

ไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโพลีบีนซีน

นายณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

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

HYDRODEOXYGENATION OF PALM KERNEL OIL USING NICKEL MOLYBDENUM CATALYST

Mr.Narongwut Jaokaenkaew

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม
โดย	นายณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุนา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรพ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ)

ณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว : ไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม. (HYDRODEOXYGENATION OF PALM KERNEL OIL USING NICKEL MOLYBDENUM CATALYST) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.เจ็ดศักดิ์ไชยคุนา, 91 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ อุณหภูมิที่ใช้คือ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 450 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ต่อชั่วโมง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูง ทำให้ได้ปริมาณสารประกอบอัลเคนและน้ำมาก นอกจากนี้ยังพบว่าเกิดการสลายตัวของสารประกอบอัลเคนเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงเมื่อใช้อุณหภูมิในการทดลองสูงกว่า 340 องศาเซลเซียส ความดันในการทำปฏิกิริยาที่สูงจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้นด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2554.....

## 5170562321 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS : HYDRODEOXYGENATION/DECARBOXYLATION/ DECARBONYLATION

NARONGWUT JAOKAENKAEW: HYDRODEOXYGENATION OF PALM KERNEL OIL USING NICKEL MOLYBDENUM CATALYST. ADVISOR: JIRDSAK TSCHEIKUNA, Ph.D.,91 pp.

This research is the study of hydrodeoxygenation reaction of palm kernel oil. The experiments were conducted in a continuous flow fixed bed reactor using nickel molybdenum on alumina oxide supported catalyst. Temperatures used in the experiments were 300, 320, 340, 360 and 380°C. Pressures were 450, 750 and 1,050 psia and liquid hourly space velocity (LHSV) was 1 per hour. Experimental results showed that hydrodeoxygenation reaction proceeded quickly at high temperature resulting in large quantities of alkane components and water. It is also found that decomposition of alkane components occurred at the temperature higher than 340°C. The reactions produce quickly at high hydrogen pressure.

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

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

Academic Year :...2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือ ความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ซึ่งข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณทุกท่านมา ณ โอกาสนี้

ขอบพระคุณอาจารย์ ดร.เจดศักดิ์ ไชยคุณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่มอบโอกาสให้แก่ข้าพเจ้าได้มาศึกษาในสาขาวิชาที่ข้าพเจ้ารักและสนใจที่จะศึกษา รวมถึงคำแนะนำ คำสั่งสอนที่ช่วยชี้ทางให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนคอยแก้ไขปัญหาต่างๆมาโดยตลอดจนงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เหมือนเดือน พิศาลพงศ์ ประธานกรรมการผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรวัชและ ดร.ขจรศักดิ์ เฟื่องนวกิจ ที่กรุณามาร่วมเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้สละเวลาเพื่อการสอบวิทยานิพนธ์และได้ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้เป็นอย่างมาก

ขอบคุณเพื่อน ๆ ในกลุ่มงานวิจัยโพลิโอเคมีคอล สำหรับกำลังใจ ความช่วยเหลือหลายๆได้มาโดยตลอด

และสุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดามารดาที่ได้มอบโอกาสให้ข้าพเจ้าได้ศึกษาเล่าเรียน ทั้งทางด้านทุนการศึกษาและเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ปฏิภรียาในกระบวนการไฮโดรทรีตติง.....	4
ตัวเร่งปฏิภรียา.....	6
วัตถุดิบที่ใช้.....	6
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
3 การทดลองและการวิเคราะห์.....	18
3.1 การทดลอง.....	19
3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิภรียา.....	21
3.3 สภาวะในการทดลอง.....	21
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	22
3.3 การวิเคราะห์.....	22
3.4 การคำนวณในงานวิจัย.....	25
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	32
4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น.....	32

บทที่	หน้า
4.2 ปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์.....	37
4.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน.....	38
4.2.3 ผลกระทบของความดันต่อปฏิกริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน.....	46
4.3 ปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกริยาดีคาร์บอนิลเลชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์.....	56
4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกริยาดีคาร์บอนิลเลชัน.....	56
. 4.3.2 ผลกระทบของความดันต่อปฏิกริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกริยาดีคาร์บอนิลเลชัน.....	61
5 สรุปผลการวิจัย.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	80
ภาคผนวก ค.....	85
ภาคผนวก จ.....	90
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	91



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.2	สภาวะของคอลัมน์.....	23
3.3	ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมต่อร้อยละกรดไขมัน.....	24
4.1	องค์ประกอบของกรดไขมันและคุณสมบัติของสารตั้งต้น.....	33
4.2	ปริมาณกรดไขมันอิสระ.....	35
ก-1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	75
ก-2	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	76
ก-3	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	77
ก-4	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	78
ก-5	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	79
ข-1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	80
ข-2	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	81
ข-3	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	82
ข-4	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	83
ข-5	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว..	84
ค-1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	85
ค-4	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	86
ค-5	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	87
ค-6	ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	88

ตารางที่		หน้า
ค-7	ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	89
ง-1	ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	90

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์.....	6
1.2	แผนผังแสดงปฏิกิริยากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช.....	7
3.1	ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง.....	18
3.2	ระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง.....	19
4.1	ปริมาณสารประกอบอัลเคนที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส.....	40
4.2	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส.....	41
4.3	ปริมาณน้ำที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส.....	41
4.4	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส.....	43
4.5	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ณ ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	44
4.6	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ณ ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	45
4.7	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ณ ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	46
4.8	ปริมาณสารประกอบอัลเคนที่ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	48
4.9	ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ความดัน 450 ถึง 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	49
4.10	ปริมาณน้ำที่ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	49
4.11	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	50
4.12	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	51
4.13	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส.....	52
4.14	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส.....	53
4.15	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส.....	54
4.16	ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส.....	55

รูปที่	หน้า
4.17 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	58
4.18 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	59
4.19 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	60
4.20 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	61
4.21 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว.....	62
4.22 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	63
4.23 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส.....	64
4.24 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส.....	65
4.25 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส.....	66
4.26 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิลเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส.....	67
4.27 ปริมาณการเปลี่ยนของสารตั้งต้น.....	68

## บทที่ 1

### บทนำ

เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuels) คือ พลังงานหมุนเวียนที่เกิดจากวัตถุดิบทางธรรมชาติ หรือ สารชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นสารที่ได้จากพืชและสัตว์ โดยพืชจะเป็นผู้ผลิตชีวมวลจาก กระบวนการสังเคราะห์แสงโดยการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นสารอินทรีย์ เมื่อมนุษย์หรือ สัตว์กินพืชเป็นอาหารก็จะได้รับสารอินทรีย์ที่พืชสังเคราะห์เข้าไปด้วย ซึ่งสารอินทรีย์ที่เกิดจาก สิ่งมีชีวิตทั้งหมดนั้นเรียกว่า ชีวมวล (Biomass) และเมื่อนำสารชีวมวลเหล่านั้นมาผ่าน กระบวนการที่เหมาะสมจะสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพที่เป็นประโยชน์ได้

เชื้อเพลิงชีวภาพนั้นมีความแตกต่างจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม คือเชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพลังงาน หมุนเวียนที่สามารถย่อยสลายไปเองได้โดยที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเกิดขึ้น ใหม่ได้ ดังนั้นการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพจึงเป็นการช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย ในประเทศไทย สามารถผลิตพลังงานใช้เองภายในประเทศได้เพียงบางส่วน ซึ่งไม่เพียงพอต่อความต้องการของ ประชากรในประเทศที่ขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องควบคู่ไปกับการเติบโตทางเศรษฐกิจ ด้วยเหตุ นี้จึงมีการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนเพื่อนำมาใช้ควบคู่กับพลังงานจากระบบอื่นๆ ปัจจุบันเชื้อเพลิง ชีวภาพที่ดำเนินการผลิตเชิงพาณิชย์และจำหน่ายอยู่ในประเทศไทยนั้น ได้แก่ เอทานอล น้ำมัน แก๊สไฮโดรเจน น้ำมันพืช (บริสุทธิ์) และไบโอดีเซล ซึ่งเชื้อเพลิงชีวภาพที่กำลังเป็นที่สนใจในปัจจุบัน คือ น้ำมันไบโอดีเซล ซึ่งไบโอดีเซลคือ เชื้อเพลิงเหลวที่เกิดจากการนำน้ำมันพืชหรือไขมันจากสัตว์ มาผ่านกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันหรือปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีสารตั้งต้นเป็นสารชีวมวล (Biomass) เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันงา น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันระหูนุ่น น้ำมันดอกทานตะวัน ไขมันวัว ไขมันหมู เป็นต้น ทำ ปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก เป็นต้น ซึ่งน้ำมันไบโอดีเซลนี้เป็นพลังงาน ทางเลือกที่จะนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ สารอัลคิลเอสเทอร์ (Alkyl Ester) เช่น เมทิลเอสเทอร์ (Fatty acid methyl ester, FAMES) หรือเอทิลเอสเทอร์ (Fatty acid ethyl ester, FAEEs) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของแอลกอฮอล์ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น กระบวนการ ดังกล่าวช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำมันพืชและไขมันจากสัตว์ให้มีความหนืดลดลงหรือใกล้เคียง กับน้ำมันดีเซล เพิ่มค่าซีเทน (cetane number) และจุดวาบไฟ (flash point) เป็นต้น เพื่อให้มี คุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์

ดีเซล การเผาไหม้จากน้ำมันไบโอดีเซลเป็นการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ทำให้ไม่ก่อให้เกิดเขม่าควันในอากาศ ปลอดภัยจากสารกำมะถันจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ปัจจุบันจึงมีการสนับสนุนและส่งเสริมให้ประชาชนหันมาใช้ น้ำมันไบโอดีเซลกันอย่างมาก ในปัจจุบันนักวิจัยได้ค้นพบกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมันมาประยุกต์ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือสารประกอบอัลเคน มีประสิทธิภาพและคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมมากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่เกิดจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Bezergianni และคณะ (2010), Guzman และคณะ (2010)) โดยปฏิกิริยาหลักที่สำคัญคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน (hydrodeoxygenation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแทนที่ของไฮโดรเจนต่อพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม (C=C) เพื่อให้กรดไขมันที่อยู่ในไตรกลีเซอไรด์จากน้ำมันพืชที่เป็นสารตั้งต้นกลายเป็นสารอัลเคน ที่สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง (Huber และคณะ, 2007) ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งคือ นิกเกิลโมลิบดีนัม และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ จากงานวิจัยของ Senol และคณะ (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน (Hydrodeoxygenation) ของเมทิลเฮปตะโนเอต (Methyl heptanoate) และเมทิลเฮกซะโนเอต (Methyl hexanoate) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ (NiMo/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ (CoMo/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่อุณหภูมิ 120 ถึง 390 องศาเซลเซียส ความดัน 3 เมกกะปาสคาร์ ผลการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์

สำหรับงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ โดยน้ำมันเมล็ดในปาล์มนั้นเป็นสารไตรกลีเซอไรด์ที่มีชนิดของกรดไขมันที่สำคัญคือ กรดไมลิสติก (Myristic acid) กรดลอริก (Lauric acid) และกรดโอเลอิก (Oleic acid) ซึ่งเป็นน้ำมันที่มีกำลังการผลิตสูงในประเทศไทย หาได้ง่าย มีราคาไม่แพง และยังไม่พบงานวิจัยที่ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันจากน้ำมันเมล็ดในปาล์มมาก่อน

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม
2. หาค่าอุณหภูมิและความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถพัฒนาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ เพื่อทำให้เกิดสารประกอบอัลเคนเป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถพัฒนาเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

### ขอบเขตของการวิจัย

1. น้ำมันพืชที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง คือ น้ำมันเมล็ดในปาล์ม
2. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิในช่วง 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส
4. ศึกษาผลของความดันในช่วง 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

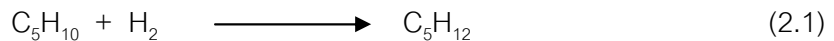
## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งซึ่งจะเป็นแนวทางเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

กระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง (Hydrotreating)

ไฮโดรทรีตติ้งเป็นกระบวนการที่ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น กำมะถัน ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบโลหะ ในผลิตภัณฑ์หรือสารตั้งต้น โดยการทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาสำคัญที่เกิดขึ้นมีดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation, HDA) เป็นปฏิกิริยารวมตัวจากการเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนจะเข้าไปรวมตัวกับสารตั้งต้นเกิดเป็นปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ซึ่งทำให้พันธะที่ไม่อิ่มตัวของสารตั้งต้นกลายเป็นพันธะที่อิ่มตัวโดยจะสลายพันธะเก่าออกก่อน ซึ่งไฮโดรเจนเป็นพันธะโควาเลนต์จะสลายตัวยากมาก ต้องอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูงปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องมีตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการนี้ ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.1



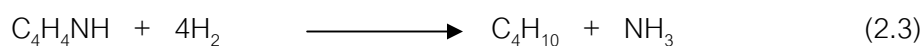
2. ปฏิกิริยาไฮโดรดีซัลฟิวไรเซชัน (Hydrodesulfurization, HDS) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้กำจัดอะตอมของซัลเฟอร์ที่มีอยู่ในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา ให้ได้เป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) เพื่อลดการปล่อยก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในรถยนต์ เครื่องบิน โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆที่มีการเผาไหม้ โรงไฟฟ้า หรือจากกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงอื่นๆ ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.2



3. ปฏิกิริยาไฮโดรดีไนโตรจีเนชัน (Hydrodenitrogenation, HDN) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้กำจัดอะตอมของไนโตรเจนที่เป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา ให้ได้เป็นอัลเคนและก๊าซแอมโมเนีย ทำให้



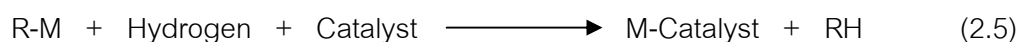
ลดการปล่อยก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) ออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นก๊าซพิษและก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.3



4. ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation, HDO) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้กำจัดอะตอมของออกซิเจนซึ่งเป็นส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในน้ำมันปิโตรเลียมและน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา เพื่อให้ได้เป็นน้ำ สำหรับน้ำมันปิโตรเลียมจะมีออกซิเจนอะตอมเป็นส่วนประกอบในปริมาณน้อยมาก ดังนั้นปฏิกิริยานี้จึงไม่ใช่จุดประสงค์ของกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง แต่ปฏิกิริยานี้สามารถกำจัดออกซิเจนอะตอมที่มีอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีอยู่จำนวนมากเพื่อสังเคราะห์ดีเซลได้ ผลิตรถยนต์ที่ได้จากปฏิกิริยานี้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ได้จากปิโตรเลียม ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.4



5. ปฏิกิริยาไฮโดรดีเมทัลล (Hydrodemetallation, HDM) เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้กำจัดโลหะต่างๆที่อยู่ในน้ำมันออกโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.5



6. ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) เป็นกระบวนการทางเคมีที่สลายโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กลงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง โมเลกุลของสารตั้งต้นจะถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างการจัดเรียงโมเลกุลใหม่ทำให้มีตัว มีความสมบูรณ์และความแข็งแรงขึ้น ส่งผลให้น้ำมันที่เกิดปฏิกิริยานี้มีความต้านทานต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีขึ้น (Oxidation Resistance) ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.6

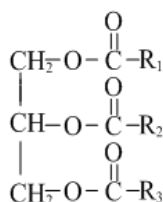


ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งมีอยู่หลายชนิด เช่น นิกเกิล โมลิบดีนัม, โคบอลต์โมลิบดีนัม, นิกเกิลทังสแตน, โคบอลต์ทังสแตน, แพททินัม, พาราเดียม บนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งสามารถเตรียมได้ในรูปแบบออกไซด์และซัลไฟด์ ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเป็นสารผลิตภัณฑ์ (conversion) ซึ่งการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาในรูปแบบของออกไซด์จะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาต่ำและเสื่อมสภาพง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่ออยู่ในรูปของซัลไฟด์ ดังนั้นจึงต้องมีการซัลไฟด์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนใช้งาน (Senol และคณะ (2005))

วัตถุดิบที่ใช้

ในน้ำมันพืชจะประกอบด้วยโมเลกุลที่เรียกว่า ไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งไตรกลีเซอไรด์จะมีแขนของคาร์บอนซึ่งจะประกอบด้วยกรดไขมันที่หลากหลาย ตามชนิดของน้ำมันพืช เช่น กรดปาล์ม มิติก กรดสเตียริก กรดลอริก เป็นต้น โดยโมเลกุลของกรดไขมันจะประกอบด้วยคาร์บอนที่มีความยาวอยู่ในช่วง 12 ถึง 24 อะตอมตามชนิดของกรดไขมัน

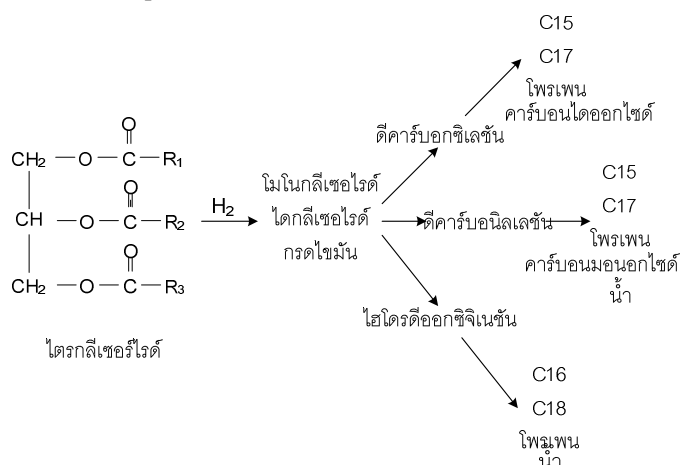


รูปที่ 1.1 โครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ โดย R คือหมู่อัลคิลในกรดไขมัน

น้ำมันเมล็ดในปาล์ม ประกอบด้วยกรดไขมันที่อิ่มตัว (saturated fatty acids) กว่าร้อยละ 90 อะตอมคาร์บอนของกรดไขมันที่อิ่มตัวจะต่อกันเป็นสายโซ่ (chain) โดยมีพันธะเดี่ยว (single bond) จับกันเองเป็นเส้นยาวตามจำนวนอะตอมของคาร์บอน แต่ละอะตอมของคาร์บอนจะมีไฮโดรเจนติดอยู่ 2 ตัว เนื่องจากแต่ละอะตอมของคาร์บอนไม่สามารถรับไฮโดรเจนได้อีกเพราะไม่มีพันธะว่าง จึงเรียกน้ำมันที่มีกรดไขมันประเภทนี้ว่า “น้ำมันอิ่มตัว” กรดไขมันอิ่มตัวในน้ำมันเมล็ดในปาล์มส่วนใหญ่ มีจำนวนอะตอมของคาร์บอน 8 – 14 ตัว กรดไขมันที่สำคัญได้แก่ กรดคาปริก (Capric acid, C10) กรดลอริก (Lauric acid, C12) อยู่ในปริมาณที่สูงมากประมาณร้อยละ 48 - 53 และกรดไมริสติก (Myristic acid, C14) ทำให้โมเลกุลมีความยาวของเส้น (chain) ขนาดปาน

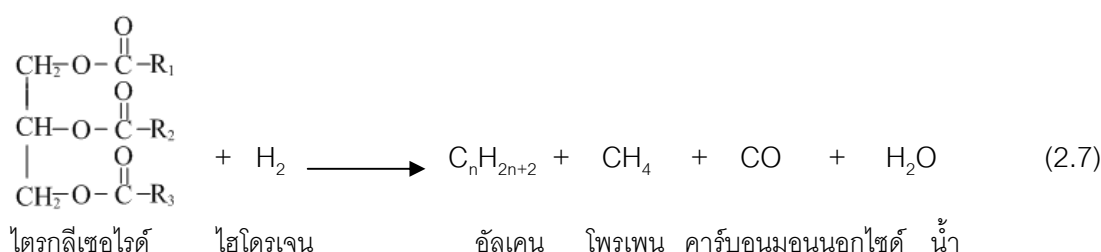
กลาง นอกจากนี้ น้ำมันเมล็ดในปาล์มยังประกอบไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) อีกร้อยละ 17 - 22 เช่น กรดโอเลอิก (Oleic acid, C18:1)

ในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชหรือไตรกลีเซอไรด์จะมีปฏิกิริยาสำคัญคือ ปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชัน และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน ซึ่งทั้งสามปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังรูปที่ 1.2



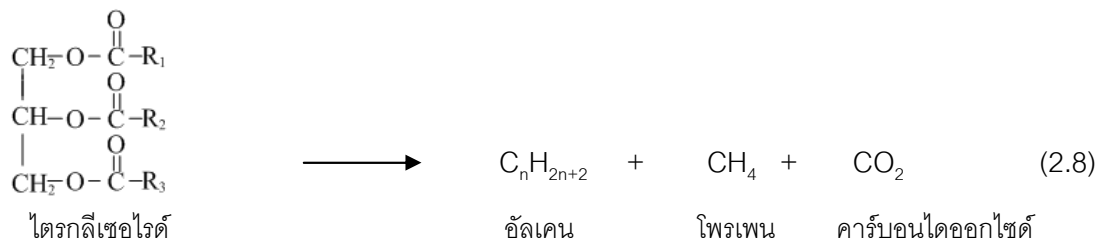
รูปที่ 1.2 แผนผังแสดงปฏิกิริยากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช

ปฏิกิริยาคาร์บอนิลเลชัน (decarbonylation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพื่อกำจัดอะตอมของออกซิเจน โดยเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยา อะตอมคาร์บอนของกรดไขมันจะหลุดออกไปพร้อมกับอะตอมของออกซิเจนในรูปของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ทำให้ผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นมีความยาวของโซ่คาร์บอนลดลงไปหนึ่งอะตอมเนื่องจากเสียไปจากปฏิกิริยานี้ในรูปของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาคือ สารไฮโดรคาร์บอนหมู่เมทิล ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โพรเพนและน้ำ ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.7

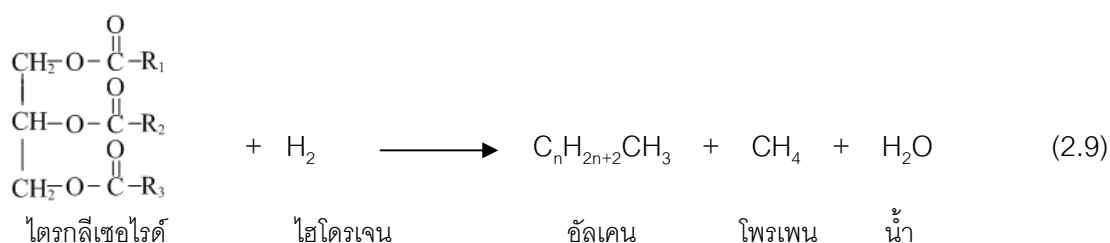


ปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพื่อกำจัดอะตอมของออกซิเจน โดยไม่ต้องเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยา ซึ่งกรดไขมันจะสลายตัวเป็นฟังก์ชัน

คาร์บอกซีกลายเป็นสารไฮโดรคาร์บอนหมู่เมทิล โพรเพนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และความยาวของโซ่คาร์บอนของผลิตภัณฑ์จะลดลงไปหนึ่งอะตอมเนื่องจากเสียไปจากปฏิกิริยานี้ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.8



ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (hydrodeoxygenation) เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันชีวภาพ ซึ่งใช้ในการกำจัดอะตอมออกซิเจนออกจากสารตั้งต้นได้แก่ น้ำมันพืชหรือกรดไขมันต่างๆ โดยการเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาทำให้ออกซิเจนอะตอมหลุดออกมาในรูปของสารประกอบ คือ น้ำและโพรเพนซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมในปฏิกิริยา ส่วนของผลิตภัณฑ์หลักคือสารประกอบอัลเคนจะมีความยาวของโซ่คาร์บอนเท่ากับความยาวของโซ่คาร์บอนของกรดไขมันที่อยู่ในสารตั้งต้น ตัวอย่างของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการที่ 2.9



### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Senol และคณะ (2005) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation) ของเมทิลเฮปตะโนเอต (Methyl heptanoate) และเมทิลเฮกซะโนเอต (Methyl hexanoate) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ (NiMo/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ (CoMo/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ที่ผ่านการซัลไฟด์และที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบท่อที่มีการไหลต่อเนื่อง (Tubular continuous flow reactor) อุณหภูมิที่ใช้คือ 120 ถึง 390 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 3 เมกกะปาสคาร์ ผลการทดลองเปรียบเทียบกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการซัลไฟด์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการซัลไฟด์มีความว่องไวในการ

เกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ โดยสังเกตได้จากค่าร้อยละผลได้ (%yield) และค่าร้อยละการเปลี่ยน (%conversion) ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนจากการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์แล้ว พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์แล้ว มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ สังเกตได้จากการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ จะเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ส่วนการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ จะเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

Huber และคณะ (2007) ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง (Hydrotreating) ของน้ำมันดอกทานตะวัน (Sunflower oil) และน้ำมันดอกทานตะวันผสมกับน้ำมันหนักที่เกิดจากการกลั่นแบบสุญญากาศ (Heavy vacuum oil, HVO) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์แล้ว ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed bed reactor) อุณหภูมิที่ใช้คือ 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 50 บาร์ และความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (Liquid hourly space velocity, LHSV) ที่ใช้คือ 5.2 ต่อชั่วโมง ( $5.2 \text{ h}^{-1}$ ) พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งมี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน (Decarbonylation) ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน (Decarboxylation) และปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (Hydrodeoxygenation) ผลการทดลองที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของน้ำมันดอกทานตะวันบริสุทธิ์ พบว่ามีค่าร้อยละการเปลี่ยนของผลิตภัณฑ์คือสารประกอบอัลเคน  $C_{15}$  ถึง  $C_{18}$  ชนิดไซโตรงมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 71 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และผลการทดลองของน้ำมันดอกทานตะวันผสมในน้ำมันหนักที่ได้จากการกลั่นแบบสุญญากาศ พบว่าจากการผสมน้ำมันดอกทานตะวันในปริมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ได้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์สารประกอบประเภทอัลเคนไซโตรงสูงสุดร้อยละ 87 ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

Gandarias และคณะ (2008) ศึกษากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพโดยการกำจัดออกซิเจนจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้ง โดยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิดคือ นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์และนิกเกิลทังสเตนบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์และอยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ โดยมีสารตั้งต้นคือฟีนอลความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในตัวทำละลายออกเทน (Octane) ทดลองที่อุณหภูมิ 473

ถึง 623 องศาเซลเซียส (200 ถึง 350 องศาเซลเซียส) ความดันที่ใช้คือ 1.5 เมกกะปาสคาล อัตราการไหลของสารละลายพีนอลในออกเทนที่ใช้คือ 10 กรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้คือ 2 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองจากการเปรียบเทียบกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการซัลไฟด์และตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการซัลไฟด์มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของสารประกอบออกไซด์ ซึ่งสังเกตได้จากค่าร้อยละการเปลี่ยนของผลิตภัณฑ์ในทุกอุณหภูมิของปฏิกิริยาจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์และนิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์แล้ว จะมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์แล้วในทุกอุณหภูมิ

Sebos และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการไฮโดรโพรเซสซิง (Hydroprocessing) ของน้ำมันเมล็ดฝ้าย (Cottonseed oil) ผสมกับน้ำมันดีเซลปิโตรเลียมที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของน้ำมันเมล็ดฝ้ายบริสุทธิ์ในน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 305 ถึง 345 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 30 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 5 ถึง 25 ต่อชั่วโมง อัตราการไหลของของเหลวที่ใช้คือ 25 กรัมต่อชั่วโมง ถึง 125 กรัมต่อชั่วโมง จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์เมื่อผ่านปฏิกิริยาไปแล้ว 300 ชั่วโมงยังสามารถเกิดปฏิกิริยาได้คงที่และค่าร้อยละการเปลี่ยนของผลิตภัณฑ์จะเข้าใกล้ร้อยละ 100 ที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวน้อยกว่า 5 ต่อชั่วโมง

Simacek และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการไฮโดรโพรเซสซิงของน้ำมันเมล็ดเรพ (Rapeseed oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทดลองที่อุณหภูมิ 260 ถึง 340 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 7 เมกกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 1 ต่อชั่วโมง และอัตราการไหลเข้าของน้ำมันคือ 22 กรัมต่อชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบด้วยน้ำ ก๊าซไฮโดรเจน และสารอินทรีย์ที่เป็นของเหลว (Organic Liquid Product, OLP) คือสารอัลเคนไฮโดรคาร์บอน (n-alkanes) เช่น เฮปตะเดเคน ( $C_{17}$ ), ออกตะเดเคน ( $C_{18}$ ) และสารอัลเคนไฮโดรคาร์บอน (i-alkanes) จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิต่ำคือ 260 ถึง 300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นของเหลวปนกับผลึกสีขาว และมีไตรกลีเซอไรด์หรือกรดไขมันอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาปนอยู่สูง แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์จะมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ปริมาณไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยา

ปนอยู่เล็กน้อย และปริมาณของเฮฟวี่เตตระเดคเซนโซ่ตรงเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง แต่ในทางตรงกันข้ามจะทำให้ออกตะเตตระเดคเซนโซ่ตรงลดลง มีความหนาแน่น 730 ถึง 750 กิโลกรัมต่อตารางเมตร และที่อุณหภูมิสูงกว่า 310 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะสารไฮโดรคาร์บอนเท่านั้น ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในน้ำมันดีเซลปิโตรเลียม

Walendziewski และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันเมล็ดเรพที่มีส่วนผสมของน้ำมันก๊าซเบา (Light gas oil) ที่ร้อยละ 10 20 80 และ 90 โดยใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีการไหลต่อเนื่อง ทดลองที่อุณหภูมิ 320 350 และ 380 องศาเซลเซียส ความดันก๊าซไฮโดรเจนคือ 3 และ 5 เมกกะปาสคาล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิระหว่าง 350 ถึง 380 องศาเซลเซียส และความดันก๊าซไฮโดรเจน 5 เมกกะปาสคาล จะมีประสิทธิภาพดีที่สุด

Bezergianni และคณะ (2010) ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืชใช้แล้ว (Waste cooking oil) เพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ทดลองที่ช่วงอุณหภูมิ 330 ถึง 398 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 1,200 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวคือ 1 ต่อชั่วโมง และอัตราการไหลเข้าของน้ำมันคือ 0.33 มิลลิลิตรต่อนาที จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเกิดค่าร้อยละผลได้ของสารประกอบอัลเคนสูงสุดคือ ร้อยละ 90.1 และค่าร้อยละการเปลี่ยนสูงสุดร้อยละ 90 ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) ขึ้น ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่สลายตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง จะเห็นได้จากค่าร้อยละผลได้ที่อุณหภูมิ 385 และ 398 องศาเซลเซียส พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลงเหลือเพียงร้อยละ 70

Charoenwong (2010) ศึกษาการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิที่ใช้คือ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิสูงและความเร็วเชิงสเปซของของเหลวต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเกิดปริมาณสารผลิตภัณฑ์อัลเคนสูง โดยสภาวะที่ดีที่สุดของน้ำมันทั้งสามชนิด คือ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 0.5 ต่อชั่วโมง โดยน้ำมันปาล์มโอเลอินเกิดสารประกอบอัลเคนสูงสุดร้อยละ 94.2 น้ำมันปาล์มสเตียรีนเกิดสารอัลเคนสูงสุดร้อยละ 96.5 และกรดไขมันปาล์มเกิดสารอัลเคนสูงสุดร้อยละ 92.1

Guzman และคณะ (2010) ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงของน้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทดลองที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวคือ 2 ต่อชั่วโมง อัตราการไหลของน้ำมันที่ใช้คือ 180 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง และความดันที่ใช้คือ 15 ถึง 90 บาร์ จากผลการทดลองพบว่าที่ความดันสูงกว่า 40 บาร์จะมีความเหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน เนื่องจากที่สภาวะความดัน 40 ถึง 90 บาร์ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้ดีและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล ส่วนความดันที่ต่ำกว่า 40 บาร์ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์

Jirasavetakul (2010) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันปาล์มโอเลอินโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมและนิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว และความแตกต่างของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิด ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (Fixed-bed reactor) ที่มีการไหลอย่างต่อเนื่องภายใต้ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิที่ใช้คือ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิและความเร็วเชิงสเปซของของเหลวมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และการแตกตัวของกรดไขมัน และการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าโคบอลต์โมลิบดีนัมเพราะเกิดปริมาณอัลเคนสูงกว่าในทุกสภาวะการทดลอง และเกิดปริมาณอัลเคนสูงสุดที่ร้อยละ 94.05 ในสภาวะการทดลองที่ใช้คือที่ อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และความเร็วเชิงสเปซของของเหลวเท่ากับ 0.5 ต่อชั่วโมง

Kubicka และคณะ (2010) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดเรพเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิดคือ นิกเกิล (Ni), โมลิบดีนัม (Mo) และนิกเกิลโมลิบดีนัม (NiMo) บนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ทดลองในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งอุณหภูมิที่ใช้คือ 260 ถึง 280 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 3.5 เมกกะปาสคาร์ และความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 0.25 ถึง 4 ต่อชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์มีค่าสูงสุด และปฏิกิริยาที่เกิดจากตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ได้ค่าร้อยละผลได้และค่าการเลือกของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนสูงกว่าปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ตามลำดับในทุกอุณหภูมิและทุกความเร็วเชิงสเปซของของเหลวของการทดลอง โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากตัวเร่ง



ปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ได้จากปฏิกิริยา 2 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์และนิกเกิลบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์เกิดปฏิกิริยาเดียวคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเท่านั้น

Simacek และคณะ (2010) ศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวภาพจากกระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงของน้ำมันเมล็ดเรพ (Rapeseed oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ที่อุณหภูมิ 310 และ 360 องศาเซลเซียส ความดันก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้คือ 7 และ 15 เมกกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 1 ต่อชั่วโมง อัตราการไหลเข้าของน้ำมันที่ใช้คือ 100 กรัมต่อชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาส่วนใหญ่คือ เฮปตะเดเคน และออกตะเดเคน ค่าร้อยละการเปลี่ยนที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียสมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 และที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียสพบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนเกิดสมบูรณ์โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ สารอินทรีย์ที่เป็นของเหล্বর้อยละ 83 โดยน้ำหนัก น้ำร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก และก๊าซไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก และได้นำผลิตภัณฑ์จากสภาวะอุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 7 เมกกะปาสคาลผสมกับน้ำมันปิโตรเลียมดีเซลที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส ความดัน 7 เมกกะปาสคาล พบว่าการทำปฏิกิริยาของน้ำมันผสมมีคุณสมบัติที่ดีกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมเพียงอย่างเดียว

Toba และคณะ (2010) ศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันพืชใช้แล้ว (Waste cooking oil) และไขมันสัตว์ (Trap grease) ทดลองในถังปฏิกรณ์ 2 แบบคือ ถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งและถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการซัลไฟด์ 3 ชนิดคือนิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลทังสเทน และโคบอลต์โมลิบดีนัม การทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกะจะทดลองที่ อุณหภูมิที่ใช้คือ 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 7 เมกกะปาสคาล เวลาในการทดลอง 3 ชั่วโมง จากการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกะพบว่าเกิดปฏิกิริยาได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส โดยที่นิกเกิลโมลิบดีนัมและนิกเกิลทังสเทนให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกันและมีความเหมาะสมมากกว่าโคบอลต์โมลิบดีนัม ส่วนการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งทดลองที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 5 เมกกะปาสคาล ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2.8 ต่อชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ให้ผลการทดลองที่ดีกว่า ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าน้ำมันพืชใช้แล้วและไขมันสัตว์เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ ณ อุณหภูมิที่สูงกว่า 300 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมและตัวเร่ง

ปฏิกิริยานิกเกิลทั้งสแตนมีที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยากับน้ำมันพืชที่ใช้แล้วมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัม

Kovacs และคณะ (2011) ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการซัลไฟด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 280 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 20 ถึง 80 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 0.75 ถึง 3.0 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนปริมาตรของไฮโดรเจนต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้คือ 400 ถึง 600 ตารางนิวตันเมตรต่อตารางเมตร จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่มีความเหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส ความดัน 20 ถึง 40 บาร์ ค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ต่อชั่วโมงและอัตราส่วนปริมาตรของแก๊สไฮโดรเจนต่อน้ำมันถั่วเหลือง 500 ตารางนิวตันเมตรต่อตารางเมตร พบว่าได้ค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ร้อยละ 73.2 ถึง 75.6

Kubicka และ Horacek (2011) ศึกษาปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดเรพซึ่งมีค่าของกรด (Acid Value) ที่ต่างกัน 4 ชนิดและไขมันจากสัตว์ที่ใช้แล้ว เพื่อศึกษาผลกระทบของโลหะที่อยู่ในน้ำมันเช่น ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม โพแทสเซียม แคลเซียม โซเดียม และกำมะถันต่อการเกิดปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน ทดลองในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทดลองที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 2 ต่อชั่วโมง ความดันของไฮโดรเจนที่ใช้คือ 3.5 เมกกะปาสคาล จากผลการทดลองพบว่า น้ำมันเมล็ดเรพที่ผ่านการกลั่น (refinery rapeseed oil) เกิดปฏิกิริยาเป็นสารไฮโดรคาร์บอนได้ดีที่สุด และผลกระทบจากความเข้มข้นของฟอสฟอรัส ความเป็นต่าง และความเข้มข้นของกำมะถันมีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชัน โดยสารฟอสโฟลิพิด (phospholipids) ความเป็นต่าง และกำมะถันที่มีอยู่ในน้ำมันแต่ละชนิดจะไปยับยั้งการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพลดลง โดยเฉพาะไขมันสัตว์ที่ใช้แล้วและน้ำมันเมล็ดเรพที่ใช้แล้ว ซึ่งมีความบริสุทธิ์ต่ำจึงเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดี

Kwon และคณะ (2011) ศึกษาปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันของเมทิลลอรเรต และน้ำมันคาโนลา (canola oil) เพื่อผลิตและพัฒนากระบวนการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนจากสารชีวมวล ก๊าซไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยา ทดลองในถังปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทำปฏิกิริยาที่ช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 18.25 ถึง 85.13 บาร์ เวลาในการทดลอง 30 ถึง 60 นาที จากผลการทดลองพบว่า เมทิลลอรเรตทำปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันเกิดเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่สำคัญคือ อันดีเคนและโดดีเคน (Undecane,  $C_{11}$  และ Dodecane,  $C_{12}$ ) โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการ

ทำปฏิกิริยาคือที่ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดัน 46.52 ถึง 47.90 บาร์และที่ช่วงอุณหภูมิสูงคือ 350 ถึง 375 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยา คือ อันเดเคนและโดเดเคนมีแนวโน้มลดลง ส่วนน้ำมันคาโนลามีผลิตภัณฑ์หลักที่สำคัญคือ เฮปตะเดเคน และออกตะเดเคน (Heptadecane, C<sub>17</sub> และ Octadecane, C<sub>18</sub>) และปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่ออุณหภูมิและความดันสูงขึ้น และที่ช่วงอุณหภูมิ 350 ถึง 400 องศาเซลเซียส ความดัน 45.82 ถึง 47.20 บาร์ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด

Sankaranarayanan และคณะ (2011) ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิ่งของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันผสมกับน้ำมันก๊าซที่อยู่ในน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 และ 60 ต่อ 40 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 320 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 30 ถึง 60 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองพบว่าร้อยละการเปลี่ยนของผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดัน 60 บาร์ และพบว่า เมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าร้อยละการเปลี่ยนของสารประกอบอัลเคนจะสูงขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิงและปฏิกิริยาไฮโดรจีโนไลซิสได้ดี

Tiwari และคณะ (2011) ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงและไฮโดรแครกกิงของน้ำมันโซยา (Soya-oil) และน้ำมันผสมของน้ำมันโซยากับน้ำมันที่กลั่นจากปิโตรเลียม (Refinery gas-oil) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการซัลไฟด์และนิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการซัลไฟด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 340 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 50 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 2 และ 4 ต่อชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าการใช้นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการซัลไฟด์ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน (C<sub>15</sub> ถึง C<sub>18</sub>) สูงกว่าการใช้นิกเกิลทั้งสแตนบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการซัลไฟด์ในทุกสภาวะการทดลอง โดยได้ค่าร้อยละผลได้สูงสุดที่ร้อยละ 96.4 จากการใช้น้ำมันโซยาบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 2 ต่อชั่วโมง

Veriansyah และคณะ (2012) ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิ่งของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 6 ชนิดคือ นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ โคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ พาราดีนบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ นิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกอนออกไซด์ รูทีเนียมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ และแพททินัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ในถังปฏิกรณ์แบบท่อยาว 177 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 34.5 มิลลิเมตร จากการศึกษาผลของค่าการเกิดผลิตภัณฑ์อัลเคนสูงสุดจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล

โมลิตีนัม คือ ร้อยละ 92.9 ซึ่งพบผลิตภัณฑ์อัลเคนไซตรง C17 และ C15 สูงสุดเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นิกเกิลหรือแพททินัม โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแพททินัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์สามารถเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้ดี ส่วนนิกเกิลโมลิตีนัมและโคบอลต์โมลิตีนัมสามารถเกิดปฏิกิริยาเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันได้ดี

สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันพืช

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง

ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งสามารถเกิดขึ้นได้กับน้ำมันพืชและไขมันจากสัตว์ชนิดต่างๆ เช่น น้ำมันเมล็ดเรพ น้ำมันคาโนลา น้ำมันปาล์ม รวมถึงน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่สำคัญของปฏิกิริยาจะขึ้นกับปริมาณกรดไขมันที่อยู่ในสารตั้งต้นเป็นหลัก ในงานวิจัยนี้ได้สนใจที่จะศึกษาน้ำมันเมล็ดในปาล์มเนื่องจากในน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีกรดไขมันหลักที่สำคัญคือ กรดลอริก (Lauric acid) กรดไมลิสติก (Myristic acid) เป็นกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 12 และ 14 อะตอม ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนอะตอมต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันคาโนลา เป็นต้น

สภาวะของการทดลอง

1. อุณหภูมิ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของสารชีวมวลเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งอุณหภูมิมิอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันเป็นอย่างมาก จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันมีความเหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส (Simacek และคณะ (2009), Toba และคณะ (2010), Charoenwong (2010), Jirasavetakul (2010)) และจากงานวิจัยของ Simacek (2009) พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิที่ละ 20 องศาเซลเซียสมีผลต่ออัตราส่วนของสารผลิตภัณฑ์อัลเคนคาร์บอนอะตอมคู่และคาร์บอนอะตอมคี่ (n-C17 และ n-C18) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนอร์มอลเฮปตะดีเคนจะเกิดได้ดีขึ้นและมีแนวโน้มการเกิดแบบเส้นตรงแต่นอร์มอลออกตะดีเคนมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

2. ความดัน การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจเนชันต้องใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นเพื่อทำปฏิกิริยากับกรดไขมันที่อยู่ในไตรกลีเซอไรด์ ซึ่งความดันของก๊าซไฮโดรเจนเป็นอีกปัจจัยหลักที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ในการทดลองมีหลายค่าแตกต่างกันไปซึ่งขึ้นอยู่กับหลายๆ ปัจจัยด้วยกัน เช่น ชนิดของน้ำมัน

อุณหภูมิ ชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น ซึ่งความดันที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะอยู่ในช่วง 30 ถึง 50 บาร์

3. ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (Liquid hourly space velocity, LHSV) ค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลวในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมีค่าที่เหมาะสมแตกต่างกันออกไป ซึ่งจากงานวิจัยที่ศึกษาพบว่าค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่มีค่าต่ำจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่า (Sebos และคณะ (2009), Kubicka และคณะ (2010)) จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่าความเร็วเชิงสเปซที่มีความเหมาะสมที่สุดคือ 1 ต่อชั่วโมง

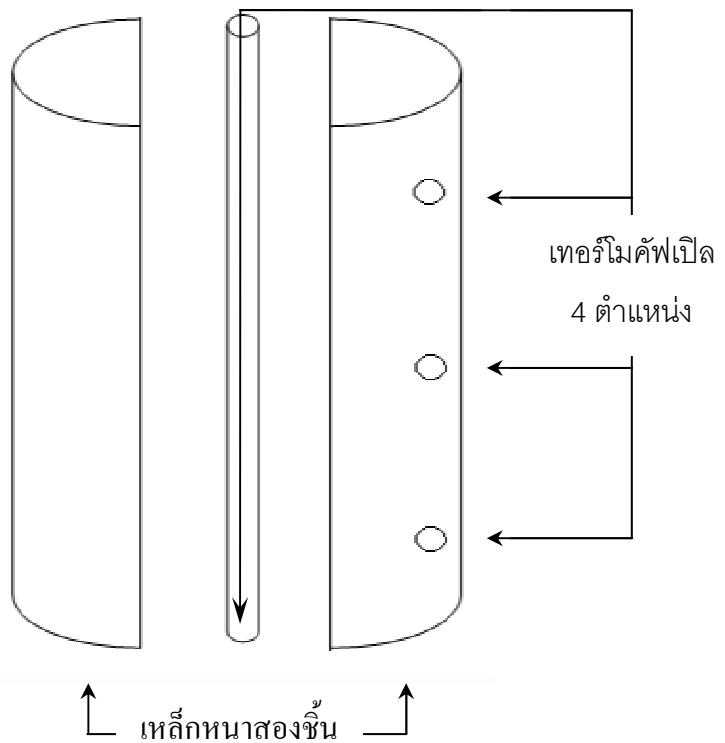
#### ตัวเร่งปฏิกิริยา

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่พบส่วนใหญ่คือ นิกเกิลโมลิบดีนัม นิกเกิลทังสเตน และโคบอลต์โมลิบดีนัม บนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาจะพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมจะมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่น (Senol และคณะ (2005), Gandarias และคณะ (2008), Kubicka และคณะ (2010), Toba และคณะ (2010)) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### บทที่ 3

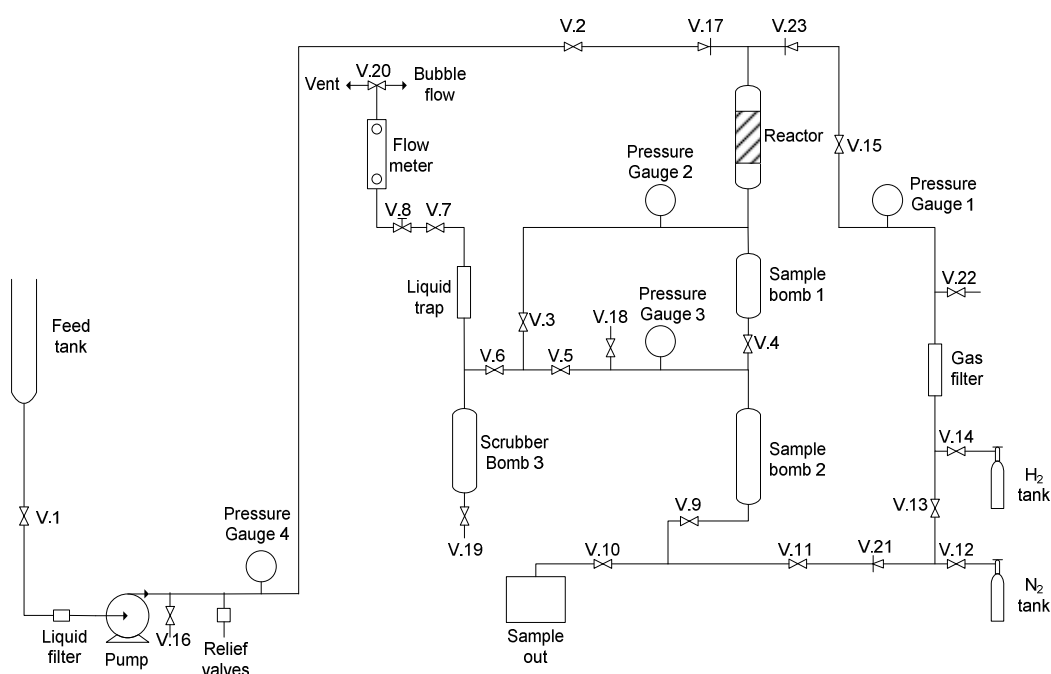
#### การทดลองและการวิเคราะห์

การทดลองเพื่อศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์ทำด้วยท่อโลหะไร้สนิมมีความยาว 47 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 1.27 เซนติเมตร และความหนา 0.089 เซนติเมตร ในเครื่องปฏิกรณ์บรรจุตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 30 มิลลิลิตร ซึ่งอยู่ตรงกลางระหว่างชั้นของลูกแก้ว เครื่องปฏิกรณ์จะได้รับความร้อนจากฮีตเตอร์ไฟฟ้าขนาด 2,000 วัตต์โดยจะนำความร้อนไปยังเหล็กหนาสองชั้นที่หุ้มถังปฏิกรณ์ และจะถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเป็นชั้นสุดท้ายเพื่อรักษาอุณหภูมิและความปลอดภัยจากพื้นผิวที่ร้อน อุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์จะถูกควบคุมด้วยเทอร์โมคัพเบิล (thermocouple) ซึ่งถูกติดตั้งทั้งหมด 4 ตำแหน่ง คือ ส่วนบน ส่วนกลาง ส่วนล่าง และภายในเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง

ในการทดลองสารตั้งต้นที่ป้อนเข้าไปในถังปฏิกรณ์จะมีทั้งก๊าซและของเหลว ซึ่งถูกป้อนเข้าสู่ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองเฟส โดยที่ก๊าซไฮโดรเจนจะไหลออกมาจากวาล์วหมายเลข 14 ผ่านมาตรวัดความดันหมายเลข 1 (pressure gauge 1) และไหลผ่านวาล์วหมายเลข 15 ตามลำดับ ในส่วนของของเหลวหรือน้ำมันจะไหลออกมาจากถังเก็บสารตัวอย่างซึ่งดัดแปลงมาจากบิวเรตเพื่อให้สามารถอ่านค่าปริมาตรของน้ำมันที่ป้อนเข้าไปได้ โดยปัมความดันสูงจะทำหน้าที่ปั๊มของเหลวผ่านมาตรวัดความดันหมายเลข 4 (pressure gauge 4) และวาล์วหมายเลข 2 ตามลำดับ ซึ่งถูกติดตั้งวาล์วนิรภัยเพื่อความปลอดภัยเมื่อความดันในระบบสูงเกินกว่า 1,500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว



รูปที่ 3.2 ระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง

ก๊าซและของเหลวจะพบกันที่ส่วนบนของเครื่องปฏิกรณ์และไหลลงมาผ่านชั้นของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในถังปฏิกรณ์ จากนั้นจะไหลเข้าสู่ถังเก็บตัวอย่างที่ 1 (sample bomb 1) และเข้าสู่ถังเก็บตัวอย่างที่ 2 (sample bomb 1) ตามลำดับ โดยมีมาตรวัดความดันหมายเลข 3 (pressure gauge 3) และหมายเลข 4 (pressure gauge 4) บอกระดับความดันของถังเก็บตัวอย่าง ผลิตภัณฑ์ก๊าซจะไหลออกที่ด้านบนของถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 ผ่านวาล์วปรับละเอียดหมายเลข 8 แล้วผ่านมาตรวัดอัตราการไหลและไหลออกทางออกก๊าซ (Vent flow) ที่มีภาชนะบรรจุสารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนที่จะปล่อยสู่บรรยากาศ ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจะไหลลงสู่ด้านล่างของถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2

การเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากระบบจะทำทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยถูกออกแบบให้มีถังเก็บตัวอย่าง 2 ถัง เพื่อรักษาสภาวะคงตัวในระบบ ซึ่งมีขั้นตอนในการเก็บตัวอย่างดังนี้

1. เปิดวาล์วหมายเลข 3 และปิดวาล์วหมายเลข 4 และ 5 เพื่อแยกถังเก็บตัวอย่างที่ 2 ออกจากระบบ โดยของเหลวที่ไหลอย่างต่อเนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์จะถูกเก็บชั่วคราวในถังเก็บตัวอย่างที่ 1 และก๊าซจากระบบจะวิ่งผ่านวาล์วหมายเลข 3 เพื่อออกสู่บรรยากาศ

2. ลดความดันภายในถังเก็บตัวอย่างที่ 2 ออกโดยเปิดวาล์วหมายเลข 18 จากนั้นปล่อยผลิตภัณฑ์ส่วนของของเหลวซึ่งไหลออกจากระบบด้วยแรงดันผ่านวาล์วหมายเลข 9 และ 10 สู่กล่องเก็บตัวอย่าง โดยใช้กล่องเก็บตัวอย่างที่มีขนาด 750 มิลลิลิตรบรรจุผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวทั้งหมดไว้

3. หลังจากการเก็บตัวอย่างเสร็จสิ้น ถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 จะสูญเสียความดัน จึงจำเป็นต้องเพิ่มความดันให้เท่ากับความดันภายในระบบ โดยเติมก๊าซไนโตรเจนผ่านวาล์วหมายเลข 12, 11 และ 9 ตามลำดับ เมื่อความดันในถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 มีค่าเท่ากับความดันภายในระบบแล้ว จากนั้นปิดวาล์วหมายเลข 9, 11 และ 12 และเปิดวาล์วหมายเลข 4 และ 5 อย่างช้าๆ และปิดวาล์วหมายเลข 3 เพื่อเชื่อมต่อถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 กับระบบทั้งหมด

4. นำผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ในขวดเก็บตัวอย่างขนาด 750 มิลลิลิตร ใส่ลงในกระบอกตวงขนาด 500 มิลลิลิตรเพื่อวัดปริมาตรของสารประกอบอัลเคนและน้ำซึ่งจะแยกชั้นกันอยู่อย่างชัดเจน โดยที่น้ำจะอยู่ชั้นล่างและสารประกอบอัลเคนจะอยู่ชั้นบน จากนั้นนำไปซึ่งน้ำหนักในเครื่องชั่ง Digicon GM-501 ซึ่งมีความละเอียดทศนิยมหนึ่งตำแหน่ง โดยทำการแยกน้ำและสารประกอบอัลเคนออกจากกันด้วยปิเปต จากนั้นจึงนำสารประกอบอัลเคนไปทำการวิเคราะห์หาค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ ค่าของกรด ค่าความหนาแน่น และค่าการกระจายตัวของสารประกอบอัลเคนต่อไป

5. การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ที่มีสถานะก๊าซ ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์แนวโน้มของการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะไหลออกทางด้านบนของของถังเก็บตัวอย่างหมายเลข 2 ผ่านวาล์วหมายเลข 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ แล้วไหลออกที่ทางออกก๊าซ (bubble flow) ก๊าซจะไหลลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 N ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็น



ผลิตภัณฑ์โซเดียมคาร์บอเนตและน้ำ โดยใช้เวลา 30 นาทีในการทำปฏิกิริยา จากนั้นจึงนำไปไตรเทรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเพื่อหาปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อไป

#### การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือ นิกเกิลโมลิบดีนัม ซึ่งต้องผ่านกระบวนการพรีซัลไฟด์ (Presulfide) เพื่อเปลี่ยนนิกเกิลโมลิบดีนัมออกไซด์ให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ก่อนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและระยะเวลาการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยไล่ความชื้นที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาออกก่อนด้วยก๊าซไนโตรเจนที่ความดัน 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ระยะเวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นเริ่มทำปฏิกิริยากับสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่ผสมในเฮกเซนในปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และก๊าซไฮโดรเจนทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 300 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน 300 มิลลิลิตรต่ออนาที ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 18 ชั่วโมง

#### สภาวะในการทดลอง

1. อุณหภูมิ 300, 320, 340, 360 และ 380 องศาเซลเซียส
2. ความดัน 450, 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
3. ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ต่อชั่วโมง
4. อัตราการไหลของน้ำมัน 30 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
5. อัตราส่วนโมลของก๊าซไฮโดรเจนต่อน้ำมัน 500:1 โมล
6. ระยะเวลาในการทดลองเมื่อเข้าสู่สภาวะคงที่
7. เวลาในการเก็บตัวอย่าง 6 ชั่วโมง
8. ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการซัลไฟด์
9. ปริมาตรเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา 30 มิลลิลิตร

ซัลไฟด์

### สารตั้งต้นและสารเคมี

1. น้ำมันเมล็ดในปาล์ม ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร
2. สารเคมี ในการทดลองและการวิเคราะห์ผลจะใช้สารเคมีหลายชนิด มาจากแหล่งผลิต และคุณภาพความบริสุทธิ์ที่แตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสาร	เกรด/ความบริสุทธิ์
Hydrogen	99.99 %
Nitrogen	99.99%
Ethanol	industrial
Iso-propanol	analytical reagent
Toluene	industrial
Hexane	analytical reagent
Methyl Octanoate	analytical reagent
Mix alkane	99.9%
Carbon disulfide	analytical reagent
Nickel Molybdenum	commercial

### การวิเคราะห์

การทดลองจะนำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณของสารประกอบประเภทอัลเคน, การกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคน, ความหนาแน่น, ปริมาณกรดไขมันอิสระ, ค่าของกรด ร้อยละน้ำหนักของน้ำ และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

#### 1. การวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนและการกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคน

ผลิตภัณฑ์ในส่วนหนึ่งของของเหลวจะมีส่วนประกอบและการกระจายตัวของสารประกอบอัลเคนแตกต่างกันเนื่องจากผลของสภาวะการทดลองที่ต่างกัน คือ อุณหภูมิและความดันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีค่าแตกต่างกันออกไป จึงต้องนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี โดย

ใช้เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีชนิดคอลัมน์แบบคาปิลารีท่อ varian รุ่น 3,800 คาปิลารีคอลัมน์  
 ยี่ห้อ innowax m 20 เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร และความ  
 หนาชั้นฟิล์ม 0.25 ไมโครเมตร ใช้ตัวตรวจวัดแบบแฟรมไอออนไนซ์ (flame ionization detector)  
 โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลายและเมทิลออกตะโนเอตเป็นสารมาตรฐานภายใน (internal  
 standard) โดยสภาวะคอลัมน์ในการวิเคราะห์ก๊าซโครมาโตกราฟีแสดงในตารางที่ 3.2

### ตารางที่ 3.2 สภาวะของคอลัมน์

สภาวะ	
อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)	30
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

## 2. ความหนาแน่นของผลิตภัณฑ์

จากการทดลองสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยค่าความหนาแน่นจะถูกวิเคราะห์โดยขวดถ่วงจำเพาะแบบ Gay lussac pycnometer ทำโดยเติมผลิตภัณฑ์ของเหลวลงสู่ขวดถ่วงจำเพาะจนเต็มแล้วจึงปิดฝา ซึ่งขวดถ่วงจำเพาะจะปรับปริมาตรของของเหลวที่แน่นอนเมื่อปิดฝา แล้วจึงนำไปชั่งในเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง จากนั้นคำนวณหาค่าความหนาแน่นจากน้ำหนักและปริมาตรที่ได้

### 3. ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%Free fatty acid)

ปริมาณกรดไขมันอิสระบอกถึงปริมาณร้อยละของกรดไขมันที่อยู่ในสารตัวอย่าง การคำนวณค่าปริมาณกรดไขมันอิสระ จะคำนวณตามตามมาตรฐาน AOCS Ca-5a-40

**ตารางที่ 3.3** ปริมาณของแอลกอฮอล์ สารตัวอย่างและความเข้มข้นของสารละลายเบสที่เหมาะสมต่อปริมาณกรดไขมันอิสระ

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

#### สารเคมีที่ใช้

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณกรดไขมันอิสระที่อยู่ในสารตัวอย่างที่ทดลอง ดังตารางที่ 3.2

2. เอทานอล ความบริสุทธิ์ร้อยละ 95

3. สารละลายฟีนอล์ฟทาไลน์ในไอโซโพรพานอลความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล

#### 4. ปริมาณของน้ำ

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองในส่วนของการหาค่าจะมีผลิตภัณฑ์หลักคือ สารประกอบประเภทอัลเคน และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ซึ่งน้ำเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ผลิตภัณฑ์น้ำและสารประกอบอัลเคนจะแยกชั้นกันอยู่ ดังนั้นเมื่อเก็บสารตัวอย่างในส่วนของการหาค่าในขวดเก็บตัวอย่างแล้วทิ้งไว้ให้แยกชั้นกัน จากนั้นดูดเอาส่วนของน้ำออกมาซึ่งน้ำหนักด้วยปิเปตเพื่อหาน้ำหนักของน้ำและน้ำหนักของสารประกอบอัลเคน

## 5. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลิตภัณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการไตรเตรทในการวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อหาแนวโน้มการเกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเกินพอทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ทางออกของผลิตภัณฑ์ก๊าซ (bubble flow) โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที แล้วนำมาไตรเตรทกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก สารเคมีที่ใช้

1. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 N
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.1 N
3. สารละลายฟีนอล์ฟทาลีนในไอโซโพรพานอลความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยมวล

### การคำนวณในงานวิจัย

#### 1. การคำนวณค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor)

ค่าแฟกเตอร์ตอบสนอง (Respond Factor) มีนิยามดังนี้

$$\text{แฟกเตอร์ตอบสนอง} = \frac{\text{พื้นที่ของอัลเคน} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง (Weight of I.S.)}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง (Area of I.S.)} \times \text{น้ำหนักของอัลเคน}} \quad (3.1)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาแฟกเตอร์ตอบสนองของสารประกอบประเภทอัลเคนจำนวนคาร์บอน 14 อะตอม ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- พื้นที่ของสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 14 อะตอม = 657,749
- น้ำหนักของสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 14 อะตอม = 0.000377 g
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 0.00088 กรัม
- พื้นที่ของสารตัวอย่าง = 1087,135

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.1 จะมีค่าดังนี้

แฟกเตอร์ตอบสนองของสารประกอบประเภทอัลเคน 14 อะตอม มีค่าเท่ากับ

$$\frac{657,749 \times 0.00088}{1,087,135 \times 0.000377} = 1.4158$$

## 2. การคำนวณปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน

$$\text{ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน (\%)} = \frac{\text{ปริมาณอัลเคน}}{\text{ปริมาณสารตัวอย่าง}} \times 100 \quad (3.2)$$

ซึ่งปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนคำนวณได้จาก

$$\text{ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคน (กรัม)} = \frac{\text{พื้นที่ของอัลเคน} \times \text{น้ำหนักของสารตัวอย่าง}}{\text{พื้นที่ของสารตัวอย่าง} \times \text{แฟกเตอร์ตอบสนอง}} \quad (3.3)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- พื้นที่ของสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 14 อะตอม = 2,353,978
- น้ำหนักของสารตัวอย่าง = 0.0166 กรัม
- พื้นที่ของสารตัวอย่าง = 3,760,661
- แฟกเตอร์ตอบสนองของสารประกอบประเภทอัลเคน 14 อะตอม = 1.4158

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.3 จะมีค่าดังนี้

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน (กรัม)} = \frac{2,353,978 \times 0.0166}{3,760,661 \times 1.4158} = 0.007345$$

หลังจากนั้นคำนวณหาเปอร์เซ็นต์สารประกอบประเภทอัลเคนได้จาก

- ปริมาณสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอน 14 อะตอม = 0.007345 กรัม
- ปริมาณสารตัวอย่าง = 0.0578 กรัม

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.2 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\text{ปริมาณสารประกอบอัลเคน (\%)} = \frac{0.007345}{0.0578} \times 100 = 12.71 \%$$

## 3. การคำนวณค่าความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (Liquid Hourly Space Velocity)

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ชม.<sup>-1</sup>)} = \frac{\text{อัตราการไหลของของเหลว (มล./ชม.)}}{\text{ปริมาตรของเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา (มล.)}} \quad (3.4)$$

ตัวอย่างการคำนวณหาความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้ในการทดลองที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1 ชั่วโมง<sup>-1</sup> มีค่าดังต่อไปนี้

- อัตราการไหลของของเหลว = 30 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง
- ปริมาตรของเบดบรรจุตัวเร่งปฏิกิริยา = 30 มิลลิลิตร

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการ 3.4 จะมีค่าดังนี้

$$\text{ความเร็วเชิงสเปซของของเหลว (ชม.<sup>-1</sup>)} = \frac{30}{30} = 1 \text{ ชม.<sup>-1</sup>}$$

#### 4. การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระตามมาตรฐาน AOCS Ca-5a-40

ปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันหรือไขมันจะคำนวณตามชนิดของกรดไขมันที่เป็น

ส่วนประกอบที่สำคัญในน้ำมันชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำมันถั่วเหลืองคำนวณกรดโอเลอิก น้ำมันมะพร้าว

และน้ำมันเมล็ดในปาล์มคำนวณกรดลอริก และน้ำมันปาล์มคำนวณกรดปาล์มมิติก เป็นต้น

$$\text{Free fatty acid as oleic, \%} = \frac{\text{ml of alkali} \times N \times 28.2}{\text{mass, g of sample}} \quad (3.6)$$

$$\text{Free fatty acid as lauric, \%} = \frac{\text{ml of alkali} \times N \times 20.0}{\text{mass, g of sample}} \quad (3.7)$$

$$\text{Free fatty acid as palmitic, \%} = \frac{\text{ml of alkali} \times N \times 25.6}{\text{mass, g of sample}} \quad (3.8)$$

เมื่อ N = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- ปริมาณน้ำหนักตัวอย่าง = 9 กรัม
- ปริมาตรเอทานอล = 8 มิลลิลิตร
- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 0.4 มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 0.017 โมลต่อลิตร

เมื่อนำค่าทั้งหมดแทนลงในสมการที่ 3.7 ซึ่งจะมีค่าดังนี้

$$\text{ร้อยละกรดไขมัน} = \frac{0.4 \times 0.017 \times 20.0}{9} = 0.015\%$$

### 5. การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การคำนวณปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะคำนวณจากการไตรเตรทของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

$$C_1V_1 = C_2V_2 \quad (3.9)$$

$C_1$  = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่หลังจากทำปฏิกิริยา

$C_2$  = ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

$V_1$  = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

$V_2$  = ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้

- ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนทำปฏิกิริยา = 0.102 N
- ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หลังจากทำปฏิกิริยา ( $V_1$ ) = 20 มิลลิลิตร
- ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ( $C_2$ ) = 0.322 N
- ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจากการไตรเตรท ( $V_2$ ) = 4 มิลลิลิตร

$$C_1 = \frac{C_2V_2}{V_1} = \frac{0.322 \times 4}{20}$$

ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือหลังทำปฏิกิริยา  $C_1 = 0.0644$  N

∴ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดปฏิกิริยา คือ

$$0.102 - 0.0644 = 0.00657 \text{ mol/dm}^3$$

จากนั้นแปลงหน่วยความเข้มข้นให้เป็นหน่วยกรัมที่เวลา 6 ชั่วโมง

$$= (0.00657 \times 20 \times 12 \times 14) \div 1000$$

$$= 0.0694 \text{ g}$$

จากสมการ  $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 \longrightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

จะได้

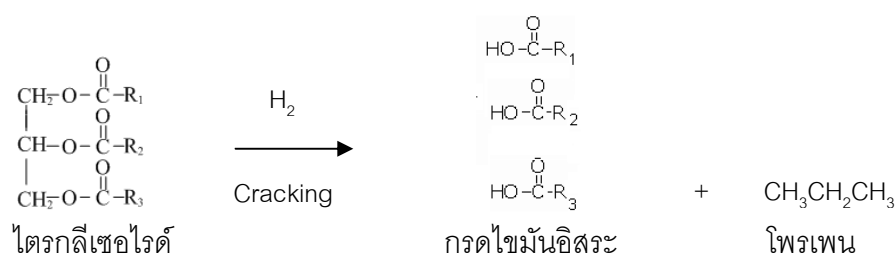
$$\frac{1}{2} \left( \frac{0.0694}{40} \right) = 1 \frac{\text{g.CO}_2}{44}$$

$$\text{g.CO}_2 = 0.0382 \text{ กรัม}$$



## 6. การคำนวณปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น

การคำนวณปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นในงานวิจัยนี้จะคำนวณเป็นร้อยละ โดยโมล โดยคำนวณจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไปต่อจำนวนโมลจากสารตั้งต้นเริ่มต้น โดยมีหลักการคำนวณ คือ ไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลจะแตกตัวออกเป็นกรดไขมันอิสระ 3 โมล และโพรเพน 1 โมล ดังนั้นเมื่อนำจำนวนไตรกลีเซอไรด์ 1 โมลมาคูณด้วย 3 ก็จะได้เท่ากับจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระที่อยู่ในไตรกลีเซอไรด์



การเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นคือ จำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนทั้งหมดที่เกิดขึ้น นำมาหารด้วยสามจะมีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของไตรกลีเซอไรด์ และเมื่อนำมาหารด้วยจำนวนโมลของไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้นก็จะได้ค่าการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น ดังสมการที่ 3.10

$$\frac{\text{จำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนทั้งหมด} / 3}{\text{จำนวนโมลของไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น}} \times 100 = \% \text{ conversion} \quad (3.10)$$

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

คำนวณจำนวนโมลของสารตั้งต้น

$$\begin{array}{lcl}
 \text{โดย} & \text{น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม} & = 641.8 \text{ กรัมต่อโมล} \\
 & \text{ปริมาณไตรกลีเซอไรด์เริ่มต้น} & = 166.20 \text{ กรัม} \\
 & \text{จำนวนโมลของสารตั้งต้น} & = 166.2 \div 641.8 \\
 & & = 0.259 \text{ โมล}
 \end{array}$$

นำค่าน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่ได้จากเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟีมาหารจำนวนโมลและหารด้วยสาม จะได้ค่าของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนี้

$$0.4322 \div 3 = 0.1441 \text{ โมล}$$

และเมื่อหาอัตราส่วนโมลของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนแปลงไปต่อโมลของสารตั้งต้น ก็จะได้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น ดังสมการที่ 3.10

$$\frac{0.1441}{0.259} \times 100 = 55.62 \%$$

### 7. การคำนวณปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

- ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมีหลักการคำนวณคือ จำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่หารด้วยจำนวนโมลของกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ก่อนทำปฏิกิริยา ดังสมการที่ 3.11

$$\frac{\text{จำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่}}{\text{จำนวนโมลของกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ก่อนทำปฏิกิริยา}} \times 100 = \% \text{HDO} \quad (3.11)$$

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของโคดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

$$\text{จำนวนโมลของสารประกอบอัลเคน } C_{12} = 0.2286$$

$$\text{จำนวนโมลของกรดไขมันก่อนทำปฏิกิริยา } C_{12} = 0.3774$$

คำนวณค่าร้อยละปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันตามสมการที่ 3.11 ได้ค่า ดังนี้

$$\frac{0.2286}{0.3774} \times 100 = 60.57 \%$$

- ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน มีหลักการคำนวณ คือ จำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่หารด้วยจำนวนโมลของกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ก่อนทำปฏิกิริยา ซึ่งในงานวิจัยนี้จะคิดสองปฏิกิริยานี้ร่วมกันเนื่องจากว่าไม่สามารถวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ จึงไม่สามารถแยกผลิตภัณฑ์ทั้งสองปฏิกิริยาออกจากกันได้ และคำนวณได้ดังสมการที่ 3.12

$$\frac{\text{จำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่}}{\text{จำนวนโมลของกรดไขมันที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ก่อนทำปฏิกิริยา}} \times 100 = \begin{array}{l} \% \text{decarboxylation} \\ \&\text{decarbonylation} \end{array} \quad (3.12)$$

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ) ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

$$\text{จำนวนโมลของสารประกอบอัลเคน } C_{11} = 0.0224$$

$$\text{จำนวนโมลของกรดไขมันก่อนทำปฏิกิริยา } C_{12} = 0.3774$$

คำนวณค่าร้อยละปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน โดยแทนค่าลงในสมการที่ 3.12 ได้ค่า ดังนี้

$$\frac{0.0224}{0.3774} \times 100 = 5.94 \%$$

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 300 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 450 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และความเร็วเชิงสเปซของของเหลว 1.0 ชั่วโมง<sup>-1</sup> ในระหว่างการทดลองจะทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 6 ชั่วโมง โดยตัวอย่างที่ได้จะมีทั้งสถานะของเหลวและก๊าซ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวนั้นจะนำมาวิเคราะห์หาการกระจายตัวของสารประกอบประเภทอัลเคน ร้อยละของกรดไขมัน ปริมาณน้ำ และความหนาแน่น ส่วนผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสถานะก๊าซจะทำการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ผลการทดลองแบ่งออกเป็นหัวข้อดังต่อไปนี้

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น

4.2 ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์

##### 4.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

##### 4.2.3 ผลกระทบของความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

4.3 ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์

4.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

4.3.2 ผลกระทบของความดันต่อปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สารตั้งต้น

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์ม ซึ่งเป็นน้ำมันที่สกัดมาจากส่วนของเมล็ดในของผลปาล์มโดยผ่านกระบวนการกลั่นทำให้บริสุทธิ์ ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้องจะเป็นของเหลวใส และเป็นไขได้ที่อุณหภูมิต่ำ มีสีเหลืองอ่อน และมีองค์ประกอบของกรดไขมันหลายชนิด ซึ่งสามารถวิเคราะห์การกระจายตัวของกรดไขมันได้ในรูปของเอสเทอร์ของกรดไขมันจากเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี และสามารถหาน้ำหนักโมเลกุลได้จากค่าสะพานนิฟิเคชันและค่าของกรด ค่าองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันเมล็ดในปาล์มแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของกรดไขมันและคุณสมบัติของสารตั้งต้น

ชนิดกรดไขมัน	สูตรโมเลกุล	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Capric acid	C 10:0	1.73
Lauric acid	C 12:0	48.58
Myristic acid	C 14:0	17.10
Palmitic	C 16:0	9.76
Stearic acid	C 18:0	2.32
Oleic acid	C 18:1	17.80
Linoleic acid	C 18:2	2.72
<hr/>		
ปริมาณกรดไขมันอิ่มตัว		79.49
ปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว		20.52
<hr/>		
ค่าของกรด		0.239
ปริมาณกรดไขมันอิสระ		0.087
ค่าสปอนนิฟิเคชัน		262.27
น้ำหนักโมเลกุล		641.8
ค่าความหนาแน่น		0.916

\*ค่าของกรด: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง)

\*\*ค่าสปอนนิฟิเคชัน: (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมของตัวอย่าง)

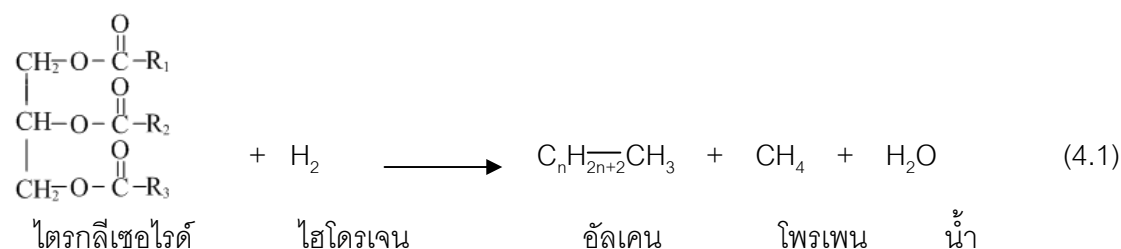
\*\*\*ความหนาแน่น: (กรัมต่อมิลลิลิตร)

\*\*\*\*น้ำหนักโมเลกุล: (กรัมต่อโมล)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันที่อยู่ในน้ำมันเมล็ดในปาล์มด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟีดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าน้ำมันเมล็ดในปาล์มมีองค์ประกอบชนิดของกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนอยู่ในช่วง 10 ถึง 18 อะตอม โดยองค์ประกอบหลักจะเป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 12 14 และ 16 อะตอม และกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอม จากการวิเคราะห์น้ำมันเมล็ดในปาล์ม จะมีปริมาณของกรดไขมันอิสระเท่ากับร้อยละ 0.087 ความหนาแน่น 0.916 กรัมต่อมิลลิลิตร และมีน้ำหนักโมเลกุล 641.8 กรัมต่อโมล

จากการทดลอง เมื่อนำน้ำมันเมล็ดในปาล์มทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ทดลองในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์แล้ว ทดลองที่สภาวะความดันและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน พบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสถานะก๊าซและสถานะของเหลวซึ่งผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น คือ สารประกอบอัลเคน น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนและน้ำที่เก็บไว้ในขวดเก็บสารตัวอย่างจะแยกชั้นกันอยู่อย่างชัดเจน โดยที่น้ำจะอยู่ชั้นล่างและสารประกอบอัลเคนจะอยู่ชั้นบน และเมื่อแยกเอาสารประกอบอัลเคนไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟีเพื่อหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอน พบสารประกอบอัลเคนอยู่หลายชนิด (ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ถึง ภาคผนวก ค.) ได้แก่ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ), เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ), เฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{38}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ )

จากการทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม อะตอมของออกซิเจนที่อยู่ในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์จะถูกกำจัดออกมาในรูปของน้ำ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันที่อยู่ในโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ดังสมการที่ 4.1



จากการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโตกราฟี พบสารประกอบอัลเคนที่ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน คือ สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมไม่

เท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันที่อยู่ในโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{38}$ ) และพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชัน และนอกจากนี้ยังพบว่ามีการเกิดไขมันอิสระเกิดขึ้นอีกด้วย

จากการนำผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนไปวิเคราะห์หาค่าปริมาณของกรดไขมันอิสระตามมาตรฐาน AOCS Ca-5a-40 พบค่าปริมาณของกรดไขมันอิสระเกิดขึ้นดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระ

อุณหภูมิ	ปริมาณกรดไขมันอิสระ (%FFA)				
	300°C	320°C	340°C	360°C	380°C
ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	5.58	0.41	0.02	0.015	0.015
ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	2.14	0.12	0.02	0.015	0.015
ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว	2.14	0.14	0.02	0.015	0.015

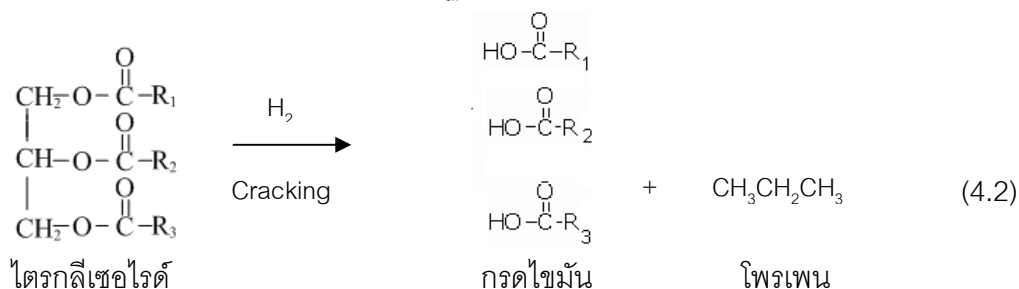
จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของกรดไขมันอิสระจะมีค่าสูงเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นก่อนทำปฏิกิริยา คือ ร้อยละ 0.087 ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 320 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการเกิดไขมันอิสระเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันเมล็ดในปาล์มกลายเป็นกรดไขมันอิสระ และจะเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปได้ซ้ำ จึงทำให้ผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 320 องศา มีปริมาณของกรดไขมันอิสระสูง

จากงานวิจัยของ Veriansyah และคณะ (2012) ที่ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซึ่งของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 6 ชนิดคือ นิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ โคบอลต์โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ พาราดีมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ นิกเกิลบนตัวรองรับซิลิกอนออกไซด์ รูทีเนียมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ และแพททินัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรโปรเซสซึ่งของน้ำมันถั่วเหลืองจะเริ่มต้นจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนเข้าไปในพันธะคู่ของสายโซ่ไตรกลีเซอไรด์ ได้แก่ กรดปาล์มมิโทเลอิก (C16:1), กรดโอเลอิก (18:1), กรดไลโนเลอิก (18:2) ทำให้พันธะคู่ของกรดไขมันที่อยู่ในไตรกลีเซอไรด์อิมตัวจากการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจน จากนั้นโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์อิมตัวจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัว (cracking)

ออกเป็นกรดไขมันอิสระ และโพรเพน ซึ่งจะให้น้ำมันมีค่าความเป็นกรดสูงในช่วงอุณหภูมิ 270 ถึง 330 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรโปรเซสซึ่งต่อไป และจะพบปริมาณของกรดไขมันอิสระในปริมาณน้อยมาก

เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Huber และคณะ (2007) ที่ศึกษากระบวนการไฮโดรที่ติดตั้งของน้ำมันดอกทานตะวัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์แล้ว ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง อุณหภูมิที่ใช้คือ 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส และความดันที่ใช้คือ 50 บาร์ พบว่ากลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันในน้ำมันพืชเริ่มจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไตรกลีเซอไรด์ทำให้พันธะคู่ของกรดไขมันที่อยู่ในไตรกลีเซอไรด์อิมตัวจากการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจน และจะเกิดปฏิกิริยาแตกตัวเป็นสารประกอบโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และกรดไขมันอิสระ ซึ่งผลการวิเคราะห์ค่าของกรดพบว่ามีความสูง จากนั้นกรดไขมันอิสระจะทำปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปกับก๊าซไฮโดรเจน เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นสารประกอบอัลเคนและน้ำ และพบว่าค่าของกรดในผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีค่าน้อยมาก

ผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระสรุปได้ว่า ไตรกลีเซอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นกรดไขมันอิสระ และโพรเพนขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่ำคือ 300 ถึง 320 องศาเซลเซียส ซึ่งจะให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง และจะเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปได้ซ้ำ ดังสมการที่ 4.2



จากผลการวิเคราะห์การทดลองพบสารผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่คือ โดดีเคน ( $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ ), เตตระดีเคน ( $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ ), เฮกซะดีเคน ( $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ ) และออกตะดีเคน ( $\text{C}_{18}\text{H}_{40}$ ) เกิดจากปฏิกิริยาของกรดไขมันอิสระที่สลายตัวจากไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันเมล็ดในปาล์มเข้าทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันขึ้น เกิดเป็นผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนเป็นเลขคู่ และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม และไม่พบสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบอัลคีนเกิดขึ้นจากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดจาก



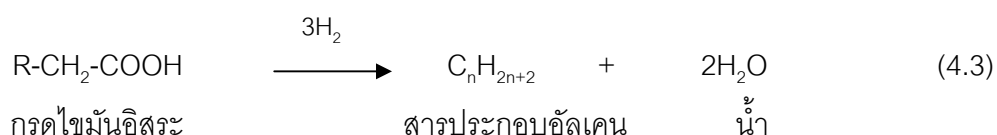
กรดไขมันที่มีพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอมในโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม ซึ่งในที่นี้คือ กรดโอเลอิก (C18:1) และ กรดไลโนลีนิก (C18:2) ทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน ทำให้พันธะที่ไม่อิ่มตัวของกรดโอเลอิกและกรดไลโนลีนิกเกิดเป็นพันธะที่อิ่มตัวจากการรวมตัวกันกับก๊าซไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จึงทำให้ไม่พบสารประกอบอัลคีนในงานวิจัยนี้

นอกจากนั้นยังพบผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลคีนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่คือ อัลดีเคน (C<sub>11</sub>H<sub>24</sub>) ไตรดีเคน (C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>) เพนตะดีเคน (C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>) และเฮปตะดีเคน (C<sub>17</sub>H<sub>36</sub>) และยังพบผลิตภัณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นด้วย ซึ่งจากงานวิจัยของ Huber และคณะ (2007) พบว่ามีปฏิกิริยาข้างเคียงอีกสองปฏิกิริยาเกิดขึ้นคือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดขึ้นพร้อมกับปฏิกิริยาหลักคือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันด้วย ซึ่งทั้งสองปฏิกิริยานี้จะได้ผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลคีนที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นเลขคี่เนื่องจากเสียคาร์บอนไปหนึ่งอะตอมจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ทำให้เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลคีนที่มีคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ คือ อัลดีเคน (C<sub>11</sub>H<sub>24</sub>) ไตรดีเคน (C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>) เพนตะดีเคน (C<sub>15</sub>H<sub>32</sub>) และเฮปตะดีเคน (C<sub>17</sub>H<sub>36</sub>) เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน โดยมีผลิตภัณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม และคาดว่า จะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันขึ้นด้วย แต่ไม่สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจนเนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์หาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้

#### 4.2 ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์

ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันนั้นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากันของกรดไขมันที่เกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์กับก๊าซไฮโดรเจน โดยออกซิเจนหนึ่งอะตอมภายในโมเลกุลของกรดไขมันจะถูกกำจัดออกจากการรวมตัวของไฮโดรเจน 2 อะตอม ซึ่งจะรวมตัวกันเป็นโมเลกุลของน้ำ ซึ่งกรดไขมันอิสระ 1 โมลจะทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจน 3 โมล แล้วเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลคีน 1 โมล และน้ำ 2 โมล ดังสมการที่ 4.3 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันพืช โดยสารประกอบอัลคีนที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ และมีจำนวนเท่ากับจำนวนคาร์บอนอะตอมของกรดไขมันเริ่มต้น



#### 4.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

การทำปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเกิดสารผลิตภัณฑ์หลัก คือ สารประกอบอัลเคนที่มีคาร์บอนอะตอม 12 14 16 และ 18 อะตอมเกิดขึ้นในปริมาณมาก และมีน้ำเกิดขึ้นด้วย ซึ่งแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันขึ้น

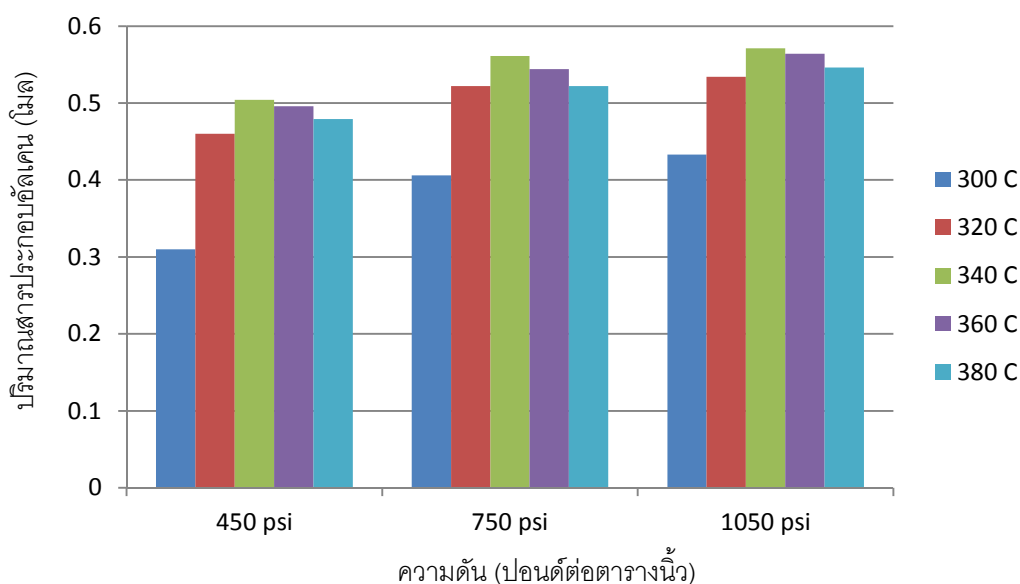
ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคน และน้ำในปริมาณน้อย และผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระมีค่าสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้น แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ไตรกลีเซอไรด์เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว ออกเป็นกรดไขมันอิสระ แต่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันต่อไปได้ช้ากว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากพบปริมาณน้ำและปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ เกิดขึ้นในปริมาณน้อย จากงานวิจัยของ Simacek และคณะ (2009) ได้ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิงของน้ำมันเมล็ดเรพ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิล โมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียม ออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 260 ถึง 340 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 7 เมกะปาสคาล และความเร็วเชิงสเปซของของเหลวคือ 1 ต่อชั่วโมง จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 260 ถึง 300 องศาเซลเซียส พบปริมาณไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาปนอยู่ในผลิตภัณฑ์สูงและมีปริมาณผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนน้อย แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์จะมีปริมาณไตรกลีเซอไรด์และกรดไขมันอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยาปนอยู่เล็กน้อย และที่อุณหภูมิสูงกว่า 310 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีเฉพาะสารประกอบอัลเคนเท่านั้นโดยไม่พบกรดไขมันอิสระและสารตั้งต้นที่เหลือในผลิตภัณฑ์อยู่แล้ว

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มในการเกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนและน้ำ ที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิ เพราะที่อุณหภูมิสูง น้ำมันเมล็ดในปาล์มจะทำปฏิกิริยาได้ดี และจากผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระพบว่า มีแนวโน้มลดลงจนเหลือค่าน้อยมากดังรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียส กรดไขมันอิสระที่แตกตัวจากปฏิกิริยาสลายตัวของไตรกลีเซอไรด์สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ดีขึ้น และจากผลการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระแสดงให้เห็นว่าจะมีค่าลดลงจนเหลือค่าน้อยมาก ซึ่งสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Huber และคณะ (2007) ซึ่งพบว่าค่าของกรดในน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันมีค่าลดลงจาก 2.44 เป็น 0.00 เมื่อเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการ

ไฮโดรทรีตติ้งที่อุณหภูมิ 300 ถึง 350 องศาเซลเซียส และจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ได้แก่ โดดีเคน (C12) เตตระดีเคน (C14) เฮกซะดีเคน (C16) และออกตะดีเคน (C18) และปริมาณน้ำจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ และจะมีค่าคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง

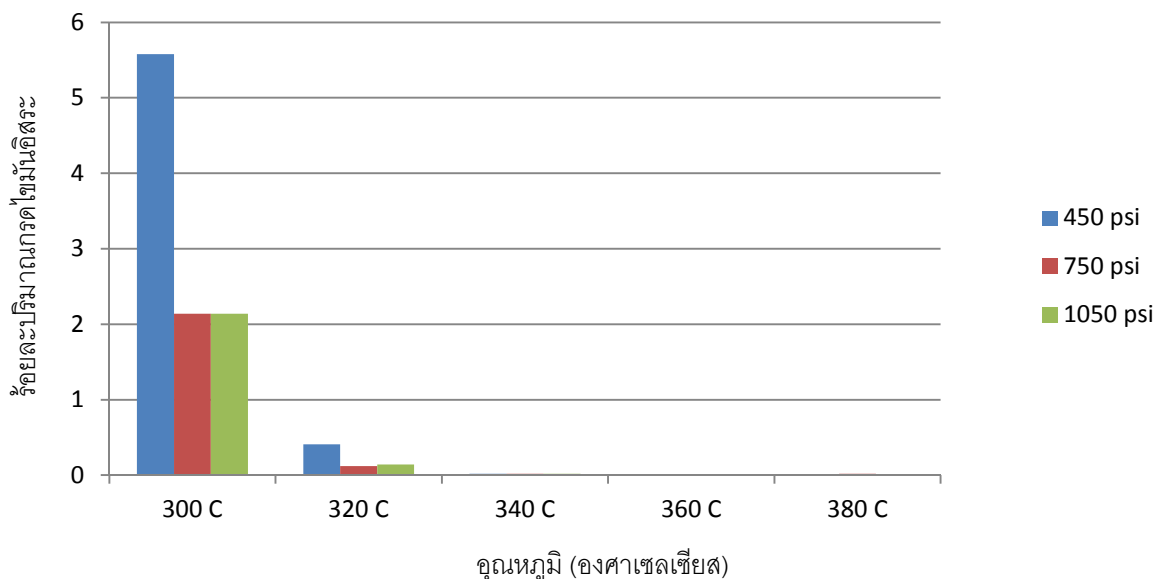
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณของสารประกอบอัลเคนที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่างกัน โดยเปรียบเทียบที่ความดันเดียวกัน ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณสารประกอบอัลเคนต่ำที่สุด และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิโดยมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Charoenwong (2010) ที่ศึกษาการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียริน และกรดไขมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ความดันที่ใช้คือ 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิที่ใช้คือ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน และปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสามารถเกิดขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ เช่น ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ คือ 12 14 16 และ 18 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน มีปริมาณ 0.274 โมล และมีสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ คือ 11 13 15 และ 17 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน มีปริมาณ 0.037 โมล ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ คือ 12 14 16 และ 18 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน มีปริมาณ 0.425 โมล และมีสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ คือ 11 13 15 และ 17 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน มีปริมาณ 0.048 โมล ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ คือ 12 14 16 และ 18 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน มีปริมาณ 0.446 โมล และมีสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ คือ 11 13 15 และ 17 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน มีปริมาณ 0.063 โมล ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม

เป็นเลขคู่ คือ 12 14 16 และ 18 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน มีปริมาณ 0.420 โมล และมีสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ คือ 11 13 15 และ 17 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน มีปริมาณ 0.071 โมล และที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ คือ 12 14 16 และ 18 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน มีปริมาณ 0.40 โมล และมีสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ คือ 11 13 15 และ 17 อะตอมที่เกิดจากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน มีปริมาณ 0.083 โมล



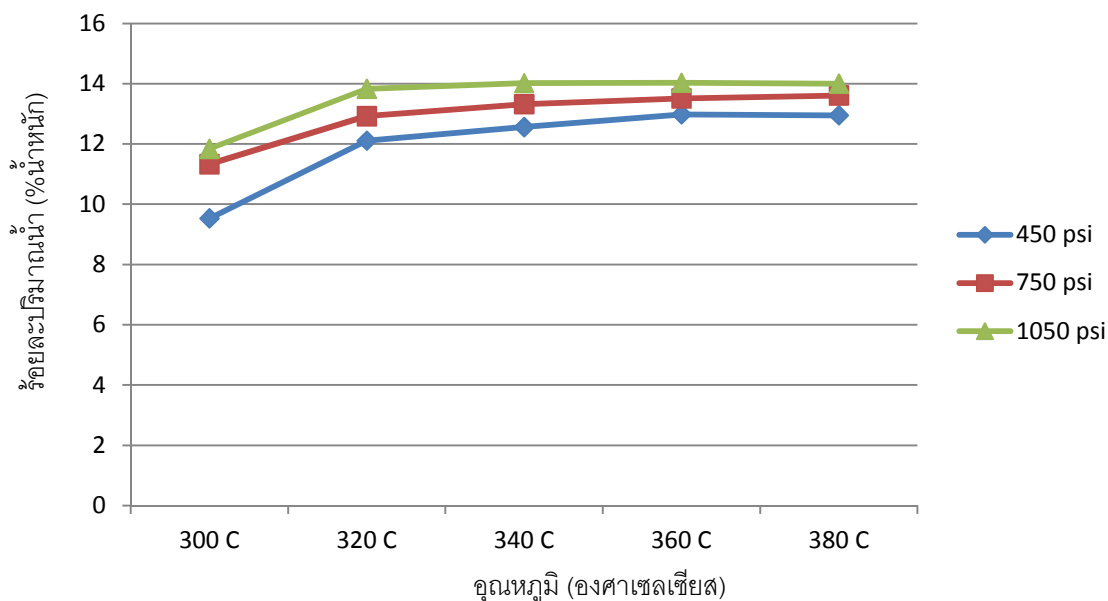
**รูปที่ 4.1** ปริมาณสารประกอบอัลเคนที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณของกรดไขมันอิสระจะลดลงจนเหลือค่าน้อยมาก เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีขึ้น และที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณของกรดไขมันอิสระสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำ ไตรกลีเซอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเกิดเป็นกรดไขมันอิสระขึ้น และจะเกิดปฏิกิริยาในขั้นต่อนต่อไปได้ช้า ดังนั้นจึงมีปริมาณกรดไขมันอิสระสูง



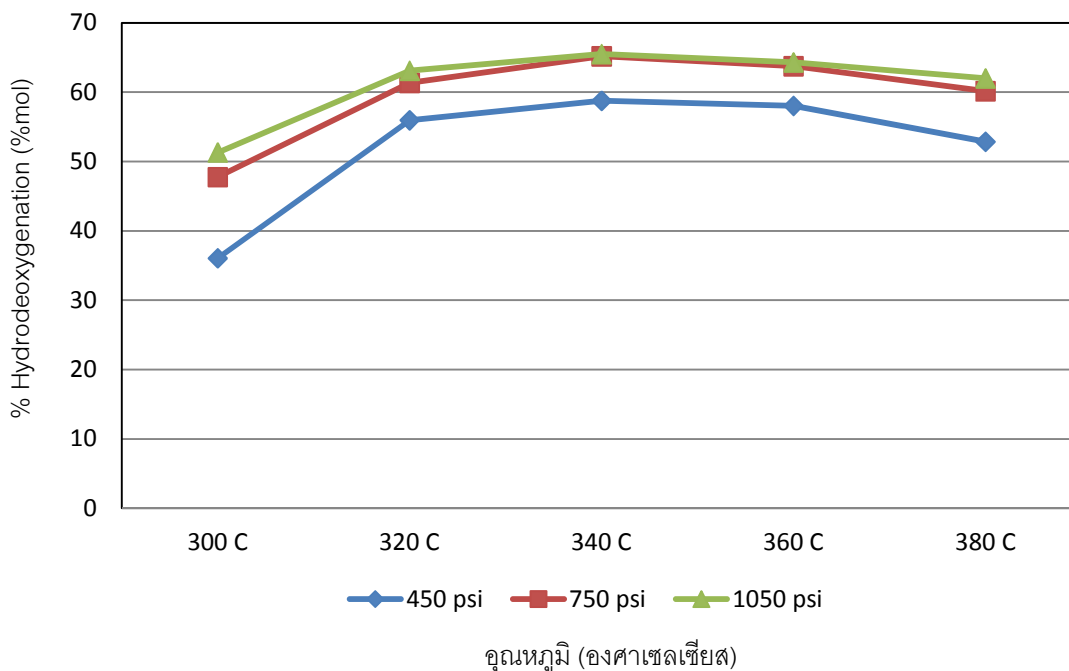
รูปที่ 4.2 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำจะมีแนวโน้มสูงขึ้น ซึ่งที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณน้ำเกิดขึ้นต่ำที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ และปริมาณน้ำจะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ร้อยละ 14.02



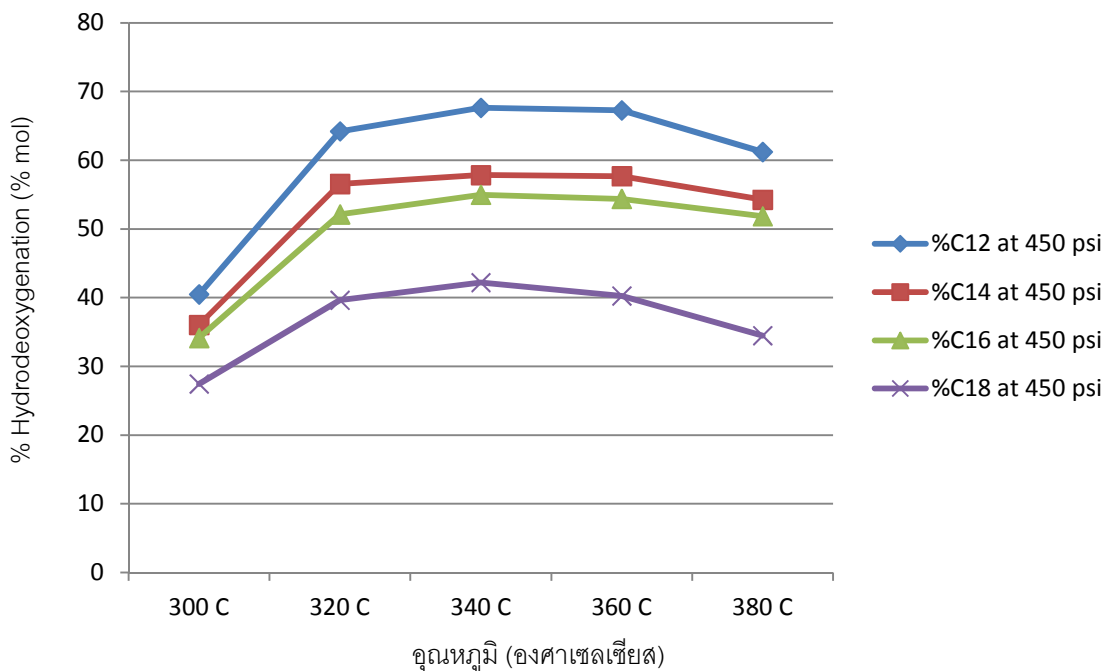
รูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ทั้งหมดต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ทั้งหมด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 340 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอุณหภูมิ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดี โดยปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ร้อยละ 65.49 และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 340 องศาเซลเซียส ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสลายตัว (Hydrocracking) จึงทำให้สารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการในปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์ปฏิกิริยาสลายตัวด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (ดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ง.) ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เกิดผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง คือ เฮกเซน ( $C_6H_{14}$ ) เฮปเทน ( $C_7H_{16}$ ) ออกเทน ( $C_8H_{18}$ ) โนเนน ( $C_9H_{20}$ ) และดีเคน ( $C_{10}H_{22}$ ) ขึ้น ซึ่งผลิตภัณฑ์โนเนนและดีเคนนั้นเกิดจากปฏิกิริยาสลายตัวด้วย เนื่องจากพบว่าปริมาณสารประกอบอัลเคนของโนเนนและดีเคนที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณสูงกว่าปริมาณกรดไขมันเริ่มต้น คือ 0.029 โมล โดยที่จำนวนโมลของกรดไขมันเริ่มต้นคือ 0.0133 โมล ทำให้สรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมระหว่าง 6 ถึง 10 อะตอมนั้นเกิดจากปฏิกิริยาสลายตัว เมื่อนำมาหาค่าร้อยละการเปลี่ยนของสารตั้งต้นพบว่ามียุทธศาสตร์ 93.55 และพบว่ามีการเกิดสารประกอบอัลเคนแบบอะลิไซคลิก (alicyclic hydrocarbon) เกิดขึ้นด้วย เช่น ไซโคลเฮกเซน (cyclohexane) ไซโคลเพนเทน (cyclopentane) เป็นต้น ซึ่งพบว่าเกิดขึ้นในปริมาณน้อยมาก คือ ร้อยละ 0.74



รูปที่ 4.4 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส

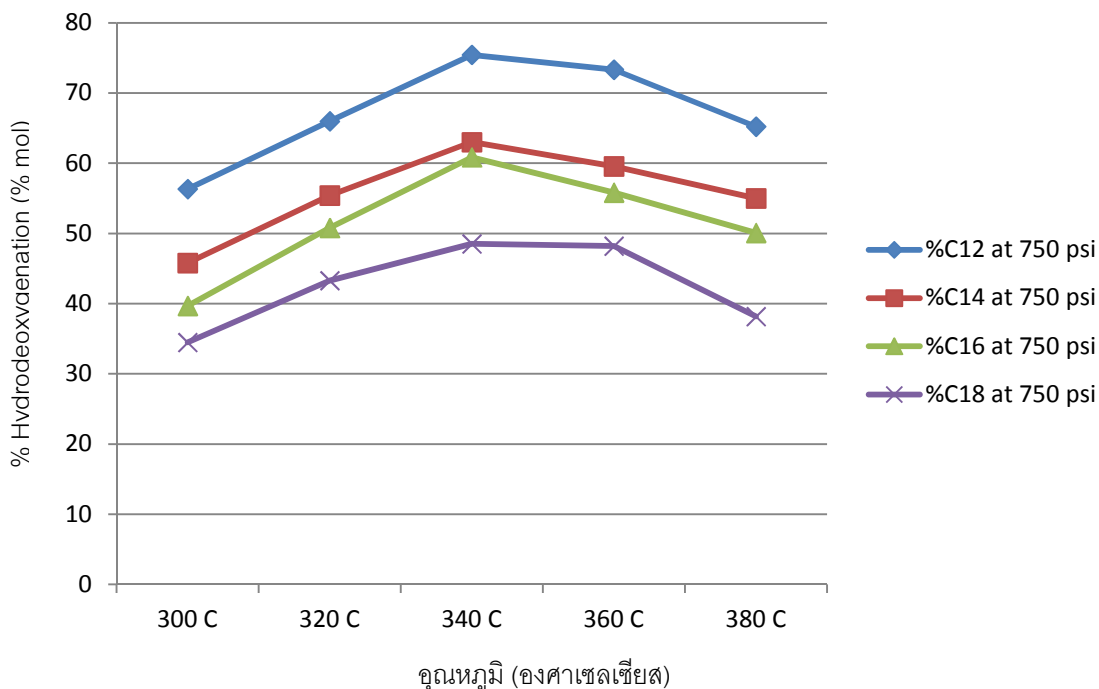
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ) เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ) เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ ) ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของโดดีเคน จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส โดยเกิดขึ้นร้อยละ 67.64 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ เตตระดีเคน เฮกซะดีเคน และออกตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และที่อุณหภูมิสูงกว่า 340 องศาเซลเซียสจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสลายตัวของสารประกอบอัลเคน จึงทำให้สารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง



รูปที่ 4.5 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ณ ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

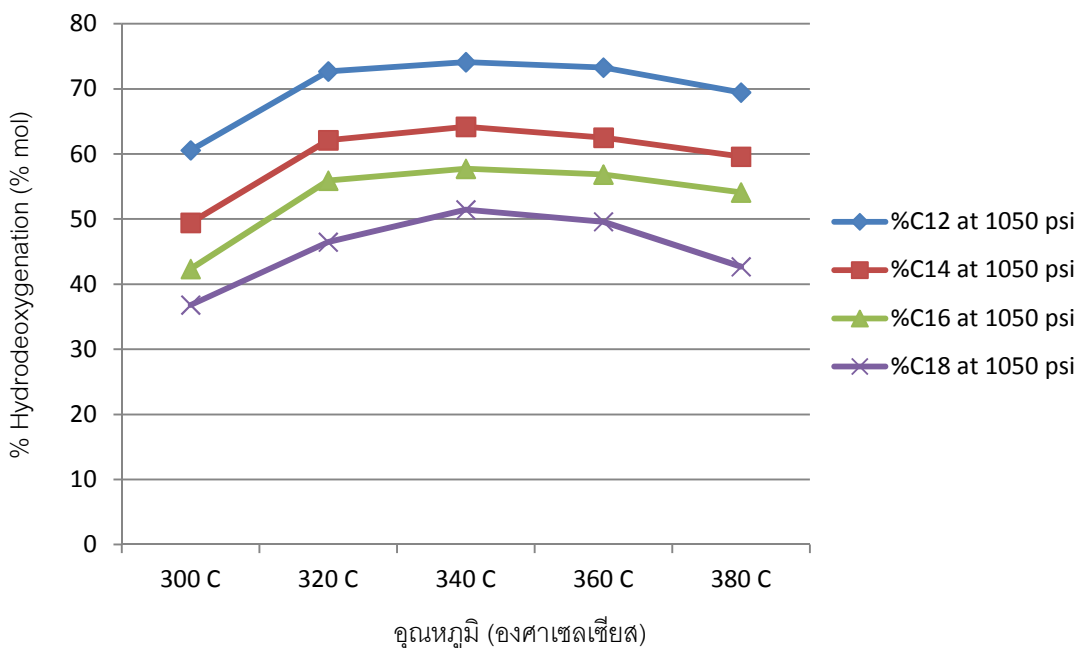
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ) เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ) เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ ) ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของโดดีเคน จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส โดยเกิดขึ้นร้อยละ 75.44 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ เตตระดีเคน เฮกซะดีเคน และออกตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และที่อุณหภูมิสูงกว่า 340 องศาเซลเซียสจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสลายตัวของสารประกอบอัลเคน จึงทำให้สารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง





รูปที่ 4.6 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ณ ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.7 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ) เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ) เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ ) ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของโดดีเคน จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส โดยเกิดขึ้นร้อยละ 74.10 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ เตตระดีเคน เฮกซะดีเคน และออกตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และที่อุณหภูมิสูงกว่า 340 องศาเซลเซียสจะมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสลายตัวของสารประกอบอัลเคน จึงทำให้สารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง



รูปที่ 4.7 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ณ ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

#### 4.2.3 ผลของความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน

ความดันเป็นอีกตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน เนื่องจากเมื่อค่าความดันเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ปริมาณสารประกอบอัลเคนเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน จากผลการทดลองปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มโดยใช้ความดันที่แตกต่างกัน คือ 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบปริมาณของผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนและน้ำ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน และยังพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นด้วย จึงแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันขึ้น และคาดว่า จะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันขึ้นด้วย แต่ไม่สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจนเนื่องจากไม่สามารถวิเคราะห์หาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ โดยปริมาณของผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคน และน้ำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความดัน

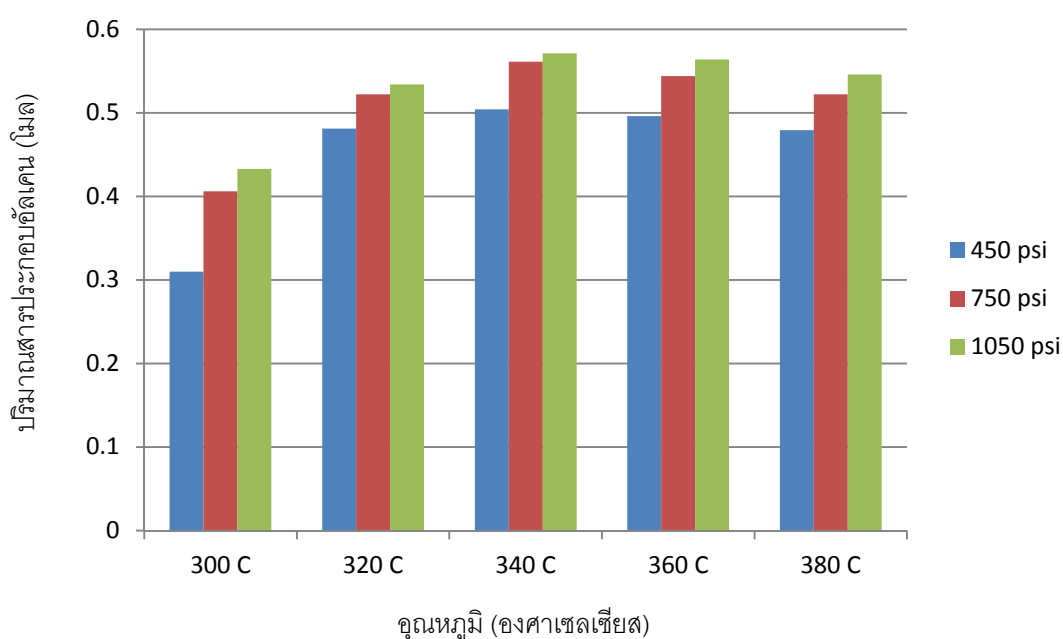
ผลการทดลองที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แสดงให้เห็นว่าเกิดสารประกอบอัลเคน น้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้น โดยจากผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระแสดงให้เห็นว่าจะมีค่าสูงที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แต่จะมีค่าลดลงจนเหลือค่าน้อยมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังรูปที่ 4.9 และมีปริมาณสารประกอบอัลเคนรวมน้อยกว่าที่ความดันสูง แสดงให้เห็นว่าที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ไตรกลีเซอไรด์เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออกเป็นกรดไขมันอิสระ และจะเกิดปฏิกิริยาในขั้นต่อนต่อไปได้ซ้ำ เนื่องจากพบว่ามีปริมาณสารประกอบอัลเคนและน้ำ

เกิดขึ้นน้อยกว่าที่ความดันสูง ดังรูปที่ 4.10 และยังเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันขึ้นด้วย เนื่องจากผลการวิเคราะห์หาผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนพบสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเป็นเลขคู่คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) เกิดขึ้นและยังพบผลิตภัณฑ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นด้วย และคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันขึ้นด้วย แต่ในการทดลองไม่สามารถตรวจสอบหาปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้

ผลการทดลองที่ความดัน 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว แสดงให้เห็นว่าเกิดสารประกอบอัลเคน และน้ำในปริมาณที่สูงขึ้น และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นด้วย โดยจากผลการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระแสดงให้เห็นว่ามีค่าลดลงเมื่อความดันสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ปริมาณสารประกอบอัลเคน และปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดัน เพราะภายใต้สภาวะความดันสูงน้ำมันเมล็ดในปาล์มจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีเนื่องจากพบปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ได้แก่ โคดีเคน ( $C_{12}$ ) เตตระดีเคน ( $C_{14}$ ) เฮกซะดีเคน ( $C_{16}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}$ ) มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดัน และมีปริมาณน้ำเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่เกิดขึ้น คือ อัลดีเคน ( $C_{11}$ ) ไตรดีเคน ( $C_{13}$ ) เพนตะดีเคน ( $C_{15}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}$ ) ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดัน ดังรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้สูงขึ้น และคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันขึ้นพร้อมกันด้วย แต่ในการทดลองไม่สามารถตรวจสอบหาปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้

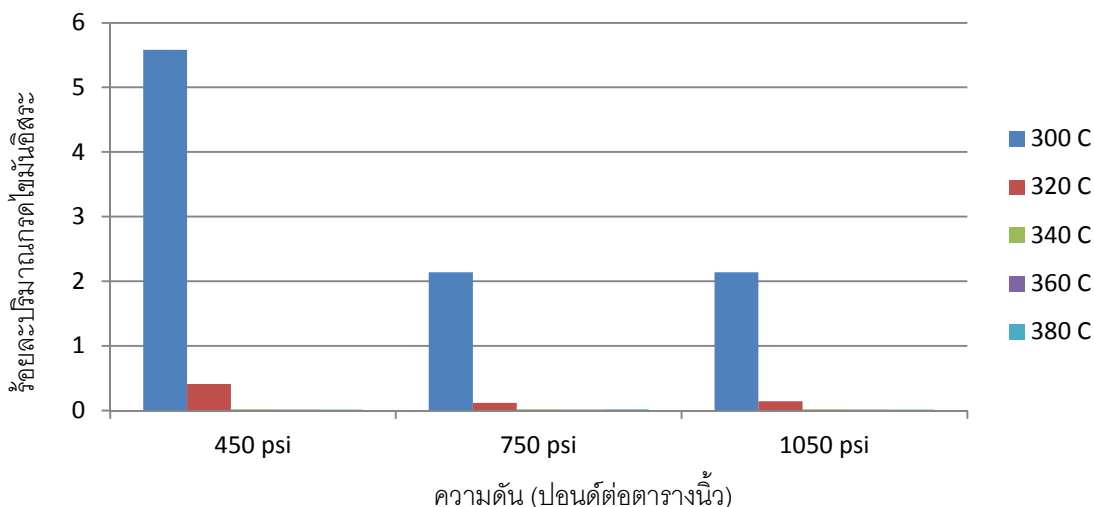
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นการเปรียบเทียบปริมาณผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่เกิดขึ้นที่ความดันต่างกัน โดยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเท่ากัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณสารประกอบอัลเคนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีขึ้นเมื่อความดันสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sankaranarayanan และคณะ (2011) ที่ศึกษากระบวนการไฮโดรโปรเซสซิ่งของน้ำมันเมล็ดดอกทานตะวันผสมกับน้ำมันก๊าซที่อยู่ในน้ำมันดีเซล ที่อัตราส่วน 80 ต่อ 20 และ 60 ต่อ 40 โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 320 ถึง 350 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 30 ถึง 60 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม ผลการทดลองพบว่าร้อยละการเปลี่ยนของผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่ได้จะมีค่าเข้าใกล้ร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ความดัน 60 บาร์ และพบว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้นค่าร้อยละการเปลี่ยนของสารประกอบอัลเคนจะมีค่าสูงขึ้น

เช่นเดียวกับ Kwon และคณะ (2011) ที่ศึกษาปฏิกิริยาดีออกซิจีเนชันของเมทิลลอเรต และน้ำมันคาโนลา โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทำปฏิกิริยาที่ช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 400 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 18.25 ถึง 85.13 บาร์ จากผลการทดลองพบว่า ความดันที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา คือ 46.52 ถึง 47.90 บาร์ และที่ช่วงอุณหภูมิสูงคือ 350 ถึง 375 องศาเซลเซียส พบว่าการเกิดผลิตภัณฑ์อัลดีเคน และโดดีเคน มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



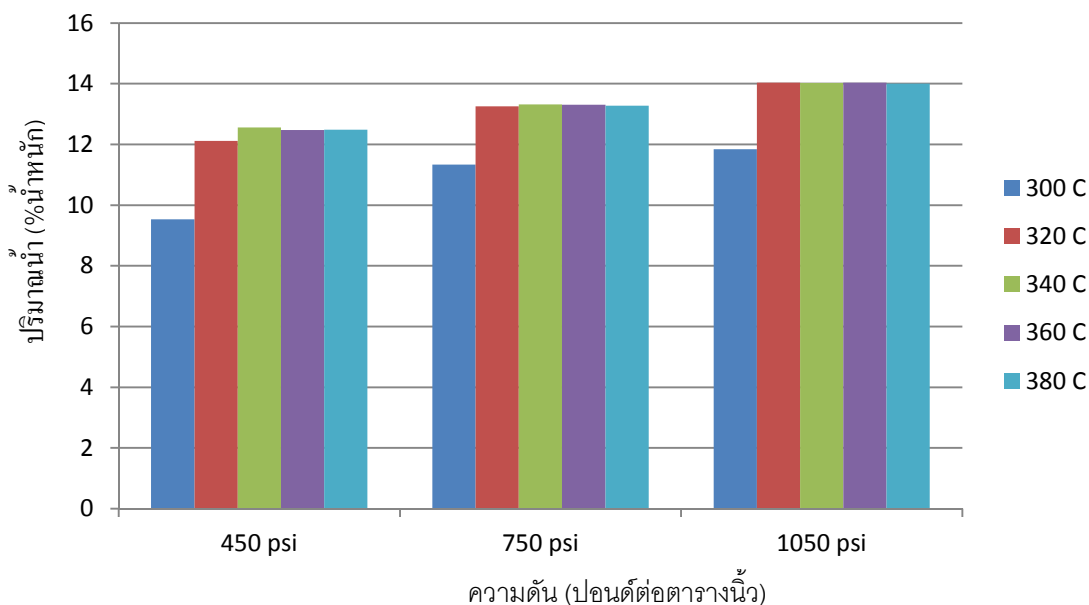
รูปที่ 4.8 ปริมาณสารประกอบอัลดีเคนที่ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันสูงขึ้น ปริมาณกรดไขมันอิสระจะมีแนวโน้มลดลงตามความดัน เนื่องจากการเพิ่มความดันจะทำให้ไตรกลีเซอไรด์เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวเป็นกรดไขมันอิสระ และเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปได้ดีขึ้น ทำให้เหลือปริมาณกรดไขมันอิสระในผลิตภัณฑ์ในปริมาณน้อยมาก



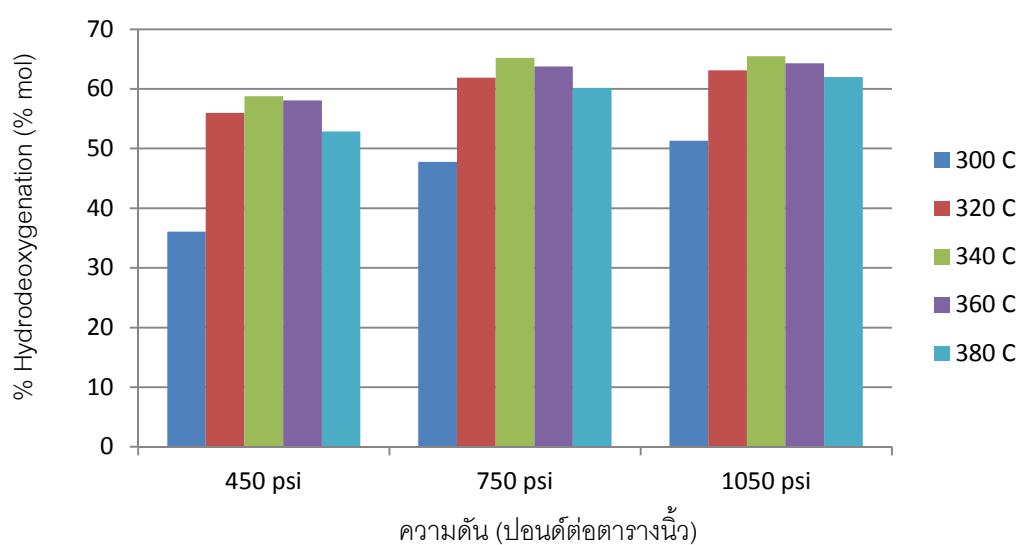
รูปที่ 4.9 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ความดัน 450 ถึง 1050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีปริมาณน้ำเกิดขึ้นต่ำที่สุด เนื่องจากปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชันจะเกิดได้ไม่ดีที่ความดันต่ำ และเมื่อเพิ่มความดันสูงปริมาณน้ำจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไดออกซิเจเนชันได้ดีที่ความดันสูง ซึ่งจะมีค่าสูงที่สุดที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ที่ร้อยละ 14.02



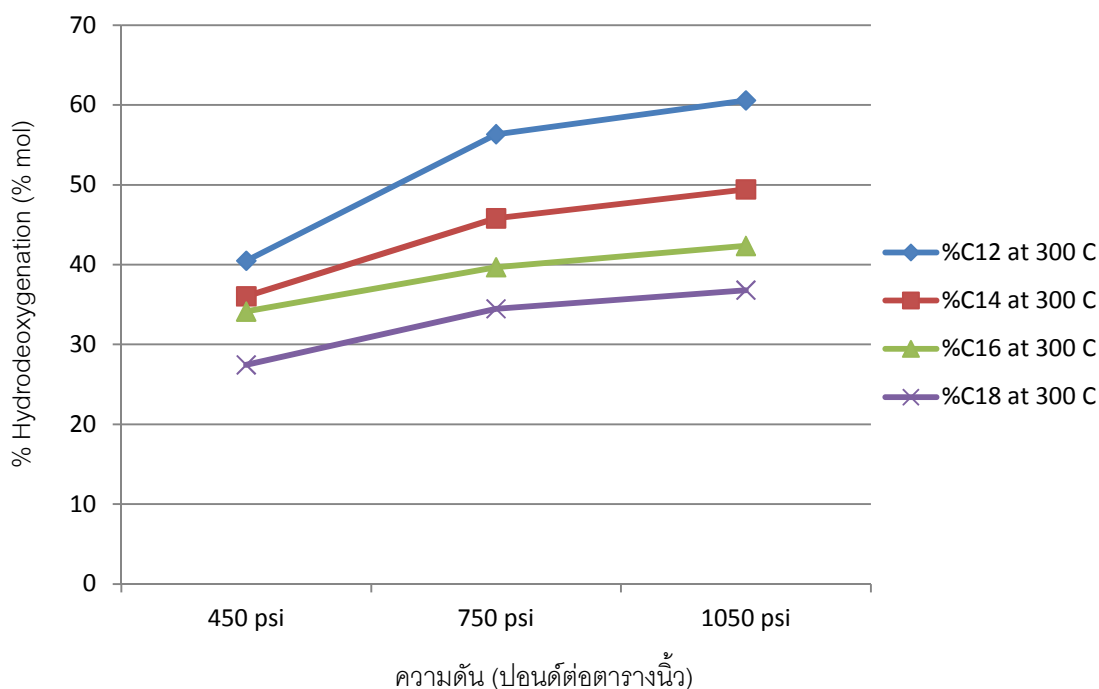
รูปที่ 4.10 ปริมาณน้ำที่ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ความดันที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ทั้งหมดต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ทั้งหมด จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิเดียวกันปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น โดยที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันสูงที่สุด คือ ร้อยละ 65.49



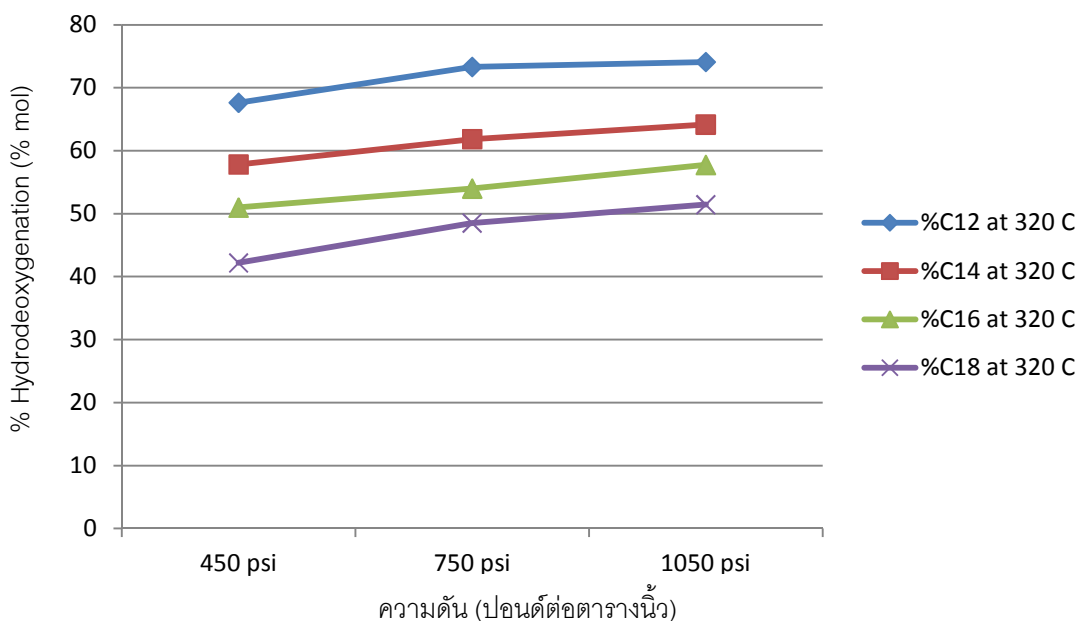
รูปที่ 4.11 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่แต่ละชนิด คือ โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ), เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ), เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ ) ซึ่งหาจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของโดดีเคนจะมีค่าสูงที่สุด โดยเกิดขึ้นร้อยละ 60.57 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ เตตระดีเคน เฮกซะดีเคน และออกตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



รูปที่ 4.12 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

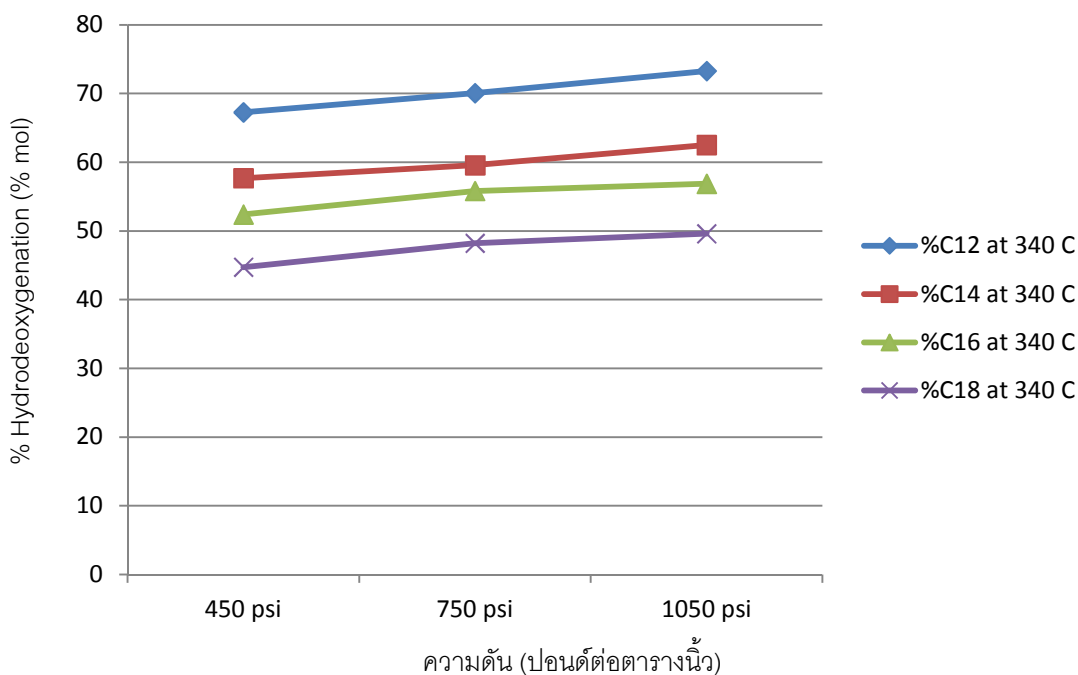
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.13 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่แต่ละชนิด คือ โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ), เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ), เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ ) ซึ่งหาจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของโดดีเคนจะมีค่าสูงที่สุด โดยเกิดขึ้นร้อยละ 74.10 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ เตตระดีเคน เฮกซะดีเคน และออกตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส

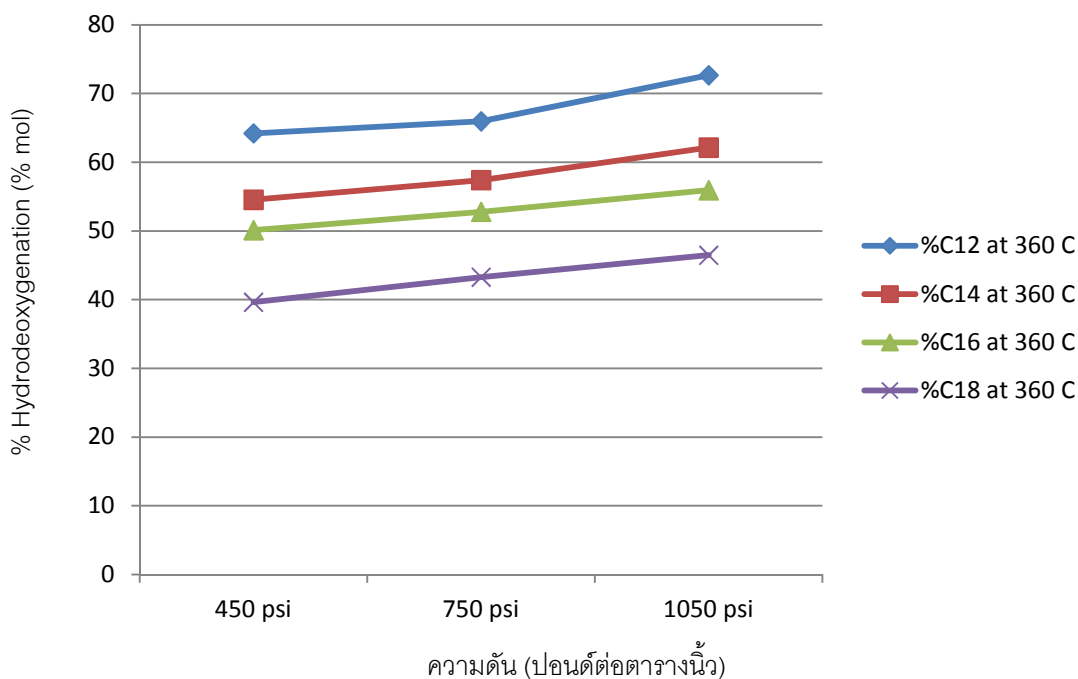
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.14 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่แต่ละชนิด คือ โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ), เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ), เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ ) ซึ่งหาจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของโดดีเคนจะมีค่าสูงที่สุด โดยเกิดขึ้นร้อยละ 73.28 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ เตตระดีเคน เฮกซะดีเคน และออกตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น





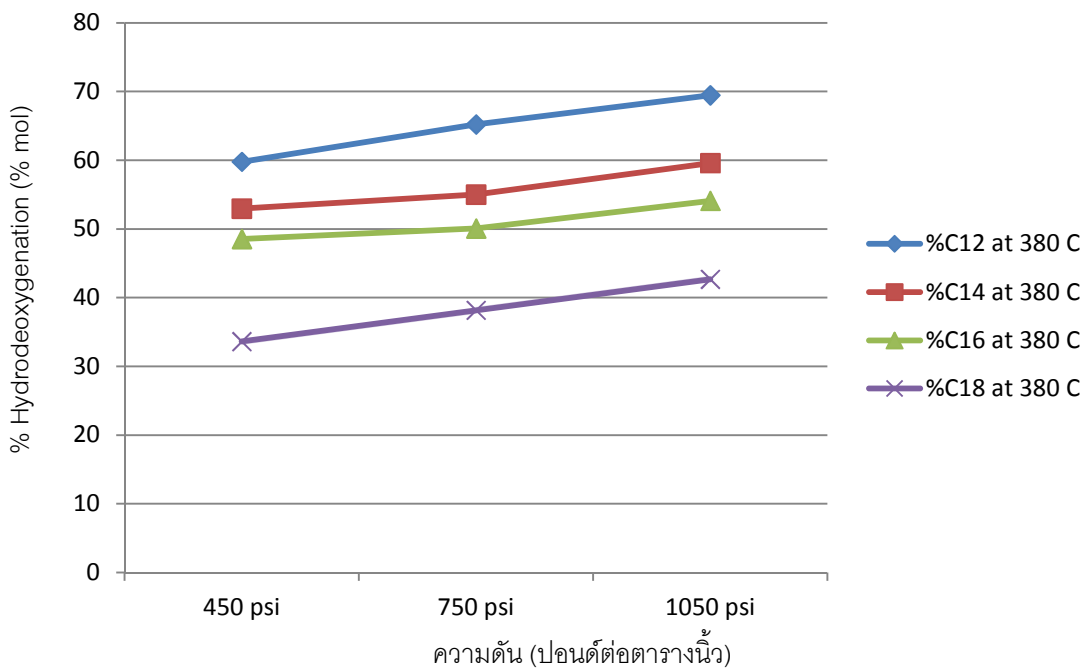
รูปที่ 4.14 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่แต่ละชนิด คือ โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ), เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ), เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ), และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ ) ซึ่งหาจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันของโดดีเคนจะมีค่าสูงที่สุด โดยเกิดขึ้นร้อยละ 72.68 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ เตตระดีเคน เฮกซะดีเคน และออกตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



รูปที่ 4.15 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส

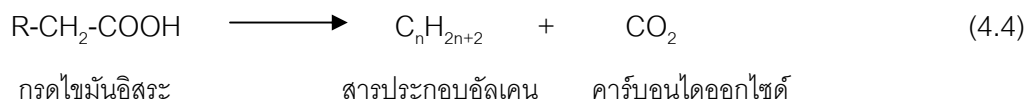
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่แต่ละชนิด คือ โดดีเคน ( $C_{12}H_{26}$ ), เตตระดีเคน ( $C_{14}H_{30}$ ), เฮกซะดีเคน ( $C_{16}H_{34}$ ) และออกตะดีเคน ( $C_{18}H_{40}$ ) ซึ่งหาจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของโดดีเคนจะมีค่าสูงที่สุด โดยเกิดขึ้นร้อยละ 69.46 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ เตตระดีเคน เฮกซะดีเคน และออกตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



รูปที่ 4.16 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส

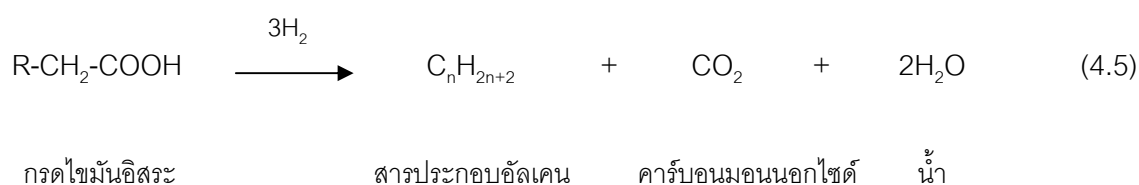
4.3 ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์

ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันเป็นปฏิกิริยาที่แยกออกซิเจนอะตอมออกจากโมเลกุลของกรดไขมันโดยไม่ต้องอาศัยก๊าซไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา โดยออกซิเจนหนึ่งอะตอมในโมเลกุลของกรดไขมันจะถูกกำจัดออกไป และเกิดเป็นผลิตภัณฑ์คือ สารประกอบอัลเคน และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนจะสูญเสียจำนวนคาร์บอนไปหนึ่งอะตอมเนื่องจากคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเป็นเลขคี่ ดังสมการที่ 4.4



ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิเลชัน เป็นปฏิกิริยาที่แยกออกซิเจนอะตอมออกจากโมเลกุลของกรดไขมันอิสระโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา ซึ่งกรดไขมันหนึ่งโมลจะทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนสาม โมลเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคน และมีน้ำและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม โดยที่ผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนจะสูญเสียจำนวนคาร์บอนไปหนึ่งอะตอม เนื่องจากคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ จึงทำให้มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเป็นเลขคี่ ดังสมการที่ 4.5



#### 4.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถแยกปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันออกจากกันได้ เนื่องจากไม่มีเครื่องมือที่สามารถวัดค่าปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงค่าร่วมกันของทั้งสองปฏิกิริยา จากผลการทดลองการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มด้วยตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมในถังปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 300 ถึง 380 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ามีผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นคือ สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่คือ อัลดีเคน ( $\text{C}_{11}\text{H}_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $\text{C}_{15}\text{H}_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $\text{C}_{17}\text{H}_{36}$ ) และพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นด้วย ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน จึงแสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันขึ้น และคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันขึ้นด้วย เพราะพบสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอม 11 13 15 และ 17 อะตอม และพบว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นด้วย

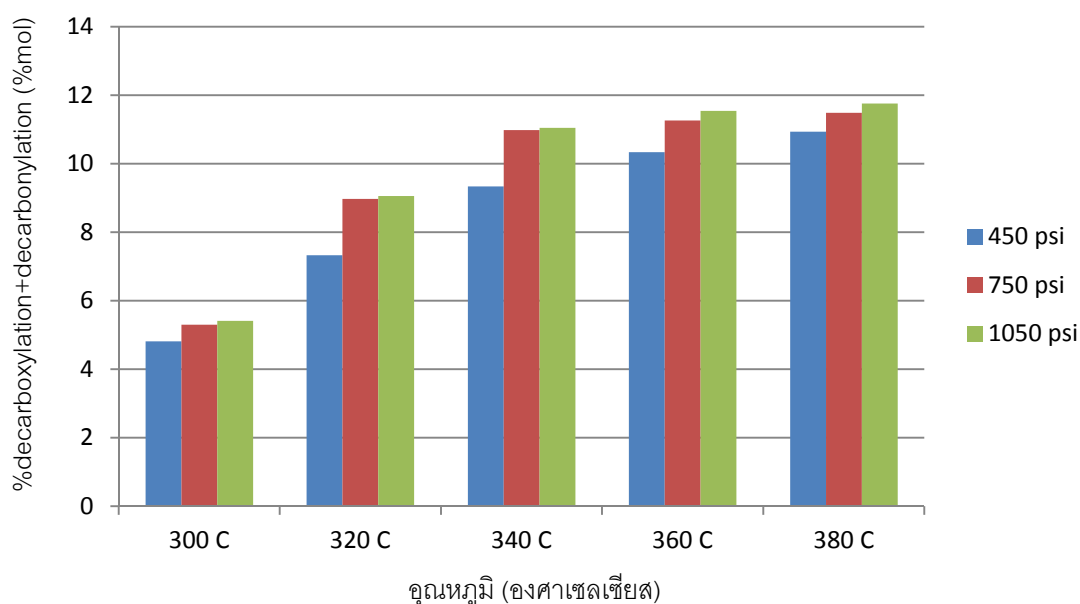
ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระพบว่ามีความสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารตั้งต้น แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียสเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ออกเป็นกรดไขมันอิสระ แต่สามารถเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปได้ซ้ำ เนื่องจากพบปริมาณน้ำและปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่เกิดขึ้นน้อย ซึ่งสอดคล้องกันกับงานวิจัยของ Charoenwong (2010) ที่ศึกษาการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันปาล์มโอเลอิน ปาล์มสเตียรีน และกรดไขมันปาล์มโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ที่ผ่านการซัลไฟด์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่มีการไหลอย่างต่อเนื่อง ที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

อุณหภูมิที่ใช้คือ 200 250 300 และ 350 องศาเซลเซียส และความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 0.5 1.0 และ 1.5 ต่อชั่วโมง จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของกรดไขมันปาล์มพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส พบว่ามีค่าของกรดเหลืออยู่ที่ 1.75 และมีปริมาณการเกิดสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่เกิดขึ้นในปริมาณน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำนั้นปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะเกิดได้ไม่ดี

ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 340 360 และ 380 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่และน้ำ มีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามอุณหภูมิ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงกรดไขมันที่สลายตัวจากไตรกลีเซอไรด์จะทำปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันต่อไปได้ดี และจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันอิสระพบว่ามีแนวโน้มลดลงจนเหลือค่าน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียส กรดไขมันอิสระที่แตกตัวจากปฏิกิริยาสลายตัวสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้ดีขึ้น ซึ่งจากงานวิจัยของ Charoenwong (2010) พบว่าที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ค่าของกรดของผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนจะมีค่าเป็นศูนย์ และมีปริมาณน้ำและปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่เกิดขึ้นสูงกว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีขึ้น โดยกรดไขมันอิสระจะเกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

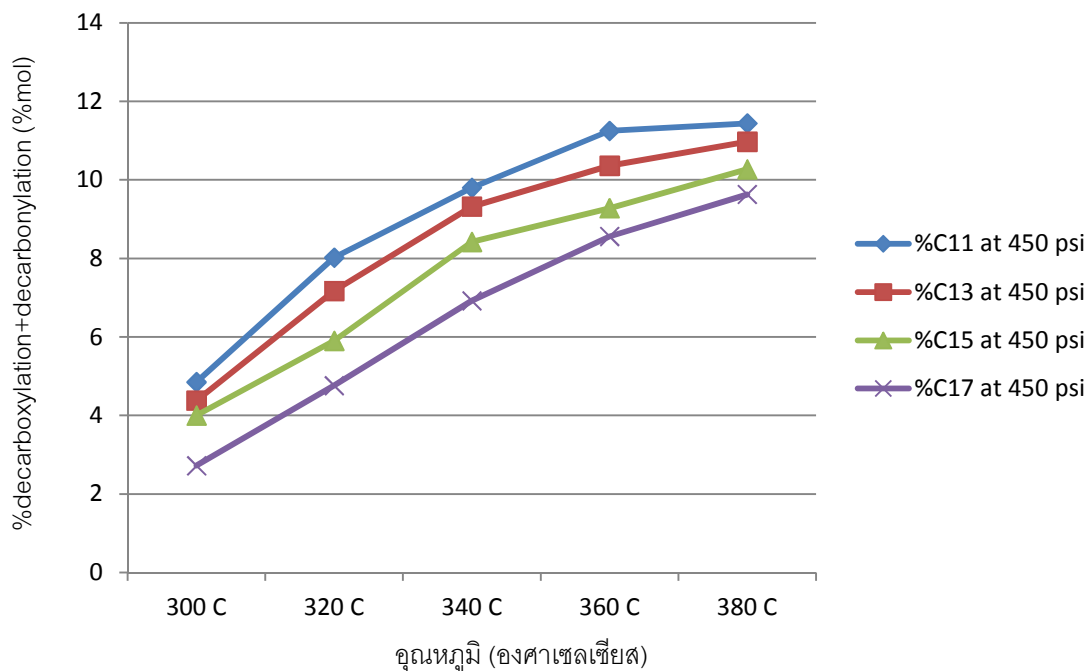
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.17 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ทั้งหมดต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ทั้งหมด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความดันเดียวกันปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยในงานวิจัยนี้จะแสดงสองปฏิกิริยาร่วมกันเนื่องจากว่า ไม่สามารถวัดค่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ได้ จึงไม่สามารถแสดงปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันแยกออกมาได้ โดยมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ที่ร้อยละ 11.75 ซึ่งสอดคล้องกับจากงานวิจัยของ Kovacs และคณะ (2011) ที่ศึกษากระบวนการไฮโดรทรีตติงของน้ำมันถั่วเหลือง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัมบนตัวรองรับอลูมิเนียมออกไซด์ผ่านการซัลไฟด์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 280 ถึง 380 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้คือ 20 ถึง 80 บาร์ ความเร็วเชิงสเปซของของเหลวที่ใช้คือ 0.75 ถึง 3.0 ต่อชั่วโมง และอัตราส่วนปริมาตรของไฮโดรเจนต่อน้ำมันถั่วเหลืองที่ใช้คือ 400 ถึง 600 ตารางนิ้วตันเมตรต่อตารางเมตร จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของปริมาณ

สารประกอบอัลเคนคือ ออกตะเดเคน (C18) ต่อเฮปตะเดเคน (C17) มีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันและปฏิกิริยาข้างเคียงคือ ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน จะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



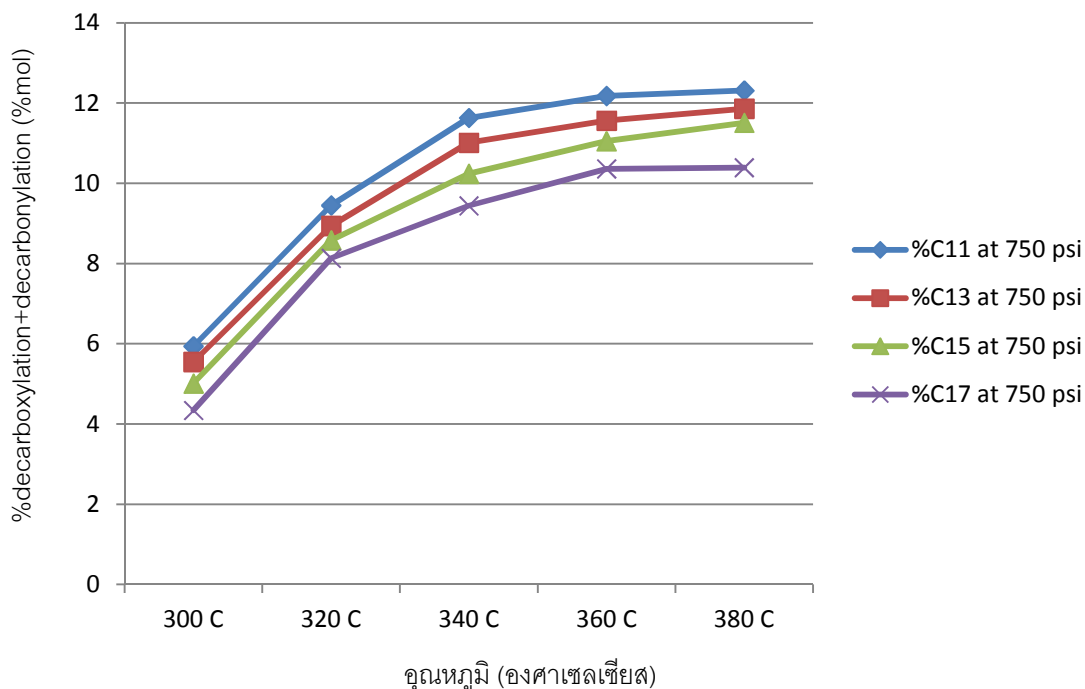
**รูปที่ 4.17** ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ถึง 380 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.18 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคี่แต่ละชนิด คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคน จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยเกิดขึ้นร้อยละ 11.44 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ ไตรดีเคน เพนตะดีเคน และเฮปตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง



รูปที่ 4.18 ปริมาณการเกิดเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

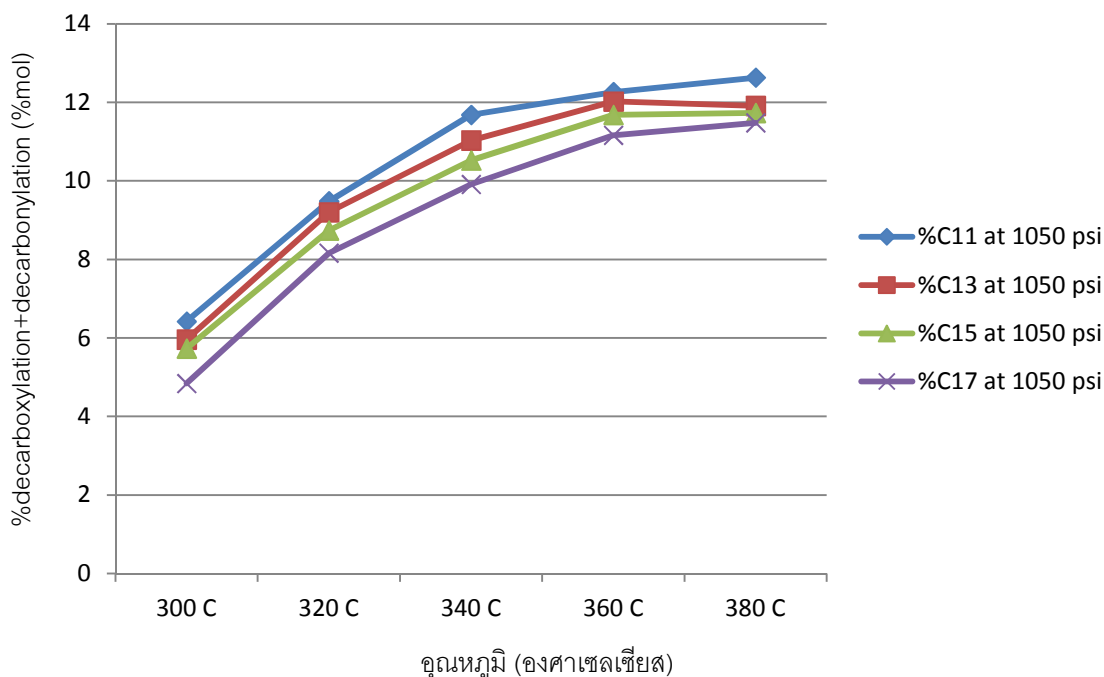
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.19 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคี่แต่ละชนิด คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคน จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยเกิดขึ้นร้อยละ 12.31 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ ไตรดีเคน เพนตะดีเคน และเฮปตะดีเคนตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง



รูปที่ 4.19 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.20 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคน จะมีค่าสูงที่สุดที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยเกิดขึ้นร้อยละ 12.63 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ ไตรดีเคน เพนตะดีเคน และเฮปตะดีเคนตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง





รูปที่ 4.20 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

#### 4.3.2 ผลกระทบของความดันต่อปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน

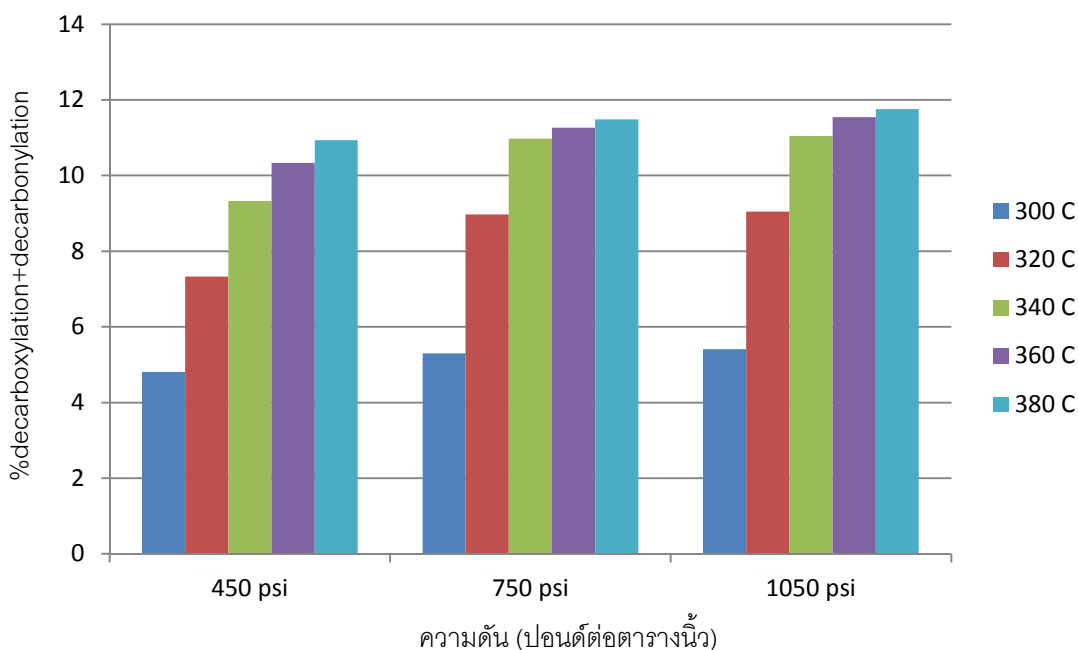
จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความดันมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เนื่องจากเมื่อค่าความดันเปลี่ยนแปลงไปจะทำให้ปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความดันอยู่ในช่วง 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลไตรกลีเซอไรด์ออกเป็นกรดไขมันอิสระ แต่สามารถเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันขั้นต่อไปได้น้อยกว่าที่ความดันสูงขึ้น เนื่องจากผลของปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีอะตอมคาร์บอนเป็นเลขคู่คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) เกิดขึ้นน้อย และคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันพร้อมกันด้วย แต่ในการทดลองไม่สามารถตรวจสอบหาก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้

ผลการทดลองที่ความดัน 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณกรดไขมันอิสระแสดงให้เห็นว่ามีแนวโน้มลดลงจนเหลือค่าน้อยมากเมื่อความดันสูงขึ้น

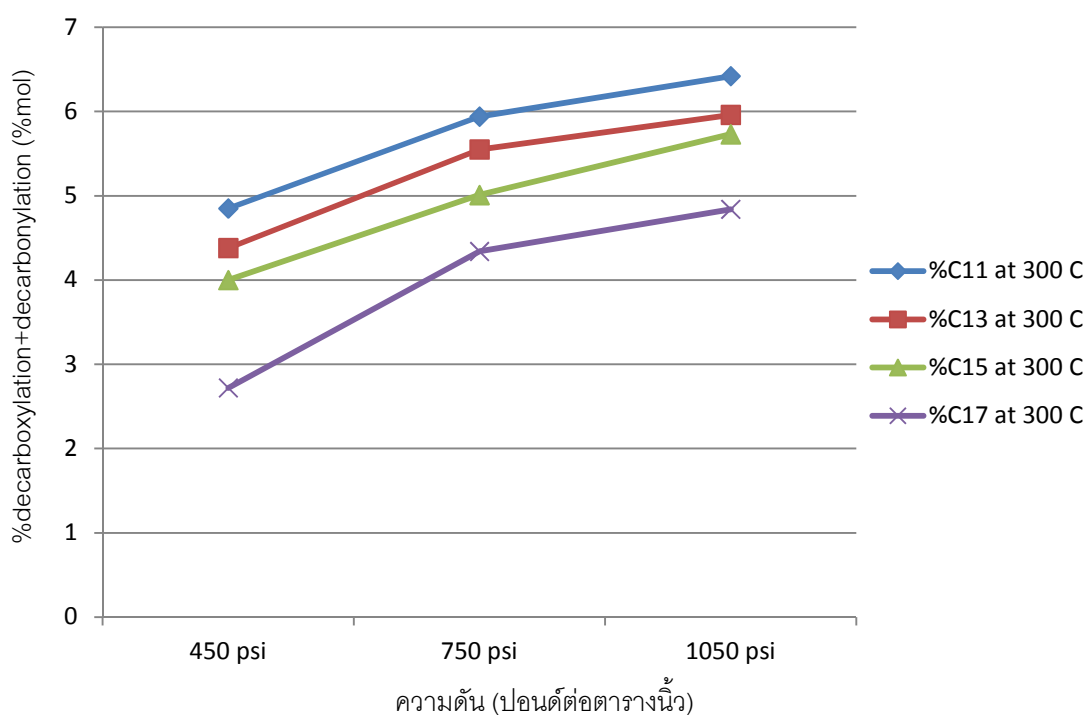
และพบปริมาณสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่เกิดขึ้น คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งมีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดัน แสดงให้เห็นว่าเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันได้สูงขึ้น และคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันขึ้นพร้อมกันด้วย แต่ในการทดลองไม่สามารถพิสูจน์หาก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ได้

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.21 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์มที่ความดันที่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ทั้งหมดต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ทั้งหมด จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิเดียวกันปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น โดยที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จะมีการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันสูงสุด คือ ร้อยละ 11.75 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันนั้นจะเกิดได้ดีที่สภาวะความดันสูง



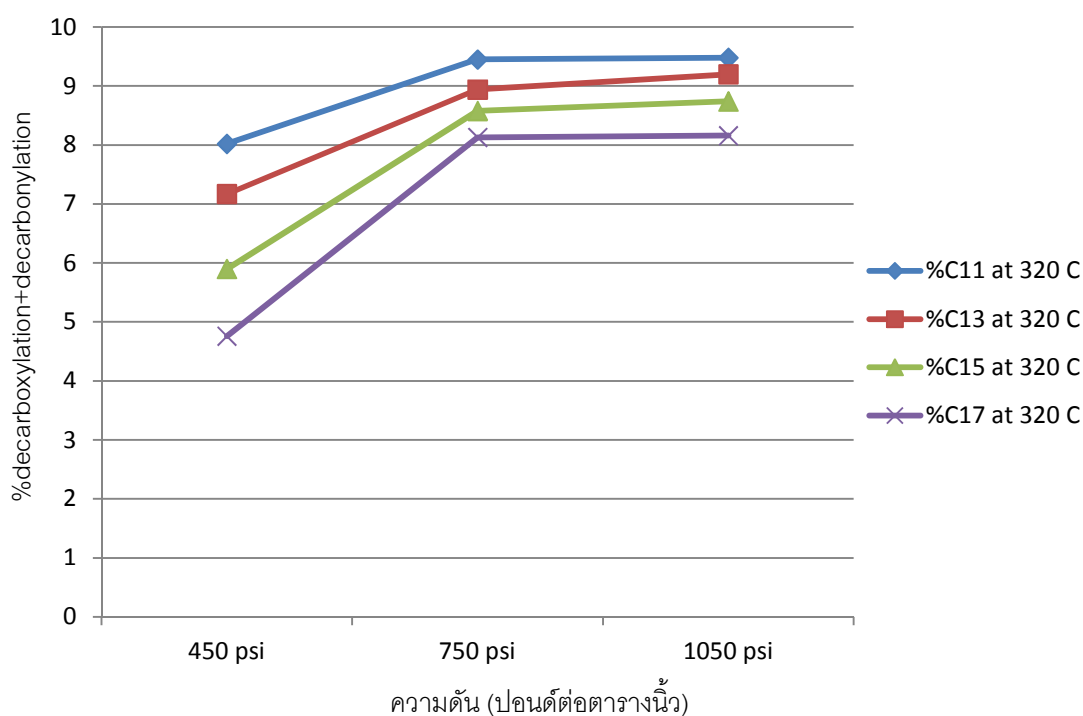
รูปที่ 4.21 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่ความดัน 450 ถึง 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.22 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดัน โดยการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคนจะมีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 6.42 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ ไตรดีเคน เพนตะดีเคน และเฮปตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



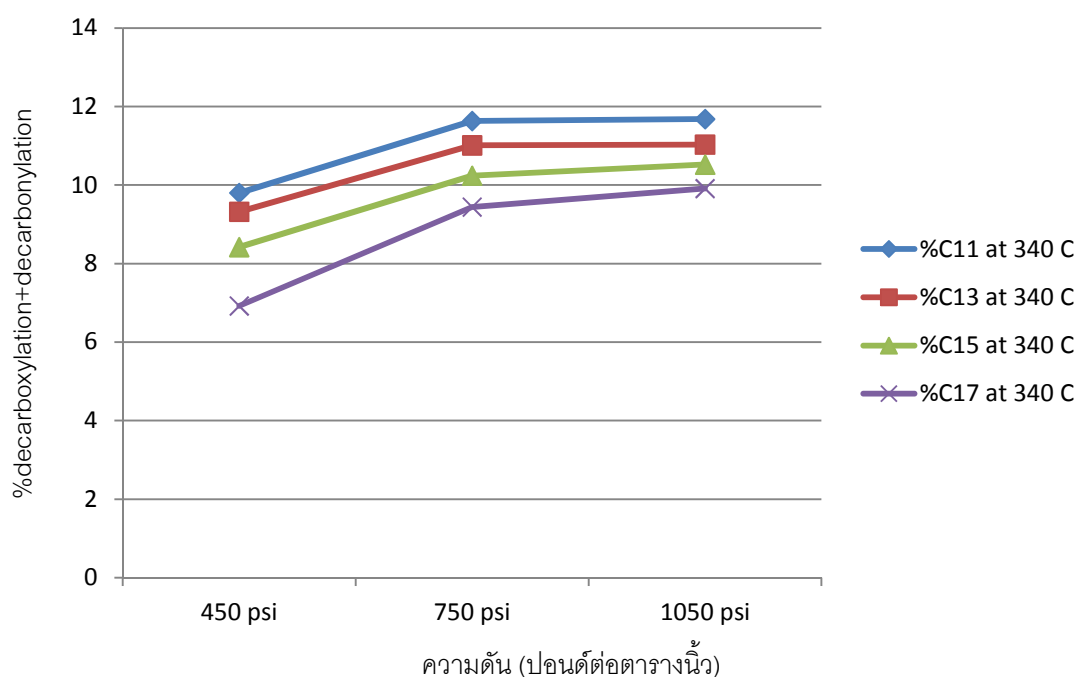
รูปที่ 4.22 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.23 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งคำนวณจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคนจะมีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 9.48 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ ไตรดีเคน เพนตะดีเคน และเฮปตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



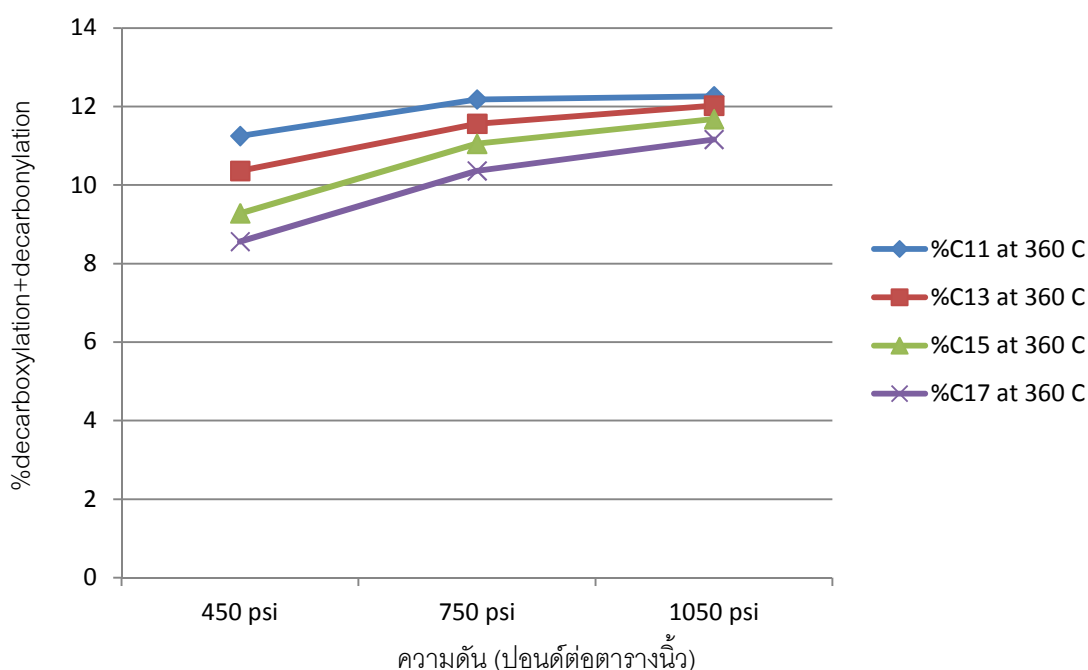
รูปที่ 4.23 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.24 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งหากจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคนจะมีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 11.68 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ ไตรดีเคน เพนตะดีเคน และเฮปตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูงและการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



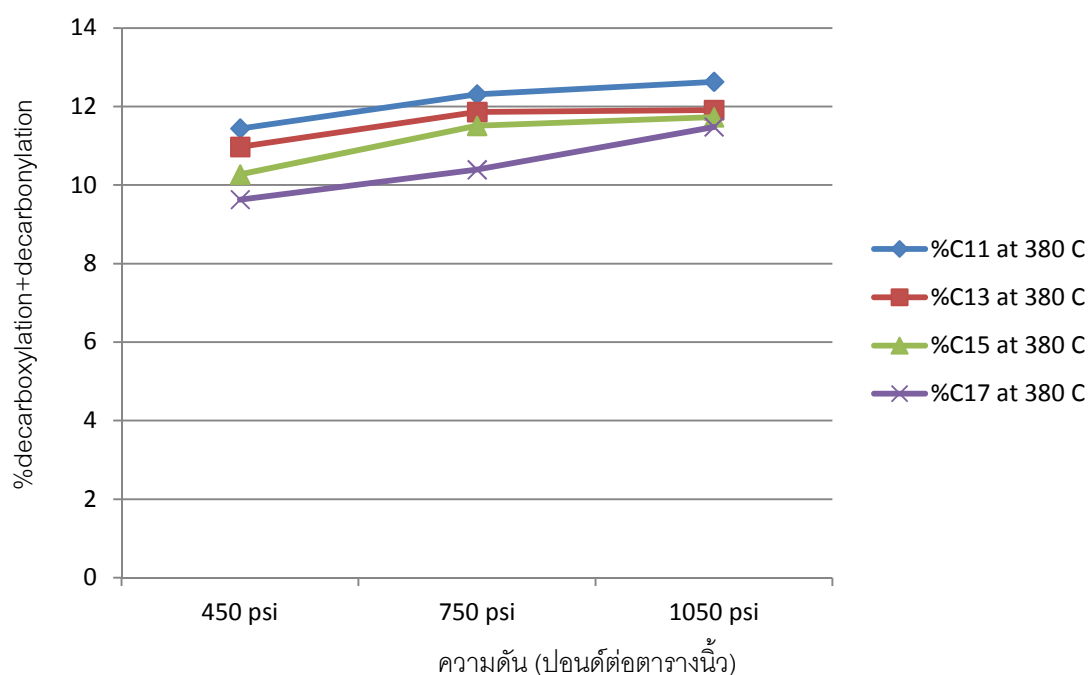
รูปที่ 4.24 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.25 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งหากจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคนจะมีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 12.26 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ ไตรดีเคน เพนตะดีเคน และเฮปตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูงและการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



รูปที่ 4.25 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส

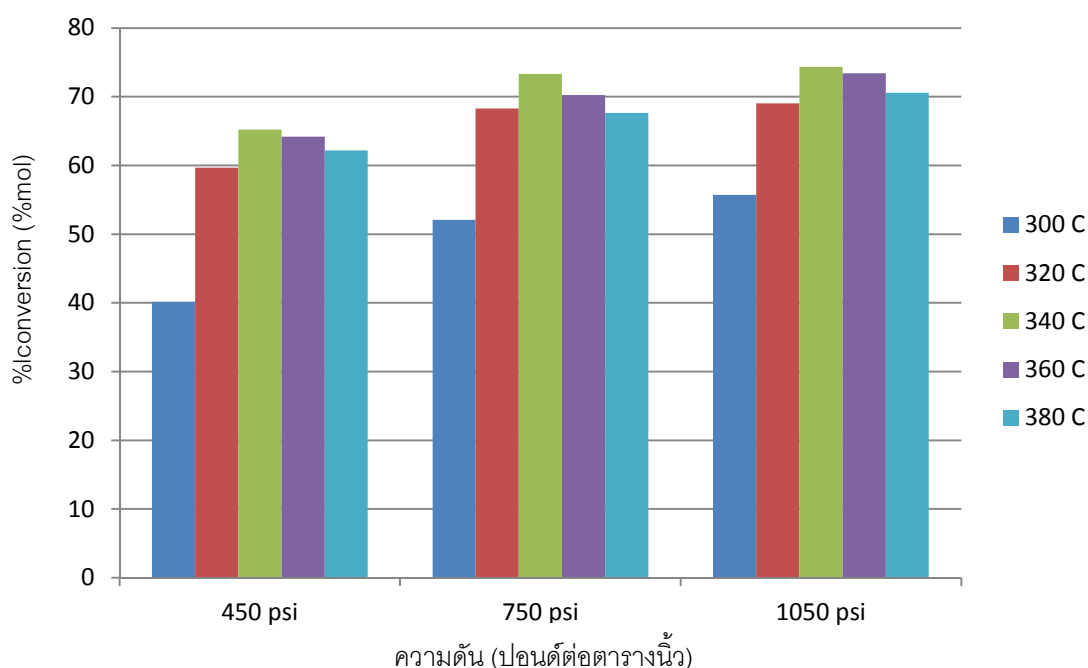
ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.26 แสดงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส โดยแบ่งออกเป็นสารประกอบอัลเคนเลขคู่แต่ละชนิด คือ อัลดีเคน ( $C_{11}H_{24}$ ), ไตรดีเคน ( $C_{13}H_{28}$ ), เพนตะดีเคน ( $C_{15}H_{32}$ ) และเฮปตะดีเคน ( $C_{17}H_{36}$ ) ซึ่งหาจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระของสารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคี่ ซึ่งพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้นตามความดันโดยการเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันของอัลดีเคนจะมีค่าสูงสุด คือ ร้อยละ 12.63 และมีค่าลดลงตามจำนวนคาร์บอนอะตอมคือ ไตรดีเคน เพนตะดีเคน และเฮปตะดีเคน ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยานี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำได้ดีกว่ากรดไขมันอิสระที่มีจำนวนคาร์บอนสูง และการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความดันสูงขึ้น



รูปที่ 4.26 ปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิเจเนชันที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.27 แสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น เกิดจากอัตราส่วนของจำนวนโมลของสารประกอบอัลเคนทั้งหมดต่อจำนวนโมลของกรดไขมันอิสระเริ่มต้น ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันค่าปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นจะมีค่าสูงขึ้นตามความดัน โดยมีค่าสูงสุดที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับผลรวมของปริมาณการ

เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ร่วมกับปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เช่น ผลการทดลองที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้วอุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเท่ากับร้อยละ 73.43 ซึ่งปริมาณการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันมีค่าร้อยละ 63.09 และปริมาณการเกิดปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันร่วมกับปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันมีค่าร้อยละ 11.54



รูปที่ 4.27 ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น

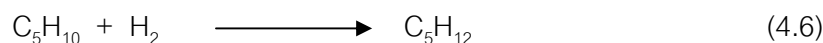
จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิและความดันมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ไตรกลีเซอไรด์เกิดปฏิกิริยาสลายตัวเกิดเป็นกรดไขมันขึ้น แต่จะเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปได้ช้า และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันต่อไปได้ดีขึ้น โดยที่อุณหภูมิสูงกว่า 340 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาสลายตัวของสารประกอบอัลเคน ทำให้สารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นสารประกอบอัลเคนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง และการเพิ่มความดันจะทำให้ความสามารถในการละลาย (solubility) ของไฮโดรเจนต่อน้ำมันมีค่าสูงขึ้น และยังเป็น การเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมันให้สูงขึ้นด้วย (Kwon และคณะ (2011)) ซึ่งจะทำให้



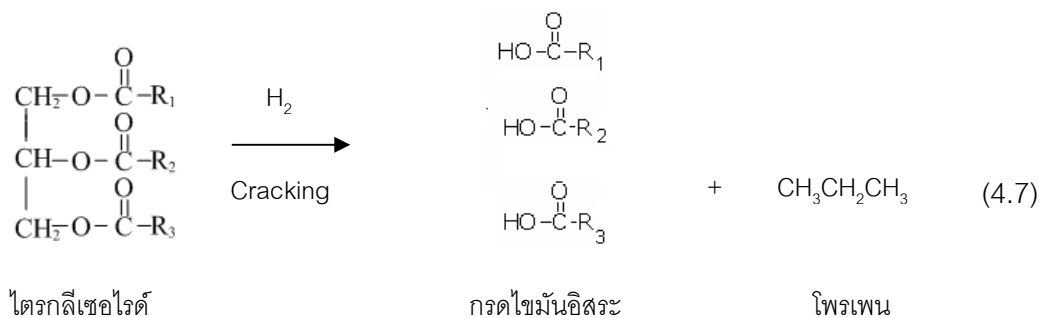
ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันและปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชันเกิดได้ดีขึ้น จากการทดลองที่ความดัน ทั้งสามค่า พบว่าความดันที่เกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดคือ ที่ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยมีค่า ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นร้อยละ 74.35

จากการทดลองสามารถสรุปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการไฮโดรที่ติดตั้งของน้ำมัน เมล็ดในปาล์มทั้งหมดได้ดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เป็นปฏิกิริยาซึ่งทำให้พันธะที่ไม่อิ่มตัวของสารตั้งต้นกลายเป็น พันธะอิ่มตัวจากการเติมก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาร่วมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ก๊าซไฮโดรเจนจะ เข้าไปรวมตัวกับสารตั้งต้นเกิดเป็นปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน ซึ่งทำให้พันธะที่ไม่อิ่มตัวของสารตั้งต้น กลายเป็นพันธะที่อิ่มตัว ต้องอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูงและความดันสูง ดังสมการที่ 4.6



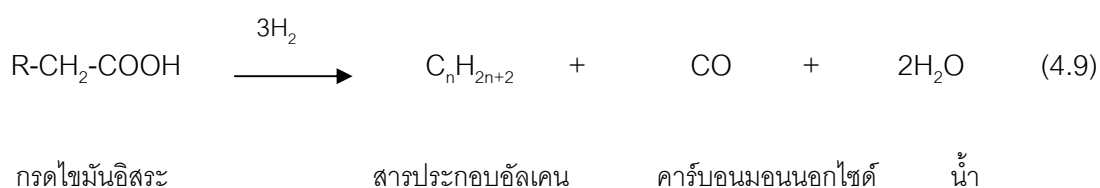
2. ปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) เป็นปฏิกิริยาที่สลายโมเลกุลขนาดใหญ่ให้ เป็นโมเลกุลขนาดเล็กลงโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าทำปฏิกิริยา เกิดขึ้นภายใต้ สภาวะอุณหภูมิและความดันสูง ซึ่งทำให้โมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์สลายตัวกลายเป็นกรดไขมัน อิศระขึ้น ดังสมการที่ 4.7



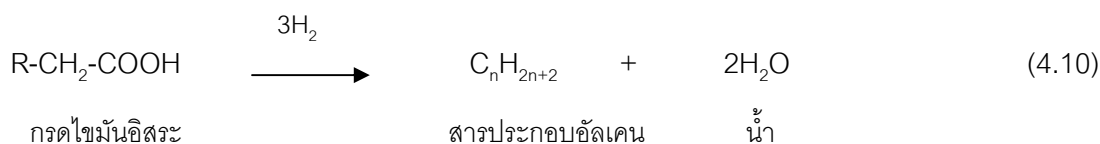
3. ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องอาศัยก๊าซไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา จะได้ผลิตภัณฑ์คือ สารประกอบอัลเคน และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม และ ผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนจะเสียจำนวนคาร์บอนไปหนึ่งอะตอมเนื่องจากทำปฏิกิริยากับ ออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้มีจำนวนอะตอมเป็นเลขคี่ ดังสมการที่ 4.8



4. ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน เป็นปฏิกิริยาที่ต้องใช้ไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยานี้จะได้ผลิตภัณฑ์คือสารประกอบอัลเคน และมีน้ำและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วม โดยที่ผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนจะเสียจำนวนคาร์บอนไปหนึ่งอะตอมเนื่องจากทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ จึงทำให้มีจำนวนอะตอมเป็นเลขคู่ ดังสมการที่ 4.9



5. ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน เป็นปฏิกิริยาหลักซึ่งเปลี่ยนไตรกลีเซอไรด์ให้เป็นสารประกอบอัลเคน และมีน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ร่วม ปฏิกิริยานี้ต้องอาศัยก๊าซไฮโดรเจนในการทำปฏิกิริยา และผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบประเภทอัลเคนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ ดังสมการที่ 4.10



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ และความดันต่อปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของ น้ำมันเมล็ดในปาล์ม โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลโมลิบดีนัม สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ในกระบวนการไฮโดรทรีตติ้งของน้ำมันเมล็ดในปาล์มจะเกิดปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาขึ้น คือ ปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชัน ปฏิกิริยาดีคาร์บอนิลเลชัน ปฏิกิริยา การแตกตัวของกรดไขมันอิสระและปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน

2. ผลกระทบของอุณหภูมิตพบว่ามีผลว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันจะเกิดได้ดีขึ้น จากการศึกษาคพบว่า

2.1 ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ไตรกลีเซอไรด์จะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว ออกเป็นกรดไขมันอิสระ และเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปได้ช้า ทำให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระ สูง

2.2 ที่อุณหภูมิ 320 ถึง 380 เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีเมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้น และเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อ อุณหภูมิสูงกว่า 340 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาหลายตัวของสารประกอบอัลเคน ทำให้สารประกอบอัลเคนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง

3. ผลกระทบของความดันพบว่า ความดันสูงจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชัน ได้ดีเนื่องจากความดันจะทำให้ความสามารถในการละลาย (solubility) ของไฮโดรเจนต่อน้ำมันมี ค่ามากสูงขึ้น และยังเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนในการเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำมัน

3.1 ที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้วเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของไตรกลีเซอไรด์เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ และเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไปได้ช้า ทำให้มีปริมาณกรดไขมันอิสระ สูง

3.2 ที่ความดัน 750 และ 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เกิดปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันได้ดีเมื่อความดันสูงขึ้น และจะมีผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน

4. จากผลการทดลอง ผลิตภัณฑ์สารประกอบอัลเคนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรดีออกซิจีเนชันของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม มีผลการทดลองที่ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ซึ่งมีปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้นเกิดขึ้นร้อยละ 74.35

## รายการอ้างอิง

- Bezergianni, S., Dimitriadis, A., Kalogianni, A., and Pilavachi, P.A. Hydrotreating of waste cooking oil for biodiesel production Part I: Effect of temperature on product yields and heteroatom removal. Bioresource Technology 101 (2010): 6651–6656.
- Bezergianni, S., Dimitriadis, A., Sfetsas, T., and Kalogianni, A. Hydrotreating of waste cooking oil for biodiesel production Part II: Effect of temperature on hydrocarbon composition. Bioresource Technology 101 (2010): 7658–7660.
- Charoenwong, P. Hydrotreating of palm olein, palm stearin and palm fatty acid distillate using nickel molybdenum catalyst. Master's thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2010.
- Gandarias, I., Barrio, V.L., Requies, J., Arias, P.L., Cambra, J.F., and Gemez, M.B. From biomass to fuels: Hydrotreating of oxygenated compounds. International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008): 3485-3488.
- Guzman, A., Torres, J.E., Prada, L.P., and Nunez, M.L. Hydroprocessing of crude palm oil at pilot plant scale. Catalysis Today 156 (2010): 38-43.
- 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. Applied Catalysis A: General 329 (2007): 120-129.
- Jirasavetakul, P. Hydrotreating of palm olein using nickel molybdenum and cobalt Molybdenum catalysts. Master's thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University, 2010.
- Kovacs, S., Kasza, T., Thernesz, A., Horvath, I., and Hancsok, J. Fuel production by hydrotreating of triglyceride on NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/F catalyst. Chemical Engineering Journal 176-177 (2011): 237-243.
- Kubicka, D., and Kaluza, L. Deoxygenation of vegetable oils over sulfided Ni, Mo and NiMo catalysts. Applied Catalysis A: General 372,(2010): 199-208.

- Kubicka, D., and Horacek, J. Deactivated of HDS catalysts in deoxygenation of vegetable oils. Applied Catalysis A: General 394,(2011): 9-17.
- Kwon, K., Mayfield, H., Marolla, T., Nichols, B., and Mashburn, M. Catalytic deoxygenation of liquid biomass for hydrocarbon fuels. Renewable Energy 36. (2011): 907-915.
- Sebos, I., Matsoukas, A., Apostolopoulos, V., and Papayannakos., N. Catalytic hydroprocessing of cottonseed oil in petroleum diesel mixtures for production of renewable diesel. Fuel 88 (2009): 145-149.
- Senol, O.i., Viljana, T., and Krause, A. Hydrodeoxygenation of methyl esters on sulphided NiMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts, Catalysis Today 100 (2005) 331-335.
- Simcek, P., et al. Hydroprocessed rapeseed oil as a source of hydrocarbon based biodiesel. Fuel 88,(2009): 456-460.
- Simacek, P., Kubicka, D., Sebor, G., and Pospisil, M. Fuel properties of hydroprocessed rapeseed oil. Fuel 89 (2010): 611–615.
- Sankaranarayanan, T.M., Banu, M., Pandurangan, A., Sivasanker, S. Hydroprocessing of sunflower oil-gas oil blends over sulfide Ni-Mo-Al-zeolite beta composites. Bioresource Technology 102 (2011): 10717–10723.
- Tiwari, R., Rana, B., Kumar, R., Verma, D., Kumar, R., Joshi, R., Garg, M., and Sinha, A. Hydrotreating and hydrocracking catalysts for processing of waste soya-oil and refinery-oil mixtures. Catalysis Communications 12. (2011): 559-562.
- Toba, M., Abe, Y., Kuramochi, H., Osako, M., Mochizuki, T., and Yoshimura, Y. Hydrodeoxygenation of waste vegetable oil over sulfide catalysts. Catalysis Today. 164 (2010): 533-537.
- Veriansyah, B., Young Han, V., Kim, S., Hong, S., Kim, Y., Lim, J., Shu, Y., Oh, S., and Kim, Y. Production of renewable diesel by hydroprocessing of soybean oil : Effect of catalysts. Fuel. 94 (2012): 578-585.
- Walendziewski, J., Stolarski, M., Luzny, R., and Klimek, B.,. Hydroprocessing of light gas oil-rape oil mixtures. Fuel Processing Technology. 90 (2009): 686-691.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองที่ความดัน 450 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/นาที่)	0.502	0.500	0.500	0.50	0.27	0.13
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/นาที่)	558.44	549.80	553.76	554.00	0.80	0.76
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	165.54	164.88	164.88	165.10	0.27	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	144.9	144.5	146	145.13	0.59	0.16
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	130.9	131	132	131.30	0.53	0.31
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	14.0	13.5	14.0	13.83	1.19	2.47
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	9.66	9.34	9.59	9.53	1.35	2.02
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.096	0.088	0.103	0.10	7.12	8.71
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	59.16	61.35	59.73	60.08	2.07	1.56
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	2.84	2.88	2.8	2.84	1.39	1.43
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	25.44	26.33	25.66	25.81	1.97	1.45
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	1.18	1.24	1.2	1.21	2.69	2.26
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	9.07	9.72	9.47	9.42	3.09	3.86
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	0.68	0.72	0.69	0.70	3.24	2.45
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	5.65	5.97	5.81	5.81	2.68	2.83
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	1.97	2.07	2.00	2.01	2.74	2.20
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	12.33	12.42	12.1	12.28	1.10	1.52
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	16.69	16.56	16.84	16.70	0.85	0.04
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.57	5.64	5.53	5.58	1.06	0.90
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.788	0.795	0.798	0.790	0.54	0.72

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที)	0.500	0.502	0.500	0.50	0.27	0.13
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	568.32	573.45	569.34	570.37	0.54	0.36
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	164.88	165.54	164.88	165.10	0.27	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	146.90	147.00	147.20	147.03	0.11	0.09
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	130.9	131	131.5	131.13	0.28	0.18
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.0	16.0	15.7	15.90	0.62	1.27
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.89	12.15	12.07	12.11	0.71	1.39
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.126	0.126	0.118	0.12	2.12	4.52
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	44.83	46.13	45.31	45.42	1.53	1.32
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	3.92	4.25	4.04	4.07	4.24	0.74
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	39.09	40.25	39.19	39.51	1.84	1.07
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	1.48	1.41	1.39	1.43	3.60	2.64
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	14.72	14.84	14.01	14.52	2.13	3.66
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.17	1.2	1.05	1.14	5.00	8.57
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	8.67	8.13	8.92	8.57	3.89	5.45
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	2.18	2.37	2.28	2.28	3.94	4.43
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	17.28	17.09	17.33	17.23	0.56	0.84
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	1.12	1.25	1.12	1.16	6.93	3.87
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.40	0.40	0.42	0.41	3.17	1.67
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.779	0.783	0.791	0.784	0.84	0.68



ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 340 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาท)	0.501	0.502	0.500	0.500	0.20	0.20
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาท)	586.8	590	589.5	588.77	0.21	0.34
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	165.21	165.54	164.88	165.21	0.20	0.20
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	145.0	147.0	146.0	146.0	0.68	0.69
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127.00	128.00	128.00	127.67	0.26	0.52
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18.00	19.00	18.00	18.33	3.51	1.85
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.41	12.93	12.33	12.56	2.86	1.84
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.149	0.149	0.141	0.15	1.79	3.78
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	97.84	98.99	93.68	96.84	2.18	3.37
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	5.35	5.24	4.88	5.16	1.59	5.67
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	43.71	43.9	41.01	42.87	2.34	4.54
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.04	2.23	2.07	2.11	5.23	2.09
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	15.4	15.43	14.41	15.08	2.27	4.65
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.24	1.52	1.4	1.39	8.77	11.83
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	8.88	9.77	9.12	9.26	5.25	1.50
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	2.89	3.06	2.84	2.93	4.25	3.17
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	18.33	17.84	17.95	18.04	1.58	0.50
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.049	0.051	0.051	0.05	1.31	2.72
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.015	0.015	0.017	0.02	7.84	4.44
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.754	0.755	0.759	0.756	0.40	0.27

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.503	0.500	0.500	0.50	0.40	0.20
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	605.9	609.7	607.3	607.63	0.34	0.29
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	165.87	164.88	164.88	165.21	0.40	0.20
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	146.00	148.00	147.80	147.27	0.50	0.87
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127	128	128	127.67	0.26	0.52
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18	18.2	18.1	18.10	0.55	0.56
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.42	12.60	12.40	12.47	0.98	0.60
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.164	0.156	0.164	0.16	1.63	3.42
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	94.92	96.38	94.95	95.42	1.00	0.52
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	6.21	5.52	5.39	5.71	8.11	3.38
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	40.43	41.32	41.12	40.96	0.88	1.30
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.28	2.3	2.1	2.23	3.19	6.03
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	14.22	15.32	14.86	14.80	3.39	4.08
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.48	1.53	1.42	1.48	3.49	3.99
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	8.56	9.16	8.91	8.88	3.09	3.70
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	3.72	3.81	3.33	3.62	4.99	8.71
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	18.02	17.42	17.82	17.75	1.48	1.91
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.044	0.044	0.044	0.044	0.00	0.00
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.015	0.015	0.015	0.015	0.00	0.00
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.752	0.755	0.753	0.753	0.22	0.18

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 380 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/นาที่)	0.500	0.500	0.500	0.50	0.00	0.00
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที่)	625.8	630.6	629.5	628.63	0.31	0.45
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	164.88	164.88	164.88	164.88	0.00	0.00
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	148.20	147.80	147.90	147.97	0.16	0.11
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127.6	128	127.9	127.83	0.13	0.18
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	18.8	18.1	18.5	18.47	1.77	2.03
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.69	12.25	12.51	12.48	1.62	1.91
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.179	0.179	0.171	0.18	1.49	3.12
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	92.17	93.46	89.59	91.74	0.47	2.40
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	6.67	6.74	6.34	6.58	1.30	3.84
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	37.92	40.47	38.50	38.96	3.72	2.75
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.67	2.48	2.56	2.57	3.75	3.63
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	13.72	14.72	14.00	14.15	3.89	3.11
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.59	1.55	1.62	1.59	2.06	2.37
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.65	8.62	8.18	8.82	8.64	7.78
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	3.70	3.73	3.53	3.65	2.06	3.49
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	16.25	15.15	14.86	15.42	5.11	3.77
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.044	0.044	0.044	0.04	0.00	0.00
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.015	0.015	0.015	0.015	0.00	0.00
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.751	0.755	0.750	0.752	0.40	0.27

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองที่ความดัน 750 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.498	0.500	0.500	0.50	0.13	0.27
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/นาที)	331.31	335.78	333.19	333.43	0.70	0.64
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	164.22	164.88	164.88	164.66	0.13	0.27
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	148.60	150.00	148.90	149.17	0.56	0.38
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	132	133	131.8	132.27	0.55	0.35
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	16.6	17.0	17.1	16.90	1.17	1.81
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.17	11.33	11.48	11.33	1.35	1.42
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.118	0.118	0.110	0.12	2.26	4.85
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	44.83	46.13	45.31	45.42	1.53	1.32
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	3.31	3.25	3.37	3.31	1.78	1.85
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	36.17	35.72	35.53	35.81	1.00	0.78
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	1.34	1.32	1.26	1.31	2.49	3.70
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	11.86	11.86	11.84	11.85	0.06	0.11
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	0.89	0.9	0.95	0.91	3.86	2.62
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	6.63	6.79	6.8	6.74	0.74	1.66
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	1.83	1.77	1.79	1.80	1.82	0.37
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	14.99	15.63	15.59	15.40	1.45	2.76
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	5.88	5.88	5.78	5.85	0.57	1.15
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.250	2.103	2.060	2.138	4.99	3.77
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.776	0.765	0.774	0.772	0.56	0.87

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.490	0.498	0.500	0.50	0.80	1.22
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/นาที)	345.60	349.8	346.50	347.30	0.71	0.49
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	161.58	164.22	164.88	163.56	0.80	1.22
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	149.40	148.40	147.50	148.43	0.65	0.63
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	129.4	128.9	128	128.77	0.49	0.60
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	20.0	19.5	19.5	19.67	1.67	0.85
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.39	13.14	13.22	13.25	1.03	0.83
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.164	0.160	0.164	0.16	0.81	1.67
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	104.72	103.76	99.7	102.73	1.90	3.04
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	5.6	5.46	5.35	5.47	2.32	2.24
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	45.11	44.7	42.87	44.23	1.96	3.16
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.17	2.19	2.09	2.15	1.83	2.87
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	15.59	15.83	14.83	15.42	1.11	3.96
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.36	1.36	1.33	1.35	0.74	1.50
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.32	9.37	8.88	9.19	1.92	3.49
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	3.49	3.4	3.35	3.41	2.20	1.89
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	19.23	19.38	19.29	19.30	0.41	0.36
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.317	0.355	0.372	0.35	6.45	9.78
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.106	0.128	0.113	0.116	9.64	2.36
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.755	0.769	0.765	0.763	0.78	1.06

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม)	0.493	0.498	0.498	0.50	0.33	0.68
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	349.88	356.32	355.12	353.77	0.71	1.11
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	162.57	164.22	164.22	163.67	0.33	0.68
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	148.50	146.90	148.30	147.90	0.40	0.68
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	128.5	127.9	128.2	128.20	0.23	0.23
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	20.0	19.0	20.1	19.70	1.99	3.68
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.47	12.93	13.55	13.32	1.73	2.97
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.194	0.179	0.190	0.19	3.26	4.84
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	107.71	107.28	109.29	108.09	1.09	0.76
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	6.65	6.68	6.87	6.73	1.99	0.80
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	45.93	46.16	46.77	46.29	1.03	0.27
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.63	2.57	2.73	2.64	3.17	2.85
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	15.93	15.92	16.22	16.02	1.21	0.59
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.63	1.67	1.62	1.64	1.80	1.23
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.45	9.31	9.54	9.43	1.12	1.32
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	4.16	3.76	3.95	3.96	4.89	5.23
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	21.33	21.21	21.59	21.38	0.99	0.79
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.069	0.055	0.062	0.06	10.14	12.73
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.023	0.019	0.028	0.023	16.67	22.81
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.750	0.754	0.755	0.753	0.26	0.40

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.506	0.500	0.502	0.50	0.66	0.53
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/นาที)	366.63	364.45	366.19	365.76	0.24	0.36
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	166.86	164.88	165.54	165.76	0.66	0.53
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	146.90	147.70	148.00	147.53	0.32	0.43
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127.9	128.2	128.8	128.30	0.39	0.31
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	19.0	19.5	19.2	19.23	1.37	1.23
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	12.93	13.20	12.97	13.04	1.26	0.79
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.247	0.239	0.243	0.24	1.62	1.67
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	103.97	104.59	105.31	104.62	0.65	0.63
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	7.01	6.92	6.89	6.94	1.00	0.73
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	44.22	44.95	44.99	44.72	0.60	1.13
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.66	2.87	2.72	2.75	4.18	3.38
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	15.47	15.57	15.72	15.59	0.85	0.75
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.69	1.71	1.66	1.69	0.20	1.61
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.31	9.22	9.45	9.33	1.31	1.16
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	4.16	4.12	4.23	4.17	1.42	1.21
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	19.45	19.23	19.65	19.44	1.05	1.11
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.044	0.056	0.056	0.05	7.14	18.18
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.015	0.022	0.015	0.017	21.21	15.56
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.752	0.757	0.751	0.753	0.48	0.31

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 380 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม)	0.502	0.500	0.500	0.50	0.27	0.13
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	374.53	379.88	375.64	376.68	0.84	0.57
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	165.54	164.88	164.88	165.10	0.27	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	147.30	148.50	148.90	148.23	0.45	0.63
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127.8	128.5	129.4	128.57	0.64	0.60
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	19.5	20.0	19.5	19.67	1.67	0.85
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.24	13.47	13.10	13.27	1.49	1.31
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.303	0.307	0.299	0.30	1.30	1.34
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	100.23	99.44	100.63	100.10	0.53	0.66
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	7.22	7.05	7.16	7.14	0.23	1.32
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	42.55	41.43	42.62	42.20	0.99	1.86
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.81	2.77	2.83	2.80	0.94	1.20
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	15.21	15.27	15.33	15.27	0.39	0.00
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.78	1.81	1.83	1.81	1.28	1.50
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.01	9.13	9.07	9.07	0.66	0.67
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	4.22	4.16	4.28	4.22	1.40	1.44
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	17.43	17.82	17.51	17.59	1.31	0.90
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.044	0.064	0.052	0.05	16.67	21.21
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.015	0.022	0.015	0.017	21.21	15.56
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.752	0.751	0.750	0.751	0.13	0.13



ภาคผนวก ค

ผลการทดลองที่ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.500	0.500	0.512	0.50	1.56	0.80
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/นาที)	237.67	235.66	235.52	236.28	0.58	0.32
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	164.88	164.88	168.837	166.20	1.56	0.80
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	151.40	152.00	151.70	151.70	0.20	0.20
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	133.5	133.5	134.2	133.73	0.35	0.17
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	17.9	17.5	17.5	17.63	2.88	2.67
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	11.82	12.17	11.54	11.84	2.69	2.66
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.134	0.141	0.145	0.14	3.45	4.48
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	81.96	84.23	83.33	83.17	1.25	1.48
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	3.52	3.55	3.39	3.49	1.78	2.85
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	38.1	39.38	39.12	38.87	1.30	2.01
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	1.35	1.37	1.3	1.34	2.19	3.08
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	12.63	13.12	12.89	12.88	1.83	1.98
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	0.92	0.97	0.93	0.94	3.09	2.17
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	7.11	7.34	7.28	7.24	1.32	1.88
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	1.84	1.83	1.84	1.84	0.18	0.36
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	16.49	16.67	16.58	16.58	0.54	0.55
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	5.43	5.98	6.02	5.81	3.49	7.00
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.880	2.180	2.36	2.140	9.32	13.83
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.797	0.801	0.805	0.801	0.50	0.50

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 320 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.502	0.501	0.502	0.50	0.07	0.13
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/นาที)	244.30	244.15	244.50	244.32	0.07	0.07
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	165.54	165.21	165.54	165.43	0.07	0.13
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.20	152.30	150.20	150.90	0.92	0.47
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	129.2	130.8	129.2	129.73	0.82	0.41
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	21.0	21.5	21.0	21.17	1.55	0.79
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.98	14.12	13.98	14.03	0.64	0.32
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.179	0.175	0.179	0.18	0.74	1.52
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	102.37	103.94	102.66	102.99	0.91	0.61
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	5.30	5.98	5.40	5.56	7.02	4.91
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	45.23	44.99	45.18	45.13	0.21	0.32
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.12	2.38	2.17	2.22	6.58	4.87
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	15.88	15.95	15.83	15.89	0.40	0.36
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.37	1.45	1.36	1.39	3.91	2.45
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.37	9.42	9.18	9.32	1.03	1.56
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	3.21	3.64	3.53	3.46	4.95	7.79
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	19.89	20.13	20.01	20.01	0.60	0.60
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.891	0.82	0.79	0.83	6.43	5.53
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.15	0.12	0.15	0.14	6.67	16.67
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.750	0.758	0.752	0.753	0.62	0.44

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการไหลของเหลว (มล/ชม)	0.498	0.500	0.499	0.50	0.20	0.20
อัตราการไหลของก๊าซ (มล/นาที)	254.51	253.78	252.37	253.55	0.38	0.47
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	164.22	164.88	164.55	164.55	0.20	0.20
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	148.00	150.00	147.90	148.63	0.91	0.43
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127	128.5	127.9	127.80	0.54	0.63
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	21.0	21.5	20.0	20.83	3.10	4.17
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	14.19	14.33	13.52	14.02	2.22	3.64
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	109.02	109.92	111.67	110.20	1.31	1.09
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	6.97	6.8	6.78	6.85	1.72	1.03
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	46.27	47.01	47.14	46.81	0.71	1.16
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.69	2.63	2.66	2.66	1.12	1.14
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	16.01	16.2	16.6	16.27	1.99	1.62
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.72	1.6	1.72	1.68	2.33	5.00
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.42	9.55	9.96	9.64	3.18	2.37
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	4.01	4.16	4.36	4.18	4.20	4.16
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	21.93	21.97	22.45	22.12	1.48	0.85
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	17.27	17.10	17.56	17.31	1.42	1.23
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.058	0.065	0.072	0.07	9.72	12.07
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.023	0.019	0.031	0.024	21.51	28.07
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.753	0.761	0.755	0.756	0.61	0.44

ตารางที่ ค-4 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.497	0.500	0.500	0.50	0.20	0.40
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/นาท)	258.79	260.47	259.34	259.53	0.36	0.29
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	163.89	164.88	164.88	164.55	0.20	0.40
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	148.00	149.40	149.40	148.93	0.31	0.63
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	127.9	128.1	128.1	128.03	0.05	0.10
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	20.1	21.3	21.3	20.90	1.88	3.98
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	13.58	14.26	14.26	14.03	1.58	3.32
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.298	0.281	0.289	0.29	2.91	2.97
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	107.67	109.39	108.61	108.56	0.76	0.82
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	7.08	7.12	7.11	7.10	0.23	0.33
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	46.31	46.02	46.2	46.18	0.29	0.34
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.77	2.81	2.79	2.79	0.71	0.72
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	16.01	16.32	16.17	16.17	0.94	0.98
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.67	1.83	1.75	1.75	4.37	4.79
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.2	9.78	9.5	9.49	2.93	3.19
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	4.21	4.5	4.36	4.36	3.19	3.48
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	20.42	21.01	20.73	20.72	1.38	1.47
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.049	0.066	0.054	0.06	14.65	14.97
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.015	0.019	0.019	0.018	7.02	17.78
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.752	0.754	0.753	0.753	0.13	0.13

ตารางที่ ค-5 ผลการทดลองที่อุณหภูมิตั้งที่ 380 องศาเซลเซียส

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
อัตราการใช้ของเหลว (มล/ชม)	0.509	0.501	0.497	0.50	1.31	1.07
อัตราการใช้ของก๊าซ (มล/นาท)	272.54	269.78	267.62	269.98	0.94	0.88
ปริมาณสารตั้งต้น (กรัม)	167.85	165.21	163.89	165.65	1.31	1.07
ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (กรัม)	150.00	150.20	149.90	150.03	0.11	0.09
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมัน (กรัม)	129.0	129.2	128.9	129.03	0.13	0.10
ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำ (กรัม)	21.0	21.0	21.0	21.00	0.00	0.00
ปริมาณน้ำ (%โดยน้ำหนัก)	14.00	13.98	14.01	14.00	0.09	0.11
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรัม)	0.383	0.366	0.374	0.37	2.26	2.28
ปริมาณอัลเคนรวม (กรัม)	106.37	104.49	103.62	104.83	1.45	1.16
ปริมาณอัลเคน C11 (กรัม)	7.58	7.42	7.21	7.40	2.33	2.68
ปริมาณอัลเคน C12 (กรัม)	44.76	44.81	43.7	44.42	0.86	1.66
ปริมาณอัลเคน C13 (กรัม)	2.97	2.83	2.83	2.88	3.14	1.65
ปริมาณอัลเคน C14 (กรัม)	15.97	15.45	15.46	15.63	2.15	1.08
ปริมาณอัลเคน C15 (กรัม)	1.92	1.80	1.81	1.84	3.99	2.41
ปริมาณอัลเคน C16 (กรัม)	9.46	8.92	9.37	9.25	2.22	3.70
ปริมาณอัลเคน C17 (กรัม)	4.25	4.19	4.24	4.23	0.55	0.88
ปริมาณอัลเคน C18 (กรัม)	19.46	19.07	19.00	19.18	1.46	0.93
ค่าของกรด (Mg.KOH/g)	0.044	0.044	0.056	0.050	14.29	9.09
กรดไขมัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.015	0.015	0.015	0.015	0.00	0.00
ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	0.752	0.753	0.753	0.753	0.04	0.09

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ปฏิกิริยาสลายตัว (Hydrocracking)

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส ความดัน 1,050 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

รายการ	ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย	Max err.	Min err.
	1	2	3			
ปริมาณสารตั้งต้น (โมล)	0.256	0.257	0.256	0.256	0.20	0.20
ปริมาณอัลเคน C11 ถึง C18 (โมล)	0.581	0.581	0.581	0.581	0.05	0.03
ปริมาณอัลเคน C6 (โมล)	0.036	0.036	0.036	0.036	0.0	0.0
ปริมาณอัลเคน C7 (โมล)	0.031	0.031	0.031	0.031	0.0	0.0
ปริมาณอัลเคน C8 (โมล)	0.036	0.036	0.036	0.036	0.0	0.0
ปริมาณอัลเคน C9 (โมล)	0.005	0.005	0.005	0.005	0.0	0.0
ปริมาณอัลเคน C10 (โมล)	0.024	0.024	0.024	0.024	0.0	0.0
ปริมาณอัลเคนแบบอะลิไซคลิก (โมล)	0.006	0.006	0.006	0.006	0.0	0.0
รวม (โมล)	0.138	0.138	0.138	0.138	0.0	0.0
ปริมาณอัลเคนรวม C9 ถึง C18 (โมล)	0.719	0.718	0.719	0.719	0.0	0.0
ร้อยละการเปลี่ยน (%โมล)	93.55	93.55	93.55	93.55	0.00	0.00

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณรงค์วุฒิ เจ้าแก่นแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมปลายที่โรงเรียนสตรีศึกษา จังหวัดร้อยเอ็ด ในปี พ.ศ. 2545 และ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปี พ.ศ. 2549 และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ. 2551