19	9.45	8.70
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	2.45	0.89	0.00	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	3.67	1.54	0.04	0.04	0.04
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	8.44	10.75	10.87	9.63	8.98
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.802	0.764	0.744	0.746	0.745

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.2.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	58.66	75.95	79.01	77.63	77.33
C7	0.64	0.75	0.85	1.05	1.21
C8	1.34	1.62	1.30	1.37	1.29
C9	0.44	0.52	0.62	0.69	0.74
C10	1.61	1.96	1.71	1.63	1.43
C11	7.68	9.62	11.90	12.35	12.63
C12	17.96	22.45	21.02	18.93	16.55
C13	2.87	3.67	4.73	4.77	5.04
C14	7.48	9.72	9.40	8.47	7.82
C15	1.45	1.99	2.65	2.81	3.18
C16	3.94	4.96	4.76	4.61	4.52
C17	4.02	5.66	7.25	8.12	9.73
C18	9.23	13.03	12.82	12.82	13.19
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	1.93	0.35	0.00	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	3.50	1.07	0.04	0.03	0.03
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.65	11.63	11.50	11.40	10.64
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.781	0.761	0.744	0.745	0.743

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 ที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	62.03	74.42	78.16	76.62	77.50
C7	0.47	0.46	0.52	0.70	0.88
C8	1.47	1.30	1.28	1.19	1.20
C9	0.34	0.36	0.45	0.55	0.67
C10	1.83	1.79	1.84	1.63	1.61
C11	6.34	7.44	9.21	10.84	12.69
C12	20.70	22.81	22.97	20.20	19.47
C13	2.53	3.13	3.68	4.38	5.04
C14	8.57	10.46	10.32	9.18	8.71
C15	1.19	1.76	2.11	2.56	2.99
C16	4.12	5.71	5.84	5.11	4.57
C17	3.37	4.81	5.68	7.06	7.74
C18	11.08	14.39	14.27	13.22	11.93
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	1.20	0.06	0.00	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	3.41	0.54	0.02	0.02	0.02
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.32	12.86	13.14	11.98	11.41
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.784	0.752	0.745	0.744	0.746

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.1 ผลกระทบต่ออุณหภูมิ

จากข้อมูลผลการทดลองตารางที่ 4.2.1 ถึง ตารางที่ 4.2.3 เป็นผลการทดลองซึ่งมาจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตซึ่งจะได้ผลออกมาเป็นกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ และข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครโมโตกราฟฟี จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการหาปริมาณของไตรกลีเซอรไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ และส่วนที่สองเป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ซึ่งจากการพบว่าผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคน้ำมันมีองค์ประกอบเป็นแอลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 7 ถึง 18 อะตอม โดยที่แต่ละอุณหภูมิในการทดลองจะให้ผลิตภัณฑ์มีองค์ประกอบของแอลเคนที่ต่างกันออกไป นอกจากองค์ประกอบของแอลเคนของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน ปริมาณของน้ำ ปริมาณของแอลเคน และปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ก็มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองด้วยเช่นกัน

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่ได้จากเครื่องแก๊สโครโมโตรกราฟฟี สามารถนำมาสรุปเป็นไปดังตารางที่ 4.2.4 จากปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่ความดันต่าง ๆ พบว่าปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์นั้น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันที่ทุกความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิที่มีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์เหลือเยอะที่สุด และที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณของไตกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในปริมาณที่น้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไปพบว่าไม่มีปริมาณของไตกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์นั้น สามารถสรุปได้ว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งของไตรกลีเซอไรด์ (4.1.2) นั้นจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไป เนื่องจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสนั้นไม่พบไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

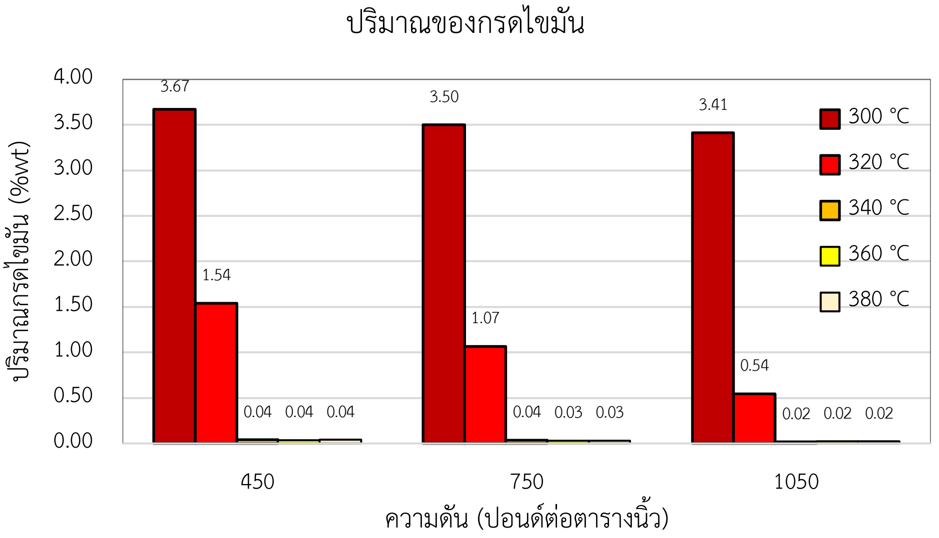
ตารางที่ 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ในผลิตภัณฑ์ที่ความดัน	อุณหภูมิ				
	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	2.45	0.89	0.00	0.00	0.00
750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	1.93	0.35	0.00	0.00	0.00
1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	1.20	0.06	0.00	0.00	0.00

หลังจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งซึ่งเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมัน ปฏิกิริยาต่อไปที่เกิดขึ้นจึงเป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันไปเป็นแอลเคน จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรตหาค่ากรดไขมันที่เหลืออยู่พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองส่งผลกระทบต่อปริมาณของกรดไขมันที่

เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์อย่างมาก การเปรียบเทียบผลกระทบของอุณหภูมิปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ความดันต่าง ๆ เป็นไปดังรูปที่ 4.2.1 จากกราฟผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 750 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และความดัน 450 750 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นมีค่ามากเมื่อเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิสูงขึ้น จากนั้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 320 องศาเซลเซียส พบว่าค่าของกรดไขมันที่เหลืออยู่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อย่างมาก และเมื่อที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากกว่า 340 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่มีปริมาณเข้าใกล้ศูนย์มากที่ทุกความดันในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนจากกรดไขมันเป็นแอลเคนดังสมการที่ (4.1.2) และ (4.1.3) ดังนั้นค่าของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์จึงบ่งบอกถึงความสามารถในการเปลี่ยนจากกรดไขมันไปเป็นแอลเคน โดยค่าของกรดไขมันที่สูงจะบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาจากกรดไขมันเปลี่ยนไปเป็นแอลเคน (ปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน) เกิดขึ้นได้อย่างไม่สมบูรณ์ และปริมาณของกรดไขมันที่เข้าใกล้ศูนย์จะสามารถบอกได้ว่ากรดไขมันสามารถเปลี่ยนเป็นแอลเคนได้อย่างสมบูรณ์ จากแนวโน้มในการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส กรดไขมันที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งบางส่วนไม่สามารถเกิดไปเป็นแอลเคนต่อได้ ที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส สามารถเกิดปฏิกิริยาจากกรดไขมันไปเป็นแอลเคนได้มากขึ้น และที่อุณหภูมิมากกว่า 340 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่มีปริมาณกรดไขมันเหลืออยู่ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเกิดปฏิกิริยาที่เปลี่ยนจากกรดไขมันไปเป็นแอลเคนได้อย่างสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

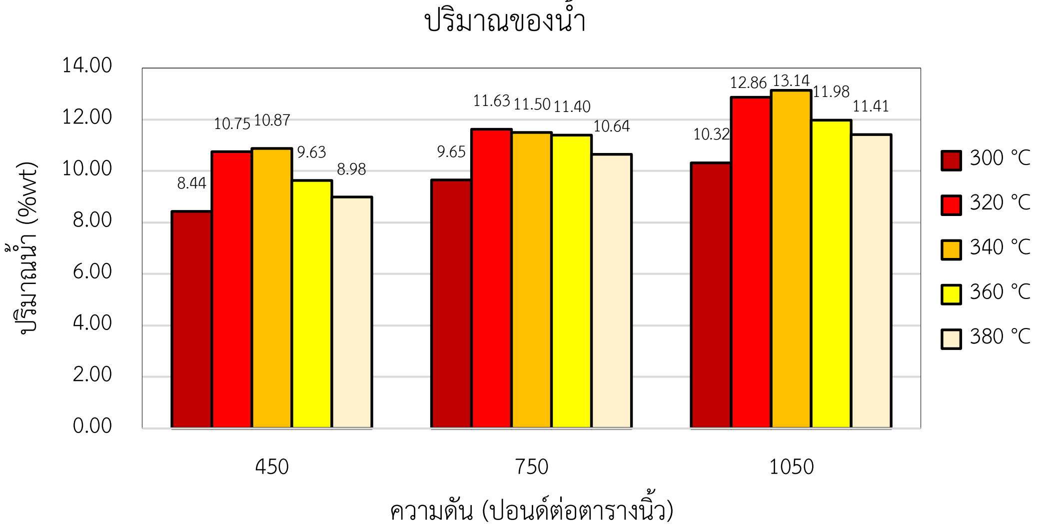


รูปที่ 4.2.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเป็นอีกค่าหนึ่งที่ได้มาจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถอธิบายถึงปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนได้เช่นกัน จากผลการวิเคราะห์ของปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถนำมาสรุปเป็นกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.2.2 ปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์จะสามารถบ่งบอกได้ถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันและดีคาร์บอกซิเลชันได้ เนื่องจากน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากทั้ง 2 ปฏิกิริยา จากรูปที่ 4.2.2 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 300 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยที่สุด ที่ทุกความดันในการทดลอง และปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจนถึง 320 และ 340 องศาเซลเซียส จากผลของปริมาณน้ำนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่เกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาจะสามารถเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามีค่ามากกว่า 320 และ 340 องศาเซลเซียส ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของปริมาณกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ดังที่กล่าวมาข้างต้น และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยามากกว่า 340 องศาเซลเซียส ปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อนำผลของปริมาณน้ำมาประกอบกับผลของปริมาณกรดไขมันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถสรุปได้ว่าเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันมีค่าน้อยกว่าน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณของกรดไขมันและปริมาณของน้ำนั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ [4] Panuwich Charoenwong (2010) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันโอเลอิน ปาล์มสเตียริน และกรดไขมันปาล์ม โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมบนตัวรองรับอะลูมินา ซึ่งใช้สภาวะในการทดลองที่อุณหภูมิ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เกิดขึ้นแต่ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง และที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส จะมีแอลเคนเกิดขึ้น และมีค่าปริมาณของกรดไขมันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น



รูปที่ 4.2.2 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณการกระจายตัวของแอลเคน เมื่อนำปริมาณของแอลเคนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ได้ผลไปตามตารางที่ 4.2.5 จากตารางพบว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสนั้นเป็นอุณหภูมิที่ปริมาณแอลเคนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยที่สุดที่ทุกความดันในการทำปฏิกิริยา และที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจะพบว่าปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันนั้นมีค่าลดลง ในทางกลับกันปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันมีปริมาณมากขึ้น โดยแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 3 ความดันที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิมากกว่า 320 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันนั้นจะเกิดน้อยลง เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 ขึ้น และในทางกลับกันปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะเกิดได้ดีขึ้น เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้น

ตารางที่ 4.2.5 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

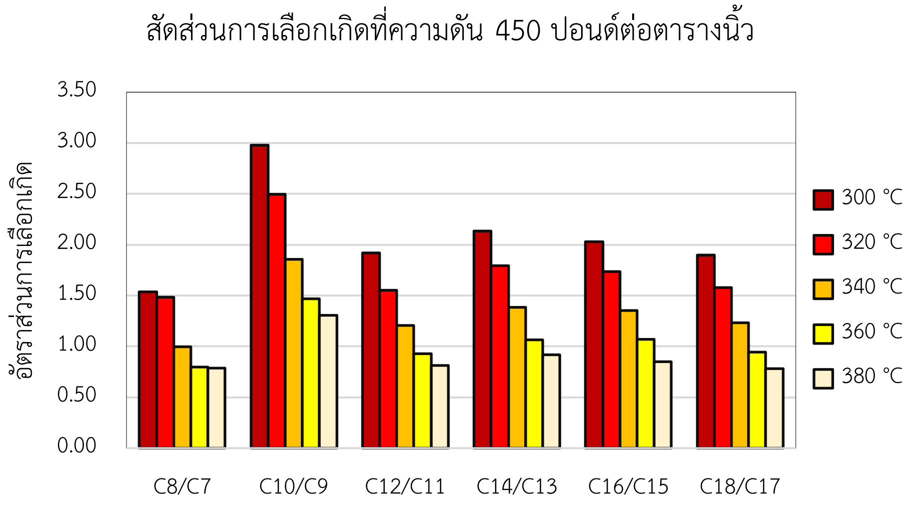
ความดัน	ปริมาณแอลเคนจากปฏิกิริยา	300 ℃	320 ℃	340 ℃	360 ℃	380 ℃
450 psi	DCO_2* (%yield)	16.82	27.22	32.82	37.60	40.24
	HDO** (%yield)	35.80	48.07	44.78	39.68	36.37
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	52.62	75.29	77.60	77.28	76.61
750 psi	DCO_2 (%yield)	17.09	22.21	28.00	29.79	32.53
	HDO (%yield)	41.56	53.74	51.01	47.84	44.80
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	58.66	75.95	79.01	77.63	77.33
1050 psi	DCO_2 (%yield)	14.25	17.96	21.65	26.10	30.01
	HDO (%yield)	47.78	56.46	56.51	50.52	47.49
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	62.03	74.42	78.16	76.62	77.50

*DCO_2 แสดงถึงปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน, **HDO แสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

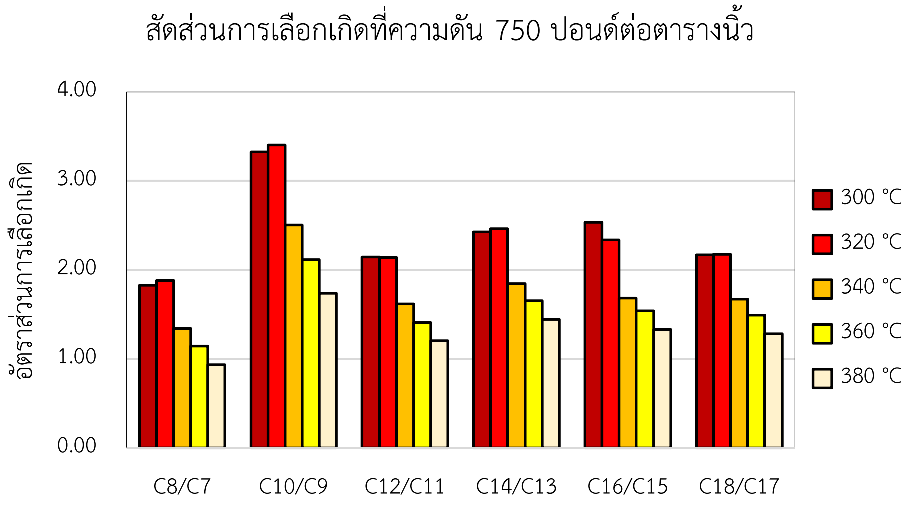
นอกจากนี้อัตราส่วนการเลือกของแอลเคนก็เป็นอีกค่าหนึ่ง ซึ่งบอกถึงเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยานี้ได้ โดยจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ในวัฏภาคน้ำมันสามารถนำมาหาค่าอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่มีคาร์บอนเลขคู่และแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเลขคี่ สามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังกราฟในรูปที่ 4.2.3 ถึง รูปที่ 4.2.5 จากกราฟพบว่าที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเลขคู่ต่อแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเลขคี่มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นในทุกคู่ของอัตราส่วนการเลือกเกิด เช่นเดียวกันที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่มีแนวโน้มของอัตราส่วนการเลือกเกิดลดลง เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

จากแนวโน้มของอัตราส่วนการเลือกเกิดสามารถบอกได้ว่าปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชันที่เป็นปฏิกิริยาเปลี่ยนจากกรดไขมันเป็นแอลเคนที่เป็นเลขคู่เกิดขึ้นได้น้อยลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนที่มีเลขคี่เกิดได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ [15] Vorranutch Itthibenchapong et.al (2016) เป็นการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 270 ถึง 330 องศาเซลเซียส และความดัน 50 บาร์ ผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันเกิดขึ้นได้น้อยลงที่อุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาสูงขึ้น จากแนวโน้มของอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่เป็นเลขคู่ต่อแอ

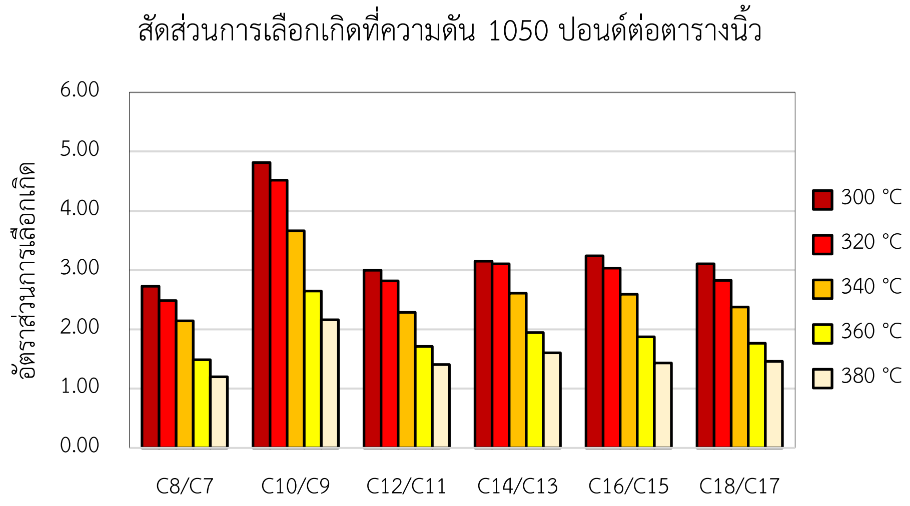
ลเคนที่เป็นเลขคี่ก็ตรงกับธรรมชาติของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่จะเกิดได้น้อยลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.2.3 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1



รูปที่ 4.2.4 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1



รูปที่ 4.2.5 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

จากการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 (ปริมาณของนิกเกิล 2.86% และปริมาณของโลหะโมลิบดินัม 7.21%) สามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไป เนื่องจากไม่พบปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส และปริมาณกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในส่วนของแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยานั้น ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันจะมีแนวโน้มในการเกิดที่ลดลง โดยสรุปได้จากปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และปริมาณของแอลเคนเลขคู่ที่มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้น

4.2.2 ผลกระทบของความดัน

จากข้อมูลตารางที่ 4.2.1 ถึง ตารางที่ 4.2.3 สามารถนำมาสรุปเป็นกราฟเพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของความดันได้ดังรูปที่ 4.2.6 ถึง รูปที่ 4.2.7 และตารางที่ 4.2.7 จากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์พบว่าค่าปริมาณของไตรกลีเซอไรด์และปริมาณของกรดที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ปริมาณของน้ำในผลิตภัณฑ์รวมถึงองค์ประกอบแอลเคนมีการเปลี่ยนแปลงตามความดันที่เปลี่ยนไปของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งความดันเป็นตัวแปรสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากการเพิ่มความดันของระบบ

ขึ้นจะทำให้ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนละลายลงไปในวัฏภาคของน้ำมันมีค่ามากขึ้น และส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น

ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเป็นปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้นในการทำปฏิกิริยา จากตารางที่ 4.2.6 ซึ่งเป็นปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าที่อุณภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียสนั้นมีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิทั้ง 300 และ 320 องศาเซลเซียสนั้น ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่เหมือนกันเมื่อทำการเปลี่ยนความดันที่ใช้ในการในการทำปฏิกิริยา ที่ความดันต่ำที่สุดที่ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นจะมีค่ามากที่สุด และที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วนั้นจะเป็นความดันที่ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นมีค่าน้อยที่สุด จากผลการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งที่เพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้น และที่อุณหภูมิมากกว่า 340 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่พบไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์จึงเป็นการแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์

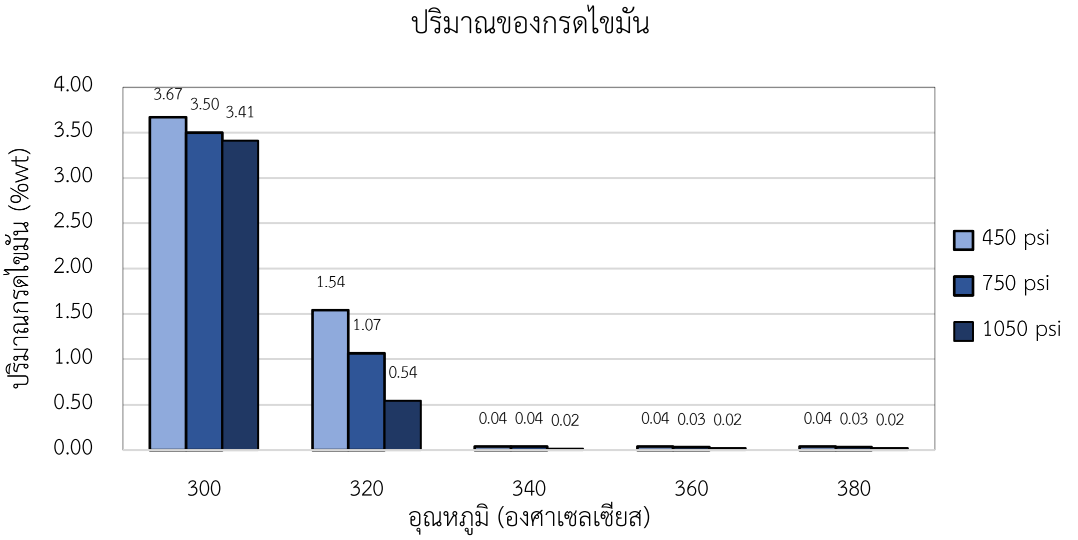
ตารางที่ 4.2.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)		
	450	750	1050
300 องศาเซลเซียส	2.45	1.93	1.20
320 องศาเซลเซียส	0.89	0.35	0.06
340 องศาเซลเซียส	0.00	0.00	0.00
360 องศาเซลเซียส	0.00	0.00	0.00
380 องศาเซลเซียส	0.00	0.00	0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

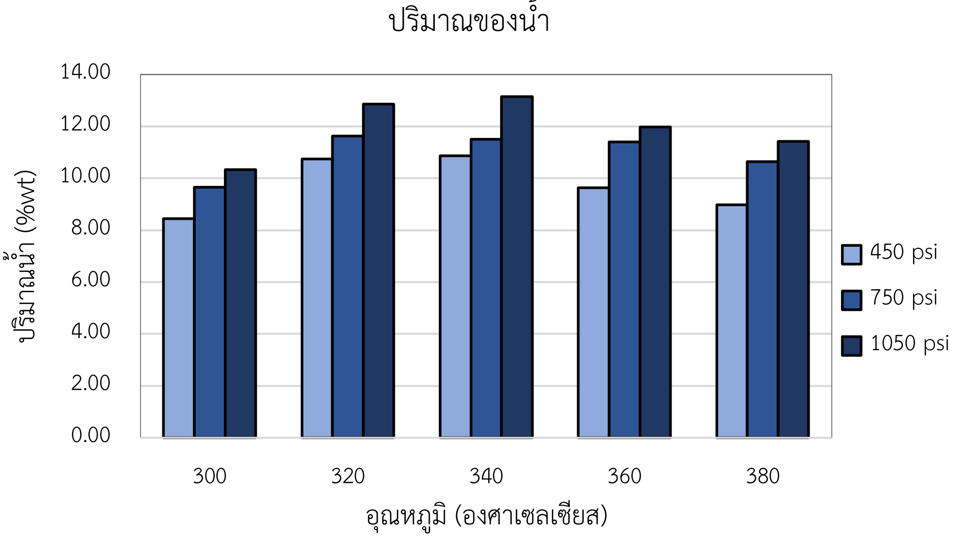
ปฏิกิริยาต่อมาจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนจากกรดไขมันเป็นแอลเคน จากกราฟรูปที่ 4.2.6 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของความดันต่อปริมาณกรดไขมัน โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณของกรดไขมันมีค่าสูงที่สุดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเมื่อเพิ่มความดันในการปฏิกิริยาขึ้น ปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์จะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความดันทำให้การเกิดปฏิกิริยาโดยรวมของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดขึ้นได้ดีขึ้น เมื่อความดันมากขึ้น และที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับแนวโน้มที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส คือ เมื่อเพิ่มความดันในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจะ

ทำให้ค่าปริมาณของกรดไขมันมีค่าลดดลง แต่เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงกว่า 340 องศาเซลเซียส การเพิ่มความดันของระบบขึ้นจะไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณของกรดไขมัน ซึ่งกราฟจากรูปที่ 4.2.6 จะเห็นได้ว่าที่มากกว่าอุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส และทุกความดัน ปริมาณกรดไขมันมีค่าใกล้เคียงกัน และเข้าใกล้ศูนย์



รูปที่ 4.2.6 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณกรดไขมันของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

ปริมาณน้ำเป็นอีกหนึ่งค่าที่สามารถอธิบายเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งจากกราฟรูปที่ 4.2.7 ซึ่งแสดงถึงผลกระทบของความดันต่อปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์พบว่า ในการทำปฏิกิริยาที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ผลิตภัณฑ์จะมีค่าปริมาณน้ำน้อยที่สุดในทุกอุณหภูมิทุกอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาเป็น 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ก็จะทำให้ปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อความดันของปฏิกิริยาสูงถึง 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยแนวโน้มของปริมาณน้ำเป็นไปดังที่กล่าวข้างต้นที่ทุกอุณหภูมิในการทำการทดลอง ผลของปริมาณน้ำที่ได้จากกผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นถึงปฏิกิริยาไฮโดรดี่ออกซิจีเนชันที่เกิดมากขึ้น เนื่องจากปฏิกิริยานี้มีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากปฏิกิริยา



รูปที่ 4.2.7 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

จากการวิเคราะห์ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสามารถนำมาวิเคราะห์ถึงเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาได้ จากตารางที่ 4.2.7 ซึ่งเป็นตารางที่แสดงถึงปริมาณของแอลเคนซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาพบว่า ที่ทุกอุณหภูมิแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันนั้นลดลง เมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณแอลเคนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันมีค่าลดลง และแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเพิ่มขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น โดยสังเกตจากได้จากปริมาณของแอลเคนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยา

Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.2.7 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

อุณหภูมิ	ปริมาณแอลเคนจากปฏิกิริยา	450 psi	750 psi	1050 psi
300 °C	DCO_2* (%yield)	16.82	17.09	14.25
	HDO** (%yield)	35.80	41.56	47.78
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	52.62	58.66	62.03
320 °C	DCO_2 (%yield)	27.22	22.21	17.96
	HDO (%yield)	48.07	53.74	56.46
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	75.29	75.95	74.42
340 °C	DCO_2 (%yield)	32.82	28.00	21.65
	HDO (%yield)	44.78	51.01	56.51
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	77.60	79.01	78.16
360 °C	DCO_2 (%yield)	37.60	29.79	30.01
	HDO (%yield)	39.68	47.84	47.49
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	77.28	77.63	77.50
380 °C	DCO_2 (%yield)	40.24	32.53	30.01
	HDO (%yield)	36.37	44.80	47.49
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	76.61	77.33	77.50

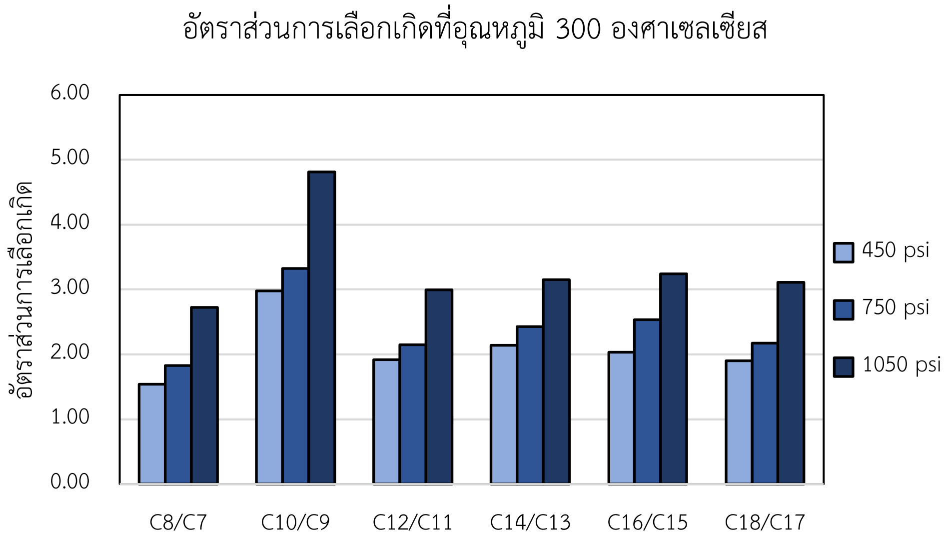
*DCO_2 แสดงถึงปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน, **HDO แสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

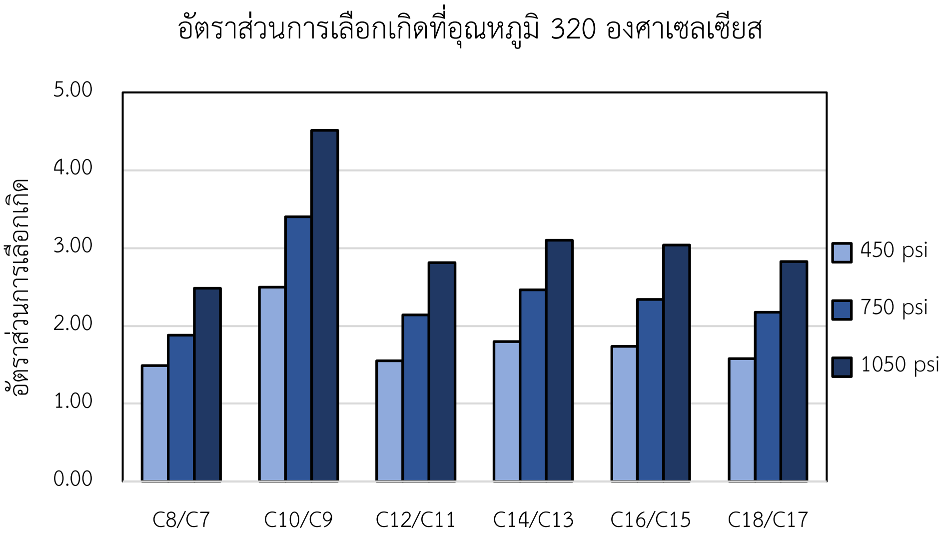
อัตราส่วนการเลือกเกิดก็เป็นอีกข้อมูลหนึ่ง ซึ่งสามารถวิเคราะห์ถึงเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยาได้ ซึ่งจากข้อมูลการทดลองสามารถมาสรุปเป็นกราฟในรูปที่ 4.2.8 ถึง รูปที่ 4.2.12 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงถึงผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่เป็นเลขคู่ต่อแอลเคนที่เป็นเลขคี่ เมื่อวิเคราะห์ผลจากกราฟพบว่าอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่เป็นเลขคู่ต่อแอลเคนที่เป็นเลขคี่ที่ความ 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีค่าน้อยที่สุดที่ทุกอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มความดันขึ้นก็จะทำให้อัตราส่วนการเลือกเกิดนั้นมีค่าสูงขึ้นไปด้วยที่ทุกอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ซึ่งจากผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันที่มากขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น โดยผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันเป็นปฏิกิริยาที่ให้ปริมาณน้ำมากกว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน เมื่อมีน้ำที่เกิดจากการทำปฏิกิริยามากขึ้น รวมถึงมีการวิเคราะห์

และพบว่ามีปริมาณของแอลเคนที่เป็นเลขคู่มากขึ้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันเกิดได้ดีขึ้น เมื่อเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น

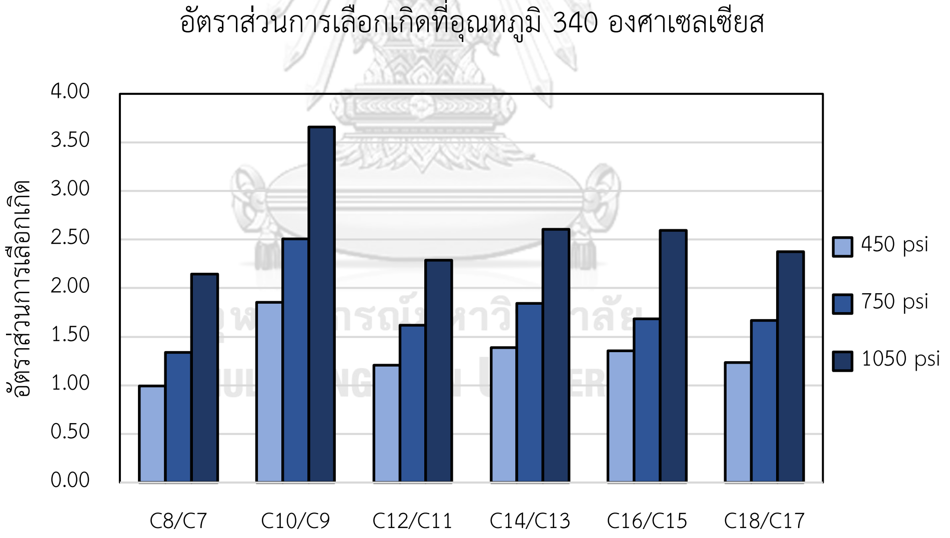
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบของความดันพบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [14] Salwa A. El et.al (2018) :ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันรำข้าวดิบ ซึ่งเป็นน้ำมันที่กินไม่ได้ ในการศึกษาจะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สามารถทำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยในการทดลองจะทำที่สภาวะอุณหภูมิ 350 ถึง 450 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ถึง 5 ต่อชั่วโมง ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 1 ถึง 5 เมกะปาสคาล ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่ถูกซัลไฟด์ โดยผลกระทบจากความดันที่ได้จากการทดลองพบว่าปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยาที่ความดัน 5 เมกะปาสคาล ซึ่งน้ำที่ได้ส่วนมากเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชัน



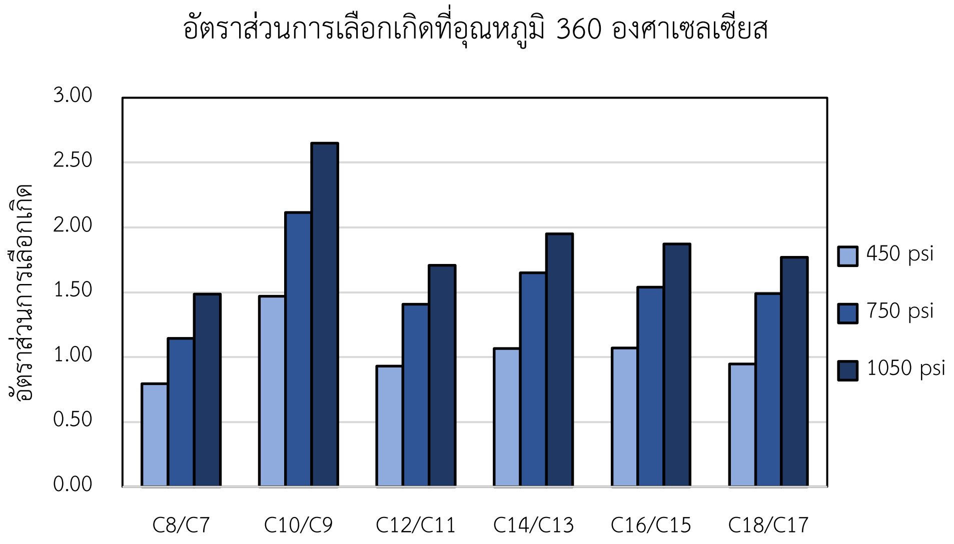
รูปที่ 4.2.8 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1



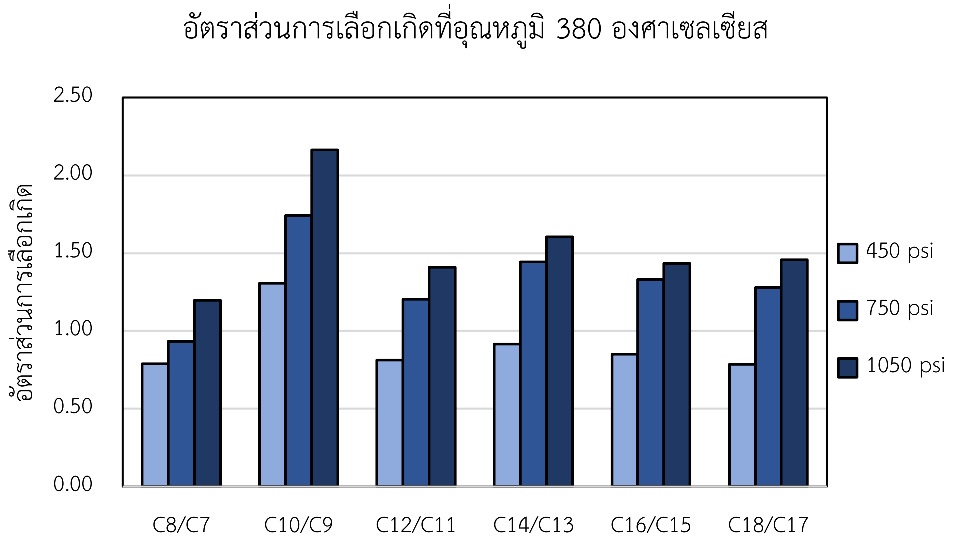
รูปที่ 4.2.9 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1



รูปที่ 4.2.10 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1



รูปที่ 4.2.11 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1



รูปที่ 4.2.12 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1

จากผลการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น ที่อุณหภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียส จะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งเกิดได้ดีมากขึ้น สังเกตได้จากปริมาณของไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันที่ลดลง เมื่อความดันในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไปเป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งที่สมบูรณ์ เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาจากกรดไขมันไปเป็นแอลเคนจะเลือกเกิดไปทางปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันมากกว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน โดยสรุปได้จากปริมาณน้ำ อัตราส่วนการเลือกเกิด และปริมาณแอลเคนที่เป็นเลขคู่ที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความดันของการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อทำการพิจารณาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์มจากตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาต้องเป็นอุณหภูมิที่มากกว่า 340 องศาเซลเซียส และความดันสูง โดยเมื่อสังเกตจากปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นพบว่าที่สภาวะอุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณของแอลเคนมากที่สุด และที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่มากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2

ผลการวิเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2 ซึ่งเป็นตัวที่มีปริมาณของนิกเกิล 3.81% และปริมาณของโลหะโมลิบดินัม 8.68% เป็นไปตามตางรางที่ 4.3.1 ถึง ตารางที่ 4.3.3 โดยเป็นผลจากการทำการทดลองที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อต่รางนิ้ว

ตารางที่ 4.3.1 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2 ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	58.03	71.16	78.38	78.09	78.48
C7	0.62	0.76	1.04	1.19	1.10
C8	1.43	1.36	1.43	1.34	1.26
C9	0.37	0.51	0.68	0.77	0.77
C10	1.65	1.69	1.74	1.63	1.65
C11	6.65	9.79	12.66	14.03	14.29
C12	18.55	20.17	20.35	18.67	19.22
C13	2.50	3.82	4.94	5.38	5.54
C14	7.75	8.80	8.86	8.09	8.32
C15	1.29	2.10	2.81	3.13	3.17
C16	3.89	4.47	4.42	4.42	4.46
C17	3.73	6.00	7.77	8.40	8.25
C18	9.61	11.69	11.68	11.04	10.45
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	2.97	1.16	0.00	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	2.82	1.31	0.03	0.02	0.03
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.02	11.54	11.32	10.86	10.41
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.779	0.767	0.744	0.744	0.744

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.3.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2 ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	63.29	78.53	77.19	77.05	76.22
C7	0.47	0.48	0.58	0.67	0.88
C8	1.28	1.23	1.20	1.19	1.31
C9	0.34	0.39	0.48	0.57	0.70
C10	1.66	1.75	1.71	1.71	1.77
C11	6.88	8.21	9.83	11.28	12.84
C12	19.83	23.05	21.57	20.98	20.30
C13	2.64	3.47	4.01	4.46	4.80
C14	8.61	10.83	9.81	9.33	8.58
C15	1.42	2.05	2.36	2.58	2.73
C16	4.39	5.68	5.26	4.93	4.45
C17	4.17	5.82	6.80	6.89	6.91
C18	11.62	15.58	13.56	12.46	10.95
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	2.04	0.03	0.03	0.02	0.02
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.15	13.05	12.38	12.61	11.90
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.771	0.747	0.747	0.748	0.745

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.3.3 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2 ที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	65.09	79.79	78.39	76.91	77.43
C7	0.51	0.61	0.64	0.57	0.66
C8	1.47	1.82	1.44	1.14	1.16
C9	0.32	0.42	0.48	0.48	0.54
C10	1.77	2.26	1.94	1.65	1.67
C11	5.99	7.88	9.23	9.81	10.68
C12	21.03	26.12	23.52	21.13	21.01
C13	2.40	2.92	3.64	4.06	4.36
C14	9.32	11.16	10.46	9.78	9.57
C15	1.29	1.63	2.10	2.41	2.65
C16	4.71	5.72	5.42	5.19	5.26
C17	3.55	4.27	5.53	6.70	6.85
C18	12.72	14.97	14.01	14.00	13.02
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	2.58	0.02	0.02	0.02	0.02
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.80	13.94	13.11	12.84	12.76
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.774	0.745	0.747	0.745	0.747

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.1. ผลกระทบของอุณหภูมิ

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งสามารถวิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ จากการทดลองผลเป็นไปดังตารางที่ 4.3.1 ถึง ตารางที่ 4.3.3 โดยสามารถนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสรุปเป็นตารางปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ได้ดังตารางที่ 4.3.4 จากข้อมูลในตารางนั้นพบว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ทุกความดันในการทดลองนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะมีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณมากที่สุด และการในทดลองที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และมีอุณหภูมิมากกว่า 340 องศาเซลเซียส จะไม่พบไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ แต่ในส่วนของการทดลองที่ความดัน 750 และ

1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วนั้นจะไม่พบไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 320 องศาเซลเซียส จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนสารตั้งต้นจากไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันนั้นเกิดได้ดีขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองขึ้น และปฏิกิริยาไฮโดรเกิดขึ้นได้อย่างไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ที่ทุกความดันในการทดลอง และที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 นั้นจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 340 องศาเซลเซียส ในส่วนของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งอย่างสมบูรณ์ของการทดลองที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 320 องศาเซลเซียส

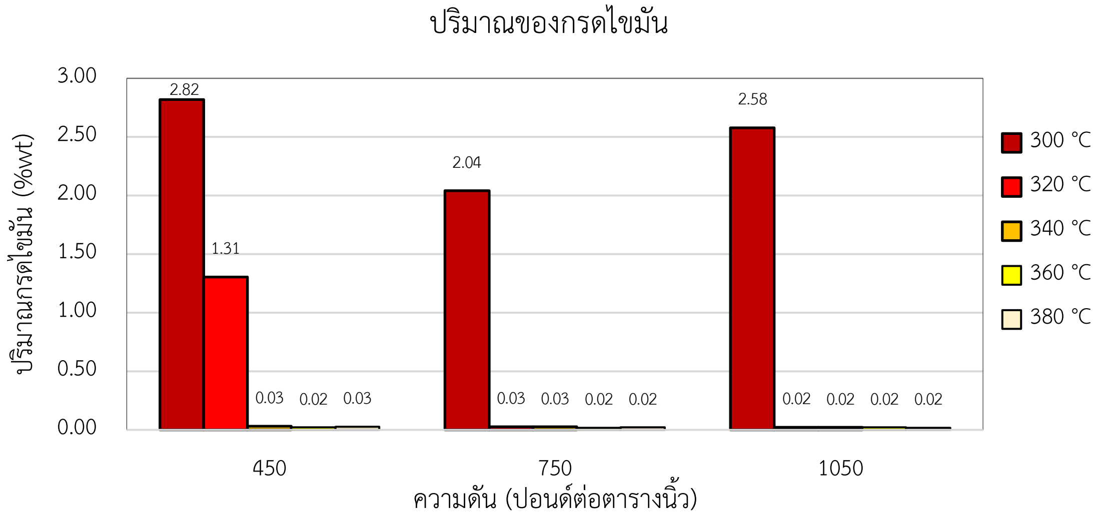
ตารางที่ 4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์	อุณหภูมิ				
ในผลิตภัณฑ์ที่ความดัน	300 ℃	320 ℃	340 ℃	360 ℃	380 ℃
450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	2.97	1.16	0.00	0.00	0.00
750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00
1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาต่อจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งสามารถอธิบายได้จากปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ จากผลการวิเคราะห์สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟดังรูปที่ 4.3.1 จากผลของค่าปริมาณของกรดไขมันพบว่าปริมาณของกรดไขมันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีค่าปริมาณของกรดไขมันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มากที่สุดในทุกความดัน และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 320 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้ค่าปริมาณของกรดลดลง โดยปริมาณของกรดไขมันที่อยู่ของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาที่สภาวะอุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นสภาวะที่ปริมาณของกรดไขมันยังมีค่าค่อนข้างสูงอยู่ และเมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า 340 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณของกรดไขมันมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แต่ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยามีค่ามากกว่า 320 องศาเซลเซียส จะทำให้ค่าปริมาณของกรดที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีเข้าใกล้ศูนย์ จากผลการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไป และที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

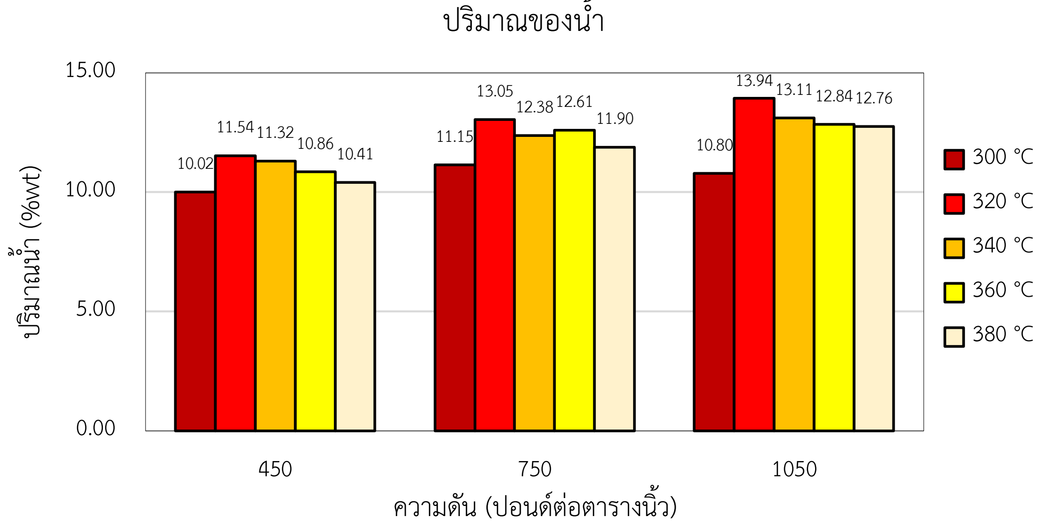
ตารางนิ้ว การเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 320 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

ปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์เป็นอีกค่าหนึ่งซึ่งสามารถอธิบายได้ถึงปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคน จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำสามารถนำมาสรุปเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.3.2 โดยผลของปริมาณน้ำสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์น้อยที่สุด ที่ทุกความดันในการทำปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาเป็น 320 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณน้ำของผลิตภัณฑ์มีค่ามากขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาขึ้น ปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ก็มีแนวโน้มลดลง เมื่อนำวิเคราะห์ผลของปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์และผลของปริมาณกรดไขมันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มาวิเคราะห์รวมกันสามารถสรุปได้ว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดี เนื่องจากปริมาณของกรดไขมันในผลิตภัณฑ์มีค่าสูง และปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์มีค่าต่ำ และที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 340 องศาเซลเซียส จะเป็นสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาจากกรดไขมันเป็นแอลเคนได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสังเกตได้จากค่าปริมาณของกรดไขมันที่เข้าใกล้ศูนย์ และที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเป็น 320 องศาเซลเซียส จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.3.2 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

เส้นทางของการเกิดปฏิกิริยาสามารถวิเคราะห์ได้โดยตรงจากผลปริมาณของแอลเคนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน สามารถนำมาสรุปผลเป็นไปดังตารางที่ 4.3.5 ที่ทุกความดันในการทดลองนั้นให้แนวโน้มของปริมาณแอลเคนที่เกิดขึ้นเหมือนกัน คือ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิที่ปริมาณของแอลเคนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด และที่อุณหภูมิในการทดลองมากกว่า 320 องศาเซลเซียส ปริมาณแอลเคนที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองขึ้น และปริมาณแอลเคนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีทิศทางตรงกันข้ามกัน คือเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองขึ้น ปริมาณของแอลเคนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีค่าน้อยลง จากผลจากการวิเคราะห์นี้สามารถสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน สามารถเกิดได้น้อยลงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิ และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดได้ดีขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาขึ้น

ตารางที่ 4.3.5 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

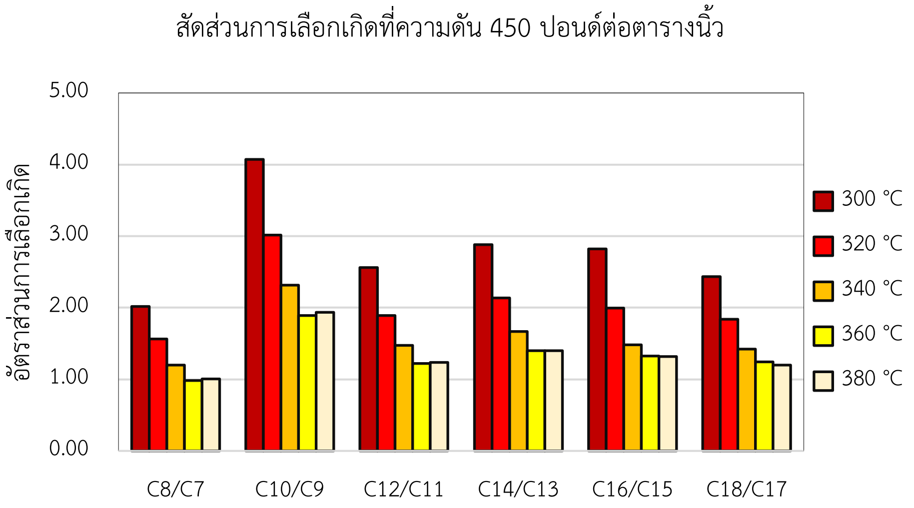
ความดัน	ปริมาณแอลเคนจากปฏิกิริยา	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
450 psi	DCO_2* (%yield)	15.16	22.98	29.89	32.90	33.12
	HDO** (%yield)	42.87	48.18	48.48	45.18	45.36
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	58.03	71.16	78.38	78.09	78.48
750 psi	DCO_2 (%yield)	15.91	20.41	24.06	26.45	28.86
	HDO (%yield)	47.38	58.13	53.13	50.60	47.36
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	63.29	78.53	77.19	77.05	76.22
1050 psi	DCO_2 (%yield)	14.06	17.74	21.62	24.03	25.73
	HDO (%yield)	51.03	62.05	56.77	52.88	51.70
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	65.09	79.79	78.39	76.91	77.43

*DCO_2 แสดงถึงปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน, **HDO แสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

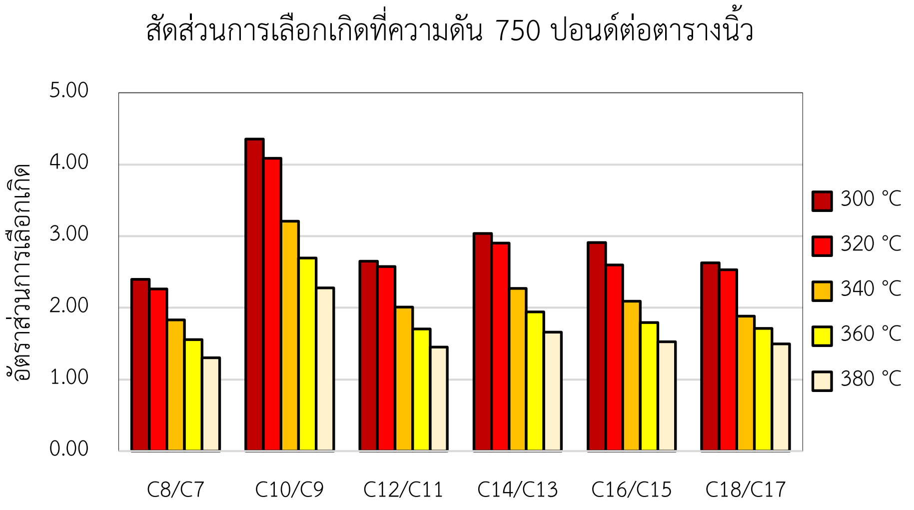
นอกจากการวิเคราะห์จากปริมาณแอลเคน อัตราส่วนการเลือกเกิดก็สามารถอธิบายได้ถึงเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยาได้เช่นกัน โดยกราฟอัตราส่วนการเลือกเกิดเป็นไปดังรูปที่ 4.3.3 ถึง รูปที่ 4.3.5 ซึ่งอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่เป็นเลขคู่ต่อแอลเคนที่เป็นเลขคี่ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของทุกคู่อัตราส่วนการเลือกเกิด จะมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะทำให้อัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่เป็นเลขคู่ต่อแอลเคนที่เป็นเลขคี่มีแนวโน้มลง และจากผลของอัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในรูปที่ 4.3.4 และ รูปที่ 4.3.5 พบว่าแนวโน้มของอัตราส่วนการเลือกเกิดมีแนวโน้มเหมือนกับอัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คือ อัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่เป็นเลขคู่ต่อแอลเคนที่เป็นเลขคี่มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และถึงแม้ว่าอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่เป็นเลขคู่ต่อแอลเคนที่เป็นเลขคี่จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของการทำปฏิกิริยาลดลง แต่ปริมาณแอลเคนที่เป็นเลขคู่ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาก็มีปริมาณมากกว่าปริมาณแอลเคนที่เป็นเลขคี่ที่ทุกสภาวะในการทดลอง จากผลที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันจะเกิดได้น้อยลง เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยสังเกตได้จากปริมาณแอลเคนที่เป็นเลขคู่มีค่าน้อยลง และอัตราส่วนการเลือกเกิดที่มีค่าลดลง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์นี้พบว่าผลเป็นในทิศทางเดียวกันวิเคราะห์ผลจากปริมาณของแอลเคน

จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ [16] Pavel Simacek et.al (2009) ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไฮโดรของน้ำมันเมล็ดเรพ สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์

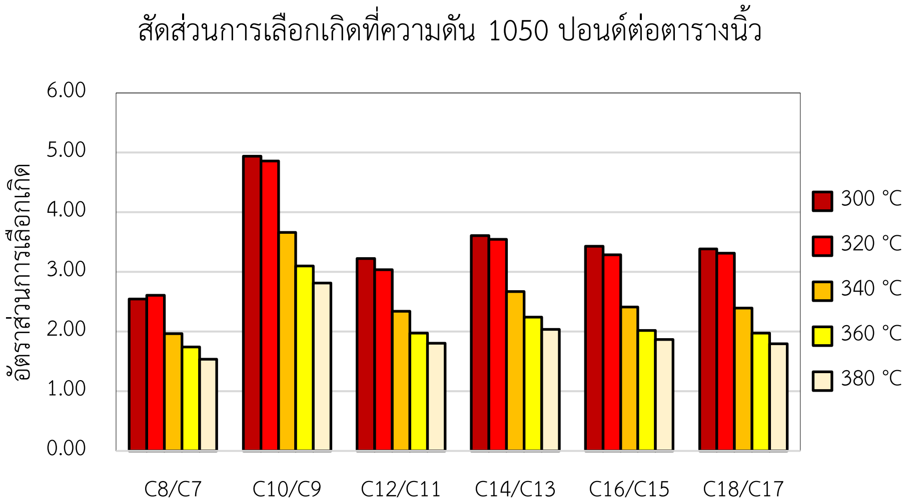
ชีวภาพที่อยู่ในช่วงของน้ำมันดีเซล ในการทดลองจะมีสภาวะของการทดลองอยู่ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 340 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 7 เมกะปาสคาล ในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหล โดยมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม พบว่าปริมาณของกรดไขมันลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนของการเลือกเกิดของแอลเคนที่เป็นเลขคู่ต่อแอลเคนที่เป็นเลขคี่จะลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3.3 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2



รูปที่ 4.3.4 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2



รูปที่ 4.3.5 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

จากการทดลองและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 (ปริมาณของนิกเกิล 3.81% และปริมาณของโลหะโมลิบดินัม 8.68%) ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งและปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนเกิดได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไป เนื่องจากไม่พบไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์และปริมาณกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ในส่วนของการทดลองที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งและปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนสามารถเกิดอย่างสมบูรณ์ได้ที่อุณหภูมิมากกว่า 320 องศาเซลเซียสขึ้นไป และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซีจีเนชันจะมีแนวโน้มในการเกิดที่ลดลง โดยสรุปได้จากปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่มีค่าลดลง เมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้น

4.3.2 ผลกระทบของความดัน

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ผลกระทบของความดันได้ เริ่มจากผลการวิเคราะห์ของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ดังตารางที่ 4.3.6 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์จะมีค่ามากที่สุดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งเป็นความดันที่น้อยที่สุดในการทดลองนี้ และปริมาณไตรกลีเซอไรด์จะเหลือน้อยที่สุดที่ความดันเท่ากับ 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วนั้นพบว่าไม่มีไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ แต่ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นั้นจะตรวจไม่พบไตรกลีเซอไรด์ที่อุณหภูมิเท่ากับ 340 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์ของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้น จะทำให้การปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเกิดได้ดีขึ้น

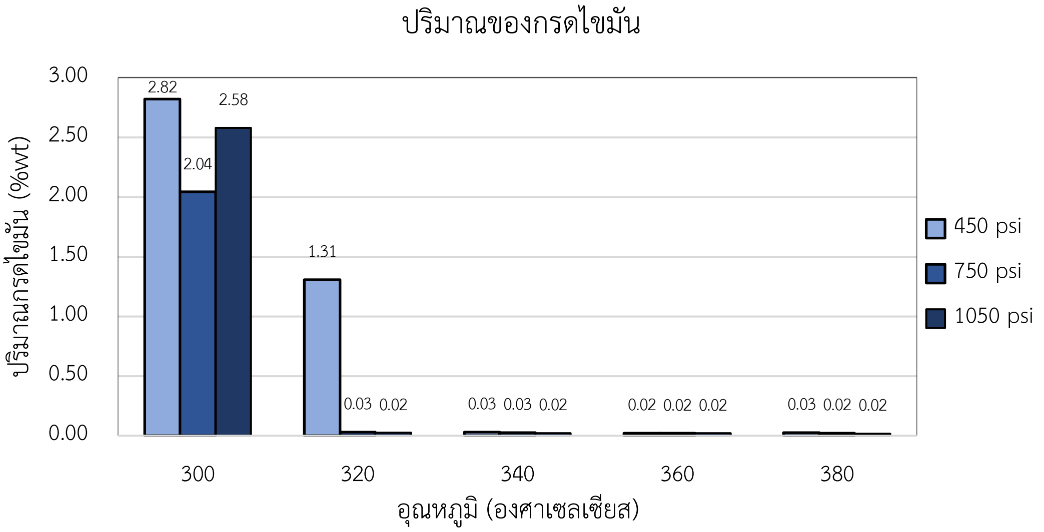
ตารางที่ 4.3.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)		
ในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ	450	750	1050
300 องศาเซลเซียส	2.97	0.53	0.90
320 องศาเซลเซียส	1.16	0.00	0.00
340 องศาเซลเซียส	0.00	0.00	0.00
360 องศาเซลเซียส	0.00	0.00	0.00
380 องศาเซลเซียส	0.00	0.00	0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในส่วนถัดไปการวิเคราะห์ผลของความดันต่อปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนซึ่งเป็นปฏิกิริยาต่อจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.3.1 ถึง ตารางที่ 4.3.3 สามารถนำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.3.6 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงถึงปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ โดยจากกราฟพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่นั้นจะลดลง เมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้น โดยปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีค่ามากที่สุด และปริมาณของกรดไขมันจะมีค่าน้อยที่สุดที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิในการทดลองเท่ากับ 320 องศาเซลเซียส ที่ความดันเท่ากับ 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงถึงการปฏิกิริยาซึ่งเปลี่ยนจากกรดไขมันเป็นแอลเคนอย่าง

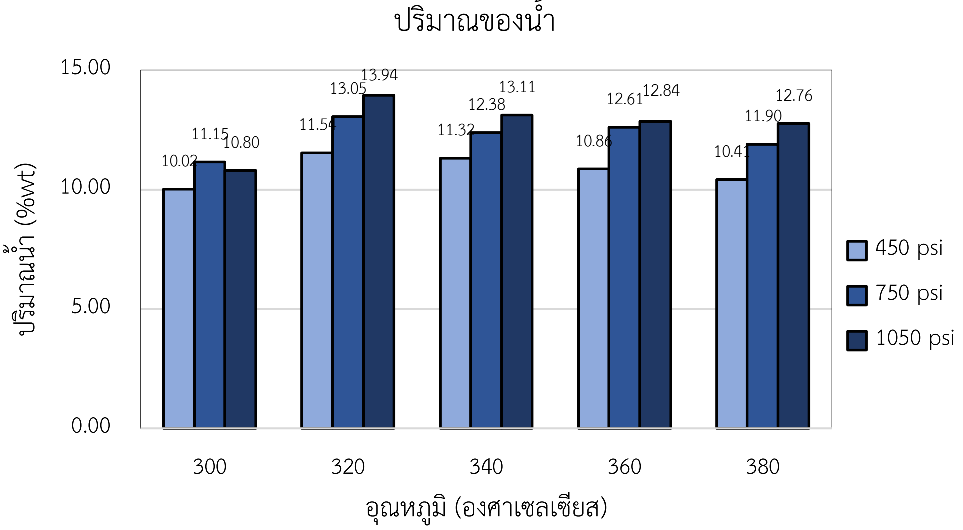
สมบูรณ์ แต่การทดลองที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ค่าของกรดไขมันจะเข้าใกล้ศูนย์ที่อุณหภูมิที่สูงกว่าที่อุณภูมิ 340 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่าการทำปฏิกิริยาที่ความดันสูงจะทำให้ปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนเกิดขึ้นได้ดีกว่า ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ข้างต้น



รูปที่ 4.3.6 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณกรดไขมันของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

ปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นสามารถนำมาอธิบายรวมกับผลของปริมาณกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ได้ และสามารถนำไปอธิบายรวมกับอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนในส่วนถัดไปได้ จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์สามารถนำผลของปริมาณน้ำมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 4.3.7 โดยผลของปริมาณน้ำพบว่าแนวโน้มของการเพิ่มความดันที่ทุกอุณหภูมิ ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่พบในผลิตภัณฑ์เหมือนกัน คือ เมื่อทำการเพิ่มความดันจะทำให้ปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีปริมาณน้ำมากที่สุด เมื่อนำข้อมูลนี้มาวิเคราะห์รวมกับปริมาณของกรดไขมัน พบว่าผลที่ได้นั้นสอดคล้องกันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีปริมาณของกรดไขมันที่น้อยที่สุด ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนเกิดได้ดีที่สุด ทำให้ปริมาณน้ำที่สภาวะนี้มีมากที่สุด และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 320 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเพิ่มความดันในการทดลองขึ้นพบว่ามีปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นมากขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับผลของกรดไขมันที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิในการทดลองนี้ปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีค่ามากที่สุด และลดลงเมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้นเป็น 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในส่วนของจากการเพิ่มความดันที่อุณหภูมิมากกว่า 340 องศาเซลเซียส พบว่าการเพิ่มความดันไม่ส่งผลต่อปริมาณของ

กรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งหมายถึงการเกิดปฏิกิริยาจากกรดไขมันไปเป็นแอลเคนเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์ โดยไม่ขึ้นกับความดันที่สภาวะอุณหภูมิมากกว่า 340 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3.7 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

จากผลของปริมาณแอลเคนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสามารถบอกถึงเส้นทางในการการเกิดปฏิกิริยาได้ จากตารางที่ 4.3.7 พบว่าปริมาณแอลเคนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความดันขึ้นที่ทุกอุณหภูมิการทดลอง ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับสมการเคมีของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่มีการใช้แก๊สไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มความดันของแก๊สไฮโดรเจนจะทำให้แก๊สไฮโดรเจนละลายลงไปทำปฏิกิริยาในวัฏภาคของน้ำมันได้มากขึ้นจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้มากขึ้น ในทางกลับกันปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดได้มากขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความดันในการทดลองขึ้น

ตารางที่ 4.3.7 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส

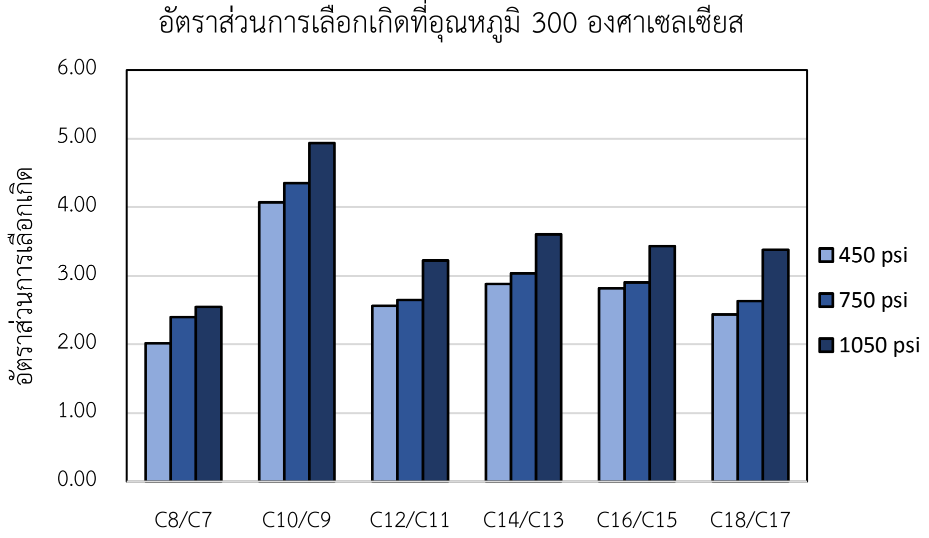
อุณหภูมิ	ปริมาณแอลเคนจากปฏิกิริยา	450 psi	750 psi	1050 psi
300 °C	DCO_2* (%yield)	15.16	15.91	14.06
	HDO** (%yield)	42.87	47.38	51.03
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	58.03	63.29	65.09
320 °C	DCO_2 (%yield)	22.98	20.41	17.74
	HDO (%yield)	48.18	58.13	62.05
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	71.16	78.53	79.79
340 °C	DCO_2 (%yield)	29.89	24.06	21.62
	HDO (%yield)	48.48	53.13	56.77
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	78.38	77.19	78.39
360 °C	DCO_2 (%yield)	32.90	26.45	24.03
	HDO (%yield)	45.18	50.60	52.88
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	78.09	77.05	76.91
380 °C	DCO_2 (%yield)	33.12	28.86	25.73
	HDO (%yield)	45.36	47.36	51.70
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	78.48	76.22	77.43

*DCO_2 แสดงถึงปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน, **HDO แสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

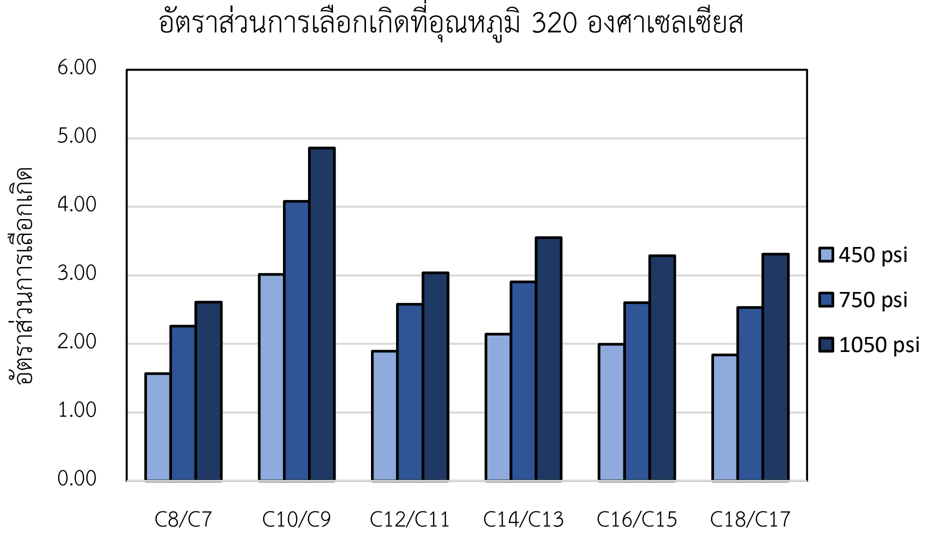
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เส้นทางของปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคน สามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนการเลือกเกิดได้เช่นกัน ซึ่งกราฟของอัตราส่วนการเลือกเกิดเป็นไปดังรูปที่ 4.3.8 ถึง รูปที่ 4.3.12 จากกราฟอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่ทุกอุณหภูมิมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อทำการเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น จะทำให้อัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนเลขคู่ต่อแอลเคนเลขคี่เพิ่มขึ้น และผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นเหมือนกันทุกคู่ของแอลเคนที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.3.8 ถึง รูปที่ 4.3.12 จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันนั้นเกิดได้ดีขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้นซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนการเลือกเกิดนั้นมีค่ามากขึ้น จากผลการวิเคราะห์ที่ได้นั้นเมื่อนำมาวิเคราะห์รวมกับผลการวิเคราะห์ของปริมาณน้ำ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ด้วย ดังนั้นถ้าหากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้ดีขึ้น

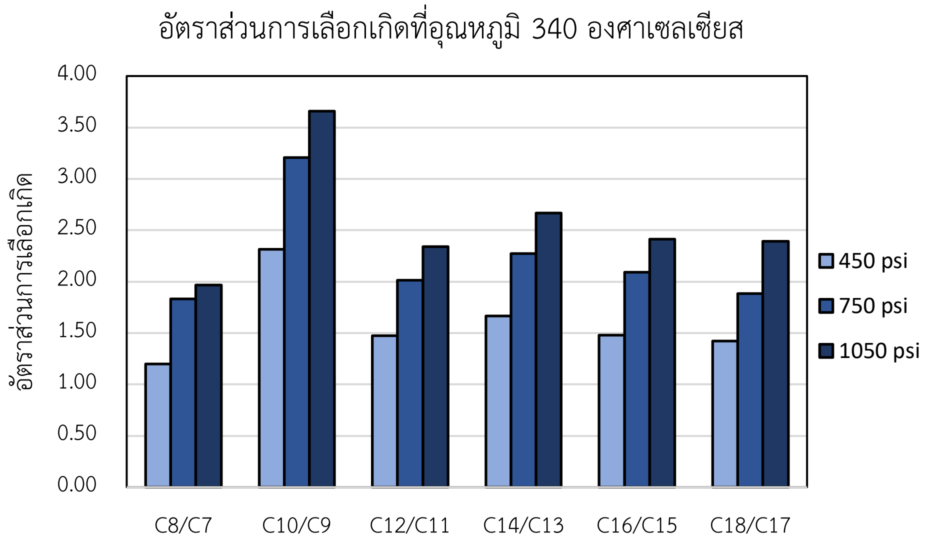
ปริมาณน้ำก็จะมากขึ้นด้วย ซึ่งผลที่ได้จากน้ำเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ มีปริมาณน้ำมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความดันในการทดลองขึ้น



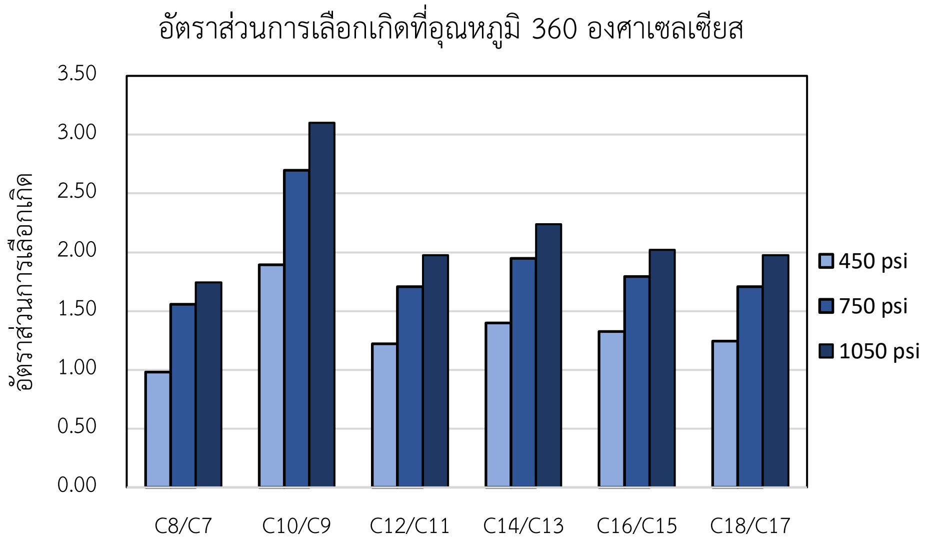
รูปที่ 4.3.8 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2



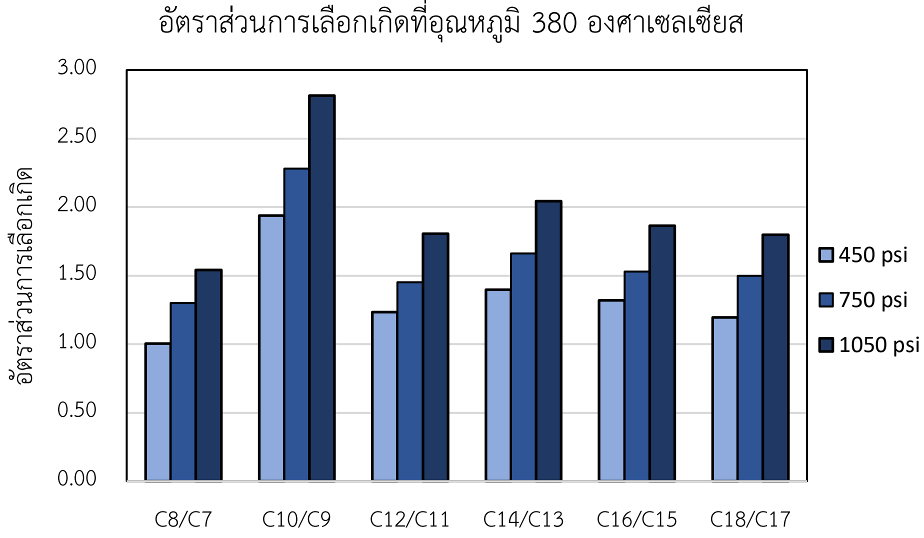
รูปที่ 4.3.9 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2



รูปที่ 4.3.10 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2



รูปที่ 4.3.11 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2



รูปที่ 4.3.12 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2

จากการวิเคราะห์ข้างต้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ [18] Atthapon Srifa et.al. (2014) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตน้ำมันดีเซลไบโอไฮโดรจีเนตด้วยการไฮโดรทรีตติ้งน้ำมันปาล์มบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมซัลไฟด์ ซึ่งศึกษาโดยการใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลต่อเนื่องแบบเบดนิ่ง ที่อุณหภูมิ 270 ถึง 420 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 15 ถึง 80 บาร์ และ พบว่าที่ความดัน 15 บาร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เหลือกรดปาล์มิติก และกรดสเตียริกอยู่ เป็นการแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนเกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนไปทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เพียงพอ และเมื่อความดันของแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 30 บาร์ ไปเป็น 80 บาร์ พบว่าปริมาณของแอลเคนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดนดีออกซิจีเนชันมีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้ามแอลเคนที่ได้จากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชันนั้นมีค่าน้อยลง

จากผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 จะอยู่ที่สภาวะอุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส และความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยที่สภาวะนี้จะเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์แอลเคนรวมมากที่สุด มีปริมาณของแอลเคนเลขคู่มากที่สุด และเป็นสภาวะที่ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเกิดได้สมบูรณ์ และมีกรดไขมันเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ในปริมาณต่ำ

4.4 ผลการทดลองกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3

ผลการวิเคราะห์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3 ซึ่งเป็นตัวที่มีปริมาณของนิกเกิล 5.13% และปริมาณของโลหะโมลิบดินัม 12.84% เป็นไปตามตางรางที่ 4.4.1 ถึง ตารางที่ 4.4.3 โดยเป็นผลจากการทำการทดลองที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อต่รางนิ้ว

ตารางที่ 4.4.1 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3 ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	28.42	39.90	79.32	79.00	79.42
C7	0.00	0.44	0.80	0.78	0.63
C8	0.55	0.88	1.59	1.59	1.35
C9	0.15	0.25	0.58	0.55	0.44
C10	0.74	1.00	1.99	1.99	1.82
C11	3.38	4.68	10.52	9.92	8.61
C12	8.81	11.91	22.66	22.96	22.67
C13	1.26	1.92	4.08	3.92	3.79
C14	3.97	5.02	9.78	10.00	10.89
C15	0.70	1.04	2.36	2.35	2.49
C16	1.96	3.18	5.38	5.36	6.06
C17	1.80	2.84	6.90	6.38	6.45
C18	5.10	6.72	12.70	13.21	14.23
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	14.38	4.79	0.41	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	2.82	3.27	1.18	0.33	0.10
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	4.52	6.76	11.97	12.81	12.92
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.85	0.82	0.75	0.75	0.74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.4.2 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3 ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	40.99	61.68	79.18	79.08	78.46
C7	0.10	0.47	0.56	0.58	0.57
C8	0.96	1.35	1.53	1.42	1.50
C9	0.19	0.31	0.41	0.41	0.41
C10	1.19	1.65	2.00	1.86	2.00
C11	4.15	5.96	7.61	7.86	7.75
C12	13.61	19.72	24.48	23.26	24.55
C13	1.45	2.34	3.08	3.28	3.19
C14	5.72	8.45	11.10	10.91	11.23
C15	0.74	1.30	1.82	2.19	1.97
C16	3.08	4.87	6.02	6.03	5.89
C17	2.02	3.79	5.35	5.61	5.00
C18	7.78	11.45	15.23	15.66	14.38
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	11.38	1.13	0.23	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	3.52	3.74	0.76	0.18	0.09
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.36	8.86	12.67	13.12	13.71
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.83	0.80	0.75	0.74	0.74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.4.3 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3 ที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิ	300 °C	320 °C	340 °C	360 °C	380 °C
แอลเคน (%yield)	57.73	68.98	80.57	79.19	78.18
C7	0.33	0.44	0.53	0.55	0.49
C8	1.20	1.58	1.81	1.77	1.60
C9	0.24	0.31	0.37	0.38	0.36
C10	1.60	1.96	2.26	2.21	2.13
C11	5.38	5.66	6.75	6.72	6.74
C12	19.52	23.12	26.90	25.72	25.69
C13	1.93	2.22	2.64	2.65	2.74
C14	8.18	9.89	11.84	11.46	11.60
C15	0.97	1.21	1.49	1.68	1.65
C16	4.52	5.45	6.15	6.07	5.99
C17	2.66	3.62	4.13	4.30	4.30
C18	11.21	13.52	15.69	15.70	14.88
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	9.11	1.00	0.40	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	2.99	1.92	0.63	0.14	0.12
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.08	10.16	12.67	14.21	14.88
ความหนาแน่น (กรัมต่อตารางเซนติเมตร)	0.81	0.80	0.76	0.75	0.75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิ

ปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง จากตารางที่ 4.4.1 ถึง ตารางที่ 4.4.3 สามารถนำผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์มาสรุปเป็นตารางของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ได้ ดังตารางที่ 4.4.4 จากผลของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณณ์พบว่า ที่ทุกความดันในการทดลองแนวโน้มของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มที่เหมือนกัน คือ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มากที่สุด จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่น้อยลง ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่มีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในปริมาณที่น้อย และที่ในการทำปฏิกิริยามากกว่าอุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสขึ้นไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไม่มีไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ จากผลของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 จะทำปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งได้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิมากกว่า 360 องศาเซลเซียส ซึ่งสรุปได้จากการที่ไม่พบไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์

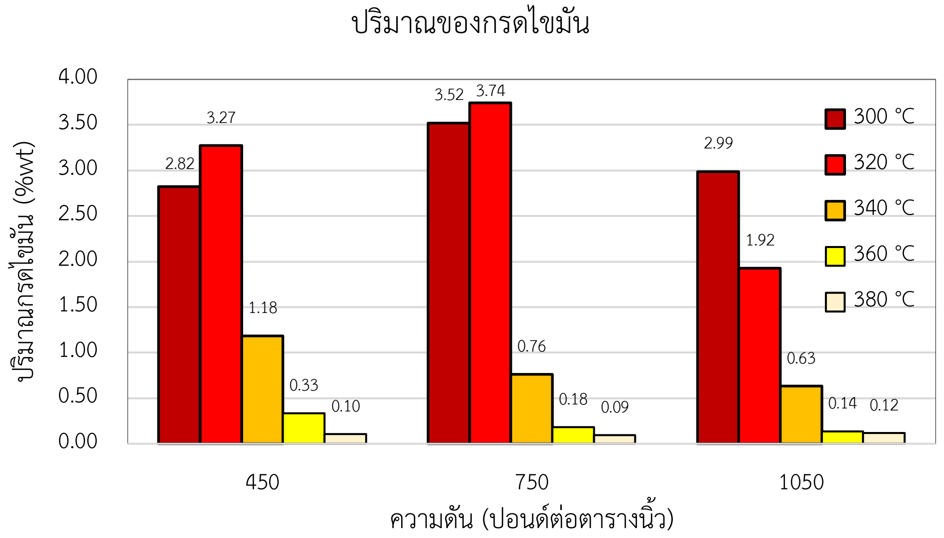
ตารางที่ 4.4.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ ในผลิตภัณฑ์ที่ความดัน	อุณหภูมิ				
	300 ℃	320 ℃	340 ℃	360 ℃	380 ℃
450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	14.38	4.79	0.41	0.00	0.00
750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	11.38	1.13	0.23	0.00	0.00
1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	9.11	1.00	0.40	0.00	0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปฏิกิริยาต่อมาที่เกิดขึ้นต่อจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง คือ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคน ซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน โดยค่าของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์สามารถบอกได้ถึงการเปลี่ยนแปลงโดยรวมของทั้ง 2 ปฏิกิริยา จากตารางที่ 4.4.1 ถึง ตารางที่ 4.4.3 สามารถนำมาสรุปเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.4.1 ซึ่งผลการทดลองที่ได้พบว่าที่ความดัน 450 และ 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปริมาณของกรดไขมันที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส จะมีค่ามากที่สุด และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิถึง 340 องศาเซลเซียส ปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์จะน้อยลงอย่างมาก และปริมาณของกรดไขมันจะเหลือน้อยที่สุดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ในส่วนของที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปริมาณของกรดไขมันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะมีค่ามากที่สุด และมีค่าน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึง 320 องศาเซลเซียส และในทำนองเดียวกันกับการทดลองที่ความดัน 450 และ 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว คือ ปริมาณของกรด

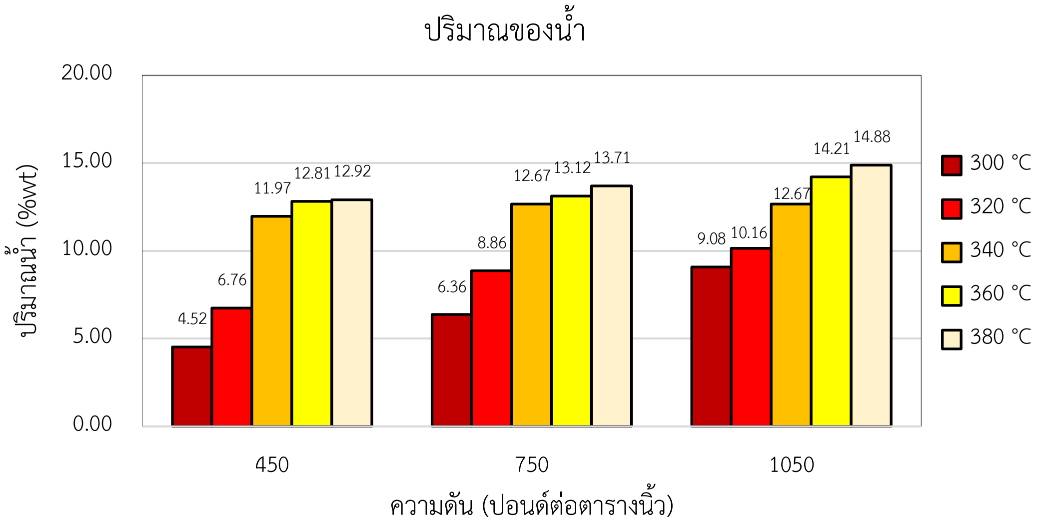
ไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์จะน้อยลงอย่างมากที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไป และค่าของกรดไขมันที่เหลืออยู่ก็มีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิ 360 และ 380 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่น้อยที่สุดที่ความดันนี้ จากผลที่ได้มาจากการทดลองสามารถนำมาสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองขึ้น แนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาในการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนมีค่าสูงขึ้น เมื่อนำผลที่ได้มารวมกับผลของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่นั้น สามารถสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีทั้งปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ และปริมาณของกรดไขมันเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ในปริมาณมาก ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง และปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนที่เกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมินี้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองถึง 360 องศาเซลเซียส จะพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ และปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนเกิดขึ้นได้ดี เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ และมีปริมาณของกรดไขมันที่เหลือในปริมาณน้อย



รูปที่ 4.4.1 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของกรดไขมันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

ปริมาณของน้ำเป็นอีกค่าหนึ่งที่สามารถถึงปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนได้เช่นกัน ซึ่งผลปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นสามารถนำมาสรุปเป็นกราฟรูปที่ 4.4.2 จากกราฟพบว่าปริมาณของน้ำที่อยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิที่มีปริมาณน้ำน้อยที่สุด และเมื่อทำการเพิ่ม

อุณหภูมิจาก 320 องศาเซลเซียส เป็น 340 องศาเซลเซียส จะทำให้ปริมาณน้ำนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก จากผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถสรุปได้ว่า ปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนสามารถเกิดของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 นั้นเกิดได้ไม่ดีที่อุณหภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียส เนื่องจากน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีปริมาณน้อย ซึ่งผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณของกรดไขมันในผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.4.2 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่อปริมาณของน้ำที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

จากผลของปริมาณแอลเคนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาสามารถนำมาวิเคราะห์ในส่วนของเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยาได้ ผลการวิเคราะห์ที่ได้เป็นไปดังตารางที่ 4.4.5 จากการวิเคราะห์ผลการทดลองพบว่าที่ทุกความดันในการทดลอง การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียสจะเป็นอุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์มีปริมาณของแอลเคนเกิดน้อย ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลของปริมาณไตรกลีเซอไรด์และปริมาณของกรดไขมันข้างต้น คือ ที่อุณหภูมิในการทดลองอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 320 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงที่เกิดทั้งปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งและปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนได้ไม่ดี ต่อมาในช่วงอุณหภูมิในการทดลองมากกว่า 340 องศาเซลเซียส จะเป็นช่วงที่มีปริมาณของแอลเคนที่เกิดขึ้นในปริมาณมาก จากผลการเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส พบว่าที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิที่ให้ปริมาณของแอลเคนทั้งหมดและแอลเคนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากที่สุด ในส่วนของการทำปฏิกิริยาที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วนั้น ที่อุณหภูมิ 340 องศา

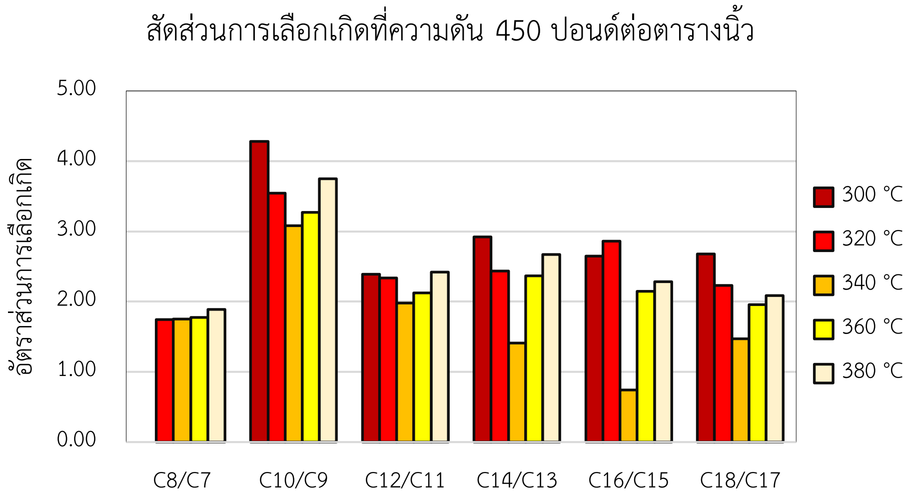
เซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิที่ให้ทั้งปริมาณของแอลเคนทั้งหมด และปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากที่สุด

ตารางที่ 4.4.5 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

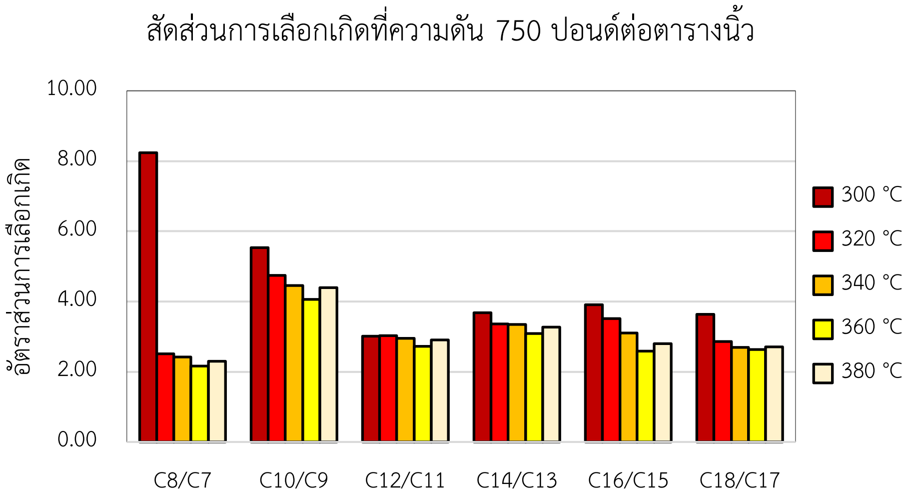
ความดัน	ปริมาณแอลเคนจากปฏิกิริยา	300 ℃	320 ℃	340 ℃	360 ℃	380 ℃
450 psi	DCO_2* (%yield)	7.29	11.18	25.23	23.89	22.40
	HDO** (%yield)	21.13	28.72	54.08	55.11	57.02
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	28.42	39.90	79.32	79.00	79.42
750 psi	DCO_2 (%yield)	8.65	14.17	18.82	19.93	18.90
	HDO (%yield)	32.34	47.50	60.36	59.14	59.56
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	40.99	61.68	79.18	79.08	78.46
1050 psi	DCO_2 (%yield)	11.50	13.45	15.91	16.27	16.28
	HDO (%yield)	46.23	55.53	64.67	62.92	61.89
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	57.73	68.98	80.57	79.19	78.18

*DCO_2 แสดงถึงปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน, **HDO แสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

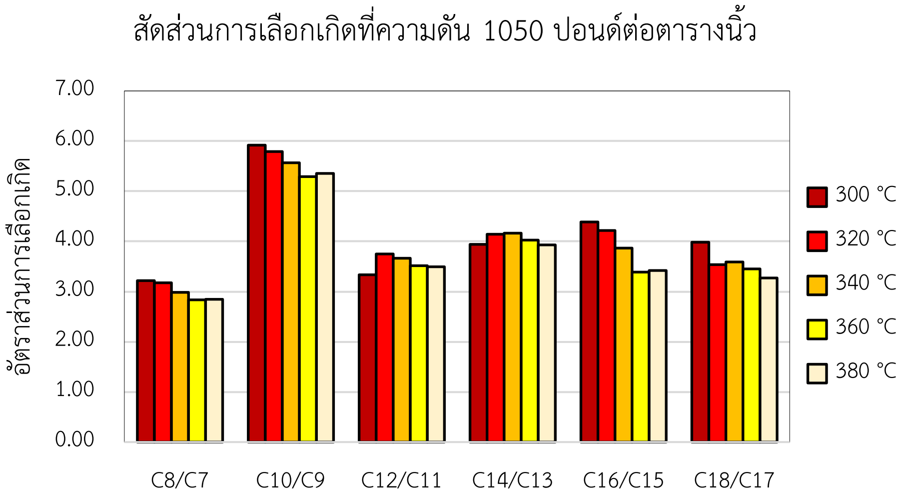
อัตราส่วนการเลือกเกิดสามารถอธิบายถึงเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยอัตราส่วนการเลือกเกิดสามารถนำมาทำเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 4.4.3 ถึง รูปที่ 4.4.5 จากกราฟพบว่าที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วนั้น แนวโน้มของอัตราส่วนการเลือกเกิดที่คล้ายกัน คือ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาขึ้นจะทำให้อัตราส่วนการเลือกเกิดลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันนั้นเกิดได้น้อยลง เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาขึ้น แต่ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แนวโน้มของอัตราส่วนการเลือกเกิดในช่วงแรกจะลดลง เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นจากอุณหภูมิ 300 ถึง 340 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 360 ถึง 380 องศาเซลเซียส แนวโน้มของอัตราส่วนการเลือกเกิดจะมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.4.3 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3



รูปที่ 4.4.4 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3



รูปที่ 4.4.5 กราฟแสดงผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 (ปริมาณของนิกเกิล 5.13% และปริมาณของโลหะโมลิบดินัม 12.84%) พบว่าที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 300 และ 320 องศาเซลเซียส ที่ทุกความดัน ปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งทั้งหมดเกิดขึ้นได้ไม่ดี เนื่องจากมีปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นการแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งที่เกิดได้ไม่ดี ปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีอยู่ในปริมาณที่มาก และปริมาณของแอลเคนที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่น้อย ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่ไม่ดี และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 340 องศาเซลเซียส พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเกิดในปริมาณมากขึ้นจากที่อุณหภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในปริมาณต่ำ และปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามากกว่า 360 องศาเซลเซียส ในส่วนของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันที่เกิดขึ้นนั้นจะเกิดได้ดีขึ้น เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาขึ้น โดยสังเกตได้จากปริมาณของกรดไขมันที่ลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองขึ้นตั้งแต่ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส ที่ทุกความดันในการทดลอง ในส่วนของเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยานั้น ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว มีแนวโน้มไม่เหมือนกับการทำปฏิกิริยาที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นั้นพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส นั้นมีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากขึ้น แต่ที่ความดัน 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นั้นมีแนวโน้มที่

ต่างกัน โดยที่ความดัน 750 และ1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาขึ้นมีแนวโน้มทำให้เกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันมากขึ้น

4.4.2 ผลกระทบของความดัน

จากผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์สามารถนำมาสรุปในส่วนของผลกระทบของความดันได้ โดยผลกระทบของความดันที่ส่งผลต่อปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์เป็นไปดังตารางที่ 4.4.6 จากตารางพบว่าปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาอุณหภูมิ 300 ถึง 320 องศาเซลเซียส มีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือ ที่ความดันต่ำผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มากที่สุด และเมื่อเพิ่มความดันขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่ลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเป็นปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา และเมื่อทำการเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาก็จะทำให้ปริมาณของไฮโดรเจนละลายลงไปในเฟสของเหลวทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ที่อุณหภูมิในการทดลองเท่ากับ 340 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งจะเกิดใกล้สมบูรณ์ทำให้ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นมีค่าน้อย และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 มากกว่าอุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส จะเป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งได้สมบูรณ์โดยสามารถสังเกตได้จากการที่ไม่มีไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยานี้

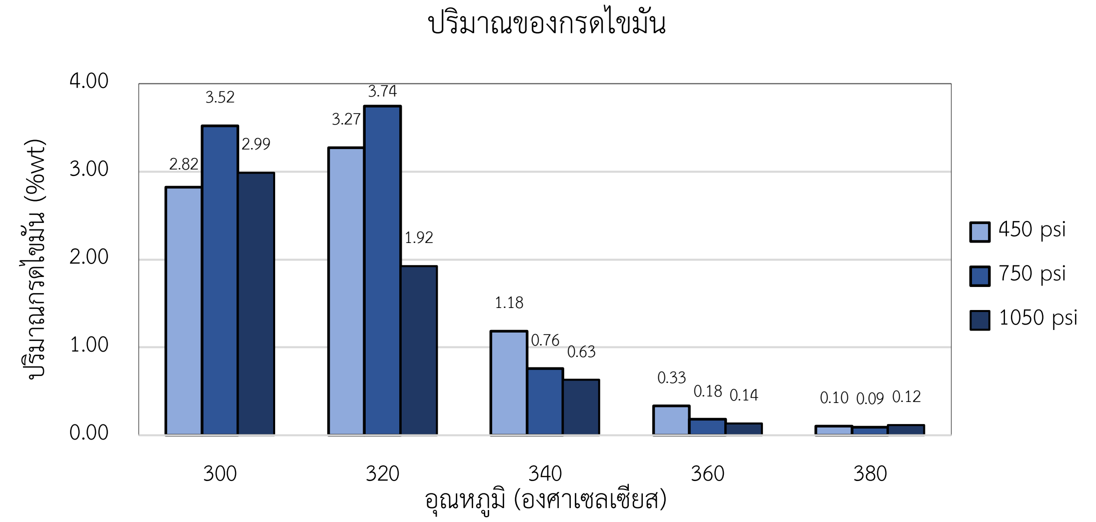
ตารางที่ 4.4.6 ผลการวิเคราะห์ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

ปริมาณของไตรกลีเซอไรด์	ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)		
ในผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ	450	750	1050
300 องศาเซลเซียส	14.38	11.38	9.11
320 องศาเซลเซียส	4.79	1.13	1.00
340 องศาเซลเซียส	0.41	0.23	0.40
360 องศาเซลเซียส	0.00	0.00	0.00
380 องศาเซลเซียส	0.00	0.00	0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปฏิกิริยาถัดมาจากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งจะเป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งไปเป็นแอลเคน ซึ่งปฏิกิริยาผลจากการเปลี่ยนกรดไขมันเป็นแอลเคนนั้นสามารถสรุปโดยใช้ปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มาใช้ในการสรุปได้ โดยผลที่ได้เป็นไปดังกราฟในรูปที่ 4.4.6 จากกราฟพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำ

ปฏิกิริยาที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีปริมาณของกรดไขมันเหลือมากที่สุด เช่นเดียวกันกับในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเท่ากับ 320 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส จะมีแนวโน้มของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์เหมือนกัน คือ เมื่อเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้นจะทำให้ปริมาณของกรดไขมันลดลง



รูปที่ 4.4.6 ผลกระทบของความดันต่อปริมาณกรดไขมันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันทั้ง 2 ปฏิกิริยาสามารถเปลี่ยนกรดไขมันที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งไปเป็นแอลเคนได้ โดยแอลเคนที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นไปดังตารางที่ 4.4.7 จากตารางพบว่าที่อุณหภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียส ปริมาณแอลเคนที่เกิดขึ้นแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น และที่อุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเพิ่มความดันขึ้นปริมาณแอลเคนจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และแอลเคนที่ได้จากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันก็มีแนวโน้มในทิศทางตรงกันข้ามกัน โดยปริมาณแอลเคนจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับสมการเคมีของปฏิกิริยาทั้ง 2 ปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันนั้นเป็นปฏิกิริยาที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มความดันขึ้นปฏิกิริยาจึงมีแนวโน้มที่จะเกิดไปทางปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากกว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

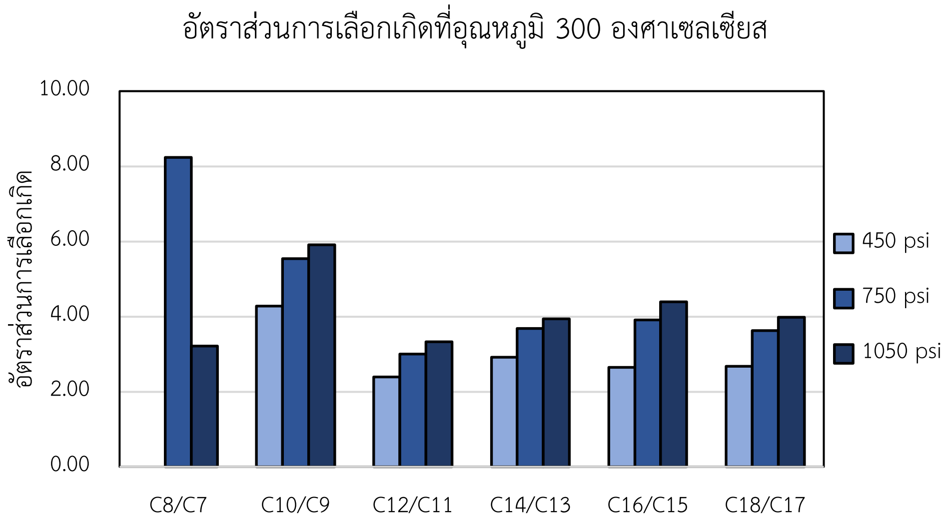
ตารางที่ 4.4.7 ปริมาณของแอลเคนจากปฏิกิริยาดีออกซีจีเนชัน และดีคาร์บอกซิเลชันที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

อุณหภูมิ	ปริมาณแอลเคนจากปฏิกิริยา	450 psi	750 psi	1050 psi
300 °C	DCO_2* (%yield)	7.29	8.65	11.50
	HDO** (%yield)	21.13	32.34	46.23
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	28.42	40.99	57.73
320 °C	DCO_2 (%yield)	11.18	14.17	13.45
	HDO (%yield)	28.72	47.50	55.53
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	39.90	61.68	68.98
340 °C	DCO_2 (%yield)	25.23	18.82	15.91
	HDO (%yield)	54.08	60.36	64.67
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	79.32	79.18	80.57
360 °C	DCO_2 (%yield)	23.89	19.93	16.27
	HDO (%yield)	55.11	59.14	62.92
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	79.00	79.08	79.19
380 °C	DCO_2 (%yield)	22.40	18.90	16.28
	HDO (%yield)	57.02	59.56	61.89
	ปริมาณแอลเคนทั้งหมด (%yield)	79.42	78.46	78.18

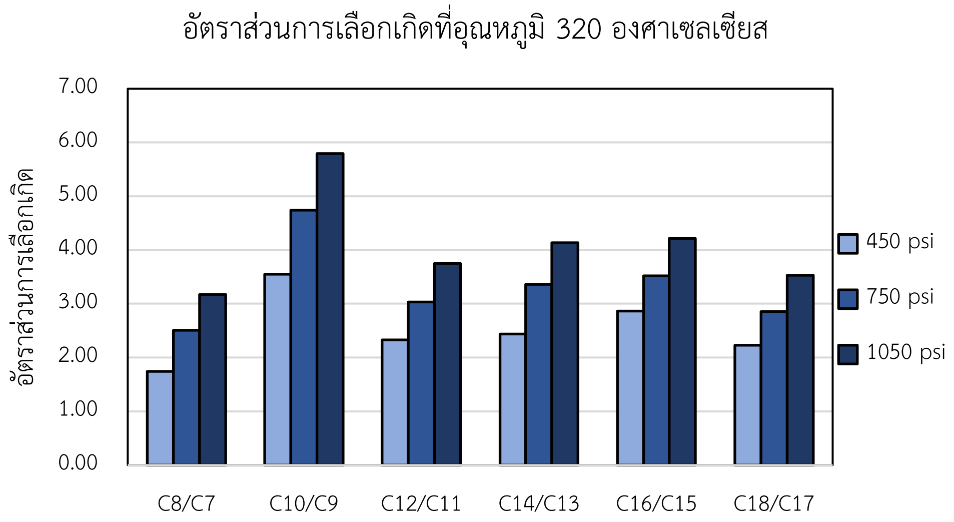
*DCO_2 แสดงถึงปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน, **HDO แสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

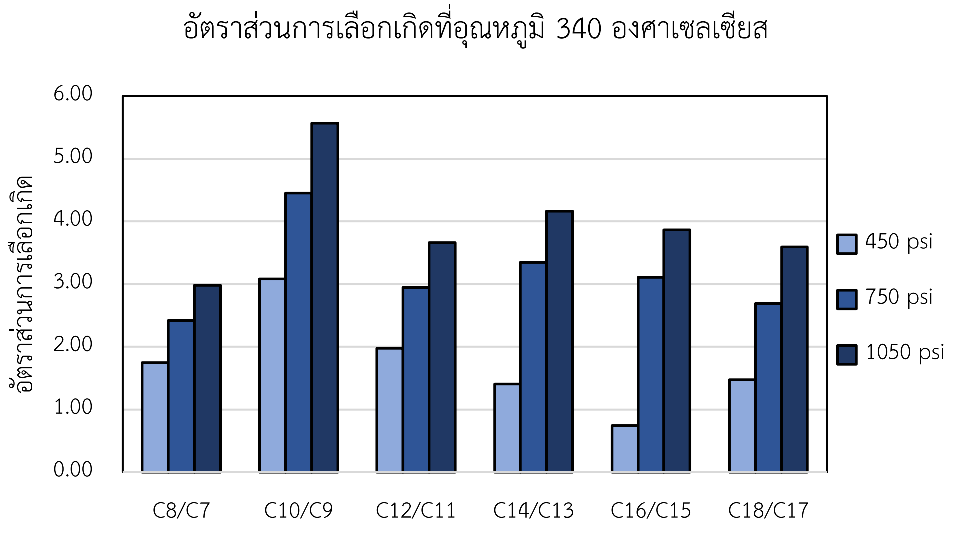
นอกจากปริมาณของแอลเคนรวมที่เกิดขึ้น อัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนเลขคู่ต่อแอลเคนเลขคี่ก็สามารถบอกเส้นทางในการเกิดปฏิกิริยาได้เช่นกัน ผลของอัตราส่วนการเลือกเกิดเป็นไปดังกราฟในรูปที่ 4.4.7 ถึง รูปที่ 4.4.11 จากผลที่ได้พบว่าแนวโน้มของอัตราส่วนการเลือกเกิดส่วนมากจะมีแนวโน้มที่เหมือนกัน เมื่อทำการเพิ่มความในการทำปฏิกิริยาขึ้นจะทำให้อัตราส่วนการเลือกเกิดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยแนวโน้มเป็นเช่นนี้ที่ทุกอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา จากผลการวิเคราะห์ของอัตราส่วนการเลือกเกิดสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้มากขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น โดยสังเกตได้จากค่าของอัตราส่วนการเลือกเกิดที่มากขึ้น โดยผลที่ได้นั้นสอดคล้องกับผลที่ได้จากปริมาณแอลเคนในส่วนข้างต้น



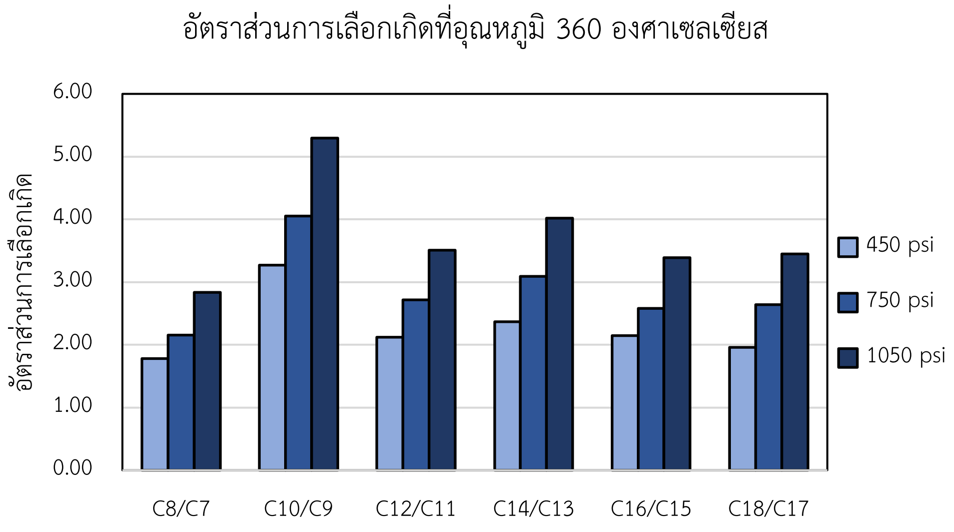
รูปที่ 4.4.7 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3



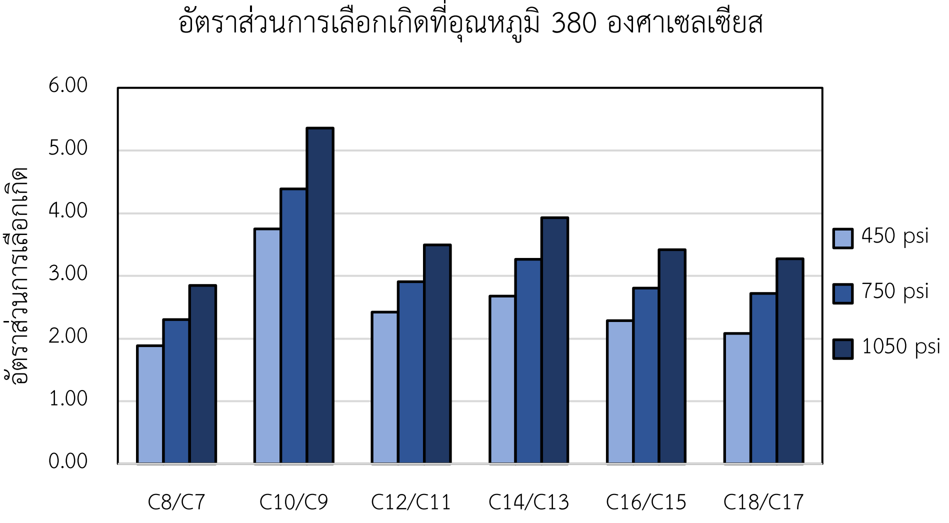
รูปที่ 4.4.8 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3



รูปที่ 4.4.9 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3



รูปที่ 4.4.10 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3



รูปที่ 4.4.11 ผลกระทบของความดันต่ออัตราส่วนการเลือกเกิดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3

จากผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งนั้นจะเป็นสภาวะที่อุณหภูมิมากกว่า 360 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ไม่มีไตรกลีเซอไรด์เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ และมีปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ในปริมาณต่ำ โดยที่สภาวะอุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นสภาวะที่ผลิตภัณฑ์มีปริมาณของแอลเคนมากที่สุด และสภาวะอุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส และความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วจะเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณแอลเคนที่เป็นเลขคู่มากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.5 ผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมต่างกัน

การทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม ตัวที่ 1 ถึง 3 นั้นเป็นการเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ปรับเปลี่ยนปริมาณรวมของโลหะนิกเกิล และโมลิบดินัมในตัวเร่งปฏิกิริยา โดยสัดส่วนของปริมาณโลหะนิกเกิลต่อโลหะโมลิบดินัมนั้นมีค่าคงที่ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมทั้ง 3 ตัวนั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่ใช้ในอุตสาหกรรม โดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 จะมีปริมาณของโลหะรวมน้อยที่สุด ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2 จะมีปริมาณโลหะรวมมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 และตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 จะมีปริมาณรวมมากที่สุดดังตารางที่ 4.5.1

ตารางที่ 4.5.1 รายละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

รายละเอียดของตัวเร่งปฏิกิริยา	ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1	ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2	ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3
ปริมาณธาตุ Ni (%)	2.86	3.81	5.13
ปริมาณธาตุ Mo (%)	7.21	8.68	12.84
อัตราส่วนของ Ni : Mo	0.40	0.44	0.40
พื้นที่ผิวบีอีที (ตารางเมตรต่อกรัม)	168.83	237.64	225.27
ปริมาตรของรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม)	0.82	0.65	0.35
รัศมีของรูพรุน (อังสตรอม)	87.30	61.89	39.10

จากผลการทดลองทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ตัวสามารถนำมาสรุปผลกระทบของความดันได้ดังตารางที่ 4.5.2 ซึ่งสภาวะของอุณหภูมิที่เลือกมาเปรียบเทียบผลกระทบของความดันจะเลือกสภาวะที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาทั้งหมดได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ และค่ากรดของผลิตภัณฑ์อยู่ในปริมาณต่ำ จากตารางที่ 30 พบว่าผลกระทบของความดันต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ตัวมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยสังเกตจากปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา และอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนคาร์บอนอะตอมเลขคู่ต่อเลขคี่ ในส่วนของปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ตัวนั้นจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น และอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนเลขคู่ต่อเลขคี่ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณของน้ำ โดยอัตราส่วนการเลือกเกิดจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มความดันในการทำปฏิกิริยาขึ้น ซึ่งแนวโน้มของทั้ง 2 ค่านี้สามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันนั้นเกิดได้ดีขึ้นเมื่อความดันในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ตัว

ตารางที่ 4.5.2 ผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณโลหะต่างกัน ที่สภาวะความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม	ตัวที่ 1			ตัวที่ 2			ตัวที่ 3		
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	450	750	1050	450	750	1050	450	750	1050
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	360	360	360	360	360	360	360	360	360
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.33	0.18	0.14
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.63	11.40	11.98	10.86	12.61	12.84	12.81	13.12	14.21
ปริมาณแอลเคน (%yield)	77.28	77.63	76.62	82.73	79.78	79.28	79.00	79.08	79.19
อัตราส่วนการเลือกเกิด									
C12/C11	0.93	1.41	1.71	1.22	1.71	1.98	2.12	2.72	3.51
C14/C13	1.07	1.65	1.95	1.40	1.95	2.24	2.37	3.09	4.02
C16/C15	1.07	1.54	1.87	1.33	1.79	2.02	2.14	2.58	3.39
C18/C17	0.95	1.49	1.77	1.24	1.71	1.97	1.96	2.64	3.45

จากผลการทดลองของปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณของโลหะต่างกันทั้ง 3 ตัวในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียสนั้น พบว่า มีทั้งช่วงที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งได้อย่างสมบูรณ์ และไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมทั้ง 3 ตัวนั้นจะวิเคราะห์โดยแบ่งเป็นช่วงการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างไม่สมูรณ์ และช่วงการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ ในการเปรียบเทียบการทำปฏิกิริยาในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างไม่สมบูรณ์นั้น สภาวะที่ใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองจะเป็นการทดลองที่อุณหภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างไม่สมบูณ์ และความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เนื่องจากเป็นความดันที่เกิดปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งได้ดีที่สุด และความดันไม่มีผลต่อผลกระทบของอุณหภูมิ โดยผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 4.5.3

ตารางที่ 4.5.3 ผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณโลหะต่างกัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 300 และ 320 องศาเซลเซียส

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม	ตัวที่ 1		ตัวที่ 2		ตัวที่ 3	
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	1050	1050	1050	1050	1050	1050
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	300	320	300	320	300	320
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	1.20	0.06	0.90	0.00	9.11	1.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	3.41	0.54	2.58	0.02	2.99	1.92
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.32	12.86	10.80	13.94	9.08	10.16
ปริมาณแอลเคน (%yield)	65.09	74.42	62.75	79.79	57.73	68.98
อัตราส่วนการเลือกเกิด						
C12/C11	3.00	2.81	3.22	3.04	3.33	3.75
C14/C13	3.15	3.10	3.61	3.55	3.94	4.14
C16/C15	3.24	3.04	3.43	3.28	4.39	4.21
C18/C17	3.11	2.83	3.38	3.31	3.99	3.53

จากตารางที่ 4.5.3 พบว่าปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์นั้นจะมีค่าลดลง เมื่อเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาจากตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 เป็นตัวที่ 2 จากนั้นค่าของปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่จะเพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาจากตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 เป็นตัวที่ 3 ซึ่งผลที่ได้จากปริมาณไตรกลีเซอไรด์พบว่า เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมในตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้งเกิดดีขึ้น แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมในตัวเร่งปฏิกิริยาถึงปริมาณหนึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ไม่ดี การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมทั้ง 3 ตัวมีแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกันกับปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง โดยแนวโน้มการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันสามารถสังเกตได้จากค่ากรดของผลิตภัณฑ์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ค่ากรดของผลิตภัณฑ์นั้นพบว่าค่ากรดของผลิตภัณฑ์ลดลง เมื่อทำการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้จากตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 เป็นตัวที่ 2 และค่ากรดของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาจากตัวที่ 2 เป็นตัวที่ 3 จากผลของการทดลองการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 ซึ่งมีปริมาณของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมมากที่สุด แต่การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดได้ไม่ดีเท่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 และ 2 อาจเป็นเพราะขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีขนาดเล็ก และโมเลกุลของสารตั้งต้นมีขนาดใหญ่ทำให้สารตั้งต้นไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนได้ทำให้การเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 เกิดได้ไม่ดี นอกจากนี้ผลของการเพิ่มปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมในตัวเร่ง

ปฏิกิริยาพบว่าอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเลขคู่ต่อเลขคี่มีแนวโน้มเพิ่มเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมในตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผลที่ได้จากการทดลองในส่วนนี้มีส่วนคล้ายกับงานวิจัยของ [11] Sudakhara Reddy Yenumala et.al (2019) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตกรีนดีเซลด้วยน้ำมันคารันจา ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณรวมของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนเป็นแอลเคนดีขึ้น เนื่องจากปริมาณโลหะรวมในตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีจำนวนพื้นที่ในการทำปฏิกิริยา (active site) ของ Ni^{2+} สารประกอบเชิงซ้อนของนิกเกิลโมลิบดินัมและโลหะโมลิบดินัมออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ในส่วนของอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเท่ากับ 18 จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มปริมาณโลหะขึ้นถึงค่าหนึ่งจากนั้นค่าของอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่มีคาร์บอน 18 อะตอมจะมีค่าคงที่ถึงแม้จะมีการเพิ่มปริมาณรวมของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมในตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.5.4 ผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณโลหะต่างกัน ที่สภาวะอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม	ตัวที่ 1			ตัวที่ 2			ตัวที่ 3		
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050	1050
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	340	360	380	340	360	380	340	360	380
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.63	0.14	0.12
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.14	11.98	11.41	13.11	12.84	12.76	12.67	13.14	11.98
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.16	76.62	77.50	78.39	76.91	77.43	80.57	79.19	78.18
อัตราส่วนการเลือกเกิด									
C12/C11	2.29	1.71	1.41	2.34	1.98	1.81	3.66	2.29	1.71
C14/C13	2.61	1.95	1.61	2.67	2.24	2.04	4.17	2.61	1.95
C16/C15	2.59	1.87	1.43	2.41	2.02	1.86	3.87	2.59	1.87
C18/C17	2.37	1.77	1.46	2.39	1.97	1.80	3.59	2.37	1.77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จากการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 320 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้ชัดเจนเนื่องจากเป็นช่วงที่การเกิดปฏิกิริยาเป็นการเกิดแบบไม่สมบูรณ์ ในส่วนถัดมาเป็นผลการทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่การเกิดปฏิกิริยาทั้งปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีปริมาณของสารที่เป็นสารตั้งต้นของทั้ง 3 ปฏิกิริยาข้างต้นเหลืออยู่ในปริมาณน้อย โดยในช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์นั้น เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้สัดส่วนการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันแตกต่างกัน โดยตารางที่ 4.5.4 แสดงถึงผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณโลหะต่างกันที่สภาวะอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากตารางพบว่าการทำปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียสนั้นการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันนั้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์สังเกตได้จากผลิตภัณฑ์ที่ตรวจไม่พบปริมาณไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ และมีค่าของกรดในปริมาณต่ำ ในส่วนของอัตราส่วนการเลือกเกิดของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเลขคู่ต่อเลขคี่นั้นพบว่า เมื่อทำการเพิ่มปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมจะทำให้อัตราส่วนการเลือกเกิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้มากขึ้น และในขณะเดียวกันปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันก็เกิดได้น้อยลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4.5.5 สภาวะที่ดีที่สุดในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีปริมาณโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมแตกต่างกัน

ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัม	ตัวที่ 1	ตัวที่ 2	ตัวที่ 3
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	1050	1050	1050
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	340	320	360
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)	0.00	0.00	0.00
ค่ากรด (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.14
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.14	13.94	14.88
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.16	79.79	79.19
DCO_2* (%yield)	21.65	17.74	16.27
HDO** (%yield)	56.51	62.05	62.92
อัตราส่วนการเลือกเกิด			
C12/C11	2.29	3.04	3.51
C14/C13	2.61	3.55	4.02
C16/C15	2.59	3.28	3.39
C18/C17	1.49	3.31	3.45

จากผลการทดลองทั้งหมดพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมทั้ง 3 ตัวนั้นเป็นสภาวะที่แตกต่างกันไป โดยสภาวะในการทำปฏิกิริยาที่ดีที่สุดของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ตัวเป็นไปดังตารางที่ 4.5.5 จากตารางพบว่าการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งของตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 3 ถึงแม้จะให้แอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเลขคู่ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากที่สุด แต่ก็มีปริมาณของกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ในส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2 เป็นตัวที่มีประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากที่สุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเลขคู่มาก และใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 และตัวที่ 3

บทที่ 5
สรุปผลการการทดลอง

การศึกษาผลของการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมที่มีปริมาณรวมของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมต่างกัน ในขณะที่มีสัดส่วนของโลหะนิกเกิลต่อโมลิบดินัมคงที่ ในสภาวะอุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 750 และ 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากการทดลองประกอบไปด้วย ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิ้ง ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

2. การทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมจะเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 320 หรือ 340 องศาเซลเซียสขึ้นไป และในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้ลดลงทำให้แอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเลขเป็นคู่เกิดได้น้อยลง ในขณะที่ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะเกิดได้ดีขึ้นและส่งผลให้ปริมาณของแอลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่เกิดได้มากขึ้น

3. การทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมจะเกิดได้ดีที่สภาวะความดันสูง ซึ่งการเพิ่มความดันในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์จะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดมากขึ้น และทำให้ปริมาณของกรดไขมันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ลดลง ในทำนองเดียวกันการเพิ่มความดันในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเพิ่มขึ้น และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดได้ลดลง

4. การเพิ่มปริมาณของโลหะนิกเกิลและโมลิบดินัมในตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมากขึ้น แต่ถ้าหากเพิ่มปริมาณของโลหะนิกเกิลโมลิบดินัมมากจนเกินไปจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้น้อยลง ทำให้มีปริมาณกรดไขมันที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์มีปริมาณมาก ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 2 ซึ่งมีปริมาณของนิกเกิล 3.81% และปริมาณของโลหะโมลิบดินัม 8.68% จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้มาก และมีปริมาณของกรดไขมันเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ในปริมาณต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวที่ 1 และตัวที่ 3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 1

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	161.11	162.29	161.84	161.75	0.34	0.39
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.39	151.33	149.48	150.40	0.62	0.61
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	137.51	139.15	136.48	137.71	1.04	0.90
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	12.88	12.18	13.00	12.69	2.50	4.01
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	8.56	8.05	8.70	8.44	3.11	4.62
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		2.45		2.45	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	52.52	52.95	52.39	52.62	0.63	0.44
C7	0.55	0.62	0.51	0.56	0.00	0.00
C8	0.95	1.07	0.94	0.99	8.90	4.76
C9	0.38	0.42	0.34	0.38	9.38	9.83
C10	1.24	1.34	1.19	1.26	6.46	4.95
C11	7.25	7.70	6.78	7.24	6.24	6.37
C12	15.03	15.47	14.93	15.14	2.17	1.40
C13	2.77	2.96	2.83	2.85	3.71	3.00
C14	6.55	6.44	6.67	6.55	1.81	1.72
C15	1.53	1.46	1.48	1.49	2.82	2.29
C16	3.25	3.11	3.34	3.23	3.33	3.76
C17	4.35	4.14	4.38	4.29	2.09	3.42
C18	8.69	8.22	8.97	8.63	4.03	4.70
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	4.08	3.74	3.19	3.67	11.11	13.07
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.800	0.806	0.800	0.802	0.50	0.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.84	162.56	161.02	162.14	0.43	0.69
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	145.99	146.70	145.45	146.05	0.45	0.41
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	129.99	131.27	129.79	130.35	0.71	0.43
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.00	15.43	15.66	15.70	1.93	1.71
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.96	10.52	10.77	10.75	1.97	2.15
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.89		0.89	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	74.78	75.61	75.47	75.29	0.43	0.67
C7	0.96	0.67	0.89	0.84	14.45	20.40
C8	1.49	1.38	1.38	1.42	4.98	2.56
C9	0.66	0.67	0.62	0.65	3.40	4.65
C10	1.78	1.86	1.73	1.79	3.88	3.37
C11	12.04	12.56	11.86	12.15	3.33	2.44
C12	20.25	20.94	20.43	20.54	1.96	1.42
C13	4.55	4.52	4.47	4.51	0.81	1.00
C14	8.60	8.71	8.85	8.72	1.42	1.33
C15	2.38	2.39	2.43	2.40	1.31	0.94
C16	4.22	4.23	4.90	4.45	10.09	5.11
C17	6.68	6.62	6.70	6.67	0.48	0.74
C18	11.17	11.06	11.23	11.15	0.68	0.83
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	1.51	1.55	1.56	1.54	1.20	2.02
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.765	0.765	0.762	0.764	0.13	0.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.66	161.38	163.02	161.69	0.82	0.64
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	140.61	139.52	142.39	140.84	1.10	0.94
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	125.30	124.45	126.82	125.52	1.03	0.86
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	15.31	15.07	15.57	15.32	1.65	1.61
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.89	10.80	10.93	10.87	0.55	0.68
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	77.96	77.08	77.76	77.60	0.46	0.67
C7	1.09	1.07	1.03	1.06	2.36	2.99
C8	1.26	1.14	1.22	1.21	4.54	5.27
C9	0.78	0.68	0.75	0.74	6.26	7.65
C10	1.61	1.40	1.56	1.52	5.83	8.10
C11	14.61	13.03	14.06	13.90	5.10	6.27
C12	18.81	17.51	18.43	18.25	3.05	4.04
C13	5.53	5.34	5.44	5.43	1.70	1.80
C14	8.05	8.16	8.12	8.11	0.62	0.73
C15	3.07	3.17	3.13	3.12	1.42	1.58
C16	4.37	4.84	4.31	4.51	7.34	4.29
C17	8.23	8.95	8.52	8.57	4.53	3.97
C18	10.56	11.80	11.21	11.19	5.44	5.60
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.04	0.04	0.04	0.04	6.88	6.61
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.743	0.743	0.745	0.744	0.18	0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.56	164.57	160.84	162.66	1.17	1.12
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	139.14	141.11	137.17	139.14	1.42	1.42
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	125.87	128.07	123.31	125.75	1.84	1.94
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	13.2664	13.0422	13.8594	13.39	3.51	2.59
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.53	9.24	10.10	9.63	4.95	4.00
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	77.40	77.79	76.64	77.28	0.67	0.83
C7	1.20	1.21	1.33	1.25	7.08	3.98
C8	1.08	1.07	1.25	1.13	10.32	5.82
C9	0.87	0.84	0.92	0.88	5.31	4.54
C10	1.41	1.35	1.53	1.43	6.66	5.26
C11	16.43	15.87	16.46	16.26	1.27	2.34
C12	16.43	16.09	16.87	16.46	2.48	2.26
C13	6.23	6.20	6.10	6.17	0.84	1.21
C14	7.07	7.16	7.01	7.08	1.16	1.03
C15	3.64	3.76	3.43	3.61	4.18	5.07
C16	4.19	4.25	3.93	4.12	3.13	4.72
C17	9.40	9.96	8.95	9.44	5.56	5.20
C18	9.45	10.03	8.87	9.45	6.13	6.17
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.04	0.04	0.04	0.04	1.93	1.01
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.744	0.749	0.744	0.746	0.45	0.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.02	162.56	160.11	160.90	1.04	0.55
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	133.88	137.02	135.54	135.48	1.13	1.18
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	121.76	124.89	123.28	123.31	1.28	1.26
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	12.1195	12.1274	12.2633	12.17	0.77	0.42
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.05	8.85	9.05	8.98	0.77	1.48
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	76.06	76.80	76.97	76.61	0.47	0.71
C7	1.17	0.46	1.48	1.04	42.67	56.01
C8	0.92	0.73	1.14	0.93	22.83	21.81
C9	0.89	0.81	0.99	0.90	10.30	9.10
C10	1.26	1.25	1.39	1.30	7.20	4.00
C11	17.23	16.91	17.28	17.14	0.82	1.35
C12	14.90	15.30	15.44	15.21	1.47	2.07
C13	6.81	6.89	6.57	6.76	1.94	2.77
C14	6.48	6.86	6.66	6.67	2.95	2.83
C15	3.90	4.06	3.79	3.92	3.61	3.25
C16	3.50	3.68	3.51	3.56	3.29	1.80
C17	10.53	10.87	10.06	10.49	3.65	4.10
C18	8.47	8.98	8.66	8.70	3.16	2.70
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.04	0.04	0.04	0.04	3.76	3.31
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.743	0.746	0.745	0.745	0.18	0.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	153.20	161.47	161.11	158.59	1.82	3.40
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	140.80	149.39	147.74	145.98	2.34	3.54
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127.32	136.07	132.30	131.90	3.16	3.47
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	13.48	13.32	15.44	14.08	9.64	5.41
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.58	8.91	10.45	9.65	8.32	7.58
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		1.93		1.93	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	58.96	59.02	57.98	58.65	0.63	1.15
C7	0.71	0.68	0.54	0.64	0.00	0.00
C8	1.59	1.27	1.17	1.34	18.44	12.72
C9	0.44	0.45	0.42	0.44	3.76	4.57
C10	1.75	1.53	1.55	1.61	8.62	5.10
C11	7.13	8.11	7.79	7.68	5.61	7.14
C12	18.74	17.27	17.87	17.96	4.36	3.85
C13	2.56	3.08	2.96	2.86	7.40	10.73
C14	7.80	7.25	7.40	7.48	4.25	3.09
C15	1.38	1.52	1.47	1.45	4.67	5.45
C16	4.35	3.83	3.63	3.94	10.56	7.79
C17	3.58	4.44	4.03	4.02	10.59	10.83
C18	8.93	9.60	9.15	9.23	4.04	3.24
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	2.95	4.15	3.40	3.50	18.65	15.78
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.785	0.781	0.778	0.781	0.47	0.43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.66	158.66	167.47	162.26	3.21	2.22
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	148.41	144.68	152.25	148.45	2.56	2.54
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	130.52	128.02	135.00	131.18	2.91	2.41
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.89	16.66	17.25	17.27	3.62	3.51
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.05	11.51	11.33	11.63	3.63	2.61
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.35		0.35	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	76.34	75.78	75.72	75.95	0.52	0.30
C7	0.81	0.71	0.74	0.75	7.43	6.05
C8	1.65	1.59	1.62	1.62	1.78	1.78
C9	0.52	0.52	0.52	0.52	0.40	0.34
C10	1.91	1.98	1.98	1.96	1.30	2.30
C11	9.20	9.75	9.90	9.62	2.91	4.32
C12	21.94	22.74	22.68	22.45	1.27	2.28
C13	3.55	3.80	3.66	3.67	3.53	3.15
C14	9.68	9.77	9.71	9.72	0.50	0.42
C15	2.02	1.98	1.98	1.99	1.30	0.66
C16	5.01	4.90	4.96	4.96	1.11	1.20
C17	5.94	5.52	5.51	5.66	5.05	2.69
C18	14.11	12.52	12.48	13.04	8.22	4.27
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	1.04	1.09	1.07	1.07	2.44	2.64
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.756	0.765	0.761	0.761	0.57	0.61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.11	159.29	159.38	160.26	1.15	0.61
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.07	140.11	139.15	143.11	4.86	2.77
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	133.54	123.27	123.19	126.67	5.43	2.74
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.53	16.84	15.96	16.45	2.40	2.94
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.02	12.02	11.47	11.50	4.49	4.22
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	82.34	77.36	77.26	78.99	4.25	2.18
C7	0.90	0.89	0.76	0.85	5.52	10.22
C8	1.37	1.30	1.22	1.30	5.40	5.85
C9	0.61	0.64	0.59	0.62	3.68	3.35
C10	1.75	1.69	1.68	1.71	2.52	1.54
C11	11.83	12.12	11.71	11.89	1.96	1.46
C12	21.76	20.48	20.79	21.01	3.57	2.51
C13	4.86	4.70	4.64	4.73	2.65	2.03
C14	9.92	9.02	9.27	9.40	5.48	4.02
C15	2.73	2.62	2.59	2.65	3.14	2.05
C16	5.11	4.54	4.64	4.76	7.29	4.76
C17	7.62	7.13	7.00	7.25	5.08	3.39
C18	13.89	12.22	12.36	12.83	8.32	4.71
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.04	0.04	0.04	0.04	6.10	8.01
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.742	0.745	0.745	0.744	0.13	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	164.38	163.66	164.20	164.08	0.18	0.26
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	144.65	144.84	141.92	143.81	0.72	1.31
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	128.19	128.50	125.56	127.42	0.85	1.46
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.46	16.34	16.36	16.39	0.44	0.27
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.38	11.28	11.53	11.40	1.15	1.00
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	77.96	78.49	76.44	77.63	1.11	1.53
C7	1.25	0.97	0.93	1.05	19.32	11.73
C8	1.58	1.33	1.21	1.37	14.85	11.89
C9	0.77	0.70	0.62	0.70	10.95	11.48
C10	1.70	1.71	1.48	1.63	4.84	9.09
C11	12.47	13.02	11.58	12.35	5.37	6.30
C12	18.22	20.17	18.42	18.93	6.50	3.78
C13	4.53	4.99	4.77	4.77	4.70	4.89
C14	7.95	8.77	8.69	8.47	3.53	6.17
C15	2.72	2.82	2.89	2.81	2.94	3.23
C16	4.43	4.77	4.64	4.61	3.47	4.00
C17	8.49	7.59	8.28	8.12	4.58	6.50
C18	13.85	11.66	12.94	12.82	8.07	9.02
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.56	1.12
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.745	0.745	0.744	0.745	0.04	0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	161.47	161.02	160.20	160.90	0.36	0.43
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	140.00	139.52	138.33	139.28	0.51	0.68
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	124.87	124.75	123.77	124.46	0.33	0.56
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	15.13	14.77	14.56	14.82	2.06	1.73
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.80	10.59	10.53	10.64	1.55	1.05
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	77.31	77.45	77.23	77.33	0.16	0.12
C7	1.07	1.32	1.24	1.21	9.19	11.79
C8	1.17	1.37	1.32	1.29	6.72	9.28
C9	0.69	0.78	0.76	0.74	4.53	7.18
C10	1.39	1.46	1.44	1.43	2.16	3.06
C11	12.63	12.62	12.63	12.63	0.04	0.03
C12	17.24	16.18	16.23	16.55	4.14	2.21
C13	5.32	4.82	4.97	5.04	5.69	4.29
C14	8.31	7.50	7.65	7.82	6.20	4.05
C15	3.29	3.10	3.16	3.18	3.36	2.77
C16	4.47	4.39	4.70	4.52	4.02	2.86
C17	9.39	9.93	9.88	9.73	2.07	3.55
C18	12.35	13.96	13.25	13.19	5.89	6.34
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.744	0.742	0.742	0.743	0.18	0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	161.29	169.57	162.38	164.41	3.13	1.90
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	151.14	159.16	149.51	153.27	3.84	2.45
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	135.36	142.93	134.06	137.45	3.99	2.47
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	15.78	16.23	15.45	15.82	2.57	2.35
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.44	10.20	10.33	10.32	1.16	1.24
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		1.20		1.20	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	62.03	62.58	61.46	62.02	0.89	0.91
C7	0.46	0.53	0.44	0.47	0.00	0.00
C8	1.49	1.55	1.37	1.47	5.54	6.63
C9	0.35	0.36	0.32	0.34	5.44	6.86
C10	1.89	1.88	1.73	1.83	3.06	5.87
C11	6.34	6.61	6.08	6.34	4.15	4.11
C12	21.23	20.85	20.03	20.70	2.54	3.25
C13	2.31	2.68	2.60	2.53	5.85	8.83
C14	8.64	8.54	8.54	8.57	0.81	0.40
C15	1.17	1.20	1.21	1.19	1.39	1.96
C16	4.09	4.07	4.19	4.12	1.76	1.17
C17	3.14	3.41	3.55	3.37	5.38	6.67
C18	10.93	10.90	11.40	11.08	2.93	1.57
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	3.78	3.36	3.10	3.41	10.70	9.20
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.786	0.786	0.781	0.784	0.21	0.42

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.84	160.93	167.29	163.69	2.20	1.68
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	145.11	145.02	151.52	147.21	2.92	1.49
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127.04	125.50	132.32	128.29	3.14	2.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18.07	19.52	19.20	18.93	3.11	4.53
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.45	13.46	12.67	12.86	4.65	3.17
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.06		0.06	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	74.00	74.01	75.22	74.41	1.09	0.55
C7	0.50	0.49	0.38	0.46	9.61	15.94
C8	1.31	1.37	1.21	1.30	5.51	6.99
C9	0.35	0.37	0.35	0.36	2.65	1.75
C10	1.70	1.85	1.81	1.79	3.67	4.99
C11	7.22	7.66	7.42	7.43	2.98	2.86
C12	21.91	23.30	23.20	22.80	2.18	3.91
C13	3.30	3.08	3.01	3.13	5.52	3.96
C14	10.43	10.49	10.46	10.46	0.30	0.28
C15	1.76	1.70	1.84	1.76	4.05	3.89
C16	5.53	5.30	6.32	5.72	10.57	7.34
C17	5.04	4.59	4.80	4.81	4.79	4.56
C18	14.93	13.82	14.42	14.39	3.77	3.96
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.65	0.60	0.39	0.54	18.78	28.29
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.754	0.752	0.751	0.752	0.22	0.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-13 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.47	180.93	166.75	170.05	6.40	4.46
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	144.37	168.41	146.32	153.03	10.05	5.66
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	124.73	146.49	127.56	132.93	10.20	6.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	19.63	21.92	18.75	20.10	9.05	6.72
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.60	13.02	12.82	13.14	3.47	2.50
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	76.76	80.95	76.49	78.07	3.69	2.02
C7	0.48	0.59	0.51	0.52	11.88	9.36
C8	1.28	1.30	1.27	1.28	1.22	1.09
C9	0.46	0.44	0.46	0.45	1.75	3.49
C10	1.91	1.73	1.85	1.83	4.37	5.28
C11	9.56	8.79	9.19	9.18	4.16	4.24
C12	23.32	22.68	22.76	22.92	1.75	1.06
C13	3.65	3.75	3.61	3.67	2.20	1.70
C14	10.08	10.77	10.07	10.31	4.50	2.28
C15	2.03	2.18	2.11	2.11	3.43	3.59
C16	5.47	6.61	5.43	5.84	13.27	6.94
C17	5.24	6.28	5.51	5.68	10.68	7.69
C18	13.27	15.82	13.72	14.27	10.87	7.00
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.01	0.02	0.02	0.02	1.24	2.48
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.743	0.745	0.748	0.745	0.36	0.31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-14 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	172.02	164.57	159.11	165.23	4.11	3.71
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	147.79	145.85	137.87	143.84	2.75	4.15
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	130.90	127.97	120.99	126.62	3.38	4.45
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.89	17.88	16.88	17.22	3.86	1.94
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.43	12.26	12.24	11.98	2.36	4.60
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	76.08	77.75	76.03	76.62	1.47	0.77
C7	0.72	0.69	0.68	0.70	3.16	2.45
C8	1.23	1.09	1.24	1.19	4.46	7.76
C9	0.58	0.50	0.58	0.55	4.85	9.67
C10	1.70	1.48	1.71	1.63	5.26	9.40
C11	11.27	10.13	11.11	10.84	3.99	6.56
C12	20.55	19.46	20.56	20.19	1.83	3.62
C13	4.39	4.38	4.35	4.38	0.34	0.52
C14	9.02	9.46	9.06	9.18	3.01	1.69
C15	2.45	2.70	2.54	2.56	5.29	4.33
C16	4.83	5.67	4.83	5.11	10.96	5.50
C17	6.72	7.66	6.82	7.07	8.40	4.87
C18	12.62	14.53	12.54	13.23	9.83	5.20
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	2.53	3.79
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.743	0.748	0.741	0.744	0.54	0.40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-15 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	163.11	161.84	155.66	160.20	1.82	2.84
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	142.15	141.35	137.03	140.18	1.41	2.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	125.90	125.06	121.57	124.18	1.39	2.10
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.25	16.29	15.46	16.00	1.82	3.38
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.43	11.53	11.28	11.41	0.99	1.15
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	77.17	77.26	78.08	77.50	0.75	0.43
C7	0.85	0.85	0.95	0.88	7.38	3.81
C8	1.17	1.15	1.28	1.20	6.42	4.08
C9	0.64	0.66	0.71	0.67	6.20	4.09
C10	1.56	1.59	1.68	1.61	4.57	3.10
C11	12.29	12.75	13.03	12.69	2.66	3.16
C12	19.21	19.47	19.73	19.47	1.33	1.35
C13	4.98	5.10	5.04	5.04	1.17	1.18
C14	8.77	8.71	8.65	8.71	0.71	0.70
C15	3.00	3.04	2.94	2.99	1.70	1.79
C16	4.60	4.56	4.55	4.57	0.66	0.43
C17	7.91	7.73	7.57	7.74	2.22	2.17
C18	12.19	11.64	11.96	11.93	2.18	2.41
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	2.38	2.34
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.746	0.743	0.748	0.746	0.31	0.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข
ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 2

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.47	163.38	164.38	163.41	0.59	0.57
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.41	139.21	143.06	144.23	4.29	3.48
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	135.81	124.67	128.85	129.78	4.65	3.93
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	14.60	14.54	14.21	14.45	1.04	1.66
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.71	10.44	9.93	10.03	4.15	3.20
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		2.97		2.97	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	61.08	55.74	57.30	58.04	5.25	3.96
C7	0.66	0.56	0.65	0.62	5.75	9.92
C8	1.46	1.34	1.51	1.43	5.29	6.83
C9	0.37	0.35	0.37	0.36	2.05	3.88
C10	1.67	1.59	1.68	1.65	1.97	3.50
C11	6.71	6.51	6.71	6.64	1.03	2.03
C12	19.22	17.80	18.61	18.54	3.64	4.00
C13	2.55	2.45	2.49	2.50	2.31	1.91
C14	8.21	7.35	7.69	7.75	5.91	5.19
C15	1.41	1.22	1.26	1.29	8.79	6.02
C16	4.21	3.75	3.71	3.89	8.30	4.73
C17	3.98	3.65	3.55	3.73	6.82	4.70
C18	10.63	9.17	9.06	9.62	10.44	5.80
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	2.81	2.85	2.79	2.82	1.23	1.02
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.779	0.778	0.779	0.779	0.04	0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.75	163.47	159.84	162.02	0.90	1.35
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	147.90	151.22	148.38	149.17	1.38	0.85
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	130.43	133.41	132.04	131.96	1.10	1.16
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.47	17.81	16.34	17.21	3.51	5.04
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.81	11.78	11.01	11.53	2.41	4.52
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		1.16		1.16	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	70.09	71.25	72.16	71.17	1.39	1.51
C7	0.83	0.70	0.75	0.76	9.69	7.73
C8	1.29	1.33	1.45	1.36	7.04	4.90
C9	0.55	0.48	0.49	0.51	8.94	5.43
C10	1.59	1.71	1.78	1.70	4.91	6.09
C11	10.47	9.53	9.34	9.78	7.10	4.52
C12	18.89	20.67	20.98	20.18	3.98	6.41
C13	4.14	3.68	3.63	3.82	8.39	4.85
C14	8.26	9.02	9.12	8.80	3.68	6.15
C15	2.25	2.05	2.01	2.10	6.91	4.20
C16	4.11	4.47	4.85	4.48	8.23	8.14
C17	6.41	5.82	5.75	5.99	6.98	4.01
C18	11.29	11.79	12.00	11.69	2.61	3.46
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	1.21	1.38	1.33	1.31	5.45	7.38
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.763	0.767	0.771	0.767	0.52	0.52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	161.75	157.47	162.93	160.72	1.38	2.02
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	142.61	141.31	142.32	142.08	0.37	0.54
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	126.39	125.34	126.28	126.00	0.31	0.53
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.22	15.97	16.04	16.08	0.89	0.66
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.37	11.30	11.27	11.32	0.52	0.40
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.12	79.57	77.48	78.39	1.51	1.16
C7	1.08	0.99	1.06	1.04	3.41	5.42
C8	1.47	1.37	1.44	1.43	3.35	4.31
C9	0.69	0.65	0.69	0.68	2.16	3.92
C10	1.77	1.71	1.74	1.74	1.85	1.78
C11	12.65	12.61	12.73	12.66	0.55	0.43
C12	20.46	20.58	20.03	20.36	1.12	1.61
C13	4.89	5.00	4.92	4.94	1.29	0.91
C14	8.87	9.07	8.65	8.86	2.34	2.41
C15	2.77	2.87	2.78	2.81	2.18	1.36
C16	4.40	4.58	4.30	4.42	3.43	2.77
C17	7.57	7.99	7.74	7.77	2.86	2.51
C18	11.50	12.16	11.39	11.68	4.07	2.50
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.12
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.742	0.748	0.742	0.744	0.54	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.75	166.20	162.93	163.29	1.78	1.56
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	141.45	145.14	142.61	143.07	1.45	1.13
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	126.39	129.35	126.87	127.54	1.42	0.90
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	15.06	15.79	15.74	15.53	1.67	3.03
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.65	10.88	11.04	10.85	1.68	1.91
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.61	77.81	77.85	78.09	0.66	0.36
C7	1.30	1.25	1.03	1.19	8.94	13.68
C8	1.42	1.38	1.20	1.34	6.46	9.81
C9	0.83	0.79	0.71	0.77	6.95	8.46
C10	1.68	1.63	1.57	1.63	3.38	3.66
C11	14.47	14.03	13.58	14.03	3.19	3.21
C12	18.64	18.58	18.78	18.67	0.59	0.46
C13	5.44	5.36	5.35	5.38	1.07	0.55
C14	7.95	8.00	8.32	8.09	2.80	1.73
C15	3.15	3.11	3.12	3.13	0.62	0.56
C16	4.49	4.45	4.32	4.42	1.66	2.35
C17	8.44	8.30	8.46	8.40	0.71	1.19
C18	10.79	10.93	11.41	11.04	3.34	2.32
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.742	0.741	0.748	0.744	0.58	0.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	158.93	160.38	162.20	160.50	1.06	0.98
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	139.04	140.64	142.20	140.63	1.12	1.13
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	124.60	126.03	127.35	125.99	1.08	1.11
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	14.44	14.61	14.85	14.63	1.48	1.32
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.39	10.39	10.44	10.41	0.36	0.19
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.38	78.56	78.49	78.48	0.11	0.12
C7	1.16	1.06	1.08	1.10	5.48	3.56
C8	1.28	1.25	1.25	1.26	1.60	0.95
C9	0.81	0.75	0.75	0.77	5.37	3.05
C10	1.68	1.66	1.63	1.65	1.29	1.48
C11	14.86	14.07	13.95	14.29	3.96	2.40
C12	19.11	19.37	19.18	19.22	0.77	0.55
C13	5.66	5.48	5.46	5.54	2.26	1.30
C14	8.13	8.41	8.42	8.32	1.25	2.33
C15	3.19	3.15	3.16	3.17	0.76	0.48
C16	4.36	4.63	4.39	4.46	3.73	2.21
C17	8.16	8.19	8.39	8.25	1.71	1.04
C18	9.98	10.53	10.83	10.45	3.69	4.51
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.30	0.24
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.748	0.744	0.741	0.744	0.49	0.45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	158.66	161.20	165.29	161.72	2.21	1.89
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	145.37	151.40	152.44	149.74	1.81	2.92
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	128.87	134.99	135.28	133.05	1.68	3.14
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.50	16.41	17.16	16.69	2.83	1.68
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.35	10.84	11.26	11.15	1.80	2.78
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.53		0.53	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	62.60	64.45	62.83	63.29	1.83	1.09
C7	0.40	0.51	0.50	0.47	8.31	14.89
C8	1.13	1.38	1.33	1.28	7.65	11.49
C9	0.32	0.36	0.35	0.34	6.07	7.25
C10	1.56	1.77	1.65	1.66	6.67	6.28
C11	6.49	7.26	6.89	6.88	5.52	5.63
C12	19.29	20.62	19.59	19.83	3.97	2.75
C13	2.56	2.68	2.67	2.64	1.82	2.97
C14	8.67	8.69	8.45	8.60	1.03	1.75
C15	1.48	1.39	1.38	1.42	4.69	2.76
C16	4.44	4.35	4.38	4.39	1.20	0.92
C17	4.29	4.08	4.15	4.17	2.73	2.30
C18	11.98	11.36	11.49	11.61	3.19	2.16
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	1.87	2.00	2.25	2.04	10.31	8.41
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.773	0.775	0.765	0.771	0.52	0.78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	161.02	161.47	160.11	160.87	0.38	0.47
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	148.29	145.96	141.78	145.34	2.03	2.45
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	128.96	126.92	123.24	126.37	2.05	2.48
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	19.33	19.04	18.54	18.97	1.91	2.27
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.04	13.04	13.07	13.05	0.18	0.12
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	80.07	78.58	76.95	78.53	1.95	2.01
C7	0.52	0.45	0.45	0.48	9.63	4.97
C8	1.31	1.25	1.12	1.23	6.96	9.03
C9	0.41	0.40	0.35	0.39	6.61	10.89
C10	1.83	1.87	1.56	1.76	6.56	10.96
C11	8.57	8.67	7.39	8.21	5.56	9.94
C12	23.67	24.15	21.36	23.06	4.72	7.37
C13	3.58	3.53	3.29	3.47	3.36	5.06
C14	10.99	10.85	10.64	10.83	1.52	1.75
C15	2.10	1.99	2.06	2.05	2.26	2.92
C16	5.67	5.50	5.86	5.68	3.25	3.15
C17	5.92	5.45	6.09	5.82	4.62	6.31
C18	15.48	14.46	16.77	15.57	7.72	7.14
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.03	0.03	0.03	0.03	2.25	1.14
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.748	0.745	0.748	0.747	0.13	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.84	161.56	162.02	162.14	0.43	0.36
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	142.16	142.49	143.99	142.88	0.78	0.50
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	125.06	124.40	126.11	125.19	0.73	0.63
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.10	18.09	17.88	17.69	2.25	3.33
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.03	12.70	12.42	12.38	2.54	2.84
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	76.78	76.98	77.82	77.19	0.81	0.53
C7	0.63	0.57	0.52	0.58	9.39	9.06
C8	1.29	1.14	1.17	1.20	7.64	4.89
C9	0.52	0.46	0.46	0.48	7.97	4.06
C10	1.81	1.61	1.72	1.71	5.48	5.96
C11	10.25	9.58	9.68	9.83	4.21	2.60
C12	21.92	20.83	21.97	21.57	1.85	3.47
C13	4.02	4.03	3.98	4.01	0.56	0.86
C14	9.66	9.76	10.02	9.81	2.15	1.58
C15	2.36	2.40	2.32	2.36	1.71	1.68
C16	5.04	5.39	5.37	5.26	2.32	4.25
C17	6.38	7.19	6.82	6.80	5.75	6.17
C18	12.90	14.02	13.78	13.57	3.33	4.91
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.03	0.02	0.03	0.03	3.24	2.60
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.749	0.745	0.748	0.747	0.22	0.31

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.20	163.47	161.66	161.78	1.05	0.97
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	141.74	144.14	142.13	142.67	1.03	0.65
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	124.00	126.12	123.92	124.68	1.15	0.61
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.74	18.02	18.21	17.99	1.22	1.38
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.52	12.50	12.81	12.61	1.60	0.87
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	77.39	77.13	76.64	77.05	0.43	0.54
C7	0.62	0.69	0.70	0.67	5.34	7.88
C8	1.15	1.25	1.16	1.19	5.26	3.26
C9	0.58	0.59	0.55	0.57	2.32	3.79
C10	1.73	1.78	1.62	1.71	4.01	5.24
C11	11.63	11.39	10.83	11.29	3.07	4.00
C12	21.21	21.38	20.37	20.98	1.86	2.93
C13	4.58	4.40	4.39	4.46	2.67	1.50
C14	9.35	9.33	9.32	9.33	0.13	0.11
C15	2.61	2.52	2.61	2.58	1.28	2.46
C16	5.01	4.72	5.07	4.93	2.71	4.23
C17	6.82	6.66	7.17	6.89	4.16	3.24
C18	12.11	12.43	12.83	12.46	3.04	2.81
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	1.72	3.39
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.749	0.747	0.748	0.748	0.13	0.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.47	163.57	165.29	163.78	0.93	0.80
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	139.37	140.66	145.09	141.71	2.39	1.65
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	122.76	124.09	127.70	124.85	2.28	1.67
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.61	16.57	17.39	16.86	3.16	1.68
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.92	11.78	11.99	11.89	0.77	0.94
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	75.54	75.85	77.24	76.21	1.35	0.88
C7	0.88	0.84	0.94	0.89	5.94	4.98
C8	1.31	1.25	1.38	1.31	5.03	4.61
C9	0.72	0.68	0.70	0.70	2.81	3.15
C10	1.78	1.72	1.80	1.77	1.72	2.60
C11	12.90	12.88	12.73	12.84	0.46	0.82
C12	20.04	20.14	20.71	20.30	2.04	1.25
C13	4.92	4.76	4.70	4.80	2.56	1.91
C14	8.52	8.50	8.72	8.58	1.60	0.92
C15	2.73	2.73	2.73	2.73	0.18	0.12
C16	4.27	4.30	4.79	4.45	7.52	4.02
C17	6.86	6.99	6.86	6.90	1.31	0.70
C18	10.61	11.05	11.19	10.95	2.18	3.07
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	4.67	2.34
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.745	0.746	0.744	0.745	0.13	0.13

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	166.38	159.20	161.66	162.41	2.44	1.98
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	156.86	150.61	150.40	152.62	2.78	1.46
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	139.26	134.33	134.85	136.15	2.29	1.33
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.60	16.28	15.55	16.48	6.82	5.62
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.22	10.81	10.34	10.79	3.99	4.17
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.90		0.90	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	65.06	65.50	64.72	65.09	0.63	0.58
C7	0.43	0.41	0.68	0.51	33.52	18.41
C8	1.35	1.42	1.66	1.47	12.46	8.74
C9	0.24	0.30	0.43	0.32	32.99	24.72
C10	1.54	1.86	1.90	1.77	7.54	12.91
C11	4.59	5.88	7.48	5.98	25.06	23.26
C12	19.88	22.37	20.85	21.03	6.36	5.50
C13	2.03	2.36	2.82	2.40	17.24	15.64
C14	9.85	9.54	8.58	9.32	5.65	7.99
C15	1.31	1.17	1.38	1.29	7.14	8.82
C16	5.33	4.65	4.17	4.72	13.05	11.58
C17	3.66	3.31	3.69	3.55	3.84	6.76
C18	14.86	12.23	11.08	12.72	16.81	12.91
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	2.47	2.60	2.66	2.58	3.28	4.10
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.773	0.773	0.777	0.774	0.34	0.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	164.38	159.02	164.02	162.47	1.18	2.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.24	146.18	155.62	150.68	3.28	2.99
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	128.89	126.08	134.06	129.68	3.38	2.77
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	21.35	20.10	21.56	21.00	2.65	4.30
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	14.21	13.75	13.85	13.94	1.95	1.35
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.39	79.27	81.71	79.79	2.41	1.75
C7	0.60	0.59	0.65	0.61	5.84	3.36
C8	1.75	1.81	1.91	1.82	4.57	3.86
C9	0.40	0.41	0.44	0.42	4.98	3.75
C10	2.16	2.26	2.37	2.26	4.74	4.69
C11	7.63	7.90	8.11	7.88	2.88	3.15
C12	25.22	26.12	27.01	26.12	3.42	3.42
C13	2.98	2.82	2.97	2.92	1.90	3.47
C14	11.00	11.10	11.39	11.16	2.07	1.50
C15	1.59	1.58	1.74	1.63	6.25	3.32
C16	5.58	5.58	5.99	5.72	4.78	2.43
C17	4.32	4.20	4.29	4.27	1.24	1.70
C18	15.16	14.89	14.85	14.96	1.31	0.79
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.03	0.02	12.56	6.36
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.744	0.742	0.749	0.745	0.54	0.40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-13 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	159.11	162.02	165.66	162.26	2.09	1.94
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	143.44	146.58	149.24	146.42	1.93	2.04
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	124.45	127.20	130.04	127.23	2.21	2.19
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18.99	19.38	19.20	19.19	0.99	1.04
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.24	13.22	12.87	13.11	1.00	1.86
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.20	78.49	78.48	78.39	0.13	0.25
C7	0.67	0.63	0.62	0.64	4.52	3.46
C8	1.45	1.43	1.43	1.44	1.14	0.67
C9	0.49	0.46	0.47	0.48	3.57	2.84
C10	1.94	1.93	1.95	1.94	0.49	0.58
C11	9.48	8.99	9.22	9.23	2.70	2.55
C12	23.35	23.55	23.65	23.52	0.56	0.71
C13	3.72	3.59	3.61	3.64	2.20	1.44
C14	10.36	10.56	10.45	10.46	0.97	0.90
C15	2.08	2.04	2.19	2.10	4.18	3.17
C16	5.22	5.37	5.66	5.42	4.46	3.55
C17	5.61	5.53	5.44	5.53	1.51	1.56
C18	13.81	14.41	13.80	14.01	2.88	1.50
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.12	0.06
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.748	0.748	0.744	0.747	0.18	0.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-14 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	172.38	158.02	158.38	162.93	5.80	3.01
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	151.77	139.00	140.65	143.80	5.54	3.34
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	132.58	121.58	121.84	125.33	5.78	2.99
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	19.19	17.42	18.81	18.47	3.87	5.70
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.64	12.53	13.37	12.85	4.07	2.47
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	76.89	76.92	76.91	76.91	0.02	0.02
C7	0.61	0.63	0.47	0.57	10.31	17.19
C8	1.12	1.25	1.04	1.14	10.01	8.73
C9	0.47	0.52	0.44	0.48	9.23	8.27
C10	1.55	1.78	1.61	1.65	7.93	5.64
C11	9.64	10.32	9.46	9.81	5.24	3.56
C12	20.30	21.73	21.36	21.13	2.84	3.91
C13	4.10	4.07	4.01	4.06	1.06	1.25
C14	9.71	9.61	10.01	9.78	2.35	1.68
C15	2.50	2.30	2.44	2.41	3.51	4.76
C16	5.32	4.98	5.28	5.19	2.36	4.12
C17	7.17	6.34	6.58	6.70	7.06	5.33
C18	14.38	13.39	14.21	14.00	2.77	4.31
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	1.16	0.58
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.743	0.748	0.743	0.745	0.45	0.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-15 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	165.66	165.02	165.20	165.29	0.22	0.17
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	146.93	144.93	148.33	146.73	1.09	1.22
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	128.43	126.37	129.22	128.01	0.95	1.28
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18.50	18.56	19.11	18.72	2.05	1.20
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.59	12.81	12.88	12.76	0.95	1.33
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	77.51	76.56	78.20	77.43	1.00	1.11
C7	0.71	0.69	0.58	0.66	7.46	11.61
C8	1.22	1.13	1.14	1.16	4.71	2.68
C9	0.56	0.51	0.54	0.54	4.56	5.60
C10	1.72	1.57	1.73	1.67	3.42	6.40
C11	10.91	10.14	10.99	10.68	2.93	5.10
C12	21.11	20.21	21.71	21.01	3.34	3.82
C13	4.36	4.28	4.44	4.36	1.81	1.91
C14	9.48	9.50	9.74	9.57	1.69	0.96
C15	2.59	2.71	2.65	2.65	2.23	2.35
C16	5.30	5.52	4.96	5.26	4.94	5.65
C17	6.75	7.03	6.75	6.84	2.67	1.36
C18	12.79	13.29	12.96	13.02	2.13	1.72
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.02	0.02	0.02	0.02	1.30	0.66
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.746	0.748	0.748	0.747	0.09	0.18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ค
ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดินัมตัวที่ 3

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.02	161.66	161.56	161.08	0.36	0.66
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	155.25	154.19	154.64	154.69	0.36	0.33
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	148.22	147.39	147.49	147.70	0.35	0.21
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	7.03	6.8	7.15	6.99	2.24	2.76
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	4.53	4.41	4.62	4.52	2.28	2.44
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		14.38		14.38	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	28.71	28.26	28.29	28.42	1.01	0.57
C7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C8	0.53	0.57	0.55	0.55	3.34	3.85
C9	0.16	0.16	0.15	0.15	2.49	3.74
C10	0.73	0.75	0.72	0.74	2.03	1.77
C11	3.00	3.74	3.39	3.38	10.75	11.09
C12	8.68	8.93	8.82	8.81	1.40	1.47
C13	1.19	1.31	1.29	1.26	4.01	5.82
C14	4.31	3.76	3.85	3.97	8.49	5.41
C15	0.81	0.63	0.64	0.70	16.51	9.01
C16	2.09	1.85	1.95	1.96	6.62	5.77
C17	1.95	1.70	1.76	1.80	8.01	5.68
C18	5.26	4.86	5.18	5.10	3.16	4.76
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	2.82	2.82	2.82	2.82	0.00	0.00
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.846	0.855	0.845	0.849	0.75	0.43

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	161.11	162.56	164.47	162.72	1.08	0.99
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	152.66	156.06	156.33	155.02	0.85	1.52
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	142.07	145.44	146.13	144.55	1.10	1.71
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	10.59	10.62	10.20	10.47	1.43	2.58
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.94	6.81	6.52	6.76	2.69	3.42
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		4.79		4.79	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	39.56	40.17	39.96	39.90	0.69	0.84
C7	0.44	0.51	0.38	0.44	15.36	13.80
C8	0.88	1.00	0.76	0.88	13.64	13.59
C9	0.26	0.29	0.22	0.25	12.21	12.55
C10	1.01	1.09	0.90	1.00	9.40	10.53
C11	4.52	4.83	4.70	4.68	3.18	3.49
C12	11.75	12.41	11.57	11.91	4.19	2.84
C13	1.88	1.81	2.06	1.92	7.26	5.33
C14	5.02	5.07	4.98	5.02	0.96	0.94
C15	1.04	1.05	1.03	1.04	1.09	0.87
C16	3.07	3.19	3.28	3.18	3.07	3.34
C17	2.88	2.73	2.92	2.84	2.84	4.03
C18	6.82	6.18	7.16	6.72	6.55	8.00
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	3.37	3.29	3.15	3.27	3.07	3.74
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.823	0.817	0.831	0.824	0.89	0.81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.84	160.84	160.11	160.60	0.15	0.30
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	148.96	145.58	146.59	147.04	1.30	1.00
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	130.50	128.33	129.50	129.44	0.82	0.86
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18.46	17.25	17.09	17.60	4.89	2.90
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.39	11.85	11.66	11.97	3.56	2.58
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.41		0.41	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	79.85	78.56	79.54	79.32	0.67	0.95
C7	0.79	0.90	0.71	0.80	12.22	10.91
C8	1.46	1.75	1.54	1.59	10.52	7.68
C9	0.56	0.63	0.57	0.58	7.85	4.77
C10	1.87	2.10	2.00	1.99	5.36	5.81
C11	10.34	10.91	10.32	10.52	3.66	1.93
C12	21.98	23.09	22.89	22.65	1.91	2.95
C13	4.12	4.11	4.00	4.08	1.15	1.89
C14	9.77	9.73	9.83	9.78	0.56	0.46
C15	2.43	2.33	2.31	2.36	2.92	1.93
C16	5.61	5.14	5.39	5.38	4.33	4.51
C17	7.46	6.36	6.88	6.90	8.12	7.84
C18	13.46	11.53	13.11	12.70	6.00	9.22
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	1.18	1.13	1.25	1.18	5.41	4.69
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.756	0.750	0.755	0.754	0.31	0.49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	163.11	161.29	161.29	161.90	0.75	0.37
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	147.52	146.99	147.04	147.18	0.23	0.13
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	128.73	128.26	128.01	128.33	0.31	0.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18.79	18.73	19.03	18.85	0.95	0.64
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.74	12.74	12.94	12.81	1.05	0.55
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.67	79.26	79.09	79.01	0.33	0.43
C7	0.74	1.01	0.60	0.79	29.11	23.25
C8	1.58	1.86	1.33	1.59	16.72	16.33
C9	0.58	0.60	0.46	0.55	9.48	15.97
C10	2.06	2.08	1.83	1.99	4.45	8.20
C11	10.48	10.10	9.18	9.92	5.65	7.47
C12	23.19	22.83	22.86	22.96	1.00	0.55
C13	4.06	3.85	3.85	3.92	3.55	1.83
C14	9.83	9.78	10.38	10.00	3.84	2.21
C15	2.46	2.25	2.32	2.35	4.94	3.92
C16	5.09	5.31	5.69	5.36	6.16	5.15
C17	6.22	6.35	6.55	6.38	2.73	2.41
C18	12.37	13.24	14.04	13.21	6.25	6.43
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.32	0.32	0.35	0.33	5.99	3.00
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.747	0.745	0.743	0.745	0.27	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	163.84	162.93	163.20	163.32	0.32	0.24
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	149.09	148.36	149.85	149.10	0.50	0.50
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	130.15	129.18	130.19	129.84	0.27	0.51
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18.94	19.18	19.66	19.26	2.08	1.66
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.70	12.93	13.12	12.92	1.57	1.65
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	79.36	79.20	79.69	79.42	0.34	0.27
C7	0.65	0.62	0.62	0.63	2.94	2.19
C8	1.33	1.30	1.43	1.35	5.40	3.78
C9	0.46	0.40	0.44	0.44	5.97	7.64
C10	1.87	1.69	1.89	1.82	4.09	7.02
C11	9.35	8.05	8.41	8.61	8.63	6.41
C12	23.20	22.01	22.82	22.68	2.32	2.94
C13	3.95	3.75	3.65	3.78	4.49	3.54
C14	10.61	11.10	10.95	10.89	1.97	2.52
C15	2.49	2.57	2.41	2.49	3.25	3.05
C16	5.72	6.30	6.15	6.06	3.97	5.51
C17	6.34	6.69	6.31	6.45	3.78	2.13
C18	13.38	14.71	14.61	14.23	3.37	6.01
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.10	0.10	0.11	0.10	0.93	0.47
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.742	0.748	0.744	0.745	0.45	0.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.93	158.02	159.93	159.63	0.82	1.01
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	153.67	151.07	154.18	152.97	0.79	1.24
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	144.40	141.36	143.96	143.24	0.81	1.31
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	9.27	9.71	10.22	9.73	5.00	4.76
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	6.03	6.43	6.63	6.36	4.18	5.19
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		11.38		11.38	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	40.97	40.91	41.10	40.99	0.25	0.19
C7	0.00	0.31	0.00	0.10	200.00	100.00
C8	0.94	0.99	0.96	0.96	2.58	2.55
C9	0.19	0.19	0.20	0.19	0.84	0.74
C10	1.22	1.18	1.17	1.19	2.82	1.93
C11	4.11	4.15	4.19	4.15	0.96	1.00
C12	13.81	13.53	13.48	13.61	1.50	0.95
C13	1.40	1.46	1.48	1.45	2.55	3.40
C14	5.81	5.68	5.67	5.72	1.59	0.84
C15	0.72	0.74	0.75	0.74	1.84	1.91
C16	2.92	2.97	3.34	3.08	8.47	4.96
C17	1.97	2.02	2.09	2.02	3.09	2.78
C18	7.87	7.70	7.77	7.78	1.15	1.03
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	3.56	3.43	3.58	3.52	1.52	2.74
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.836	0.833	0.834	0.834	0.20	0.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	156.02	157.47	166.47	159.99	4.05	2.48
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	147.96	149.34	156.01	151.10	3.25	2.08
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	135.05	135.48	142.64	137.72	3.57	1.94
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	12.91	13.86	13.37	13.38	3.59	3.51
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	8.73	9.28	8.57	8.86	4.77	3.26
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		1.13		1.13	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	61.93	61.68	61.43	61.68	0.41	0.41
C7	0.47	0.46	0.48	0.47	1.83	2.10
C8	1.41	1.29	1.36	1.35	4.20	4.72
C9	0.32	0.30	0.32	0.31	3.29	3.92
C10	1.71	1.60	1.65	1.65	3.56	3.17
C11	5.80	5.72	6.36	5.96	6.71	4.02
C12	20.22	19.43	19.51	19.72	2.54	1.48
C13	2.25	2.31	2.45	2.34	4.78	3.69
C14	8.57	8.59	8.18	8.45	1.72	3.13
C15	1.27	1.34	1.29	1.30	3.14	2.64
C16	4.90	5.02	4.71	4.87	3.00	3.44
C17	3.68	3.86	3.81	3.79	1.96	2.72
C18	11.33	11.74	11.29	11.45	2.51	1.42
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	3.87	3.68	3.68	3.74	3.39	1.69
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.808	0.800	0.801	0.803	0.62	0.37

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	164.11	163.20	161.75	163.02	0.67	0.78
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	145.54	153.19	149.26	149.33	2.58	2.54
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	129.71	132.12	129.31	130.38	1.33	0.82
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	15.83	21.07	19.95	18.95	11.19	16.46
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	10.88	13.75	13.37	12.67	8.59	14.12
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.23		0.23	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.22	80.17	79.16	79.18	1.25	1.22
C7	0.55	0.55	0.56	0.56	1.32	0.72
C8	1.65	1.45	1.49	1.53	8.08	5.58
C9	0.44	0.39	0.39	0.41	7.96	4.91
C10	2.13	1.87	2.01	2.00	6.49	6.67
C11	7.72	7.38	7.72	7.61	1.53	2.99
C12	24.44	23.79	25.19	24.48	2.93	2.79
C13	2.97	3.15	3.12	3.08	2.31	3.61
C14	10.72	11.36	11.21	11.10	2.35	3.39
C15	1.72	1.94	1.79	1.82	6.80	5.27
C16	5.86	6.36	5.84	6.02	5.61	2.92
C17	5.15	5.80	5.11	5.35	8.36	4.54
C18	14.86	16.14	14.71	15.24	5.92	3.45
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.80	0.73	0.75	0.76	5.39	4.05
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.756	0.752	0.750	0.753	0.44	0.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	163.84	160.20	163.84	162.63	0.75	1.49
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.49	146.89	147.50	148.29	1.48	0.95
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	130.60	127.16	128.74	128.83	1.37	1.30
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	19.89	19.73	18.76	19.46	2.21	3.60
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.22	13.43	12.72	13.12	2.36	3.08
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	79.56	79.23	78.43	79.08	0.62	0.81
C7	0.65	0.53	0.55	0.58	13.26	8.44
C8	1.50	1.42	1.33	1.42	6.12	6.24
C9	0.44	0.43	0.37	0.41	6.18	10.20
C10	1.95	1.93	1.70	1.86	4.83	8.71
C11	8.35	8.16	7.07	7.86	6.18	10.07
C12	24.06	23.65	22.08	23.26	3.43	5.07
C13	3.39	3.37	3.10	3.28	3.09	5.65
C14	10.92	10.90	10.91	10.91	0.09	0.11
C15	2.19	2.16	2.23	2.19	1.72	1.52
C16	5.82	5.92	6.36	6.03	5.43	3.50
C17	5.49	5.49	5.84	5.61	4.10	2.06
C18	14.80	15.28	16.89	15.66	7.89	5.46
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.19	0.18	0.18	0.18	2.42	2.45
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.743	0.744	0.744	0.744	0.04	0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	163.84	158.84	162.11	161.60	1.39	1.71
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	149.46	142.06	149.68	147.07	1.78	3.40
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	128.74	122.62	129.37	126.91	1.94	3.38
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	20.72	19.44	20.31	20.16	2.79	3.56
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.86	13.68	13.57	13.71	1.15	1.00
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.50	77.13	79.73	78.45	1.63	1.69
C7	0.52	0.61	0.58	0.57	7.23	9.65
C8	1.38	1.49	1.63	1.50	8.82	8.19
C9	0.40	0.40	0.44	0.41	7.18	3.72
C10	1.92	1.91	2.19	2.01	9.34	5.03
C11	7.75	7.43	8.08	7.75	4.24	4.19
C12	24.20	23.64	25.84	24.56	5.23	3.76
C13	3.27	3.11	3.21	3.19	2.25	2.66
C14	11.31	11.02	11.35	11.23	1.13	1.84
C15	2.04	1.96	1.91	1.97	3.62	3.02
C16	5.99	5.90	5.77	5.89	1.69	1.95
C17	5.17	5.06	4.78	5.00	3.30	4.48
C18	14.58	14.61	13.93	14.37	1.64	3.07
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.10	0.09	0.09	0.09	6.70	3.35
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.743	0.745	0.743	0.744	0.18	0.09

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	161.38	170.20	161.29	164.29	3.60	1.83
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.35	161.90	153.77	155.34	4.22	3.21
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	136.30	147.63	139.79	141.24	4.52	3.50
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	14.05	14.27	13.98	14.10	1.21	0.85
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.34	8.81	9.09	9.08	2.88	2.97
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		9.11		9.11	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	56.65	58.26	58.26	57.72	0.93	1.86
C7	0.26	0.38	0.34	0.33	16.44	19.10
C8	1.05	1.31	1.23	1.20	9.18	12.07
C9	0.23	0.26	0.24	0.24	5.35	4.13
C10	1.57	1.64	1.61	1.60	2.13	2.21
C11	5.45	5.49	5.19	5.38	2.04	3.52
C12	19.16	19.67	19.73	19.52	1.06	1.83
C13	1.93	1.95	1.91	1.93	1.16	1.05
C14	8.05	8.16	8.33	8.18	1.82	1.58
C15	0.97	0.96	0.96	0.97	0.35	0.23
C16	4.42	4.49	4.64	4.52	2.69	2.07
C17	2.63	2.69	2.65	2.66	1.35	1.11
C18	10.91	11.26	11.44	11.21	2.11	2.62
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	3.10	2.97	2.90	2.99	3.61	2.98
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.809	0.812	0.809	0.810	0.25	0.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	168.57	162.38	158.38	163.11	3.34	2.90
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	159.62	154.24	149.88	154.58	3.26	3.04
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	145.09	138.74	132.91	138.91	4.45	4.32
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	14.53	15.50	16.97	15.67	8.32	7.26
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.10	10.05	11.32	10.16	11.46	10.39
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		1.00		1.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	69.71	69.18	68.00	68.96	1.08	1.39
C7	0.47	0.42	0.43	0.44	6.98	4.90
C8	1.64	1.59	1.52	1.58	3.60	4.01
C9	0.30	0.30	0.31	0.31	1.88	1.57
C10	1.98	2.00	1.91	1.96	1.74	2.70
C11	5.51	5.49	5.97	5.66	5.57	2.98
C12	23.60	23.12	22.63	23.12	2.10	2.11
C13	2.20	2.11	2.35	2.22	5.78	4.87
C14	10.22	9.88	9.57	9.89	3.36	3.24
C15	1.21	1.20	1.23	1.21	1.04	1.02
C16	5.20	5.71	5.44	5.45	4.71	4.58
C17	3.63	3.61	3.60	3.62	0.46	0.34
C18	13.75	13.76	13.05	13.52	1.78	3.47
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	1.93	1.96	1.88	1.92	1.89	2.35
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.802	0.800	0.793	0.798	0.46	0.67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-13 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.84	161.11	160.38	161.44	0.86	0.66
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	152.87	149.90	148.73	150.50	1.57	1.18
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	134.90	130.00	129.42	131.44	2.63	1.54
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.97	19.90	19.31	19.06	4.41	5.72
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.76	13.28	12.98	12.67	4.77	7.23
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.40		0.40	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	81.98	79.85	79.88	80.57	1.76	0.90
C7	0.56	0.59	0.45	0.53	10.70	15.94
C8	1.97	1.96	1.51	1.82	8.69	16.83
C9	0.38	0.40	0.32	0.37	9.68	13.08
C10	2.40	2.38	2.00	2.26	6.29	11.57
C11	6.73	7.21	6.29	6.74	6.90	6.66
C12	27.91	27.03	25.76	26.90	3.76	4.24
C13	2.60	2.66	2.67	2.64	1.04	1.63
C14	12.04	11.44	12.04	11.84	1.69	3.34
C15	1.46	1.45	1.57	1.49	5.38	2.92
C16	6.23	5.86	6.37	6.15	3.57	4.82
C17	3.91	4.09	4.38	4.13	6.21	5.26
C18	15.80	14.77	16.51	15.69	5.19	5.85
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.64	0.64	0.61	0.63	2.14	2.87
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.760	0.760	0.755	0.758	0.22	0.44

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-14 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	163.66	162.56	155.29	160.50	1.96	3.25
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.83	150.81	143.41	148.35	1.67	3.33
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	129.09	129.66	123.06	127.27	1.88	3.31
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	21.74	21.15	20.35	21.08	3.13	3.46
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	14.41	14.02	14.19	14.21	1.44	1.30
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	78.77	79.65	79.14	79.19	0.58	0.52
C7	0.60	0.66	0.39	0.55	20.33	29.40
C8	1.82	2.07	1.41	1.77	17.08	20.03
C9	0.39	0.42	0.32	0.38	12.02	15.27
C10	2.16	2.42	2.06	2.21	9.29	6.88
C11	6.72	7.04	6.41	6.72	4.69	4.62
C12	24.92	26.65	25.59	25.72	3.63	3.12
C13	2.63	2.66	2.65	2.65	0.45	0.51
C14	11.17	11.63	11.58	11.46	1.47	2.49
C15	1.73	1.64	1.67	1.68	2.82	2.09
C16	6.07	6.05	6.08	6.07	0.20	0.29
C17	4.49	4.08	4.31	4.30	4.57	4.94
C18	16.08	14.33	16.68	15.70	6.27	8.72
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.13	0.14	0.13	0.14	4.35	2.17
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.745	0.748	0.747	0.747	0.18	0.22

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-15 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	การทดลองครั้งที่					
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	167.29	175.29	160.02	167.54	4.63	4.49
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	155.24	155.66	151.24	154.05	1.05	1.82
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	132.89	132.06	128.43	131.13	1.34	2.06
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	22.35	23.60	22.81	22.92	2.97	2.49
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	14.40	15.16	15.08	14.88	1.89	3.25
ปริมาณไตรกลีเซอไรด์ (%โดยน้ำหนัก)		0.00		0.00	0.00	0.00
ปริมาณแอลเคน (%yield)	79.35	75.25	80.16	78.25	2.44	3.84
C7	0.49	0.48	0.50	0.49	1.84	1.87
C8	1.57	1.58	1.64	1.60	2.66	1.62
C9	0.35	0.36	0.37	0.36	3.35	2.60
C10	2.12	2.10	2.18	2.13	2.34	1.53
C11	6.73	6.67	6.83	6.74	1.32	1.13
C12	26.14	24.90	26.09	25.71	1.67	3.16
C13	2.79	2.66	2.80	2.75	1.74	3.34
C14	11.94	11.03	11.88	11.62	2.76	5.02
C15	1.68	1.56	1.71	1.65	3.62	5.66
C16	6.13	5.65	6.23	6.00	3.84	5.93
C17	4.31	4.08	4.53	4.31	5.21	5.26
C18	15.10	14.19	15.40	14.90	3.36	4.74
ปริมาณกรดไขมัน (%โดยน้ำหนัก)	0.11	0.12	0.12	0.12	2.98	5.42
ความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.747	0.749	0.751	0.749	0.27	0.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

1. *Phase change material*. [cited 2019 5 Dec]; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material.
2. *Processing crude oil*. [cited 2019 5 Dec].
3. *Advantages and disadvantages of petroleum*. [cited 2019 5 Dec]; Available from: https://greengarageblog.org/16-marked-advantages-and-disadvantages-of-petroleum.
4. *<[2010] Hydrotreating of palm olein, palm stearin and palm fatty acid distillate using nickel molybdenum catalyst (Panuwich Charoenwong).pdf>.*
5. Veriansyah, B., et al., *Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil: Effect of catalysts.* Fuel, 2012. **94**: p. 578-585.
6. *Hydrotreating process*. [cited 2019 5 Dec]; Available from: http://what-when-how.com/petroleum-refining/fundamentals-of-hydrotreating-part-1/.
7. *Sulfiding of catalyst*. [cited 2019 5 Dec]; Available from: http://www.reactor-resources.com/sulfiding-services/sulfiding-101.html.
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. 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.
10. *<[2010] Hydrodeoxygenation of palm olein using nickel molybdenum and cobalt molybdenum catalysts (Patara Jirasavetakul).pdf>.*
11. Yenumala, S.R., et al., *Production of green diesel from karanja oil (Pongamia pinnata) using mesoporous NiMo-alumina composite catalysts.* Bioresource Technology Reports, 2019. **7**.
12. Ameen, M., et al., *The effect of metal loading over Ni/γ-Al2O3 and Mo/γ-Al2O3 catalysts on reaction routes of hydrodeoxygenation of rubber seed oil for green diesel production.* Catalysis Today, 2019.
13. Yoosuk, B., et al., *Hydrodeoxygenation of oleic acid and palmitic acid to*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

hydrocarbon-like biofuel over unsupported Ni-Mo and Co-Mo sulfide catalysts. Renewable Energy, 2019. **139**: p. 1391-1399.

14. El Khatib, S.A., et al., *Hydrotreating rice bran oil for biofuel production.* Egyptian Journal of Petroleum, 2018. **27**(4): p. 1325-1331.
15. Itthibenchapong, V., et al., *Deoxygenation of palm kernel oil to jet fuel-like hydrocarbons using Ni-MoS 2 / γ -Al 2 O 3 catalysts.* Energy Conversion and Management, 2017. **134**: p. 188-196.
16. Šimáček, P., et al., *Hydroprocessed rapeseed oil as a source of hydrocarbon-based biodiesel.* Fuel, 2009. **88**(3): p. 456-460.
17. Nimkarde, M.R. and P.D. Vaidya, *Toward Diesel Production from Karanja Oil Hydrotreating over CoMo and NiMo Catalysts.* Energy & Fuels, 2016. **30**(4): p. 3107-3112.
18. Srifa, A., et al., *Production of bio-hydrogenated diesel by catalytic hydrotreating of palm oil over NiMoS2/gamma-Al2O3 catalyst.* Bioresour Technol, 2014. **158**: p. 81-90.
19. Kubička, D. and J. Horáček, *Deactivation of HDS catalysts in deoxygenation of vegetable oils.* Applied Catalysis A: General, 2011. **394**(1-2): p. 9-17.
20. Kumar, R., et al., *Hydroprocessing of jatropha oil and its mixtures with gas oil.* Green Chemistry, 2010. **12**(12).
21. Gong, S., et al., *Hydrotreating of Jatropha Oil over Alumina Based Catalysts.* Energy & Fuels, 2012. **26**(4): p. 2394-2399.
22. *<[2011] Hydrodeoxygenation of palm kernel oil using nickel molybdenum catalyst (Narongwut Jaokaenkaew).pdf>.*
23. Rukunudin, I.H., et al., *A modified method for determining free fatty acids from small soybean oil sample sizes.* Journal of the American Oil Chemists' Society, 1998. **75**(5): p. 563-568.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กันต์ เจริญเศรษฐศิลป์
วัน เดือน ปี เกิด	11 สิงหาคม 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	146/44 ซอยปรีดีพนมยงค์ 10 ถนนสุขุมวิท 71 แขวงพระโขนงเหนือ เขตวัฒนา กรุงเทพฯ 10110

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY