

ไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม
และโคบอลต์โมลิบดีนัม



นายภทร จิรเศวตกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDRODEOXYGENATION OF PALM OLEIN USING NICKEL MOLYBDENUM
AND COBALT MOLYBDENUM CATALYSTS



Mr.Patara Jirasavetakul

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ไฮโดรทีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัม

โดย

นายภทร จิรเศวตกุล


สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัจนวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรวาท)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ชจรศักดิ์ เพ็ญนวกิจ)

บทกร จีระเศวตกุล : ไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัม. (HYDRODEOXYGENATION OF PALM OLEIN USING NICKEL MOLYBDENUM AND COBALT MOLYBDENUM CATALYSTS)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา, 81 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วเชิงสเปซของของเหลวของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัม การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงและความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนสูง โดยมีปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้นพร้อมกัน แต่ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาต่ำจะพบเพียงกรดไขมันเกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....
ปีการศึกษา.....2553.....

ลายมือชื่อนิสิต จกธ. จีระเศวตกุล
ลายมือชื่อที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5170601121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HYDRODEOXYGENATION / HYDROTREATING / COBALT
MOLYBDENUM / NICKEL MOLYBDENUM / ALKANE

PATARA JIRASAVETAKUL : HYDRODEOXYGENATION OF PALM OLEIN
USING NICKEL MOLYBDENUM AND COBALT MOLYBDENUM CATALYST.
ADVISOR : JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 81 pp.

The objective of this study is to investigate catalytic hydrodeoxygenation of palm olein using Nickel Molybdenum and Cobalt Molybdenum catalyst. The experiments were conducted in a fixed bed continuous flow reactor. The pressure was maintained at 750 psig while the temperatures were varied at 200, 250, 300 and 350 °C and liquid hourly space velocity (LHSV) of 0.5, 1.0 and 1.5 hr⁻¹ were used during the study. The results showed that Nickel Molybdenum catalyst was suitable for hydrodeoxygenation of palm olein and at high reaction temperatures and low liquid hourly space velocity, the reactants converted to alkanes by hydrodeoxygenation reaction, decarboxylation reaction and decarbonylation reaction while only fatty acids were detected in products at low reaction temperatures.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Chemical Engineering.....

Field of Study : Chemical Engineering.....

Academic Year : 2010.....

Student's Signature Patara Jirasavetakul

Advisor's Signature Jirdsak Tschekuna

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเล่มนี้สำเร็จเรียบร้อยได้ก็ด้วยความเสียสละ ความอนุเคราะห์ และน้ำใจจากบุคคลหลายฝ่าย ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้ฝากตัวเป็นลูกศิษย์ โดยให้ความทุ่มเทการสอนและความเอาใจใส่ ให้คำปรึกษาที่ดีตลอดจนงานวิจัยสำเร็จ รวมถึงการสนับสนุนทุนการวิจัยและเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ อ.ดร.อภิวัฒน์ สุทธิธรรวัช ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. วรงค์ ปวรอาจารย์ และดร.ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยชี้แนะการทำงานวิจัย และสละเวลาสำหรับการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท ปตท.อโรเมติกส์และการกลั่น จำกัดมหาชน ที่สนับสนุนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ สมาชิกห้องวิจัยโพลิโอเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้มีมิตรภาพที่ดี และการช่วยเหลือในการทำงานวิจัยตลอดมา

และสุดท้ายขอขอบพระคุณบิดาและมารดา สำหรับทุนทรัพย์สำหรับการศึกษา การเลี้ยงดูตลอดจนกำลังใจที่คอยมีให้เสมอ แม้ในยามที่ผู้ทำวิจัยท้อแท้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ณ |
| สารบัญภาพ..... | ฐ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| | |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง..... | 4 |
| 2.2 ปฏิกริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง..... | 5 |
| 2.3 กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งในอุตสาหกรรมก๊าซและน้ำมัน..... | 7 |
| 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง..... | 8 |
| 2.5 การประยุกต์ใช้กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งในการสังเคราะห์อัลเคนจากน้ำมัน พืช..... | 9 |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 9 |
| 2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช..... | 12 |
| | |
| บทที่ 3 การทดลองและการวิเคราะห์..... | 15 |
| 3.1 การทดลอง..... | 15 |
| 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี..... | 18 |
| 3.3 การวิเคราะห์..... | 18 |
| 3.4 การคำนวณในงานวิจัย..... | 20 |
| | |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย..... | 23 |
| 4.1 ผลการวิเคราะห์หัตถุติบ..... | 24 |

| | หน้า |
|---|------|
| 4.2 ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน..... | 25 |
| 4.3 ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน..... | 26 |
| 4.4 ผลการทดลองทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... | 28 |
| 4.5 ผลการทดลองทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม..... | 38 |
| 4.6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 46 |
| | |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง..... | 49 |
| | |
| รายการอ้างอิง..... | 50 |
| | |
| ภาคผนวก..... | 52 |
| ภาคผนวก ก ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซ ไนโตรเจน..... | 53 |
| ภาคผนวก ข ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซ ไฮโดรเจน..... | 55 |
| ภาคผนวก ค ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... | 57 |
| ภาคผนวก ง ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม..... | 69 |
| | |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 81 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|---|------|
| 3.1 | สภาวะในการทดลอง..... | 17 |
| 3.2 | สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... | 18 |
| 3.3 | สภาวะของคอลัมน์..... | 19 |
| 4.1 | องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน..... | 24 |
| 4.2 | ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม. ⁻¹ โดยไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน..... | 25 |
| 4.3 | ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม. ⁻¹ โดยไม่ใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน..... | 27 |
| 4.4 | ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม. ⁻¹ โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... | 28 |
| 4.5 | ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ซม. ⁻¹ โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... | 29 |
| 4.6 | ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ซม. ⁻¹ โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... | 29 |
| 4.7 | ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม. ⁻¹ โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม..... | 38 |
| 4.8 | ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ซม. ⁻¹ โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม..... | 39 |
| 4.9 | ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ซม. ⁻¹ โดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม..... | 39 |
| 4.10 | คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 46 |
| 4.11 | เปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยา..... | 47 |
| ก-1 | ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง..... | 53 |
| ก-2 | ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง..... | 53 |

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| ง-11 | ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง..... | 79 |
| ง-12 | ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง..... | 80 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| ภาพที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 2.1 | โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์..... | 4 |
| 3.1 | แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง..... | 15 |
| 4.1 | ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... | 33 |
| 4.2 | ค่าของกรดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... | 35 |
| 4.3 | ปริมาณน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม..... | 36 |
| 4.4 | ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม.. | 37 |
| 4.5 | ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม... | 40 |
| 4.6 | ค่าของกรดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม..... | 43 |
| 4.7 | ปริมาณน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม..... | 44 |
| 4.8 | ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์ โมลิบดีนัม..... | 45 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมา

ปัจจุบันมีความต้องการเชื้อเพลิงที่มากขึ้น เป็นสาเหตุให้เชื้อเพลิงปิโตรเลียมถูกนำมาใช้ในปริมาณที่มาก ซึ่งเชื้อเพลิงปิโตรเลียมอาจจะหมดได้ในอนาคต ดังนั้นการสังเคราะห์เชื้อเพลิงจึงเป็นอีกวิธีในการแก้ปัญหาวิกฤติพลังงานในอนาคต โดยเชื้อเพลิงสังเคราะห์ หมายถึง เชื้อเพลิงเหลวที่สังเคราะห์จาก ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ หรือวัสดุชีวภาพ ซึ่งเชื้อเพลิงดีเซลสังเคราะห์จัดเป็นหนึ่งในชนิดในเชื้อเพลิงสังเคราะห์เช่นกัน โดยชนิดของเชื้อเพลิงสังเคราะห์ที่ถูกระบุได้ดังนี้ [1]

1 ไบโอดีเซล (Biodiesel) โดยเป็นการทำปฏิกิริยา ระหว่าง น้ำมันพืช หรือกรดไขมัน กับเมทานอล ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ เอสเทอร์ของกรดไขมัน (Fatty Acid Methyl Ester) สำหรับประเทศไทยใช้น้ำมันปาล์มเป็นหลักในการผลิตไบโอดีเซล และบังคับใช้น้ำมันดีเซลผสมกับไบโอดีเซลในสัดส่วนร้อยละสาม

2 เชื้อเพลิงสังเคราะห์ จาก ถ่านหินสู่ของเหลว (Coal-To-Liquid) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ระหว่างก๊าซไฮโดรเจน และถ่านหิน

3 เชื้อเพลิงสังเคราะห์ จาก ก๊าซสู่ของเหลว (Gas-To-Liquid) หรือ กระบวนการฟิชเชอร์-โทรป (Fischer-Tropsch) ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ไฮโดรคาร์บอนจาก การทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์

4 เชื้อเพลิงสังเคราะห์ จาก กระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช เช่นการสังเคราะห์ดีเซลจากน้ำมันพืช โดยทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลเคน

ข้อดีของการสังเคราะห์เชื้อเพลิงแบบ ถ่านหินสู่ของเหลว ก๊าซสู่ของเหลว และกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นอัลเคน ซึ่งมีโครงสร้างที่เหมือนกับเชื้อเพลิงปิโตรเลียม แต่การสังเคราะห์เชื้อเพลิงโดยใช้กระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช จะมีข้อได้เปรียบกว่าเนื่องจากใช้สารตั้งต้นเป็นน้ำมันพืช ซึ่งน้ำมันพืช เป็นวัสดุหมุนเวียน สามารถผลิตทดแทนใหม่ได้

การสังเคราะห์แบบกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช การประยุกต์ใช้กระบวนการไฮโดรทรีตติง และตัวเร่งปฏิกิริยาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยแต่เดิมกระบวนการไฮโดรทรีตติง มีการใช้งานเพื่อจุดประสงค์ในการกำจัดสิ่งเจือปนในผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น ในอุตสาหกรรม

ปิโตรเลียม ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมถูกใช้ในการกำจัดกำมะถันเป็นหลัก และตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัมถูกใช้ในการกำจัดไนโตรเจนเป็นหลัก[2] แต่มีการค้นพบว่าทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถใช้กำจัดออกซิเจนได้[3] ซึ่งการประยุกต์ใช้เพื่อสังเคราะห์ดีเซล เป็นการกำจัดออกซิเจนในน้ำมันพืชซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์คืออัลเคน ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่สามารถประยุกต์ใช้กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง และตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อสังเคราะห์ดีเซลได้เช่น Pavel Simcek [4] และคณะได้สังเคราะห์ดีเซลจากน้ำมันเมล็ดเรพพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้คืออัลเคนซึ่งคล้ายกับปิโตรเลียมดีเซล David Kubicka [5] และคณะศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้ง ได้แก่ นิกเกิล โมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัม พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะสองชนิด จะมีประสิทธิภาพดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะชนิดเดียว ในการสังเคราะห์อัลเคนจากน้ำมันพืช I.Sebos และคณะ [8] ได้ศึกษาจลพลศาสตร์ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดฝ้าย โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ โดยทั่วไปกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชจะทำในสภาวะ อุณหภูมิ 200 ถึง 450 องศาเซลเซียส ความดันของก๊าซไฮโดเจน ระหว่าง 200 ถึง 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.25 ถึง 5 ต่อชั่วโมง

สำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นการสังเคราะห์ดีเซลโดยกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช เนื่องจากมีข้อดีคือ ประเทศไทยมีน้ำมันพืชหลายชนิดที่สามารถผลิตได้ในภายในประเทศ เช่น น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม ซึ่งแต่เดิมประเทศไทยใช้น้ำมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตไบโอดีเซลแต่ และการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม และนิกเกิลโมลิบดีนัมซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทั่วไปในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง ซึ่งงานวิจัยจะศึกษาผลของอุณหภูมิ ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยา โคบอลต์โมลิบดีนัม และนิกเกิลโมลิบดีนัม ในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน

จุดประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบบของอุณหภูมิ อัตราการไหลเชิงสเปซ ต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดคือ นิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถบอกถึงผลกระทบของอุณหภูมิและอัตราการไหลเชิงสเปซ ต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัม ได้

ขอบเขตของงานวิจัย

- น้ำมันพืชที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งน้ำมันปาล์มโอเลอิน
- ทำการศึกษาอุณหภูมิในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งในช่วง 200-350 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอัตราการไหลเชิงสเปซ 0.5 - 1.5 ชั่วโมง⁻¹ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดคือ นิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัม
- วิเคราะห์องค์ประกอบของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลเคน และหาปริมาณกรดไขมันในผลิตภัณฑ์

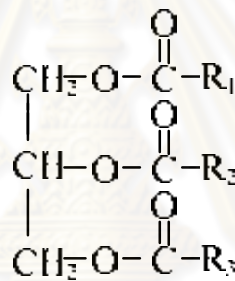


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

น้ำมันพืชจะประกอบด้วยโมเลกุลที่เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งแขนของไตรกลีเซอไรด์จะประกอบด้วยกรดไขมันที่หลากหลาย ตามชนิดของน้ำมันพืช เช่น กรดปาล์มมีติก กรดสเตียริก กรดลอริก เป็นต้น โดยโมเลกุลของกรดไขมันจะประกอบด้วยคาร์บอนที่มีความยาวอยู่ในช่วง 12 ถึง 24 อะตอมตามชนิดของกรดไขมัน ซึ่งสอดคล้องกับช่วงความยาวของคาร์บอนอะตอมจากเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียม ที่ผ่านมานุษยจึงได้นำความสอดคล้องเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตเชื้อเพลิงดีเซลทดแทนตามกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น กระบวนการการทอานซ์เอสเทอร์รีฟิเคชัน และกระบวนการไฮโดรทรีตติง



Triglyceride

รูป 2.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ โดย R คือหมู่อัลคิลในกรดไขมัน

2.1 กระบวนการไฮโดรทรีตติง

ไฮโดรทรีตติง (ไฮโดรโปรเซสซิงหรือไฮโดรฟิซนิซซิง) เป็นกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมัน เพื่อปรับเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และการกำจัดสิ่งเจือปน เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน ฮาไลด์ และสารประกอบโลหะ ในผลิตภัณฑ์หรือ สารตั้งต้น โดยการทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยา กระบวนการไฮโดรทรีตติงในอุตสาหกรรมมีเพื่อจุดประสงค์หลักคือ [8]

1. ปรับปรุงคุณภาพในผลิตภัณฑ์ดาวนส์ตรีม
2. ป้องกันและเพิ่มประสิทธิภาพ ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมดาวนส์ตรีม

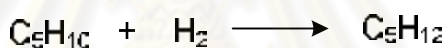
3.ลดปริมาณ กำมะถัน ของสารตั้งต้น เพื่อลดปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อม

4.ปรับปรุงเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์

2.2 ปฏิกริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง

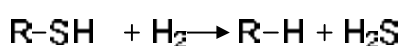
กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งประกอบด้วยหลายปฏิกิริยาย่อยที่เกิดพร้อมกัน คือ ไฮโดรจีเนชัน ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน ไฮโดรดีออกซีจีเนชัน ไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน และไฮโดรดีเมทัลไลต์เซชัน ปฏิกิริยาทั้งหมดจะเกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์หรือไฮโดรทรีเตอร์เดียวกัน

- **ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation reaction)** เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนแบบผันกลับได้ ซึ่งปฏิกิริยานี้มีจุดประสงค์เพื่อลดปริมาณพันธะที่ไม่อิ่มตัวของสารตั้งต้นหรือผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียมโดยการเติมอะตอมของไฮโดรเจนลงสู่พันธะที่ไม่อิ่มตัว โดยปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ในสถานะที่อุณหภูมิสูงและความดันสูงปฏิกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นได้



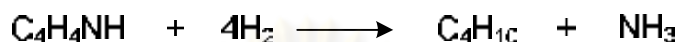
สมการปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

- **ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน (Hydrodesulfurization reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยานี้เป็นจุดมุ่งหมายส่วนใหญ่ของกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งเพื่อใช้ในการกำจัดอะตอมของกำมะถันในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงปิโตรเลียม เช่น ก๊าซโซลีน เคโรซีน ดีเซล และเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เพื่อปริมาณลดมลพิษของก๊าซที่เกิดจากกำมะถัน เช่น ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur dioxide) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงใน รถยนต์ อากาศยาน โรงไฟฟ้า หรือ เตาเผาในอุตสาหกรรม



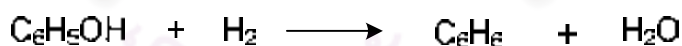
สมการปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน

- **ปฏิกิริยาไฮโดรตีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการกำจัดอะตอมของไนโตรเจนในอุตสาหกรรมก๊าซและน้ำมัน ซึ่งโดยทั่วไปในสารปิโตรเลียมจะมีปริมาณของไนโตรเจนที่ต่ำ แต่ในสารตั้งต้นที่มีปริมาณไนโตรเจนมากจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการไฮโดรทรีตติง ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดไนโตรเจนออก ซึ่งปริมาณของไนโตรเจนจากสารปิโตรเลียมจะขึ้นอยู่กับชนิดและแหล่งกำเนิดของน้ำมันดิบ



สมการปฏิกิริยาไฮโดรตีไนโตรจีเนชัน

- **ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation reaction)** เป็นปฏิกิริยาที่ต้องการตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งใช้ในการกำจัดอะตอมของออกซิเจน จากก๊าซธรรมชาติหรือปิโตรเลียม ซึ่งปริมาณขององค์ประกอบออกซิเจนในปิโตรเลียมมีปริมาณที่ต่ำมาก (น้อยกว่าร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก) จึงทำให้ปฏิกิริยานี้ไม่ใช่จุดประสงค์ของกระบวนการไฮโดรทรีตติง แต่ปฏิกิริยานี้สามารถใช้กำจัดออกซิเจนในน้ำมันพืชซึ่งมีปริมาณมาก เพื่อสังเคราะห์ดีเซลได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ดีเซลที่สังเคราะห์จากน้ำมันพืชโดยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีโครงสร้างที่เหมือนกับปิโตรเลียมดีเซล



สมการปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

โดยทั่วไปในกระบวนการไฮโดรทรีตติงตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีหน้าที่ในการตัดพันธะและดึงอะตอมที่ไม่ต้องการออกจากโมเลกุล โดยอะตอมที่ไม่ต้องการจะถูกกำจัดออกในรูปของสารประกอบกับไฮโดรเจน เช่น สมการปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน คือการกำจัดอะตอมกำมะถันที่ไม่ต้องการออกจากผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน โดยกำมะถันที่ไม่ต้องการจะถูกดึงออกในรูปไฮโดรเจนซัลไฟด์

กระบวนการไฮโดรทรีตติงจะทำในถังปฏิกรณ์แบบฟลิกซ์เบด โดยมีสภาวะในการ

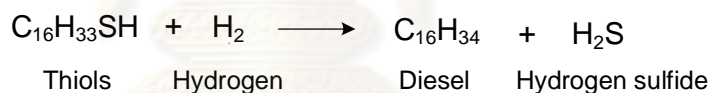
เกิดปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส และความดัน 100 ถึง 3000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราการไหลของเหลวเชิงสเปซ 0.5 ถึง 2.5 ชั่วโมง⁻¹

2.3 กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งในอุตสาหกรรมก๊าซและน้ำมัน

- การใช้งานเพื่อกำจัดอะตอมของซัลเฟอร์

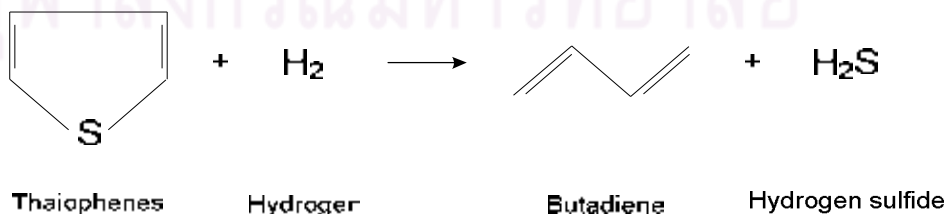
ในอุตสาหกรรมก๊าซและน้ำมัน สารตั้งต้นจะมีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบหลักในเกือบทุกโครงสร้าง เช่น โครงสร้างโซ่เปิด โครงสร้างโซ่ปิด และโครงสร้างแบบอโรมาติก ซึ่งซัลเฟอร์จะมีการเกาะตัวในโครงสร้างรูปแบบ ซัลไฟด์ ไตซัลไฟด์ และไทโอซัลไฟด์รูปแบบต่างๆ เช่น ไทโอฟีนส์ เบนโซไทโอฟีน และไดเบนโซไทโอฟีน ซึ่งจะใช้กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งในการกำจัดซัลเฟอร์ โดยมีปฏิกิริยาหลักคือ ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน ซึ่งเป็นการตัดพันธะระหว่างซัลเฟอร์และคาร์บอน และจะได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่ไม่ใช่ซัลเฟอร์ปนอยู่ และซัลเฟอร์ที่ถูกกำจัดออกจะอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ เช่น

การกำจัดซัลเฟอร์ในเชื้อเพลิงดีเซล ให้เป็นดีเซลกำมะถันต่ำเพื่อเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ซัลเฟอร์จะถูกกำจัดในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และได้ผลิตภัณฑ์ดีเซลดังสมการ



สมการปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชันของเชื้อเพลิงดีเซล

การเปลี่ยนรูปของบิวตะไดอีนจากไทโอฟีนส์ ซึ่งเป็นการตัดพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมกับซัลเฟอร์ ซึ่งซัลเฟอร์จะหลุดออกมาในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และได้ผลิตภัณฑ์คือ บิวตะไดอีน ดังสมการ



สมการปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชันของไทโอฟีนส์

- การใช้งานเพื่อกำจัดอะตอมของไนโตรเจน

โดยทั่วไปอุตสาหกรรมก๊าซและน้ำมัน สารตั้งต้นจะมีองค์ประกอบของไนโตรเจนต่ำแต่ องค์ประกอบของไนโตรเจนจะส่งผลมากต่อประสิทธิภาพ ของกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง ซึ่งปริมาณของไนโตรเจนจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดของน้ำมันดิบและ ชนิดของน้ำมัน ปฏิบัติการที่ใช้ในการกำจัดอะตอมของไนโตรเจนมีชื่อว่า ไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน และ อะตอมของไนโตรเจนที่ถูกกำจัดออกจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย [2]

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งนิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ ประกอบด้วยตัวเร่งโลหะที่กระจายตัวบนพื้นผิวของตัวรองรับอลูมินาออกไซด์ โดยโลหะตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่ใช้กันแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งคือ นิกเกิล โคบอลต์ และ โมลิบดีนัม ซึ่งมีลักษณะเด่นเนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาสูงเมื่อเทียบกับน้ำหนัก (โดยประมาณ 195 ถึง 300 ตารางเมตรต่อกรัม) ตัวเร่งทั้งสามชนิดจะมีความว่องไวในการทำ ปฏิกิริยาต่ำและเสื่อมสภาพง่าย เมื่ออยู่ในรูปของออกไซด์ แต่จะมีความว่องไวสูงสุดเมื่ออยู่ในรูป ของซัลไฟด์ดังนั้นจึงต้องมีการซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้งาน

การใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมซัลไฟด์ นิยมนำใช้งานเพื่อจุดประสงค์ในการ เลือกเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชันเพื่อกำจัดอะตอมซัลเฟอร์ออกจากสารปิโตรเลียม ส่วน ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมซัลไฟด์ นิยมใช้งานเพื่อจุดประสงค์ในการเลือกเกิดปฏิกิริยาไฮโดร ดีไนโตรจีเนชันเพื่อกำจัดอะตอมไนโตรเจนออกจากสารที่ต้องการ และปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพื่อ เติมาอะตอมไฮโดรเจนเพื่อให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดจะมีค่า การเลือกเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกัน แต่การใช้งานในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ เช่นไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ไฮโดรดีเมทัลไลเซชัน ดีคาร์บอกซิเลชัน และดีคาร์บอนิลเลชัน สามารถใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดแทนได้ ซึ่งจำเป็นต้องหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับปฏิกิริยาที่ต้องการ ตามการใช้งาน เช่น ควรเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมซัลไฟด์สำหรับปฏิกิริยาไฮโดร ออกซิจีเนชัน เนื่องจาก สามารถกำจัดออกซิเจน ได้มากกว่าการตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิและความดันเท่ากัน

2.5 การประยุกต์ใช้กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งในการสังเคราะห์อัลเคนจากน้ำมันพืช

การเปลี่ยนโมเลกุลของน้ำมันพืชหรือกรดไขมันให้มีโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอน อัลเคน มีหลักการคือการทำจัดอะตอมของออกซิเจนออกจากโมเลกุลของน้ำมันพืชหรือกรดไขมัน และการเติมอะตอมของไฮโดรเจนลงในพันธะที่ว่างของน้ำมันพืช ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะไฮโดรคาร์บอนชนิดอัลเคน คล้ายกับเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียม

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Somsak Sriwanichapoom. 1995. [8] ได้ศึกษาการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วโดยกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง ทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาสามชนิดคือ โคบอลต์โมลิบดีนัม นิกเกิลโมลิบดีนัม และนิกเกิลทั้งสแตน ภายใต้อุณหภูมิในการทำลอง 320 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 5.51 เมกะปาสคาล ซึ่งการบำบัดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว จำเป็นต้องมีการกำจัดกำมะถันออกจากสารตั้งต้นโดยปฏิกิริยา ไฮโดรดีซัลเฟอร์ไรเซชัน ผลการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัม เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดกำมะถันมากที่สุด เนื่องจากมีความว่องไวในการกำจัดกำมะถันสูงที่อุณหภูมิต่ำ และอัตราการไหลเชิงสเปซสูง และที่สภาวะอุณหภูมิปฏิกิริยาสูงอัตราการไหลเชิงสเปซต่ำตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามชนิด จะมีความว่องไวในการกำจัดกำมะถันใกล้เคียงกัน

Senol, O.I., T.R. Viljava, and A.O.I. Krause. 2005. [6] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน ของเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัม ในถึงปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมออกไซด์ จะมีการความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน ที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการซัลไฟด์จะมีค่าความว่องไว สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบออกไซด์ ของทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อเปรียบเทียบชนิดโลหะตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัม จะพบว่า นิกเกิลโมลิบดีนัม จะมีการความว่องไวสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา จะพบว่าค่าการเลือกเกิดไฮโดรคาร์บอนของนิกเกิลโมลิบดีนัม ที่ผ่านการซัลไฟด์จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ในขณะที่เดียวกันค่าการเลือกเกิดไฮโดรคาร์บอนของโคบอลต์โมลิบดีนัม ที่ผ่านการซัลไฟด์จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

George W. Huber, Paul O Connor, Avelino Corma. 2007. [3] ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดทานตะวันและ น้ำมันเมล็ดทานตะวันผสมกับน้ำมันที่ได้จากการกลั่นภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Heavy vacuum oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามิกเกลิมอลิบดีนัมที่ผ่านการซัลไฟด์ ทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส ความดัน 725 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราการไหลเชิงของเหลวสเปซ 4.97 ชั่วโมง⁻¹ อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำมันเมล็ดทานตะวันกับ HVO 50:50 ถึง 5:95 โดยทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ผลการทดลองสรุปว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช มี 3 คือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและ ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และพบว่าการทำไฮโดรทรีตติงโดยการผสมน้ำมันเมล็ดทานตะวันกับน้ำมัน HVO ที่อัตราส่วน 5: 95 จะมีค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนสูงสุดคือร้อยละ 87

I. Gandarias, V.L. Barrio, J. Requies, P.L. Arias, J.F. Cambra, M.B. Guemez. 2007. [10] การศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงธรรมชาติโดยการทำจัดออกซิเจนด้วยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน โดยใช้สารเคมีจำลองคือ ฟีนอล โดยทำการศึกษัตวเร่งปฏิกิริยาสองชนิดคือ นิกเกิลโมลิบดีนัมและ นิกเกิลทั้งสแตน ซึ่งจะมีส่วนประกอบของนิกเกิลร้อยละ 3.2 โมลิบดีนัมร้อยละ 16 และ นิกเกิลร้อยละ 4.1 ทั้งสแตนร้อยละ 13.9 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ บนตัวรองรับอะลูมินาออกไซด์ ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิระหว่าง 473 ถึง 623 เคลวิน ที่ความดัน 1.5 เมกะปาสคาล โดยของเหลวที่ป้อนเข้ามาประกอบด้วยฟีนอลความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในตัวทำละลายออกเทน ผลการศึกษาพบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม มีความว่องไวในการกำจัดอะตอมของออกซิเจนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตน ทุกช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลอง

Pavel Simcek, David Kubicka, Gustav Sebor, Milan Pospisil. 2008. [4] ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงน้ำมันเมล็ดเรพเพื่อผลิตไฮโดรคาร์บอนดีเซล ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1015 ปอนด์ต่อตารางนิ้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ในถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ผลการศึกษาพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช ประกอบด้วยน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรคาร์บอนเหลวชนิดอัลเคนแบบโซ่ตรงและโซ่กิ่งเป็นหลัก ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับเชื้อเพลิงดีเซลจากปิโตรเลียม และสรุปว่าที่อุณหภูมิปฏิกิริยาที่ต่ำ (260 องศาเซลเซียส) ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่ได้จะมีสารตั้งต้นคือ ไตรกลีเซอไรด์ และกรดไขมันปนอยู่ และที่อุณหภูมิปฏิกิริยาสูงกว่า 310 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาจะเกิดสมบูรณโดยไม่มี

สารตั้งต้นเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ โดยผลิตภัณฑ์จะมีแต่ไฮโดรคาร์บอนอัลเคนเท่านั้น โดยแนวโน้มที่อุณหภูมิสูงขึ้นผลิตภัณฑ์ออกตะเดเคน จะมีความเข้มข้นลดลง แต่เฮปตะเดเคน จะมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นซึ่งมีแนวโน้มแบบสมการเส้นตรง

Pavel Simcek, David Kubicka, Gustav Sebor, Milan Pospisil. 2008. [11] ได้ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงดีเซลที่ได้จากกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดเรพ ภายใต้สภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 310 ถึง 360 องศาเซลเซียส ความดัน 7 และ 15 เมกะปาสคาล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม สำหรับอุตสาหกรรมไฮโดรทรีตติง พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเป็นเฮปตะเดเคน ออกตะเดเคนและมีผลิตภัณฑ์แอลเคนไซตรงและไซกิ่งร่วมเล็กน้อย และได้นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาในสภาวะ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 7 เมกะปาสคาล มาผสมกับปิโตรเลียมดีเซล ที่ความเข้มข้นโดยมวลร้อยละ 5 ถึง 30 พบว่าการใช้น้ำมันผสมระหว่างไบโอดีเซลกับปิโตรเลียมดีเซลจะมีคุณสมบัติที่ดีกว่าหรือเทียบเท่า การใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมอย่างเดียว

Hardi Sulimma. 2008. [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาคาร์ไบด์และไนไตรด์หกชนิด ได้แก่ โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ โมลิบดีนัมไนไตรด์ ทังสเตนคาร์ไบด์ ทังสเตนไนไตรด์ วานาเดียมคาร์ไบด์ และวานาเดียมไนไตรด์ โดยศึกษาการกำจัดออกซิเจน และการเปลี่ยนโมเลกุลของกรดโอเลอิกเป็นไฮโดรคาร์บอนอัลเคน โดยกระบวนการไฮโดรทรีตติง

ผลการศึกษาที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ความดันย่อยของไฮโดรเจน มากกว่า 7000 กิโลปาสคาล แสดงให้เห็นว่า โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ และโมลิบดีนัมไนไตรด์ สามารถกำจัดออกซิเจนได้เกือบร้อยละ 100 และมีปริมาณ อัลเคน/โอเลฟิน มากกว่าร้อยละ 30 หลังจากนั้นก็ได้ทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 380 ถึง 390 องศาเซลเซียส โดยใช้ความดันย่อยของ ไฮโดรเจน 7100 กิโลปาสคาล ตรวจสอบพบว่าโมลิบดีนัมไนไตรด์ เป็นตัวเร่งที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งกำจัดออกซิเจนได้มากกว่าร้อยละ 85 และมีค่าการเลือกเกิดของ อัลเคน/โอเลฟิน มากกว่าร้อยละ 20 และ ค่าการเลือกเกิดดีเซล มากกว่าร้อยละ 40

I. Sebos, A. Matsoukas, V. Apostolopoulos, N. Papayannakos. 2009.

[7] ทำการศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิ่งของน้ำมันเมล็ดฝ้ายผสมกับน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ โคบอลต์โมลิบดีนัม โดยทำการทดลองที่ ที่อุณหภูมิ 305 ถึง 345 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 5 ถึง 25 ชั่วโมง⁻¹ ผล

การศึกษาพบว่า พบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำมันเมล็ดฝ้ายต่อน้ำมันดีเซล **10:90** จะมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งโดยใช้สภาวะเดียวกันกับไฮโดรทรีตติ้งในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และยังได้นำเสนอข้อมูลการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม หลังจากผ่านการใช้งาน **300** ชั่วโมง ยังมีความว่องไวสูงปกติ รวมทั้งได้เสนอปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิปฏิกิริยาและมีค่าพลังงานแอคทิเวชัน **111** กิโลจูลต่อโมล

David Kubicka, Ludek Kaluza. 2010. [5] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของน้ำมันเมล็ดเรพ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามชนิดคือนิกเกิล โมลิบดีนัม และนิกเกิลโมลิบดีนัม โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ **260 - 280** องศาเซลเซียส ความดัน **508** ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราการไหลเชิงสเปซ **0.25 ถึง 4** ชั่วโมง⁻¹ ในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ผลการศึกษาพบว่าความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาเรียงตามลำดับคือ นิกเกิลโมลิบดีนัม > โมลิบดีนัม > นิกเกิล โดยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะสองชนิดจะให้ค่าการเกิดไฮโดรคาร์บอนที่สูงกว่าตัวเร่งโลหะชนิดเดียว และได้นำเสนอผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสามคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลโมลิบดีนัม จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา คาร์บอกซีเลชัน และไฮโดรดีออกซิเจเนชัน, ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา คาร์บอกซีเลชัน และตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัม จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา ไฮโดรดีออกซิเจเนชันเท่านั้น

2.7 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

สภาวะในการทดลองไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชนิยมใช้อุณหภูมิระหว่าง **200 ถึง 450** องศาเซลเซียส ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม จะมีความว่องไวที่อุณหภูมิปฏิกิริยาที่ต่ำกว่า เมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ที่ความดันระหว่าง **200 ถึง 1015** ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซของเหลว **0.25 ถึง 25** ชั่วโมง⁻¹

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งเพื่อผลิตดีเซลชนิดไฮโดรคาร์บอน สามารถใช้น้ำมันพืช หรือกรดไขมัน ซึ่งพบว่าสารตั้งต้นทั้งสองชนิดเมื่อถูกกำจัดอะตอมของออกซิเจนออกจะได้อผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนอัลเคน

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

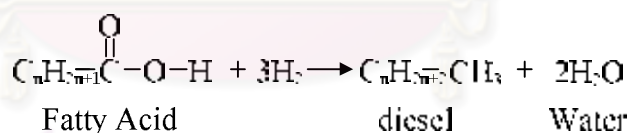
นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซัลไฟด์นิกเกิลโมลิบดีนัม โคบอลต์โมลิบดีนัม และนิกเกิลทั้งสแตน ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งเดิมที่ใช้งานในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่เร็วในการกำจัดออกซิเจนออกจากน้ำมันพืช จึงเป็นตัวเร่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

David Kubicka et al. และ George W. Huber et al. ได้นำเสนอปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องซึ่งอ้างอิงจากผลิตภัณฑ์หลักและผลิตภัณฑ์ร่วม สามปฏิกิริยา คือ [3], [5]

ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

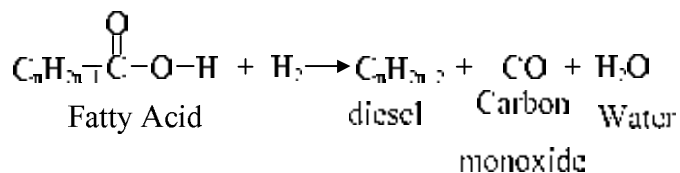
ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน เป็นปฏิกิริยาหลักที่ต้องการให้เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช โดยอะตอมของออกซิเจนจะถูกกำจัดออกจากโมเลกุลของน้ำมันพืชหรือกรดไขมัน อะตอมของออกซิเจนจะถูกกำจัดออกในรูปสารประกอบคือ น้ำ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ส่วนผลิตภัณฑ์หลักจะได้ไฮโดรคาร์บอนดีเซลที่มีความยาวของโซ่คาร์บอนเท่ากับความยาวของโซ่คาร์บอนในกรดไขมันซึ่งสอดคล้องกับน้ำมันพืชชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของปฏิกิริยานี้



สมการปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

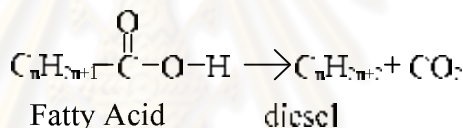
ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพร้อมกับปฏิกิริยาอื่นๆ เพื่อกำจัดอะตอมของออกซิเจน ออกในรูปของฟังก์ชันคาร์บอนิล โดยอะตอมคาร์บอนของกรดไขมันจะถูกกำจัดไปพร้อมกับอะตอมของออกซิเจนในรูปของ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่เป็นเอกลักษณ์ของปฏิกิริยานี้ และผลิตภัณฑ์หลักจะได้ไฮโดรคาร์บอนดีเซลที่มีความยาวของโซ่คาร์บอนน้อยกว่าความยาวของโซ่คาร์บอนในกรดไขมันหนึ่งอะตอม เนื่องจากเสียคาร์บอนหนึ่งอะตอมในรูปของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์



สมการปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

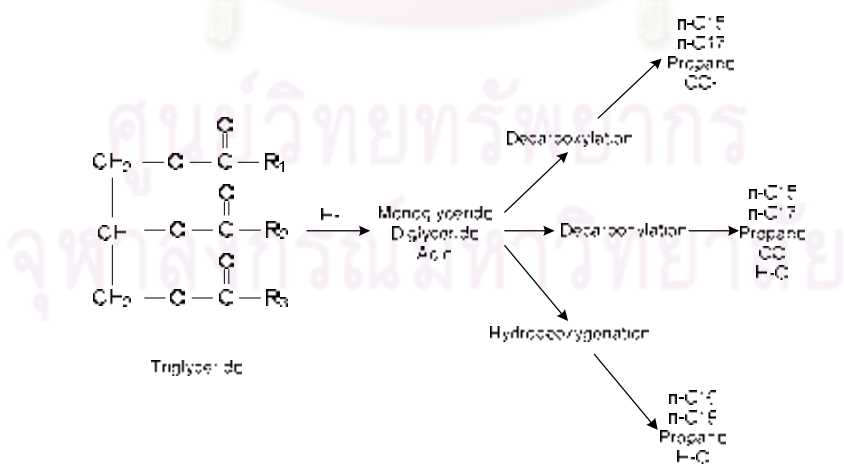
ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชัน

ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชัน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพร้อมกับปฏิกิริยาอื่นๆ เพื่อกำจัดอะตอมของออกซิเจน โดยการสลายตัวของกรดไขมันออกเป็นฟังก์ชันคาร์บอกซี ซึ่งปฏิกิริยานี้จะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่เป็นเอกลักษณ์ของปฏิกิริยา และในส่วนของผลิตภัณฑ์หลักจะได้ไฮโดรคาร์บอนดีเซลที่มีความยาวของโซ่คาร์บอนน้อยกว่าความยาวของโซ่คาร์บอนในกรดไขมันหนึ่งอะตอม เนื่องจากเสียคาร์บอนหนึ่งอะตอมในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



สมการปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชัน

ซึ่งทั้งสามปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชสามารถรวมเป็นแผนผังได้ดังนี้



สมการแผนผังปฏิกิริยากระบวนการไฮโดรทรีตติงนำเสนอโดย **George W. Huber** และ

คณะ

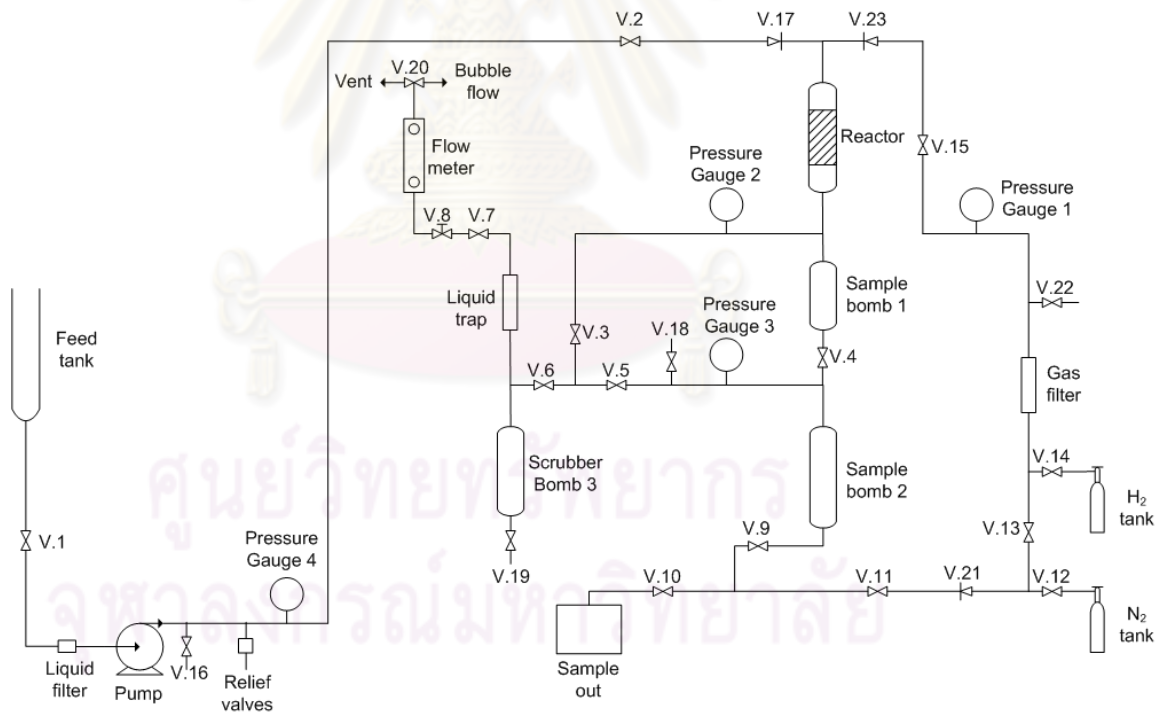
บทที่ 3

การทดลองและการวิเคราะห์

3.1 การทดลอง

ระบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ถูกใช้เพื่อศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเคชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยระบบเครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบและสร้างที่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งระบบถูกปรับแต่งเพื่อความเหมาะสมในงานวิจัย โดยเครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบให้รองรับอุณหภูมิสูงสุด 380 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุด 1600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และชิ้นส่วนของเครื่องปฏิกรณ์จะใช้วัสดุสเตนเลสตีลเป็นหลัก เพื่อป้องกันการกัดกร่อน เช่น ท่อ ข้อต่อ และวาล์ว โดยแผนผังเครื่องปฏิกรณ์ แสดงใน

รูป 3.1



รูป 3.1 แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง

ในการทดลองก๊าซ และของเหลวจะไหลจากส่วนของก๊าซและส่วนของของเหลวตามลำดับ และจะมาพบกันที่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Reactor)

ส่วนของก๊าซ ก๊าซไฮโดรเจนจะไหลผ่านมาตรวัดความดัน ซึ่งถูกติดตั้งเพื่อวัดความดันใน ส่วนของก๊าซ และจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 15 (Valve 15) เพื่อเข้าสู่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)

ส่วนของของเหลว ประกอบด้วยถังเก็บสารตั้งต้น ซึ่งปรับแต่งมาจากบิวเรตต์เพื่อสามารถ อ่านค่าระดับของเหลวได้ สารตั้งต้นที่เป็นของเหลวจะไหลผ่านวาล์วหมายเลข 1 (Valve 1) เข้าสู่ บั้มความดันสูง ซึ่งสามารถสร้างความดันสูงได้ที่อัตราการไหลต่ำ โดยความดันในส่วน ของของเหลวสามารถวัดได้จาก มาตรวัดความดันหมายเลข 4 (Pressure Gauge 4) ซึ่งในส่วน ของของเหลวจะถูกติดตั้งวาล์วนิรภัยเพื่อความปลอดภัย โดยจะปล่อยความดันเมื่อความดันในระบบ สูงเกินกว่า 1500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ของเหลวและก๊าซ จะพบกันที่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์และไหลลงมาสู่ส่วนล่าง ในเครื่อง ปฏิกรณ์บรรจตุ้แรงปฏิริยาตรงกลางระหว่างชั้นของลูกแก้ว โดยเครื่องปฏิกรณ์มีความยาว 47 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร และความหนา 0.089 เซนติเมตร ซึ่งในส่วน ของเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor) จะถูกหุ้มด้วยเหล็กประกบสองชั้นเพื่อส่งความร้อนต่อจาก แหล่งให้ความร้อน ซึ่งใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2000 วัตต์ สองชั้นและทั้งหมดในส่วน ของเครื่อง ปฏิกรณ์จะถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน เพื่อความปลอดภัยจากพื้นผิวที่ร้อน โดยอุณหภูมิในส่วน ของเครื่องปฏิกรณ์ถูกวัด เทอร์โมคัพเบิล (thermocouple) ซึ่งถูกติดตั้ง 3 จุดภายนอกเครื่อง ปฏิกรณ์ (ส่วนบน ตรงกลาง และส่วนล่าง) และ 1 ในตำแหน่งจุดศูนย์กลางภายในเครื่องปฏิกรณ์ และในส่วนใต้ของเครื่องปฏิกรณ์จะเชื่อมต่อกับระบบเก็บตัวอย่างซึ่งมีการทำงานดังนี้

ผลิตภัณฑ์ของเหลวและก๊าซ จะไหลผ่านถังเก็บตัวอย่างที่ 1 (Sample Bomb 1) เข้าสู่กับ ถังเก็บตัวอย่างที่ 2 (Sample Bomb 2) เพื่อแยกของเหลวและก๊าซออกจากกัน โดยของเหลวจะไหล ลงสู่ด้านล่างของถังเก็บตัวอย่าง และก๊าซจะไหลออกที่ด้านบนของถังเก็บตัวอย่าง ซึ่งความดันใน ส่วนบนและส่วนล่างของระบบเก็บตัวอย่างสามารถวัดได้จากมาตรวัดความดันที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และอัตราการไหลจะถูกควบคุมโดย วาล์วปรับละเอียดที่ 8 (Micro Metering Valve 8) ซึ่งสามารถวัดอัตราการไหลที่มาตรวัดอัตราการไหล (Bubble Flow Meter)

การเก็บตัวอย่างออกจากระบบ จะทำทุกๆ 6 ชั่วโมงระหว่างทำการทดลอง ซึ่งระบบถูก ออกแบบให้มีถังเก็บตัวอย่าง 2 ถัง เพื่อไม่ให้สภาวะคงตัวในระบบถูกกวนในระหว่างเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีขั้นตอนในการเก็บตัวอย่างดังนี้ ปิดวาล์วที่ 4 และ 5 เพื่อแยกถังเก็บตัวอย่างที่ 2 ออกจาก

ระบบ โดยของเหลวที่ไหลอย่างต่อเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกเก็บชั่วคราวในถังเก็บตัวอย่างที่ 1 และก๊าซจากระบบจะวิ่งผ่านวาล์วหมายเลข 3 เพื่อออกสู่อุปสรรยากาศ และในส่วนถังเก็บตัวอย่างที่ 2 ก๊าซจะถูกระบายออกสู่อุปสรรยากาศที่วาล์วหมายเลข 18 ส่วนของเหลวจะไหลออกจากระบบด้วยแรงดันผ่านวาล์วหมายเลข 9 และ 10 สู่อ่างเก็บตัวอย่าง

หลังจากการเก็บตัวอย่างเสร็จสิ้น ถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 จะสูญเสียความดัน จึงจำเป็นต้องปรับความดันให้เท่ากับแรงดันของระบบ โดยเติมก๊าซไนโตรเจน ผ่านวาล์วหมายเลข 9 11 และ 12 จนความดันในถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 มีค่าเท่ากับความดันของระบบ จากนั้นปิดวาล์วหมายเลข 9 11 และ 12 และเปิดวาล์วหมายเลข 4 และ 5 อย่างช้าๆ เพื่อเชื่อมต่อดังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 กับระบบทั้งหมด ตัวอย่างที่เก็บจะถูกติดฉลากเพื่อรอการวิเคราะห์

การทดลองจะใช้ตัวเร่งในอุตสาหกรรมไฮโดรทรีตติ้งเพื่อใช้ในการศึกษาสองชนิดคือ โคบอลต์โมลิบดีนัม และนิกเกิลโมลิบดีนัม โดยสภาวะในการทดลองแสดงในตาราง 3.1

ตาราง 3.1 สภาวะในการทดลอง

| สภาวะ | |
|--|---------------------|
| อุณหภูมิเครื่องปฏิกรณ์(เซลเซียส) | : 200,250, 300, 350 |
| ความดัน(ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) | : 750 |
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว(ชั่วโมง ⁻¹) | : 0.5, 1, 1.5 |
| อัตราการผลิตของน้ำมัน(มล./ชม.) | : 15, 30, 45 |
| อัตราส่วนก๊าซต่อน้ำมัน | : 500 : 1 |
| ระยะเวลาในการทดลอง(ชั่วโมง) | : 18 |
| เวลาในการเก็บตัวอย่าง(ชั่วโมง) | : 6 |
| ตัวเร่งปฏิกิริยา | : โคบอลต์โมลิบดีนัม |
| | : นิกเกิลโมลิบดีนัม |
| ปริมาตรเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา(มล.) | : 30 |

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 น้ำมันปาล์มโอเลอิน ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินในเกรดอุตสาหกรรมอาหาร

3.2.2 สารเคมี สารเคมีทั้งหมดที่ใช้ในงานวิจัยแสดงในตาราง 3.2

ตาราง 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

| ชื่อสาร | ผู้ผลิต/ผู้ขาย | เกรด/ความบริสุทธิ์ |
|-----------------------|-------------------|--------------------|
| Hydrogen | Praxair | 99.99 % |
| Ethanol | S.R. lab | industrial |
| Iso-propanol | Fisher Scientific | analytical reagent |
| Toluene | S.R. lab | industrial |
| Heptane | Qrec | analytical reagent |
| Methyl Octanoate | Aldrich | analytical reagent |
| Mix alkane ASTM D2886 | Restek | 99.9% |
| Carbon disulfide | Pan reaction | analytical reagent |
| Cobalt Molybdenum | ART | commercial |
| Nickel Molybdenum | Criterion | commercial |

3.3 การวิเคราะห์

ผลิตภัณฑ์ของเหลวในแต่ละการทดลองจะถูกวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคน การกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคน ความหนาแน่น ร้อยละกรดไขมัน ค่าของกรด และร้อยละน้ำหนักรของน้ำ

3.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนและการกระจายตัว

จากผลของสภาวะการทดลองเช่น อุณหภูมิ ความเร็วเชิงสเปซของเหลว และตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ในการทดลอง เป็นสาเหตุให้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณและการกระจายตัวของ

สารประกอบประเภทอัลเคนที่แตกต่างกัน โดยปริมาณอัลเคน จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี โดยใช้ก๊าซโครมาโตกราฟี varian รุ่น 3800 โดยใช้คอลัมน์แบบคาปิลารีรุ่น **innowax m 20** เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร และความหนาชั้นฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร โดยใช้ตัวตรวจวัดแบบ เพรมไอออนไนซ์ (flame ionization detector) โดยสภาวะคอลัมน์ในการวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟีแสดงในตาราง 3.3

ตาราง 3.3 สภาวะของคอลัมน์

| สภาวะ | |
|---|-----|
| อุณหภูมิเริ่มต้น(เซลเซียส) | 35 |
| ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิเริ่มต้น(นาที) | 10 |
| อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขั้นที่ 1 เพิ่มถึง 50 เซลเซียส(เซลเซียส/นาที) | 1 |
| อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขั้นที่ 2 เพิ่มถึง 80 เซลเซียส(เซลเซียส/นาที) | 2 |
| อัตราการเพิ่มอุณหภูมิขั้นที่ 3 เพิ่มถึง 230 เซลเซียส(เซลเซียส/นาที) | 3 |
| อุณหภูมิสุดท้าย(เซลเซียส) | 230 |
| ระยะเวลาคงที่อุณหภูมิสุดท้าย(นาที) | 10 |
| อุณหภูมิหัวฉีดสาร(เซลเซียส) | 230 |
| อุณหภูมิตัวตรวจวัด(เซลเซียส) | 250 |

3.3.2 ความหนาแน่นผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์ความหนาแน่นมีความสำคัญเนื่องจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์มีค่าที่แตกต่างกันมาก โดยค่าความหนาแน่นจะใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยค่าความหนาแน่นจะถูกวิเคราะห์โดยขวดตวงจำเพาะแบบ Gay-lussac pycnometer ทำโดยเติมผลิตภัณฑ์ของเหลวลงสู่ขวดตวงจำเพาะจนเต็ม แล้วจึงปิดฝา ซึ่งขวดตวงจำเพาะจะปรับเทียบปริมาตรของเหลวที่แน่นอนเมื่อปิดฝา เมื่อได้ค่าปริมาตรที่แน่นอนและน้ำหนักที่แน่นอนจึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นได้

3.3.3 ค่าของกรด

ค่าของกรดถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีการไตเตรตตามมาตรฐาน AOCS Cd-3D-63 ซึ่งเป็นการไตเตรตโดยใช้ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์สะเทินตัวอย่างให้เป็นกลาง ซึ่งค่าซึ่งค่าของกรดมีนิยามคือ ปริมาณของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในหน่วยมิลลิกรัมที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างปริมาณหนึ่งกรัมเป็นกลาง

3.3.4 ปริมาณร้อยละของน้ำ

หลังจากที่เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของเหลวซึ่งมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมและจะแยกชั้นกับผลิตภัณฑ์หลัก โดยปริมาณของน้ำสามารถบอกถึงออกซิเจนที่โดนกำจัดออกจากสารตั้งต้น ซึ่งสามารถวัดปริมาณได้โดยการ แยกชั้นและชั่งน้ำหนัก

3.4 การคำนวณในงานวิจัย

3.4.1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor) มีนิยามดังนี้

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนอง (Response Factor)} = \frac{\text{พื้นที่ของอัลเคน} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (Weight of .S.)}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง (Area of .S.)} \times \text{น้ำหนักของอัลเคน}}$$

3.4.2 การคำนวณหาปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน

$$\text{ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณอัลเคน(กรัม)}}{\text{ปริมาณตัวอย่างในชั้นน้ำมัน(กรัม)}} \times 100$$

โดย

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน (กรัม)} = \frac{\text{พื้นที่ของอัลเคน} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (Weight of .S.)}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง (Response Factor)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าปริมาณของอัลเคนที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 0.5 ชั่วโมง⁻¹ ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- พื้นที่ของอัลเคน C15 = 102031
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 0.00703 กรัม
- พื้นที่ของสารตัวอย่างภายใน = 1067047
- แฟกเตอร์ตอบสนองของ C15 = 1.3

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.3 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน (กรัม)} = \frac{102031 \times 0.00703}{1067047 \times 1.3} = 0.000517$$

หลังจากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์อัลเคนได้จาก

- ปริมาณอัลเคน C15 = 0.000517 กรัม
- ปริมาณสารตัวอย่าง = 0.0083 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.2 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน C15 (\%)} = \frac{0.000517}{0.0083} \times 100 = 6.230\%$$

3.4.3 การคำนวณหาค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (Liquid Hourly Space Velocity)

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของเหลว (ชม.⁻¹)} = \frac{\text{อัตราการไหลของของเหลว (มล./ชม.)}}{\text{ปริมาตรของเบตบรจตุว์เร่งปฏิกิริยา (มล.)}}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าเชิงสเปซที่ 0.5 ชั่วโมง⁻¹

- อัตราการไหลของของเหลว = 15 มิลลิตรต่อชั่วโมง
- ปริมาตรของเบตบรจตุว์เร่งปฏิกิริยา = 30 มิลลิตร

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.4 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของเหลว (ชม.⁻¹)} = \frac{15}{30} = 0.5$$

3.4.4 การคำนวณค่าของกรด (Acid value) ตามมาตรฐาน AOCS Cd-3d-63

โดยกำหนด

- ปริมาณน้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) = W
- สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร) = V
- ความเข้มข้นของสารละลาย (โมล/ลิตร) = N
- น้ำหนักโมเลกุลของกรดไขมัน = M

$$\text{ค่าของกรด} = \frac{56.1 Nv}{w}$$

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าของกรดของผลิตภัณฑ์ที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 0.5 ชั่วโมง⁻¹ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเมิลิบบดินัม ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- ปริมาณน้ำหนักตัวอย่าง = 10.2 กรัม
- สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ = 0.1 มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ = 0.08 โมลต่อลิตร

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.5 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\text{ค่าของกรด} = \frac{56.1 \times 0.08 \times 0.1}{10.2} = 0.044$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัม เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างในแต่ละการทดลองทุก 6 ชั่วโมง โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เก็บจากเครื่องปฏิกรณ์จะมีส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่เป็นก๊าซ สำหรับผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลวจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน ปริมาณน้ำ และค่าของกรด ผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซจะทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แสดงในภาคผนวก ก ภาคผนวก ข ภาคผนวก ค และภาคผนวก ง โดยเนื้อหาในการนำเสนอจะแบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์หัตถุคิบั

4.2 ผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน

4.3 ผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน

4.4 ผลการทดลองทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

4.4.2 ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

4.5 ผลการทดลองทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.5.2 ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

4.6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

4.1 ผลการวิเคราะห์หัตถุติบ

น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นส่วนหนึ่งของน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการแยกกรดไขมันอิสระและไฮปาล์มสเตียรีนออกแล้ว โดยน้ำมันปาล์มโอเลอินจะมีสีเหลืองและมีสถานะของเหลวที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งประกอบด้วยกิ่งของกรดไขมันหลายชนิด องค์ประกอบของกรดไขมันในโมเลกุลน้ำมันปาล์มโอเลอินสามารถวิเคราะห์ในรูปแบบเอสเทอร์ของกรดไขมัน โดยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี โดยน้ำหนักโมเลกุลสามารถคำนวณจากค่าของกรดและค่าสปอนนิฟิเคชัน ค่าองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอินแสดงในตาราง 4.1

ตาราง 4.1 องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน

| องค์ประกอบ | สูตรโมเลกุล | ร้อยละโดยน้ำหนัก |
|---|-------------|------------------|
| Myristic Acid | C14:0 | 1.0 |
| Palmitic Acid | C16:0 | 38.7 |
| Stearic Acid | C18:0 | - |
| Oleic Acid | C18:1 | 49.3 |
| Linoleic Acid | C18:2 | 10.5 |
| Linolenic Acid | C18:3 | 0.4 |
| ผลรวมองค์ประกอบอิ่มตัว | | 60.2 |
| ผลรวมองค์ประกอบไม่อิ่มตัว | | 39.7 |
| ผลรวมองค์ประกอบที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม | | 38.7 |
| ผลรวมองค์ประกอบที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม | | 60.2 |
| คุณสมบัติ | | |
| ร้อยละกรดไขมัน(ร้อยละโดยน้ำหนัก) | | 0.10 |
| ค่าของกรด(มก.ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/ก.ตัวอย่าง) | | 0.25 |
| ค่าสปอนนิฟิเคชัน(มก.ของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์/ก.ตัวอย่าง) | | 210 |
| น้ำหนักโมเลกุล(กรัม/โมล) | | 850 |

ผลการวิเคราะห์วัสดุบดแสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มโอเลอิน จะมีปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 14 ถึง 18 อะตอม โดย องค์ประกอบหลักจะเป็นกรดไขมันที่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม ซึ่งจากการวิเคราะห์น้ำมันปาล์มโอเลอินจะมีค่าของกรด 0.25 มิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำเนื่องจากน้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นน้ำมันที่ผ่านกระบวนการแยกกรดไขมันและไซสเตอรินออกไปแล้ว

4.2 ผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันกึ่งไนโตรเจน

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ส่วนของเหลว ทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ภายใต้ความดันกึ่งไนโตรเจน แสดงในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม.⁻¹ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันกึ่งไนโตรเจน

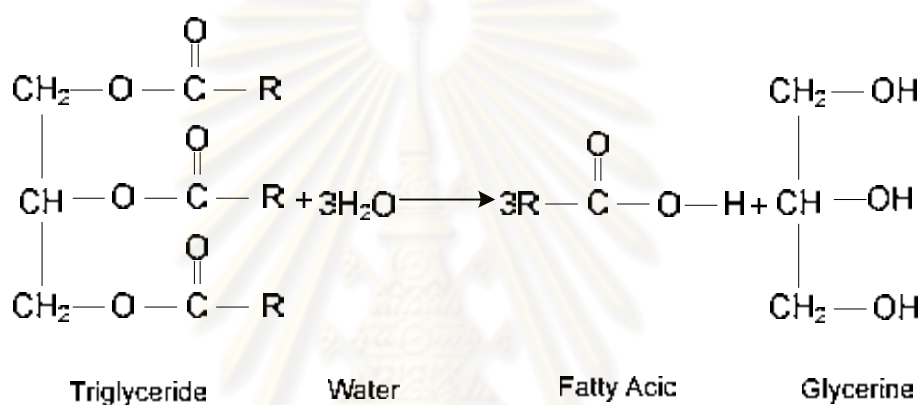
| อุณหภูมิ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|------|------|------|------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณอัลเคน C15 (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณอัลเคน C16 (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณอัลเคน C17 (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณอัลเคน C18 (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | - | - | - | - |
| ค่าของกรด | 0.27 | 0.28 | 0.30 | 4.12 |

* ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง)

** ค่าของกรดของสารตั้งต้น 0.25 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน พบว่า ตัวอย่างมีปริมาณของกรดไขมัน โดยไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำ

Logan และคณะ [14] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ โดยทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืช และน้ำ พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะความดัน 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแสดงดังสมการ



สมการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์

ผลการทดลองพบว่าเมื่อนำน้ำมันปาล์มโอเลอินป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ภายใต้อุณหภูมิสูง และภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจนที่สูงโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะพบว่าตัวอย่างจะมีค่าของกรดเกิดขึ้น โดยกรดไขมันเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ระหว่างโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน และน้ำซึ่งอยู่ในรูปของความชื้น ซึ่งค่าของกรดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมายถึงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

4.3 ผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ส่วนของเหลว ทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจนแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.3 ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม.⁻¹ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน

| คุณสมบัติ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|------|------|------|------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณอัลเคน C15 (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณอัลเคน C16 (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณอัลเคน C17 (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณอัลเคน C18 (% wt.) | - | - | - | - |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | - | - | - | - |
| ค่าของกรด | 0.26 | 0.28 | 0.41 | 4.17 |

* ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง)

** ค่าของกรดของสารตั้งต้น 0.25 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันไฮโดรเจน พบว่า ผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างมีปริมาณของกรด โดยไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำ เช่นเดียวกับผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันไฮโดรเจน

ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อน้ำมันปาล์มโอเลอินป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ภายใต้อุณหภูมิสูง และภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่สูงโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะพบว่าตัวอย่างจะมีค่าของกรดเกิดขึ้น โดยกรดไขมันเกิดขึ้นจาก ปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิส ระหว่างโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน และน้ำซึ่งอยู่ในรูปของความชื้นที่ ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และตัวอย่างไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำแสดงให้เห็นว่า กรดไขมันและไตรกลีเซอไรด์ไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันกับก๊าซไฮโดรเจนได้โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน และผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน จะพบว่าผลการ

ทดลองที่เหมือนกันกล่าวคือ พบกรดไขมันที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่าง ไตรกลีเซอไรด์ และน้ำที่อยู่ในรูปของความชื้น โดยค่าของกรดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

4.4 ผลการทดลองทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของเหลว และผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซที่ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมแสดงในตาราง 4.4 ถึงตาราง 4.6

ตาราง 4.4 ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชม.⁻¹ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

| อุณหภูมิ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | - | 36.54 | 83.99 | 94.05 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (% wt.) | - | 1.35 | 3.43 | 5.95 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (% wt.) | - | 13.18 | 28.15 | 31.97 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (% wt.) | - | 2.25 | 5.89 | 9.46 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (% wt.) | - | 19.74 | 46.52 | 46.65 |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | - | 7.42 | 11.56 | 11.66 |
| ค่าของกรด | 10.70 | 4.74 | 0.44 | 0.44 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | ไม่พบ | ไม่พบ | พบ | พบ |

ตาราง 4.5 ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ซม.⁻¹ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

| อุณหภูมิ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | - | 14.46 | 70.71 | 91.75 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (% wt.) | - | 0.65 | 2.65 | 5.07 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (% wt.) | - | 5.01 | 25.90 | 31.97 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (% wt.) | - | 1.13 | 3.78 | 8.27 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (% wt.) | - | 7.65 | 38.36 | 46.43 |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | - | 4.29 | 10.71 | 11.45 |
| ค่าของกรด | 7.78 | 8.60 | 2.14 | 0.74 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | ไม่พบ | ไม่พบ | พบ | พบ |

ตาราง 4.6 ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ซม.⁻¹ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

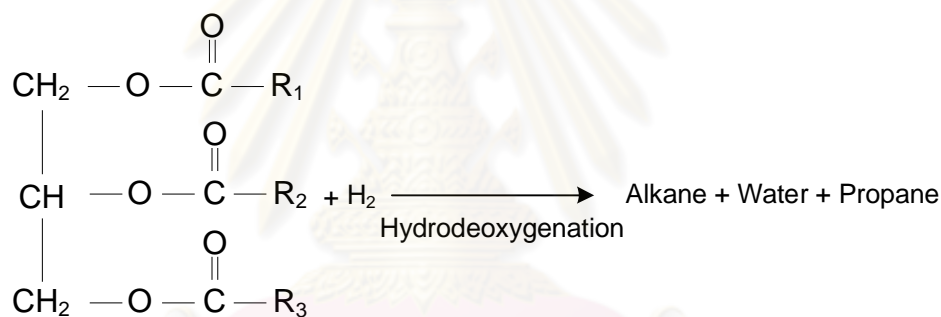
| อุณหภูมิ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | - | 8.29 | 62.11 | 76.91 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (% wt.) | - | 0.41 | 2.34 | 3.92 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (% wt.) | - | 2.80 | 22.55 | 28.31 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (% wt.) | - | 0.73 | 3.99 | 5.92 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (% wt.) | - | 4.33 | 33.22 | 38.74 |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | - | 3.13 | 8.46 | 10.25 |
| ค่าของกรด | 6.06 | 8.90 | 5.37 | 3.44 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | ไม่พบ | ไม่พบ | พบ | พบ |

* ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง)

** ค่าของกรดของสารตั้งต้น 0.25 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง พบว่าประกอบด้วยสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และ 18 อะตอมรวมถึงน้ำที่เกิดขึ้นในปริมาณที่มาก ซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และยังพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม และ 17 อะตอมเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้ยังตรวจพบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดไขมัน

เมื่อนำน้ำมันปาล์มโอเลอินมาทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเรียกว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ออกซิเจนอะตอมในโครงสร้างของน้ำมันปาล์มโอเลอินจะถูกกำจัดออก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาคือ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเทียบเท่ากับจำนวนคาร์บอนของกิงกรดไขมันในโครงสร้างของน้ำมันปาล์มโอเลอิน นอกจากนี้ยังมีน้ำและก๊าซโพเพนเกิดขึ้นพร้อมกันด้วย ดังแสดงในสมการ



Triglyceride

สมการปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันพืช

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ พบสารเคมีที่ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันคือ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมไม่เท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมของสารตั้งต้น คือ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม และ 17 อะตอม รวมถึงกรดไขมัน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พบในบางกรณี

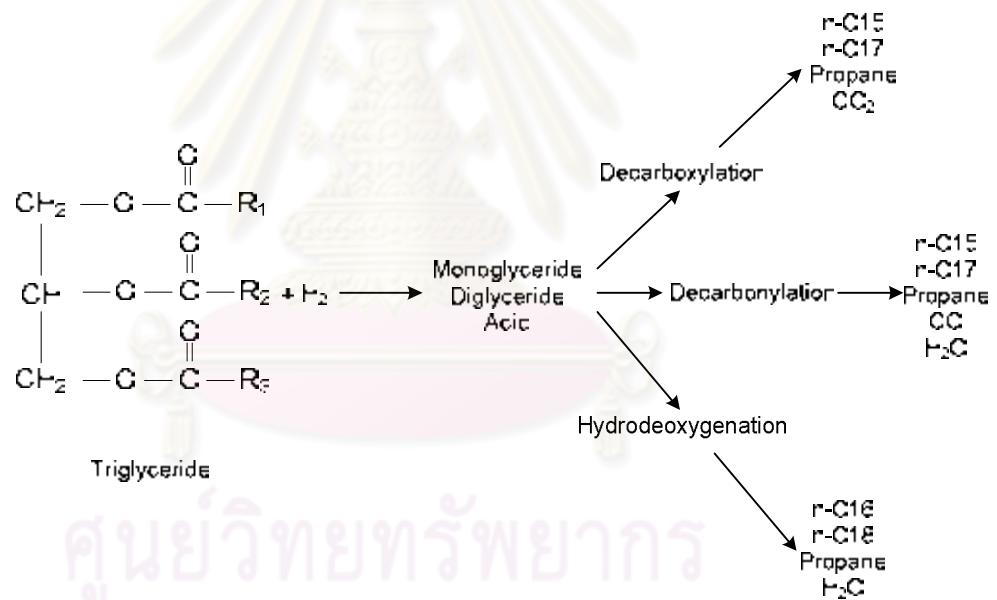
George W. Huber [3] และคณะได้ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดทานตะวันของพบว่า ปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช มีปฏิกิริยาที่แตกต่างเกิดขึ้นพร้อมกันสามปฏิกิริยา เพื่อเปลี่ยนโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นสารประกอบประเภทอัลเคน คือ

1.ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชัน จะเป็นปฏิกิริยาที่ไม่จำเป็นต้องใช้ไฮโดรเจนและมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม โดยจะให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่

2.ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ร่วมเป็น น้ำ และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยจะให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่

3.ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน เป็นปฏิกิริยาเป้าหมายของกระบวนการนี้ เพื่อเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นสารประกอบประเภทอัลเคน ซึ่งจะมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม และผลิตภัณฑ์หลักเป็นอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่

ซึ่งทั้งสามปฏิกิริยาจะมีเอกลักษณ์โดยมีผลิตภัณฑ์ร่วมที่แตกต่างกัน และจะพบสารเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างปฏิกิริยายังไม่สมบูรณ์ เช่น โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และกรดไขมัน ดังแสดงแผนผังปฏิกิริยาแสดงในสมการ



สมการแผนผังปฏิกิริยากระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

ผลการวิเคราะห์ผลการทดลองในงานวิจัยแสดงให้เห็นว่ากระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน จะพบการเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับแผนผังกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งที่ George W. Huber ได้เสนอไว้ กล่าวคือพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม 18 อะตอม และน้ำซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน และพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม 17 อะตอม และก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน นอกจากนี้คาดว่าน่าจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันอีกด้วยแต่ไม่สามารถยืนยันได้ชัดเจน เพราะไม่สามารถวิเคราะห์หาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

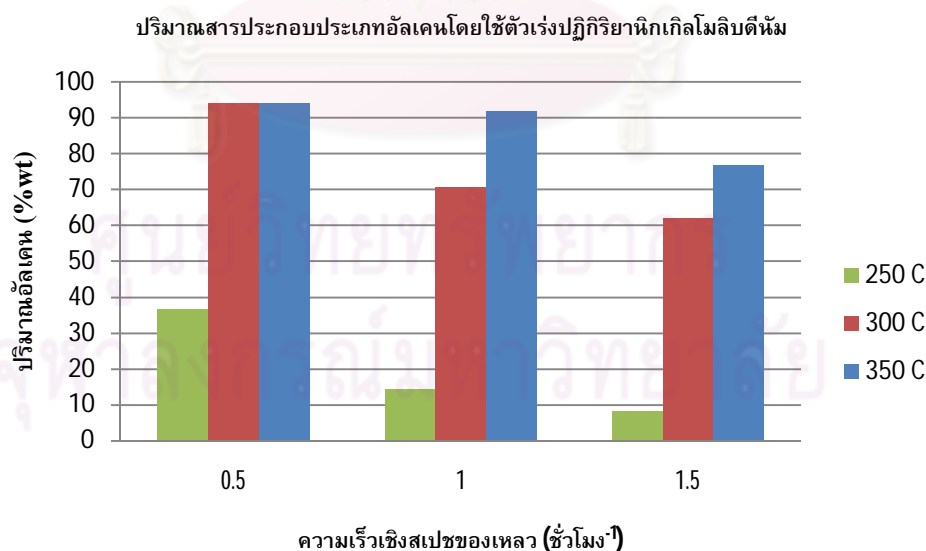
4.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล

โมลิบดีนัม

การทดลองจะศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม นำเสนอโดยใช้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนเป็นตัวเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิซึ่งปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนสามารถคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณอัลเคน(กรัม)}}{\text{ปริมาณตัวอย่างในชั้นน้ำมัน(กรัม)}} \times 100$$

ผลการทดลองทำการเปรียบเทียบที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากันโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน ดังแสดงในรูป 4.1



รูป 4.1 ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลการทดลองแสดงถึงผลของอุณหภูมิโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมดังรูป 4.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากัน พบว่าปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสามารถเกิดได้มากขึ้น ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนจึงมีค่าสูงขึ้น

Pavel Simacek และคณะได้ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงของน้ำมันเมล็ดเรพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม พบว่าเมื่ออุณหภูมิปฏิกิริยาสูงขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนเพิ่มขึ้น โดยการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณสารตั้งต้นอยู่มากและมีผลิตภัณฑ์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทอัลเคนในปริมาณที่น้อยและที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียสจะไม่พบสารตั้งต้นเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ โดยจะพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีปริมาณมากกว่าการทดลองที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส

จากกฎอัตราจลพลศาสตร์ [16] กล่าวถึง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีผลขึ้นกับตัวแปรคือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าคงที่ของปฏิกิริยา โดยค่าคงที่ของปฏิกิริยาจะมีผลขึ้นกับอุณหภูมิตามสมการของ Arrhenius คือ การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสูงขึ้น และมีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

ที่อุณหภูมิต่ำผลิตภัณฑ์จะมีค่าของกรดสูงแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำจะไม่สามารถกำจัดออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นได้หมด ดังนั้นออกซิเจนบางส่วนจะอยู่ในรูปของกรดไขมัน ในทางกลับกันที่อุณหภูมิสูงค่าของกรดจะลดต่ำลงเพราะว่าออกซิเจนในกรดไขมันสามารถทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนได้ โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ไม่พบอัลเคนในตัวอย่าง และการใช้ตัวเร่งนิกเกิลโมลิบดีนัมจะให้ค่าปริมาณอัลเคนสูงสุด 94.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

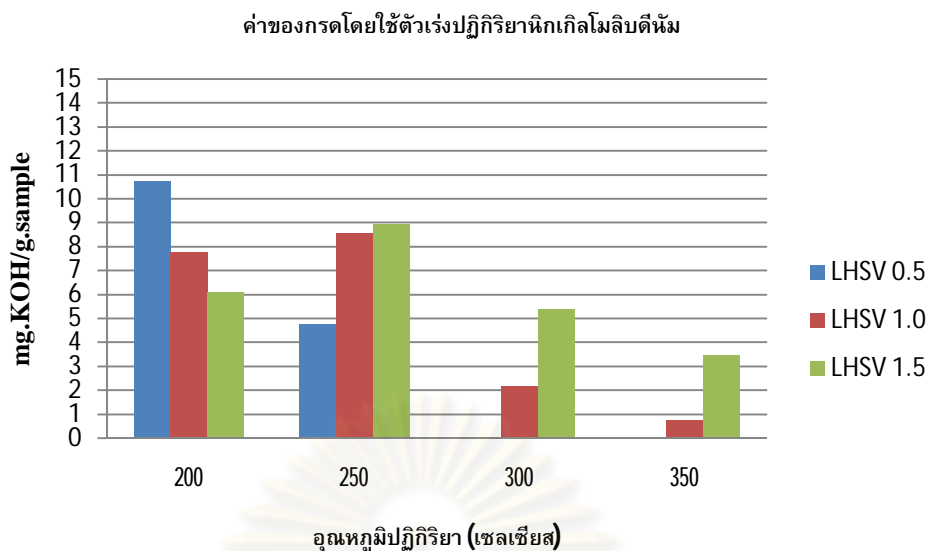
ผลการทดลองการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมดังแสดงในตาราง 4.4 ถึง 4.6 ได้แสดงปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน ปริมาณน้ำ ค่าของกรด และการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าอุณหภูมิผลต่อเส้นทางปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอินคือ

ที่อุณหภูมิต่ำ (200 องศาเซลเซียส) ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำ แต่พบว่าปริมาณกรดเกิดขึ้นเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดการแตกตัวของน้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นกรดไขมัน

ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตรวจพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และ 18 อะตอม ซึ่งมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน นอกจากนี้คาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลน่าจะเกิดขึ้นพร้อมกันด้วย เนื่องจากตรวจพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม และ 17 อะตอม แต่ในการทดลองไม่สามารถตรวจสอบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ และไม่พบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสจะพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และ 18 อะตอม ในปริมาณที่มากกว่า สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม และ 17 อะตอม ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น และมีปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเป็นปฏิกิริยาร่วม

ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตรวจพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอมและพบน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมินี้จะพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันสามารถเกิดได้มากขึ้นเพราะพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอม และน้ำในปริมาณที่มากขึ้น และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลน่าจะเกิดได้มากขึ้นตามด้วยเพราะพบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 และ 17 อะตอม และน้ำ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียสปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 และ 17 อะตอม และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนค่าของกรดจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่ากรดไขมันสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น

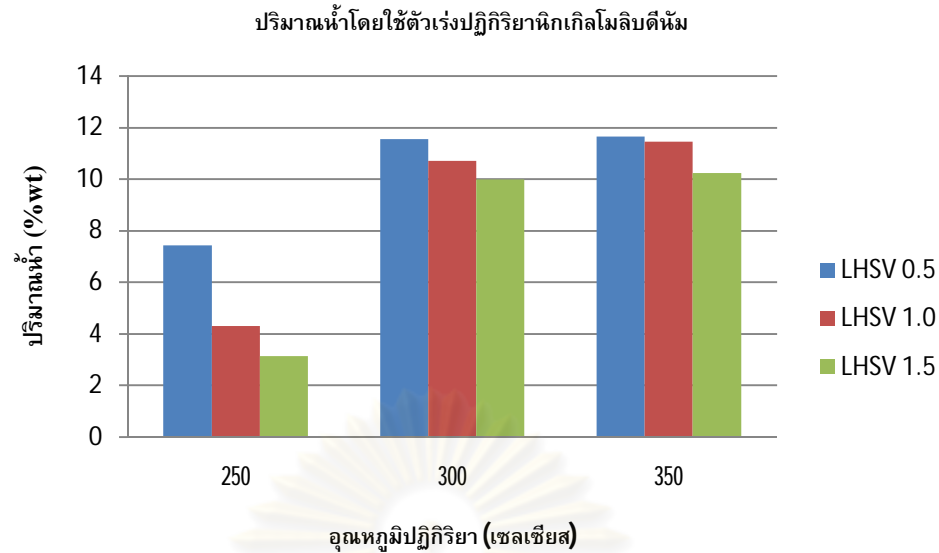
ผลการทดลองผลของอุณหภูมิในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอินมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันเป็นปฏิกิริยาหลัก ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันเป็นปฏิกิริยาร่วม โดยพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลทำให้ปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติงสามารถเกิดได้ดีขึ้น



รูป 4.2 ค่าของกรดโดยใช้ตัวเร่งนิกเกิลโมลิบดีนัม

ผลการทดลองการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมดังรูป 4.2 พบแนวโน้มที่ชัดเจนระหว่าง อุณหภูมิและค่าของกรด ซึ่งค่าของกรดจะมีค่าต่ำลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่ากรดไขมันสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเพื่อเกิดเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนได้ และที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียสจะพบกรดในปริมาณมากเพราะว่ากรดไขมันไม่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนเพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนได้ที่อุณหภูมิต่ำ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.3 ปริมาณน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

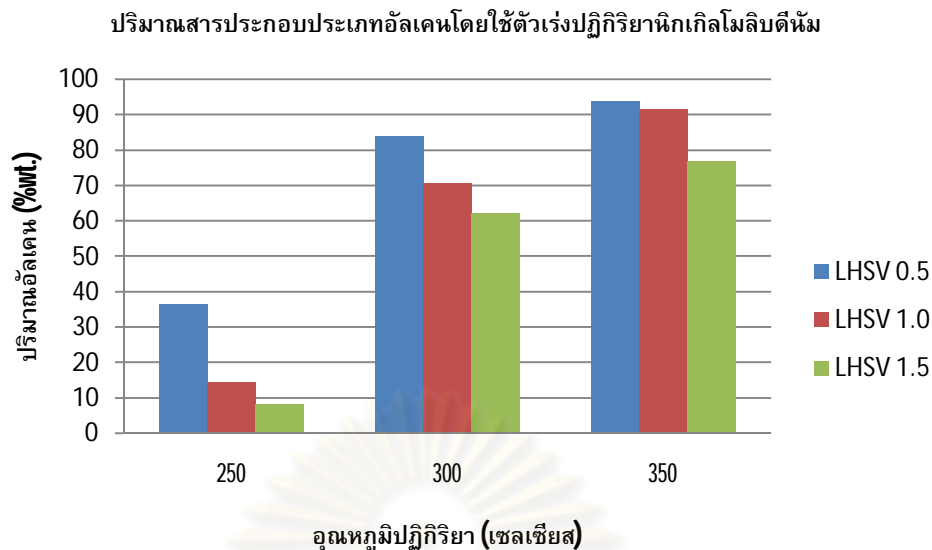
จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากันดังรูป 4.3 จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น น้ำจะมีปริมาณที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำจะสูงที่สุดที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมงที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณน้ำเท่ากับ 11.67 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4.2 ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรिटติ้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (LHSV) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีนิยามดังนี้

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ชม.}^{-1}\text{)} = \frac{\text{อัตราการไหลของของเหลว (มล.ชม.}^{-1}\text{)}}{\text{ปริมาตรของเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (มล.)}}$$

โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเร็วเชิงสเปซของของเหลว ที่ 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง ผลของอัตราการไหลเชิงสเปซของของเหลวต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนแสดงในรูป 4.4



รูป 4.4 ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวโดยใช้ตัวเร่งนิกเกิลโพลีบดัดใหม่

ผลการทดลองทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิปฏิกิริยาเท่ากันดังรูป 4.4 พบว่าปริมาณของประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเร็วเชิงสเปซของของเหลว ซึ่งมีผลมาจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงมีผลทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์อัลเคนลดลง โดยพบว่าที่ความเร็วเชิงสเปซ 0.5 และ 1.0 ต่อชั่วโมงจะให้ค่าปริมาณประกอบประเภทอัลเคนที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าความเร็วของสเปซของเหลวที่เหมาะสมสำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบดัดใหม่คือ 1 ต่อชั่วโมง เนื่องจาก ใช้ระยะเวลาสั้นกว่าในการทำปฏิกิริยา

ผลการทดลองผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีผลต่อระยะเวลาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ โดยการเพิ่มเร็วเชิงสเปซจะส่งผลให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาลดลง

4.5 ผลการทดลองทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของเหลว และผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซที่ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมแสดงในตาราง 4.7 ถึงตาราง 4.9

ตาราง 4.7 ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชม.⁻¹ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

| คุณทงุมิ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | - | 8.70 | 39.55 | 83.58 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (% wt.) | - | 0.14 | 0.85 | 3.75 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (% wt.) | - | 3.55 | 16.21 | 30.87 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (% wt.) | - | 0.22 | 1.26 | 5.12 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (% wt.) | - | 4.77 | 21.22 | 43.82 |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | - | 3.94 | 6.13 | 9.99 |
| ค่าของกรด | 1.51 | 9.23 | 6.87 | 3.23 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | ไม่พบ | ไม่พบ | พบ | พบ |

ตาราง 4.8 ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ซม.⁻¹ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

| คุณสมบัติ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | - | 3.02 | 33.23 | 34.91 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (% wt.) | - | 0.05 | 0.81 | 1.65 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (% wt.) | - | 1.22 | 13.61 | 14.34 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (% wt.) | - | 0.07 | 1.16 | 2.22 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (% wt.) | - | 1.68 | 17.63 | 16.69 |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | - | 2.77 | 4.98 | 5.81 |
| ค่าของกรด | 1.18 | 4.63 | 7.92 | 8.28 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | ไม่พบ | ไม่พบ | พบ | พบ |

ตาราง 4.9 ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ซม.⁻¹ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

| คุณสมบัติ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|-------|-------|-------|-------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | - | 1.59 | 20.30 | 25.02 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (% wt.) | - | 0.00 | 0.54 | 1.10 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (% wt.) | - | 0.67 | 8.40 | 10.48 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (% wt.) | - | 0.04 | 0.73 | 1.38 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (% wt.) | - | 0.87 | 10.61 | 12.04 |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | - | 1.96 | 2.11 | 3.08 |
| ค่าของกรด | 0.94 | 3.74 | 5.03 | 8.85 |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | ไม่พบ | ไม่พบ | พบ | พบ |

* ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง)

** ค่าของกรดของสารตั้งต้น 0.25 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง

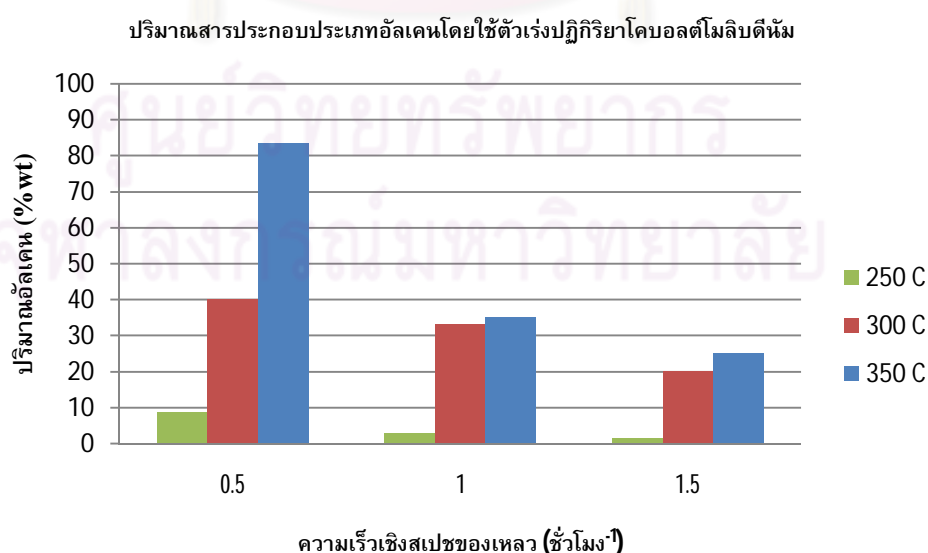
จากผลการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ทำการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมจะพบสารเคมีที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม กล่าวคือพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และ 18 อะตอมเกิดขึ้นในปริมาณมาก และยังพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม และ 17 อะตอม เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย นอกจากนี้ยังตรวจพบ น้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และกรดไขมัน

4.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

การทดลองจะศึกษาผลของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติ้งโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม นำเสนอโดยใช้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนเป็นตัวเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิซึ่งปริมาณสารประกอบอัลเคนสามารถคำนวณดังนี้

$$\text{ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณอัลเคน}}{\text{ปริมาณตัวอย่าง}} \times 100$$

ผลการทดลองทำการเปรียบเทียบที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากันโดยการใช้น้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมเพื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน ดังแสดงในรูป 4.5



รูป 4.5 ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการทดลองผลของอุณหภูมิโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมแสดงในรูป 4.5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากัน พบว่าปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสามารถเกิดได้มากขึ้น ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนจึงมีค่าสูงขึ้น

Pavel Simacek และคณะได้ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงของน้ำมันเมล็ดเรพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม พบว่าเมื่ออุณหภูมิปฏิกิริยาสูงขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์สารประกอบประเภทอัลเคนเพิ่มขึ้นโดยพบว่าที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณสารตั้งต้นอยู่มาก ซึ่งมีผลิตภัณฑ์สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในปริมาณที่น้อย และที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียสจะไม่พบสารตั้งต้นเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ แต่จะพบปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส

ทฤษฎีจากกฎอัตราจลพลศาสตร์กล่าวถึง อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะมีผลขึ้นกับตัวแปรคือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น และค่าคงที่ของปฏิกิริยา โดยกฎของ Arrhenius ได้อธิบายถึงการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลทำให้ค่าคงที่ของปฏิกิริยาสูงขึ้น มีผลทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น

ที่อุณหภูมิต่ำผลิตภัณฑ์จะมีค่าของกรดสูง เพราะว่าสารตั้งต้นบางส่วนจะอยู่ในรูปของกรดไขมัน โดยค่าของกรดแสดงในรูป 4.6 และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียสจะไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคนในตัวอย่าง การใช้ตัวเร่งโคบอลต์โมลิบดีนัมจะให้ค่าปริมาณอัลเคนสูงสุด 83.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

ผลการทดลองการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมดังแสดงในตาราง 4.7 ถึง 4.9 ได้แสดงปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน ปริมาณน้ำ ค่าของกรด และการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าอุณหภูมิผลต่อเส้นทางปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มโอเลอินคือ

ที่อุณหภูมิต่ำ (200 องศาเซลเซียส) ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำ แต่พบว่ามีปริมาณกรดเกิดขึ้นเล็กน้อยแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดการแตกตัวของน้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นกรดไขมัน

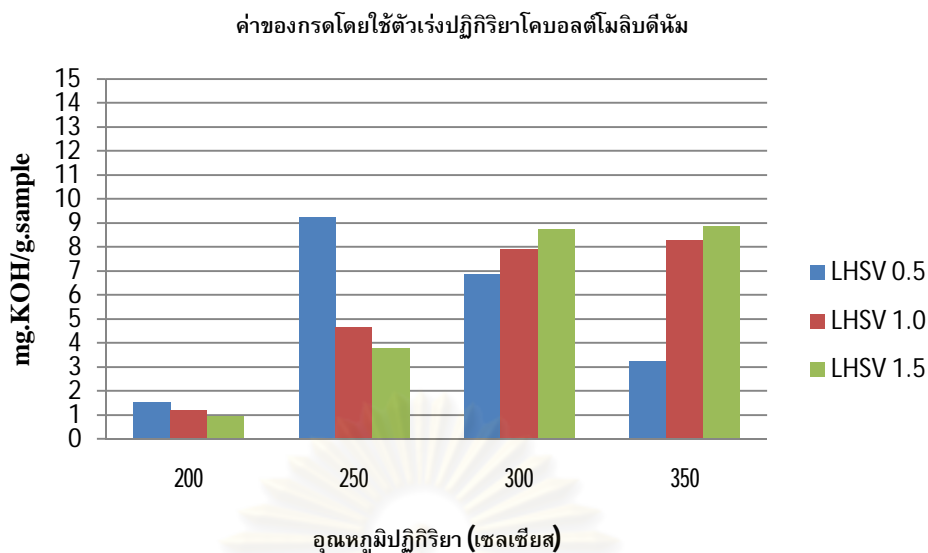
ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตรวจพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และ 18 อะตอม ซึ่งมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมซึ่งแสดงถึงการ

เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน นอกจากนี้คาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลน่าจะเกิดขึ้นพร้อมกันด้วย เนื่องจากตรวจพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม และ 17 อะตอม แต่ในการทดลองไม่สามารถตรวจสอบก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ และไม่พบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสจะพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และ 18 อะตอม ในปริมาณที่มากกว่า สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม และ 17 อะตอม ซึ่งแสดงถึงปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้น และมีปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาร่วม

ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างตรวจพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 ถึง 18 อะตอมและพบน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมินี้จะพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันสามารถเกิดได้มากขึ้นเพราะพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอม และน้ำในปริมาณที่มากขึ้น และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลน่าจะเกิดได้มากขึ้นตามด้วยเพราะพบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 และ 17 อะตอม และน้ำ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียสปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเกิดขึ้นด้วย เนื่องจากพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 และ 17 อะตอม และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนค่าของกรดจะมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่ากรดไขมันสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้มากขึ้นเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น

ผลการทดลองผลของอุณหภูมิในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอินมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเป็นปฏิกิริยาหลัก ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเกิดขึ้น ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเกิดขึ้น และปฏิกิริยาการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมันเป็นปฏิกิริยาร่วม โดยพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลทำให้ปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติงสามารถเกิดได้ดีขึ้น

ผลการทดลองพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน จะมีแผนผังปฏิกิริยาเช่นเดียวกับแผนผังปฏิกิริยากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดทานตะวันดังที่เสนอโดย George W. Huber [3] และคณะ

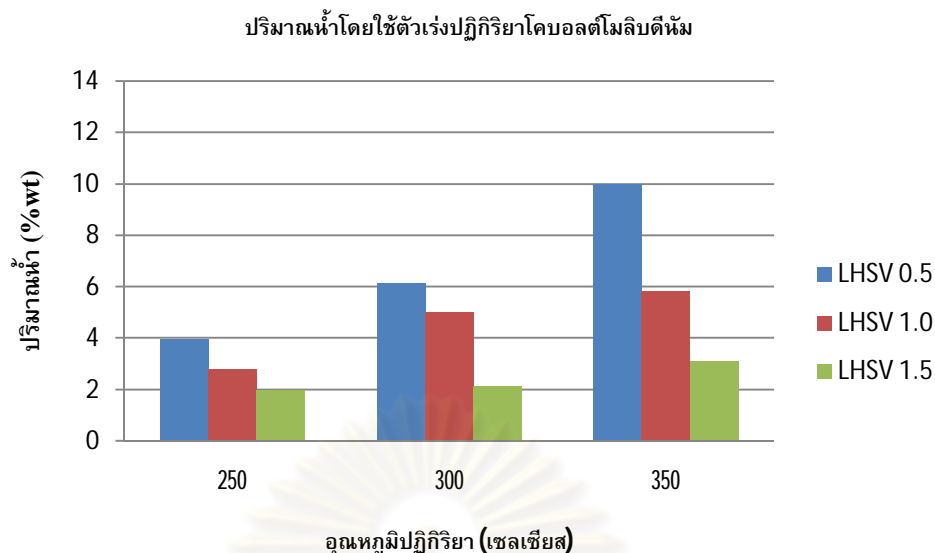


รูป 4.6 ค่าของกรดโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ผลการทดลองโดยการใช้น้ำมันพืชเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจนระหว่างอุณหภูมิปฏิกิริยา และค่าของกรด แต่พบว่าที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง มีปริมาณกรดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงว่ากรดไขมันสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนมากขึ้น เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนได้

ในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช จะพบน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ซึ่งปริมาณน้ำจะเป็นข้อมูลที่บอกถึงปริมาณออกซิเจนที่กำจัดออกจากโมเลกุลของน้ำมันพืช โดยปริมาณน้ำจะต้องมีความสอดคล้องกับปริมาณของอัลเคนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลัก โดยในงานวิจัยนี้จะนำค่าปริมาณน้ำใช้เพื่อยืนยันความสอดคล้องต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน โดยค่าปริมาณน้ำแสดงในรูป 4.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4.7 ปริมาณน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โม่ลิบดิน้ม

เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากัน จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำจะเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะสามารถเกิดได้มากขึ้น และปริมาณน้ำจะมีค่าสูงที่สุดที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว **0.5** ต่อ ชั่วโมงที่อุณหภูมิ **350** องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณน้ำเท่ากับ **9.99** เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยแนวโน้มปริมาณน้ำจะสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนคือ ปริมาณน้ำและปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้มากขึ้น เพื่อกำจัดออกซิเจนในน้ำมันพืชและกรดไขมัน โดยออกซิเจนจะถูกกำจัดออกในรูปของน้ำ

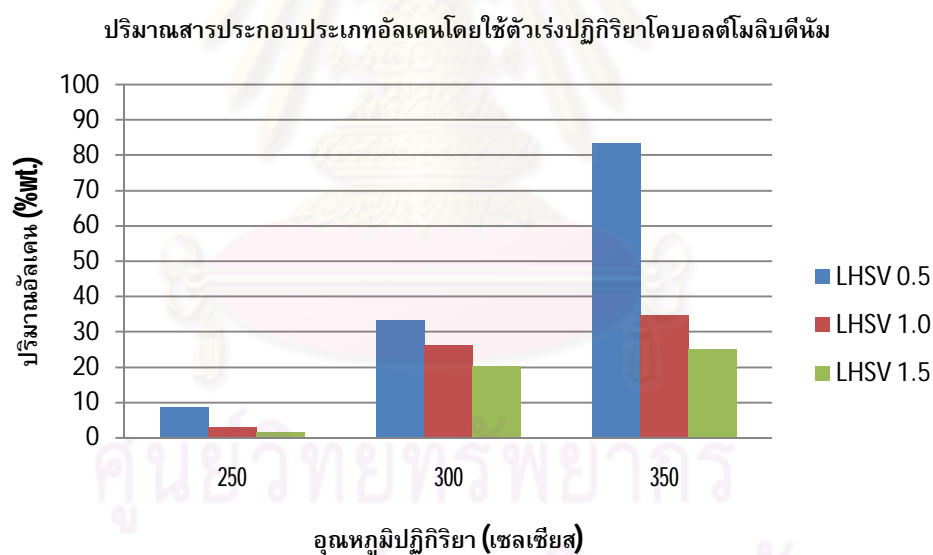
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโม่ลิบดิน้ม จะได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมในปริมาณมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โม่ลิบดิน้ม ในทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโม่ลิบดิน้มมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โม่ลิบดิน้ม ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน

4.5.2 ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลิบดินัม

ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (LHSV) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลอย่างต่อเนื่อง โดยที่ความเร็วเชิงสเปซต่ำจะมีสารที่วิ่งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลานานกว่า ความเร็วเชิงสเปซที่สูง ซึ่งความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีนิยามดังนี้

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ชม.}^{-1}\text{)} = \frac{\text{อัตราการไหลของของเหลว (มล.ชม.}^{-1}\text{)}}{\text{ปริมาตรของเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (มล.)}}$$

โดยในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเร็วเชิงสเปซของของเหลว ที่ 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง ผลของอัตราการไหลเชิงสเปซของเหลวต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลิบดินัมแสดงในรูป 4.8



รูป 4.8 ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โพลิบดินัม

ผลการทดลองทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิปฏิกิริยาเท่ากันดังรูป 4.8 พบว่า ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าลดลงความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลมาจากระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลงหมายถึงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจะ

ลดลง ซึ่งมีผลทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์สารประกอบประเภทอัลเคนมีค่าลดลง การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมควรเลือกความเร็วเชิงสเปซที่ 0.5 ต่อชั่วโมงเนื่องจากให้ค่าปริมาณประกอบประเภทอัลเคนสูงที่สุด

ผลการทดลองผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีผลต่อระยะเวลาที่สารทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ โดยการเพิ่มเร็วเชิงสเปซจะส่งผลให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาลดลง

4.6 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

การเปรียบเทียบในส่วนของผลของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน, ปริมาณน้ำ และค่าของกรด โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม โดยคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงในตาราง 4.10 และการเปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยาแสดงในตาราง 4.11

ตาราง 4.10 คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

| คุณสมบัติ | นิกเกิลโมลิบดีนัม | โคบอลต์โมลิบดีนัม |
|----------------------------|-------------------|-------------------|
| ปริมาณนิกเกิล (% wt) | 3.5 | - |
| ปริมาณโคบอลต์ (% wt) | - | 3.5 |
| ปริมาณโมลิบดีนัม (% wt) | 15.0 | 13.7 |
| พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม) | 170.63 | 193.82 |
| น้ำหนักที่บรรจุในเบด(กรัม) | 24.76 | 23.32 |
| ปริมาตรของเบด (มล.) | 30 | 30 |

ตาราง 4.11 เปรียบเทียบผลของตัวเร่งปฏิกิริยา

| อุณหภูมิ (เซลเซียส) | 200 | 250 | 300 | 350 |
|--|-------------|-------------|--------------|--------------|
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | -(-) | 36.54(8.70) | 83.99(39.55) | 94.05(83.58) |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | -(-) | 7.42(3.94) | 11.56(6.13) | 11.66(9.99) |
| ค่าปริมาณกรด | 10.70(1.51) | 4.74(9.23) | 0.44(6.87) | 0.44(3.23) |
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | -(-) | 14.46(3.02) | 70.71(33.23) | 91.75(34.91) |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | -(-) | 4.29(2.77) | 10.71(4.98) | 11.45(5.81) |
| ค่าปริมาณกรด | 7.78(1.18) | 8.60(4.63) | 2.14(7.92) | 0.74(8.28) |
| ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ซม.⁻¹ | | | | |
| ปริมาณอัลเคน (% wt.) | -(-) | 8.29(1.59) | 62.11(20.30) | 76.91(25.02) |
| ปริมาณน้ำ (% wt.) | -(-) | 3.13(1.96) | 8.46(2.11) | 10.25(3.08) |
| ค่าปริมาณกรด | 6.06(0.94) | 8.90(3.74) | 5.37(5.03) | 3.44(8.85) |

* ผลการทดลองที่ไม่ใส่แสงเป็นผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และผลการทดลองที่ใส่แสงเป็นผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

จากผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างโคบอลต์โมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัม เพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน พบว่าตัวเร่งนิกเกิลโมลิบดีนัมจะให้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนและปริมาณน้ำสูงกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ในทุกสภาวะการทดลอง ซึ่งแสดงถึงตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถใช้เพื่อเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอินได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม สาเหตุหลักเนื่องมาจากการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันเพื่อเติมไฮโดรเจนลงในพันธะที่ไม่อิ่มตัว ได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม ดังนั้นการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลจะทำการเติมไฮโดรเจนลงสู่พันธะที่ว่าง แล้วจึงตัดพันธะของออกซิเจนออก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมจะมีความแตกต่างกันคือ จะทำการตัดพันธะออกซิเจนก่อนแล้วจึงเติมไฮโดรเจนลงสู่

พันธะที่ว่าง [3], [13] ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชันจึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ตัวเร่งนิเกิลเกิดโมลิตินัมทำงานได้ดีกว่า เนื่องจากพันธะที่อ้อมตัวของระหว่าง (C-O) สามารถตัดได้ง่ายกว่าพันธะที่ไม่อ้อมตัวระหว่าง C=O [13] ดังนั้นนิเกิลเกิดโมลิตินัมจึงเป็นตัวเร่งปฏิกริยาที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานเพื่อสังเคราะห์สารประกอบอัลเคนจากน้ำมันพืช



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาผลของอุณหภูมิ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอิน บนตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน และภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

2. การทำไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน จะมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นพร้อมกัน คือปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์เป็นกรดไขมัน

3. การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิจะพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน เกิดได้ดีขึ้น และยังพบอีกว่า

3.1 ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสจะเกิดการแตกตัวของกรด

3.2 ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันสามารถเกิดขึ้นได้ และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสามารถเกิดขึ้น

3.3 ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียสพบว่ามีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน

4. ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวพบว่า ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีผลต่อระยะเวลาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ โดยการเพิ่มความเร็วเชิงสเปซจะส่งผลให้ระยะเวลาที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาลดลง

5. การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถสังเคราะห์สารประกอบประเภทอัลเคนได้ดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมในทุกสภาวะการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Claude. M. Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emission. International energy agency. (2007)
- [2] Michela. M. Experimental analysis and modelling of gasoil hydrotreatment process. Degli studi di Cagliari. (2001)
- [3] George W. H., Paul O. C., and Avelino. C. Processing biomass in conventional oil refineries: Production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures. Chemical Engineering Department, University of Massachusetts-Amherst, Amherst, MA 01003, USA. Applied Catalysis A: General. (2007): 120-129
- [4] Pavel. S., David. K., Gustav. S., and Milan. P. Hydroprocessed rapeseed oil as a source of hydrocarbon-based biodiesel. Institute of Chemical Technology, Prague, Department of Petroleum Technology and Alternative Fuels, Technick 5, 166 28 Prague 6, Czech Republic. Fuel 88,(2009): 145-149.
- [5] David. K., and Ludek. K. Deoxygenation of vegetable oils over sulfided Ni, Mo and NiMo catalysts. Department of Refinery and Petrochemical Research of Inorganic Chemistry, Institute of Chemical Process Fundamentals of the Academy of Sciences of the Czech Republic. Applied Catalysis A: General 372.(2010): 199-208.
- [6] I. Sebos., Matsoukas. A., Apostolopoulos. A., and Papayannakos. N. Catalytic hydroprocessing of cottonseed oil in petroleum diesel mixtures for production of renewable diesel. Fuel 88.(2009): 145-149
- [7] Somsak. S., and Jirdsak. T. Catalytic Hydrotreatment of Used Lubricating Oil. Thesis of Department of Chemical Engineering Chulalongkorn University, Phayathairoad, Bangkok 10330, Thailand (1995)
- [8] Senol., O.I., Viljava. T.R., and Krause A.O.I. Hydrodeoxygenation of methyl esters on sulphided NiMo/[gamma]-Al₂O₃ and CoMo/[gamma]-Al₂O₃ catalysts. Catalysis Today 2005.100(3-4): 331-335.
- [9] Gandarias. I., Barrio. V.L., Requies. J., Arias. P.L., Cambra. J.F., and Guemez. M.B. From biomass to fuels: Hydrotreating of oxygenated compounds. INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY (2008): 3485 - 3488

- [10]. Pavel. S., David. K., Gustav. S., and Milan. P. Fuel properties of hydroprocessed rapeseed oil. Institute of Chemical Technology, Prague, Department of Petroleum Technology and Alternative Fuels, Technick 5, 166 28 Prague 6, Czech Republic. Fuel. (2010): 611-615
- [11]. Hardi. S. Production of a Diesel Fuel Cetane Enhancer from Canola Oil Using Supported Metallic Carbide and Nitride Catalysts. Thesis of Department of Chemical Engineering University of Saskatchewan Saskatoon, Saskatchewan. (2008)
- [12] Edward. F. Review Catalytic hydrodeoxygenation. IMAF Group, 184 Marlborough Avenue, Ottawa, Ont., Canada. Applied Catalysis A: General. (2000): 147-190
- [13] Chongkhong. S., Tongurai. C., Chetpattananondh. P., and Bunyakan. C. Biodiesel production by esterification of palm fatty acid distillate. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, HatYai, Songkhla 90112, Thailand. (2006).
- [14] Logan, T.J., Underwood. D. C., and Rheinecker. T.C. Hydrolysis of triglycerides, in United States Patent. (1980).
- [15] Gerhard. K. Biodiesel and renewable diesel: A comparison. National Center for Agricultural Utilization Research, Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, 1815 N. University St., Peoria, IL 61604, USA. Progress in Energy and Combustion Science (2009): 1-10
- [16] Fogler. H.S., Elements of chemical reaction engineering, ed. F. edition. 1080.
- [17] Gusmao. J., Brodzki. D., Djega-Mariadassou G., and Frety. R., Utilization of vegetable oils as an alternative source for diesel-type fuel: hydrogracing on reduced Ni/SiO₂ and sulphided NiMo/Al₂O₃, Catalysis Today. (1989): 533-544
- [18] Jennifer. H., Chris. G., Rich. M., and Terry. M. UOP LLC Des Plaines, Illinois, USA. A NEW DEVELOPMENT IN RENEWABLEFUELS: GREEN DIESEL. Giovanni Faraci and Carlo Perego Eni S.p.A. Refining and Marketing Division Milan, Italy. (2007).



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการโดยไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2532 | 0.2534 | 0.2526 | 0.2531 | 0.1317 | 0.1844 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 103.89 | 104.46 | 104.27 | 104.21 | 0.24 | 0.30 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 80.19 | 80.39 | 80.78 | 80.45 | 0.41 | 0.33 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.43 | 77.49 | 77.54 | 77.49 | 0.07 | 0.07 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.24 | 0.30 | 0.27 | 0.27 | 11.11 | 11.11 |
| กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 8.00 | 4.00 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.89 | 0.88 | 0.89 | 0.89 | 0.38 | 0.75 |

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2525 | 0.2530 | 0.2517 | 0.2524 | 0.2377 | 0.2773 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 114.10 | 113.57 | 113.86 | 113.84 | 0.23 | 0.24 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 80.27 | 80.45 | 80.14 | 80.29 | 0.20 | 0.18 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 76.98 | 77.32 | 77.26 | 77.19 | 0.17 | 0.27 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.28 | 0.26 | 0.29 | 0.28 | 4.82 | 6.02 |
| กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 0.12 | 0.13 | 0.15 | 0.13 | 12.50 | 10.00 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.89 | 0.88 | 0.88 | 0.75 | 0.38 |

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | | Max err. | Min err. |
|------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2527 | 0.2541 | 0.2535 | 0.2534 | 0.2631 | 0.2894 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 125.12 | 125.28 | 125.79 | 125.40 | 0.31 | 0.22 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 80.20 | 80.12 | 80.01 | 80.11 | 0.11 | 0.12 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.02 | 77.45 | 77.54 | 77.34 | 0.26 | 0.41 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.62 | 0.58 | 0.54 | 0.58 | 6.90 | 6.90 |
| กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 0.32 | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 6.67 | 3.33 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.89 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.75 | 0.38 |

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | | Max err. | Min err. |
|------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | ค่าเฉลี่ย | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2533 | 0.2518 | 0.2537 | 0.2529 | 0.3031 | 0.4481 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 134.76 | 135.23 | 134.98 | 134.99 | 0.18 | 0.17 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 79.98 | 80.15 | 80.23 | 80.12 | 0.14 | 0.17 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.13 | 77.25 | 77.32 | 77.23 | 0.11 | 0.13 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 4.05 | 4.12 | 4.18 | 4.12 | 1.54 | 1.62 |
| กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 2.05 | 2.07 | 2.08 | 2.07 | 0.65 | 0.81 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.89 | 0.88 | 0.88 | 0.75 | 0.38 |

ภาคผนวก ข

ผลการโดยไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2523 | 0.2532 | 0.2519 | 0.2525 | 0.2905 | 0.2245 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 104.25 | 105.12 | 105.28 | 104.88 | 0.38 | 0.60 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 80.21 | 80.54 | 80.63 | 80.46 | 0.21 | 0.31 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.59 | 77.36 | 77.28 | 77.41 | 0.23 | 0.17 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.25 | 0.27 | 0.26 | 0.26 | 3.85 | 3.85 |
| กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.00 | 0.00 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.88 | 0.89 | 0.88 | 0.75 | 0.38 |

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2512 | 0.2538 | 0.2542 | 0.2531 | 0.4478 | 0.7376 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 112.38 | 113.32 | 113.38 | 113.03 | 0.31 | 0.57 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 80.11 | 80.24 | 80.35 | 80.23 | 0.15 | 0.15 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.39 | 77.45 | 77.62 | 77.49 | 0.17 | 0.12 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.30 | 0.27 | 0.26 | 0.28 | 8.43 | 6.02 |
| กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 0.16 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 6.67 | 6.67 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.38 | 0.75 |

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2523 | 0.2534 | 0.2527 | 0.2528 | 0.2373 | 0.1978 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 124.45 | 124.98 | 125.54 | 124.99 | 0.01 | 0.43 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 79.98 | 80.04 | 80.23 | 80.08 | 0.18 | 0.13 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.32 | 77.24 | 77.25 | 77.27 | 0.06 | 0.04 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.43 | 0.40 | 0.39 | 0.41 | 5.74 | 4.10 |
| กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 0.23 | 0.22 | 0.20 | 0.22 | 6.15 | 7.69 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.88 | 0.89 | 0.88 | 0.75 | 0.38 |

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2539 | 0.2528 | 0.2531 | 0.2533 | 0.2501 | 0.1843 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 135.21 | 135.37 | 134.95 | 135.18 | 0.14 | 0.17 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 80.22 | 80.34 | 80.15 | 80.24 | 0.13 | 0.11 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.45 | 77.51 | 77.42 | 77.46 | 0.06 | 0.05 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 4.13 | 4.20 | 4.17 | 4.17 | 0.80 | 0.88 |
| กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | 2.08 | 2.12 | 2.09 | 2.10 | 1.11 | 0.79 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.89 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.75 | 0.38 |

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการผลิตของเหลว (มล/ชม) | 0.2524 | 0.2547 | 0.2541 | 0.2537 | 0.37 | 0.51 |
| อัตราการผลิตของก๊าซ (มล/ชม) | 106.53 | 105.27 | 105.49 | 105.76 | 0.72 | 0.46 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 82.06 | 82.79 | 82.60 | 82.48 | 0.37 | 0.51 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.20 | 81.00 | 77.70 | 78.63 | 3.01 | 1.82 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 77.20 | 81.00 | 77.70 | 78.63 | 3.01 | 1.82 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 10.69 | 10.56 | 10.84 | 10.70 | 1.35 | 1.29 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 5.57 | 5.64 | 5.53 | 5.58 | 1.15 | 0.91 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.02 | 0.16 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.4975 | 0.4994 | 0.5005 | 0.4991 | 0.29 | 0.33 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 210.87 | 218.03 | 225.58 | 218.16 | 3.40 | 3.34 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 161.71 | 162.33 | 162.72 | 162.25 | 0.29 | 0.33 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 158.40 | 158.80 | 157.30 | 158.17 | 0.40 | 0.55 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 158.40 | 158.80 | 157.30 | 158.17 | 0.40 | 0.55 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 7.82 | 7.81 | 7.70 | 7.78 | 0.57 | 0.98 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 3.88 | 3.98 | 3.89 | 3.91 | 1.55 | 0.99 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.10 | 0.00 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.7488 | 0.7488 | 0.7502 | 0.7493 | 0.12 | 0.06 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 328.55 | 336.78 | 323.93 | 329.76 | 2.13 | 1.77 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 243.42 | 243.42 | 243.88 | 243.57 | 0.12 | 0.06 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 240.00 | 239.00 | 242.00 | 240.33 | 0.69 | 0.14 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 240.00 | 239.00 | 242.00 | 240.33 | 0.69 | 0.14 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 6.04 | 6.07 | 6.10 | 6.07 | 0.50 | 0.49 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 2.99 | 3.03 | 2.92 | 2.98 | 1.62 | 1.97 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.01 | 0.08 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2536 | 0.2553 | 0.2530 | 0.2540 | 0.54 | 0.38 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 117.50 | 118.69 | 108.56 | 114.91 | 3.28 | 5.53 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 82.43 | 83.00 | 82.25 | 82.56 | 0.54 | 0.38 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 79.20 | 79.40 | 77.50 | 78.70 | 0.89 | 1.52 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 73.18 | 73.63 | 71.76 | 72.86 | 1.06 | 1.51 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 6.02 | 5.77 | 5.74 | 5.84 | 2.98 | 1.75 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 7.60 | 7.27 | 7.41 | 7.43 | 2.33 | 2.11 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 37.53 | 37.91 | 34.19 | 36.54 | 3.74 | 6.44 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 1.42 | 1.36 | 1.27 | 1.35 | 5.20 | 5.99 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 13.49 | 13.65 | 12.42 | 13.19 | 3.53 | 5.82 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 2.37 | 2.30 | 2.10 | 2.26 | 5.11 | 6.81 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 20.24 | 20.60 | 18.40 | 19.75 | 4.32 | 6.84 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 4.84 | 4.71 | 4.67 | 4.74 | 2.15 | 1.52 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 2.33 | 2.45 | 2.29 | 2.36 | 4.03 | 2.85 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.01 | 0.18 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.5012 | 0.5000 | 0.4986 | 0.4999 | 0.25 | 0.27 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 213.59 | 220.04 | 224.44 | 219.36 | 2.32 | 2.63 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 162.93 | 162.54 | 162.08 | 162.52 | 0.25 | 0.27 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 153.20 | 151.70 | 149.30 | 151.40 | 1.19 | 1.39 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 146.77 | 145.06 | 142.85 | 144.89 | 1.29 | 1.41 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 6.43 | 6.64 | 6.45 | 6.51 | 2.03 | 1.17 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 4.20 | 4.38 | 4.32 | 4.30 | 1.83 | 2.33 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 14.59 | 14.48 | 14.32 | 14.46 | 0.87 | 1.00 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.67 | 0.65 | 0.65 | 0.66 | 2.75 | 1.20 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 5.04 | 5.03 | 4.98 | 5.02 | 0.53 | 0.75 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 1.17 | 1.13 | 1.11 | 1.14 | 2.76 | 0.26 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 7.70 | 7.67 | 7.58 | 7.65 | 0.64 | 0.90 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 8.45 | 8.75 | 8.54 | 8.58 | 2.03 | 1.53 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 4.07 | 4.13 | 4.15 | 4.11 | 0.80 | 1.12 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.02 | 0.14 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.7546 | 0.7514 | 0.7523 | 0.7528 | 0.23 | 0.18 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 334.77 | 337.95 | 351.90 | 341.54 | 3.03 | 1.98 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 245.29 | 244.28 | 244.56 | 244.71 | 0.24 | 0.18 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 231.00 | 224.00 | 224.00 | 226.33 | 2.06 | 1.03 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 223.95 | 216.74 | 217.05 | 219.25 | 2.15 | 1.14 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 7.05 | 7.26 | 6.95 | 7.08 | 2.45 | 1.93 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 3.05 | 3.24 | 3.10 | 3.13 | 3.51 | 2.53 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 8.19 | 8.12 | 8.56 | 8.29 | 3.24 | 2.06 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.42 | 0.41 | 0.42 | 0.42 | 1.09 | 2.14 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 2.79 | 2.77 | 2.86 | 2.81 | 1.85 | 1.20 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.72 | 0.71 | 0.76 | 0.73 | 3.15 | 1.94 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 4.26 | 4.22 | 4.52 | 4.33 | 4.37 | 2.62 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 8.93 | 8.98 | 8.80 | 8.90 | 0.83 | 1.16 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 4.28 | 4.38 | 4.24 | 4.30 | 1.76 | 1.33 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.07 | 0.07 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2553 | 0.2501 | 0.2505 | 0.2519 | 1.31 | 0.73 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 124.99 | 124.53 | 126.19 | 125.24 | 0.76 | 0.56 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 82.98 | 81.30 | 81.42 | 81.90 | 1.32 | 0.73 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 78.70 | 77.90 | 77.40 | 78.00 | 0.90 | 0.77 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 69.36 | 69.16 | 68.42 | 68.98 | 0.55 | 0.81 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 9.34 | 8.74 | 8.98 | 9.02 | 3.53 | 3.06 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 11.87 | 11.22 | 11.60 | 11.56 | 2.61 | 2.94 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 85.68 | 85.03 | 81.26 | 83.99 | 2.01 | 3.25 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 3.58 | 3.45 | 3.26 | 3.43 | 4.33 | 4.88 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 28.66 | 28.05 | 27.73 | 28.15 | 1.82 | 1.48 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 6.19 | 5.89 | 5.62 | 5.90 | 4.90 | 4.78 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 47.12 | 46.41 | 46.02 | 46.52 | 1.30 | 1.07 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.01 | 0.99 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 1.42 | 0.01 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.01 | 0.11 |

ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.5000 | 0.5006 | 0.4993 | 0.5000 | 0.12 | 0.13 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 247.22 | 261.71 | 251.25 | 253.40 | 3.28 | 2.44 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 162.54 | 162.74 | 162.31 | 162.53 | 0.13 | 0.13 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 154.80 | 156.10 | 153.90 | 154.93 | 0.75 | 0.67 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 137.92 | 139.64 | 137.44 | 138.33 | 0.94 | 0.64 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 16.88 | 16.46 | 16.46 | 16.60 | 1.68 | 0.82 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 10.90 | 10.55 | 10.69 | 10.72 | 1.76 | 1.56 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 76.43 | 69.48 | 66.24 | 70.72 | 8.08 | 6.34 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 2.87 | 2.61 | 2.50 | 2.66 | 7.98 | 6.14 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 28.36 | 25.39 | 23.95 | 25.90 | 9.50 | 7.54 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 2.75 | 4.38 | 4.23 | 3.79 | 15.67 | 27.40 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 42.45 | 37.10 | 35.56 | 38.37 | 10.63 | 7.32 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 2.13 | 2.07 | 2.22 | 2.14 | 3.78 | 3.41 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 1.82 | 1.71 | 1.84 | 1.79 | 2.91 | 4.34 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.05 | 0.11 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.7553 | 0.7546 | 0.7514 | 0.7538 | 0.20 | 0.30 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 363.73 | 356.23 | 347.87 | 355.94 | 2.19 | 2.27 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 245.54 | 245.29 | 244.28 | 245.04 | 0.21 | 0.31 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 233.00 | 230.00 | 231.00 | 231.33 | 0.72 | 0.58 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 213.73 | 210.89 | 210.67 | 211.76 | 0.93 | 0.52 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 19.27 | 19.11 | 20.33 | 19.57 | 3.88 | 2.33 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 8.27 | 8.31 | 8.80 | 8.46 | 4.03 | 2.25 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 65.83 | 62.58 | 57.95 | 62.12 | 5.97 | 6.70 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 2.50 | 2.37 | 2.18 | 2.35 | 6.25 | 7.17 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 23.72 | 22.73 | 21.20 | 22.55 | 5.20 | 5.99 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 4.27 | 4.04 | 3.67 | 3.99 | 6.99 | 8.08 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 35.34 | 33.44 | 30.90 | 33.23 | 6.35 | 6.99 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 5.30 | 5.39 | 5.42 | 5.37 | 1.00 | 1.34 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 2.66 | 2.58 | 2.73 | 2.65 | 2.73 | 2.86 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.78 | 0.78 | 0.79 | 0.78 | 0.07 | 0.02 |

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2536 | 0.2507 | 0.2513 | 0.2518 | 0.69 | 0.46 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 131.66 | 130.96 | 131.20 | 131.27 | 0.29 | 0.24 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 82.43 | 81.49 | 81.68 | 81.87 | 0.69 | 0.46 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 76.70 | 79.40 | 76.30 | 77.47 | 2.50 | 1.51 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 68.04 | 70.22 | 67.43 | 68.56 | 2.42 | 1.65 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 8.66 | 9.18 | 8.87 | 8.90 | 3.07 | 2.70 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 11.30 | 11.56 | 11.63 | 11.49 | 1.16 | 1.73 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 95.70 | 95.16 | 91.32 | 94.06 | 1.75 | 2.91 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 6.08 | 6.23 | 5.57 | 5.96 | 2.07 | 6.61 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 32.28 | 32.19 | 31.45 | 31.97 | 0.95 | 1.64 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 9.79 | 9.79 | 8.82 | 9.47 | 3.43 | 6.81 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 47.55 | 46.94 | 45.48 | 46.66 | 1.91 | 2.52 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.33 | 0.33 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.44 | 1.87 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.04 | 0.10 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.5005 | 0.5006 | 0.5012 | 0.5008 | 0.08 | 0.05 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 272.96 | 271.64 | 266.46 | 270.36 | 0.96 | 1.44 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 162.72 | 162.74 | 162.93 | 162.79 | 0.08 | 0.05 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 154.00 | 154.00 | 154.90 | 154.30 | 0.39 | 0.19 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 136.15 | 136.67 | 137.06 | 136.63 | 0.32 | 0.35 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 17.85 | 17.33 | 17.84 | 17.67 | 1.01 | 1.95 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 11.59 | 11.25 | 11.52 | 11.45 | 1.21 | 1.76 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 93.07 | 90.74 | 91.46 | 91.76 | 1.43 | 1.11 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 5.24 | 4.94 | 5.05 | 5.08 | 3.23 | 2.69 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 32.34 | 31.89 | 31.70 | 31.98 | 1.13 | 0.85 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 8.36 | 7.81 | 8.65 | 8.28 | 4.56 | 5.59 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 47.13 | 46.10 | 46.06 | 46.43 | 1.50 | 0.80 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.76 | 0.72 | 0.76 | 0.74 | 1.67 | 3.35 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 0.15 | 0.16 | 0.15 | 0.15 | 0.93 | 0.47 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.05 | 0.01 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.7481 | 0.7499 | 0.7500 | 0.7493 | 0.09 | 0.16 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 383.25 | 378.82 | 378.82 | 380.30 | 0.78 | 0.39 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 243.19 | 243.77 | 243.81 | 243.59 | 0.09 | 0.16 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 234.00 | 235.00 | 236.00 | 235.00 | 0.43 | 0.43 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 209.86 | 211.08 | 211.76 | 210.90 | 0.41 | 0.49 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 24.14 | 23.92 | 24.24 | 24.10 | 0.58 | 0.74 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 10.31 | 10.18 | 10.27 | 10.25 | 0.58 | 0.74 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 75.61 | 74.13 | 80.98 | 76.91 | 5.30 | 3.61 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 3.92 | 3.75 | 4.10 | 3.92 | 4.56 | 4.44 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 27.26 | 27.78 | 29.91 | 28.32 | 5.64 | 3.73 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 6.09 | 5.52 | 6.17 | 5.93 | 4.15 | 6.87 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 38.35 | 37.09 | 40.80 | 38.74 | 5.30 | 4.27 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 3.32 | 3.55 | 3.46 | 3.44 | 3.22 | 3.57 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 1.05 | 0.96 | 1.17 | 1.06 | 10.51 | 9.64 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.02 | 0.07 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดินัม

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการผลิตของเหลว (มล/ชม) | 0.2518 | 0.2542 | 0.2530 | 0.2530 | 0.47 | 0.47 |
| อัตราการผลิตของก๊าซ (มล/ชม) | 104.40 | 98.36 | 106.22 | 103.06 | 1.30 | 4.56 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 81.86 | 28.62 | 82.24 | 82.24 | .046 | 0.46 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 75.00 | 77.00 | 76.50 | 76.16 | 1.10 | 1.52 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 75.00 | 77.00 | 76.50 | 76.16 | 1.10 | 1.52 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 1.64 | 1.44 | 1.45 | 1.51 | 8.83 | 4.94 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 5.43 | 5.47 | 5.47 | 5.46 | 0.24 | 0.47 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.02 | 0.12 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.4980 | 0.4994 | 0.4994 | 0.4991 | 0.06 | 0.22 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 205.42 | 206.03 | 206.44 | 205.96 | 0.23 | 0.26 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 161.88 | 162.51 | 162.33 | 162.24 | 0.05 | 0.22 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 153.80 | 154.00 | 153.60 | 153.80 | 0.13 | 0.13 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 153.80 | 154.00 | 153.60 | 153.80 | 0.13 | 0.13 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 1.19 | 1.12 | 1.24 | 1.18 | 5.02 | 5.30 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 3.78 | 3.90 | 3.77 | 3.82 | 2.17 | 1.27 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.89 | 0.88 | 0.89 | 0.89 | 0.09 | 0.16 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.7495 | 0.7502 | 0.7509 | 0.7502 | 0.09 | 0.09 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 312.15 | 311.11 | 309.96 | 311.07 | 0.01 | 0.35 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 243.64 | 243.87 | 244.10 | 243.87 | 0.09 | 0.09 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 236.00 | 235.00 | 234.00 | 235.00 | 0.42 | 0.42 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 236.00 | 235.00 | 234.00 | 235.00 | 0.42 | 0.42 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 0.99 | 0.93 | 0.91 | 0.94 | 4.77 | 3.99 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 2.92 | 2.96 | 3.01 | 2.96 | 1.49 | 0.06 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.07 | 0.01 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม) | 0.2524 | 0.2536 | 0.2518 | 0.2526 | 0.39 | 0.31 |
| อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม) | 113.23 | 113.47 | 105.08 | 110.59 | 2.60 | 4.98 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 82.05 | 82.43 | 81.56 | 82.11 | 0.38 | 0.66 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 77.40 | 77.80 | 78.00 | 77.73 | 0.09 | 0.34 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 74.40 | 76.60 | 74.94 | 74.66 | 2.59 | 0.37 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 2.95 | 3.19 | 3.05 | 3.07 | 3.90 | 0.65 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 3.81 | 4.11 | 3.91 | 3.94 | 3.29 | 4.31 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 8.79 | 8.64 | 8.66 | 8.70 | 0.68 | 0.45 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 4.98 | 5.81 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 3.58 | 3.55 | 3.54 | 3.55 | 0.64 | 0.46 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.23 | 0.22 | 0.22 | 0.22 | 3.65 | 1.86 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 4.84 | 4.74 | 4.76 | 4.78 | 1.22 | 0.82 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 9.27 | 9.13 | 9.31 | 9.24 | 0.33 | 1.17 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 4.33 | 4.31 | 4.18 | 4.27 | 1.36 | 2.19 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.86 | 0.00 | 0.12 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.5050 | 0.5060 | 0.4990 | 0.5008 | 0.83 | 0.35 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 228.64 | 230.23 | 225.38 | 228.09 | 1.18 | 0.24 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 162.70 | 162.73 | 162.50 | 162.64 | 0.03 | 0.08 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 159.50 | 159.80 | 159.30 | 159.20 | 0.18 | 0.56 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 155.08 | 155.58 | 153.65 | 154.77 | 0.20 | 0.72 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 4.41 | 4.21 | 4.64 | 4.42 | 4.75 | 0.22 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 2.76 | 2.63 | 2.93 | 2.77 | 5.05 | 0.36 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 3.01 | 2.90 | 3.15 | 3.02 | 0.33 | 4.30 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.05 | 0.00 | 0.06 | 0.03 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 1.22 | 1.17 | 1.27 | 1.22 | 4.32 | 0.06 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 10.28 | 6.95 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 1.68 | 1.62 | 1.74 | 1.68 | 3.57 | 3.75 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 4.68 | 4.73 | 4.49 | 4.63 | 2.00 | 3.00 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 1.85 | 1.82 | 1.89 | 1.85 | 1.85 | 1.63 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.87 | 0.87 | 0.87 | 0.14 | 0.02 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.7530 | 0.7522 | 0.7523 | 0.7525 | 0.06 | 0.04 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 343.37 | 339.27 | 341.25 | 341.30 | 0.01 | 0.60 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 244.78 | 244.53 | 244.55 | 244.62 | 0.06 | 0.03 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 230.00 | 228.00 | 229.00 | 229.00 | 0.43 | 0.43 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 225.59 | 223.28 | 224.60 | 224.49 | 0.49 | 0.53 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 4.40 | 4.71 | 4.39 | 4.50 | 4.66 | 2.44 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 1.91 | 2.06 | 1.92 | 1.96 | 5.10 | 2.55 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 1.52 | 1.59 | 1.65 | 1.59 | 3.77 | 0.0 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 0.65 | 0.67 | 0.70 | 0.67 | 3.72 | 3.09 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 7.63 | 1.24 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 0.83 | 0.88 | 0.91 | 0.88 | 4.11 | 4.72 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 3.90 | 3.67 | 3.68 | 3.75 | 3.99 | 2.12 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 1.56 | 1.58 | 1.52 | 1.55 | 1.77 | 2.11 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.88 | 0.14 | 0.16 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2524 | 0.2513 | 0.2525 | 0.2521 | 0.11 | 0.31 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 124.25 | 126.35 | 126.72 | 126.10 | 0.49 | 0.19 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 78.30 | 78.80 | 75.90 | 77.60 | 0.82 | 1.46 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 78.70 | 77.90 | 77.40 | 78.00 | 0.89 | 0.76 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 73.34 | 73.93 | 71.21 | 72.83 | 0.70 | 2.22 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 4.95 | 4.86 | 4.68 | 4.83 | 2.48 | 0.62 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 6.32 | 6.16 | 5.90 | 6.13 | 3.09 | 0.48 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 39.77 | 38.93 | 39.95 | 39.55 | 0.55 | 1.01 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.86 | 0.84 | 0.86 | 0.86 | 0.60 | 1.45 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 16.32 | 15.99 | 16.33 | 16.21 | 0.68 | 0.71 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 1.27 | 1.25 | 1.27 | 1.26 | 0.56 | 1.27 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 21.32 | 20.86 | 21.49 | 21.22 | 1.28 | 1.73 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 6.95 | 6.58 | 7.09 | 6.87 | 3.15 | 4.27 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 3.05 | 2.93 | 2.89 | 2.95 | 3.14 | 2.26 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.03 | 0.27 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม) | 0.4993 | 0.5006 | 0.5005 | 0.5001 | 0.10 | 0.08 |
| อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม) | 250.42 | 248.46 | 249.35 | 249.35 | 0.35 | 0.42 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 155.80 | 155.80 | 155.80 | 155.80 | 0.00 | 0.00 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 154.80 | 156.10 | 153.90 | 154.93 | 0.75 | 0.66 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 147.98 | 148.23 | 147.86 | 148.02 | 0.14 | 0.10 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 8.81 | 7.56 | 7.93 | 7.77 | 13.38 | 2.70 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 5.01 | 4.85 | 5.09 | 4.98 | 0.60 | 2.61 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 32.94 | 34.28 | 32.45 | 33.23 | 0.87 | 2.34 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.80 | 0.84 | 0.80 | 0.81 | 3.15 | 1.68 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 13.47 | 13.99 | 13.39 | 13.62 | 1.08 | 1.69 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 1.15 | 1.20 | 1.15 | 1.17 | 2.85 | 1.55 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 17.53 | 18.26 | 17.12 | 17.63 | 3.52 | 2.90 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 8.01 | 8.04 | 7.74 | 7.93 | 1.14 | 2.41 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 3.72 | 3.84 | 3.64 | 3.73 | 3.02 | 2.58 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.09 | 0.09 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.7536 | 0.7530 | 0.7546 | 0.7538 | 0.02 | 0.10 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 366.40 | 361.41 | 375.22 | 367.85 | 0.39 | 2.00 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 230.00 | 228.00 | 229.00 | 229.00 | 0.43 | 0.00 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 233.00 | 230.00 | 231.00 | 231.33 | 0.72 | 0.57 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 224.96 | 223.34 | 224.13 | 244.15 | 0.36 | 0.00 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 5.03 | 4.65 | 4.83 | 4.85 | 0.41 | 4.12 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 2.18 | 2.04 | 2.11 | 2.11 | 0.00 | 3.31 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 20.08 | 20.29 | 20.54 | 20.30 | 1.08 | 1.18 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 0.54 | 0.55 | 0.56 | 0.55 | 1.19 | 1.22 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 8.32 | 8.42 | 8.47 | 8.40 | 0.98 | 0.79 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 0.73 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.26 | 0.91 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 10.49 | 10.59 | 10.77 | 10.61 | 1.46 | 1.18 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 8.80 | 8.45 | 8.99 | 8.75 | 0.65 | 3.40 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 3.95 | 4.05 | 3.84 | 3.95 | 2.57 | 2.73 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.85 | 0.01 | 0.10 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.2518 | 0.2524 | 0.2513 | 0.2518 | 0.19 | 0.23 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 134.98 | 135.85 | 135.67 | 135.50 | 0.38 | 0.25 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 81.86 | 82.05 | 81.67 | 81.86 | 0.00 | 0.23 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 75.80 | 76.10 | 75.90 | 75.93 | 0.22 | 0.03 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 68.15 | 68.58 | 68.29 | 68.34 | 0.35 | 0.07 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 7.64 | 7.51 | 7.60 | 7.58 | 0.92 | 0.79 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 10.07 | 9.87 | 10.02 | 9.99 | 0.30 | 0.80 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 84.70 | 84.72 | 81.31 | 83.58 | 1.34 | 2.71 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 3.81 | 3.79 | 3.66 | 3.45 | 1.42 | 2.47 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 31.26 | 31.36 | 30.02 | 30.88 | 1.57 | 2.80 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 5.19 | 5.20 | 4.99 | 5.12 | 1.42 | 2.71 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 44.45 | 44.37 | 42.65 | 43.82 | 2.67 | 2.67 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 3.18 | 3.40 | 3.13 | 3.24 | 4.90 | 3.15 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 1.37 | 1.39 | 1.33 | 1.36 | 1.89 | 2.34 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.01 | 0.24 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.499 | 0.5012 | 0.5005 | 0.5005 | 0.00 | 0.11 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 266.50 | 262.94 | 266.93 | 265.12 | 0.52 | 0.68 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 162.51 | 162.93 | 162.70 | 162.71 | 0.00 | 0.12 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 155.20 | 155.80 | 154.80 | 155.26 | 0.29 | 0.03 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 146.10 | 146.62 | 145.97 | 146.23 | 0.17 | 0.08 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 9.09 | 9.17 | 8.82 | 9.03 | 0.66 | 1.55 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 5.86 | 5.88 | 5.70 | 5.81 | 0.86 | 1.20 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 35.06 | 34.32 | 35.35 | 34.91 | 0.42 | 1.69 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 1.63 | 1.65 | 1.67 | 1.65 | 0.92 | 1.12 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 14.23 | 14.20 | 14.61 | 14.35 | 1.81 | 1.02 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 2.36 | 2.12 | 2.18 | 2.22 | 6.20 | 4.41 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 16.84 | 16.35 | 16.90 | 16.70 | 1.23 | 2.08 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 8.35 | 8.20 | 8.31 | 8.29 | 0.74 | 1.05 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 3.97 | 3.88 | 4.01 | 3.95 | 1.44 | 1.94 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร) | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.09 | 0.00 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ต่อชั่วโมง

| รายการ | ตัวอย่างที่ | | | ค่าเฉลี่ย | Max err. | Min err. |
|-------------------------------|-------------|--------|--------|-----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม) | 0.7523 | 0.7514 | 0.7530 | 0.7522 | 0.10 | 0.01 |
| อัตราการไหลของก๊าซ (มล/ชม) | 395.87 | 412.90 | 394.26 | 401.01 | 1.28 | 2.96 |
| ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม) | 244.55 | 244.27 | 244.78 | 244.54 | 0.09 | 0.00 |
| ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม) | 225.00 | 227.00 | 227.00 | 226.00 | 0.44 | 0.44 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม) | 218.10 | 219.89 | 220.05 | 219.35 | 0.31 | 0.56 |
| ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม) | 6.89 | 7.10 | 6.94 | 6.98 | 0.57 | 1.71 |
| ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก) | 3.06 | 3.12 | 3.06 | 3.08 | 0.64 | 1.29 |
| ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก) | 24.67 | 25.07 | 35.31 | 25.02 | 1.15 | 0.19 |
| ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก) | 1.09 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 0.41 | 0.26 |
| ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก) | 10.35 | 10.52 | 10.58 | 10.49 | 0.94 | 1.27 |
| ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก) | 1.37 | 1.40 | 1.40 | 1.39 | 0.91 | 1.58 |
| ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก) | 11.87 | 12.05 | 12.23 | 12.05 | 1.51 | 1.52 |
| ค่าของกรด (Mg.KOH/g) | 8.90 | 8.81 | 8.85 | 8.86 | 0.50 | 0.02 |
| ร้อยละกรดไขมัน (โดยน้ำหนัก) | 4.09 | 4.07 | 4.13 | 4.09 | 0.79 | 0.63 |
| ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร) | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0.84 | 0.00 | 0.00 |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ภทร จิรเศวตกุล เกิดเมื่อวันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2528 ภูมิลำเนาเดิมอยู่ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ปัจจุบัน 58/409 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลบึงนารางค์ อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

ประวัติการศึกษา

- | | |
|----------------|--|
| พ.ศ. 2541-2543 | มัธยมต้น โรงเรียนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนี)2 |
| พ.ศ. 2544-2546 | มัธยมปลาย โรงเรียนบดินทรเดชา(สิงห์ สิงหเสนี)2 |
| พ.ศ. 2547-2550 | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| พ.ศ. 2551-2553 | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |



ศูนย์วิทยพัชการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย