

การไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม



นาย ภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

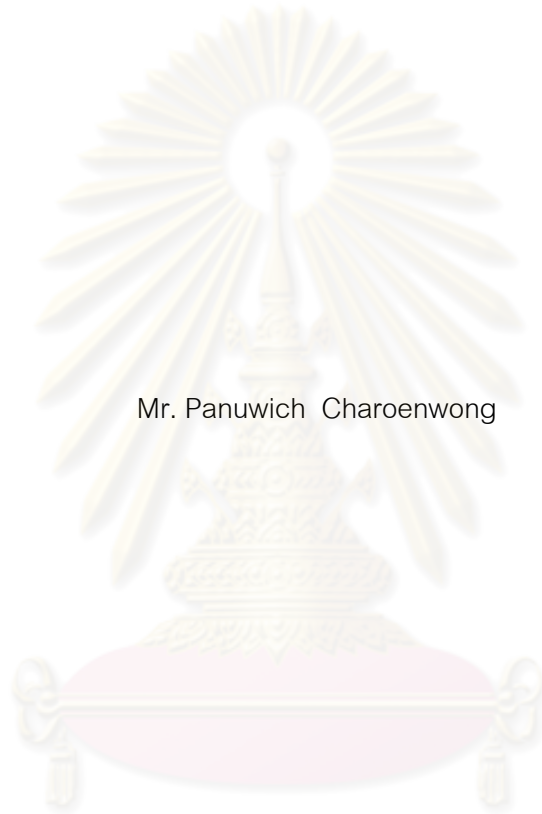
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROTREATING OF PALM OLEIN, PALM STEARIN AND PALM FATTY ACID
DISTILLATE USING NICKEL MOLYBDENUM CATALYST



Mr. Panuwich Charoenwong

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

การไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียร์น และกรดไขมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

โดย

นายภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

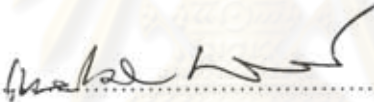
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนირวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เหมื่อนเดือน พิศาลพงศ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.เจตศักดิ์ ไชยคุนา)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วงค์ ปวีณาจารย์)


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

ภาณูวิษณุ เจริญวงศ์ : การไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม (HYDROTREATING OF PALM OLEIN, PALM STEARIN AND PALM FATTY ACID DISTILLATE USING NICKEL MOLYBDENUM CATALYST) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร. เจตศักดิ์ ไชยคุนา, 99 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงและความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่ำ ผลผลิตกัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนสูง โดยมีปฏิกิริยาไฮโดรต็อกซิเจเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้น แต่ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาต่ำ จะพบกรดไขมันเกิดขึ้นในผลผลิตกัณฑ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนิสิต ภาณูวิษณุ เจริญวงศ์
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

5170602821 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HYDROTREATING/ HYDRODEOXYGENATION/ HYDROPROCESSING
/ RENEWABLEDIESEL

PANUWICH CHAROENWONG: HYDROTREATING OF PALM OLEIN, PALM
STEARIN AND PALM FATTY ACID DISTILLATE USING NICKEL
MOLYBDENUM CATALYST. ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D., 99 pp.

The objective of this study is to investigate catalytic hydrotreating reaction of palm olein, palm stearin and palm fatty acid distillate using nickel 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 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 Panuwich Charoenwong

Advisor's Signature Jirdsak Tschek

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับการอบรมสั่งสอนการปฏิบัติงาน คำแนะนำแนวทาง ในการพัฒนางานวิจัยและความช่วยเหลือในอีกหลาย ๆ ด้านมาตลอดจนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ และ ดร.ชจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ ที่กรุณามาร่วมเป็น กรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

ขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่และน้อง ๆ สำหรับความช่วยเหลือหลาย ๆ ด้านและให้กำลังใจ ในการทำวิจัยด้วยดี

และสุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดาและพี่น้องในครอบครัวทุกคนที่ให้การ สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฑ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ชนิดของน้ำมันไบโอดีเซล.....	1
การผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ปฏิกิริยาของการไฮโดรทรีตติ้ง.....	5
ตัวเร่งปฏิกิริยาของการไฮโดรทรีตติ้ง.....	8
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไฮโดรทรีตติ้ง.....	8
3. การทดลองและการวิเคราะห์.....	14
3.1 การทดลอง.....	14
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.3 การวิเคราะห์.....	17
3.4 การคำนวณในงานวิจัย.....	20
4. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	23
4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น.....	23
4.2 ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน.....	25
4.3 ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน.....	26

บทที่	หน้า
4.4 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น.....	28
4.4.1 ผลการทดลอง.....	28
4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	32
4.4.3 ผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	35
4.5 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น.....	38
4.5.1 ผลการทดลอง.....	38
4.5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	40
4.5.3 ผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	44
4.6 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นสารตั้งต้น.....	46
4.6.1 ผลการทดลอง.....	46
4.6.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	48
4.6.3 ผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยา.....	51
5. สรุปผลการวิจัย.....	55
รายการอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก.....	59
ภาคผนวก ข.....	61
ภาคผนวก ค.....	63
ภาคผนวก ง.....	75
ภาคผนวก จ.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	99

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
3.1	สภาวะของการทดลอง.....	16
3.2	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	17
3.3	สภาวะของคอลัมน์.....	18
3.4	ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน กรดไขมันปาล์ม และสารประกอบประเภทอัลเคน.....	19
4.1	องค์ประกอบของกรดไขมันและค่าของกรดของสารตั้งต้น.....	24
4.2	ผลการทดลองโดยไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	25
4.3	ผลการทดลองโดยไมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	27
4.4	ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	28
4.5	ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	29
4.6	ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	29
4.7	ผลการทดลองที่ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	38
4.8	ผลการทดลองที่ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	39
4.9	ผลการทดลองที่ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	39
4.10	ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	46
4.11	ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	47

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสดเดี่ยวรินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	47
ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	59
ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	59
ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	60
ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	60
ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	61
ข-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	61
ข-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	62
ข-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	62
ค-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	63
ค-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	64
ค-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	65
ค-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	66
ค-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	67

ตารางที่	หน้า
ค-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	68
ค-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	69
ค-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	70
ค-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	71
ค-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	72
ค-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	73
ค-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	74
ง-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	75
ง-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	76
ง-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	77
ง-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	78
ง-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	79

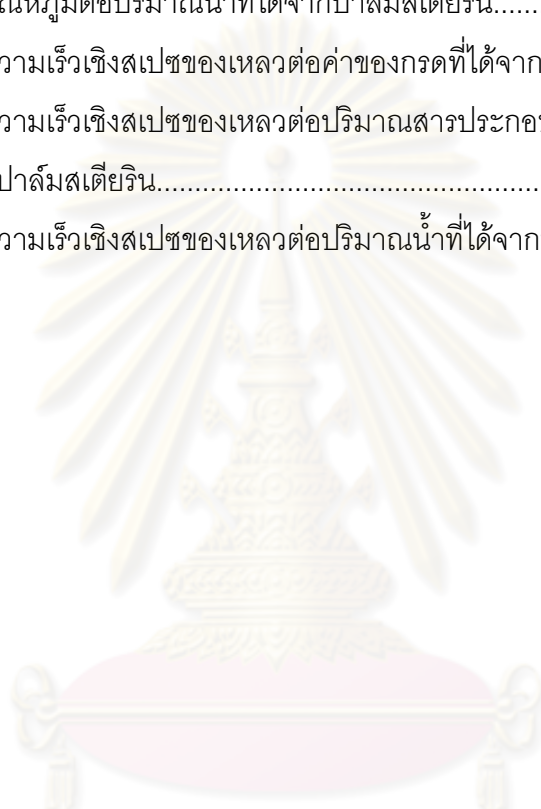
ตารางที่	หน้า
ง-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	80
ง-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	81
ง-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	82
ง-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	83
ง-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	84
ง-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	85
ง-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	86
จ-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	87
จ-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	88
จ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	89
จ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	90
จ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	91

ตารางที่	หน้า
๑-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	92
๑-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	93
๑-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	94
๑-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	95
๑-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง ⁻¹	96
๑-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง ⁻¹	97
๑-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง ⁻¹	98

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	2
1.2	2
2.1	6
2.2	6
2.3	6
2.4	7
2.5	7
2.6	7
2.7	13
2.8	13
2.9	13
3.1	14
4.1	33
4.2	33
4.3	34
4.4	36
4.5	37
4.6	37
4.7	41
4.8	42
4.9	43
4.10	44
4.11	45

รูปที่	หน้า
4.12 ผลของความเร็วเชิงสเปซของเหลวต่อปริมาณน้ำที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน..	45
4.13 ผลของอุณหภูมิต่อค่าของกรดที่ได้จากปาล์มสเตียริน.....	49
4.14 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน ที่ได้จากปาล์มสเตียริน.....	49
4.15 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่ได้จากปาล์มสเตียริน.....	50
4.16 ผลของความเร็วเชิงสเปซของเหลวต่อค่าของกรดที่ได้จากปาล์มสเตียริน.....	52
4.17 ผลของความเร็วเชิงสเปซของเหลวต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน ที่ได้จากปาล์มสเตียริน.....	52
4.18 ผลของความเร็วเชิงสเปซของเหลวต่อปริมาณน้ำที่ได้จากปาล์มสเตียริน.....	53



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

น้ำมันไบโอดีเซลคือ เชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตจากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียนที่ได้มาจากน้ำมันพืชและกรดไขมัน เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง งา เมล็ดเร้ฟ สบู่ดำ ดอกคำฝอย ละหุ่ง ทานตะวัน ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

ชนิดของน้ำมันไบโอดีเซล

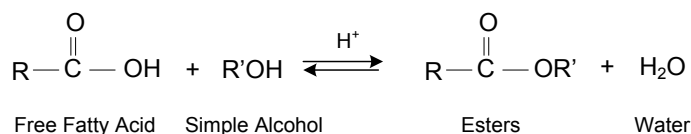
น้ำมันพืชหรือไขมันสัตว์โดยตรง ไบโอดีเซลแบบนี้ก็คือ น้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์แท้ๆเช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันถั่วลิสง น้ำมันงา น้ำมันเมล็ดเร้ฟ น้ำมันสบู่ดำ น้ำมันดอกคำฝอย น้ำมันละหุ่ง น้ำมันทานตะวัน ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้โดยไม่ต้องผสมหรือเติมสารเคมี และไม่ต้องนำมาเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำมัน

ไบโอดีเซลแบบลูกผสม ไบโอดีเซลชนิดนี้เป็นลูกผสมระหว่างน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ผสมกับน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันดีเซล เพื่อให้ไบโอดีเซลมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล

ไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์ เป็นไบโอดีเซลที่แท้จริงที่ใช้กันทั่วไป อย่างเช่นในเยอรมัน สหรัฐอเมริกาหรือมาเลเซีย ถ้าพูดถึงคำว่าไบโอดีเซลในความหมายของสากลจะหมายถึงการผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

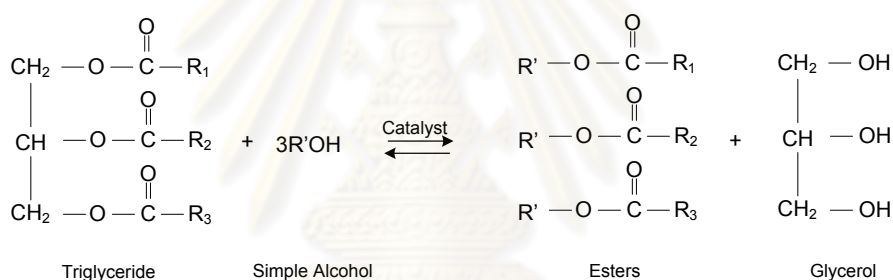
การผลิตไบโอดีเซลแบบเอสเทอร์

ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (esterification) เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนกรดไขมันให้เป็นเอสเทอร์ (Ester) โดยใช้กรดไขมันทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ ซึ่งอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดในการทำปฏิกิริยา เช่น กรดซัลฟิวริก (sulfuric acid) กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid) และกรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid) เป็นต้น จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลคิลเอสเทอร์ กับน้ำดังปฏิกิริยาในรูปที่ 1.1 จากนั้นทำการแยกน้ำที่ได้ออกให้เหลือเพียงอัลคิลเอสเทอร์ ข้อเสียของปฏิกิริยานี้คือ การใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน และกรดไขมันที่ใช้มีการผลิตที่ยุ่งยาก จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม



รูปที่ 1.1 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification) เป็นปฏิกิริยาระหว่างไตรกลีเซอไรด์ และแอลกอฮอล์ ซึ่งแอลกอฮอล์ที่นิยมใช้ในการทำปฏิกิริยา คือ เมทานอล (Methanol) มีข้อดีคือ เป็นเทคโนโลยีที่มีการลงทุนไม่สูงนัก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิและความดันต่ำ ปฏิกิริยานี้จะไม่เหมาะกับวัตถุดิบที่มีปริมาณกรดไขมันสูงเนื่องจากจะเกิดสบู่ และจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ลดลงดังปฏิกิริยาในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ริฟิเคชัน (Transesterification)

สำหรับทั้งสองปฏิกิริยาข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันไบโอดีเซลที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ซึ่งสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์ได้ตามปกติโดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์ [1] แต่เมื่อนำไปใช้งานในสภาพอากาศที่อุณหภูมิต่ำ อาจจะทำให้เกิดปัญหาการแข็งตัวของน้ำมัน การอุดตันของไส้กรองและหัวฉีด [2]

ขณะนี้ได้มีหลายหน่วยงานได้ทำการวิจัยและพัฒนาวัตถุดิบในภายในประเทศ เช่น น้ำมันพืชชนิดต่างๆ น้ำมันพืชใช้แล้ว ฯลฯ มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้แทนน้ำมันดีเซล ซึ่งกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถผลิตน้ำมันขึ้นมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้

กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง (Hydrotreating) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพทางเลือกใหม่ สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายประเภท เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง งา เมล็ดเรีฟ สบู่ดำ ดอกคำฝอย ละหุ่ง ทานตะวัน หรือน้ำมันสัตว์นำมาเข้าสู่กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งซึ่งมีการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน และมีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปช่วยในกระบวนการซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเรียกว่า Renewable diesel, Green diesel, หรือ Biohydrogenated diesel จากการศึกษาของ David Kubicka และคณะ [3] ซึ่งได้ศึกษาปฏิกิริยาดีออกซิเจเนชัน ของเมล็ดเรีฟที่อุณหภูมิ 260 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดัน 3.5 เมกกะปาสคาร์ และความเร็วเชิงสเปซของเหลว (LSHV) 0.25 ถึง 4 ชั่วโมง⁻¹ ในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง โดยมีนิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) และนิกเกิลโมลิบดีนัม (NiMo) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่านิกเกิลโมลิบดีนัมจะให้ค่าการเกิดของผลิตภัณฑ์ของไฮโดรคาร์บอนได้สูงกว่า โมลิบดีนัม และนิกเกิล

สำหรับประเทศไทยมีเป็นผลผลิตทางเกษตรกรรมหลายชนิดที่สามารถนำมาผลิตน้ำมันซึ่งปาล์มเป็นผลผลิตทางเกษตรชนิดหนึ่งที่มีปริมาณมาก และราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับผลผลิตทางการเกษตรชนิดอื่น ซึ่งน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม เป็นวัตถุดิบที่ได้มาจากปาล์มทั้งสิ้น จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการไฮโดรทรีตติ้ง โดยการนำน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์มมาเป็นสารตั้งต้น โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม
2. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และความเร็วเชิงสเปซของของเหลว ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
2. ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 200 ถึง 350 องศาเซลเซียส

3. ทำการศึกษาผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวในช่วง 0.5 ถึง 1.5 ชั่วโมง¹
4. ทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรทรีตติ้งโดยใช้ก๊าซโครมาโตกราฟี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

สามารถอธิบายผลกระทบของอุณหภูมิ และอัตราการไหลเชิงสเปซของเหลวที่ได้จากการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียริน และกรดไขมันปาล์ม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

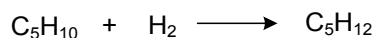
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้มีการศึกษาค้นหาความรู้เพื่อเป็นแนวทางที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

ปฏิกิริยาของการไฮโดรทรีตติ้ง

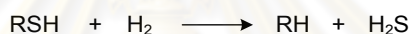
กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งเป็นกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ออกซิเจน และโลหะ โดยการเติมไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปช่วยในกระบวนการ ซึ่งปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นมีดังต่อไปนี้ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation, HDA) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของกระบวนการ แล้วจะมีปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลฟูไรเซชัน (Hydrodesulfurization, HDS) ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation, HDN) และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation, HDO) เกิดขึ้นพร้อมๆกัน ในบางครั้งกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลล (Hydrodemetallation, HDM) และปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) ด้วย [4] ในองค์ประกอบของน้ำมันปิโตรเลียมนั้นจะมีส่วนประกอบของออกซิเจนอยู่น้อย ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (HDO) จึงไม่ใช่ปฏิกิริยาหลักของกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งในน้ำมันปิโตรเลียม แต่ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (HDO) จะเป็นปฏิกิริยาหลักในการกำจัดออกซิเจนในน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ (Bio fuel) เนื่องจากในน้ำเชื้อเพลิงชีวภาพนั้นจะมีส่วนประกอบของออกซิเจนอยู่มาก [5] โดยทั่วไปกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งจะทำการทดลองที่ความดันสูง (100 ถึง 3,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว) และอุณหภูมิสูง (270 ถึง 350 องศาเซลเซียส) ในถังปฏิกรณ์แบบ Trickle-bed (TBRs) [6]

ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation, HDA) คือ ปฏิกิริยาที่มีการเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนจะเข้าไปรวมตัวเกิดเป็นปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันต้องสลายพันธะเก่าออกก่อนซึ่งไฮโดรเจนเป็นพันธะโควาเลนต์ จะสลายตัวยากมาก ดังนั้นปฏิกิริยาจะไม่เกิดถ้าไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะทำให้สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัว เปลี่ยนเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่อิ่มตัว ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกริยาไฮโดรจีเนชัน

ปฏิกริยาไฮโดรดีซัลฟูไรเซชัน (Hydrodesulfurization, HDS) คือกระบวนการทางเคมีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเข้าไปทำปฏิกริยาเพื่อกำจัดซัลเฟอร์ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ เพื่อที่จะลดการปล่อยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) จากการใช้เชื้อเพลิงโดยรถยนต์ รถไฟ เรือโรงงานที่มีการเผาไหม้ เตาเผาในบ้านหรือโรงงานอุตสาหกรรม หรือจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอื่นๆ ตัวอย่างของปฏิกริยาที่เกิดขึ้นดังสมการในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาไฮโดรดีซัลฟูไรเซชัน

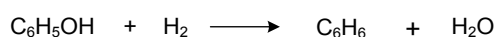
ปฏิกริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation, HDN) คือกระบวนการทางเคมีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเข้าไปทำปฏิกริยาเพื่อกำจัดไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ เพื่อที่จะลดการปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ตัวอย่างของปฏิกริยาที่เกิดขึ้นดังสมการในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ปฏิกริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน

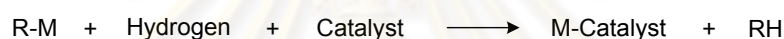
ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation, HDO) คือกระบวนการทางเคมีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเข้าไปทำปฏิกริยาเพื่อกำจัดออกซิเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ สำหรับน้ำมันปิโตรเลียมจะมีส่วนประกอบของออกซิเจนอยู่น้อยจึงไม่ใช่ปฏิกริยาที่สำคัญแต่ในน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพจะมีส่วนประกอบของออกซิเจนอยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงต้องกำจัดออกซิเจนในน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อที่จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี

คุณสมบัติคล้ายกับน้ำมันที่ได้จากการกลั่นน้ำมันจากปิโตรเลียม ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดัง
สมการในรูปที่ 2.4



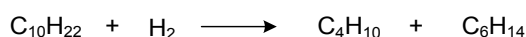
รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลล (Hydrodemetallation, HDM) คือกระบวนการทางเคมีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปทำปฏิกิริยา เพื่อจะกำจัดโลหะ ซึ่งในบางครั้งกระบวนการไฮโดรที่ติดตั้งจะมีปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลลเกิดขึ้นด้วย ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลล

ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) คือกระบวนการทางเคมีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปทำปฏิกิริยา เพื่อที่จะสลายโมเลกุลใหญ่ให้แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก กระบวนการไฮโดรแครกกิงจะเกิดขึ้นภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง กระบวนการไฮโดรแครกกิงทำหน้าที่หลักคือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจัดเรียงโมเลกุลของน้ำมันใหม่ทำให้โมเลกุลที่สร้างตัวขึ้นมาใหม่มีความสมบูรณ์และความแข็งแรงขึ้นโมเลกุลน้ำมันอิมตัวมากขึ้น ส่งผลให้น้ำมันมีการต้านทานการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีขึ้นหรือที่เรียกว่าออกซิเดชัน (Oxidation Resistance) ทนทานต่อความร้อนสูงขึ้น ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง

ตัวเร่งปฏิกิริยาของการไฮโดรทรีตติ้ง

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไฮโดรทรีตติ้งคือ นิกเกิลโมลิบดีนัม, โคบอลต์โมลิบดีนัม, นิกเกิลทังสแตน, โคบอลต์ทังสแตน โดยมีลูมินีเยมออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์เป็นตัวรองรับ ตัวเร่งปฏิกิริยามีความสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้และสารที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการ ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันและปฏิกิริยาไฮโดรตีไนโตรจีเนชัน แต่ในทางตรงกันข้ามตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาไฮโดรตีซัลฟูไลเซชันได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม [5, 6] ซึ่งความว่องไวในการทำปฏิกิริยานั้นจะขึ้นอยู่กับสภาวะของการทดลอง

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการไฮโดรทรีตติ้งสามารถเตรียมได้ในรูปแบบออกไซด์และซัลไฟด์ การเตรียมทั้งแบบออกไซด์และซัลไฟด์ซึ่งจะส่งผลให้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเป็นสารผลิตภัณฑ์ (conversion) ที่ออกมามีค่าแตกต่างกัน ซึ่งการเตรียมในรูปแบบออกไซด์จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาต่ำและเสถียรภาพง่าย แต่จะมีความว่องไวสูงสุดเมื่ออยู่ในรูปของซัลไฟด์ [7] ดังนั้นจึงต้องมีการซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้งาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการไฮโดรทรีตติ้ง

Simcek, P., Kubicka, D., Sebor, G., Pospsil, M . 2009 [8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงของเมล็ดเรพ ที่อุณหภูมิ 260 ถึง 340 องศาเซลเซียส ความดัน 7 เมกกะปาสคาล โดยใช้นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับลูมินีเยมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วตรวจสอบผลด้วยเครื่อง GC ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีน้ำ ก๊าซไฮโดรเจน และสารอินทรีย์ที่เป็นของเหลว (Organic Liquid Product) เช่น สารประกอบอัลเคนไซตรงหรือสารประกอบอัลเคนไซกิ่ง ที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาต่ำสารอินทรีย์ที่เป็นของเหลวที่ได้จะมีไตรกลีเซอไรด์หรือกรดไขมันอิสระปนอยู่ด้วย แต่ที่ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า 310 องศาเซลเซียส จะมีเฉพาะไฮโดรคาร์บอนที่เหมือนกับไฮโดรคาร์บอนตามธรรมชาติที่อยู่ในน้ำมันดีเซลเท่านั้น จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิของปฏิกิริยาต่ำ (260 ถึง 300 องศาเซลเซียส) จะมีผลิตภัณฑ์ปนในของเหลว แต่ที่อุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส ของเหลวจะสะอาดใสไม่มีสี แล้วจะมีความหนาแน่น 730 ถึง 750 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้สารตั้งต้น (ไตรกลีเซอไรด์หรือกรดไขมันอิสระ) ลดลง และปริมาณของเฮฟตะเดคเซนไซตรงเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง แต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้ออกตะเดคเซนไซตรงลดลง

Sebos, I., Matsoukas, A., Apostolopoulos, V., Papayannakos, N. 2009 [9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำน้ำมันจากเมล็ดฝ้ายผ่านกระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาทำการทดลองโดยให้ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวระหว่าง 5 ถึง 25 ชั่วโมง⁻¹ โดยของเหลวมีปริมาณของเมล็ดฝ้ายบริสุทธิ์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 305 ถึง 345 องศาเซลเซียส ความดัน 30 บาร์ โดยใช้โคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งต้องมีการเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ทุกๆ 450 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ค่อนข้างเสถียรหลังจากการดำเนินการไปแล้ว 300 ชั่วโมง

Hardi Sulimma .2008 [10] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 6 ชนิด ได้แก่ โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ โมลิบดีนัมไนไตรด์ ทังสเตนคาร์ไบด์ ทังสเตนไนไตรด์ วานาเดียมคาร์ไบด์ และ วานาเดียมไนไตรด์ โดยนำไปศึกษาตามเทคนิคที่แตกต่างกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 6 ชนิด จะถูกตรวจสอบจากการกำจัดออกซิเจน การเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน ค่าการเลือกของโอเลฟิน (olefin selectivity) การใช้ก๊าซไฮโดรเจน และผลพลอยได้ (by product) จากกรดโอเลอิก จากการศึกษาที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ความดันบางส่วนของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นมากกว่า 7,000 กิโลปาสคาล แสดงให้เห็นว่า โมลิบดีนัมคาร์ไบด์และโมลิบดีนัมไนไตรด์ กำจัดออกซิเจนได้ดีมาก และมีปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนหรือโอเลฟิน (alkane/olefin) มากกว่าร้อยละ 30 หลังจากนั้นก็ได้ทำการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิ 380 ถึง 390 องศาเซลเซียส โดยใช้ความดันบางส่วนของไฮโดรเจน 7,100 กิโลปาสคาล แล้วนำไปตรวจสอบพบว่า โมลิบดีนัมไนไตรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด ซึ่งกำจัดออกซิเจนได้มากกว่าร้อยละ 85 การเลือกของโอเลฟิน (alkane/olefin selectivity) มากกว่าร้อยละ 20 และการเลือกของดีเซล (diesel fuel selectivity) มากกว่าร้อยละ 40

George W. Huber, Paul O'Connor, Avelino Corma . 2007 [11] ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดทานตะวัน และน้ำมันเมล็ดทานตะวันผสมกับน้ำมันหนักที่ได้จากการกลั่นแบบสูญญากาศ (HVO) โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร ยาว 65 เซนติเมตร ใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาระหว่าง 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ โดยมีนิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่ามีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น 3 ปฏิกิริยา คือ ดีคาร์บอนิลเลชัน, ดีคาร์บอกซิเลชัน และไฮโดรดีออกซิเจชัน จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะพบว่าเมื่อเติมน้ำมันดอกทานตะวันในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

และน้ำมันหนักที่ได้จากการกลั่นแบบสุญญากาศร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก จะทำให้ค่าการเกิดของผลิตภัณฑ์ของสารประกอบประเภทอัลเคนไซตรงเกิดขึ้นร้อยละ 87 ซึ่งเป็นค่าที่ดีที่สุด และน้ำมันเมล็ดทานตะวันบริสุทธิ์จะมีค่าการเกิดของผลิตภัณฑ์ร้อยละ 75

Gandarias ,I., Barrio, V.L., Requies ,J., Arias,P.L., Cambra,J.F., Gu emez M.B..2008[7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันโดยมีนิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลทังสแตนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะมีส่วนประกอบของนิกเกิลร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก โมลิบดีนัมร้อยละ 16 โดยน้ำหนัก ทังสแตนร้อยละ 13.9 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยมีอลูมิเนียมออกไซด์ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิระหว่าง 473 ถึง 623 องศาเซลวิน ที่ความดัน 1.5 เมกกะปาสคาร์ โดยของเหลวที่ป้อนเข้ามาประกอบด้วย ฟีนอลร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในออกเทน ป้อนเข้ามาด้วยอัตราการไหล 10 กรัมต่อชั่วโมง แล้วป้อนก๊าซด้วยอัตราการไหล 2 ลิตรต่อชั่วโมง ผลที่ออกมาปรากฏว่านิกเกิลโมลิบดีนัมที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้สูงกว่านิกเกิลทังสแตนที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของฟีนอลในทุกๆช่วงอุณหภูมิ แล้วจากการทดลองพบว่านิกเกิลทังสแตนจะทำปฏิกิริยาได้ดีในอุณหภูมิสูงเท่านั้น แต่นิกเกิลโมลิบดีนัมจะทำปฏิกิริยาได้ดีทั้งในอุณหภูมิต่ำและอุณหภูมิสูง

Lappas, A.A., Bezergianni, S., Vasalosal, I.A. 2009 [12] ได้ทำการศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงโดยการป้อนสารตั้งต้น 2 ชนิดผสมกันคือ น้ำมันที่ผ่านการกลั่นแบบสุญญากาศ (VGO) และน้ำมันดอกทานตะวัน โดยทำการทดลอง 4 แบบคือ ผสมน้ำมันที่ผ่านการกลั่นแบบสุญญากาศ ที่ผ่านการไฮโดรทรีตติงเบื้องต้น (pre hydrotreated) กับน้ำมันดอกทานตะวันในอัตราส่วน 70:30 และ 90:10 ตามลำดับ และผสมน้ำมันที่ผ่านการกลั่นแบบสุญญากาศ ที่ไม่ผ่านการไฮโดรทรีตติงเบื้องต้นกับน้ำมันดอกทานตะวันในอัตราส่วน 70:30 และ 90:10 ตามลำดับ ซึ่งทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 2000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (LHSV) 1.5 ชั่วโมง⁻¹ อัตราการไหลของของเหลว 20 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่าปริมาณของซัลเฟอร์และไนโตรเจนลดลงหลังจากผ่านกระบวนการไฮโดรทรีตติง และอัตราส่วนของไฮโดรคาร์บอนของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ของการผสมน้ำมันที่ผ่านการกลั่นแบบสุญญากาศ ที่ผ่านการไฮโดรทรีตติงเบื้องต้นจะสูงกว่าการผสม น้ำมันที่ผ่านการกลั่นแบบสุญญากาศที่ไม่ผ่านการไฮโดรทรีตติงเบื้องต้นและการผสม น้ำมันที่ผ่านการกลั่นแบบ

สูญญากาศกับน้ำมันดอกทานตะวันในอัตราส่วน 70:30 ผลิตรัถน์ที่ได้จะมีอัตราส่วนของไฮโดรคาร์บอนมากกว่าการผสมในอัตราส่วน 90:10 ทั้งการไฮโดรทรีตติงเบื้องต้นและไม่ได้ทำการไฮโดรทรีตติงเบื้องต้นของน้ำมันที่ผ่านการกลั่นแบบสูญญากาศ

Kubicka, D., and Kaluza, L. 2010 [3] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ของเมล็ดเร้ฟที่อุณหภูมิ 260 ถึง 280 องศาเซลเซียสความดัน 3.5 เมกกะปาสคาร์ และความเร็วเชิง-สเปซของของเหลว (LSHV) 0.25 ถึง 4 ชั่วโมง⁻¹ ในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยมีนิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) และนิกเกิลโมลิบดีนัม (NiMo) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลการทดลองพบว่า ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ > โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ > นิกเกิลบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ และนิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์จะให้ค่าการเกิดของผลิตรัถน์ของไฮโดรคาร์บอนได้สูงกว่าโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ และนิกเกิลตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ค่าการเกิดของผลิตรัถน์ของไฮโดรคาร์บอนจะได้จากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ในขณะที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ และนิกเกิลบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ค่าของการเกิดของผลิตรัถน์ของไฮโดรคาร์บอนจะได้จากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเท่านั้น

Senol, O.I., Viljava , T.R., Krause , A.O.I. 2005 [13] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิ-จีเนชันของเมทิลเอสเทอร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล-โมลิบดีนัมจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบซัลไฟด์จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบออกไซด์ของทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง นิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์พบว่า นิกเกิล-โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิจะพบว่าค่าการเกิดของผลิตรัถน์ของไฮโดรคาร์บอนของนิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์แบบซัลไฟด์จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ในขณะที่เดียวกันค่าการเกิดของ

ผลิตภัณฑ์ของไฮโดรคาร์บอนของโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์จะมีความสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

Laurent E., and Delmon, B. 1994 [14] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ของหมู่คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลิกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ 4-เมตทิลลาซีโทฟินอล, ไดเอททิลเดคเซนไดโอเอท และกัวคอลลเป็นสารตั้งต้น จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะมีความว่องไวสูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน

สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวกับการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

สำหรับการไฮโดรทรีตติ้งสามารถนำวัตถุดิบที่ได้จากน้ำมันพืชหรือกรดไขมันมาเป็นสารตั้งต้นได้หลายชนิด เช่น ปาล์ม มะพร้าว ถั่วเหลือง ทานตะวัน หรือเมล็ดเรพ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดไขมันของสารตั้งต้นที่ใช้

สภาวะของการทดลอง

กระบวนการไฮโดรทรีตติ้งจะทำการทดลองที่อุณหภูมิประมาณ 200 ถึง 450 องศาเซลเซียส ความดัน 200 ถึง 1,015 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.25 ถึง 25 ชั่วโมง⁻¹

ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาในการไฮโดรทรีตติ้งที่พบส่วนใหญ่คือ นิกเกิลโมลิบดีนัมและโคบอลต์โมลิบดีนัม บนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการไฮโดรทรีตติ้ง

การไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืชจะมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้ ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชัน (Decarboxylation) คือปฏิกิริยาที่จะเปลี่ยนกรดคาร์บอกซิลิกให้กลายเป็นหมู่เมทิลและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไม่ต้องเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปช่วยในการทำปฏิกิริยาตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชัน

ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (decarbonylation) คือปฏิกิริยาที่จะเปลี่ยนกรดคาร์บอกซิลิกโดยมีการเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะเป็นหมู่เมทิลคาร์บอนมอนอกไซด์ และน้ำ ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (hydrodeoxygenation) คือปฏิกิริยาที่จะเปลี่ยนกรดคาร์บอกซิลิก โดยมีการเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะเป็นสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำ ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

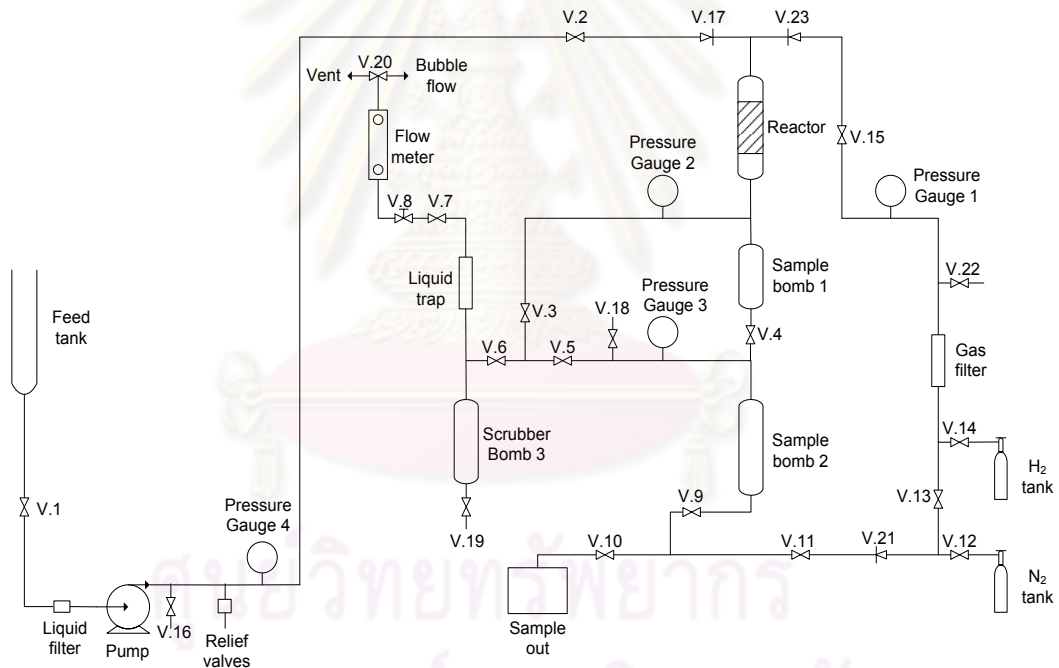
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การทดลองและการวิเคราะห์

3.1 การทดลอง

งานวิจัยจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องมาทำการศึกษาการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเครื่องปฏิกรณ์ถูกออกแบบให้รองรับอุณหภูมิสูงสุด 380 องศาเซลเซียส และความดันสูงสุด 1,600 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และชิ้นส่วนของเครื่องปฏิกรณ์จะใช้วัสดุสแตนเลสสตีลเป็นหลัก เพื่อป้องกันการกัดกร่อนและทนต่อสภาวะของแรงดันและอุณหภูมิสูงได้



รูปที่ 3.1 แผนผังระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง

ในการทดลองจะให้ค่อยๆให้ความร้อนโดยฮีตเตอร์ด้วยอัตรา 1 องศาเซลเซียสต่อนาที จนอุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นเป็น 150 องศาเซลเซียส ภายใต้การป้อนก๊าซไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 1.5 ชั่วโมง เพื่อที่จะกำจัดความชื้น หลังจากนั้นเปลี่ยนจากก๊าซไนโตรเจนเป็น

ก๊าซไฮโดรเจนเพื่อที่จะทำการเริ่มซัลไฟต์ตัวเร่งปฏิกิริยา ก๊าซและของเหลวจะถูกป้อนเข้าสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนจะไหลผ่านมาตรวัดความดัน ซึ่งถูกติดตั้งเพื่อวัดความดันในส่วนของก๊าซ แล้วไหลผ่านตัวกรองก๊าซ ผ่านมาตรวัดความดันหมายเลข 1 และไหลผ่านวาล์วหมายเลข 15 ตามลำดับ เพื่อเข้าสู่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับส่วนของของเหลวจะไหลออกมาจากหลอดบิวเรตต์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุสารตั้งต้น ไหลผ่านตัวกรองของเหลว แล้วผ่านมาเข้าสู่ปั๊มความดันสูงซึ่งสามารถสร้างความดันสูงได้ที่อัตราการไหลต่ำ โดยความดันในส่วนหนึ่งของของเหลวสามารถวัดได้จากมาตรวัดความดันหมายเลข 4 ซึ่งในส่วนหนึ่งของของเหลวจะถูกติดตั้งวาล์วนิรภัยเพื่อความปลอดภัย โดยจะปล่อยความดันเมื่อความดันในระบบสูงเกินกว่า 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ก๊าซและของเหลวจะพบกันบริเวณส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์และไหลลงมาสู่ส่วนล่างในเครื่องปฏิกรณ์บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาตร 30 มิลลิลิตร ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของลูกแก้ว โดยเครื่องปฏิกรณ์มีความยาว 47 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร และความหนา 0.089 เซนติเมตร ซึ่งในส่วนหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกหุ้มด้วยเหล็กประกบสองชั้น เพื่อส่งความร้อนต่อจากแหล่งให้ความร้อน ซึ่งใช้ฮีทเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์ สองชั้น และอุปกรณ์ทั้งหมดในส่วนหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน เพื่อความปลอดภัยจากพื้นผิวที่ร้อน โดยอุณหภูมิในส่วนหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ซึ่งถูกติดตั้ง 3 จุดภายนอกเครื่องปฏิกรณ์ (ส่วนบน ส่วนกลาง และส่วนล่าง) และอีกหนึ่งจุดในตำแหน่งจุดศูนย์กลางภายในเครื่องปฏิกรณ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ทั้งส่วนของก๊าซและส่วนของของเหลว จะไหลผ่านถึงเก็บตัวอย่างที่ 1 เข้าสู่ถังเก็บตัวอย่างที่ 2 เพื่อแยกของเหลวและก๊าซออกจากกัน โดยมีมาตรวัดความดันหมายเลข 3 วัดความดันของถังเก็บตัวอย่าง โดยก๊าซจะไหลออกที่ด้านบนของถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 1 ผ่านวาล์วปรับละเอียดหมายเลข 8 แล้วผ่านมาตรวัดอัตราการไหลหลังจากนั้นจะปล่อยก๊าซลงสู่ภาชนะที่บรรจุด้วยสารละลายไฮเดรอกไซด์ก่อนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศ และของเหลวจะไหลลงสู่ด้านล่างของถังเก็บตัวอย่าง

การเก็บตัวอย่างออกจากระบบจะทำทุกๆ 6 ชั่วโมงระหว่างทำการทดลอง ซึ่งระบบถูกออกแบบโดยมีถังเก็บตัวอย่าง 2 ถัง เพื่อไม่ให้สภาวะคงตัวในระบบถูกรบกวนในระหว่างเก็บ

ตัวอย่าง ซึ่งมีขั้นตอนในการเก็บตัวอย่างดังนี้ ปิดวาล์วที่ 4 และ 5 เพื่อแยกถังเก็บตัวอย่างที่ 2 ออกจากระบบ โดยของเหลวที่เหลืออย่างต่อเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกเก็บชั่วคราวในถังเก็บตัวอย่างที่ 1 และก๊าซจากระบบจะวิ่งผ่านวาล์วหมายเลข 3 เพื่อออกสู่บรรยากาศ และในส่วนถังเก็บตัวอย่างที่ 2 ก๊าซจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศที่วาล์วหมายเลข 18 ส่วนของเหลวจะไหลออกจากระบบด้วยแรงดันผ่านวาล์วหมายเลข 9 และ 10 สู่กล่องเก็บตัวอย่าง หลังจากการเก็บตัวอย่างเสร็จสิ้น ถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 จะสูญเสียความดัน จึงจำเป็นต้องปรับความดันให้เท่ากับแรงดันของระบบ โดยเติมก๊าซไนโตรเจน ผ่านวาล์วหมายเลข 9, 11 และ 12 จนกระทั่งความดันในถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 มีค่าเท่ากับความดันของระบบ จากนั้นปิดวาล์วหมายเลข 9, 11 และ 12 และเปิดวาล์วหมายเลข 4 และ 5 อย่างช้าๆ เพื่อเชื่อมต่อถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 กับระบบทั้งหมด ตัวอย่างที่เก็บจะถูกติดฉลากเพื่อรอการวิเคราะห์

การทดลองจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมไฮโดรทรีตติ้งเพื่อใช้ในการศึกษาคือ นิกเกิลโมลิบดีนัม โดยมีสารตั้งต้น 3 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะของการทดลอง

สภาวะของการทดลอง	
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	: 200, 250, 300, 350
ความดัน (ปอนด์ต่อตารางนิ้ว)	: 750
ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ชั่วโมง ⁻¹)	: 0.5, 1, 1.5
อัตราการไหลของน้ำมัน (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)	: 15, 30, 45
ไฮโดรเจน : น้ำมัน	: 500 : 1
ตัวเร่งปฏิกิริยา	: นิกเกิลโมลิบดีนัม
ปริมาตรเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (มิลลิลิตร)	: 30
สารตั้งต้น	: น้ำมันปาล์มโอเลอิน, ปาล์มสเตียริน, กรดไขมันปาล์ม

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองจะใช้สารเคมีหลายชนิดและการวิเคราะห์ผลซึ่งจะได้มาจากแหล่งผลิตที่แตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 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

การทดลองจะนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคน, การกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคน, ความหนาแน่น, ร้อยละกรดไขมัน, ค่าของกรด และร้อยละน้ำหนักรของน้ำ

3.3.1 การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนและการกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน และการกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคนแตกต่างกันเนื่องจากผลของสภาวะของการทดลองเช่น อุณหภูมิ, ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว โดยปริมาณอัลเคน จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี โดยใช้ก๊าซโครมาโตกราฟี varian รุ่น 3,800 โดยใช้คอลัมน์แบบคาปิลารีรุ่น innowax m 20

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร และความหนาชั้นฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร โดยใช้ตัวตรวจวัดแบบเฟรมไอออนไนซ์ (flame ionization detector) โดยสภาวะคอลัมน์ในการวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟฟีแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 สภาวะของคอลัมน์

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

3.3.2 ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าความหนาแน่นจะใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยค่าความหนาแน่นจะถูกระบุโดยขวดถ่วงจำเพาะแบบ Gay lussac pycnometer ทำโดยเติมผลิตภัณฑ์ของเหลวลงสู่ขวดถ่วงจำเพาะจนเต็มแล้วจึงปิดฝา ซึ่งขวดถ่วงจำเพาะจะปรับปริมาตรของเหลวที่แน่นอนเมื่อปิดฝา เมื่อได้ค่าปริมาตรที่แน่นอน และน้ำหนักที่แน่นอนจึงสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นได้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะการทดลองที่ดีจะมีความหนาแน่นน้อย เนื่องจากสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองจะมี

ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 0.9 กรัมต่อมิลลิลิตร แต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.8 กรัมต่อมิลลิลิตร ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน กรดไขมันปาล์ม และสารประกอบประเภทอัลเคน

สารเคมี	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)
ปาล์มโอเลอิน	0.903
ปาล์มสเตียรีน	0.891
กรดไขมันปาล์ม	0.877
เพนตะเดคเคน (n-C15)	0.769
เฮกซะเดคเคน (n-C16)	0.773
เฮปตะเดคเคน (n-C17)	0.777
อ็อกตะเดคเคน (n-C18)	0.780

3.3.3 ค่าของกรด

ค่าของกรด จะใช้บอกถึงปริมาณกรดไขมันที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าของกรดมีนิยามคือ ปริมาณของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในหน่วยมิลลิกรัมที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างปริมาณหนึ่งกรัมเป็นกลาง ซึ่งนำมาวิเคราะห์โดยการไตเตรดตามมาตรฐาน AOCS Official method Cd-3d-63

3.3.4 ปริมาณร้อยละของน้ำ

การไฮโดรทรีตติ้งจะพบว่าผลิตภัณฑ์หลักคือ สารประกอบประเภทอัลเคน และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจนชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน หลังจากเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว จะพบว่าน้ำจะแยกชั้นกับผลิตภัณฑ์หลัก ซึ่งปริมาณน้ำจะเป็นข้อมูลที่บอกถึงปริมาณออกซิเจนที่กำจัดออกจากโมเลกุลของสารตั้งต้น

3.4 การคำนวณในงานวิจัย

3.4.1 การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor) มีนิยามดังนี้

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

สมการที่ 3.1 แสดงค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง

3.4.2 การคำนวณหาปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน

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

สมการที่ 3.2 แสดงค่าปริมาณอัลเคน (%)

ซึ่งปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนคำนวณได้จาก

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

สมการที่ 3.3 แสดงค่าปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน (กรัม)

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนของน้ำมันปาล์มโอเลอินที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- พื้นที่ของสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม = 102,031
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 0.00703 กรัม
- พื้นที่ของสารตัวอย่าง = 1,067,047
- แฟกเตอร์ตอบสนองของสารประกอบประเภทอัลเคน 15 อะตอม = 1.3

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.3 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

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

หลังจากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์สารประกอบประเภทอัลเคนได้จาก

- ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 อะตอม = 0.000517 กรัม
- ปริมาณสารตัวอย่าง = 0.0083 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.2 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\frac{\text{ปริมาณสารประกอบ}}{\text{ประเภทอัลเคน (\%)}} = \frac{0.000517}{0.0083} \times 100 = 6.2301$$

3.4.3 การคำนวณหาค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (Liquid Hourly Space Velocity)

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

สมการที่ 3.4 แสดงค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลว

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินทำการทดลองที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- อัตราการไหลของของเหลว = 15 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
- ปริมาตรของเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา = 30 มิลลิลิตร

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.4 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ชม.-1)} = \frac{15}{30} = 0.5$$

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

โดยกำหนด

- ปริมาณน้ำหนักตัวอย่าง (กรัม) = w
- สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (มิลลิลิตร) = v
- ความเข้มข้นของสารละลาย (โมลต่อลิตร) = N

สามารถคำนวณหาค่าของกรดได้ดังนี้

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

สมการที่ 3.5 แสดงค่าของกรด

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าของกรดของน้ำมันปาล์มโอเลอินที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

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

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.5 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม การทดลองทำที่อุณหภูมิ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิง-สเปซของของเหลว 0.5 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง⁻¹ ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ในระหว่างการทดลองจะมีการเก็บตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยตัวอย่างที่เก็บจะมีทั้งส่วนที่เป็นของเหลวและส่วนที่เป็นก๊าซ ตัวอย่างส่วนที่เป็นของเหลวจะทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน การกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคน ค่าของกรดปริมาณน้ำ และความหนาแน่น ตัวอย่างส่วนที่เป็นก๊าซทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผลการทดลองนำเสนอในหัวข้อต่อไป

4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น

4.2 ผลการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน

4.3 ผลการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน

4.4 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น

4.5 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้ไขมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น

4.6 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นสารตั้งต้น

4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น

การทดลองจะใช้น้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม ซึ่งมีองค์ประกอบของกรดไขมัน และค่าของกรดของสารตั้งต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1

4.1.1 น้ำมันปาล์มโอเลอินคือ น้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการกลั่นทำให้บริสุทธิ์ เมื่อผ่านกระบวนการกลั่น น้ำมันที่ได้จะมีสองชั้นคือ ชั้นที่เป็นของเหลวและชั้นที่เป็นไข ในส่วนของชั้นที่เป็นของเหลวจะเรียกว่าน้ำมันปาล์มโอเลอิน ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้องจะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน

4.1.2 ปาล์มสเตียรีนคือ น้ำมันปาล์มดิบผ่านกระบวนการกลั่น ในส่วนของชั้นที่เป็นไขจะเรียกว่าปาล์มสเตียรีน ซึ่งในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้องจะเป็นของแข็งสีขาว

4.1.3 กรดไขมันปาล์มคือ ผลพลอยได้ซึ่งได้มาจากการกลั่นบริสุทธิ์ของน้ำมันปาล์มดิบ ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้องจะเป็นของแข็งสีน้ำตาลอ่อน

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของกรดไขมันและค่าของกรดของสารตั้งต้น

ชนิดกรดไขมัน	โอเลอิน	สเตียรีน	กรดไขมันปาล์ม
C 14:0	1	1.3	1.1
C 16:0	38.7	58.3	49.9
C 18:0	0	6	4.2
C 18:1	49.3	29.1	35.3
C 18:2	10.5	4.9	8.6
C 18:3	0.4	0.3	0.9
ปริมาณกรดไขมันอิ่มตัว	39.7	65.6	55.2
ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว	60.2	34.3	44.8
ค่าของกรด	0.25	0.44	218.59

*ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง)

**ชนิดของกรดไขมัน : (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์มมีองค์ประกอบชนิดของกรดไขมันที่แตกต่างกัน ซึ่งจะมีองค์ประกอบของกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง 14 ถึง 18 อะตอม โดยองค์ประกอบหลักจะเป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอม และกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม ซึ่งจากการวิเคราะห์น้ำมันปาล์มโอเลอิน และปาล์มสเตียรีน จะมีค่าของกรด 0.25 และ 0.44 มิลลิกรัมของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง เพราะฉะนั้นน้ำมันปาล์มโอเลอิน และปาล์มสเตียรีนเป็นน้ำมันที่ผ่านกระบวนการกลั่นทำให้บริสุทธิ์แล้วแยกกรดไขมันออกไปแล้ว

4.2 ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน

น้ำมันปาล์มโอเลอิน และปาล์มสเตียรีนมีโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นไตรกลีเซอไรด์เหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกน้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นแบบจำลองในการทำการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจนเป็นสารตั้งต้น

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลว ทำการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน

ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

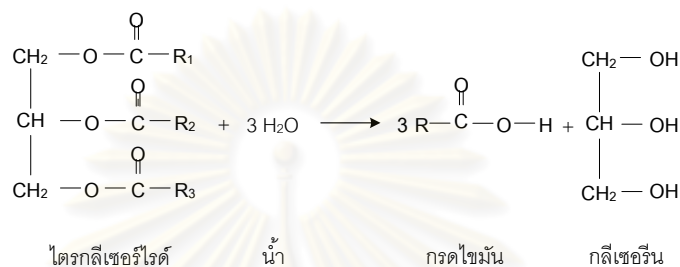
คุณหมุมิ (เซลเซียส)	200	250	300	350
ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹				
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน C15 (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน C16 (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน C17 (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน C18 (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณน้ำ (% wt.)	-	-	-	-
ค่าของกรด	0.27	0.28	0.58	4.12

*ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง)

**ค่าของกรดของสารตั้งต้น 0.25 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจนพบว่า ตัวอย่างมีปริมาณของกรดไขมัน โดยไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำ

Logan และคณะ [15] ได้ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของไตรกลีเซอไรด์ โดยทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันพืช และน้ำ พบว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะความดัน 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแสดงดังสมการต่อไปนี้



ผลการทดลองพบว่าเมื่อนำน้ำมันปาล์มโอเลอินป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ภายใต้อุณหภูมิสูง และภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่สูงโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวอย่างจะมีค่าของกรดเกิดขึ้น โดยกรดไขมันเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ระหว่างโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน และน้ำซึ่งอยู่ในรูปของความชื้น พบว่าค่าของกรดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น หมายถึงปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

4.3 ผลการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน

น้ำมันปาล์มโอเลอิน และปาล์มสเตียรีนมีโครงสร้างโมเลกุลที่เป็นไตรกลีเซอไรด์เหมือนกัน ดังนั้นจึงเลือกน้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นแบบจำลองในการทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้น

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลว ทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจนแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน

ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	200	250	300	350
ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹				
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน C15 (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน C16 (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน C17 (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน C18 (% wt.)	-	-	-	-
ปริมาณน้ำ (% wt.)	-	-	-	-
ค่าของกรด	0.26	0.28	0.41	4.17

*ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง)

**ค่าของกรดของสารตั้งต้น 0.25 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมตัวอย่าง

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน พบว่าผลิตภัณฑ์ในตัวอย่างมีปริมาณของกรด โดยไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำ เช่นเดียวกับผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันไฮโดรเจน

ผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อน้ำมันปาล์มโอเลอินป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ภายใต้อุณหภูมิสูง และภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่สูงโดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวอย่างจะมีค่าของกรดเกิดขึ้น โดยกรดไขมันเกิดขึ้นจาก ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างโครงสร้างไตรกลีเซอไรด์ของน้ำมันปาล์มโอเลอิน และน้ำซึ่งอยู่ในรูปของความชื้นที่ละลายอยู่ในน้ำมัน ซึ่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสามารถเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ตัวอย่างที่เกิดขึ้นไม่พบสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำแสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันไม่สามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่ใช่ตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน และผลการทดลองทำการทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน จะพบว่าผลการทดลองเหมือนกันกล่าวคือ พบกรดไขมันที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาระหว่าง ไตรกลีเซอไรด์ และน้ำที่อยู่ในรูปของความชื้น โดยค่าของกรดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

4.4 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น

4.4.1 ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของเหลว และผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซที่ทำการทดลองโดยใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นแสดงในตารางที่ 4.4 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

อุณหภูมิ	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด(%)	-	4.7	61.2	92.1
ปริมาณ C15	-	0.3	1.7	4.5
ปริมาณ C16	-	2.0	29.7	43.6
ปริมาณ C17	-	0.3	2.3	4.4
ปริมาณ C18	-	2.1	27.5	39.6
ค่าของกรด	181.13	13.30	1.75	0
ปริมาณน้ำ (%)	-	5.29	10.70	11.43
ความหนาแน่น	0.86	0.84	0.78	0.76
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

*ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง)

**ค่าของกรดของสารตั้งต้น 218.59 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง

***สารตั้งต้นมีองค์ประกอบที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอมและ 18 อะตอม ปริมาณร้อยละ 49.9 และ 49.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว
1.0 ชั่วโมง⁻¹

คุณหภูมิ	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด (%)	-	1.6	37.1	88.9
ปริมาณ C15	-	0.1	1.3	4.3
ปริมาณ C16	-	0.7	18.2	42.4
ปริมาณ C17	-	0.1	1.3	4.3
ปริมาณ C18	-	0.7	16.3	37.9
ค่าของกรด	188.33	69.68	3.04	0.15
ปริมาณน้ำ (%)	-	3.56	9.36	11.28
ความหนาแน่น	0.87	0.85	0.80	0.76
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว
1.5 ชั่วโมง⁻¹

คุณหภูมิ	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด (%)	-	0.9	20.4	86.7
ปริมาณ C15	-	0.1	1.0	4.1
ปริมาณ C16	-	0.4	9.9	41.7
ปริมาณ C17	-	0.1	0.9	4.1
ปริมาณ C18	-	0.3	8.6	36.8
ค่าของกรด	192.70	123.20	5.03	0.82
ปริมาณน้ำ (%)	-	1.86	8.50	11.25
ความหนาแน่น	0.87	0.85	0.81	0.76
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเมื่อนำกรดไขมันปาล์มมาทำการไฮโดรทรีตติงจะได้ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอมเกิดขึ้น ค่าของกรดลดลง มีน้ำเกิดขึ้นในปริมาณมาก และพบว่ามีการเกิดออกไซด์เกิดขึ้นด้วย ปฏิกริยาหลักในการไฮโดรทรีตติงของกรดไขมันปาล์มคือ ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ซึ่งเป็นปฏิกริยากำจัดออกซิเจนอะตอมออกจากกรดไขมันปาล์มที่มีออกซิเจนอะตอมเป็นส่วนประกอบ ก๊าซไฮโดรเจนจะเข้าไปทำปฏิกริยากับกรดไขมันปาล์มที่มีออกซิเจนอะตอม และเปลี่ยนให้กลายเป็นน้ำพร้อมกับเกิดสารประกอบประเภทอัลเคนดังสมการต่อไปนี้



สารประกอบประเภทอัลเคนที่ได้จากปฏิกริยา จะเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเทียบเท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมที่เป็นกรดไขมัน ซึ่งเป็นองค์ประกอบอยู่ในกรดไขมันปาล์ม ตัวอย่างเช่น ถ้านำกรดปาล์มมิติกที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ 16 อะตอมมาทำปฏิกริยาไฮโดรทรีตติง ก็ควรจะได้สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ 16 อะตอมด้วย ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่เป็นผลจากปฏิกริยา ควรจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมอยู่ 16 และ 18 อะตอมเป็นหลัก

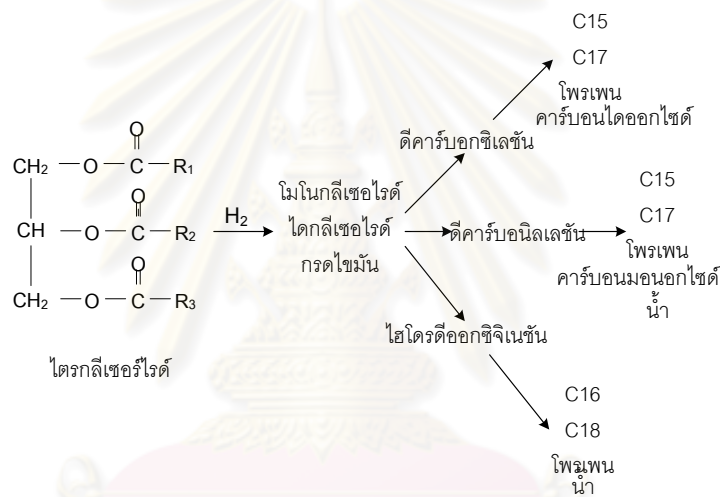
ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเกิดสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอม ปนอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกริยาอื่นที่ไม่ใช่ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้นพร้อมกับปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

จากการศึกษาของ George W. Huber และคณะ [11] ได้ทำการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดทานตะวัน และน้ำมันเมล็ดทานตะวันผสมกับน้ำมันหนักที่ได้จากการกลั่นแบบสูญญากาศ (Heavy vacuum oil) โดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกริยาระหว่าง 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส ความดัน 50 บาร์ โดยมีนิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์เป็นตัวเร่งปฏิกริยา พบว่ามีปฏิกริยาที่เกิดขึ้น 3 ปฏิกริยาดังต่อไปนี้

1. ปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชัน จะเป็นปฏิกริยาที่ไม่จำเป็นต้องใช้ก๊าซไฮโดรเจนและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม

2. ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ร่วมคือ น้ำ และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ โดยทั้งสองปฏิกิริยา จะให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่

3. ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์เป็นสารประกอบประเภทอัลเคน ซึ่งจะมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม และผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งทั้งสามปฏิกิริยาจะมีเอกลักษณ์โดยมีผลิตภัณฑ์ร่วมที่แตกต่างกัน และจะพบสารเคมีที่เกิดในระหว่างปฏิกิริยายังไม่สมบูรณ์ เช่น โมโนกลีเซอไรด์, ไดกลีเซอไรด์ และกรดไขมัน ดังสมการต่อไปนี้



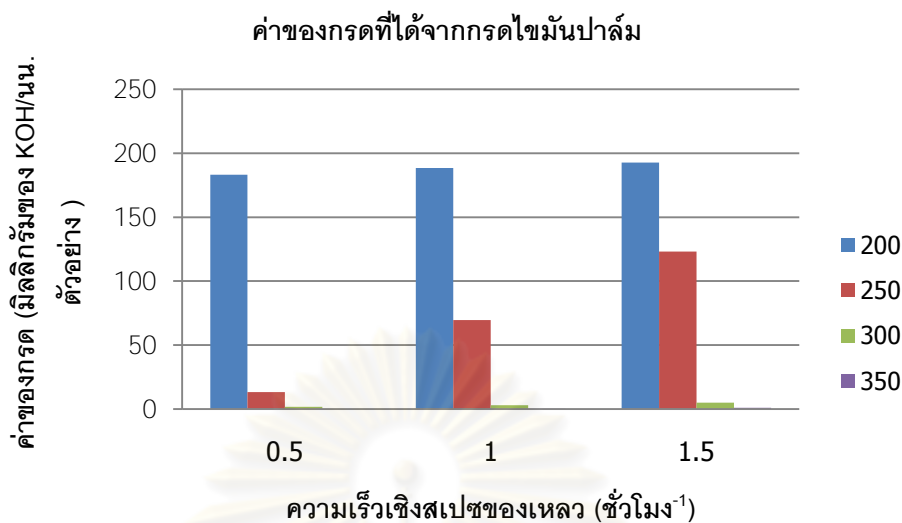
ผลจากการไฮโดรทรีตติ้งที่ชื่อของ George W. Huber ทำให้ทราบได้ว่าสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอม ที่ปนอยู่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เพราะว่าในการตรวจสอบพบว่ามีการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเกิดขึ้น และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะเกิดขึ้นด้วย แต่ไม่สามารถยืนยันได้ชัดเจน เนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้

4.4.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่ออุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา มีการเปลี่ยนแปลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส พบว่าค่าของกรดเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันไม่เกิดขึ้น ออกซิเจนอะตอมยังคงอยู่ในรูปของกรดไขมัน

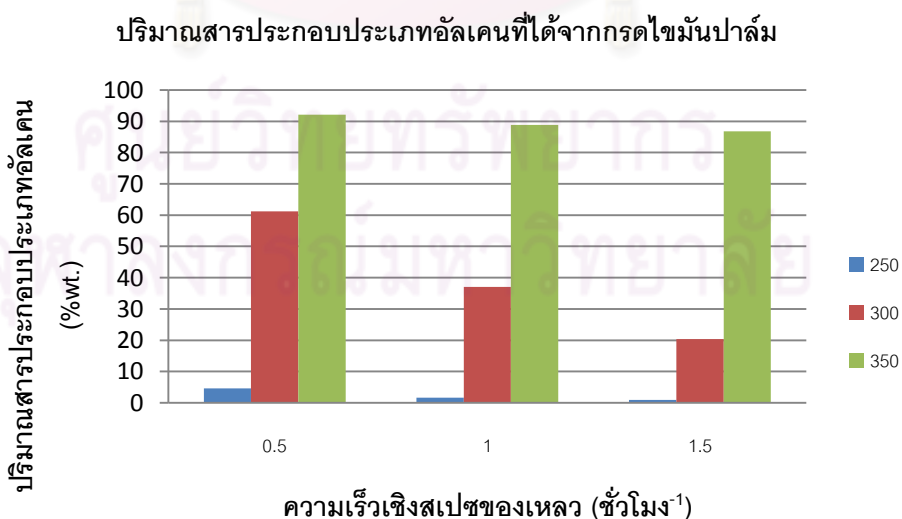
ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่าค่าของกรดมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามพบว่าปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน และปริมาณน้ำจะมีค่ามากขึ้น เพราะว่าที่อุณหภูมิสูงกรดไขมันปาล์มทำปฏิกิริยาได้ดี จะพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม เพิ่มขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบประเภทอัลเคนมากขึ้น ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในการไฮโดรทรีตติงของกรดไขมันปาล์มคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซีเลชันด้วย เพราะว่าพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 และ 17 อะตอม และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันน่าจะเกิดขึ้นด้วย เพราะว่าพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 และ 17 อะตอม และพบปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น

Pavel Simacek และคณะ[8] ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงของน้ำมันเมล็ดเรพ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม พบว่าเมื่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นโดยพบว่าที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณสารตั้งต้นอยู่มาก ซึ่งมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในปริมาณที่น้อย และที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียสจะไม่พบสารตั้งต้นเหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์ แต่จะพบปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าของกรดที่ได้จากกรดไขมันปาล์ม

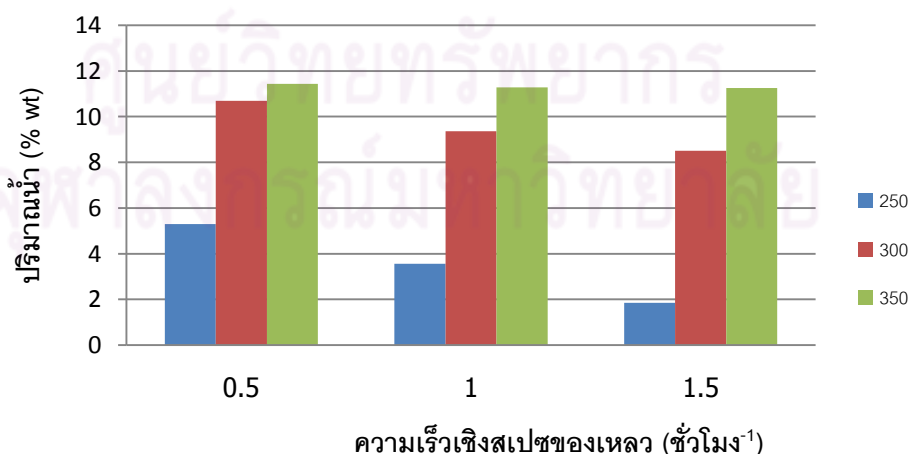
ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของกรดมีค่าลดลง เพราะว่าที่อุณหภูมิสูงกรดไขมันปาล์มจะทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน ซึ่งมีการกำจัดออกซิเจนอะตอมออกจากกรดไขมันปาล์ม และได้ผลิตภัณฑ์คือ น้ำ พร้อมกับเกิดสารประกอบประเภทอัลเคน



รูปที่ 4.2 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่ได้จากกรดไขมันปาล์ม

ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะว่าเมื่ออุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะเกิดขึ้นด้วย ซึ่งจะพบว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้นร้อยละ 0.6 และมีสารประกอบประเภท อัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอม ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้นร้อยละ 4.1 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอม เกิดขึ้นร้อยละ 4.0 และมีสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอมเกิดขึ้นร้อยละ 57.2 สำหรับที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซ 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอม เกิดขึ้นร้อยละ 8.9 และมีสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอม เกิดขึ้นร้อยละ 83.2 ซึ่งจะเห็นว่าปฏิกิริยาหลักในการไฮโดรทรีตติงของกรดไขมันปาล์มในทุกๆช่วงอุณหภูมินั้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

ปริมาณน้ำที่ได้จากกรดไขมันปาล์ม



รูปที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่ได้จากกรดไขมันปาล์ม

ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำจะเพิ่มขึ้น เพราะว่าเมื่ออุณหภูมิสูงจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรตีออกซิจีเนชันมากขึ้น โดยแนวโน้มปริมาณน้ำจะสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนคือ ปริมาณน้ำและปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และปริมาณน้ำจะมีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง^{-1} โดยมีปริมาณน้ำเท่ากับ 11.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการไฮโดรตีตั้งที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น พบว่ามีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาไฮโดรตีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาการแตกตัวของกรดไขมัน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรตีตั้งสามารถเกิดได้ดี ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำ

4.4.3 ผลกระทบของความเร็วจเชิงสเปซของของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยา

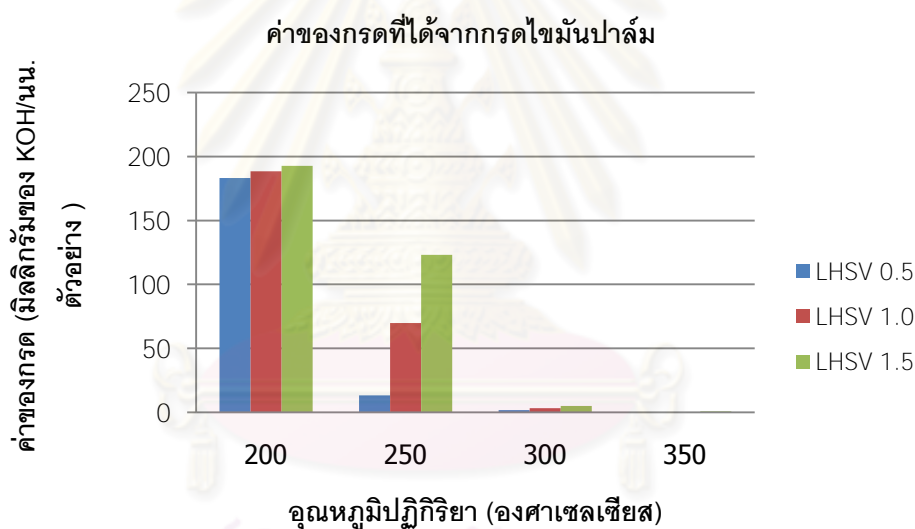
นอกจากอุณหภูมิจึงมีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็คือ ความเร็วจเชิงสเปซของของเหลว ความเร็วจเชิงสเปซของของเหลวจะบ่งบอกถึงเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้น เมื่อความเร็วจเชิงสเปซของของเหลวมีค่าสูง เวลาในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นก็จะน้อยลง แต่ในทางกลับกันเมื่อความเร็วจเชิงสเปซของของเหลวมีค่าต่ำ เวลาในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งความเร็วจเชิงสเปซของของเหลวมีนิยามดังนี้

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

จากผลการทดลองที่ความเร็วจเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง^{-1} พบว่าค่าของกรดของผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยที่สุด เพราะว่าเมื่อความเร็วจเชิงสเปซของของเหลวต่ำ สารจะวิ่งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลานานกว่าความเร็วจเชิงสเปซของของเหลวที่สูง ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอมมากขึ้น ทำให้สารประกอบประเภทอัลเคน และปริมาณน้ำมีค่ามากขึ้น กรดไขมันปาล์ม

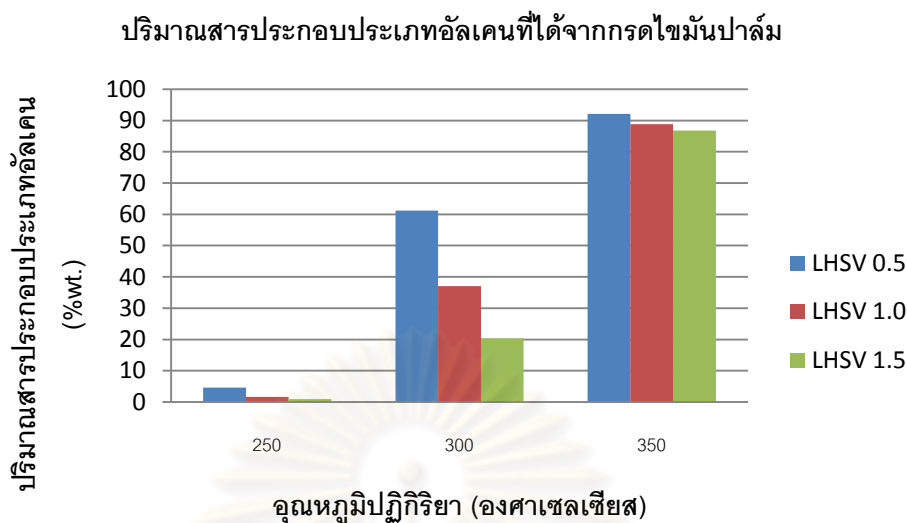
มีค่าของกรดสูง เมื่อทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน จะมีการกำจัดออกซิเจนอะตอมออกจากกรดไขมันปาล์ม ทำให้สารตั้งต้นที่เป็นกรดไขมันเปลี่ยนเป็นสารประกอบประเภทอัลเคน ค่าของกรดจึงมีค่าต่ำลง ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ค่าของกรดมีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดได้ดี ออกซิเจนอะตอมที่มีอยู่ในกรดไขมันปาล์มถูกกำจัดออกหมด

ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง⁻¹ ของแต่ละช่วงอุณหภูมิ พบว่าค่าของกรดมีค่ามากขึ้นตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามจะพบว่าสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม และปริมาณน้ำจะเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยลง เพราะว่ากรดไขมันปาล์มมีระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลง



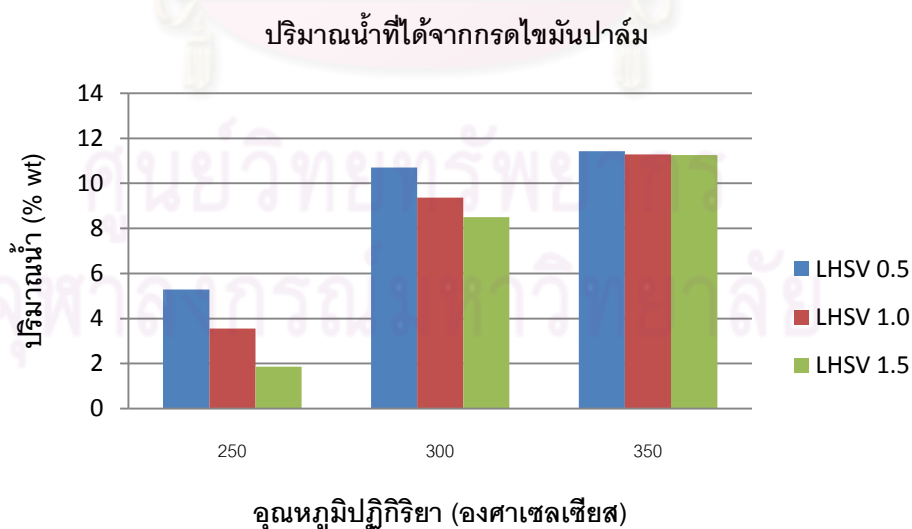
รูปที่ 4.4 ผลของความเร็วสเปซต่อค่าของกรดที่ได้จากกรดไขมันปาล์ม

ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ค่าของกรดมีค่ามากขึ้นด้วย เพราะว่าเมื่อเพิ่มความเร็วเชิงสเปซของของเหลวสูงขึ้น ระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ระยะเวลาในการทำปฏิกิริyajึงลดลง ออกซิเจนอะตอมในกรดไขมันปาล์มถูกกำจัดออกน้อย ผลลัพธ์ที่ได้จึงมีค่าของกรดสูงขึ้น



รูปที่ 4.5 ผลของความเร็วจึงสเปซของของเหลวต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน
ที่ได้จากกรดไขมันปาล์ม

ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วจึงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าลดลง เพราะว่กรดไขมันปาล์มมีเวลาในการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ได้น้อยลง



รูปที่ 4.6 ผลของความเร็วจึงสเปซของของเหลวต่อปริมาณน้ำที่ได้จากกรดไขมันปาล์ม

ผลการทดลองที่ใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมีค่าลดลง โดยปริมาณน้ำจะสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนคือ เมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำ และปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าลดลง เพราะว่าการกำจัดออกซิเจนอะตอมออกจากกรดไขมันปาล์มได้น้อยลง

ผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่ำสารจะวิ่งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลานานกว่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่สูง ส่งผลให้การปฏิกิริยาเกิดได้นานขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบประเภทอัลเคนมากขึ้น ปริมาณน้ำมากขึ้น และค่าของกรดน้อยลง ดังนั้นความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง^{-1} จะให้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด

4.5 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น

4.5.1 ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของเหลว และผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซที่ทำการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้นแสดงในตารางที่ 4.7 ถึง 4.9

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองที่ใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง^{-1}

คุณหภูมิ	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด(%)	-	36.7	84.0	94.2
ปริมาณ C15	-	1.4	3.4	6.0
ปริมาณ C16	-	13.2	28.2	32.0
ปริมาณ C17	-	2.3	5.9	9.5
ปริมาณ C18	-	19.8	46.5	46.7
ค่าของกรด	10.70	4.74	0.44	0.44
ปริมาณน้ำ (%)	-	7.43	11.56	11.66
ความหนาแน่น	0.88	0.80	0.76	0.76
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองที่ใช้ไขมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

อุณหภูมิ	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด (%)	-	14.5	70.7	91.7
ปริมาณ C15	-	0.7	2.7	5.1
ปริมาณ C16	-	5.0	25.9	32.0
ปริมาณ C17	-	1.1	3.8	8.2
ปริมาณ C18	-	7.7	38.3	46.4
ค่าของกรด	7.78	8.58	2.14	0.74
ปริมาณน้ำ (%)	-	4.30	10.72	11.45
ความหนาแน่น	0.89	0.83	0.78	0.77
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

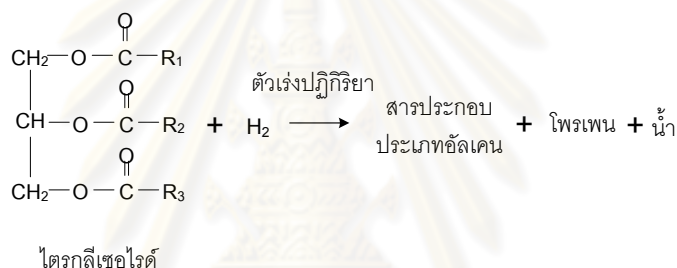
*ค่าของกรดของสารตั้งต้น 0.25 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง

**สารตั้งต้นมีองค์ประกอบที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอมและ 18 อะตอม ปริมาณร้อยละ 38.7 และ 60.2 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองที่ใช้ไขมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

อุณหภูมิ	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด (%)	-	8.2	62.2	76.8
ปริมาณ C15	-	0.4	2.4	3.9
ปริมาณ C16	-	2.8	22.6	28.3
ปริมาณ C17	-	0.7	4.0	5.9
ปริมาณ C18	-	4.3	33.2	38.7
ค่าของกรด	6.07	8.90	5.37	3.44
ปริมาณน้ำ (%)	-	3.13	8.46	10.26
ความหนาแน่น	0.89	0.85	0.78	0.78
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเมื่อนำน้ำมันปาล์มโอเลอินแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำน้ำมันปาล์มโอเลอินมาทำการไฮโดรทรีตติงจะได้ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอมเกิดขึ้นในปริมาณมาก มีน้ำเกิดขึ้น และพบว่ามีการคายคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นด้วย ปฏิกริยาหลักในการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอินคือ ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ซึ่งเป็นปฏิกริยาการกำจัดออกซิเจนอะตอมออกจากน้ำมันปาล์มโอเลอินที่มีออกซิเจนอะตอมเป็นส่วนประกอบ ก๊าซไฮโดรเจนจะเข้าไปทำปฏิกริยากับน้ำมันปาล์มโอเลอินที่มีออกซิเจนอะตอม และเปลี่ยนให้กลายเป็นน้ำ พร้อมกับเกิดสารประกอบประเภทอัลเคนและก๊าซโพเพนดังสมการต่อไปนี้



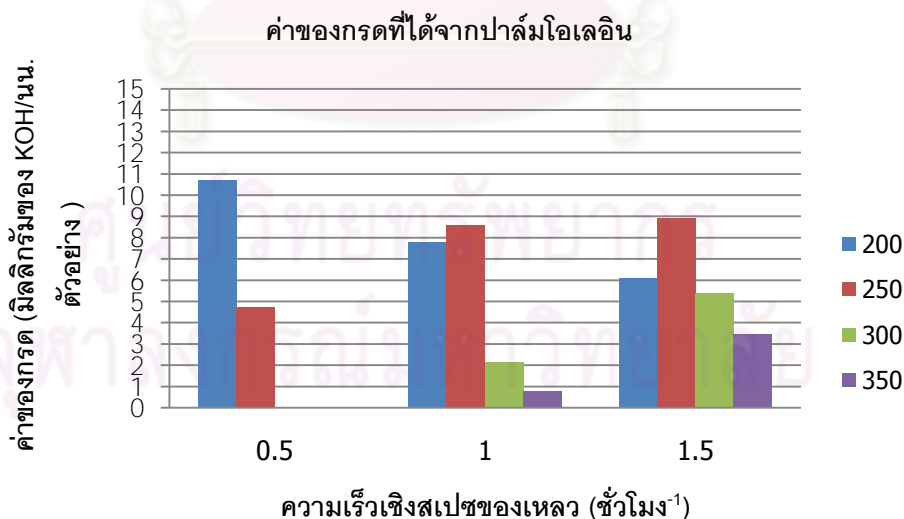
ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเกิดสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอม ปนอยู่ด้วย แสดงให้เห็นว่ามีปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และคาดว่ามีการเกิดคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้นด้วย [11]

4.5.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกริยา

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าของกรดมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้น เพราะว่าอุณหภูมิต่ำสารตั้งต้นเกิดปฏิกริยาไม่ดีจากการศึกษาของ George W. Huber [11] พบว่าเส้นทางการเกิดปฏิกริยาในการไฮโดรทรีตติงขั้นแรกสารตั้งต้นที่เป็นไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) จะเปลี่ยนเป็นกรดไขมัน หลังจากนั้นกรดไขมันจะทำปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกริยาดีคาร์บอนิลเลชัน หรือปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันต่อไปจนเกิดเป็นสารประกอบประเภทอัลเคน ทำให้ค่าของกรดของผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส มีค่ามากกว่าค่าของกรดของสารตั้งต้น เพราะว่าปฏิกริยาไปหยุด

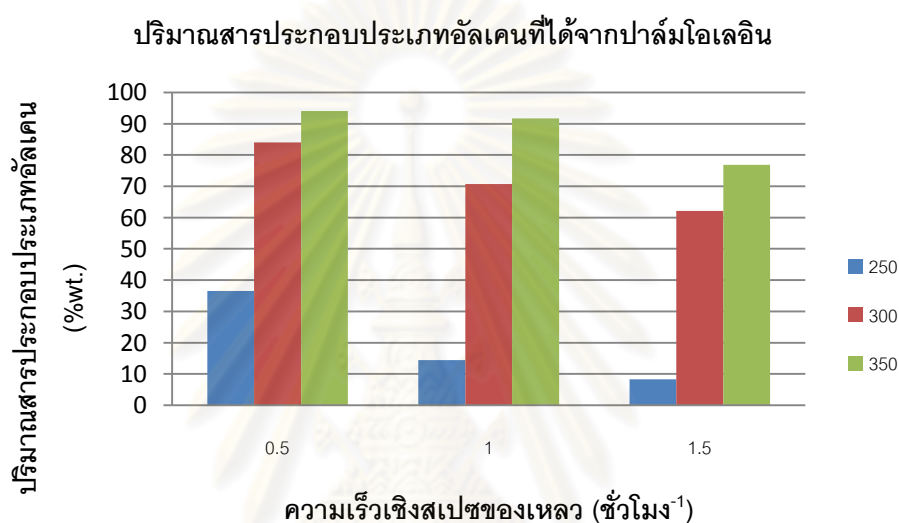
อยู่ในขั้นตอนของการเปลี่ยนเป็นกรดไขมัน และสารตั้งต้นบางส่วนทำปฏิกิริยาต่อจนเกิดเป็น สารประกอบประเภทอัลเคน ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณ สารประกอบประเภทอัลเคนเกิดขึ้นเล็กน้อย ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันไม่เกิดขึ้น เพราะว่าจากการ ทดลองไม่พบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่พบว่ามีสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน ระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม และปริมาณน้ำเกิดขึ้น ดังนั้นจะมีปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้น และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้นด้วย

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าของกรดลดลง ในทาง ตรงกันข้ามจะพบว่าปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน และปริมาณน้ำมีค่ามากขึ้น เพราะว่าที่ อุณหภูมิสูงน้ำมันปาล์มโอเลอินจะทำปฏิกิริยาได้ดี พบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวน คาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในการไฮโดรทรีตติงของน้ำมัน ปาล์มโอเลอินคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และมีปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดขึ้นด้วย เพราะว่าพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 และ 17 อะตอม และก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันน่าจะเกิดขึ้นด้วย เพราะว่าพบ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 15 และ 17 อะตอม และพบปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิต่อค่าของกรดที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน

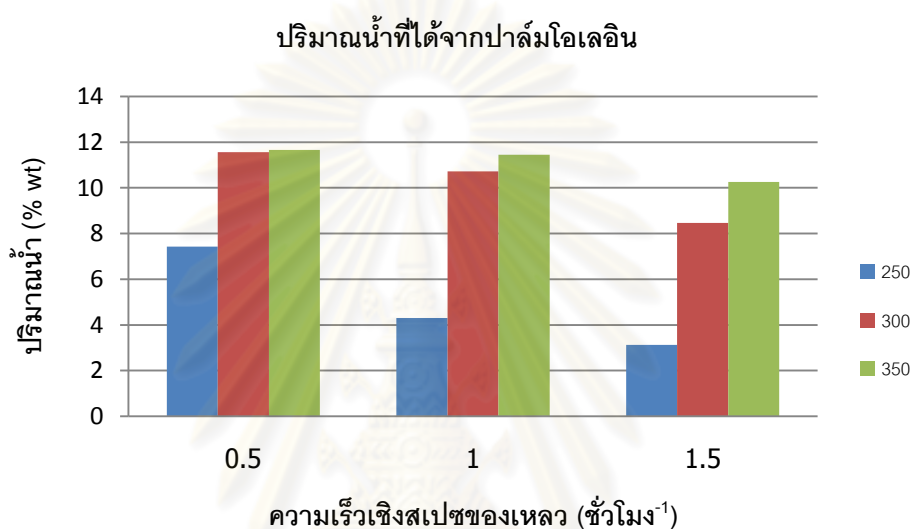
ผลการทดลองที่ใช้ น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของกรดจะลดลง เพราะว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยา น้ำมันปาล์มโอเลอิน สามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเพื่อเกิดเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนได้ และที่ อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียสจะพบกรดในปริมาณมาก เพราะว่าน้ำมันปาล์มโอเลอิน ไม่สามารถทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนได้ที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน ที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน

ผลการทดลองที่ใช้ น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะว่า การเพิ่มอุณหภูมิ จะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสามารถเกิดได้มากขึ้น ซึ่งจะพบว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอม ที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้นร้อยละ 3.6 และมี สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้นร้อยละ 32.9 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอมเกิดขึ้นร้อยละ 9.3 และมีสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอมเกิดขึ้นร้อยละ 74.7 สำหรับที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของ-

ของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอมเกิดขึ้นร้อยละ 15.4 และมีสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอม เกิดขึ้นร้อยละ 78.6 ซึ่งจะเห็นว่าปฏิกิริยาหลักในการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอินในทุกๆช่วงอุณหภูมินั้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน



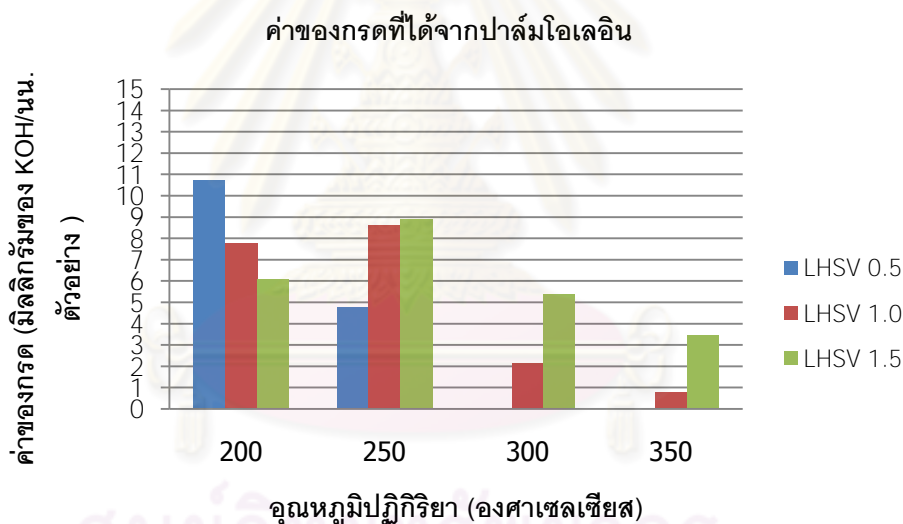
รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน

ผลการทดลองที่ใช้ น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำจะเพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำจะมีค่ามากที่สุดที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณน้ำเท่ากับ 11.66 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการไฮโดรทรีตติงที่ใช้ปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น เมื่ออุณหภูมิต่ำ สารตั้งต้นจะทำการแตกตัวเกิดเป็นกรดไขมัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่ามีปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เกิดขึ้นด้วย

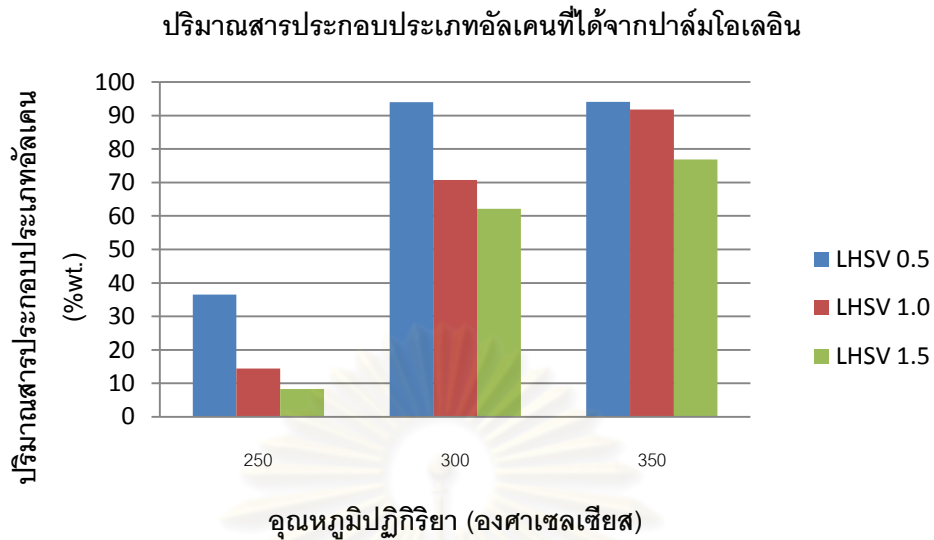
4.5.3 ผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยา

ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าของกรดน้อยในช่วงอุณหภูมิ 250 ถึง 350 องศาเซลเซียส เพราะว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่ำ สารตั้งต้นจะมีเวลาในการทำปฏิกิริยาได้นาน ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี ทำให้ได้สารประกอบประเภท อัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม มากขึ้น จึงเป็นผลทำให้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน และปริมาณน้ำมากขึ้น การทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง⁻¹ พบว่าสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม จะเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยลง ค่าของกรดมากขึ้น เพราะว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นลดลง ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยลง



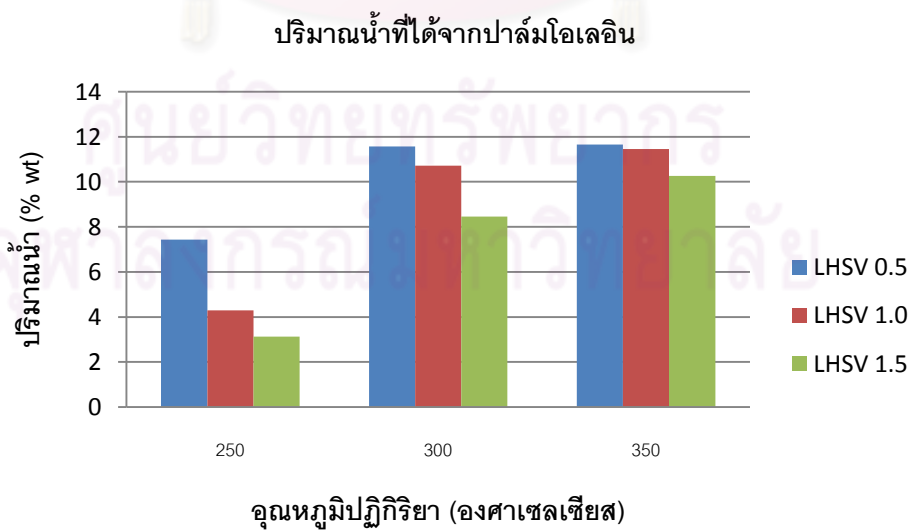
รูปที่ 4.10 ผลของความเร็วสเปซต่อค่าของกรดที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน

ผลการทดลองที่ใช้ น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ค่าของกรดมีค่ามากขึ้นด้วย เพราะว่าเมื่อเพิ่มความเร็วเชิงสเปซของของเหลวสูงขึ้น ระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจึงลดลง ออกซิเจนอะตอมในน้ำมันปาล์มโอเลอินถูกกำจัดออกน้อย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าของกรดสูงขึ้น



รูปที่ 4.11 ผลของความเร็วจึงสเปซของของเหลวต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน

ผลการทดลองที่ใช้ น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วจึงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าลดลง เพราะว่าน้ำมันปาล์มโอเลอินมีเวลาในการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลง ผลิตภัณฑ์สารประกอบประเภทอัลเคนที่ได้จึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.12 ผลของความเร็วจึงสเปซของของเหลวต่อปริมาณน้ำที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน

ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมีค่าลดลง โดยปริมาณน้ำจะสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนคือ เมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำ และปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าลดลง

ผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วเชิงสเปซต่ำสารจะวิ่งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลานานกว่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่สูง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้นานขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดสารประกอบประเภทอัลเคนมากขึ้น ปริมาณน้ำมากขึ้น และค่าของกรดน้อยลง

4.6 ผลการวิเคราะห์ที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้น

4.6.1 ผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นของเหลว และผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นก๊าซที่ทำการทดลองโดยใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้นแสดงในตารางที่ 4.10 ถึง 4.12

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

คุณทฤษฎี	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด(%)	-	8.5	80.7	96.5
ปริมาณ C15	-	0.6	3.5	7.3
ปริมาณ C16	-	4.7	48.3	55.7
ปริมาณ C17	-	0.4	2.3	4.3
ปริมาณ C18	-	2.8	26.6	29.2
ค่าของกรด	12.15	13.48	4.33	0.34
ปริมาณน้ำ (%)	-	5.07	11.02	11.37
ความหนาแน่น	0.89	0.83	0.77	0.76
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว
1.0 ชั่วโมง⁻¹

อุณหภูมิ	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด (%)	-	4.0	59.4	86.6
ปริมาณ C15	-	0.4	2.7	6.1
ปริมาณ C16	-	2.1	35.6	51.3
ปริมาณ C17	-	0.2	1.7	3.6
ปริมาณ C18	-	1.3	19.4	25.6
ค่าของกรด	8.98	12.87	6.77	2.33
ปริมาณน้ำ (%)	-	3.09	9.47	11.20
ความหนาแน่น	0.89	0.85	0.79	0.77
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

*ค่าของกรดของสารตั้งต้น 0.44 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง

**สารตั้งต้นมีองค์ประกอบที่มีจำนวนคาร์บอน 16 อะตอมและ 18 อะตอม ปริมาณร้อยละ 58.3 และ 40.3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้น ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว
1.5 ชั่วโมง⁻¹

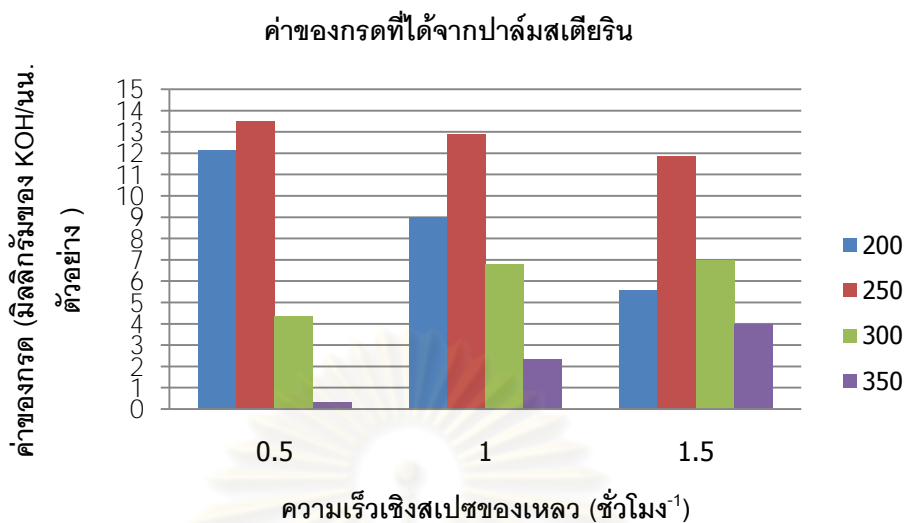
อุณหภูมิ	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C
ปริมาณอัลเคนทั้งหมด (%)	-	1.9	45.1	74.8
ปริมาณ C15	-	0.2	2.4	6.0
ปริมาณ C16	-	1.0	26.8	45.1
ปริมาณ C17	-	0.1	1.5	2.7
ปริมาณ C18	-	0.6	14.4	21.0
ค่าของกรด	5.57	11.84	6.96	3.96
ปริมาณน้ำ (%)	-	1.69	8.64	11.12
ความหนาแน่น	0.89	0.86	0.80	0.77
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ไม่พบ	ไม่พบ	พบ	พบ

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเมื่อใช้ปาล์มสเตียรินแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำปาล์มสเตียรินมาทำการไฮโดรทรีตติงจะได้ผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 16 และ 18 อะตอมเกิดขึ้นในปริมาณมาก มีน้ำเกิดขึ้น และพบว่ามีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น เช่นเดียวกับการทดลองเมื่อใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น

4.6.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยา

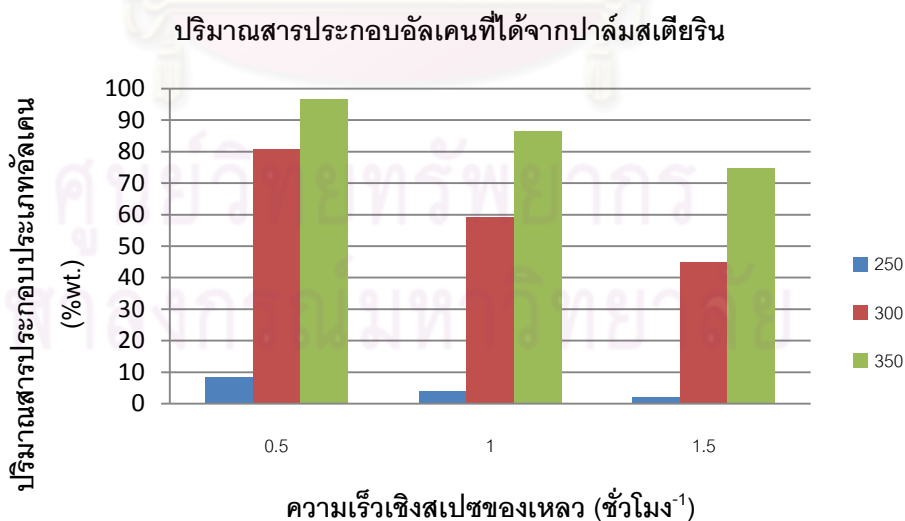
ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส พบว่าค่าของกรดของผลิตภัณฑ์มีค่ามาก ซึ่งค่าของกรดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่ามากกว่าค่าของกรดของปาล์มสเตียรินตอนเริ่มต้น เพราะว่าที่อุณหภูมิต่ำสารตั้งต้นเกิดปฏิกิริยาไม่ดี จากการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่เกิดขึ้นเล็กน้อย จากการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ปรากฏว่าพบน้ำแต่ไม่พบก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ทำให้ทราบได้ว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันจะไม่เกิดขึ้น จะมีปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้น เนื่องจากพบสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าของกรดมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามจะพบว่าปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน และปริมาณน้ำจะมีค่ามากขึ้น เพราะว่าที่อุณหภูมิสูงปาล์มสเตียรินทำปฏิกิริยาได้ดี พบปริมาณน้ำ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม ทำให้ทราบว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้น และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะเกิดขึ้นด้วย จึงเป็นผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีปริมาณมากขึ้น



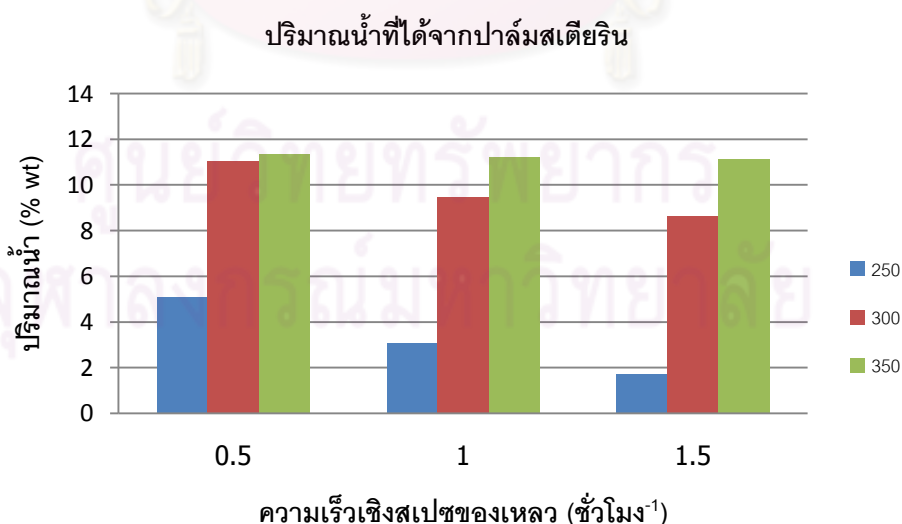
รูปที่ 4.13 ผลของอุณหภูมิต่อค่าของกรดที่ได้จากปาล์มสเตียริน

ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าของกรดจะลดลง เพราะว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยา ปาล์มสเตียรินทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันเพื่อเกิดเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนได้ ที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส จะพบว่าค่าของกรดมีปริมาณมาก เพราะว่าปาล์มสเตียรินไม่สามารถทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนได้ที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 4.14 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่ได้จากปาล์มสเตียริน

ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดได้มากขึ้น ซึ่งจะพบว่าที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้นร้อยละ 1.0 และมีสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้นร้อยละ 7.5 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอมเกิดขึ้นร้อยละ 5.8 และมีสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอมเกิดขึ้นร้อยละ 75.0 สำหรับที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 15 และ 17 อะตอมเกิดขึ้นร้อยละ 11.7 และมีสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 และ 18 อะตอม เกิดขึ้นร้อยละ 84.9 ซึ่งจะเห็นว่าปฏิกิริยาหลักในการไฮโดรทรिटติงของปาล์มสเตียรินในทุกๆช่วงอุณหภูมินั้นเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน



รูปที่ 4.15 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณน้ำที่ได้จากปาล์มสเตียริน

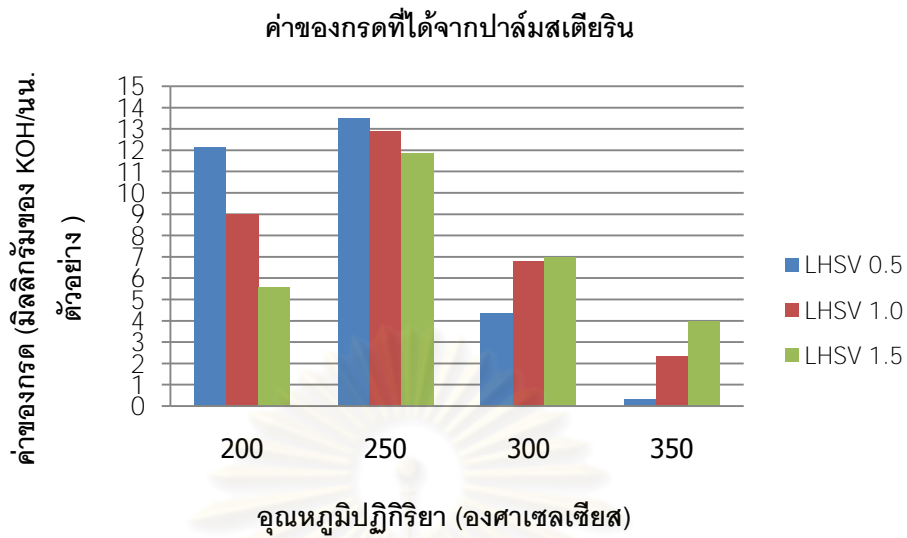
ผลการทดลองที่ใช้ น้ำมันปาล์มสเตียรีนเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณน้ำจะเพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำมีค่ามากที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง^{-1} ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส โดยมีปริมาณน้ำเท่ากับ 11.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการไฮโดรทรีตติ้งที่ใช้ปาล์มสเตียรีนเป็นสารตั้งต้น เมื่ออุณหภูมิต่ำ สารตั้งต้นจะทำการแตกตัวเกิดเป็นกรดไขมัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรตีออกซิเจนขึ้น ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และคาดว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เกิดขึ้นด้วย

4.6.3 ผลกระทบความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยา

จากผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง^{-1} พบว่าค่าของกรดผลิตภัณฑ์มีค่าน้อยในช่วงอุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เพราะว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่ำ สารตั้งต้นจะมีเวลาในการทำปฏิกิริยาได้นาน ปฏิกิริยาจึงเกิดได้ดี ทำให้ได้สารประกอบประเภท อัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน และปริมาณน้ำมีค่ามาก

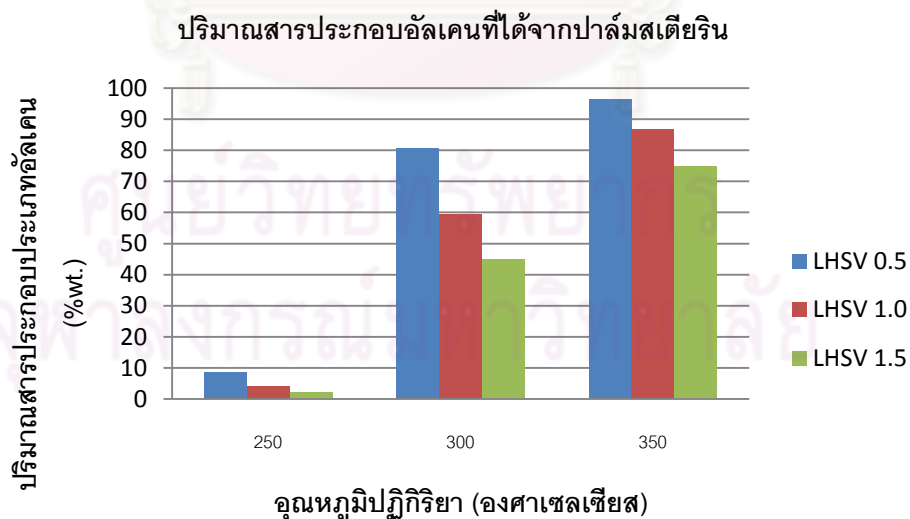
ผลการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 และ 1.5 ชั่วโมง^{-1} พบว่ามีค่าของกรดมีค่ามากขึ้น ในทางตรงกันข้ามจะพบว่า สารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 15 ถึง 18 อะตอม เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยลง เพราะว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นลดลง ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน และปริมาณของน้ำที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อยลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



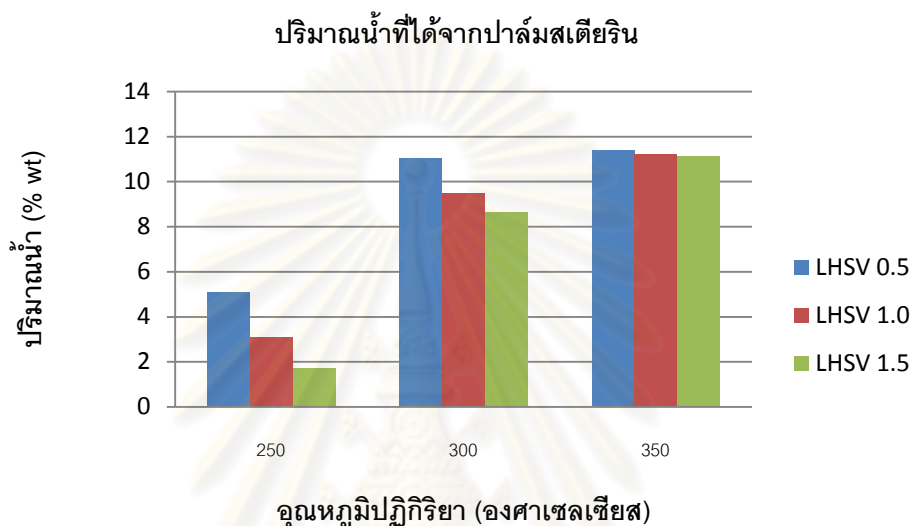
รูปที่ 4.16 ผลของความเร็วจึงต่อค่าของกรดที่ได้จากปาล์มสเตียริน

ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ค่าของกรดมีค่ามากขึ้นด้วย เพราะว่าเมื่อเพิ่มความเร็วเชิงสเปซของของเหลวสูงขึ้น ระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ลดลง ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจึงลดลง ออกซิเจนอะตอมในปาล์มสเตียรินถูกกำจัดออกน้อย ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีค่าของกรดสูงขึ้น



รูปที่ 4.17 ผลของความเร็วจึงของของเหลวต่อปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่ได้จากปาล์มสเตียริน

ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าลดลง เพราะว่าปาล์มสเตียรินมีเวลาในการทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์น้อยลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่จึงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.18 ผลของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อปริมาณน้ำที่ได้จากปาล์มสเตียริน

ผลการทดลองที่ใช้ปาล์มสเตียรินเป็นสารตั้งต้นดังรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำมีค่าลดลง โดยปริมาณน้ำจะสอดคล้องกับปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนคือ เมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำและปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคนจะมีค่าลดลง

ผลกระทบของความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่อการเกิดปฏิกิริยาในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเร็วเชิงสเปซต่ำสารจะวิ่งอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นเวลานานกว่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่สูง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เกิดสารประกอบประเภทอัลเคนมากขึ้น ปริมาณน้ำมากขึ้น และค่าของกรดน้อยลง

สำหรับสารตั้งต้นทั้งสามชนิดคือ น้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม พบว่าการไฮโดรทรีตติงจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹ ซึ่งจะให้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีค่าใกล้เคียงกัน และความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสารตั้งต้นทั้งสามชนิดคือ การกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคน เมื่อนำกรดไขมันปาล์มและปาล์มสเตียรีน มาทำการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วยสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 อะตอม มากกว่าสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 18 อะตอม แต่ในทางตรงกันข้ามพบว่าเมื่อนำน้ำมันปาล์มโอเลอินมาทำการทดลองผลิตภัณฑ์ที่ได้จะประกอบไปด้วยสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 18 อะตอม มากกว่าสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 16 อะตอม เพราะว่าปฏิกิริยาหลักในการไฮโดรทรีตติงคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่มีการกำจัดออกซิเจนอะตอมออกจากสารตั้งต้น ดังนั้นจำนวนคาร์บอนอะตอมที่ได้จากผลิตภัณฑ์จึงมีค่าใกล้เคียงกับจำนวนคาร์บอนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในสารตั้งต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการไฮโดรทรีตของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์มพบว่าผลกระทบของอุณหภูมิและความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีผลต่อผลิตภัณฑ์ดังต่อไปนี้

1. การทดลองโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน และก๊าซไฮโดรเจนพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าของกรดสูงขึ้น แต่ไม่พบปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนและน้ำ

2. การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนเพิ่มมากขึ้น ค่าปริมาณกรดลดลง และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเกิดขึ้น และคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันด้วย

3. การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเมื่อความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่ำลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนเพิ่มมากขึ้น ปริมาณน้ำมากขึ้น และค่าของกรดลดลง

4. การทดลองโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์ม ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง^{-1} เป็นสภาวะการทดลองที่ดีที่สุด ซึ่งจะให้ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนมีค่าใกล้เคียงกัน

รายการอ้างอิง

- [1] Demirbas, A. Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and noncatalytic supercritical methanol transesterification methods. Progress in Energy and Combustion Science 31,(2005): 466-487.
- [2] Bozbas, K. Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12,(2008): 542-552.
- [3] Kubicka, D., and Kaluza, L. Deoxygenation of vegetable oils over sulfided Ni, Mo and NiMo catalysts. Applied Catalysis A: General 372,(2010): 199-208.
- [4] Medde, M. Experimental analysis and modelling of gasoil hydrotreatment process, Degli studi di cagliari.
- [5] Senol, O.i. Hydrodeoxygenation of aliphatic and aromatic oxygenates on sulphided catalysts for production of second generation biofuels, in Chemical Technology. 2007, Helsinki: Finland.
- [6] Kundu, A. et al., Hydrotreating Catalysts and Processes: Current Status and Path Forward. Encyclopedia of Chemical Processing (2005): 1357 - 1365.
- [7] Gandarias, I., et al. From biomass to fuels: Hydrotreating of oxygenated compounds. International Journal of Hydrogen Energy 33,(2008): 3485-3488.
- [8] Simcek, P., et al. Hydroprocessed rapeseed oil as a source of hydrocarbon based biodiesel. Fuel 88,(2009): 456-460.
- [9] Sebos, I., et al. Catalytic hydroprocessing of cottonseed oil in petroleum diesel mixtures for production of renewable diesel. Fuel 88,(2009): 145-149.
- [10] Hardi , S. Production of a diesel fuel cetane enhancer from canola oil using supported metallic carbide and nitride catalysts. (2008), Saskatchewan.
- [11] Huber, G.W. O'Connor, P. and Corma, A. Processing biomass in conventional oil refineries: Production of high quality diesel by hydrotreating vegetable oils in heavy vacuum oil mixtures. Applied Catalysis A: General 329,(2007): 120-129.
- [12] Lappas, A.A., Bezergianni, S. and Vasalos, I. A. Production of biofuels via co processing in conventional refining processes. Catalysis Today 145,(2009): 55-62.

- [13] Senol, O.I., Viljava, T.R. and Krause, A.O.I. Hydrodeoxygenation of methyl esters on sulphided NiMo/Al₂O₃ and CoMo/Al₂O₃ catalysts. Catalysis Today 100,(2005): 331-335.
- [14] Laurent, E. and Delmon, B. Study of the hydrodeoxygenation of carbonyl, caboxylic and guaiacyl groups over sulfided CoMo/Al₂O₃ and NiMo/Al₂O₃ catalysts. Applied Catalysis A: General 109,(1994): 77-96.
- [15] Logan, T.J., Underwood, D.C. and Rheinecker, T.C. Hydrolysis of triglycerides, in United States Patent. 1980.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการโดยไม้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไนโตรเจน

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่				Max err.	Min err.
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
อัตราการผลิตของเหลว (มล/ชม)	0.2532	0.2534	0.2526	0.2531	0.1317	0.1844
อัตราการผลิตของก๊าซ (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 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่				Max err.	Min err.
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
อัตราการผลิตของเหลว (มล/ชม)	0.2525	0.2530	0.2517	0.2524	0.2377	0.2773
อัตราการผลิตของก๊าซ (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 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่				Max err.	Min err.
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2527	0.2541	0.2535	0.2534	0.2631	0.2894
อัตราการใช้ของก๊าซ (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 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่				Max err.	Min err.
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2533	0.2518	0.2537	0.2529	0.3031	0.4481
อัตราการใช้ของก๊าซ (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

ผลการโดยไม่ให้ตัวเร่งปฏิกิริยาภายใต้ความดันก๊าซไฮโดรเจน

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่				Max err.	Min err.
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
อัตราการผลิตของเหลว (มล/ชม)	0.2523	0.2532	0.2519	0.2525	0.2905	0.2245
อัตราการผลิตของก๊าซ (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 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่				Max err.	Min err.
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
อัตราการผลิตของเหลว (มล/ชม)	0.2512	0.2538	0.2542	0.2531	0.4478	0.7376
อัตราการผลิตของก๊าซ (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 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่				Max err.	Min err.
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2523	0.2534	0.2527	0.2528	0.2373	0.1978
อัตราการใช้ของก๊าซ (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 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่				Max err.	Min err.
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย		
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2539	0.2528	0.2531	0.2533	0.2501	0.1843
อัตราการใช้ของก๊าซ (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

ผลการทดลองโดยใช้กรดไขมันปาล์มเป็นสารตั้งต้น

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการผลิตของเหลว (มล/ชม)	0.2536	0.2513	0.2524	0.2524	0.46	0.46
อัตราการผลิตของก๊าซ (มล/ชม)	104.75	104.40	106.03	105.06	0.93	0.63
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	80.06	79.32	79.69	79.69	0.46	0.46
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	77.80	77.70	77.90	77.80	0.13	0.00
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	77.80	77.70	77.90	77.80	0.13	0.00
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)	185.37	181.84	182.17	183.13	1.22	0.70
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	67.81	66.25	69.10	67.72	2.04	2.17
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.86	0.86	0.87	0.86	0.14	0.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.4986	0.5016	0.5005	0.5002	0.28	0.32
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	208.99	210.20	210.62	209.94	0.33	0.45
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	157.43	158.38	158.00	157.94	0.28	0.32
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	154.00	152.90	153.80	153.57	0.28	0.43
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	154.00	152.90	153.80	153.57	0.28	0.43
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)	190.52	189.60	184.86	188.33	1.16	1.84
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	77.50	78.25	77.63	77.79	0.79	0.38
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.87	0.87	0.87	0.87	0.06	0.09

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7530	0.7523	0.7537	0.7530	0.09	0.09
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	318.50	323.09	316.31	319.30	1.19	0.94
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	237.74	237.52	237.96	237.74	0.09	0.09
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	232.00	231.00	231.00	231.33	0.29	0.14
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	232.00	231.00	231.00	231.33	0.29	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)	191.56	198.80	187.71	192.69	3.17	2.58
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	79.99	81.29	77.56	79.61	2.10	2.58
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.87	0.87	0.87	0.87	0.01	0.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2542	0.2524	0.2517	0.2528	0.55	0.41
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	113.06	113.17	106.56	110.93	2.02	3.94
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	80.25	79.69	79.48	79.80	0.55	0.41
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	76.10	79.10	78.80	78.00	1.41	2.44
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	72.13	75.08	74.40	73.87	1.64	2.36
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	3.97	4.02	4.40	4.13	6.53	3.78
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	5.22	5.08	5.58	5.29	5.45	4.11
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	5.0	4.4	4.4	4.6	8.8	4.8
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	0.3	0.2	0.2	0.3	17.6	9.5
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	2.1	1.9	1.9	2.0	7.4	3.8
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	0.3	0.3	0.3	0.3	17.5	10.1
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	2.3	2.0	2.0	2.1	7.8	4.6
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	13.14	13.69	13.07	13.30	2.93	1.72
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	4.95	5.09	4.88	4.97	2.38	1.87
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.84	0.84	0.84	0.84	0.01	0.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.4993	0.5005	0.4981	0.4993	0.24	0.23
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	222.62	227.06	226.59	225.42	0.73	1.24
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	157.62	158.02	157.26	157.63	0.24	0.24
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.10	156.80	152.10	153.00	2.48	1.90
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	144.55	151.41	146.72	147.56	2.61	2.04
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	5.55	5.39	5.38	5.44	2.05	1.06
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	3.70	3.44	3.54	3.56	4.02	3.39
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	1.8	1.5	1.6	1.6	8.0	4.6
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.8
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	0.8	0.7	0.7	0.7	7.2	5.5
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	0.1	0.1	0.1	0.1	16.5	16.3
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	0.7	0.6	0.6	0.7	9.3	5.3
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	70.37	67.24	71.43	69.68	2.51	3.50
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	26.24	27.11	26.02	26.46	2.47	1.65
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.85	0.85	0.85	0.85	0.00	0.09

ตารางที่ ค-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7537	0.7530	0.7516	0.7528	0.12	0.15
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	344.90	346.35	349.41	346.89	0.73	0.57
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	237.96	237.74	237.30	237.66	0.12	0.15
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	235.00	236.00	235.00	235.33	0.28	0.14
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	230.68	231.55	230.66	230.97	0.25	0.13
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.32	4.45	4.34	4.37	1.89	1.17
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	1.84	1.89	1.85	1.86	1.60	1.03
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	0.8	0.9	0.9	0.9	1.9	2.8
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	0.1	0.1	0.1	0.1	6.0	1.6
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	0.4	0.4	0.4	0.4	3.8	4.9
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	0.1	0.1	0.0	0.1	3.4	0.2
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	0.3	0.3	0.3	0.3	2.0	3.2
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	125.97	119.87	123.76	123.20	2.25	2.70
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	44.44	45.72	43.80	44.65	2.38	1.91
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.85	0.85	0.86	0.85	0.00	0.15

ตารางที่ ค-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2530	0.2518	0.2517	0.2522	0.32	0.18
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	125.51	126.87	127.18	126.52	0.53	0.80
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	79.88	79.51	79.48	79.62	0.32	0.18
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	75.90	76.40	76.70	76.33	0.57	0.48
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	67.48	68.24	68.79	68.17	0.91	1.01
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.42	8.16	7.91	8.17	3.14	3.11
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	11.10	10.68	10.31	10.70	3.73	3.58
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	65.4	59.8	58.2	61.2	6.9	4.8
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	1.7	1.7	1.6	1.7	2.9	2.5
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	30.9	29.5	28.5	29.6	4.4	3.9
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	3.6	1.7	1.7	2.3	54.4	27.5
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	29.2	27.0	26.4	27.5	6.0	4.0
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	1.85	1.69	1.70	1.75	6.05	3.51
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.75	0.71	0.78	0.75	4.27	5.21
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.78	0.78	0.78	0.78	0.00	0.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.4999	0.5011	0.4999	0.5003	0.15	0.08
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	256.29	254.52	248.73	253.18	1.23	1.76
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	157.83	158.20	157.83	157.95	0.16	0.08
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	152.10	152.60	152.60	152.43	0.11	0.22
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	137.90	138.10	138.50	138.17	0.24	0.19
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	14.20	14.50	14.10	14.27	1.63	1.16
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	9.34	9.50	9.24	9.36	1.52	1.26
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	37.0	37.5	36.7	37.1	1.1	0.9
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.0	0.9
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	18.1	18.3	18.1	18.2	0.8	0.4
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.1
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	16.4	16.6	16.1	16.3	1.4	1.5
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	2.96	3.03	3.12	3.04	2.95	2.63
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.29	1.20	1.36	1.28	6.03	6.47
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.01	0.05

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7530	0.7523	0.7509	0.7521	0.12	0.16
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	368.19	364.66	369.93	367.59	0.64	0.80
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	237.74	237.52	237.07	237.44	0.12	0.16
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	231.00	230.00	228.00	229.67	0.58	0.73
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	211.99	210.93	207.53	210.15	0.88	1.25
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	19.01	19.07	20.47	19.52	4.88	2.60
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	8.23	8.29	8.98	8.50	5.65	3.16
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	20.9	20.7	19.6	20.4	2.6	4.2
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	1.0	1.0	0.9	1.0	1.6	3.1
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	10.2	10.1	9.5	9.9	2.6	4.0
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	0.9	0.9	0.9	0.9	2.3	4.2
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	8.8	8.8	8.2	8.6	2.7	4.6
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	5.06	4.86	5.16	5.03	2.62	3.30
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.30	2.37	2.26	2.31	2.66	2.17
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.81	0.81	0.81	0.81	0.04	0.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2524	0.2511	0.2513	0.2516	0.13	0.19
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	138.36	139.22	139.93	139.17	0.55	0.58
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	79.69	79.27	79.32	79.43	0.33	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	76.50	75.60	76.60	76.23	0.48	0.83
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	67.74	66.93	67.88	67.52	0.54	0.86
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.76	8.67	8.72	8.72	0.52	0.57
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	11.45	11.46	11.38	11.43	0.26	0.43
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	91.9	91.4	93.2	92.1	1.1	0.8
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	4.6	4.5	4.5	4.5	1.3	0.9
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	43.6	43.2	44.1	43.6	0.1	1.2
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	4.0	4.6	4.5	4.4	4.5	7.9
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	39.7	39.1	40.0	39.6	1.0	1.2
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.99
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.94	0.47
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.76	0.76	0.76	0.76	0.06	0.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.5011	0.4999	0.5017	0.5009	0.16	0.19
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	264.21	272.53	272.42	269.72	1.04	2.04
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	158.20	157.83	158.40	158.14	0.16	0.04
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	154.70	154.70	154.50	154.63	0.04	0.09
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	137.33	137.00	137.24	137.19	0.10	0.14
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.37	17.70	17.26	17.44	1.47	1.05
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	11.23	11.44	11.17	11.28	1.43	0.97
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	87.7	90.5	88.5	88.9	1.8	1.3
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	4.3	4.4	4.2	4.3	2.0	2.8
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	41.8	43.1	42.4	42.4	1.5	1.5
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	4.3	4.4	4.1	4.3	2.8	3.1
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	37.3	38.6	37.8	37.9	1.9	1.6
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.14	0.15	0.15	0.15	1.64	1.30
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.14	0.18	0.11	0.14	25.44	25.80
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.76	0.76	0.76	0.76	0.00	0.10

ตารางที่ ค-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7524	0.7516	0.7538	0.7526	0.16	0.13
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	399.51	399.18	399.18	399.29	0.05	0.03
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	237.54	237.30	237.98	237.60	0.16	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	226.00	225.00	224.00	225.00	0.44	0.44
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	200.56	199.86	198.65	199.69	0.43	0.52
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	25.44	25.14	25.35	25.31	0.52	0.68
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	11.26	11.17	11.32	11.25	0.61	0.68
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	86.3	87.8	86.2	86.8	1.2	0.7
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	4.2	4.2	4.0	4.1	2.1	3.0
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	41.4	42.3	41.5	41.7	1.2	0.7
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	4.1	4.2	4.0	4.1	2.2	2.7
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	36.6	37.2	36.7	36.8	1.0	0.6
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.74	0.88	0.83	0.82	8.00	10.00
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.29	0.32	0.25	0.29	12.96	13.38
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.77	0.77	0.77	0.77	0.01	0.10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองโดยใช้น้ำมันปาล์มโอเลอินเป็นสารตั้งต้น

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2524	0.2547	0.2541	0.2537	0.37	0.51
อัตราการใช้ของก๊าซ (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
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.57	5.64	5.53	5.58	1.15	0.91
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.88	0.88	0.88	0.88	0.02	0.16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.4975	0.4994	0.5005	0.4991	0.29	0.33
อัตราการใช้ของก๊าซ (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
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	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 ง-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7488	0.7488	0.7502	0.7493	0.12	0.06
อัตราการใช้ของก๊าซ (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
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.99	3.03	2.92	2.98	1.62	1.97
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.89	0.89	0.89	0.89	0.01	0.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2536	0.2553	0.2530	0.2540	0.54	0.38
อัตราการใช้ของก๊าซ (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)	37.5	37.9	34.2	36.5	3.7	6.4
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	1.4	1.4	1.3	1.4	5.2	6.0
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	13.5	13.7	12.4	13.2	3.5	5.8
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	2.4	2.3	2.1	2.3	5.1	6.8
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	20.2	20.6	18.4	19.7	4.3	6.8
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	4.84	4.71	4.67	4.74	2.15	1.52
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.33	2.45	2.29	2.36	4.03	2.85
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.01	0.18

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.5012	0.5000	0.4986	0.4999	0.25	0.27
อัตราการใช้ของก๊าซ (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)	14.6	14.5	14.3	14.5	0.9	1.0
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	0.7	0.6	0.6	0.7	2.8	1.2
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	5.0	5.0	5.0	5.0	0.5	0.7
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	1.2	1.1	1.1	1.1	2.8	0.3
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	7.7	7.7	7.6	7.7	0.6	0.9
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	8.45	8.75	8.54	8.58	2.03	1.53
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	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 ง-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7546	0.7514	0.7523	0.7528	0.23	0.18
อัตราการใช้ของก๊าซ (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)	8.2	8.1	8.6	8.3	3.2	2.1
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	0.4	0.4	0.4	0.4	1.1	2.1
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	2.8	2.8	2.9	2.8	1.8	1.2
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	0.7	0.7	0.8	0.7	3.2	1.9
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	4.3	4.2	4.5	4.3	4.4	2.6
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	8.93	8.98	8.80	8.90	0.83	1.16
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	4.28	4.38	4.24	4.30	1.76	1.33
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.85	0.85	0.85	0.85	0.07	0.07

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2553	0.2501	0.2505	0.2519	1.31	0.73
อัตราการใช้ของก๊าซ (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)	85.7	85.0	81.3	84.0	2.0	3.3
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	3.6	3.5	3.3	3.4	4.3	4.9
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	28.7	28.1	27.7	28.1	1.8	1.5
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	6.2	5.9	5.6	5.9	4.9	4.8
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	47.1	46.4	46.0	46.5	1.3	1.1
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.01	0.99
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	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

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.5000	0.5006	0.4993	0.5000	0.12	0.13
อัตราการใช้ของก๊าซ (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)	76.4	69.5	66.2	70.7	8.1	6.3
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	2.9	2.6	2.5	2.7	8.0	6.1
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	28.4	25.4	23.9	25.9	9.5	7.5
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	2.7	4.4	4.2	3.8	15.7	27.4
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	42.4	37.1	35.6	38.4	10.6	7.3
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	2.13	2.07	2.22	2.14	3.78	3.41
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.82	1.71	1.84	1.79	2.91	4.34
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.78	0.78	0.78	0.78	0.05	0.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7553	0.7546	0.7514	0.7538	0.20	0.30
อัตราการใช้ของก๊าซ (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)	65.8	62.6	58.0	62.1	6.0	6.7
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	2.5	2.4	2.2	2.3	6.2	7.2
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	23.7	22.7	21.2	22.6	5.2	6.0
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	4.3	4.0	3.7	4.0	7.0	8.1
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	35.3	33.4	30.9	33.2	6.3	7.0
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	5.30	5.39	5.42	5.37	1.00	1.34
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.66	2.58	2.73	2.65	2.73	2.86
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.78	0.78	0.79	0.78	0.07	0.02

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 35 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2536	0.2507	0.2513	0.2518	0.69	0.46
อัตราการใช้ของก๊าซ (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	12.06	11.63	11.66	3.43	3.13
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	95.7	95.2	91.3	94.1	1.7	2.9
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	6.1	6.2	5.6	6.0	2.1	6.6
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	32.3	32.2	31.4	32.0	1.0	1.6
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	9.8	9.8	8.8	9.5	3.4	6.8
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	47.5	46.9	45.5	46.7	1.9	2.5
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.33	0.33
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	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 ง-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.5005	0.5006	0.5012	0.5008	0.08	0.05
อัตราการใช้ของก๊าซ (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)	93.1	90.7	91.5	91.8	1.4	1.1
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	5.2	4.9	5.0	5.1	3.2	2.7
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	32.3	31.9	31.7	32.0	1.1	0.8
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	8.4	7.8	8.7	8.3	4.6	5.6
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	47.1	46.1	46.1	46.4	1.5	0.8
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.76	0.72	0.76	0.74	1.67	3.35
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	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

ตารางที่ ง-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7481	0.7499	0.7500	0.7493	0.09	0.16
อัตราการใช้ของก๊าซ (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)	75.6	74.1	81.0	76.9	5.3	3.6
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	3.9	3.7	4.1	3.9	4.6	4.4
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	27.3	27.8	29.9	28.3	5.6	3.7
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	6.1	5.5	6.2	5.9	4.1	6.9
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	38.3	37.1	40.8	38.7	5.3	4.3
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	3.32	3.55	3.46	3.44	3.22	3.57
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	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 จ

ผลการทดลองโดยใช้ปาล์มสเดียรินเป็นสารตั้งต้น

ตารางที่ จ-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2518	0.2513	0.2524	0.2518	0.23	0.23
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	102.34	101.17	101.85	101.79	0.55	0.61
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	80.78	80.59	80.97	80.78	0.23	0.23
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	77.90	79.00	79.70	78.87	1.06	1.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	77.90	79.00	79.70	78.87	1.06	1.23
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)	12.28	12.20	11.98	12.15	1.03	1.41
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.72	5.87	5.68	5.76	1.90	1.34
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.88	0.89	0.89	0.89	0.12	0.02

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.5005	0.5000	0.4999	0.5001	0.07	0.04
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	207.66	210.04	210.68	209.46	0.58	0.86
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.53	160.38	160.35	160.42	0.07	0.04
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	155.00	157.10	156.30	156.13	0.62	0.73
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	155.00	157.10	156.30	156.13	0.62	0.73
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)	9.04	8.95	8.95	8.98	0.70	0.37
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	4.18	4.26	4.17	4.21	1.42	0.85
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.89	0.88	0.89	0.89	0.00	0.10

ตารางที่ จ-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7509	0.7516	0.7516	0.7514	0.03	0.06
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	321.60	313.92	308.38	314.63	2.21	1.99
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	240.86	241.08	241.08	241.01	0.03	0.06
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	233.00	232.00	232.00	232.33	0.29	0.14
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	233.00	232.00	232.00	232.33	0.29	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)	5.68	5.55	5.47	5.57	2.02	1.76
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.64	2.72	2.65	2.67	1.79	1.03
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.89	0.89	0.89	0.89	0.04	0.12

ตารางที่ จ-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2530	0.2518	0.2536	0.2528	0.31	0.38
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	109.71	114.52	102.59	108.94	5.12	5.83
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	81.15	80.78	81.34	81.09	0.31	0.38
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	76.20	77.70	76.70	76.87	1.08	0.87
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	72.50	73.62	72.79	72.97	0.89	0.64
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	3.70	4.08	3.91	3.90	4.73	5.05
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	4.86	5.25	5.10	5.07	3.61	4.22
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	8.9	8.5	8.3	8.6	3.6	3.4
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	0.6	0.6	0.6	0.6	3.5	3.5
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	4.9	4.7	4.6	4.7	3.4	3.3
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	0.4	0.4	0.4	0.4	4.2	3.9
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	2.9	2.8	2.7	2.8	3.8	3.4
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	13.68	13.35	13.41	13.48	1.49	1.00
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	6.06	5.92	6.11	6.03	1.36	1.78
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.83	0.83	0.83	0.83	0.02	0.09

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.4998	0.5000	0.4992	0.4997	0.07	0.09
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	223.61	224.38	225.70	224.56	0.51	0.43
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.32	160.38	160.12	160.27	0.07	0.09
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	154.60	151.70	154.40	153.57	0.67	1.22
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	149.71	147.34	149.41	148.82	0.60	0.99
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.89	4.36	4.99	4.74	5.09	8.19
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	3.16	2.87	3.23	3.09	2.41	4.52
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	4.2	3.9	3.9	4.0	5.7	3.1
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	0.4	0.3	0.4	0.4	5.3	2.0
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	2.2	2.0	2.0	2.1	5.6	3.1
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	0.3	0.2	0.2	0.2	6.9	5.0
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	1.4	1.3	1.3	1.3	5.7	3.0
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	12.82	12.85	12.95	12.87	0.59	0.40
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.74	5.71	5.72	5.73	0.23	0.20
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.85	0.85	0.85	0.85	0.00	0.08

ตารางที่ ๑-6 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7530	0.7522	0.7523	0.7525	0.07	0.04
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	349.83	357.50	356.51	354.61	0.82	1.35
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	241.53	241.28	241.31	241.37	0.07	0.04
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	234.00	234.00	234.00	234.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	229.95	230.15	230.01	230.03	0.05	0.04
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	4.05	3.85	3.99	3.97	2.14	2.80
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	1.73	1.65	1.71	1.69	2.14	0.66
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	2.1	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	0.2	0.2	0.2	0.2	2.5	1.0
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	1.1	1.0	1.0	1.0	1.3	0.9
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	0.1	0.1	0.1	0.1	3.7	0.7
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	0.7
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	11.86	11.79	11.86	11.84	0.19	0.37
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.61	5.68	5.62	5.64	0.77	0.46
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.86	0.86	0.86	0.86	0.03	0.07

ตารางที่ จ-7 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2524	0.2530	0.2513	0.2522	0.31	0.39
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	122.45	124.22	123.88	123.52	0.30	0.57
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	80.97	81.15	80.59	80.90	0.31	0.39
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	76.40	77.80	78.70	77.63	1.37	1.59
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	67.75	69.35	70.13	69.08	1.53	0.40
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.65	8.45	8.57	8.56	1.14	1.27
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	11.33	10.86	10.88	11.02	2.77	1.48
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	78.7	83.9	79.8	80.8	2.6	1.3
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	3.9	3.5	3.2	3.5	9.2	8.9
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	54.9	45.3	44.8	48.3	13.5	7.3
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	2.5	2.2	2.0	2.3	10.1	9.4
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	30.5	24.8	24.7	26.6	14.4	7.4
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	4.36	4.22	4.40	4.33	1.73	2.46
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.19	2.30	2.19	2.22	3.32	1.66
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.77	0.77	0.77	0.77	0.00	0.08

ตารางที่ จ-8 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.5012	0.5005	0.4999	0.5005	0.13	0.13
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	255.71	255.18	253.15	254.68	0.40	0.60
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.76	160.54	160.35	160.55	0.13	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	154.40	154.00	154.50	154.30	0.13	0.19
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	139.44	139.67	139.92	139.68	0.17	0.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	14.96	14.33	14.58	14.62	2.31	2.01
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	9.69	9.30	9.43	9.47	2.24	1.82
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	60.1	59.0	59.1	59.4	1.2	0.7
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	2.8	2.7	2.7	2.7	1.7	1.2
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	35.8	35.4	35.6	35.6	0.6	0.6
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	1.7	1.7	1.7	1.7	2.4	1.2
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	19.8	19.2	19.2	19.4	2.0	1.2
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	6.87	6.65	6.80	6.77	1.41	1.81
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.95	3.08	3.05	3.02	1.91	2.63
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.79	0.79	0.79	0.79	0.02	0.13

ตารางที่ จ-9 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง⁻¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7516	0.7530	0.7514	0.7520	0.13	0.08
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	354.91	351.32	368.11	358.11	2.79	1.90
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	241.08	241.53	241.03	241.22	0.13	0.08
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	235.00	235.00	235.00	235.00	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	215.02	214.94	214.15	214.71	0.15	0.26
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	19.98	20.06	20.85	20.29	2.73	1.55
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	8.50	8.53	8.87	8.64	2.73	1.55
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	43.5	44.2	47.5	45.1	1.9	3.4
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	1.9	2.7	2.5	2.4	13.9	19.5
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	21.7	29.7	29.0	26.8	10.9	19.1
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	1.2	1.7	1.5	1.5	15.5	19.8
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	11.7	16.0	15.3	14.4	11.5	18.4
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	6.97	6.86	7.04	6.96	1.20	1.41
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	3.39	3.44	3.43	3.42	0.60	0.82
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.80	0.80	0.79	0.80	0.01	0.16

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-10 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ชั่วโมง¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.2524	0.2530	0.2524	0.2526	0.15	0.08
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	138.35	140.70	144.53	141.20	0.35	2.01
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	80.97	81.15	80.97	81.03	0.15	0.08
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	76.40	77.20	77.20	76.93	0.35	0.69
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	67.69	68.45	68.43	68.19	0.38	0.73
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	8.71	8.75	8.77	8.75	0.32	0.42
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	11.40	11.34	11.36	11.37	0.27	0.25
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	96.5	96.0	97.3	96.6	0.7	0.6
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	7.5	7.3	7.2	7.3	1.9	1.5
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	55.4	55.2	56.4	55.7	1.3	0.8
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	4.4	4.3	4.3	4.3	1.8	1.7
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	29.2	29.1	29.4	29.2	0.7	0.3
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.35	0.30	0.35	0.34	4.32	9.69
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.31	0.32	0.31	0.32	0.93	0.47
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.76	0.76	0.76	0.76	0.10	0.04

ตารางที่ จ-11 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.4999	0.4999	0.5018	0.5005	0.25	0.13
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	268.36	266.10	270.26	268.24	0.75	0.80
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	160.35	160.35	160.96	160.55	0.25	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	154.00	154.20	153.00	153.73	0.30	0.48
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	136.98	137.07	135.48	136.51	0.41	0.75
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.02	17.13	17.52	17.22	1.71	1.17
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	11.05	11.11	11.45	11.20	2.20	1.34
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	82.1	89.2	88.6	86.6	1.4	1.1
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	6.4	5.9	6.0	6.1	5.1	2.9
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	48.8	52.6	52.4	51.3	2.6	4.8
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	3.8	3.5	3.5	3.6	5.8	2.8
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	23.0	27.1	26.6	25.6	6.0	10.2
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	2.32	2.40	2.28	2.33	2.85	2.40
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.53	0.54	0.53	0.53	0.95	0.47
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิเมตร)	0.77	0.77	0.77	0.77	0.02	0.13

ตารางที่ จ-12 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.5 ชั่วโมง¹

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.7509	0.7514	0.7514	0.7513	0.02	0.05
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/ชม)	389.83	394.44	394.44	392.90	0.39	0.78
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	240.86	241.03	241.03	240.98	0.02	0.05
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	229.00	234.00	231.00	231.33	1.15	1.01
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	203.57	208.17	205.12	205.62	1.24	1.00
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	25.43	25.83	25.88	25.71	0.63	1.09
ปริมาณน้ำ (โดยน้ำหนัก)	11.11	11.04	11.20	11.12	0.77	0.69
ปริมาณอัลเคนรวม (โดยน้ำหนัก)	81.2	74.7	68.4	74.8	8.6	8.5
ปริมาณอัลเคน C15 (โดยน้ำหนัก)	6.9	6.4	4.6	5.9	15.7	22.9
ปริมาณอัลเคน C16 (โดยน้ำหนัก)	49.0	45.2	41.2	45.1	8.6	8.7
ปริมาณอัลเคน C17 (โดยน้ำหนัก)	2.9	2.7	2.6	2.7	5.7	3.7
ปริมาณอัลเคน C18 (โดยน้ำหนัก)	22.4	20.5	20.0	21.0	6.9	4.6
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	4.04	3.94	3.89	3.96	2.13	1.70
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.73	1.70	1.74	1.72	1.15	1.53
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.77	0.77	0.77	0.77	0.01	0.08

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาณุวิชญ์ เจริญวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดระยอง มีพี่น้องรวม 7 คน เป็นบุตรคนเล็กของครอบครัว ในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ และในปี พ.ศ. 2551 ได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย