

การแตกตัวเชิงแรงปฏิกริยาของน้ำมันพืชใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ใน  
เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

นายนิทัศน์ วงษ์สวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ 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.

CATALYTIC CRACKING OF USED VEGETABLE OIL ON CALCIUM OXIDE AND  
MAGNESIUM OXIDE IN CONTINUOUS REACTOR

MR.NITAS WONGSAWAT

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียม  
ออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์  
แบบต่อเนื่อง

โดย

นายนิทัศน์ วงษ์สวัสดิ์

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชดารา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

นิทัศน์ วงษ์สวัสดิ์ : การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพืชใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. (CATALYTIC CRACKING OF USED VEGETABLE OIL ON CALCIUM OXIDE AND MAGNESIUM OXIDE IN CONTINUOUS REACTOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 98 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ และ แมกนีเซียมออกไซด์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาด 1,250 มิลลิลิตร ใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โดยกระบวนการแตกตัวจะทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 390-440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2-5 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก โดยนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาทดสอบปริมาณของน้ำมันชนิดเบาที่เกิดขึ้นด้วย Simulated Distillation Gas Chromatography (DGC) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด จากการคำนวณด้วยโปรแกรม design-expert พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 424 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2.21 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดจากการแตกตัวร้อยละ 32.26 โดยน้ำหนัก มีปริมาณเนฟทาและดีเซลร้อยละ 11.54 และ 9.96 ตามลำดับ ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิ 422 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2.9 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดจากการแตกตัวร้อยละ 31.19 โดยน้ำหนัก มีปริมาณเนฟทาและดีเซลร้อยละ 12.16 และ 11.18 ตามลำดับ

ภาควิชา: เคมีเทคนิค.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา: เคมีเทคนิค.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา: 2554.....

# # 5272377023: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CATALYTIC CRACKING/ USED VEGETABLE OIL/ CALCIUM OXIDE  
CATALYST/ MAGNESIUM OXIDE CATALYST

NITAS WONGSAWAT: CATALYTIC CRACKING OF USED VEGETABLE OIL ON  
CALCIUM OXIDE AND MAGNESIUM OXIDE IN CONTINUOUS . ADVISOR  
:ASSOC.PROF.THARAPONG VITIDSANT , Ph.D., 98pp.

This research work catalytic cracking of used vegetable oil on calcium oxide and magnesium oxide in a continuous reactor of 1250 mL the following operating variables were varied operation reaction temperature ranging 390 to 440 degree of celsius, feedstock's flowing rate 2 to 5 gram/min and amount of catalyst ranging from 1-5% by weight. The two level factorial experimental design was perform to investigate the effect of variable of oil yield on product yield. The product oil was analyzed by simulated distillation gas chromatography (DGC). From design-expert program, it was found that reaction of used vegetable oil on calcium oxide catalyst is temperature of 424<sup>o</sup>C, feedstock's flowing rate 2.21 gram/min by using 1 percent by weight gave the highest yield. The oil yield was 32.26 percent by weight, the naphtha yield was 11.54 percent by weight. In the reaction of used vegetable oil on magnesium oxide catalyst is temperature of 422<sup>o</sup>C, feedstock's flowing rate 2.9 gram/min by using 5 percent by weight gave the highest yield. The oil yield was 31.19 percent by weight, the naphtha yield was 12.16 percent by weight.

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

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

Academic Year : 2011 .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร .ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค ที่ได้ให้คำแนะนำตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร . ประพันธ์ คูชลธारा ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร . ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ และอาจารย์ ดร . วิชากร จารุศิริ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็นคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมี เทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือ พร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 น้ำมันปิโตรเลียม.....	4
2.2 น้ำมันพืชใช้แล้ว.....	4
2.3 การเร่งปฏิกิริยา.....	6
2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	7
2.5 การแตกตัวด้วยความร้อน.....	15
2.6 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
2.7 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....	20
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	25
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	25
3.2 การดำเนินงานวิจัย.....	28
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	31
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	33
4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารตั้งต้น.....	33
4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	33
4.1.2 สมบัติเบื้องต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	35

หน้า

4.2 ผลของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันและเนฟทาที่ได้จาก  
 ปฏิบัติการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้การออกแบบแบบแพททอ  
 เรียบ..... 38

4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์  
 น้ำมันที่ได้ จากปฏิบัติการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่ง  
 ปฏิบัติการเคลือบออกไซด์..... 38

4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาที่  
 ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิบัติกา  
 รเคลือบออกไซด์..... 41

4.2.3 หากภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่ง  
 ปฏิบัติการเคลือบออกไซด์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert..... 46

4.2.4 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของ  
 ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดย  
 ใช้ตัวเร่งปฏิบัติกาแมกนีเซียมออกไซด์..... 48

4.2.5 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาที่  
 ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิบัติกา  
 แมกนีเซียมออกไซด์..... 51

4.2.6 หากภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่ง  
 ปฏิบัติการแมกนีเซียมออกไซด์โดยใช้โปรแกรม Design-  
 Expert..... 55

4.3 ผลของอิทธิพลที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิบัติกา  
 ชนิดเบสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง..... 57

4.3.1 การศึกษาหาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้  
 แล้ว..... 57

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีผลต่อการแตก  
 ตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว..... 61



หน้า

4.3.3 การศึกษาหาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมัน พีชใช้แล้ว.....	66
4.4 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัว ของน้ำมันพีชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียม ออกไซด์.....	70
4.5 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนของ ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพีชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	72
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	72
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	73
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก.....	79
ภาคผนวก ข.....	85
ภาคผนวก ค.....	94
ภาคผนวก ง.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	98

## สารบัญญัตราจ

ตารางที่		หน้า
2.1	ความแตกต่างของการแตกตัวด้วยความร้อน และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	18
3.1	ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์.....	29
3.2	จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์.....	30
4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	33
4.2	สมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	34
4.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้ว.....	34
4.4	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์.....	35
4.5	ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์.....	36
4.6	ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	36
4.7	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์.....	39
4.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแบบ $2^k$ ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	41
4.9	ร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์.....	43
4.10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแบบ $2^k$ ของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	45
4.11	ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม design expert ของน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์.....	46

ตารางที่		หน้า
4.12	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม design expert ของน้ำมันพีซีใช้แล้วบน แคลเซียมออกไซด์.....	47
4.13	ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design expert เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการ ทดลองจริงของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออก ไซด์.....	47
4.14	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้ แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	49
4.15	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแบบ $2^k$ ของร้อยละ ผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
4.16	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแบบ $2^k$ ของร้อยละ ผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	52
4.17	ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม design expert ของน้ำมันพีซี ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์.....	54
4.18	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม design expert ของน้ำมันพีซีใช้แล้วบน แมกนีเซียมออกไซด์.....	55
4.19	ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design expert เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการ ทดลองจริงของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออก ไซด์.....	56
4.20	วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของ น้ำมันพีซีใช้แล้ว.....	70
4.21	แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียม.....	71
5.1	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์.....	72

ตารางที่		หน้า
5.2	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์.....	73

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน.....	3
2.2	ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน.....	4
2.3	ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอโรมาติก.....	4
2.4	การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
2.5	การเกิด activated complex และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา.....	9
2.6	ดำเนินไปของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	9
2.7	adsorption isotherm ที่เป็นไปได้ 5 ภาพแบบ ซึ่งเสนอโดย Brunauer.....	14
2.8	adsorption isotherm แบบที่ 2.....	15
3.1	เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	25
3.2	ชุดกรองสูญญากาศ.....	26
3.3	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น.....	27
3.4	เครื่องหาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด.....	27
3.5	เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry.....	28
3.6	ชุดทดลองประกอบ.....	32
4.1	Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
4.2	Normal % Probability สำหรับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	40
4.3	Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แนฟทาจากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44
4.4	Normal % Probability สำหรับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	44

ภาพที่	หน้า	
4.5	Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..	50
4.6	Normal % Probability สำหรับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	50
4.7	Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของแนฟทาจากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	51
4.8	Normal % Probability สำหรับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แนฟทาจากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	52
4.9	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก.....	53
4.10	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส.....	58
4.11	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณแนฟทา เคโรซีน แก๊สฮอยล์เบา และแก๊สฮอยล์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมดของการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว บนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส .....	59
4.12	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส.....	60
4.13	อิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่ 2 และ 5 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์.....	62

ภาพที่	หน้า	
4.14	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นเป็น 2 และ 5 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์.....	63
4.15	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณเนฟทา เคโรซีน แก๊สออกซิลเบา และแก๊สออกซิลที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมดของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้ว บนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 และ 5 กรัมต่อนาที.....	64
4.16	อิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีต่อร้อยละผลได้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 และ 5 กรัมต่อนาที.....	65
4.17	อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส.....	67
4.16	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0, 1 และ 5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส.....	67
4.17	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณเนฟทา เคโรซีน แก๊สออกซิลเบา และแก๊สออกซิลที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมดของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้ว บนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.1 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	68
4.18	อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0, 1 และ 5 โดยน้ำหนัก.....	69

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย [1, 2, 8]

ปัญหาวิกฤติด้านพลังงานของโลกโดยเฉพาะราคาน้ำมันในปัจจุบัน ตลอดจนความต้องการใช้น้ำมันทั่วโลกในการขนส่ง เป็นกำลังสำคัญในการผลิตสินค้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี ซึ่งน้ำมันดิบเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปจึงทำให้เกิดปัญหาขาดแคลนได้ต่อไปในอนาคต สำหรับประเทศไทยนั้นนับว่าเป็นประเทศที่มีการใช้น้ำมันปิโตรเลียมมากขึ้นทุกปี นอกจากนี้ยังต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ซึ่งปัญหาขาดแคลนแหล่งพลังงานนับว่าเป็นปัญหาสำคัญของชาติอย่างหนึ่งจึงต้องเร่งแก้ไข จัดการ ป้องกัน ส่งผลให้ปัจจุบันมีแนวคิดที่จะนำพลังงานใหม่ขึ้นมาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียมมาใช้ เพื่อให้เกิดความเพียงพอต่อการใช้พลังงานภายในประเทศ และแก้ไขปัญหาราคาน้ำมันที่สูงขึ้นในตลาดโลก

น้ำมันที่ได้รับความนิยมมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง คือ น้ำมันพืชใช้แล้ว จากสภาพสังคมและประชากรที่มีการขยายตัวอย่างมากในปัจจุบันทำให้การบริโภคน้ำมันพืชมีจำนวนมากสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปี จากการสำรวจพบว่าประเทศไทยมีการบริโภคน้ำมันพืชรวมประมาณ 94,000 ตันต่อปี ซึ่งน้ำมันพืชเมื่อผ่านการใช้แล้วเหล่านี้จัดเป็นของเสียชนิดหนึ่ง และในปัจจุบันยังไม่มีวิธีรวบรวมของเสียเหล่านี้ เพื่อกำจัด หรือทำลายอย่างเหมาะสม โดยในบางครั้งเรื้อนได้นำน้ำมันพืชใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพผู้บริโภคและเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดโรคมะเร็ง จึงมีแนวคิดการนำน้ำมันพืชใช้แล้วมาแปรสภาพเป็นเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งยังช่วยเพิ่มมูลค่าให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านการกำจัดของเสีย และพัฒนาเชื้อเพลิงใหม่อีกทางหนึ่ง

จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้ว จากสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่ยาวให้มีขนาดเล็กลง และจัดโครงสร้างที่เหมาะสมจนมีสมบัติไฮโดรคาร์บอนที่ใกล้เคียงกับเชื้อเพลิง โดยกระบวนการแตกตัว (cracking) แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ การแตกตัวโดยความร้อน (thermal cracking) และการแตกตัวโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) ซึ่งการแตกตัวโดยความร้อนนั้นต้องทำที่อุณหภูมิสูง สำหรับการแตกตัวโดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยานั้นสามารถทำได้ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่าและให้ความเลือกจำเพาะของผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่า จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการหาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ซึ่งจะทำการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเคลือบออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ของน้ำมันพืชใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องที่สามารถ



เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงได้ โดยตัวแปรที่ศึกษาผลของการแตกตัว ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อมาจึงนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง simulated distillation gas chromatograph เพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดซึ่งทำให้ทราบองค์ประกอบผลิตภัณฑ์เหลวได้ ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatograph เพื่อหาองค์ประกอบที่อยู่ในแก๊ส และหาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง
- 1.2.2 หาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้เชื้อเพลิงเหลวสูงสุด

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเพื่อให้ได้ร้อยละผลได้เชื้อเพลิงเหลวสูงสุด
- 1.3.2 ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีองค์ประกอบของแนฟทา ดีเซล และเคโรซีนสูง โดยใช้ประโยชน์จากวัสดุของเสียประเภทน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วนำมาสังเคราะห์เชื้อเพลิงเพื่อเพิ่มมูลค่าให้เกิดผลดีทั้งในด้านการกำจัดของเสียและพัฒนาเชื้อเพลิงใหม่

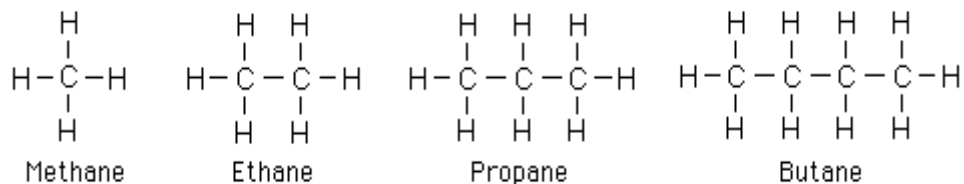
## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 น้ำมันปิโตรเลียม [1,3,4,5]

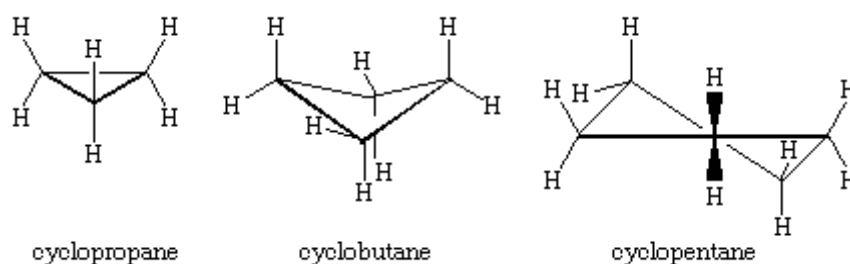
น้ำมันปิโตรเลียม หมายถึง น้ำมันที่ได้มาจากใต้พื้นดินของโลกซึ่งมีอยู่ทั่วไป น้ำมันปิโตรเลียมเกิดจากสัตว์ทะเลหรือซากพืชและซากสัตว์ที่ตายทับถมอยู่ใต้ทะเลมหาสมุทร ไขมันของสัตว์เหล่านั้น ได้ถูกกักขังด้วยชั้นต่างๆ ตะกอนเหล่านี้จะถูกอัดให้แน่นขึ้นเรื่อยๆ จนกลายเป็นหินดินดาน หินปูน หินทราย หยดไขมันต่างๆ เคลื่อนผ่านหินเหล่านี้ จนกระทั่งไปพบกับหินที่แน่นทึบ ทำให้ไขมันไหลต่อไปไม่ได้ ไขมันที่ถูกขังจะสลายตัวเป็นน้ำมันปิโตรเลียม และก๊าซต่างๆ โดยก๊าซเหล่านี้ จะลอยอยู่เหนือน้ำมันเนื่องจากน้ำมันปิโตรเลียม เมื่อนำมาจากใต้พื้นดิน มีลักษณะเป็นของเหลวสีดำ น้ำตาล หรือน้ำตาลเข้ม เรียกว่า "น้ำมันดิบ" (crude oil) ซึ่งเป็นสารประกอบที่อยู่ในน้ำมันปิโตรเลียม เป็นสารประกอบจำพวกไฮโดรคาร์บอนมากมายหลายชนิด โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 จำพวก ได้แก่

1. พาราฟิน (Parafin) เป็นอนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวโดยมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นเส้น มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไปคือ  $C_nH_{2n+2}$  เช่น มีเทน (Methane,  $CH_4$ ) อีเทน (Ethane,  $C_2H_6$ ) เป็นต้น แสดงได้ดังภาพที่ 2.1



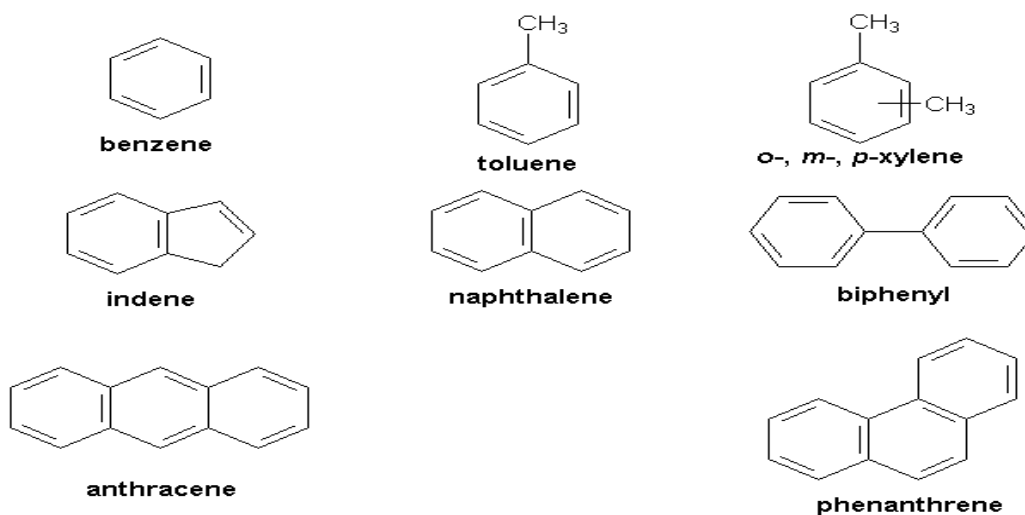
ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทพาราฟิน [7]

2. แนฟทีน (Naphthene) เป็นอนุกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวโดยมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลเชื่อมต่อกันเป็นวง มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ  $C_nH_{2n}$  เช่น ไสโคลเพนเทน (Cyclopentanes,  $C_5H_{10}$ ) และไซโคลเฮกเซน (Cyclohexanes,  $C_6H_{12}$ ) แสดงได้ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทแนฟทีน [8]

3. อโรมาติก (Aromatic) มีโครงสร้างโมเลกุลที่เชื่อมต่อกันเป็นวงไม่อิมตัวหรือไม่มีความเสถียรภาพ มีสูตรทางเคมีทั่วไป คือ  $C_nH_{2n-6}$  เช่น เบนซีน (Benzene,  $C_6H_6$ ), โทลูอีน (Toluene,  $C_7H_8$ ) และไซลีน (Xylene,  $C_8H_{10}$ ) แสดงได้ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างสารไฮโดรคาร์บอนประเภทอโรมาติก [9]

## 2.2 น้ำมันพืชใช้แล้ว [21]

น้ำมันพืชใช้แล้วจัดว่าเป็นของเสียจำพวกหนึ่ง ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการรวบรวมของเสียเพื่อกำจัด หรือทำลายอย่างเหมาะสม บางแห่งได้มีวิธีการเก็บรวบรวมน้ำมันพืชใช้แล้วโดยนำไปกรอง และฟอกสี เพื่อนำบรรจุขายใหม่ ในราคาที่ถูกลงผู้ค้ารายย่อยทั้งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ และร้านอาหารจำพวกทอด เช่น ปาท่องโก๋ ไก่ทอด ก๋วยเตี๋ยว เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคและเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดโรคมะเร็ง และอาจถึงขั้นยับยั้งการเจริญเติบโตหรือในกรณีที่โรงงานอุตสาหกรรมอาหารทอดกรอบบางแห่งได้ปล่อยน้ำมันพืชใช้แล้วลงสู่ที่ดินรกร้าง ซึ่งเป็นวิธีกำจัดอย่างไม่ถูกวิธีและเป็นผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม น้ำมันพืชประกอบด้วยกรดไขมัน

ประเภทไตรกลีเซอไรด์ เมื่อได้รับความร้อนจากการใช้งานหรือทอดหลายๆครั้ง กรดไขมันจะแตกตัวทำให้น้ำมันจะมีกรดไขมันอิสระที่เพิ่มขึ้น มีโมโนกลีเซอไรด์ และไดกลีเซอไรด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเกิดสารที่ออกซิเดชันได้หลายตัว ซึ่งรวมเรียกว่า “สารโพลาร์” หรือ สารมีขั้ว ดังนั้นน้ำมันพืชใช้แล้วจึงมีความเป็นโพลาร์ที่มากขึ้น โดยมาตรฐานแล้วนานาชาติกำหนดให้ความเป็นโพลาร์ไม่ควรเกินร้อยละ 25 นอกจากนี้เมื่อน้ำมันพืชใช้แล้วได้รับความร้อน กรดไขมันต่างๆนอกจากจะแตกตัวแล้ว ก็อาจเกิดการรวมตัวกันเป็นพอลิเมอร์ หรือเกิดปฏิกิริยาสร้างสารบางชนิดที่ทำให้กลิ่นรสของน้ำมันพืชใช้แล้วเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไป น้ำมันอาจจะเหนียวขึ้น ส่งผลให้คุณสมบัติบางอย่างเปลี่ยนแปลงไป อย่างเช่นเป็นควันได้ง่ายขึ้น เนื่องจากน้ำมันเหล่านี้แตกตัวเปลี่ยนสภาพไปบางส่วน ซึ่งทั้งสารโพลาร์ สารพอลิเมอร์ สารเหม็นหืน เหล่านี้ อาจจะเป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้บริโภคโดยมีข้อพิสูจน์แล้วอย่างชัดเจน ได้แก่สารจำพวกกลุ่มที่เรียกว่า สารไดออกซินและสารพีเอเอช ซึ่งสารเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นในน้ำในพืชใช้แล้ว สารสองกลุ่มนี้ล้วนเป็นสารก่อมะเร็งทั้งสิ้น สารไดออกซินจะเกิดขึ้นได้เมื่อน้ำมันพืชสัมผัสอยู่ในภาวะที่อุณหภูมิสูงโดยใช้เวลานาน ในน้ำมันพืชใช้แล้วยังมีโอกาสที่จะเกิดอนุมูลอิสระมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับพันธะคู่ในน้ำมัน โดยน้ำมันที่มีพันธะคู่จำนวนมาก เช่น น้ำมันเมล็ดดอกทานตะวัน น้ำมันดอกคำฝอย น้ำมันถั่วเหลือง ที่มีความไม่อิ่มตัวสูง ซึ่งส่งผลให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระในน้ำมันได้มาก ดังนั้นน้ำมันพืชที่ผ่านการใช้แล้วจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการทอดอาหารด้วยความร้อนสูงเป็นเวลานาน ส่วนการใช้น้ำมันที่มีกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวสูง อย่างเช่นน้ำมันมะกอก น้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันถั่วลิสง และน้ำมันงา จะเหมาะสมกับการทอดอาหารโดยใช้ความร้อนสูงมากกว่า การบริโภคสารอนุมูลอิสระเข้าไปบ่อยๆ ย่อมเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด ต้อกระจก ความชรา เป็นต้น

### 2.2.1 การนำน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นพลังงานทดแทน [

องค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันพืชใช้แล้วประกอบไปด้วยหมู่ไตรกลีเซอไรด์ กรดไขมัน น้ำ สเตอรอยด์ ฟอสฟอลิปิด ยาง กลิ่น และสิ่งแปลกปลอมต่างๆ นอกจากนี้ น้ำมันพืชที่ต่างชนิดกันจะมีปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวที่แตกต่างกัน โดยน้ำมันพืชนั้นจัดเป็นพลังงานสำรองชนิดหนึ่งของโลกที่สามารถผลิตขึ้นเอง ซึ่งสมบัติทางกายภาพและเคมีนั้นมีความใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล และน้ำมันพืชนั้นยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้โดยตรง เนื่องจากคุณสมบัติยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ แต่ก็สามารถนำมาปรับปรุงผ่านกระบวนการต่างๆใช้เป็นพลังงานทดแทนได้

การนำน้ำมันพืชมาใช้โดยตรง มีการนำน้ำมันพืชมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนโดยตรง ซึ่งข้อดีของการนพพมันพืชมาใช้โดยตรงนั้นมีข้อดีดังนี้

- มีลักษณะเป็นของเหลว นำมาทดแทนน้ำมันดีเซลได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการต่างๆเพื่อทำให้เป็นของเหลว
- ผลิตได้จากเกษตรกรรม สามารถเพิ่มผลผลิตได้หากมีปริมาณที่ไม่เพียงพอ
- ปริมาณกำมะถันและสารอะโรมาติกที่ต่ำ ส่งผลให้การปล่อยมลพิษที่ต่ำกว่าการให้เชื้อเพลิงปกติ

การแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันพืชใช้แล้ว นำน้ำมันพืชใช้แล้วมาผ่านการแตกตัวจากสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กในที่อับอากาศ เรียกว่า ไพโรไลซิส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก กรดคาร์บอนิก และสารประกอบอะโรมาติก ซึ่งวิธีนี้ได้มีการนำมาใช้ 100 กว่าปีแล้วในที่ขาดแคลนน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันที่ได้จะขึ้นอยู่กับอิทธิพลของอุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน และแก๊สตัวกลาง

การใช้น้ำมันพืชใช้แล้วกับเครื่องยนต์ดีเซล จากความต้องการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและภาวะขาดแคลนน้ำมันในอนาคต จึงมีความต้องการพยายามหาพลังงานอื่นมาทดแทน เช่น การนำแอลกอฮอล์ หรือพวกแก๊สชีวภาพกับเครื่องยนต์เบนซิน ซึ่งก็นับว่ามีความก้าวหน้าในการพัฒนาพอสมควรแต่ก็ยังหาพลังงานที่ราคาเหมาะสมมาใช้ทดแทนไม่ได้ เนื่องจากมีการพัฒนาให้เครื่องยนต์เหมาะแก่การใช้น้ำมันจากปิโตรเลียมมากกว่า ดังนั้นเมื่อนำพลังงานทดแทนเหล่านี้มาใช้ทดแทนจึงเกิดปัญหาขัดข้องทางเทคนิคค่อนข้างมาก ทางเลือกของการผลิตน้ำมันดีเซลที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม คือ น้ำมันพืช แต่เนื่องจากน้ำมันพืชเมื่อใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง จะเกิดปัญหาด้านจุดวาบไฟ และค่าความหนืด ซึ่งเป็นปัญหาหลัก ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงด้วยเทคนิควิธีต่างๆให้มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับกับน้ำมันดีเซล

### 2.3 การเร่งปฏิกิริยา [10]

หมายถึงการทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเป็นสารที่สามารถเพิ่มอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาโดยที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้ไปอย่างถาวรในปฏิกิริยา บุคคลแรกที่ให้คำจำกัดความของคำว่า “คะตะไลซิส” คือ เจ เจ เบอเซเลียส (J. J. Berzelius) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1836

นิยามปัจจุบันที่ครอบคลุมความหมายได้ดีขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาคือสารที่เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นโดยที่ตัวมันเองไม่ถูกใช้อย่างถาวรในปฏิกิริยา แม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีส่วนร่วมในบางขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาและเมื่อพิจารณาถึงค่าคงที่ของ

สมดุลปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องไม่ทำให้ค่าคงที่ของสมดุลเปลี่ยนไป แต่ทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้าและอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สุดท้ายมันต้องเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเดิมหลังจากปฏิกิริยาสิ้นสุดลง การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยามักจะเกิดขึ้นโดยการเกิดพันธะเคมีกับสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งตัว

## 2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) [10, 13, 23]

### 2.4.1 ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ catalyst คือ สาร (substance) ที่ใส่เข้าไปในปฏิกิริยาโดยมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น ซึ่งส่งผลให้ให้อัตราในการเกิดปฏิกิริยา (reaction rate) เร็วขึ้น โดยที่สารนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังจากที่ปฏิกิริยาเสร็จสิ้นลง แสงหรือความร้อนไม่ใช่สาร ดังนั้นแม้จะมีความสามารถในการเลือกเกิดปฏิกิริยาได้แต่ก็ไม่จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

### 2.4.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

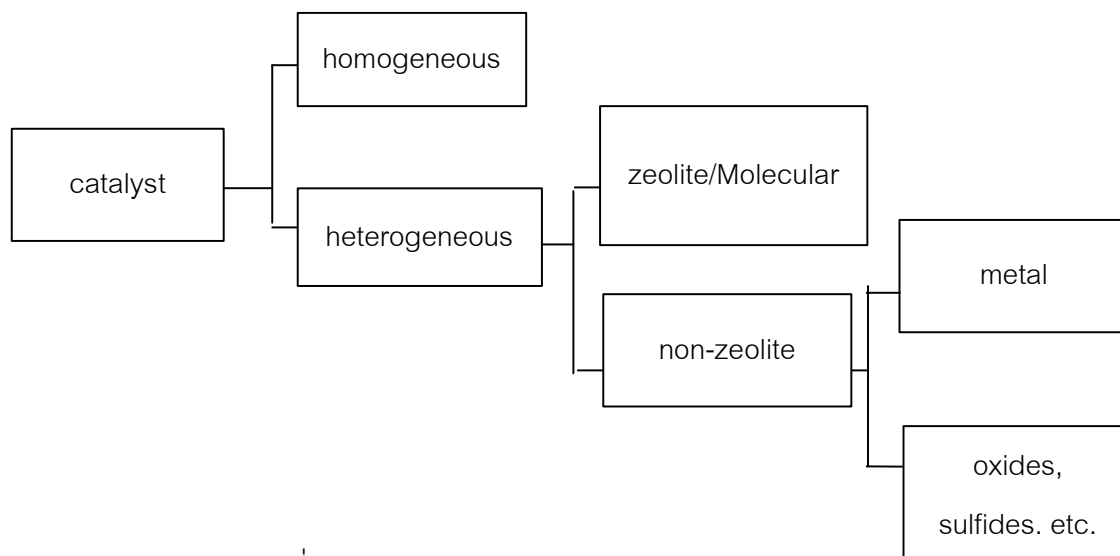
- ต้องไม่ไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา
- ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
- ต้องเป็นสารเสมอ (ไม่ใช่พลังงาน)

### 2.4.3 ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. นำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาแครกกิง (catalytic cracking)
2. นำไปใช้ในการควบคุมควันไอเสียที่ออกจากรถยนต์หรือเครื่องจักรเผาไหม้ต่างๆ (catalytic converters)
3. นำไปใช้ในการกำจัดของเสีย (waste) หรือสารที่เป็นอันตราย (toxic)
4. สามารถลดสภาวะที่รุนแรงในการเกิดปฏิกิริยาได้ อันเกิดจากกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมเคมี
5. ช่วยลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีราคาสูงได้

### 2.4.4 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา

การเร่งปฏิกิริยาสามารถแยกออกได้เป็น 2 แบบ คือ 1) การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์ (homogeneous catalysis) ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในเฟสเดียวกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่มักเป็นสารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นละลายอยู่ด้วยกัน 2) การเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalysis) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีเฟสต่างกับสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง และสารตั้งต้นเป็นแก๊สหรือของเหลว



ภาพที่ 2.4 การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา [10]

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งตามสถานะเทียบกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ มี 2 ประเภทคือ

ก. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (homogeneous catalysis)

คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวอย่างเช่นปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิตที่เร่งด้วยเอนไซม์ และปฏิกิริยาในสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน ทำให้ง่ายต่อการศึกษา แต่ก็มีข้อเสียหรือเสียสภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง

2.4.5 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์

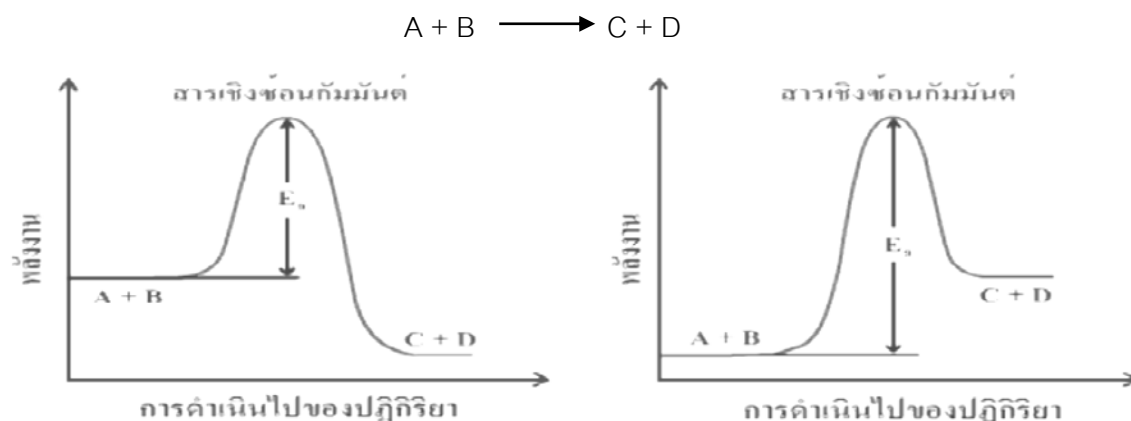
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยามีอยู่ 2 ทฤษฎี ได้แก่

1. ทฤษฎีการชน (collision theory) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้จะต้องประกอบด้วย

- สารตั้งต้นต้องมีการชนกัน
- ทิศทางของการชนต้องเหมาะสม
- การชนกันต้องทำให้เกิดพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้น

ในกรณีนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่เข้าไปนำสารตั้งต้นมาสะสมเอาไว้ที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้โอกาสที่สารตั้งต้นชนกันมีมากขึ้น

2. ทฤษฎีทอานซิชันสเตต (transition state theory) การเกิดปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์ต้องเกิดผ่าน สารตัวกลางตัวหนึ่งซึ่งเรียกว่า activated complex หลังจากนั้น activated complex สลายตัวเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 2.5



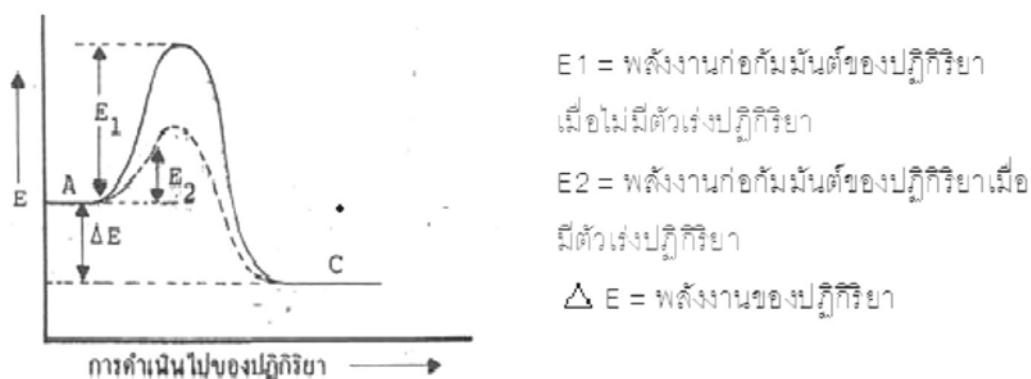
ภาพที่ 2.5 การเกิด activated complex และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา [15]

ผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นด้วยอัตราที่เร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับค่าพลังงานกระตุ้นที่มากหรือน้อยของปฏิกิริยา

$$K = Ae^{-E_a/RT} \text{ และอัตราการเกิดปฏิกิริยา} = k [A]^a [B]^b$$

จากสมการของอาร์เรเนียส (arrhenius equation) ในช่วงต้นพบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับค่าคงที่อัตรา (rate constant, k) ส่วนค่าคงที่นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (activation energy,  $E_a$ )

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นกลายเป็นสารผลิตภัณฑ์ได้เร็วขึ้น โดยไปลดค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาและไม่เข้าไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา (Equilibrium) ในระบบ แต่เข้าไปเปลี่ยนกลไกของปฏิกิริยาให้ไปเกิดในทิศทางใหม่ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่ำกว่าเดิมทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็วขึ้น ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การดำเนินไปของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา [15]

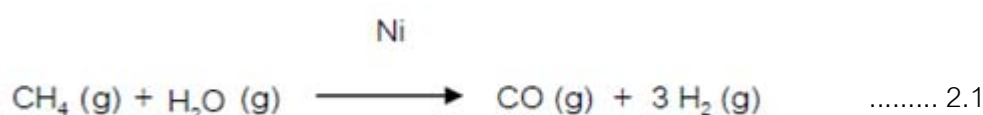


ตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีบทบาทที่สำคัญอย่างมากต่อกระบวนการผลิตในระดับ อุตสาหกรรม โดยจะพบว่าในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีและพอลิเมอร์ต่างก็นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์กันมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์

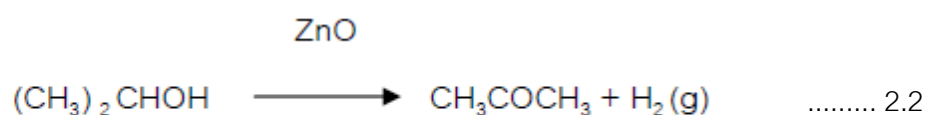
ข. ปฏิกิริยาอะตละไลซิสแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalysis) [13, 24]

คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างกับสารที่ทำปฏิกิริยา เช่นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์พบได้ในอุตสาหกรรมหลายๆอย่าง เช่น ปู่ย ผลิตภัณฑ์ยา เชื้อเพลิง เส้นใยสังเคราะห์ ตัวทำละลาย เนื่องจากสามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์

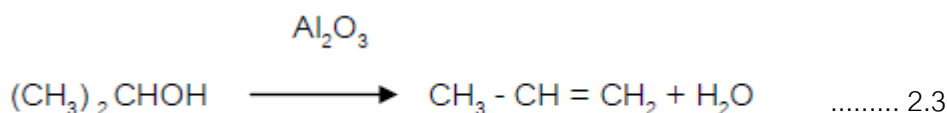
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่นำมาใช้กันส่วนใหญ่ ได้แก่ โลหะทรานซิชัน (เช่น Fe, Ni, Pt, Ag ) และ พวกออกไซด์ของโลหะ (เช่น NiO, ZnO, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>) หรือเกิดจากการผสมกันของโลหะกับพวกออกไซด์ของโลหะ 2 ชนิด เพื่อให้การทำงานดีขึ้นหรือมีความเสถียรมากยิ่งขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์นี้โดยส่วนมากถูกนำไปใช้ใน อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน ในกระบวนการ hydrogenation dehydrogenation oxidation reduction และ polymerization ตัวอย่างเช่น ในการผลิต synthesis gas (CO/H<sub>2</sub>) โดยปฏิกิริยา steam reforming ของมีเทน CH<sub>4</sub> ดังสมการที่ 2.1



สารตั้งต้นตัวเดียวกันแต่ถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างชนิดกัน อาจเกิดผลิตภัณฑ์ที่ต่างชนิดกัน เช่น ในปฏิกิริยาการสลายตัวของไอโซโพรพานอล Isopropanol : (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CHOH โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะเกิดปฏิกิริยา dehydrogenation โดยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นอะซิโตน (acetone) ดังสมการที่ 2.2



และถ้าใช้อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นโพรพิลีน (Propylene) ซึ่งปฏิกิริยาเกิดผ่าน dehydrogenation ดังสมการที่ 2.3



กระบวนการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (heterogeneous catalytic process) ขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาแบ่งออกได้เป็น 7 ขั้นตอน เป็นดังนี้

1. การแพร่กระจายของสารตั้งต้นเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา (external diffusion) เป็นความขณะไหลผ่านผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่จะแพร่ไปยังผิวด้านนอกของตัวเร่งปฏิกิริยาของสารตั้งต้นจากกระแสของสารตั้งต้นไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา (external diffusion) ในขั้นตอนนี้ยังไม่มีเปลี่ยนแปลงทางเคมี

2. การแพร่กระจายของสารตั้งต้นสู่ภายในรูพรุน (internal pore diffusion) เป็นการแพร่ของสารตั้งต้นที่บริเวณผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา เข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากรูพรุนมีขนาดเล็กมากและไม่มีรูปทรงที่ชัดเจนแน่นอนตลอดรูพรุน ทำให้ระหว่งการแพร่แบบนี้จะมีการชนกันเองระหว่งโมเลกุลของสารตั้งต้น หรือการชนของโมเลกุลกับผนังของรูพรุน ขั้นตอนนี้ยังไม่มีเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น

3. การดูดซับของสารตั้งต้นลงบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา (adsorbtion) เป็นการดูดซับของสารตั้งต้นบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาในนี้โมเลกุลของสารตั้งต้นแพร่ไปถึงตำแหน่งกระตุ้นซึ่งอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วเกิดการดูดซับซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ในการเร่งปฏิกิริยานั้นการดูดซับในเชิงเคมี (chemical adsorbtion หรือ chemisorbtion) เสมอ นั่นคือการเกิดพันธะเคมีระหว่งโมเลกุลของสารตั้งต้นในที่นี้เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbtion) และผิวหน้าของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในที่นี้เรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbent)

4. การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา (surface reaction) หลังจากที่เกิดการดูดซับแล้ว สารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาเคมีเพื่อให้เกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์ โดยปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะตอมหรือโมเลกุลของสารตั้งต้นซึ่งถูกดูดซับอยู่บนตำแหน่งกัมมันต์ที่อยู่ติดกันเคลื่อนที่มาพบกันและรวมตัวกันเป็นโมเลกุลใหม่

5. การคาย (desorbtion) เป็นการหลุดออกของสารผลิตภัณฑ์จากผิวตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากเสร็จสิ้นปฏิกิริยา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขั้นตอนนี้สุดท้าย การคายออกถือว่าเป็นกระบวนการย้อนกลับของการดูดซับ ถ้าเป็นการดูดซับในระบบปิดจะมีสมดุลเกิดขึ้นระหว่งการดูดซับและการคาย

6. การแพร่ของสารผลิตภัณฑ์ออกจากภายในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้เสมือนเป็นกระบวนการย้อนกลับของขั้นตอนที่ 2 ยกเว้นสารที่แพร่ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์ไม่ใช่สารตั้งต้น อย่างไรก็ตามถ้าปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ก็จะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาเช่นกัน

7. การแพร่กระจายของผลิตภัณฑ์ออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้นตอนนี้ก็เป็นเสมือนการย้อนกลับของปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 ยกเว้นสารที่แพร่ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์ไม่ใช่สารตั้งต้น อย่างไรก็ตามถ้าปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ก็จะมีสารตั้งต้นแพร่ออกมาเช่นกัน

#### 2.4.7 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst deactivation)

คือ การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (activity) และการเลือกจำเพาะเจาะจงในการเกิดปฏิกิริยา (selectivity) สาเหตุของการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยามีดังนี้

1. พอยซันนิง (poisoning) เป็นการเสื่อมของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบหนึ่ง ที่เกิดจากการเกาะติดของสารพอยซัน (poison) บนพื้นที่กัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมีอย่างแข็งแรง (strong chemisorptions) ทำให้สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปและไม่สามารถและปฏิกิริยาได้ สารพอยซันดังกล่าวนั้นอาจมีการปนเปื้อนในสารป้อน ซึ่งพอยซันนิงจะส่งผลต่อการปิดกั้นการทำงานของพื้นที่กระตุ้น และอาจทำให้มีการดูดซับสารอื่นที่ไม่ใช่สารตั้งต้นปฏิกิริยาแทนเนื่องจากผลทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนแปลงไป คำว่าสารพอยซันในที่นี้จึงหมายถึงสารที่เป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา

2. การอุดตัน (fouling) เป็นปรากฏการณ์ทางด้านกายภาพ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝุ่นผง หรือพวกคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยามาเกาะหรือไปอุดตันที่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำให้ความว่องไว หรือการเลือกจำเพาะเจาะจงของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

3. การเสื่อมสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจากการซินเทอริง (sintering) เป็นการลดลงของพื้นที่ผิวกัมมันต์โดยมีการปรับโครงสร้างภายในของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งส่วนใหญ่เป็นผลมาจากความร้อนทางกายภาพเกิดเนื่องจากการที่โลหะเกิดการหลอมเหลวเนื่องจากมีการใช้อุณหภูมิที่สูงในกระบวนการผลิต ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงส่งผลให้โลหะนั้นมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ตำแหน่งที่ว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ active site จึงลดลง หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแบบหนึ่งไปเป็นโครงสร้างอีกแบบหนึ่ง ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวที่ลดต่ำลง

4. การเสื่อมสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาจากการเปลี่ยนแปลงในสถานะของแข็ง (solid state transformation) เป็นการเสื่อมสภาพที่เป็นผลต่อเนื่องและรุนแรงขึ้นจากการซินเทอริงที่อุณหภูมิสูงที่มากขึ้น หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกระตุ้นกับตัวรองรับ

#### 2.4.8 การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst characterization)[16]

การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งกายภาพและเคมี เป็นสิ่งที่สำคัญในการอธิบายการทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะช่วยออกแบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมตามความต้องการ ซึ่งการวิเคราะห์สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทางกายภาพ สนใจในเรื่องของการหา พื้นที่ผิว (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ได้แก่ วิธีการดูดซับ แก๊สโดยเทคนิคบีอีที (BET) และการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยอาศัยเทคนิคทางฟิสิกส์เข้ามาช่วย ได้แก่ X-Ray powder diffraction (XRD), transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy (SEM) เป็นต้น และในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการดูดซับแก๊ส โดยเทคนิค BET

1. วิธีการดูดซับแก๊สโดยเทคนิคบีอีที (BET) การวัดพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุน และการศึกษารูปร่างของรูพรุนซึ่งทฤษฎีของบีอีที (BET) ใช้การดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) โดย Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการพัฒนามาจากทฤษฎีการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) ของ Longmuir โดยทฤษฎีของ Longmuir อยู่บนสมมติฐานที่ว่า

- การดูดซับโมเลกุลของแก๊สเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ บนผิวหน้าจนกระทั่งเต็ม แต่มีเพียงชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น
- การดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนย้าย (localize)
- พลังงานที่ใช้ในการดูดซับบนพื้นผิวทุกชนิดนั้นมีค่าเท่ากัน จึงส่งผลให้มีการดูดซับเท่ากันตลอดทั้งพื้นผิว
- ไม่สนใจผลของแรงผลักและแรงดึงดูดจากโมเลกุลข้างเคียง

ส่วนทฤษฎีการดูดซับแก๊สของบีอีที (BET) นั้นมีสมมติฐานที่เพิ่มขึ้นมาจากสมมติฐานของ Longmuir ดังนี้

- จำนวนของ active site นั้นคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง
- โมเลกุลในชั้นที่เข้าไปเกาะจะเข้าไปเกาะชั้นก่อนหน้าในลักษณะที่ตรงกัน
- คุณสมบัติโมเลกุลที่ถูกดูดซับตั้งแต่ชั้นที่ 2 ขึ้นไป มีคุณสมบัติที่เหมือนกับแก๊สหรือของเหลว
- เมื่อความดันย่อยของตัวถูกดูดซับมีค่าเท่ากับความดันไออิ่มตัว ตัวถูกดูดซับจะควบแน่นบนชั้นที่ดูดซับ และจำนวนชั้นของการดูดซับจะมีลักษณะแบบไม่จำกัด

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาณที่ถูกดูดซับแล้วเกิดการดูดซับชั้นเดียว คือ สมการของบีอีที แสดงดังสมการที่ 2.4

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \frac{I}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \dots\dots\dots 2.4$$

เมื่อ P = ความดันย่อยของสารที่จะมาเกาะ (adsorbate)

P<sub>0</sub> = ความดันไออิ่มตัว (saturation pressure) ของแก๊สที่อุณหภูมิที่ศึกษา

V = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

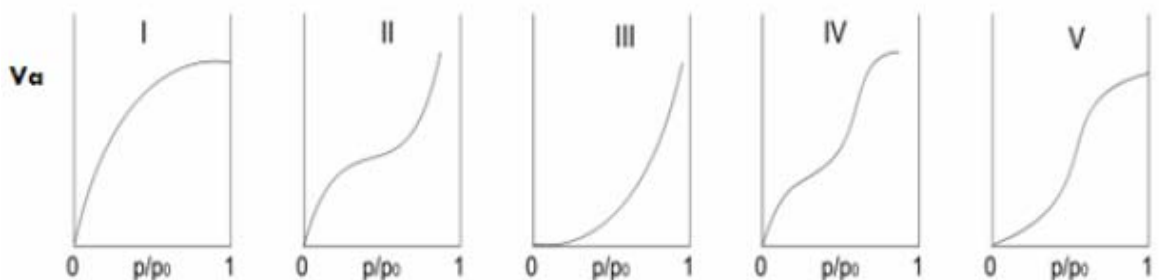
V<sub>m</sub> = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับเพื่อเกิดเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว

C = ค่าคงที่ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของการดูดซับ และค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของแก๊ส

$$C = C^{(q_1-q_2)}/RT$$

เมื่อ q<sup>1</sup> = ค่าความร้อนของการดูดซับที่ชั้นแรก

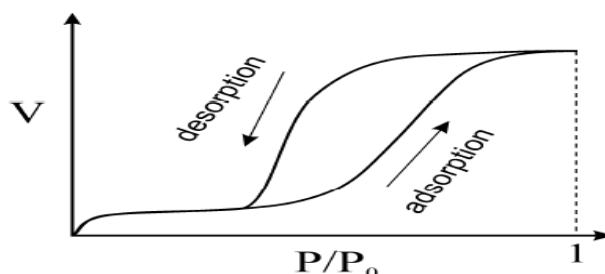
เมื่อ q<sup>2</sup> = ค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของแก๊สที่มาดูดซับบนชั้น อื่น ๆ ทั้งหมด ซึ่งวิธีในการทดลองสามารถทำได้โดยการหาปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่สภาวะความดัน (P) หรือ ความเข้มข้น (C) ที่แตกต่างกัน ด้วยการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งจะได้เส้นไอโซเทอรั่มของการดูดซับ (adsorption isotherm) โดย Brunauer ได้เสนอภาพแบบของ adsorption isotherm ที่เป็นไปได้ 5 ภาพแบบ ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 adsorption isotherm ที่เป็นไปได้ 5 ภาพแบบ ซึ่งเสนอโดย Brunauer

โดยปกติแก๊สไนโตรเจนมักใช้เป็นตัวถูกดูดซับ เพราะแก๊สไนโตรเจนมีราคาถูก มีความบริสุทธิ์สูง ดูดซับได้ง่ายและรวดเร็วกว่าการใช้แก๊สชนิดอื่นๆ โดยปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล คือ ที่อุณหภูมิจุดเดือด (-195.8°C) และความดันที่ใช้วัดในช่วงต่ำกว่า 1 บรรยากาศ ภายใต้ภาวะเช่นนี้โมเลกุลของไนโตรเจนถูกดูดซับเป็นชั้นๆ ที่เรียงซ้อนกัน แต่ต้องการที่จะคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับ ที่สอดคล้องกับการดูดซับเพียงชั้นเดียว ดังนั้นความดันไอย่อย

ของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้จึงควรอยู่ในช่วง 10 – 100 kPa ทั้งนี้ก็เพื่อให้ค่า  $P/P_0$  อยู่ในช่วง 0.05 -0.3 ซึ่ง Brunauer พบว่าแก๊สไนโตรเจนจะให้ ลักษณะของ adsorption isotherm มีภาพการดูดซับเป็นแบบ II (s-shape isotherm) บนผิวหน้าทั้งหมด



ภาพที่ 2.8 adsorption isotherm แบบที่ 2

adsorption isotherm แบบที่ 2 บางครั้งอาจเรียกว่า sigmoid หรือ s-shape isotherm โดยพบในวัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างแบบไม่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งที่จุดโค้ง เรียกว่า knee เป็นจุดเปลี่ยนจากการดูดซับ แบบชั้นเดียว (monolayer) ไปเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer)

ค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ต้องการหาได้โดยเทคนิคนี้ แต่พบว่าปัญหาของการหาพื้นที่ผิวโดยเทคนิค BET คือความไม่แน่นอนของผู้วัดและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดสำหรับมาตรฐานของ ASTM กำหนดความ ผิดพลาดในการวัดด้วยเครื่องมือเครื่องเดียวกันจะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 1 และความผิดพลาดในการวัดด้วย เครื่องมือต่างเครื่องกันจะต้องมีค่าไม่เกินร้อยละ 3

### 3. เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry [24]

เทคนิค X-Ray fluorescence spectrometry หรือ เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิด องค์ประกอบ และปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างไม่ว่าจะเป็นเป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอย เทคนิค XRF อาศัย หลักการของการที่เมื่อรังสีเอกซ์ซึ่งมีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) และโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดกันนั้นจะมีความยาวคลื่นหรือค่าพลังงานเฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง

### 2.5 การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking) [12, 26]

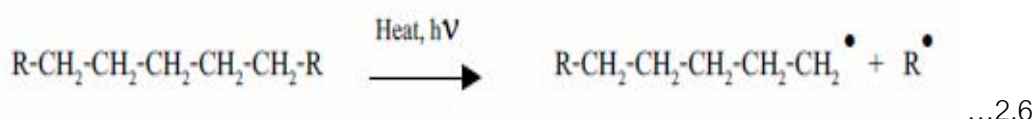
จากอิทธิพลของความร้อนทำให้โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนแตกตัวออกไป Siliman ได้เสนอแนะวิธีนี้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1871 กระบวนการที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระบวนการแรก คือ Burton Process ได้ใช้แพร่หลายในช่วงปี ค.ศ. 1910-1920 หลังจากนั้นได้มีกระบวนการอื่นๆ เกิดขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่นกระบวนการ Dubbs เป็นต้น จนเมื่อหมด ความนิยมเนื่องจากมี

กระบวนการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาแทนที่ การใช้หน่วยเหล่านี้ก็เบนวัตถุประสงค์ไป คือ ใช้สำหรับการผลิตน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นจากน้ำมันหนัก หรือกากน้ำมัน ซึ่งเรียกว่า thermal gas oil unit และใช้ช่วยลดความหนืดของกากน้ำมันในการผลิตน้ำมันเตาชนิดใส โดยเรียกชื่อหน่วยนี้ว่า Visbreaker นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตไคปิโตรเลียมจากกากน้ำมัน โดยเรียกว่า thermal coking process ดังนั้นคำว่า thermal cracking จึงเป็นคำกลางๆที่ หมายถึง กระบวนการเหล่านี้ กระบวนการใดก็ได้

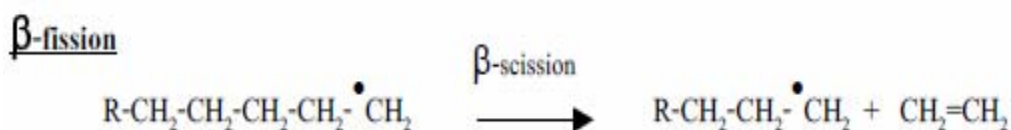
ปฏิกิริยาสำคัญสำหรับการแตกตัวด้วยความร้อน คือ การเปลี่ยนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลที่เล็ก ๆ โดยใช้อุณหภูมิสูง การแตกตัวนี้ ถ้าเป็นไปได้ควรแตกตัวให้พอดีๆ หรือเรียกว่า เลือกลงเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ เพราะถ้าแตกเป็นโมเลกุลเล็กเกินไป เช่น  $C_1-C_4$  ซึ่งเป็นแก๊สและไม่เป็นที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อน จะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะส่วนที่เป็นแซนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันเองต่อไป

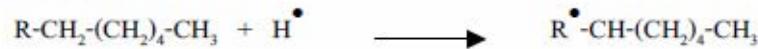
ปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน จัดเป็นปฏิกิริยาประเภทอนุมูลอิสระ (free radical) แบบเป็นห่วงโซ่ ประกอบด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้น

1. ขั้นเริ่มต้น (Initiation step) ขั้นตอนนี้เป็นการเกิดอนุมูลอิสระ (free radical) โดยความร้อนไปทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนแตกขาดออกจากกันเกิดเป็นอนุมูลอิสระและไปทำปฏิกิริยาในขั้นตอนต่อไป ดังสมการ 2.6



2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (propagation step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาต่อเนื่องจะเกิดการเปลี่ยนสภาพของไอโซเมอร์ และแตกโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง หลังจากนั้นเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นมาใหม่นั้นอาจทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น ๆ เป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นมา นอกจากนี้อนุมูลอิสระนั้น อาจทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นอีกไปเรื่อยๆ ส่งผลให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีขนาดที่เล็กลงไป ตามสมการที่ 2.7



**Chain transfer**

...2.7

3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนั้นจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยอนุมูลอิสระทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใหญ่ขึ้นซึ่งอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่ โมเลกุลเดียว หรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อยหลายโมเลกุล ตามสมการที่ 2.8



...2.8

ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่ป้อนเข้าไปทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปโมเลกุลที่ใหญ่แตกตัวง่าย และเกิดปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องอื่นๆ ตามมาดังนั้นสารป้อนไฮโดรคาร์บอนที่หนัก เช่น กากน้ำมันจะแตกตัวได้เร็ว โดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นสารป้อนเบาจะต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อให้ปฏิกิริยาเป็นไปตามที่ต้องการ

**2.6 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) [12, 26]**

การค้นพบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยในการแตกตัวโมเลกุลน้ำมันขนาดใหญ่ให้เป็นขนาดตามที่ต้องการนั้นนับเป็นความก้าวหน้าที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมัน เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาทำหน้าที่ปรับปรุงการแตกตัวโมเลกุลของน้ำมันให้เป็นไปตามลักษณะที่ต้องการ สามารถควบคุมและปรับแต่งโครงสร้างโมเลกุลที่ได้ให้มีขนาดที่เหมาะสมต่อการใช้งานไม่ว่าจะเป็นการผลิตน้ำมันเบนซิน

การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาของคาร์โบเนียมไอออน (carbonium ion) ตรงกันข้ามกับปฏิกิริยาที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อน อาศัยอนุมูลอิสระ โดยที่อนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนเกิดจากไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมไป แต่ตัวมันจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนคาร์โบเนียมไอออนเกิดจากการที่ไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรไอออนที่มีประจุลบไป ตัวมันเองจึงมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า ความแตกต่างของผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวทางความร้อน และแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางที่ 2.1

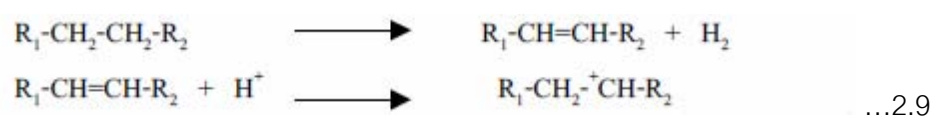


ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการแตกตัวด้วยความร้อน และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

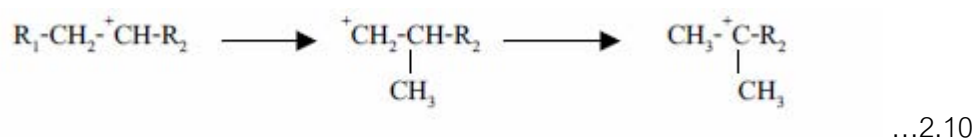
การแตกตัวด้วยความร้อน (อนุมูลอิสระ)	การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (คาร์โบเนียมไอออน)
1. ได้แก๊สเบา ๆ ส่วนมากมีคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 3 อะตอม	1. ได้แก๊สซึ่งส่วนมากมีคาร์บอนอะตอม 3-6 อะตอม
2. โอลิฟินมักเป็นแอลฟาโอลิฟินมาก	2. ไม่ค่อยมีแอลฟาโอลิฟิน
3. พาราฟินเป็นแกนตรง	3. พาราฟิน จะแยกแบบไอโซพาราฟิน
4. แนฟทีน ไม่ไวต่อปฏิกิริยา ไม่เกิดปฏิกิริยา	4. แนฟทีน ที่ได้ไวต่อปฏิกิริยา และเกิดปฏิกิริยาขั้นสอง
5. การแตกแขนงของแอรโอมติก จะเหลือคาร์บอนอะตอมติดอยู่กับวงแหวนอีก 1-2 อะตอม	5. การแตกแขนงของแอรโอมติก จะไม่เหลือคาร์บอนอะตอมที่ติดอยู่กับวงแหวนอีกเลย
6. วงแหวนแอรโอมติกจะไม่ค่อยเปลี่ยน	6. วงแหวนแอรโอมติกจะไม่ค่อยเปลี่ยน

กลไกของการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนโดยตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย

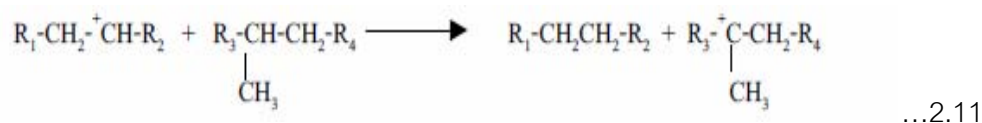
1. การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) เกิดจากโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรด์ไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออนโดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary ion และ primary ion ตามสมการที่ 2.9



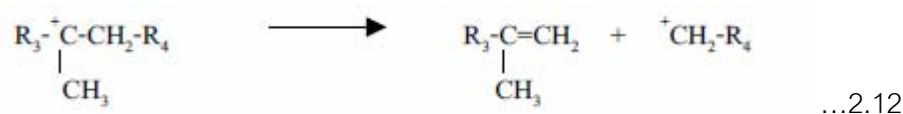
2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์โบเนียมไอออนซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของคาร์โบเนียมไอออนมีความเสถียรที่ต่างกัน ดังสมการ 2.10



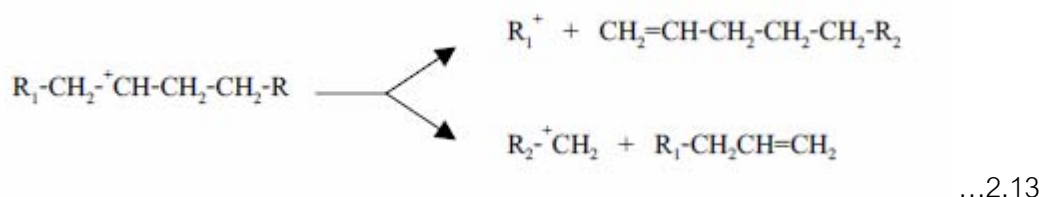
จากนั้นเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน ตามสมการที่ 2.11



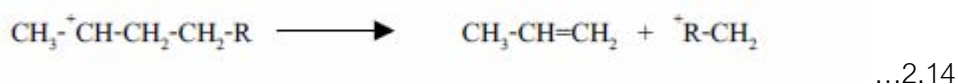
และคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยาหรือแตกตัวที่ตำแหน่งที่นับจากจุดที่มีประจุบวกซึ่งจะให้สารประกอบพวกโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยส่วนมากเป็น primary carbonium ion ตามสมการที่ 2.12



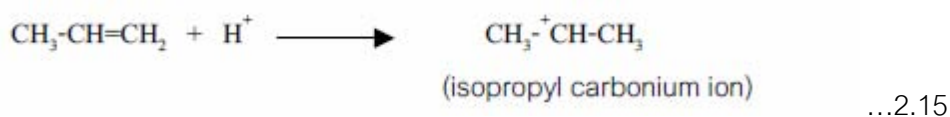
ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 แบบ เช่น ในตัวอย่างของ secondary carbonium ion ตามสมการที่ 2.13



ถ้า  $R_1 = H$  สามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ตามสมการที่ 2.14

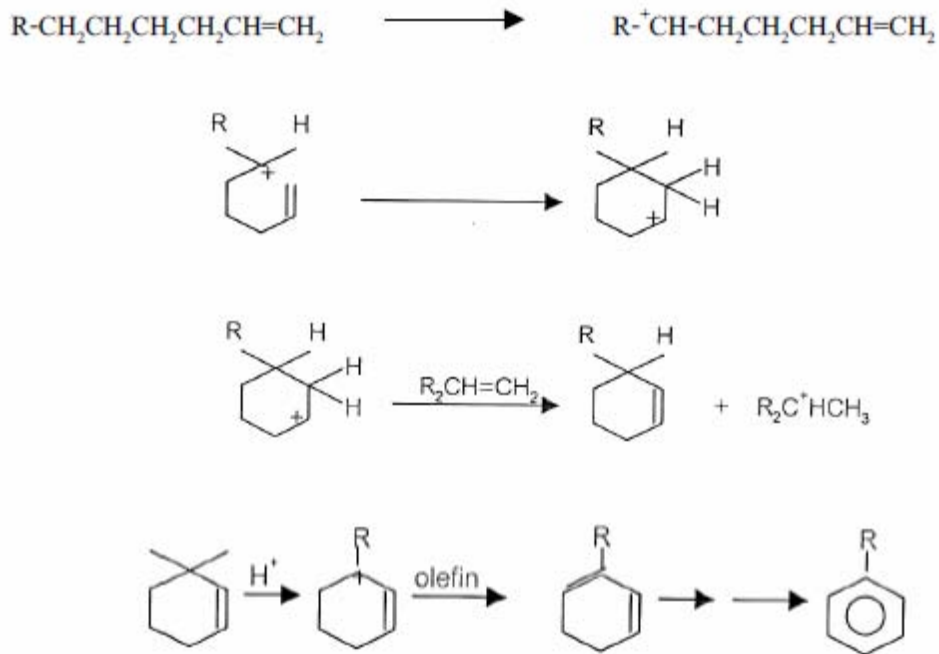


โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโพรพีนจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในสภาพคาร์บอนเนียมไอออนซึ่ง จะไม่สามารถเกิด  $\beta$ -scission ต่อไปได้ ดังสมการ 2.15



Isopropyl carbonium ion จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮไดรด์กับโมเลกุลประกอบไฮโดรคาร์บอน อื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน ในการเกิดวงแหวนแอโรแมติกจากปฏิกิริยา dehydrocyclization โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา  $\beta$ -scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็น วงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรด ของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิด

การรับโปรตอนจาก cyclohexadine ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก ดังสมการ 2.16



...2.16

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกแอโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่จะเกาะติดอยู่บนผิวของ ตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

## 2.7 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) [12, 26]

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดย ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของ โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินาที่สามารถ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆ กับการเติมไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นที่บริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโอเลฟินไปทำให้เกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณ ที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะเกิดการแตกตัว และที่บริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเอง จะเกิดการ

เติมไฮโดรเจนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีตัวในที่สุด นอกจากนี้การที่เกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน บริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยทำความสะอาดให้กับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป

กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้เกิด การเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็น อย่างดี เพราะ หากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสีย ความสามารถไปหรือทำให้เครื่อง ปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ ต้องการ

## 2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

G. Elovdi , M. Olazar , G. Lopez M. [11] ศึกษาการแตกตัวทางความร้อนของพลาสติกพอลิเอทิลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Conical spouted bed โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ ซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5 , HY และ H $\beta$  ซึ่งดำเนินการภายใต้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ พบว่า การใช้ซีโอไลต์ ชนิด HZSM-5 ให้ผลดีที่สุด เนื่องจากให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นโอเลฟินชนิดเบา (Light Olefin) ถึงร้อยละ 58 แต่การใช้ซีโอไลต์ ชนิด HY และ H $\beta$  ให้อัตราส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นพวงสารไฮโดรคาร์บอนตั้งแต่คาร์บอน 5 ตัวขึ้นไปที่ไม่ใช่แอมโรแมติกประมาณร้อยละ 45 และมีผลิตภัณฑ์ที่เป็นไซเกิดขึ้นมาก

Junming Xu, Jianchun Jiang, Yunjuan Sun [14] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันถั่วเหลืองเป็น เชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยเปรียบเทียบที่ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างชนิดกัน ซึ่ง ดำเนินการทดลองภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 480-520 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไป วิเคราะห์เปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำมันดีเซล แก๊สโซลีน และค่าความเป็นกรด พบว่า การใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาอะลูมิเนียมออกไซด์ ให้อัตราส่วนน้ำมันดีเซลมากที่สุดถึงร้อยละ 73.3 แต่ก็ให้ความเป็น กรดในน้ำมันมากถึง 104.5 mg KOH/g และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมคาร์บอเนตให้ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สโซลีนมากที่สุดถึงร้อยละ 12 และให้ความเป็นกรดในแก๊สโซลีนน้อยที่สุดโดย ให้ค่าความเป็นกรดเพียง 15.9 mg KOH/g

Katsuhida Murata, Mihai Brebu, Sakata Yusuka [15] ศึกษาการแตกตัวทางความร้อนของ พลาสติกพอลิเอทิลีนเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซิลิกา-อะลูมินาและไม่ใช่ตัวเร่ง ปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ศึกษาที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของ สารป้อนเข้า 0-1.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สและของเหลวที่เกิดขึ้น พบว่า เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบปริมาณผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นมีมากขึ้น และแก๊สที่เกิดขึ้นมี

สัดส่วนของบิวเทนและบิวทีนที่มากขึ้น ในขณะที่มีอีเทนและอีทีนที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

Kim, S.S., Chun, B.H., Kim, S.H. [16] ศึกษาปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ ซึ่งให้อัตราความร้อนที่ 0.50, 1.00 และ 2.00 องศาเซลเซียสต่อหน้าที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ซึ่งพบว่าน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วนั้นแตกตัวได้ดีที่อุณหภูมิ 400 ถึง 460 องศาเซลเซียส โดยตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว ได้แก่ พลังงานกระตุ้น และพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการให้ความร้อน

Koc Adil, Y. Ali Bilgesu [17] ศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนของพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารป้อนเข้า 0.7 กรัมต่อหน้าที่ และอัตราการไหลของอากาศที่ 200, 400 และ 600 มิลลิลิตรต่อหน้าที่ โดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้โมลิบดินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นมากที่สุดที่ภายใต้ภาวะอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของอากาศเท่ากับ 600 มิลลิลิตรต่อหน้าที่ โดยมีค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นร้อยละ 102 ที่เป็นเช่นนี้เพราะ ออกซิเจนในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบทำให้สารประกอบอินทรีย์ที่ได้เปลี่ยนภาพเป็นแอลกอฮอล์ กรดคาร์บอกซิลิก จึงส่งผลให้ค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นมีค่ามาก และเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดที่ภาวะอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลเข้าของอากาศเท่ากับ 600 มิลลิลิตรต่อหน้าที่ โดยมีค่าสัดส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นร้อยละ 95

Y.S. Prasad [18] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันคาโนโลรา (canolora oil) เพื่อให้ได้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟิสิกซ์เบด (fixed bed) จากงานวิจัยพบว่าปัจจัยของอุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการแตกตัวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำมันคาโนโลรา (canolora oil) ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว และได้ทำวิธีการทางสถิติเพื่อออกแบบการทดลองเพื่อต้องการผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 60 ถึง 95 และเป็นสารประกอบแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากที่สุด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการแตกตัวคือ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมงในการแตกตัว

กมลวรรณ กิ่งพุทธพงษ์และคณะ [21] ศึกษาการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นบนตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียมเฮกซะเอมเอส (HMS) งานวิจัยได้ทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30, 45, 60 และ 120 นาที ซึ่งผลจากงานวิจัยพบว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็น

ผลิตภัณฑ์เหลวและแก๊สเพิ่มมากขึ้น ส่วนกากที่เหลือมีปริมาณที่ลดลง และเมื่อเปลี่ยนตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอะลูมิเนียมชนิด  $\beta$  เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ผลที่ได้มีค่าที่ไม่แตกต่างจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียมเฮกซะเอมเอส (HMS)

จินตนา สุมารินทร์ [22] ศึกษาการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง งานวิจัยทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิ 390 ถึง 450 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนเข้าของสารตั้งต้นตั้งแต่ 0.34 ถึง 3.30 กรัมต่ออนาที อัตราการเติมไฮโดรเจนที่ 10 มิลลิลิตรต่ออนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้เท่ากับร้อยละ 57.21 ถึง 57.36

ศิลปีตารา ทศนปรัชญานนท์ [25] ศึกษาการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ต่อเนื่อง ศึกษาที่อุณหภูมิ 390-450 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 0.32 -1.23 กรัมต่ออนาที อัตราส่วนของพลาสติกผสมพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีนที่ใช้คือ 70 : 30 โดยน้ำหนัก ร้อยละ 1- 10 โดยน้ำหนัก ของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 5-10 มิลลิลิตรต่ออนาที และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.1 -1.0 เหล็กบนถ่านกัมมันต์ พบว่าที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2.01 กรัมต่ออนาที ปริมาณพลาสติกผสมพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีนที่ใช้คือ 70 : 30 โดยน้ำหนัก จำนวนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของสารตั้งต้น อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 5 มิลลิลิตรต่ออนาที และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 บนถ่านกัมมันต์ร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สและของเหลวร้อยละ 37.28 เมื่อนำไปวิเคราะห์หาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณแฉะร้อยละ 20.51 เคาโรซีนร้อยละ 4.20 แก๊สออกไซด์ร้อยละ 11.60 แก๊สออกซัลร้อยละ 2.95 และกากน้ำมันร้อยละ 23.46 โดยน้ำหนัก

วิษขากร จารุศิริ [26] ศึกษาการแปรสภาพน้ำมันพืช น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว และพลาสติกใช้แล้ว ให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ทดลองที่อุณหภูมิในช่วง 450-600 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 1.23 , 3.30 และ 9.04 กรัมต่ออนาที อัตราส่วนน้ำมันพืช น้ำมันหล่อลื่น และพลาสติกพอลิพรอพิลีนเท่ากับ 0.7 : 0.1 : 0.2 และอัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจนตั้งแต่ 0- 10 มิลลิลิตรต่ออนาที พบว่าที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของแก๊สไฮโดรเจน 5 มิลลิลิตรต่ออนาที อัตราการไหลของสารป้อนเข้า 1.23 กรัมต่ออนาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์ ให้ผลิตภัณฑ์ร้อยละของแก๊สไฮโดรคาร์บอนสูงสุตร้อยละ 50.95 เคาโรซีนร้อยละ 10.38 แก๊สออกซัลร้อยละ 21.68 และกากน้ำมันร้อยละ 16.99 โดยน้ำหนัก จากนั้นจึงนำผลิตภัณฑ์

ของเหลวที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อนบรรจุนในเครื่องกลั่นลำดับส่วนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สโซลีน ต่อมาจึงนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ เช่น สี อัตราการไหลเท และความดันไอ

อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล [27] ศึกษาการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิบดีนัมบนอะลูมินา และซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ความดันไฮโดรเจนที่ใช้อยู่ในช่วง 5 ถึง 10 บาร์ ภายใต้อุณหภูมิ 375 ถึง 425 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 10 ถึง 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิบดีนัมบนอะลูมินาร้อยละ 1 ถึง 5 โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ HZSM-5 อยู่ในช่วงร้อยละ 0.1 ถึง 10 โดยน้ำหนัก ผลจากงานวิจัยพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ผ่านการใช้แล้ว คืออุณหภูมิ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลา ซึ่งเมื่อเพิ่มปัจจัยทั้งสามจะพบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ แนฟทา เคโรซีน และแก๊สออกยล์เบา มีปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น โดยสภาวะที่เหมาะสมให้แก๊สโซลีนสูงสุดคือที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิบดีนัมบนอะลูมินาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และ HZSM-5 ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักนอกจากนั้นยังพบว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ปริมาณแนฟทาสูงสุด

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวโดยการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้เพื่อหาภาวะของการทดลองที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน และผลิตภัณฑ์เหลวที่ดีที่สุด

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง (tubular furnace) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกกลวง สามารถให้ความร้อนได้ถึง 1,200 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller) ดังภาพที่ 3.1

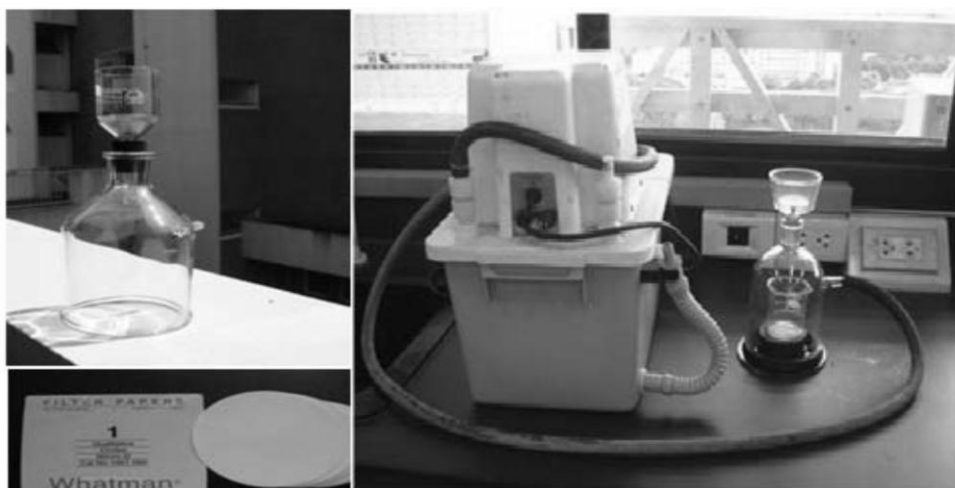


ภาพที่ 3.1 เตาเผาอุณหภูมิสูง

- 3.1.2 เครื่องปฏิกรณ์ เป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.4 เมตร ความยาว 0.8 เมตร
- 3.1.3 ชุดลดอุณหภูมิสารผลิตภัณฑ์ (condenser) ทำจากท่อสเตนเลส เพื่อลดอุณหภูมิของสารผลิตภัณฑ์และควบแน่นแก๊สที่เกิดขึ้น



- 3.1.4 ปั๊มเพอริสแตติก (peristaltic pump) สำหรับควบคุมอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นเข้าเครื่องปฏิกรณ์
- 3.1.5 สายยาง masterflex สำหรับใช้กับปั๊มเพอริสแตติก
- 3.1.6 โบริกซ์ปั่นกวน (motor stirrer) สำหรับกวนให้สารตั้งต้นมีอัตราส่วนที่เสมอกันตลอดทั่วทั้งเครื่องปฏิกรณ์
- 3.1.7 เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นชนิดเค (K-type) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร
- 3.1.8 ชุดเลือกบอกอุณหภูมิแบบดิจิตอล (temperature indicator and temperature switch) สำหรับเลือกดูอุณหภูมิในตำแหน่งที่ต้องการ
- 3.1.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 3.1.11 เครื่องชั่งน้ำหนัก ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.1.12 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.13 ตู้อบแบบ dry oven เพื่ออบไล่ความชื้นตรวจเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.1.14 ตู้ดูดความชื้น (desiccator)
- 3.1.15 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ ได้แก่ เครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกส่วนของกากน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์ออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็งโดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วแสดงดังภาพ 3.2



ภาพที่ 3.2 ชุดกรองสุญญากาศ

- 3.1.15 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulated distillation) AC SIMDIS บริษัท AC Analytical Control จำกัด พร้อมเครื่องตรวจวิเคราะห์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL5CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบ

ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวตามคาบจุดเดือด วิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น  
(simulated distillation gas chromatography : Varian CP-3800)

3.1.16 เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area) บริษัท micromeritics รุ่น ASAP 2020 สำหรับวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส แสดงดังภาพ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด(BET surface area)

3.1.16 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) เทคนิค XRF อาศัยหลักการของการเปลี่ยเบนรังสี X พลังงานสูงเข้าไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) และโฟตอนที่ปล่อยออกมามากจากธาตุต่างชนิดกันในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่นหรือพลังงานเฉพาะสำหรับธาตุนั้น จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุและปริมาณที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้ เครื่อง XRF ดังภาพที่ 3.5



### ภาพที่ 3.5 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

## 3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.2.1 น้ำมันพืชใช้แล้ว จากน้ำมันพืชใช้แล้วที่เตรียมนำมาแปรสภาพเป็นน้ำมันไบโอดีเซล จากบริษัทบางจาก จำกัด (มหาชน)
- 3.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ (Calcium Oxide)
- 3.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide)

## 3.3 การดำเนินงานวิจัย

- 3.3.1 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชใช้แล้ว ได้แก่ สมบัติทางกายภาพ องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้ว และองค์ประกอบของกรดไขมัน
- 3.3.2 วิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ได้แก่องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) และวิเคราะห์หาพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET
- 3.3.3 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้

โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วนการทดลองดังนี้

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วที่อุณหภูมิตั้งแต่ 390-440 องศาเซลเซียส
  2. ศึกษาชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์
  3. ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วที่ร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนัก
  4. ศึกษาอัตราการป้อนที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วตั้งแต่ 2-5 กรัม/นาที
- 3.3.4 ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อหาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโดยตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ

อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้การคำนวณจากโปรแกรม Design expert เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์

ตัวแปร	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	390
อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (กรัมต่อนาที)	2	5
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1	5

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์

การทดลอง	ตัวแปร		
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (กรัมต่อนาที)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)
	A	B	C
1.1	390	2	1
1.2			
2.1	390	2	5
2.2			
3.1	390	5	1
3.2			
4.1	390	5	5
4.2			
5.1	440	2	1
5.2			

6.1	440	2	5
6.2			
7.1	440	5	1
7.2			
8.1	440	5	5
8.2			
9.1	415	3.5	3
9.2			
9.3			

3.3.5 นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่เกิดขึ้นจากการทดลองไปวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง simulated distillation gas chromatograph เพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือด ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatograph เพื่อหาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในแก๊ส

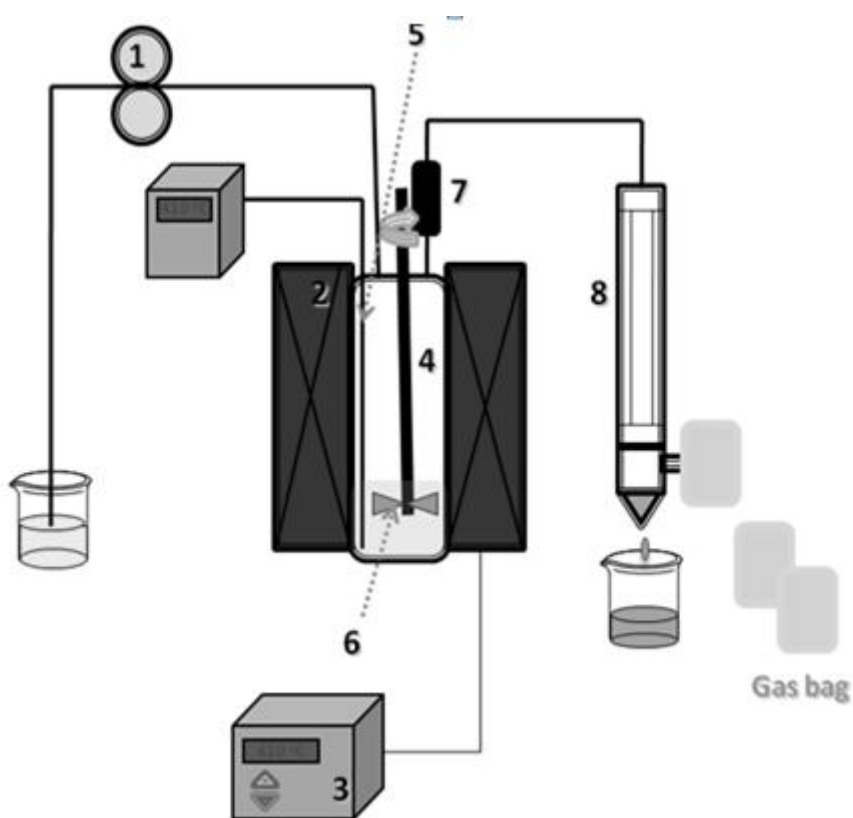
### 3.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 3.4.1 เตรียมสารตั้งต้นตามสภาวะการทดลองที่กำหนด โดยชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง ตลอดการทดลอง
- 3.4.2 ประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนประกอบต่างๆ โดยใส่เครื่องปฏิกรณ์ในเตาเผาอุณหภูมิสูง สารตั้งต้นจะถูกป้อนและควบคุมอัตราการป้อนด้วยปั๊มเพอริสแตติก ด้านบนของเครื่องปฏิกรณ์ต่อกับชุดลดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิจริงภายในเตา แสดงดังภาพ 3.6
- 3.4.3 ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์จนกระทั่งถึงอุณหภูมิตามสภาวะการทดลองที่กำหนด
- 3.4.4 ป้อนสารตั้งต้นเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์โดยใช้เพอริสแตติกปั๊มรอจนกระทั่งสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะถูกลดอุณหภูมิโดยเครื่องลดอุณหภูมิ (condenser) กลายเป็นผลิตภัณฑ์เหลวและแก๊ส
- 3.4.5 เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารตั้งต้นผ่านไป 2 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้ทั้งหมดด้วยเครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 3.4.6 นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

ในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยเครื่อง simulated distillation gas chromatograph

3.4.7 นำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง gas chromatograph

3.4.8 นำกากน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ไปกรองด้วยเตตระไฮโดรฟูเรนเพื่อแยกของแข็งออกจากกากน้ำมัน



ภาพที่ 3.6 ชุดทดลองประกอบด้วย 1)ปั๊มเพริสแตติก (peristaltic pump) 2)เตาเผาอุณหภูมิสูง 3)อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล 4)เครื่องปฏิกรณ์ 5)เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) 6)ไบกวน 7)รีฟลักซ์ (reflux) 8)ชุดลดอุณหภูมิ (condenser)

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อกระบวนการเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ โดยศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ตลอดจนหาการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของน้ำมัน และผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

#### 4.1 การวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของสารตั้งต้น

##### 4.1.1 สมบัติเบื้องต้นของน้ำมันพืชใช้แล้ว

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้วที่จะนำมาเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาด้วยเครื่อง simulated distillation gas chromatograph (DGC) ได้ผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันพืชใช้แล้ว

องค์ประกอบ	ร้อยละองค์ประกอบ
แนฟทา	7.49
เคโรซีน	28.67
แก๊สออยล์เบา	20.63



แก๊สออกยล์	2.81
กากน้ำมัน	40.40

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของน้ำมันพืชใช้แล้วเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่นพบว่า น้ำมันพืชใช้แล้วมีโมเลกุลที่ใหญ่และไม่มีสมบัติที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เนื่องจากมีองค์ประกอบของกากน้ำมันสูงถึงร้อยละ 40.40 และมีปริมาณเนฟทาน้อยมากเพียงร้อยละ 7.49 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่สนใจในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว

สมบัติทางกายภาพ	
ความหนืด (40°C) : ASTM D2270	45.08
ค่าพลังงานความร้อนจำเพาะ (KJ/kg):	39,340

ตารางที่ 4.2 แสดงสมบัติทางกายภาพของน้ำมันพืชใช้แล้ว พบว่าน้ำมันพืชใช้แล้วมีค่าความหนืดและค่าความจุความร้อนไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้โดยตรงจึงต้องนำมาปรับเปลี่ยนด้วยเทคนิควิธีต่างๆ ทางเคมี เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถใช้กับเครื่องจักรต่างๆไป

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้ว

องค์ประกอบของกรดไขมันไม่อิ่มตัว	น้ำมันพืชใช้แล้ว
Palmitoleic acid	0.58
Cis-10-Heptadecenoic acid	0.07
Cis-9-Octadecenoic acid	42.26
Cis-9,12-Octadecadienoic acid	13.69
Cis-9,12,15-Octadecatrienoic acid	0.56
Cis-11-Eicosenoic acid	0.22
Cis-11,14-Eicosenoic acid	0.04

Cis-5,8,11,14,17-Eicosapentaenoic acid	0.07
Docosapentaenoic acid	0.04
Cis-4,7,10,13,16,19-Docosahexanoic acid	0.13
Cis-11,14-Eicosenoic acid	0.04
<b>Total unsaturated fatty acid</b>	<b>58.11</b>

<b>องค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัว</b>	<b>น้ำมันพืชใช้แล้ว</b>
Capric acid	0.04
Lauric acid	0.52
Myristic acid	1.11
Palmitic acid	35.26
Stearic acid	4.26
Arachidic acid	0.32
Behenic acid	0.08
Lignoceric acid	0.07
<b>Total saturated fatty acid</b>	<b>41.89</b>

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันจากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าน้ำมันพืชใช้แล้วประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 41.89 และกรดไขมันไม่อิ่มตัวร้อยละ 58.11 ซึ่งกรดไขมันชนิดอิ่มตัวโดยมากอยู่ในรูปของ Palmitic acid ส่วนกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวโดยมากอยู่ในรูปของ Cis-9-Octadecadienoic acid และ Cis-9,12,15-Octadecatrienoic acid กรดไขมันไม่อิ่มตัวมีความไวต่อการเกิดออกซิเดชัน นับว่าเป็นข้อจำกัดในการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันของน้ำมันพืชใช้แล้วนี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ Cis-9-Octadecadienoic acid ซึ่งการที่มีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวในปริมาณมาก ส่งผลให้น้ำมันพืชใช้แล้วมีสมบัติไม่เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง แสดงว่าน้ำมันพืชใช้แล้วที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ยังมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นของกระบวนการต่างๆ ทางเคมีได้

#### 4.1.2 สมบัติเบื้องต้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดและปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET surface area แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) และปริมาตรรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด( $S_{BET}$ ) (ตารางเมตร/กรัม)	ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./กรัม)
แคลเซียมออกไซด์	8.10	0.076
แมกนีเซียมออกไซด์	89.00	0.078

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดของตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีพื้นที่ผิวรูพรุนที่มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มี active side ที่มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

ปริมาณองค์ประกอบในตัวเร่งปฏิกิริยาของแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ตรวจวัดด้วยเทคนิค XRF แสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Ca	95.852
Mg	3.675
Si	0.052
P	0.078
S	0.28
K	0.014
Sr	0.049

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Mg	97.314
Si	0.133

P	0.38
S	1.58
K	0.231
Ca	0.678
Sr	0.026

ตารางที่ 4.5 และ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์มีปริมาณ ความบริสุทธิ์ของแคลเซียมร้อยละ 95.852 และตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีปริมาณความ บริสุทธิ์ของแมกนีเซียมร้อยละ 97.314

การศึกษาในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ

1. การศึกษาออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยแต่ละตัวแปร มีสองระดับของการ แยกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยา แมกนีเซียมออกไซด์เพื่อหาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมัน และแฉพทาอย่างมีนัยสำคัญ
2. การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยมี ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสม ของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ตาม ASTM D2887 เป็นแฉพทา (naphtha) เคโรซีน (kerosene) แก๊สออยล์เบา (light gas oil) แก๊สออยล์ (gas oil) และกากน้ำมัน (long residue)
3. วิเคราะห์หาค่าความเป็นกรด (total acid number) ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการ แยกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียม ออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องตามมาตรฐาน ASTM D664
4. วิเคราะห์หาองค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ ได้จากการแยกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และ แมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

## 4.2 ผลของตัวแปรที่ส่งผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแอฟทาที่ได้จาก ปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้การออกแบบแบบแฟกทอเรียล

### 4.2.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ จากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

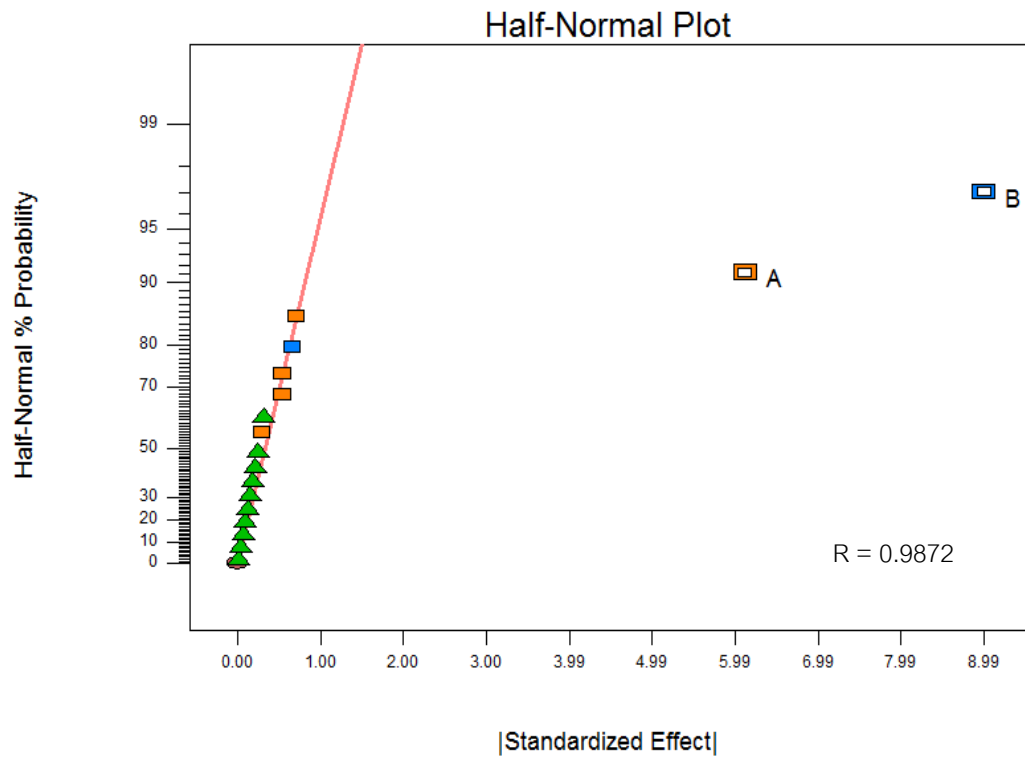
ทำการศึกษารูปแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเพื่อหาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (factorial design) จากนั้นทำการทดลองซ้ำครบทุกการทดลอง ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษามี 3 ตัวแปรประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมดคือ  $2^3$  หรือ 8 การทดลอง ผลของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วงร้อยละ 19.51 และ 36.24 ภาพที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ มาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่าปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมาก คือ อุณหภูมิและอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob>F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน พบเช่นเดียวกันว่า อุณหภูมิ และอัตราการไหลของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของการผลิตน้ำมัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่าอุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากนั้นจึงตรวจสอบความถูกต้องทำโดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สามารถทำนายได้ โดยส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากการคาดเดา จากนั้นจึงนำค่าที่วิเคราะห์ได้จากการพล็อตส่วนตกค้างกับค่า Half Normal probability plot และลำดับการทดลอง ดังภาพที่

4.2 แสดงส่วนตกค้างกับ Normal probability plot ตามลำดับการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วผลการทดลองที่ได้มีลักษณะแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและไม่พบความผิดปกติใดๆเกิดขึ้น

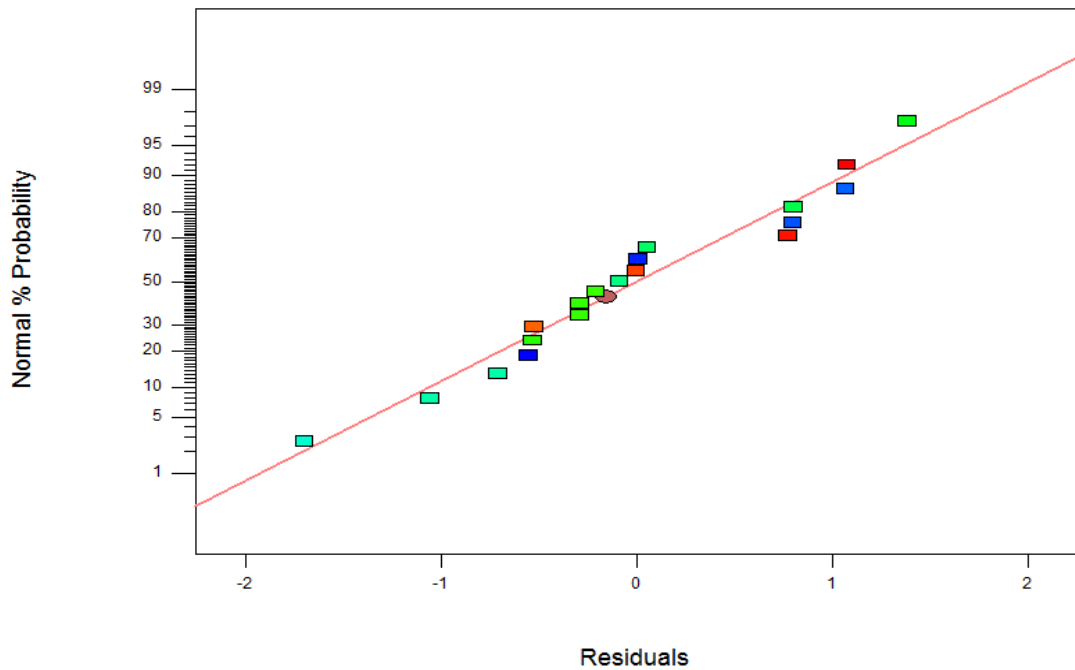
ตารางที่ 4.7 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน
	อุณหภูมิ	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	
1.1	390	2	1	28.52
1.2				28.84
2.1	390	2	5	29.65
2.2				28.76
3.1	390	5	1	20.07
3.2				21.13
4.1	390	5	5	20.86
4.2				19.51
5.1	440	2	1	34.64
5.2				35.94
6.1	440	2	5	35.16
6.2				36.24
7.1	440	5	1	24.48
7.2				25.12
8.1	440	5	5	26.23

8.2				27.56
9.1	415	3.5	3	25.75
9.2				26.64
9.3				25.13



ภาพที่ 4.1 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีแล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 4.2 Normal % Probability สำหรับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแบบ  $2^k$  ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F values	p-value Prob > F
Model	472.67	2	236.33	303.72	< 0.0001
A-Temperature	149.57	1	149.57	192.21	< 0.0001
B-Feed flow rate	323.10	1	323.10	415.22	< 0.0001
Curvature	7.94	1	7.94	10.21	0.0060
Residual	11.67	15	0.77		
Cor Total	492.29	18			



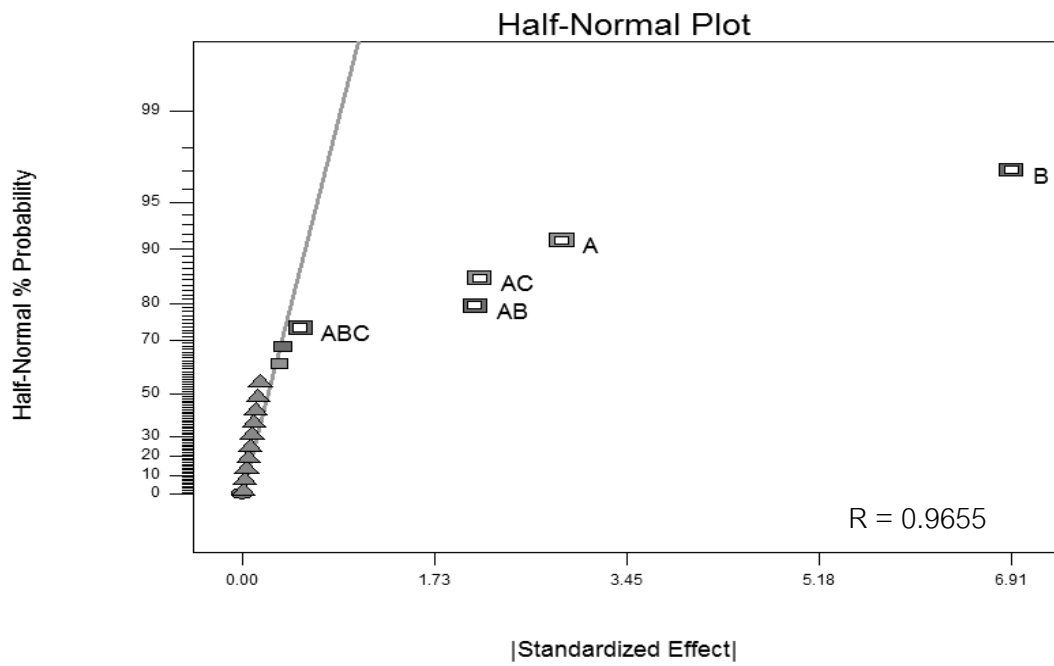
#### 4.2.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

ทำการศึกษาออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเพื่อหาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (factorial design) จากนั้นทำการทดลองซ้ำครบทุกการทดลอง ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษามี 3 ตัวแปรประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมดคือ  $2^3$  หรือ 8 การทดลอง ผลของผลิตภัณฑ์แนฟทาที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาอยู่ในช่วงร้อยละ 3.50 และ 15.98 ภาพที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ มาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่าปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมาก คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้ง อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.9 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob>F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา พบเช่นเดียวกันว่า อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้ง อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จึงเป็นการยืนยันได้ว่าอุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้ง อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากนั้นจึงตรวจสอบความถูกต้องทำโดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สามารถทำนายได้ โดยส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากการคาดเดา จากนั้นจึงนำค่าที่วิเคราะห์ได้จากการพล็อตส่วนตกค้างกับค่า Half Normal probability plot และลำดับการทดลอง ดังภาพที่ 4.4

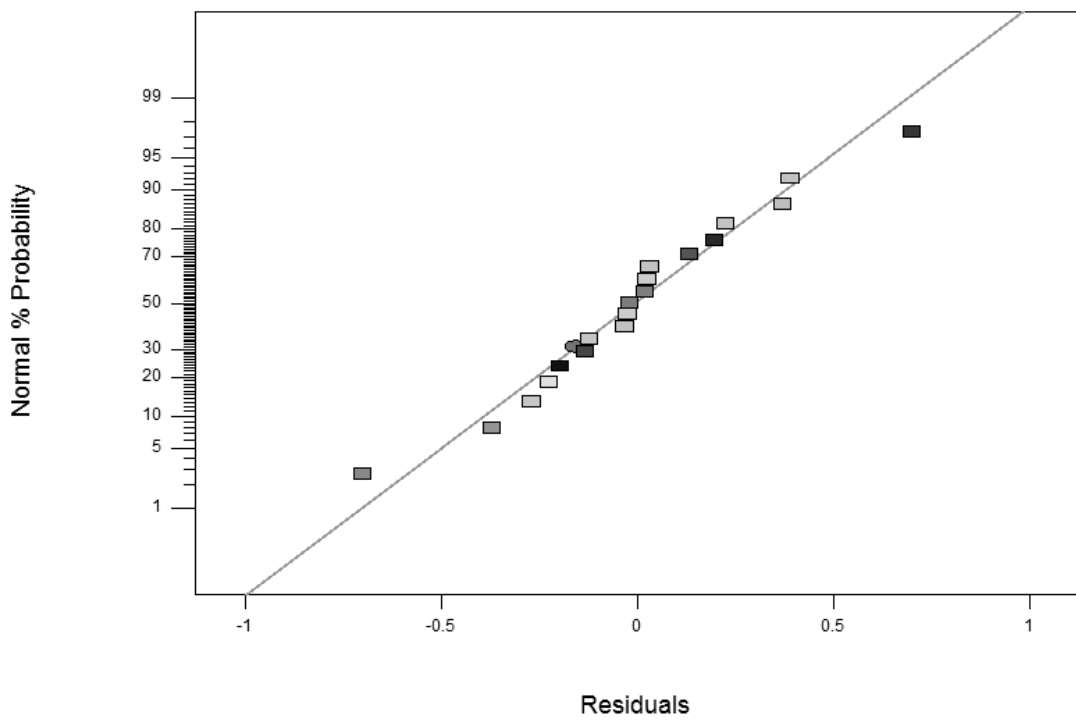
แสดงส่วนตกค้างกับ Normal probability plot กับตามลำดับการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วผลการทดลองที่ได้มีลักษณะแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและไม่พบความผิดปกติใดๆเกิดขึ้น

ตารางที่ 4.9 ร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ของเนฟทา
	อุณหภูมิ	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	
1.1	390	2	1	10.99
1.2				11.04
2.1	390	2	5	8.22
2.2				7.62
3.1	390	5	1	5.36
3.2				5.32
4.1	390	5	5	3.90
4.2				3.50
5.1	440	2	1	12.66
5.2				13.55
6.1	440	2	5	15.29
6.2				15.98
7.1	440	5	1	4.64
7.2				4.38
8.1	440	5	5	5.72
8.2				6.46
9.1	415	3.5	3	7.06
9.2				7.72
9.3				7.20



ภาพที่ 4.3 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 4.4 Normal % Probability สำหรับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์  
 แนนพทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็น  
 ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร ในการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ  
 ของร้อยละผลได้ของแนนพทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้  
 แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F values	p-value Prob > F
Model	260.80	5	52.16	231.61	< 0.0001
A-Temperature	32.99	1	32.99	146.52	< 0.0001
B-Feed flow rate	190.94	1	190.94	847.86	< 0.0001
AB	17.53	1	17.53	77.84	< 0.0001
AC	18.24	1	18.24	80.99	< 0.0001
ABC	1.09	1	1.09	4.85	0.0479
Curvature	2.72	1	2.72	12.10	0.0046
Residual	2.70	12	0.22		
Cor Total	266.23	18			

#### 4.2.3 หาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ โดยใช้โปรแกรม Design-Expert

ตารางที่ 4.11 ขอบเขตของในการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temperature	Is in range	390	440	°C
Feedstock's flowrate	Is in range	2	5	gram/min
Amount catalyst	Is in range	1	5	%wt
Yield gas	minimize	12.59	22.28	%
Yield liquid	maximize	19.51	36.24	%
Yield naptha	maximize	3.50	15.98	%

หาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์ในเครื่องกรณ์แบบต่อเนื่อง พิจารณา 4 ค่า คือ ค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทา และค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของดีเซล โดยพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด ส่วนค่าตอบสนองที่เหลือ ได้แก่ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล พิจารณาให้มีค่ามากที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-expert ในการหาภาวะที่เหมาะสม ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.11 ภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.12 คือ ที่อุณหภูมิ 423.62 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2.21 กรัมต่อนาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซลเป็นร้อยละ 18.64, 32.26, 11.54 และ 9.96 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4.12 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert ของน้ำมันพืชใช้แล้วบน แคลเซียมออกไซด์

Temperature (°C)	Feedstock's flowrate (g/min)	Catalyst (%wt)	Gas (%)	Liquid (%)	Naphtha (%)	Diesel (%)
423.62	2.21	1	18.64	32.26	11.54	9.96

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design-expert แล้วจึงทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม เมื่อทำการทดลองเพิ่มขึ้นจากเดิมอีก 2 การทดลอง แสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากโปรแกรม

ตารางที่ 4.13 ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design-expert เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

การทดลอง	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			% Yield gas	% Yield Liquid	% Yield naphtha	% Yield diesel
	Temp (°C)	Feedstock' s flowrate (g/min)	Catalyst (%wt)				
คำนวณจาก โปรแกรม	423.62	2.21	1	18.64	32.26	11.54	9.96
ทำการ ทดลอง	423.62	2.21	1	19.20	31.05	12.87	9.14
ทำการ ทดลอง	423.62	2.21	1	16.51	33.06	13.12	10.23

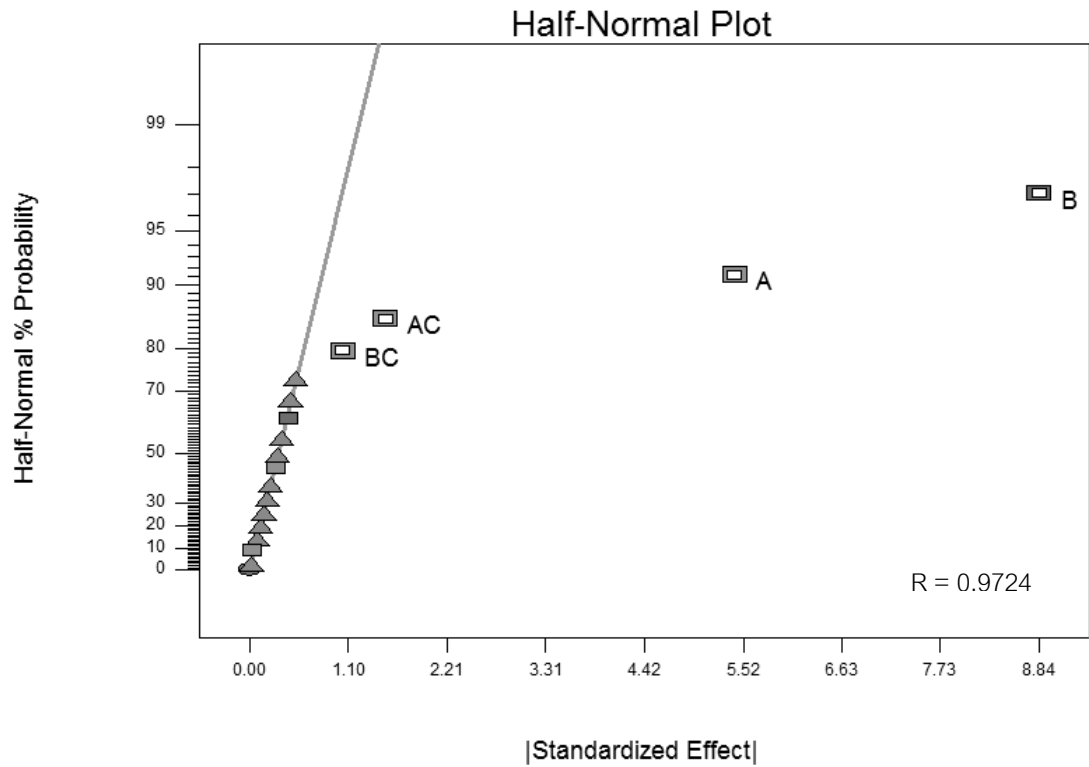
#### 4.2.4 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

ทำการศึกษารูปแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเพื่อหาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วบนแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (factorial design) จากนั้นทำการทดลองซ้ำครบทุกการทดลอง ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษามี 3 ตัวแปรประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมดคือ  $2^3$  หรือ 8 การทดลอง ผลของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้แสดงในตารางที่ 4.14 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วงร้อยละ 20.5 และ 36.08 ภาพที่ 4.3 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ มาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่าปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมาก คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วบนแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.15 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob>F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน พบเช่นเดียวกันว่า อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของการผลิตน้ำมัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่าอุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากนั้นจึงตรวจสอบความถูกต้องทำโดยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สามารถทำนายได้ โดยส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากการคาดเดา จากนั้นจึงนำค่าที่วิเคราะห์ได้จากการพล็อตส่วนตกค้างกับค่า Half Normal probability plot และลำดับการทดลองดังภาพที่ 4.2 แสดงส่วนตกค้างกับ Normal probability plot ตามลำดับการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วผลการทดลองที่ได้มีลักษณะแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและไม่พบความผิดปกติใดๆเกิดขึ้นของผลที่ได้จากการทดลอง

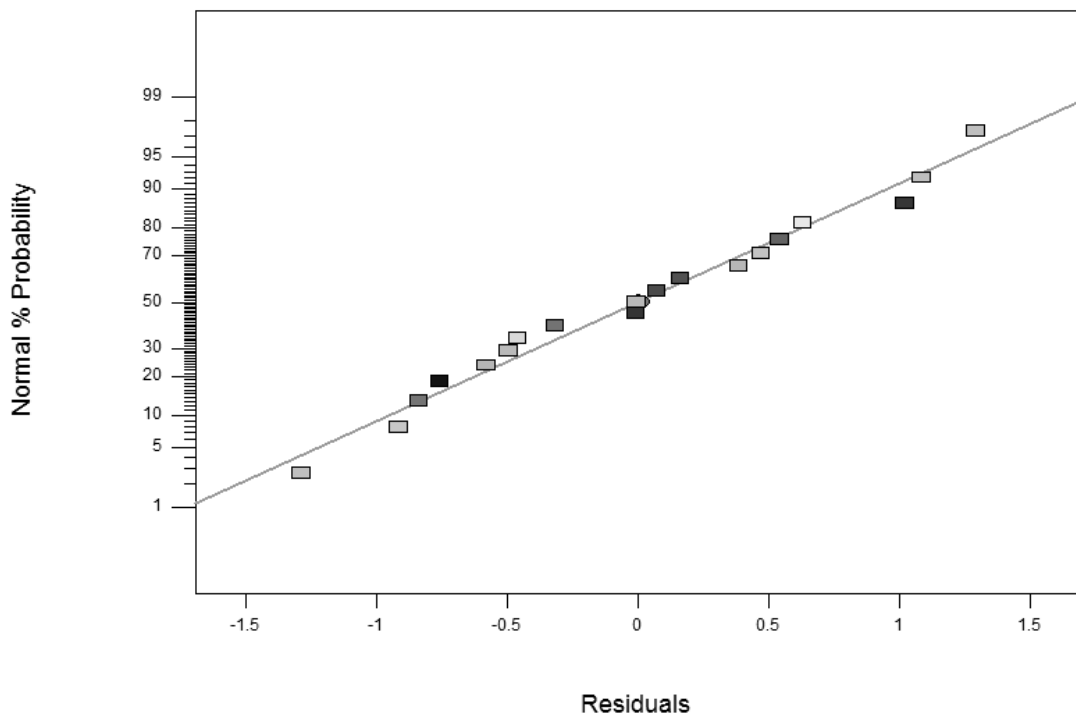
ตารางที่ 4.14 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว  
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน
	อุณหภูมิ	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	
1.1	390	2	1	31.16
1.2				32.25
2.1	390	2	5	28.47
2.2				29.52
3.1	390	5	1	21.9
3.2				22.28
4.1	390	5	5	20.5
4.2				21.25
5.1	440	2	1	33.21
5.2				31.56
6.1	440	2	5	36.08
6.2				35.17
7.1	440	5	1	26.73
7.2				24.71
8.1	440	5	5	27.72
8.2				28.6
9.1	415	3.5	3	27.94
9.2				26.66
9.3				29.24





ภาพที่ 4.5 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 4.6 Normal % Probability สำหรับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิบัติการการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์ออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F values	p-value Prob > F
Model	444.12	4	111.03	149.58	< 0.0001
A-Temperature	118.04	1	118.04	159.04	< 0.0001
B-Feed flow rate	312.40	1	312.40	420.88	< 0.0001
AC	9.30	1	9.30	12.53	0.0036
BC	4.36	1	4.36	5.88	0.0306
Curvature	1.18	1	1.18	1.60	0.2280
Residual	9.64	13	0.74		
Cor Total	454.96	18			

#### 4.2.5 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

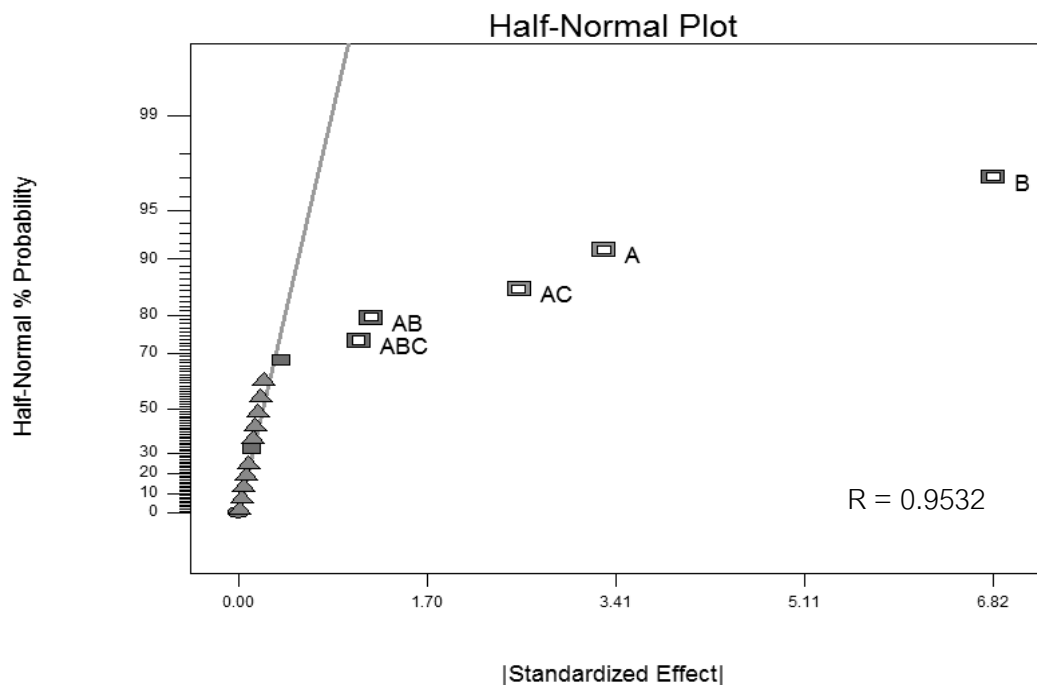
ทำการศึกษาออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเพื่อหาปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (factorial design) จากนั้นทำการทดลองซ้ำครบทุกการทดลอง ซึ่งตัวแปรที่ทำการศึกษามี 3 ตัวแปรประกอบด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งหมดคือ  $2^3$  หรือ 8 การทดลอง ผลของผลิตภัณฑ์เนฟทาที่เกิดขึ้นแสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทาอยู่ในช่วงร้อยละ 4.12 และ 17.31 ภาพที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ มาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่าปัจจัยที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงมาก คือ อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้ง อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา จากการแตกตัวของน้ำมันพีซี

ใช้แล้วบนแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.17 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob>F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เนฟทา พบเช่นเดียวกันว่า อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา จึงเป็นการยืนยันได้ว่าอุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา จากนั้นจึงตรวจสอบความถูกต้องทำการวิเคราะห์ส่วนตกค้างที่เหลือจากข้อมูลที่สามารถทำนายได้ โดยส่วนตกค้างหาได้จากการนำค่าจริงจากการทดลองลบด้วยค่าจากการคาดเดา จากนั้นจึงนำค่าที่วิเคราะห์ได้จากการพล็อตส่วนตกค้างกับค่า Half Normal probability plot และลำดับการทดลอง ดังภาพที่ 4.6 แสดงส่วนตกค้างกับ Normal probability plot ก็ตามลำดับการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วผลการทดลองที่ได้มีลักษณะแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและไม่พบความผิดปกติใดๆ เกิดขึ้น

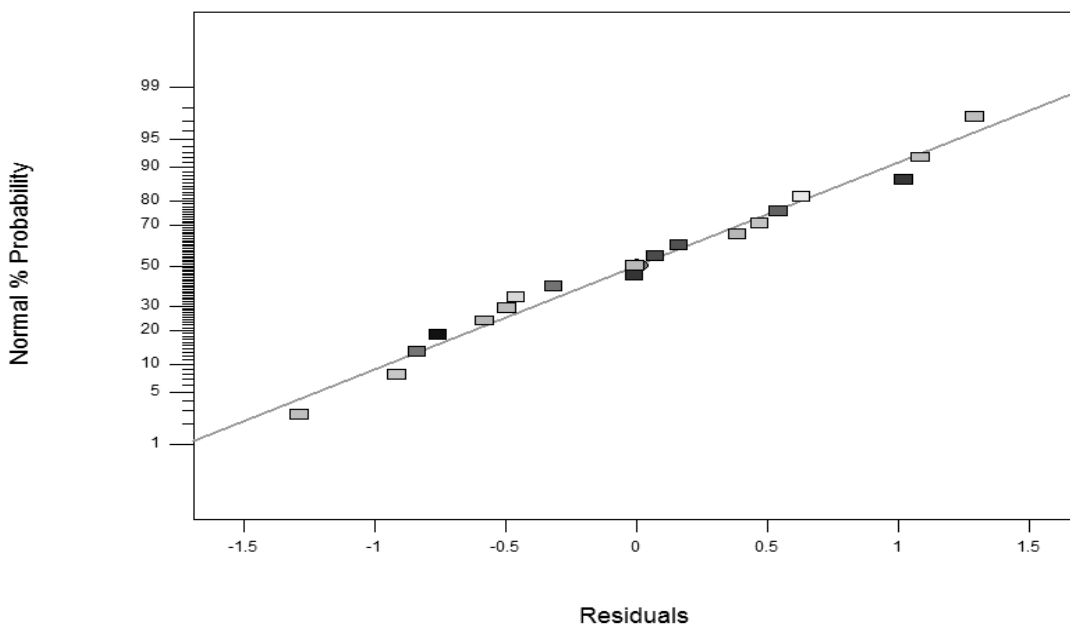
ตารางที่ 4.16 ร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

การทดลอง	ตัวแปร			ร้อยละผลได้ของเนฟทา
	อุณหภูมิ	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	
1.1	390	2	1	13.06
1.2				12.86
2.1	390	2	5	8.36
2.2				10.13
3.1	390	5	1	5.33
3.2				5.41
4.1	390	5	5	4.12

4.2	390	5	5	4.71
5.1	440	2	1	14.38
5.2				13.30
6.1	440	2	5	17.08
6.2				17.31
7.1	440	5	1	7.15
7.2				6.90
8.1	440	5	5	7.95
8.2				7.99
9.1	415	3.5	3	9.28
9.2				9.32
9.3				9.44



ภาพที่ 4.7 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณ์ท์ของเนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีแล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



ภาพที่ 4.8 Normal % Probability สำหรับการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 4.17 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลองแบบ  $2^k$  ของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean squares	F values	p-value Prob > F
Model	265.82	5	53.16	192.93	< 0.0001
A-Temperature	43.65	1	43.66	158.42	< 0.0001
B-Feed flow rate	185.95	1	185.95	674.81	< 0.0001
AB	5.75	1	5.76	20.90	0.0006
AC	25.72	1	25.72	93.35	< 0.0001
ABC	4.73	1	4.73	17.16	0.0014
Curvature	1.79	1	1.79	6.52	0.0253
Residual	3.31	12	0.27		
Cor Total	270.93	18			

#### 4.2.6 คำแนะนำภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา แมกนีเซียมออกไซด์โดยใช้โปรแกรม Design-Expert

ตารางที่ 4.18 ขอบเขตของการหาภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert ของน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temperature	Is in range	390	440	°C
Feedstock's flowrate	Is in range	2	5	gram/min
Amount catalyst	Is in range	1	5	%wt
Yield gas	minimize	14.88	23.49	%
Yield liquid	maximize	20.5	36.55	%
Yield naptha	maximize	4.12	17.30	%

หาภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วบนแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องกรรณแบบต่อเนื่อง พิจารณา 4 ค่า คือ ค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา และค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของดีเซล โดยพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด ส่วนค่าตอบสนองที่เหลือ ได้แก่ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของแนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล พิจารณาให้มีค่ามากที่สุดโดยใช้โปรแกรม Design-expert ในการหาภาวะที่เหมาะสม ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.18 ภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.19 คือ ที่อุณหภูมิ 422.90 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2.90 กรัมต่อนาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของแนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซลเป็นร้อยละ 20.10, 31.19, 12.16, และ 11.18 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4.19 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert ของน้ำมันพืชใช้แล้วบน แมกนีเซียมออกไซด์

Temperature (°C)	Feedstock's flowrate (g/min)	Catalyst (%wt)	Gas (%)	Liquid (%)	Naphtha (%)	Diesel (%)
422.9	2.9	5	20.1	31.19	12.16	11.18

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design-expert แล้วจึงทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม เมื่อทำการทดลองเพิ่มขึ้นจากเดิมอีก 2 การทดลอง แสดงในตารางที่ 4.20 พบว่าค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจากโปรแกรม

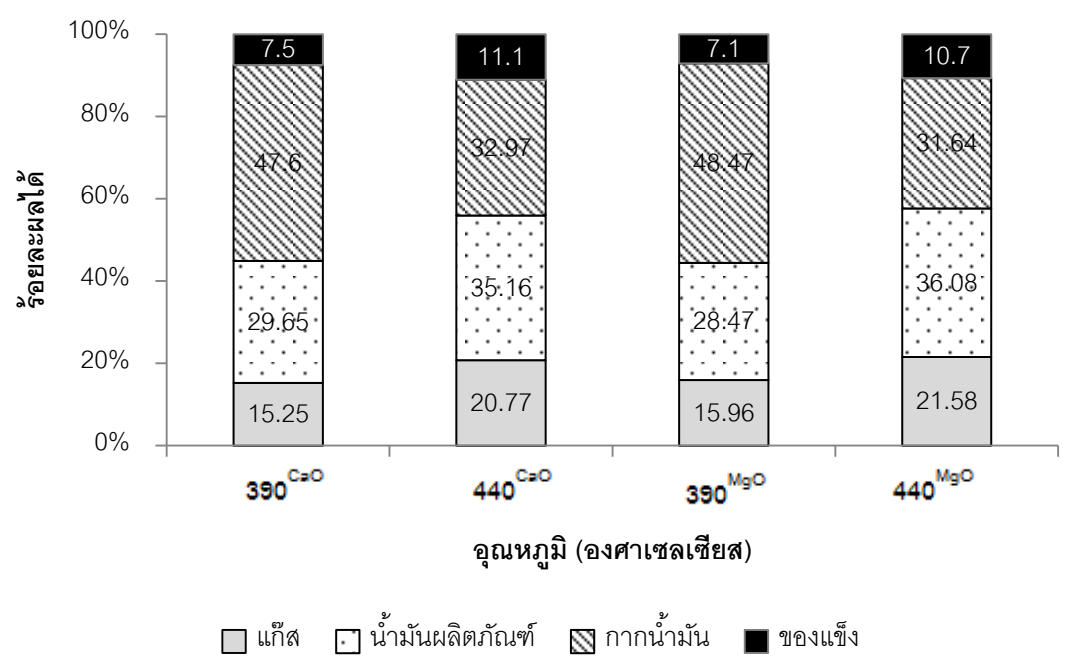
ตารางที่ 4.20 ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design-expert เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริงของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

การทดลอง	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง			% Yield gas	% Yield Liquid	% Yield naphtha	% Yield diesel
	Temp (°C)	Feedstock's flowrate (g/min)	Catalyst (%wt)				
คำนวณจาก โปรแกรม	422.9	2.9	5	20.1	31.19	12.16	11.18
ทำการ ทดลอง	423	2.9	5	21.23	32.17	13.45	12.98
ทำการ ทดลอง	423	2.9	5	19.87	30.59	11.63	10.97

### 4.3 ผลของอิทธิพลที่มีมีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

#### 4.3.1 การศึกษาหาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว

ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 390 และ 440 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของทั้งแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์พิจารณาจากร้อยละผลได้ของน้ำมันที่เกิดปฏิกิริยาจากน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นน้ำมันผลิตภัณฑ์ ร้อยละผลได้กาน้ำมันที่เหลือหลังจากที่เกิดปฏิกิริยาแล้ว และร้อยละผลได้ของแข็งและแก๊สที่เกิดขึ้น และนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปทำวิเคราะห์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง simulated distillation gas chromatography เพื่อหาค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็น แนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา และแก๊สออยล์

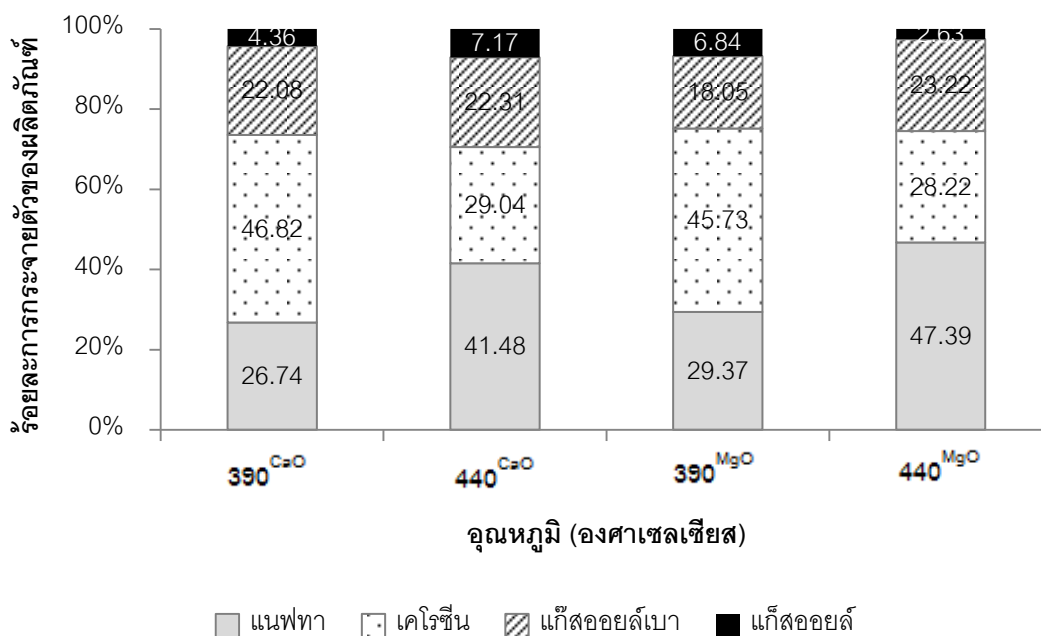


ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากภาพที่ 4.9 เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ในการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์พบว่าที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของกาน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 47.6 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 440 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของกาน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 32.97 และร้อยละผลได้ของน้ำมันที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 390 ถึง 440 องศาเซลเซียส



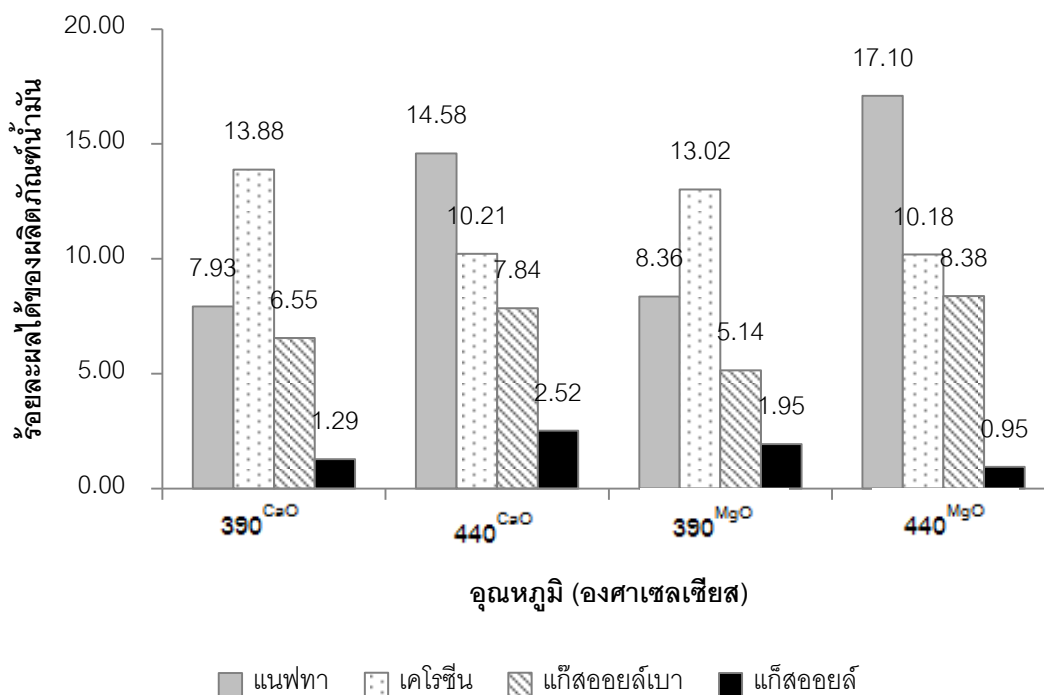
เป็นร้อยละ 29.65 และ 35.16 ตามลำดับ และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์พบว่าที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของกาน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 48.47 และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเป็น 440 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของกาน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 31.64 และร้อยละผลได้ของน้ำมันที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิ 390 ถึง 440 องศาเซลเซียสเป็นร้อยละ 28.47 และ 36.48 ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่เข้ามามีบทบาทต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของการเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก และหลังจากนั้นจึงได้รับอิทธิพลจากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่เข้าไปดึงหมู่ไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเข้าไปช่วยให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่สามารถแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กดังนั้นก็ส่งผลให้ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณกาน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จึงน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.10 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียสอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง simulated distillation gas chromatograph แสดงดังภาพที่ 4.8 โดยเมื่อดูผลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณแนฟทาจะมากขึ้นเนื่องจากมี

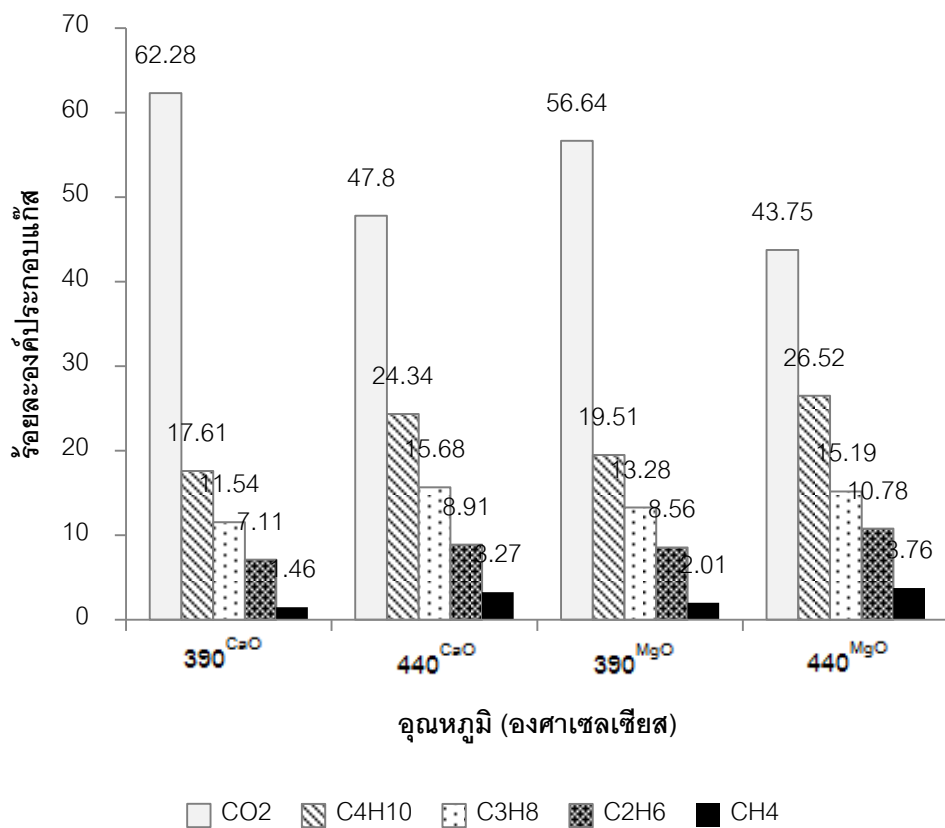
การแตกตัวมากขึ้น ที่อุณหภูมิจาก 390 และ 440 องศาเซลเซียสของแคลเซียมออกไซด์ปริมาณของแนฟตามีค่าสูงขึ้นเป็นร้อยละ 26.74 และ 41.48 ตามลำดับ และแมกนีเซียมออกไซด์ปริมาณของแนฟตามีค่าสูงขึ้นเป็นร้อยละ 29.37 และ 47.34 ตามลำดับ เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่เข้ามามีบทบาทต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของการเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก และได้รับอิทธิพลจากการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสที่เข้าไปช่วยดึงหมู่ไฮดรอกซิลไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก



ภาพที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณแนฟทา แคโรซีน แก๊สออยล์เบา และแก๊สออยล์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมดของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียส ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์หาปริมาณแนฟทา แคโรซีน แก๊สออยล์เบา และแก๊สออยล์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมด จากภาพที่ 4.9 เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณน้ำมันผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้นและภาพที่ 4.10 ปริมาณแนฟทาเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจากการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลในด้านของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว โดยใช้แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะเข้าไปดึงหมู่ไฮดรอกซิลที่มีอยู่ในน้ำมันพีซีใช้แล้วทำให้น้ำมันผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการแตกตัวได้ดีขึ้น จาก

ภาพที่ 4.9 พบว่าในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้นของการแตกตัวที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส โดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนฟทาไร้อยู่ 7.93 เครโซีน้อยอยู่ 13.88 แก๊สออยล์เบาอยู่ 6.55 และแก๊สออยล์หนักอยู่ 1.29 และที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส โดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนฟทาไร้อยู่ 14.58 เครโซีน้อยอยู่ 10.21 แก๊สออยล์เบาอยู่ 7.84 และแก๊สออยล์หนักอยู่ 2.52 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส จะให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนฟทาที่มากกว่าที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส



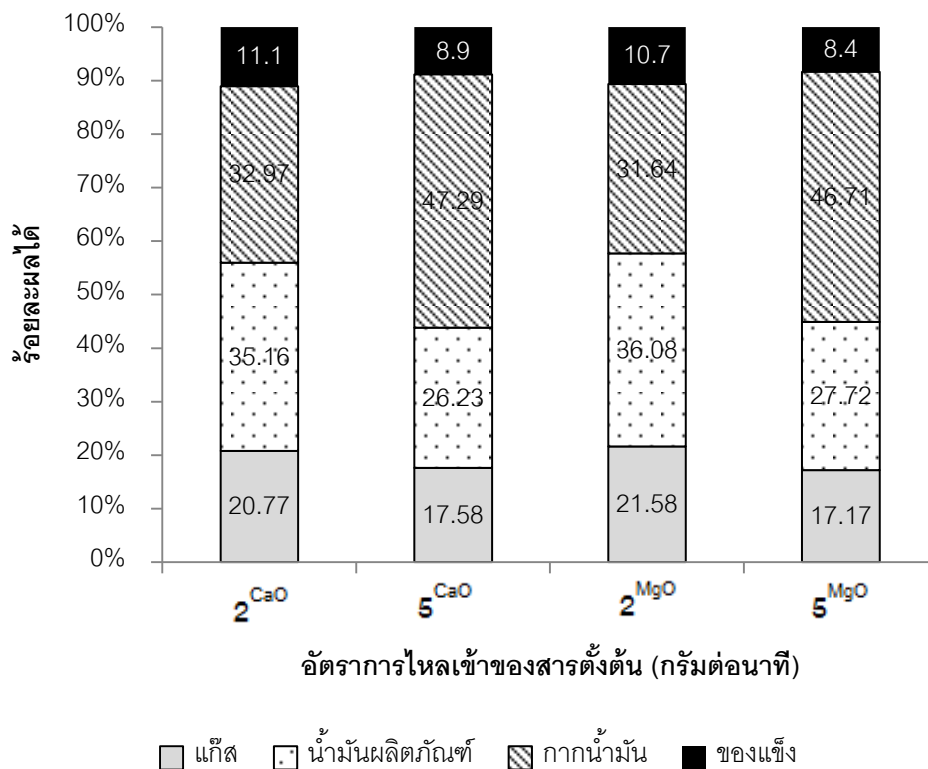
ภาพที่ 4.12 อธิบายผลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อุณหภูมิ 390 และ 440 องศาเซลเซียสอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงผลเป็นร้อยละผลได้ของแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จากภาพที่ 4.10 พบว่าที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 1.46, 7.11,

11.54, 17.61 และ 62.28 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.27, 8.91, 15.68, 24.34 และ 47.80 ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส ใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 2.01, 8.56, 13.28, 19.51 และ 56.64 ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.76, 10.78, 15.19, 26.52 และ 43.75 ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำมันพีชใช้แล้วเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลใหญ่เมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงจะเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนกลายเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นตัวตัวเล็กได้มากขึ้น ดังนั้นจากภาพจะเห็นว่าที่อุณหภูมิที่ 440 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มากกว่าอุณหภูมิ 390 องศาเซลเซียส และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจำนวนมากในระบบนั้นเกิดจากการดึงออกซิเจนในหมู่ไดรอกซิลไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในน้ำมันพีชใช้แล้ว

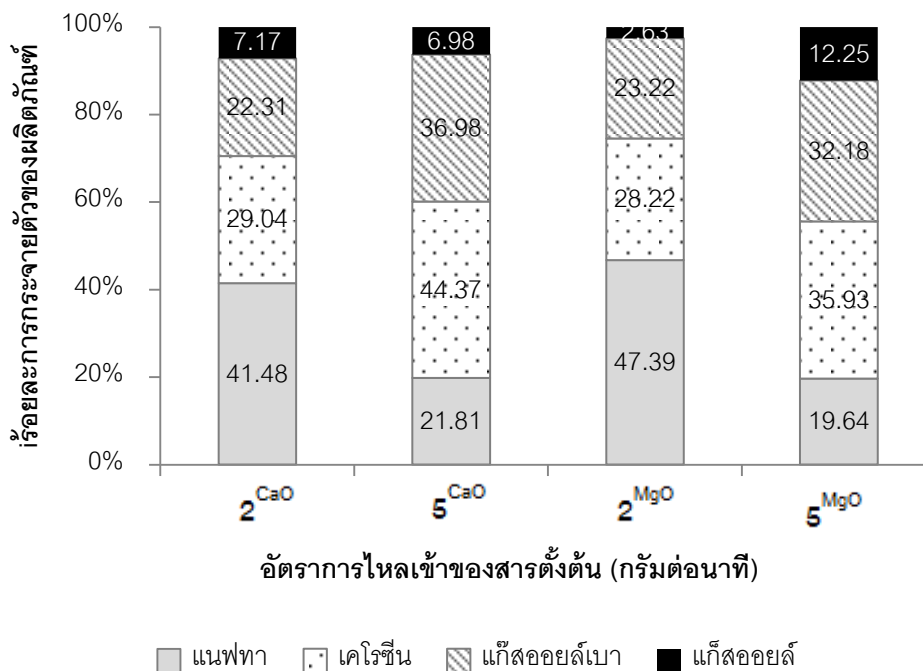
#### 4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีชใช้แล้ว

ศึกษาเปรียบเทียบผลของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ของน้ำมันพีชใช้แล้ว ที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2 และ 5 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อศึกษาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์โดยใช้เครื่อง Simulated distillation gas chromatograph ส่วนแก๊สที่เกิดขึ้นไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบของแก๊สโดยใช้เครื่อง Gas chromatograph



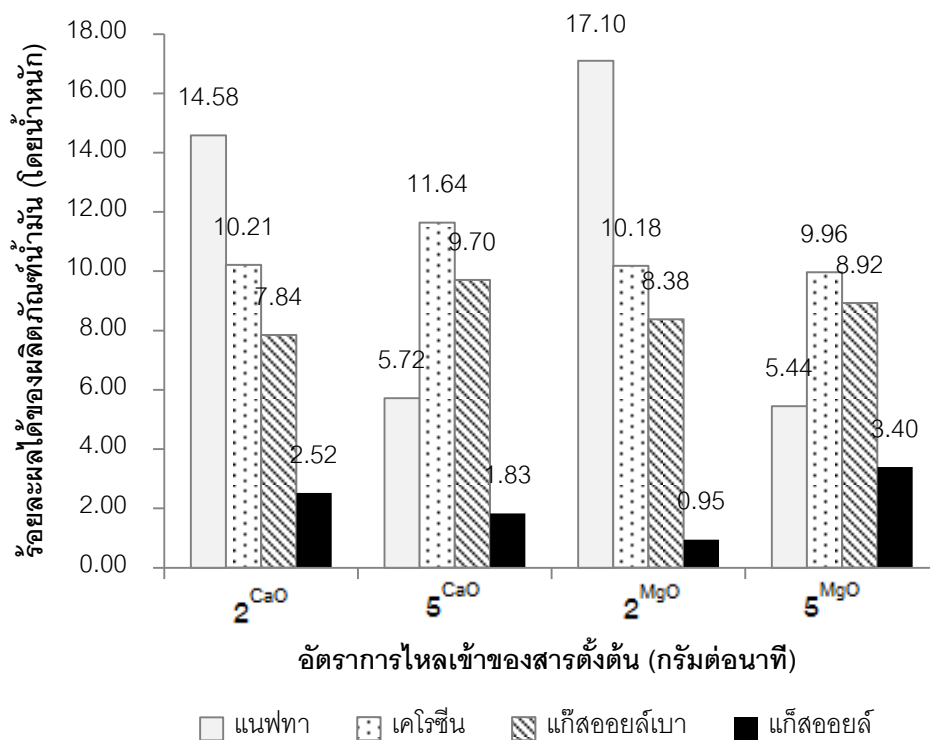
ภาพที่ 4.13 อิทธิพลของอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นที่ 2 และ 5 กรัมต่ออนาทิ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากภาพที่ 4.13 เป็นการแสดงร้อยละผลได้ของน้ำมันผลิตภัณฑ์ ร้อยละผลได้ของกากน้ำมันที่เหลือหลังจากเกิดปฏิกิริยาแล้ว และร้อยละผลได้ของแข็งและแก๊สที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของอัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลอง คือ 2 และ 5 กรัมต่ออนาทิ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่สูงกว่าจะได้ร้อยละผลได้ของกากน้ำมันที่เหลืออยู่ในเครื่องปฏิกรณ์จะมีค่ามากกว่าที่อัตราการใช้ของสารตั้งต้นที่ต่ำกว่า โดยอัตราการใช้ของสารตั้งต้นจาก 2 และ 5 กรัมต่ออนาทิ ใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเป็นร้อยละ 32.97 และ 47.29 ตามลำดับ และที่ใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีค่ากากน้ำมันในเครื่องปฏิกรณ์เหลืออยู่ร้อยละ 31.64 และ 46.71 ตามลำดับ เนื่องจากที่อัตราการใช้ของสารตั้งต้นมากทำให้เวลาที่สารตั้งต้นเกิดการถ่ายโอนความร้อนที่ผิวเครื่องปฏิกรณ์ได้น้อย ทำให้ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิในการแตกตัวด้วยความร้อนได้น้อยโครงสร้างโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจึงยังมีขนาดใหญ่อยู่ ปริมาณของกากน้ำมันที่เหลืออยู่จึงมีค่ามากกว่า และร้อยละผลได้ของน้ำมันผลิตภัณฑ์ที่อัตราการใช้ของสารตั้งต้นต่ำจะให้ร้อยละของน้ำมันผลิตภัณฑ์ที่มากกว่าที่อัตราการใช้ของสารตั้งต้นสูงกว่า



ภาพที่ 4.14 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นเป็น 2 และ 5 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

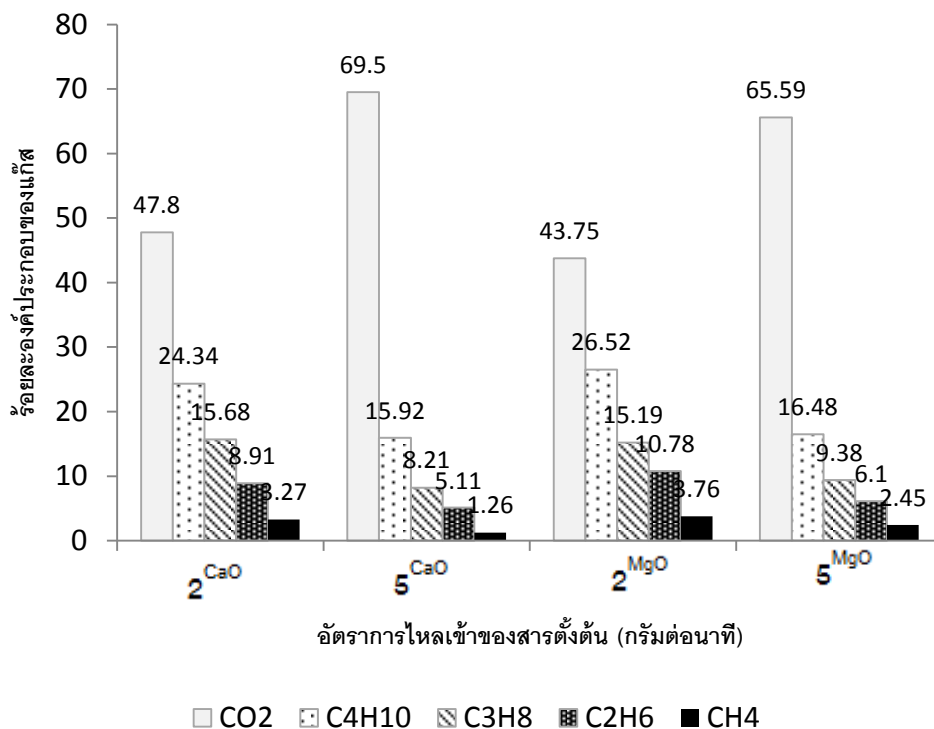
จากภาพที่ 4.14 พบว่าในการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2 และ 5 กรัมต่อนาที การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ให้ปริมาณแนฟทาร้อยละ 41.48 และอัตราการไหลของสารตั้งต้น 5 กรัมต่อนาที ให้ปริมาณแนฟทาร้อยละ 21.81 สำหรับการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ให้ปริมาณแนฟทาร้อยละ 47.39 และที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 5 กรัมต่อนาที ให้ปริมาณแนฟทาร้อยละ 19.64 จะเห็นว่าปริมาณแนฟทาน้อยที่จากอัตราการไหลสูง เนื่องจากที่อัตราการไหลของสารตั้งต้นสูง สารตั้งต้นได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิที่ถ่ายโอนจากผนังเครื่องปฏิกรณ์มายังน้ำมันได้น้อย ทำให้เกิดการแตกตัวด้วยความร้อนเกิดขึ้นไม่ดี จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำนวนมากจึงเกิดแนฟทาในปริมาณที่น้อย



ภาพที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณแนนนฟา เคโรซีน แก๊สออกไซด์เบา และแก๊สออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมดของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้ว บนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่อัตราการใช้สารตั้งต้น 2 และ 5 กรัมต่ออนาท อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์หาปริมาณแนนนฟา เคโรซีน แก๊สออกไซด์เบา และแก๊สออกไซด์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมด จากภาพที่ 4.13 เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอัตราการใช้สารตั้งต้นส่งผลให้ได้ปริมาณน้ำมันที่ลดลงและภาพที่ 4.14 ปริมาณแนนนฟาที่ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการใช้สารตั้งต้น และจากการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราการใช้สารตั้งต้นที่ส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้ว โดยใช้แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากภาพที่ 4.15 พบว่าในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้นของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้ว โดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราการใช้สารตั้งต้น 2 กรัมต่ออนาท มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนนนฟาร้อยละ 14.58 และที่อัตราการใช้สารตั้งต้น 5 กรัมต่ออนาท มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนนนฟาร้อยละ 5.72 และผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้นของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราการใช้สารตั้งต้น 2 กรัมต่ออนาท มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนนนฟาร้อยละ 17.10 และที่อัตราการใช้สารตั้งต้น 5 กรัมต่ออนาท มีองค์ประกอบ

ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นเนฟทา ร้อยละ 5.44 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที จะให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นเนฟทาที่มากกว่าที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 5 กรัมต่อนาที เนื่องจากอัตราการไหลของสารตั้งต้นสูงการได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิที่ถ่ายโอนจากผนังเครื่องปฏิกรณ์มายังน้ำมันได้น้อย ทำให้เกิดการแตกตัวด้วยความร้อนเกิดขึ้นไม่ได้



ภาพที่ 4.16 อิทธิพลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีต่อร้อยละผลได้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 และ 5 กรัมต่อนาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

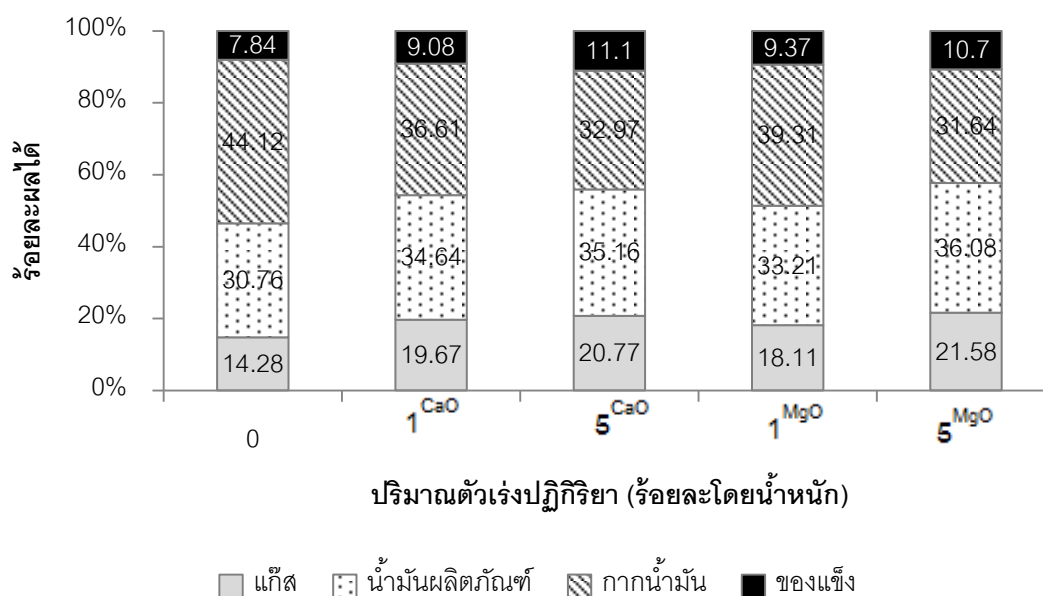
เมื่อพิจารณาผลของอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นที่มีต่อการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงผลเป็นร้อยละผลได้ของแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากภาพที่ 4.16 พบว่าในผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาทีให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.27, 8.91, 15.68, 24.34 และ 47.80 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 5 กรัมต่อนาที ให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 1.26, 5.11, 8.21, 15.92 และ 69.50 ตามลำดับ และผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ให้



ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.76, 10.78 , 15.19 , 26.52 และ 43.75 ตามลำดับ ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 5 กรัมต่อให้ ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 2.45, 6.10, 9.38, 16.48 และ 65.59 ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ทั้งสองตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อเพิ่มอัตราการไหล เข้าของสารตั้งต้นปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นลดลง เนื่องจากน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นสาร ไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลใหญ่เมื่ออัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นเพิ่มมากขึ้นทำให้อุณหภูมิต่ำกว่า โอนจากผนังเครื่องปฏิกรณ์มายังน้ำมันได้น้อยลงการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นโมเลกุล ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจึงเกิดได้น้อย

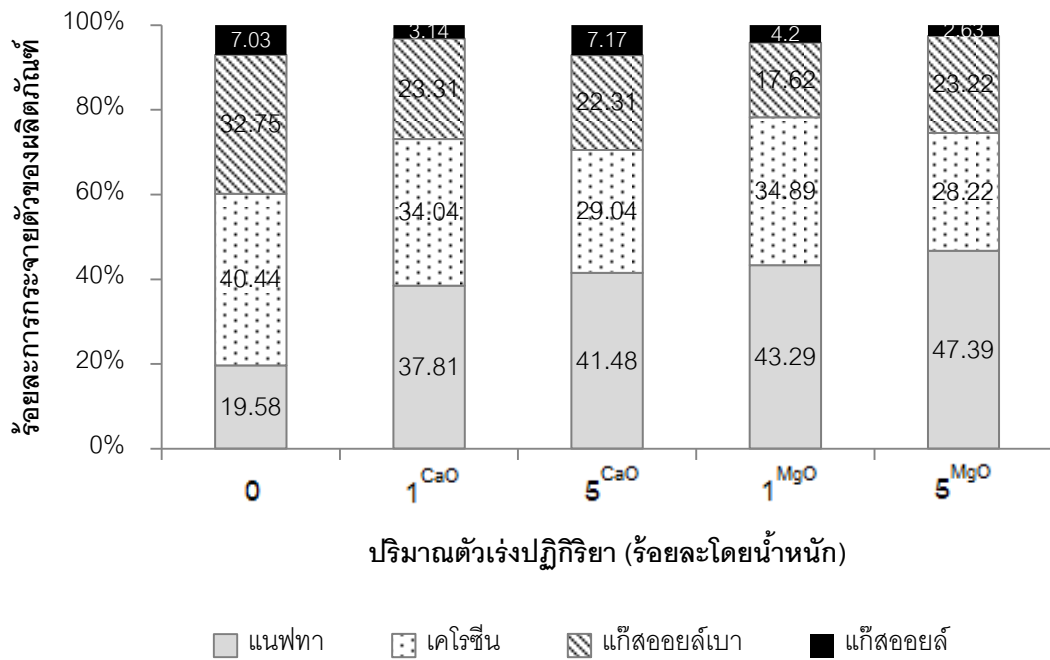
#### 4.3.3 การศึกษาหาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้ว

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา เป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างกันเป็นร้อยละ 1 และ 5 โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบของทั้งแคลเซียมออกไซด์และ แมกนีเซียมออกไซด์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้ง ต้น 2 กรัมต่อนาที โดยพิจารณาจากร้อยละผลได้ของน้ำมันที่เกิดปฏิกิริยาจากน้ำมันพืชใช้แล้วไป เป็นน้ำมันชนิดเบา องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการวิเคราะห์การกระจายตัวด้วยเครื่อง simulated distillation gas chromatography ส่วนแก๊สที่เกิดขึ้นไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณ องค์ประกอบของแก๊สโดยใช้เครื่อง gas chromatograph



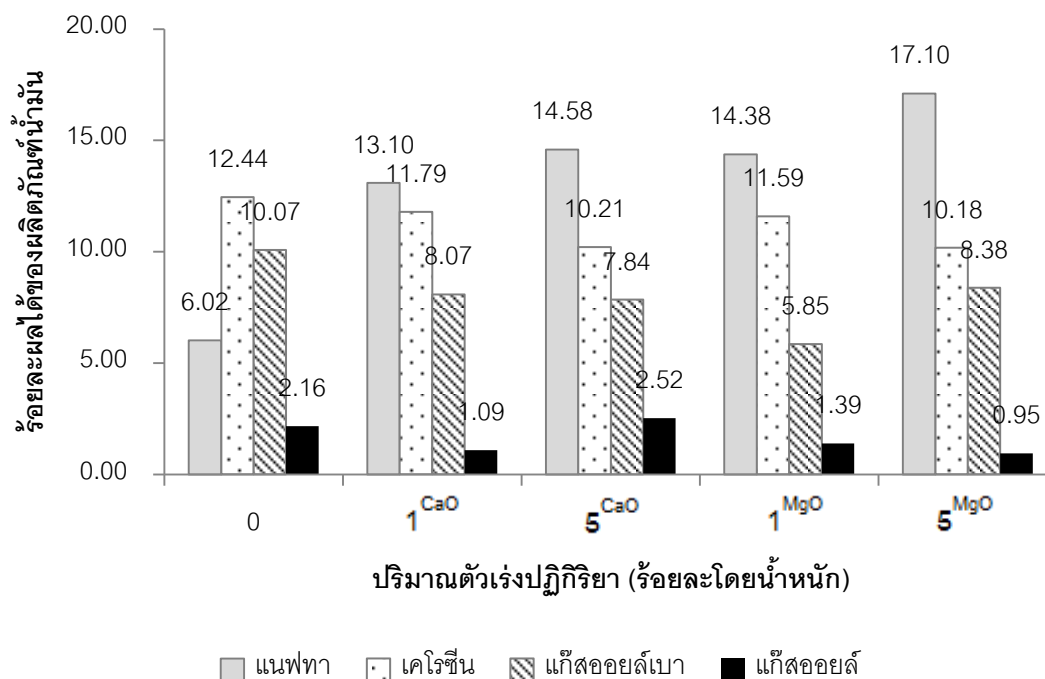
ภาพที่ 4.17 อิทธิพลปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0, 1 และ 5 โดยน้ำหนักที่มีต่อร้อยละผลได้ ของผลิตภัณฑ์ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที อุณหภูมิ 440 องศา เซลเซียส

จากผลการทดลองแสดงดังภาพ 4.17 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบที่การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วได้ดีขึ้น เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปมีบทบาทในการแตกตัวสารตั้งต้นโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นสารผลิตภัณฑ์โมเลกุลขนาดเล็กลงได้มากขึ้น จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเบามากขึ้น



ภาพที่ 4.18 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0, 1 และ 5 โดยน้ำหนัก อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส

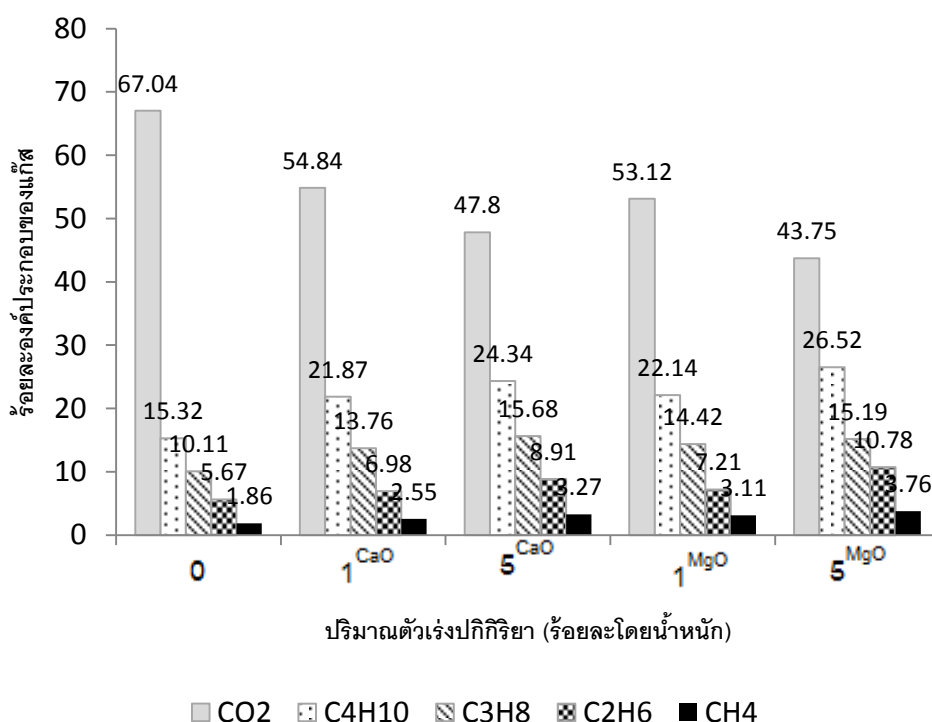
จากภาพที่ 4.18 พบว่าในการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที เมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบ จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ประกอบด้วย แนฟทา เคโรซีนในปริมาณที่น้อยโดยที่มีปริมาณแก๊สออยล์หนักในปริมาณที่มากซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นจะมีเพียงการแตกตัวด้วยความร้อนเท่านั้น ในขณะที่เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสลงไปจะเห็นว่าปริมาณแนฟทาเกิดขึ้นในน้ำมันผลิตภัณฑ์มากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งตัวเร่งนั้นจะมีส่วนช่วยไปดึงหมู่ไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพีซีใช้แล้วทำให้ได้น้ำมันมีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงทำให้ได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดที่เล็กจำพวกแนฟทามากขึ้น



ภาพที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา และแก๊สออยล์ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0, 1 และ 5 โดยน้ำหนัก

จากการวิเคราะห์หาปริมาณแนฟทา เคโรซีน แก๊สออยล์เบา และแก๊สออยล์ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งหมด จากภาพที่ 4.15 พบว่าในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้นของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยการแตกตัวด้วยความร้อนที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนฟทาร์้อยละ 6.02 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนฟทาร์้อยละ 13.10 โดยน้ำหนัก และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนฟทาร์้อยละ 14.58 และผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้นของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนฟทาร์้อยละ 14.38 และเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์เป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแนฟทาร์้อยละ 17.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือแตกตัวโดยใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียวปริมาณแนฟทาที่เกิดขึ้นมีปริมาณที่น้อยกว่าการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีความเป็นเบสจะเข้าไปดึงหมู่ไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในน้ำมันพีซีใช้แล้วทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนมีขนาด

ที่เล็กลงโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจึงเกิดการแตกตัวได้ดีขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักจะส่งผลให้ปริมาณแฉะเพิ่มมากขึ้นแต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ใช้ คือ แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแฉะที่มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีความเป็นเบสที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์จึงส่งผลให้ความสามารถในการไปดึงหมู่ไตรกลีเซอไรด์ซึ่งมีความเป็นกรดในน้ำมันพืชใช้แล้วได้ดีกว่า



ภาพที่ 4.16 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0, 1 และ 5 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แสดงผลเป็นร้อยละผลได้ของแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จากภาพที่ 4.16 พบว่าในผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นของการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วโดยไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 1.86, 5.67, 10.11, 15.32 และ 67.05 ตามลำดับและเมื่อใช้แคลเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่

ปริมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 2.55, 6.98, 13.76, 21.87 และ 54.84 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.27, 8.91, 15.68, 24.34 และ 47.8 ตามลำดับและผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นของการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แมกนีเซียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.11, 7.21, 14.42, 22.14 และ 53.12 ตามลำดับและเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมเป็นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ให้ปริมาณขององค์ประกอบแก๊สมีเทน อีเทน โพรเพน บิวเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 3.76, 10.78, 15.19, 26.52 และ 43.75 ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วเมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกที่เกิดขึ้นจะมีเพียงการแตกตัวด้วยความร้อนเท่านั้นซึ่งจะช่วยให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง แต่เมื่อมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสลงไปตัวเร่งนั้นจะมีส่วนช่วยดึงหมู่ไฮดรอกซิลที่ติดอยู่ในน้ำมันพีซีใช้แล้วทำให้โมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อนไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไปเป็นสารไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น

#### 4.4 วิเคราะห์ค่าความเป็นกรดของน้ำมันผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์

ตารางที่ 4.20 แสดงผลค่าความเป็นกรดของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

การแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา	ค่าความเป็นกรด (mgKOH/g)
แตกตัวด้วยความร้อน	58.6
แคลเซียมออกไซด์	6.4
แมกนีเซียมออกไซด์	5.1

เมื่อนำน้ำมันผลิตภัณฑ์ไปวัดค่าความเป็นกรดตามมาตรฐาน ASTM D664 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมันให้ดีขึ้นโดยพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในระบบช่วยลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันผลิตภัณฑ์ทำให้สามารถ

นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดียิ่งขึ้นเนื่องจากสามารถลดการกัดกร่อนเครื่องยนต์ได้ และการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีความเป็นกรดที่น้อยกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

#### 4.5 วิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์

ตารางที่ 4.21 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียม

ตัวอย่าง	ธาตุองค์ประกอบ		
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน
น้ำมันพีซีใช้แล้ว	77.02	11.70	11.27
การแตกตัวทางความร้อน	80.00	12.19	7.80
การแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา			
แคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	81.68	11.80	6.51
การแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา			
แมกนีเซียมออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	81.57	12.17	6.25

เมื่อนำน้ำมันผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ไปวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบอุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น 2 กรัมต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักพบว่าเมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณออกซิเจนในผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณที่ลดลง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส คือ แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ตัวเร่งปฏิกิริยานี้เข้าไปตั้งหม้อไอน้ำที่อุณหภูมิที่อยู่ในน้ำมันพืชใช้แล้ว ซึ่งจะสนใจศึกษาถึงอิทธิพลต่อปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้จากการแตกตัวของสารป้อนเข้าเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ตัวแปรที่ศึกษานั้นประกอบไปด้วย อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดน้อยลง สามารถนำไปวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาร้อยละของผลิตภัณฑ์เหลวและทำการวิเคราะห์ของเหลวในเชิงคุณภาพโดยวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดต่างๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (simulated distillation gas chromatography) และวัดค่าความเป็นกรดของน้ำมันผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาหลังจากการแตกตัว ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatograph) เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส และทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับและทำการทดลองซ้ำ ออกแบบและคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert โปรแกรมนี้สามารถบ่งบอกได้ว่าตัวแปรใดมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ร้อยละผลได้ของเนฟทาและดีเซล และสามารถคำนวณหาสภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวในน้ำมันพืชใช้แล้ว

##### 5.1.1 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์มี ดังนี้

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา  
แคลเซียมออกไซด์

ปัจจัยที่พิจารณา	ตัวแปรที่มีผล
ร้อยละผลได้ของน้ำมัน	อุณหภูมิ และ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น
ร้อยละผลได้ของเนฟทา	อุณหภูมิ, อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น, ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา, อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น, อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยา, และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.2 การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันพืชใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์มี ดังนี้

ตารางที่ 5.2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยการเร่งปฏิกิริยา แคลเซียมออกไซด์

ปัจจัยที่พิจารณา	ตัวแปรที่มีผล
ร้อยละผลได้ของน้ำมัน	อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิ กับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราปฏิกิริยาระหว่างอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
ร้อยละผลได้ของแฉฟทา	อุณหภูมิ อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น อัตราปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิ กับอัตราการไหลเข้าของสารตั้ง อัตราปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้นและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.3 เปรียบเทียบผลของการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างการใช้แคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์จากการวิจัยพบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ส่งผลให้การแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่แตกตัวได้ดีกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีความเป็นเบสที่สูงกว่าแคลเซียมออกไซด์ จึงไปดึงหมู่ไฮดรอกซิลในน้ำมันพืชใช้แล้วได้ดีกว่าแคลเซียมออกไซด์

5.1.4 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสมีส่วนช่วยปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยพบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะให้ร้อยละผลได้ของแฉฟทาและเคโรซีนที่สูงกว่าการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา และพบว่ามีการนำน้ำมันคงเหลือน้อยกว่าการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย ทั้งนี้เนื่องจากผลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยให้เกิดการแตกตัวทำให้ได้โมเลกุลจำพวกแฉฟทาและเคโรซีนมากขึ้น นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสในระบบช่วยลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันผลิตภัณฑ์ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากลดการกัดกร่อนในเครื่องยนต์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องให้มีขนาดใหญ่ขึ้นที่สามารถให้กำลังผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น เพื่อกำจัดน้ำมันพืชใช้แล้วให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
- ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาอื่นๆที่เหมาะสม โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถสังเคราะห์เองได้ และราคาไม่แพง รวมถึงการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่



3. พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ให้มีระบบที่สามารถถ่วงน้ำหนักน้ำมันที่ไม่เกิดปฏิกิริยากลับมาทำการแตกตัวอีกได้

4. ศึกษาความเป็นไปได้และเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงหรือสารเคมีที่ได้จากการแตกตัวน้ำมันพีซีใช้แล้ว

## รายการอ้างอิง

- [1] วิฤทธิพลังงาน. [ออนไลน์]แหล่งที่มา: <http://www.sgl1.com> [19 เมษายน 2553]
- [2] ราคาน้ำมันปิโตรเลียม. [ออนไลน์]แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/index-T.html> [21 มิถุนายน 2554]
- [3] มลพิษ. [ออนไลน์]แหล่งที่มา: [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/waste\\_rubbish](http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_rubbish) [11 พฤษภาคม 2553]
- [4] พลังงานในประเทศไทย. [ออนไลน์]แหล่งที่มา: <http://teenet.chiangmai.ac.th/sci/fossil> [19 เมษายน 2553]
- [5] ปิโตรเลียม. [ออนไลน์]แหล่งที่มา: <http://th.wikipedia.org/wiki/ปิโตรเลียม>[10 ตุลาคม 2554]
- [6] ปิโตรเลียมและการผลิต. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK24/chapter7/t24-7-11.html>[22 เมษายน 2551]
- [7] พาราฟิน. [ออนไลน์]แหล่งที่มา: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu> [20 พฤษภาคม 2553]
- [8] แนฟทีน. [ออนไลน์]แหล่งที่มา: [http://www.eoearth.org/article/Petroleum\\_crude\\_oil?topic=49478](http://www.eoearth.org/article/Petroleum_crude_oil?topic=49478) [9 ตุลาคม 2553]
- [9] อะโรมาติก. [ออนไลน์]แหล่งที่มา: <http://www.oknation.net/blog/print.php?id=196999> [7 มกราคม 2551]
- [10] Charles N. Satterfield. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. New York: McGraw-Hill,1991.
- [11] G. Elordi, M. Olazar, G. Lopez. Catalytic pyrolysis of HDPE in continuous mode over zeolite catalysts in a conical bed reactor. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 85(2009) : 345-351.
- [12] Harold H. Schobert, The Chemistry of Hydrocarbon fuel. NewYork: 1991. S., Manfred J.M., Hassan A.T. Catalysis in Petrochemical Processes. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (1989): 46-48.
- [14]Junming Xu, Jianchun Jiang, Yunjuan Sun, Jie Chen. Production of hydrocarbon fuels from pyrolysis of soybean oils using a basic catalyst. Bioresource Technology. 101(2010) : 9803-9806

- [16] Kim, S.-S. , Chun, B.H. , Kim, S.H. Pyrolysis kinetics of waste automobile lubricating oil. Fuel, 79(2000): 1943-1949.
- [ 17] Koc Adil, Y. Ali Bilgesu. Catalytic and Thermal oxidative pyrolysis of LDPE in a continuous reactor system. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 78(2007):7-13.
- [18] Prasad Y.S, Bakshishi N.N., Mathews J.F. and R.L. Eager R.L.(1996) Catalytic Conversion of Canola Oil to Fuels and Chemical Feedstocks Part I. Effect of Process Conditions on the Performance of HZSM-5 Catalyst. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 64: 278-284.
- [19] Serrano,D.P.,Aguado,J.,Escola,J.M.“Catalytic conversion of polystyrene over HZSM-5, HMCM-41 and amorphous SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> comparison with thermal cracking”, Journal of Applied Catalysis B, 25, (2000): 181-189.
- [20] Weibing Ding, Jing Liang, and Laary L. Anderson. Catalysis and processes for heavy oil conversion. International Symposium on Advances in Catalysis and Processes for Heavy oil Conversion. (1997): 428–432
- [21] กมลวรรณ กิ่งพุทธพงษ์และโสภณวี ไชยอนันต์สุจริต. การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียม HMS. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [22] จินตนา สุมารินทร์. การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [23] จตุพร วิทยาคุณและนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา:พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
- [24] ประชารัตน์ แต่ภักดี. การแตกตัวของพอลิพรอดิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [25] ศิลป์ดารา ทศนปริญญานนท์. การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของพอลิพรอดิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

- [26] ดร.วิชากร จารุศิริ. การแตกตัวของพลาสติก น้ำมันพืช และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนเป็นแก๊สโซลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. รายงานวิจัย. กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [27] อ๋านาจ เพิ่มทรัพย์สกุล. การเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวบนตัวเร่งปฏิกิริยาบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิบดีนัมบนอะลูมินา และ HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุษฎีบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ก1 แสดงผลของการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated distillation gas chromatograph (ASTM D 2887)

อุณหภูมิ	อัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น (กรัม/นาที)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	แก๊ส	ผลิตภัณฑ์น้ำมัน	กากน้ำมัน	ของแข็ง	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล
390	2	1	14.97	28.52	49.07	7.44	38.54	32.19	29.27
390	2	1	15.37	28.84	47.59	8.2	38.29	34.28	27.42
390	2	5	15.25	29.65	47.59	7.51	27.74	45.82	26.44
390	2	5	14.19	28.76	49.72	7.33	26.51	44.16	29.33
390	5	1	14.96	20.07	57.47	7.5	26.72	33.33	39.95
390	5	1	12.59	21.13	61.26	5.02	25.19	32.18	42.63
390	5	5	16.05	20.86	56.43	6.66	18.68	30.96	50.43
390	5	5	15.91	19.51	58.13	6.45	17.96	27.15	54.89
440	2	1	19.67	34.64	36.61	9.08	36.54	34.32	29.14
440	2	1	20.51	35.94	35.34	8.21	37.7	36.88	25.42

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการ ไหลเข้าของ สารตั้งต้น (กรัม/นาที)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน	กาก น้ำมัน	ของแข็ง	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล
440	2	5	21.16	36.24	30.8	11.8	44.1	35.23	20.67
440	5	1	16.28	24.48	51.8	7.44	18.96	17.11	63.93
440	5	1	16.77	25.12	47.99	10.12	17.42	15.04	67.54
440	5	5	17.58	26.23	47.29	8.9	21.81	44.37	33.76
440	5	5	16.75	27.56	47.09	8.6	23.45	41.64	34.91
415	3.5	3	20.99	25.75	46.16	7.1	27.41	11.77	60.82
415	3.5	3	21.12	26.64	44.84	7.4	28.97	15.23	55.8
415	3.5	3	20.14	25.13	47.41	7.32	28.67	13.76	57.57

ตารางที่ ก2 แสดงผลของการแตกตัวของน้ำมันพีซีแล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมงनीเซียมออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated distillation gas chromatograph (ASTM D 2887)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล เข้าของสาร ตั้งต้น (กรัม/นาที)	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน	กาก น้ำมัน	ของแข็ง	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล
390	2	1	17.51	31.16	43.07	8.26	41.9	33.75	24.34
390	2	1	17.6	32.25	42.59	7.56	39.89	32.16	27.95
390	2	5	15.96	28.47	48.47	7.1	29.37	45.73	24.9
390	2	5	16.75	29.52	47.16	6.57	34.33	17.11	48.59
390	5	1	14.88	21.9	53.45	9.77	24.34	40.28	35.29
390	5	1	15.19	22.28	54.12	8.41	24.43	40.28	35.29
390	5	5	16.28	20.5	56.19	7.03	20.11	29.46	50.43
390	5	5	16.19	21.25	58.16	4.4	22.17	30.15	47.68
440	2	1	18.11	33.21	39.25	9.43	43.29	34.89	22.52
440	2	1	20.32	31.55	45.15	2.98	42.17	35.6	22.23
440	2	5	21.58	36.08	31.64	10.7	47.34	28.22	24.45
440	2	5	22.77	35.17	31.88	10.18	49.21	27.24	23.55



อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อัตราการไหล เข้าของสาร ตั้งต้น (กรัม/นาที)	ปริมาณ ตัวเร่ง ปฏิกิริยา (ร้อยละโดย น้ำหนัก)	แก๊ส	ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน	กาก น้ำมัน	ของแข็ง	แนฟทา	เคโรซีน	ดีเซล
440	5	1	16.54	26.73	49.25	7.48	26.76	32.95	40.29
440	5	1	17.06	24.72	48.15	10.07	27.92	30.64	41.44
440	5	5	17.17	27.72	47.54	7.57	28.67	16.08	55.25
440	5	5	18.24	28.6	46.21	6.95	27.94	17.1	45.04
415	3.5	3	23.49	27.94	41.26	7.31	33.22	8.45	58.28
415	3.5	3	22.72	26.66	41.88	8.74	31.19	12.17	56.64
415	3.5	3	21.71	29.24	42.15	6.9	32.29	14.55	51.19

ตารางที่ ก3 แสดงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกของน้ำมันพืชใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatograph (ASTM D 2887)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราการไหลเข้า ของสารตั้งต้น (กรัมต่อนาที)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>
390	2	5	17.61	11.54	7.11	1.46	62.28
440	2	1	21.87	13.76	6.98	2.55	54.84
440	2	5	24.34	15.68	8.91	3.27	47.8
440	5	5	15.92	8.21	5.11	1.26	69.5

ตารางที่ ก4 แสดงองค์ประกอบของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกของน้ำมันพีซีแล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatograph (ASTM D 2887)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	อัตราการไหลเข้า ของสารตั้งต้น (กรัมต่อนาที)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>
390	2	5	19.51	13.28	8.56	2.01	56.64
440	2	1	22.14	14.42	7.21	3.11	53.12
440	2	5	26.52	15.19	10.78	3.76	43.75
440	5	5	16.48	9.38	6.1	2.45	65.59

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์สถิติได้มีรูปแบบการคำนวณในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ และอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรง

#### 1. สัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1.1 k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ได้ทำการศึกษา

1.2 n หมายถึง จำนวนการทดลองที่สภาวะการทดลองเดียวกัน

1.3 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ (A, B, C, D) แทนปัจจัยที่สนใจ เช่น อุณหภูมิ เวลา

1.4 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่เขียนติดกัน (combination) เช่น AB, AC, ABC หมายถึง อันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย (interaction)

1.5 อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กเขียนติดกัน เช่น ab, ac, abc หมายถึงการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ เรียกว่า Treatment combination การทดลองที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จะแทนแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยเป็น  $-1$  ที่ค่าระดับต่ำ และ  $+1$  ที่ค่าระดับสูง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและเนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ซึ่งออกแบบการทดลองเป็น  $2^k$  แฟกทอเรียล โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปร ดังนี้

ตาราง ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปร	ระดับ	
	(-1) ต่ำ	(+) สูง
A = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	390	440
B = อัตราการไหลของสารตั้งต้น (กรัมต่อนาที)	2	5
C = ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1	5

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลในปัจจัยต่างๆ มีความหมาย คือ การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใด แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้น และ ปัจจัยที่ไม่ปรากฏสัญลักษณ์ทำการทดลองที่ระดับ -1

(-1) แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับ -1 ทุกปัจจัย

a แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา +1 และปัจจัยอื่นๆทำที่ระดับ -1 ดังนั้นภาวะการทดลองคือ อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดัน 1 บาร์

ab แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา +1 และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น +1 ส่วนปัจจัยอื่นๆทดลองที่ -1

## 2. ความหมายของคำสำคัญ

อิทธิพลหลัก (main effect) หมายถึง อิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษา

อันตรกิริยา (interaction) หมายถึง การแสดงออกของระดับต่างๆในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

อิทธิพลแฟกทอเรียล (factorial effect) หมายถึง อิทธิพลต่างๆ ทั้งอิทธิพลหลักและอันตรกิริยา ทั้งหมดในการทดลองซึ่งจะมีเท่ากัน จำนวนการรวมตัว -1 หรือเท่ากับองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom) ของสิ่งที่ทดลอง

## 3. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ $2^k$

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับตัวแปรหลายตัวแปร ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากตัวแปรเหล่านั้น กรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีตัวแปร  $k$  ตัวแปร ซึ่งแต่ละตัวแปรจะประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจเกิดได้จากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ สูง หรือ ต่ำ ของตัวแปรหนึ่งๆ หรือการ มี หรือ ไม่มี ของตัวแปรนั้นๆก็ได้ ใน 1 เวกเตอร์ที่ปริบูรณ์ สำหรับการออกแบบลักษณะนี้เรียกว่าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$

การออกแบบ  $2^k$  ต้องานทดลองในช่วงแรก เมื่อมีตัวแปรจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบการทดลองเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้เพื่อศึกษาถึง ผลของตัวแปรทั้ง  $k$  ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจ เลยที่การออกแบบ  $2^k$  จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองตัวแปรที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือ น้อยลง เนื่องจากตัวแปรแต่ละการทดลองแบบ  $2^k$  ประกอบด้วย 2 ระดับ เราขอสมมติว่าผลตอบที่ได้ จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของตัวแปรที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานนี้ เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อกรองตัวแปรเมื่อเราเพิ่งเริ่มต้นทำการศึกษาระบบ

#### 4. สูตรการคำนวณ

1. Contrast = (ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละTreatment) x [สัมประสิทธิ์(-1หรือ+1)ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร]

2. Effect Estimate  $_{AB...K}$  (EE) =  $2$  (Contrast $_{AB...K}$ ) /  $n2^k$

3. Sum of Squares  $_{AB...K}$  (SS)

$$SS_{AB...K} = 2 (\text{Contrast}_{AB...K})^2 / n2^k$$

4. Total of Sum of Squares (SS<sub>T</sub>)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - y^2 \dots, N = \text{จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด}$$

5. Sum of Squares Error (SS<sub>E</sub>)

$$SS_E = SS_T - SS \text{ main effect}$$

6. Mean of Square (MS)

$$MS = SS / \text{Degree of freedom}$$

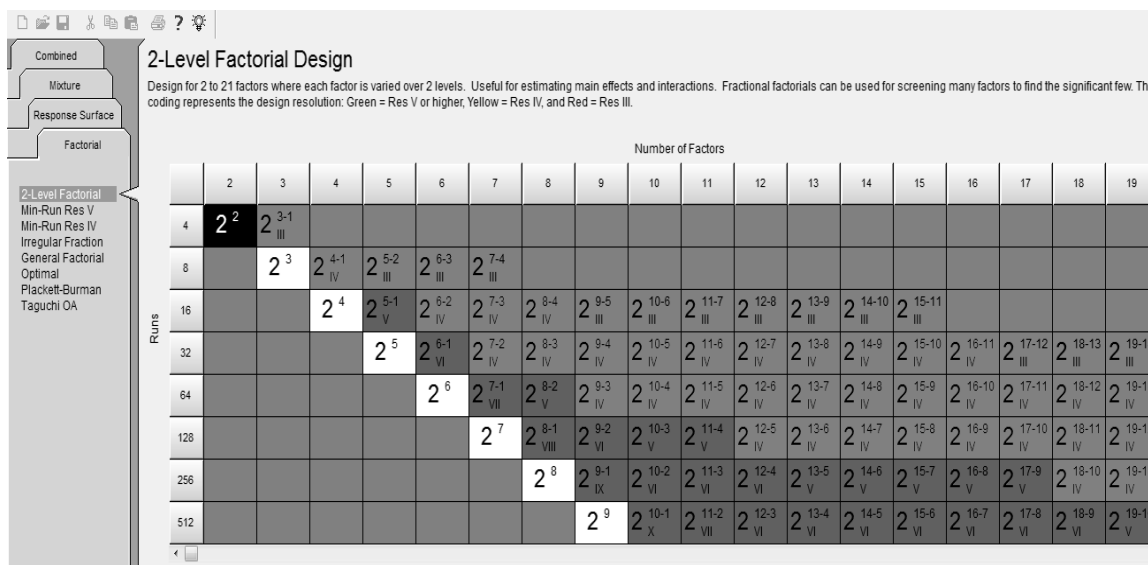
$$7. \% \text{ Normal Probability} = \frac{[(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100]}{\text{Total Cumulative frequency}}$$

Total Cumulative frequency

$$8. F_0 = \text{MS effect} / \text{MS error}$$

## 5. การใช้โปรแกรม Design-Expert ในการคำนวณ

1. เปิดเข้าโปรแกรม คลิกเข้าไปที่ file เลือก New Design และจะแสดงดังรูป ข1



	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
4	2 <sup>2</sup>	2 <sup>3-1</sup> <sub>III</sub>																
8		2 <sup>3</sup>	2 <sup>4-1</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>5-2</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>6-3</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>7-4</sup> <sub>III</sub>												
16			2 <sup>4</sup>	2 <sup>5-1</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>6-2</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>7-3</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>8-4</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>9-5</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>10-6</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>11-7</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>12-8</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>13-9</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>14-10</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>15-11</sup> <sub>III</sub>				
32				2 <sup>5</sup>	2 <sup>6-1</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>7-2</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>8-3</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>9-4</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>10-5</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>11-6</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>12-7</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>13-8</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>14-9</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>15-10</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>16-11</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>17-12</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>18-13</sup> <sub>III</sub>	2 <sup>19-14</sup> <sub>III</sub>
64					2 <sup>6</sup>	2 <sup>7-1</sup> <sub>VII</sub>	2 <sup>8-2</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>9-3</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>10-4</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>11-5</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>12-6</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>13-7</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>14-8</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>15-9</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>16-10</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>17-11</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>18-12</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>19-13</sup> <sub>IV</sub>
128						2 <sup>7</sup>	2 <sup>8-1</sup> <sub>VIII</sub>	2 <sup>9-2</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>10-3</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>11-4</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>12-5</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>13-6</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>14-7</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>15-8</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>16-9</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>17-10</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>18-11</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>19-12</sup> <sub>IV</sub>
256							2 <sup>8</sup>	2 <sup>9-1</sup> <sub>IX</sub>	2 <sup>10-2</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>11-3</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>12-4</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>13-5</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>14-6</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>15-7</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>16-8</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>17-9</sup> <sub>V</sub>	2 <sup>18-10</sup> <sub>IV</sub>	2 <sup>19-11</sup> <sub>IV</sub>
512								2 <sup>9</sup>	2 <sup>10-1</sup> <sub>X</sub>	2 <sup>11-2</sup> <sub>VII</sub>	2 <sup>12-3</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>13-4</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>14-5</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>15-6</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>16-7</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>17-8</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>18-9</sup> <sub>VI</sub>	2 <sup>19-10</sup> <sub>V</sub>

รูป ข1 แสดงตารางของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ

2. เลือกจำนวนตัวแปรที่สนใจในการทดลองนี้ เช่น ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ อัตราการป้อนของสารตั้งต้น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งหมด 3 ตัวแปร เลือกที่ Full ของช่อง 3 จากนั้นกรอกจำนวนที่ซ้ำในการทดลองช่อง Replicates และกรอกค่าทำซ้ำที่ค่ากลาง ช่อง Center point per block ยกตัวอย่างเช่น Replicates = 2, Center point per block = 3 กดที่ Continue จะปรากฏดังรูป ข2 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกเลือกที่ Continue

	Name	Units	Type	Low	High
A [Numeric]	A		Numeric	-1	1
B [Numeric]	B		Numeric	-1	1
C [Numeric]	C		Numeric	-1	1

	Name	Units	Type	Low	High
A:	Temperature	C	Numeric	390	440
B:	Feed flow rate	g/min	Numeric	2	5
C:	Catayst	%wt	Numeric	1	5

รูป ข2 แสดงตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

3. เลือก Responses กรอกชื่อปัจจัยที่เราสนใจในงานวิจัยลงในช่อง Responses พร้อมกรอกหน่วยที่ใช้ในงานวิจัยลงในช่อง Unit ของตัวแปรนั้น ดังรูป ข3 เมื่อกรอกตัวแปรครบแล้วคลิกเลือกที่ Continue

Responses:

	Name	Units
<input type="checkbox"/>	Response 1	
<input type="checkbox"/>	Response 2	
<input type="checkbox"/>	Response 3	
<input type="checkbox"/>	Response 4	
<input type="checkbox"/>	Response 5	

รูป ข3 แสดง Response และ หน่วยที่ต้องการของการทดลอง

4. จากนั้นโปรแกรมจะแสดงตัวแปรที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น มีทั้งหมด 8 การทดลอง ทำซ้ำ ทำการทดลองละ 2 ครั้ง ค่ากลาง 1 การทดลอง ทำซ้ำ 3 ครั้ง รวมการทดลอง 19 การทดลอง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองกรอกในช่องดังรูป ข4



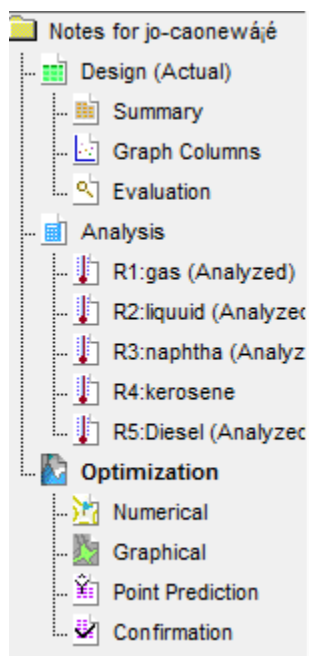
Select	Std	Run	Block	Factor 1 A:Temperature oC	Factor 2 B:Feed flow ... g/min	Factor 3 C:Catalyst %wt	Response 1 gas %wt	Response 2 liquid %wt	Response 3 naphtha %wt	Response 4 kerosene %wt	Response 5 Diesel %wt	
8		1	Block 1	440.00	5.00	1.00	22.28	24.48	4.64141	4.18853	15.6501	
		12	2	Block 1	440.00	2.00	5.00	20.77	35.16	14.58	10.37	
		7	3	Block 1	440.00	5.00	1.00	21.73	25.12	4.3759	3.77805	16.966
		14	4	Block 1	390.00	5.00	5.00	16.05	20.86	3.89665	6.45826	10.5197
		13	5	Block 1	390.00	5.00	5.00	15.91	19.51	3.504	5.29697	10.709
		16	6	Block 1	440.00	5.00	5.00	17.58	26.23	5.72076	11.6383	8.85525
		15	7	Block 1	440.00	5.00	5.00	17.75	27.56	6.46282	11.476	9.6212
		11	8	Block 1	440.00	2.00	5.00	21.16	36.24	15.9818	12.7674	7.49081
		10	9	Block 1	390.00	2.00	5.00	15.25	28.76	7.69	13.47	7.83946
		3	10	Block 1	440.00	2.00	1.00	19.67	34.64	13.1	11.79	9.16
		2	11	Block 1	390.00	2.00	1.00	14.97	28.52	10.9916	9.18059	8.3478
		5	12	Block 1	390.00	5.00	1.00	14.96	20.07	5.3627	6.68933	8.01797
		1	13	Block 1	390.00	2.00	1.00	15.37	28.84	11.0428	9.88635	7.90793
		18	14	Block 1	415.00	3.50	3.00	20.99	25.75	7.05807	3.03078	15.6611
		19	15	Block 1	415.00	3.50	3.00	21.62	26.64	7.71761	4.05727	14.8651
		4	16	Block 1	440.00	2.00	1.00	20.51	35.94	13.5494	13.2547	9.13595
		9	17	Block 1	390.00	2.00	5.00	14.19	28.76	7.62428	12.7004	8.43531
		17	18	Block 1	415.00	3.50	3.00	20.14	25.13	7.20477	3.45789	14.4673
		6	19	Block 1	390.00	5.00	1.00	12.59	21.13	5.32265	6.79963	9.00772

Design Tool

- Design Layout
- Run Sheet
- Column Info Sheet
- Pop-Out View

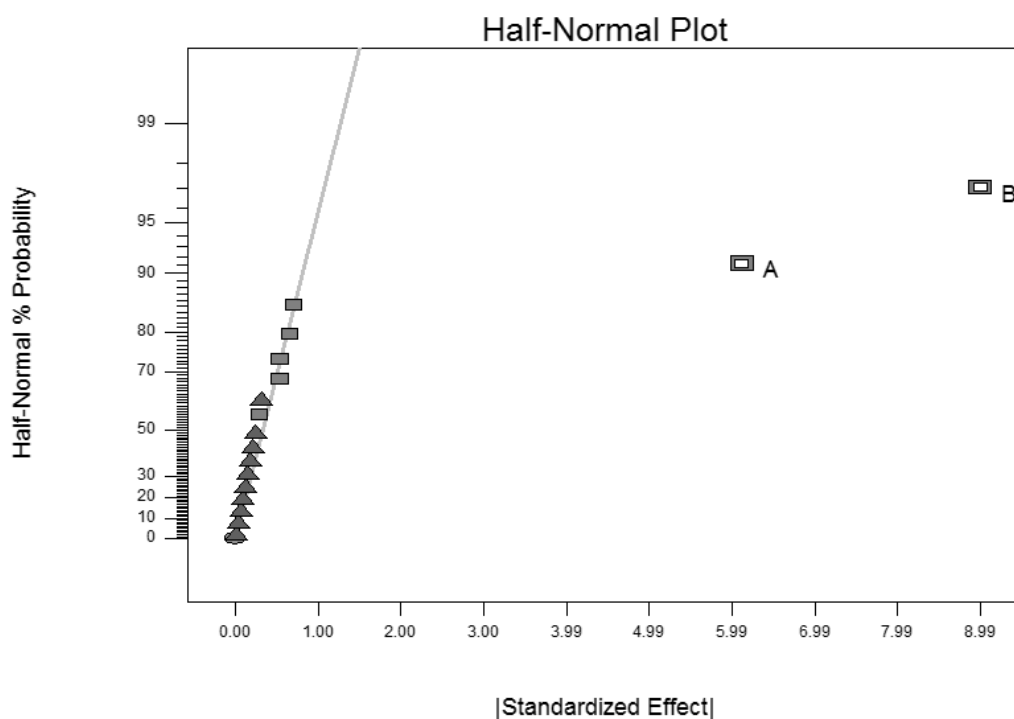
รูป ข4 แสดงตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยโปรแกรม Design-Expert ยกตัวอย่างเช่น วิเคราะห์ผลของผลิตภัณฑ์น้ำมัน เลือก liquid ดังรูป ข6 จากนั้นไปคลิกที่ Effect



รูป ข5 แสดงแถบของผลิตภัณฑ์แก๊ส น้ำมัน และดีเซล

6. เมื่อคลิก Effect จากนั้นทำการเลือกจุดในกราฟ Normal %Probability ที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง เพื่อให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังรูป ข6 ยกตัวอย่างเช่น



รูป ข6 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้เนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วโดยใช้แคลเซียมออกไซด์

จากรูปบ่งบอกว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ และอัตราการไหลเข้าของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา

7. คลิกเลือก ANOVA ดังรูป ข7 เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมและเป็นการยืนยันผลของกราฟ Half Normal probability

**ANOVA for selected factorial model**

**Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]**

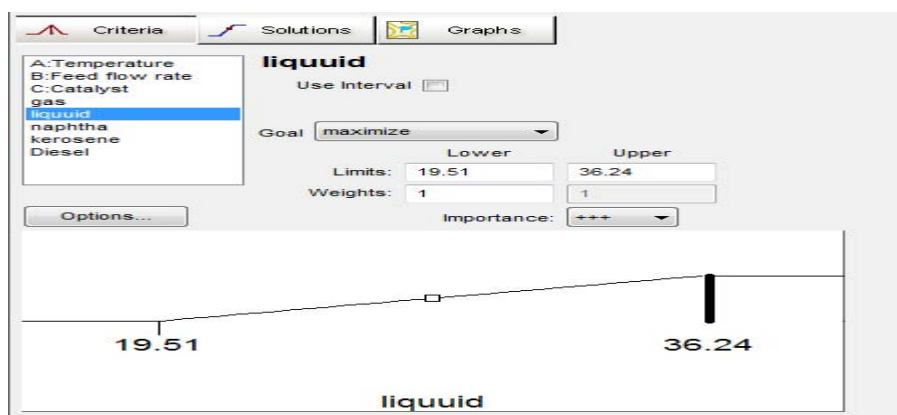
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value	
Model	472.67	2	236.34	303.72	< 0.0001	significant
A-Temperatu	149.57	1	149.57	192.22	< 0.0001	
B-Feed flow r	323.10	1	323.10	415.22	< 0.0001	
Curvature	7.95	1	7.95	10.21	0.0060	significant
Residual	11.67	15	0.78			
Lack of Fit	6.48	5	1.30	2.49	0.1025	not significant
Pure Error	5.19	10	0.52			
Cor Total	492.29	18				

รูปที่ ๗ แสดงการคำนวณผลของ ANOVA

จากการคำนวณทางสถิติด้วยโปรแกรม Design-Expert จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล พบว่าอุณหภูมิและอัตราการป้อนของสารตั้งต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาในตัวเองปฏิกิริยาแคลเซียมออกไซด์

8. จากนั้นวิเคราะห์ตัวแปรอื่นๆ ตามข้อ 5-7

9. หากภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง คลิกที่ numerical จากนั้นจึงเลือกพร้อมกรอบขอบเขตที่ต้องการในช่องของ Limit ดังรูป ๗8



รูป ๗8 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

10. คลิกเลือกที่ solution จะได้สภาวะที่เหมาะสมดังรูป ข9

The screenshot shows a software interface with a sidebar on the left containing a tree view of project elements like 'Design (Actual)', 'Summary', 'Graph Columns', 'Evaluation', 'Analysis', and 'Optimization'. The main window has tabs for 'Criteria', 'Solutions', and 'Graphs'. Below these are tabs for 'Solutions' numbered 1 through 8. A 'Constraints' table is visible, followed by a 'Solutions' table with columns for various parameters and 'Desirability'. A 'Solutions Tool' pop-up is also present in the bottom left.

Constraints							
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance	
A:Temperature	is in range	390	440	1	1	3	
B:Feed flow rate	is in range	2	5	1	1	3	
C:Catalyst	is in range	1	5	1	1	3	
gas	minimize	12.59	22.28	1	1	3	
liquid	maximize	19.51	36.24	1	1	3	
Diesel	maximize	7.49081	16.966	1	1	3	

Solutions							
Number	Temperature	Feed flow rate	Catalyst	gas	liquid	Diesel	Desirability
1	<u>419.25</u>	<u>3.09</u>	<u>1.00</u>	<u>18.505</u>	<u>29.0698</u>	<u>11.1185</u>	<u>0.440</u>
2	419.30	3.11	1.00	18.5147	29.0415	11.1385	0.440
3	419.44	3.07	1.00	18.5209	29.1566	11.1008	0.440
4	419.32	3.06	1.00	18.5026	29.1831	11.0731	0.440
5	419.53	3.12	1.00	18.548	29.0201	11.1788	0.440
6	418.79	3.08	1.00	18.4471	29.0428	11.0731	0.440
7	418.96	3.21	1.00	18.5085	28.6801	11.269	0.440
8	421.18	2.89	1.00	18.6613	29.9219	10.9375	0.439

รูป ข9 แสดงสภาวะที่เหมาะสมและขอบเขตของการทดลอง

## ภาคผนวก ค

### การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด

#### (Boiling Distribution)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง simulated distillation gas chromatography จะวิเคราะห์ตามจุดเดือดของแต่ละสารดังต่อไปนี้

IBP–200 °C = Naphtha

200 °C – 250 °C = Kerosene

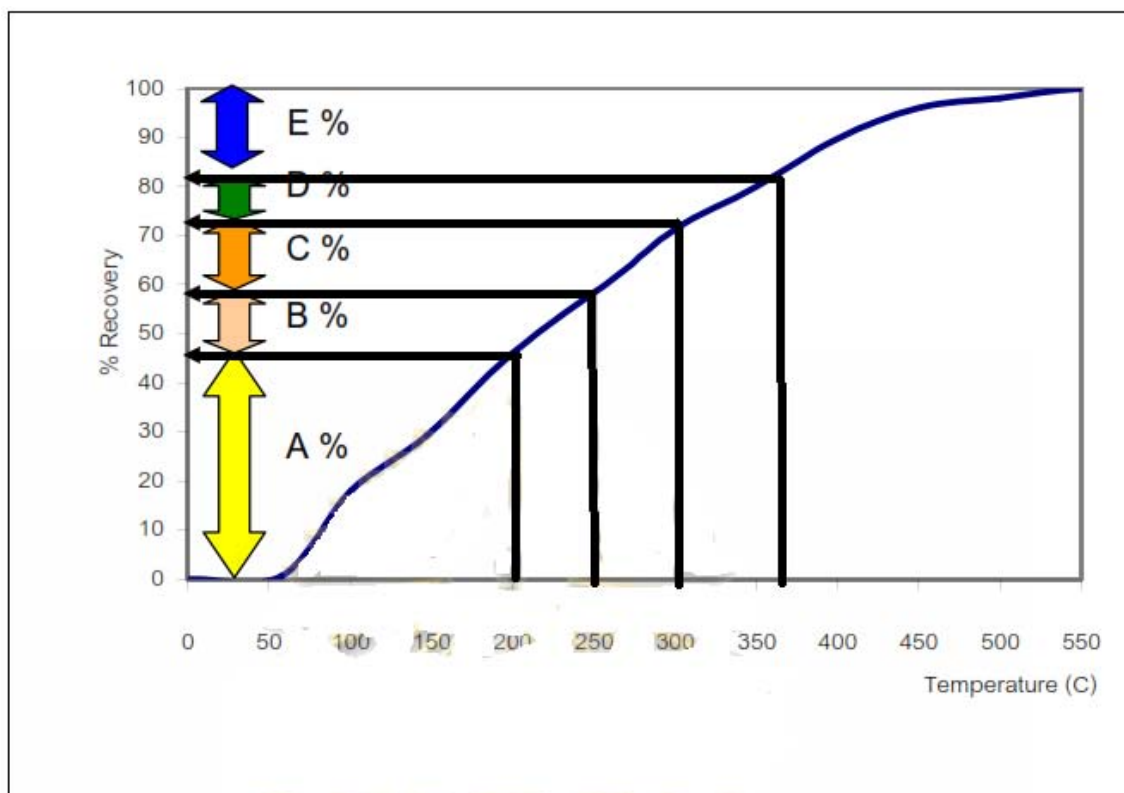
250 °C – 350 °C = Light Gas Oil

350 °C – 370 °C = Gas Oil

370 °C – FBP = Long residue

การวิเคราะห์จะเริ่มจากการเตรียมสารตัวอย่างโดยนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปละลายในสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS<sub>2</sub>) ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วนโดยปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 พร้อมทั้งดีเทคเตอร์แบบ FID ใช้ซอฟต์แวร์ simulated distillation คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary column มี stationary phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 15 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และความหนา 0.25 ไมครอน ภาวะที่ใช้ คือ อุณหภูมิหัวฉีด (Injector Temperature) 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ (column temperature or oven temperature) 30-320 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Detector Temperature) 320 องศาเซลเซียส โดยมี carrier gas เป็น helium gas ที่อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อ นาที ด้วย split ratio 2

ตัวอย่างกราฟแสดงลักษณะการกลั่นตามคาบจุดเดือด



ภาพที่ ค1 ตัวอย่างกราฟแสดงผลที่วิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์การกลั่น (simulated gas chromatograph) และการคำนวณปริมาณวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆ

วิธีการคำนวณหาร้อยละขององค์ประกอบต่างๆ ที่ได้จากกราฟวิเคราะห์การกระจายตัวตามจุดเดือดขององค์ประกอบน้ำมัน

ปริมาณแนฟทาที่อ่านได้จากกราฟร้อยละ A

$$\text{ดังนั้นร้อยละแนฟทาของผลิตภัณฑ์น้ำมัน } W \text{ กรัม} = \frac{A \times W}{100}$$

ปริมาณเคโรซีนที่อ่านจากกราฟร้อยละ B

$$\text{ดังนั้นร้อยละเคโรซีนของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{B \times W}{100}$$

ปริมาณแก๊สออยล์เบาจากกราฟร้อยละ C

$$\text{ดังนั้นร้อยละแก๊สออยล์เบาของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{C \times W}{100}$$

ปริมาณแก๊สออยล์ที่อ่านจากกราฟร้อยละ D

$$\text{ดังนั้นร้อยละแก๊สออยล์ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{D \times W}{100}$$

ปริมาณกากน้ำมันที่อ่านจากกราฟร้อยละ E

$$\text{ดังนั้นร้อยละกากของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = \frac{E \times W}{100}$$

## ภาคผนวก ง

### การวิเคราะห์หาค่าความหนืด จากค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส

การหาค่าความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส (Kinetic viscosity and calculating of viscosity index from kinematic viscosity at 40 °C) ตามมาตรฐาน ASTM D2270

ขั้นตอนการใช้งานอ่างควบคุมอุณหภูมิเพื่อวัดค่าความหนืด

1. ตรวจสอบระดับขีด Parafin ในอ่างควบคุม (ห้ามต่ำกว่าระดับขีดที่กำหนด)
2. เสียบปลั๊กไฟฟ้า (220 V)
3. ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการ (ที่ 40 องศาเซลเซียส)
  - โดยหมุนปุ่มด้านซ้ายมือสุดก่อน (หลักสิบ) ตามต้องการ
  - หมุนปุ่มถัดมาตรงกลาง โดยปรับเป็นหลักหน่วยตามที่ต้องการ
  - หมุนปุ่มด้านขวาสุด (เป็นการปรับองศาเซลเซียสแบบละเอียด)
4. เมื่อทำการตั้งอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ว ให้ทำการต่อไปนี้
  - กดปุ่ม Main Switch และปุ่ม Heater
5. รอจนกว่าอุณหภูมิจะถึงค่าที่ set ไว้ โดยดูจากเทอร์โมมิเตอร์ที่เสียบไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ
6. ใส่สารตัวอย่างลงใน Viscometer แล้วแช่ทิ้งไว้ประมาณ 25-30 นาที จึงเริ่มจับเวลา (flow time) เป็นวินาที

การคำนวณหาค่าความหนืด

$$\text{Viscosity (mm}^2/\text{s)} = \text{flow time(s)} \times K \text{ (mm}^2/\text{s}^2)$$



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนิทัศน์ วงษ์สวัสดิ์ เกิดเมื่อวันที่ 28 มกราคม 2530 ที่จังหวัดสงขลา สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตร มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2552