

การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพิซีซีใช้แล้ว

นางสาวกฤษณิ ปิ่นเวหา

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.

PYROLYSIS OF USED LUBRICATING OIL ON SPENT FCC CATALYST

Miss Koontanee Pinweha

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

การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบน
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีใช้แล้ว

โดย

นางสาวกฤษณี ปิ่นเวหา

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
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.วิชากร จารุศิริ)

คุณวุฒิ ปิ่นเวหา : การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว. (PYROLYSIS OF USED LUBRICATING OIL ON SPENT FCC CATALYST) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์, 111 หน้า.

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว โดยทำการทดลอง ในเครื่อง ปฏิกรณ์ขนาด 250 มิลลิลิตร กระบวนการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วนี้จะทำการศึกษาที่ภาวะอุณหภูมิ 410-450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก ปริมาณสาร ตั้งต้นจำนวน 20 กรัม ใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของน้ำมันที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatography (DGC) ภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วคือที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการ ทำปฏิกิริยา 46 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์และ ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนัก ซึ่งใน ภาวะการทดลองข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ร้อยละ 78.42 โดยน้ำหนัก แก๊สไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 16.84 โดยน้ำหนัก กากของแข็งร้อยละ 4.74 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณแนฟทา ร้อยละ 33.26 โดยน้ำหนัก เกลโรซีน ร้อยละ 19.70 โดยน้ำหนัก ดีเซลร้อยละ 32.25 โดยน้ำหนัก โมเลกุลไฮโดรคาร์บอน สายโซ่ยาว ร้อยละ 5.37 โดยน้ำหนัก และพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็นพวกเอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันหลักใน น้ำมันเบนซินออกเทน 95 แล้วพบว่ามีหมู่เอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนที่คล้ายกัน

ภาควิชา: เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา: เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา: 2554.....

5272229923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : PYROLYSIS / USED LUBRICATING OIL / SPENT FCC CATALYST

KOONTANEE PINWEHA : PYROLYSIS OF USED LUBRICATING OIL ON
SPENT FCC CATALYST. ADVISOR : ASSOC.PROF.THARAPONG VITIDSANT,
111 pp.

The aim of this research was to study the pyrolysis of used lubricating oil on spent FCC catalyst in a batch microreactor of 250 ml. The experiment was carried out under various condition by the follow variables : reaction temperature of 410 - 450 °C, reaction time of 30 - 60 min, initial hydrogen pressure of 1 - 5 bars, amount of spent FCC catalyst ranging from 1 - 5 % by weight and weight of raw material was 20 g. The two level factorial experimental design was performed to investigate the effect of variables on oil yield to determine the optimum condition. The product oil was analyzed by Simulate Distillation Gas Chromatography (DGC). The optimum conditions of pyrolysis of used lubricating oil were reaction temperature of 430 °C, reaction time of 60 min, initial hydrogen pressured of 5 bars by using 4 percent by weight of spent FCC catalyst. The product was present in 72.94 percent by weight of oil yield, 23.86 percent by weight of gas yield, and 3.24 percent by weight of solid yield and composed of naphtha, kerosene, light gas oil, gas oil and long residue (33.08, 11.46, 16.65, 2.70 and 9.05 percent by weight respectively). It was found that the product consist of an aromatic hydrocarbon in main structure. Comparing the structure oil product with benzene (octane 95) was similar.

Department : Chemical Technology Student's Signature

Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ที่กรุณาให้ความรู้ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือให้งานวิจัยสามารถดำเนินการและสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประพันธ์ คูชดารา ปรธาน กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.วิษชากร จารุศิริ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่กรุณาให้ความรู้ความคิดเห็น รวมถึงคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

ขอขอบคุณ พี่ๆเพื่อนๆน้องๆในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 น้ำมันหล่อลื่น.....	3
2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน.....	4
2.1.2 สารที่เพิ่มคุณภาพ.....	6
2.1.3 สมบัติของน้ำมันหล่อลื่น.....	6
2.1.4 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น.....	8
2.1.5 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น.....	9
2.1.6 การจัดการเกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	10
2.2 ปฏิกริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกริยา.....	11
2.3 ตัวเร่งปฏิกริยา.....	12
2.3.1 ความหมายของตัวเร่งปฏิกริยา.....	12
2.3.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกริยา.....	12
2.3.3 ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกริยา.....	12
2.3.4 ประเภทของตัวเร่งปฏิกริยา.....	12
2.3.5 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับปฏิกริยาที่มีตัวเร่งปฏิกริยา.....	13
2.3.6 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์.....	15
2.4 ซีโอไลต์.....	16

	หน้า
2.4.1 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์.....	17
2.4.2 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์.....	18
2.4.3 ลักษณะที่เอื้อต่อการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	19
2.4.4 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	21
2.4.5 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยา.....	22
2.5 ปฏิริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน.....	25
2.5.1 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน.....	25
2.5.2 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
2.5.3 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจน รวม.....	29
2.6 การเกิดโค้ก.....	29
2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	30
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	33
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	33
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	40
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	40
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	44
3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบและสารตั้งต้น.....	44
3.4.2 ขั้นตอนทำการทดลอง.....	44
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	46
4.1 การวิเคราะห์สมบัติสารตั้งต้น.....	46
4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์.....	50
4.3 การกำหนดภาวะที่ใช้ในการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	51
4.4 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	52
4.5 ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อ การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	64

	หน้า
4.5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ.....	64
4.5.2 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทดลอง.....	68
4.5.3 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา.....	72
4.5.4 อิทธิพลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น.....	76
4.6 คำแนะนำภาวะเหมาะสมโดยโปรแกรม Design-Expert	80
4.7 การวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทดลอง.....	83
4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทดลอง.....	85
4.9 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียง.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก.....	92
ภาคผนวก ก.....	93
ภาคผนวก ข.....	98
ภาคผนวก ค.....	105
ภาคผนวก ง.....	109
ภาคผนวก จ.....	110
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	111

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
3.1	ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว....	41
3.2	จำนวนการทดลองจากการออกแบบแฟคทอเรียลสองระดับ.....	42
4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว.....	46
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	47
4.3	ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรุกรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	49
4.4	ผลการวิเคราะห์ความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา.....	50
4.5	แสดงร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจาก 2 ⁴ factorial design	53
4.6	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จาก ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว..	56
4.7	แสดงร้อยละผลได้ขององค์ประกอบเนฟทาจากการออกแบบการทดลอง แบบแฟคทอเรียลสองระดับ (2 ⁴ factorial design).....	58
4.8	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จาก ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว..	61
4.9	ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert 6.0.10.....	80
4.10	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert 6.0.10.....	81
4.11	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองจริง.....	81
4.12	เปรียบเทียบระหว่างภาวะที่เหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา.....	82
4.13	เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น.	83
4.14	องค์ประกอบต่างๆที่พบในผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	86

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	4
2.2	13
2.3	14
2.4	15
2.5	17
2.6	17
2.7	17
2.8	17
2.9	23
2.10	24
3.1	33
3.2	34
3.3	35
3.4	36
3.5	36
3.6	37
3.7	38
3.8	38
3.9	39
3.10	40
4.1	48
4.2	48
4.3	49

ภาพที่	หน้า	
4.4	Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาการ แตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว.....	55
4.5	Normal Plot of Residuals.....	56
4.6	Residuals vs. Run.....	57
4.7	Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้องค์ประกอบแนฟทาที่ได้ จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้ แล้ว.....	61
4.8	Normal Plot of Residuals.....	62
4.9	Residuals vs. Run.....	63
4.10	ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิระหว่าง 400-450 องศาเซลเซียส.....	65
4.11	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatograph ที่อุณหภูมิระหว่าง400-450 องศาเซลเซียส...	66
4.12	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุณหภูมิ 400-450 องศา เซลเซียส.....	67
4.13	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากอุณหภูมิ 400-450 องศา เซลเซียส.....	67
4.14	ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการ ทดลองระหว่าง 30-60 นาที.....	69
4.15	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatograph ที่เวลาในการทดลองระหว่าง 30-60 นาที.....	70
4.16	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเวลาในการทดลองระหว่าง 30- 60 นาที.....	71
4.17	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเวลาในการทดลองระหว่าง 30-60 นาที.....	71
4.18	ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของ ตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 1 – 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	73

ภาพที่	หน้า
4.19 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatograph ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 1 – 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	74
4.20 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 1 – 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา.....	75
4.21 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง 1 – 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	75
4.22 ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 5 บาร์.....	77
4.23 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatograph ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 5 บาร์.....	78
4.24 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 5 บาร์.....	79
4.25 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้นระหว่าง 1 – 5 บาร์.....	79
4.26 FTIR spectrum จากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว	84
4.27 FTIR spectrum จากผลิตภัณฑ์น้ำมันเบนซินออกเทน 95.....	84
4.28 Interpreting spectra ที่ได้จากเครื่อง GC-MS.....	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

จากสถานการณ์ต่างๆในปัจจุบันนี้โดยเฉพาะปัญหาในด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมนั้นมีอิทธิพลกับความเป็นอยู่ในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลกนี้อย่างมาก ทำให้คุณภาพชีวิตของสิ่งมีชีวิตแย่ลงและยังทำให้คุณภาพด้านการเงินต่ำลงด้วย ประชากรโลกมีฐานะที่ยากจนสูงขึ้นจากการที่ประชากรได้เพิ่มปริมาณขึ้นอย่างต่อเนื่องในแต่ละปีจึงทำให้เกิดความก้าวหน้าของเทคโนโลยีความทันสมัยสูง ทั้งในด้านอุตสาหกรรมก็เป็นที่ยอมรับมากขึ้นและมีการเติบโตอย่างก้าวกระโดดเพื่อให้สามารถรองรับและตอบสนองต่อความต้องการของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะมนุษย์ได้ จึงเป็นที่มาทำให้พลังงานของโลกถูกนำมาใช้มากยิ่งขึ้นโดยเฉพาะน้ำมัน

น้ำมันจัดเป็นพลังงานหลักที่ถูกนำมาใช้มากมายทั้งในด้านของอุตสาหกรรม ด้านการขนส่ง รวมไปถึงด้านเกษตรกรรมก็ได้มีการนำน้ำมันมาใช้เพื่อเพิ่มพลังงานการผลิตให้สูงขึ้น ในปัจจุบันนี้กิจกรรมเกือบทุกอย่างล้วนมีเรื่องน้ำมันเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยทั้งสิ้น แต่น้ำมันเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปจึงทำให้เกิดสถานการณ์การขาดแคลนน้ำมันขึ้นในไม่ช้า ในขณะที่ประเทศไทยต้องมีการนำเข้าของน้ำมันเกือบทั้งหมดและปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นทุกปี จึงเล็งเห็นความสำคัญในวิกฤตการณ์พลังงานจึงได้เกิดนโยบายต่างๆเพื่อแก้ไข จัดการ ป้องกัน รวมถึงมีการคิดค้นและหาวิธีเพื่อนำน้ำมันที่ผ่านการใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ น้ำมันที่ถูกได้รับความสนใจนั้นคือน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว จากข้อมูลปี 2552 พบว่ามีการใช้น้ำมันหล่อลื่น 50.3 ล้านลิตรต่อวัน โดยบางส่วนถูกนำไปบำบัดหรือรีไซเคิล แต่มีบางส่วนถูกปล่อยลงสู่ธรรมชาติ ก่อให้เกิดมลภาวะเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศต่างๆ แต่ในการจัดการเกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วนั้นต้องใช้การลงทุนที่สูงในด้านของการเงินและอุปกรณ์เครื่องจักรที่ใช้มีราคาสูง ดังนั้นจึงไม่คุ้มค่าที่จะดำเนินการ จึงทำให้เกิดความคิดที่จะนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วซึ่งเป็นน้ำมันชนิดหนักมาแปรสภาพให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่เบาที่มีคุณค่าและนำกลับมาใช้ได้อีก

การศึกษาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีรายงานผลงานวิจัยมากกว่าผลการแตกตัวให้แอฟทา คีโรซีน แก๊สฮอยล์และน้ำมันสายโซ่ยาวมากกว่าร้อยละ 30 (ก่อนการแตกตัวจะมีมากกว่าร้อยละ 80) เมื่อเพิ่มความดันหรืออุณหภูมิจะทำให้การเปลี่ยนแปลงของน้ำมันสายโซ่ยาวขึ้น แต่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแอฟทา เคโรซีน และแก๊สฮอยล์น้อยลง ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จึงกลายเป็นแก๊ส จึงเป็นที่มาของงานวิจัยที่จะพยายามทำให้น้ำมันสายโซ่ยาวแตกตัวให้หมดหรือให้เหลือน้อยที่สุด โดยต้องเปลี่ยนให้เป็นแอฟทา คีโรซีน และแก๊สฮอยล์มากขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกใช้เป็น

ตัวเลือกหนึ่งที่สามารถแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวให้เป็นสายโซ่สั้นที่ยังเป็นของเหลวอยู่โดยให้แก๊สน้อยที่สุดได้ การทดลองทำในปฏิกรณ์แบบแบดซ์ขนาด 250 มิลลิลิตร มีตัวแปรคืออุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส เวลา 30-60 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1-5 โดยมวลมีการวิเคราะห์ผลได้ของน้ำมัน แก๊ส และของแข็ง ร้อยละผลได้ของน้ำมันผลิตภัณฑ์ที่เป็นแนฟทา เคโรซีน ดีเซลและน้ำมันสายโซ่ยาวโดยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph และมีการศึกษาลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยดูค่าพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุนและค่าความเป็นกรด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้เอพซีซีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ศึกษาภาวะเหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมาจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่ดีที่สุด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกโมเลกุลของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วให้ได้เป็นน้ำมันชนิดเบาหรือเชื้อเพลิงเหลว
2. ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันปิโตรเลียม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

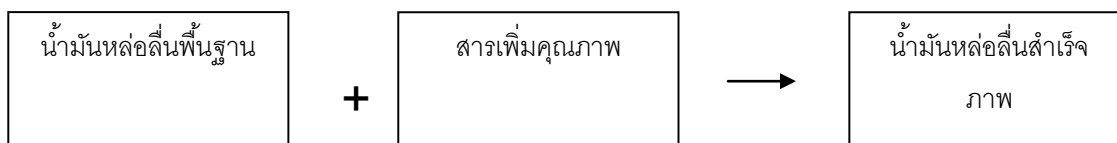
2.1 น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating oil) [1, 3]

ในปัจจุบันมีสารหล่อลื่นที่ใช้กันอยู่มากมาย ถ้าแบ่งตามสถานะจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่ ก๊าซ ของเหลว สารกึ่งแข็ง และของแข็ง ในจำนวนของสารหล่อลื่นทั้งหมดที่ใช้กัน ของเหลวจะเป็นสถานะของสารหล่อลื่นที่ใช้กันมากที่สุด รองมาก็คือสารพวกกึ่งแข็ง เช่นจาระบี การที่สารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวนิยมและใช้กันแพร่หลายเพราะมีความสามารถแยกผิววัตถุทั้งสองได้อย่างสมบูรณ์ และอีกความสามารถหนึ่งก็คือการรับแรงที่กระทำได้มาก ของเหลวที่เป็นสารหล่อลื่นที่ใช้กันมีดังนี้ สารละลายกับน้ำ น้ำมันแร่ น้ำมันพืชต่างๆ น้ำมันสัตว์ต่างๆ และน้ำมันสังเคราะห์ ในบรรดาของเหลวเหล่านี้ น้ำจะมีการใช้งานที่ค่อนข้างจำกัด เช่น การใช้งานในการหล่อลื่นแบริงไม้ หรือแบริงยางของอุปกรณ์พวกกังหันวิดน้ำ หรือพวกเครื่องสูบน้ำบางประเภท ส่วนสารละลายกับน้ำนั้นจะใช้เฉพาะในงานการหล่อลื่นชิ้นงานในส่วนของเครื่องกลึง เครื่องเจียระไน และเครื่องไสเป็นส่วนใหญ่ น้ำมันหล่อลื่นเป็นสารหล่อลื่นที่เป็นของเหลวที่ใช้กันมากที่สุดโดยจะมีอยู่ 2 ชนิดคือน้ำมันแร่และน้ำมันสังเคราะห์ ในด้านของน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์นั้นไม่เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากน้ำมันทั้ง 2 มีราคาค่อนข้างแพง

น้ำมันหล่อลื่นเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากการกลั่นในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียม เป็นสารที่มีลักษณะเป็นของเหลว นำมาใช้หล่อลื่นชิ้นส่วนของเครื่องยนต์และเครื่องจักร

การผลิตน้ำมันหล่อลื่นให้ได้เป็นน้ำมันสำเร็จรูปที่ดี มีคุณภาพ และเหมาะสมสำหรับการใช้งานในเครื่องยนต์ และเครื่องจักรกลในแต่ละชนิดนั้น มีขั้นตอนการผลิตโดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังภาพที่ 2.1 ดังนี้

1. ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน
2. ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูป โดยทำการเติมสารคุณภาพต่างๆเพิ่มลงในน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน



ภาพที่ 2.1 ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูป

2.1.1 น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน ที่ใช้กันอยู่แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือน้ำมันที่ได้จากพืชหรือสัตว์ น้ำมันแร่ และน้ำมันสังเคราะห์ แต่ที่นิยมนำมาผลิตเป็นน้ำมันหล่อลื่นสำเร็จรูปคือน้ำมันแร่

1. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากพืชหรือสัตว์

น้ำมันหล่อลื่นนี้จะมีการคงตัวทางเคมีที่ต่ำ ส่งผลทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายระหว่างการใช้งาน จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพ ส่งผลทำให้ราคาแพงและไม่เป็นที่นิยม แต่จะมีการใช้งานในด้านที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษบางพวกเท่านั้น ส่วนใหญ่จะนำมาใช้เพื่อเพิ่มคุณภาพให้กับน้ำมันหล่อลื่นที่ผลิตจากน้ำมันปิโตรเลียมที่ต้องการคุณสมบัติในด้านความลื่น และในด้านการผสมเข้ากับน้ำได้ เช่น น้ำมันละหุ่ง น้ำมันหมู เป็นต้น

2. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานที่ได้จากปิโตรเลียมหรือน้ำมันแร่

น้ำมันหล่อลื่นนี้เป็นน้ำมันที่ได้มาจากการกลั่นน้ำมันดิบ จะเป็นส่วนที่หนักของน้ำมันดิบ ซึ่งเหลือมาจากการเอาส่วนที่เบาอีกที กระบวนการผลิตน้ำมันหล่อลื่นที่ได้จากน้ำมันดิบ เริ่มต้นโดยการนำส่วนที่เหลือจากหอกกลั่นบรรยากาศไปทำการกลั่นอีกครั้งหนึ่งในหอกกลั่นสุญญากาศ เพื่อให้เกิดการแยกส่วนที่เหลือออกจากหอกกลั่นบรรยากาศออกไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ที่มีจุดเดือดที่เหมือนกัน โดยความดันในหอกกลั่นสุญญากาศนั้นจะมีค่าต่ำกว่า 1 ใน 10 ของความดันบรรยากาศเพื่อไม่ให้เกิดการแยกสลายหรือแตกตัวที่อุณหภูมิสูง สมบัติสำคัญที่ต้องมีการควบคุมคือความหนืด จุดวาบไฟ และพวงกกาคาร์บอน โดยจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดต่าง ๆ กัน หลังจากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อทำการแยกส่วนที่ไม่ต้องการออกให้เหลือไว้เพียงแต่ผลิตภัณฑ์หรือน้ำมันหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติตรงตามต้องการ ตัวอย่างของกระบวนการเหล่านั้น เช่น กระบวนการแยกยางมะตอยออกด้วยไพรเพน โดยจะกระบวนการนี้ใช้ไพรเพนเป็นสายละลาย กระบวนการแยกสารประกอบที่เป็นเฉพาพวกแอมโรแมติกไฮโดรคาร์บอน ออก ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นการเพิ่มคุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นในด้านเสถียรภาพทางความร้อนและการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและเป็นการเพิ่มดัชนีความหนืด ให้แก่น้ำมันหล่อลื่นอีกด้วย กระบวนการแยกในส่วนที่เป็นไขออก ทำให้จุดไหลเทมีค่าต่ำลง จุดประสงค์เพื่อให้สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำ ส่วนการเติมไฮโดรเจนนั้นจะทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลของสารที่

ไม่เสถียรและที่มีผลทำให้เกิดสี ส่งผลทำให้น้ำมันหล่อลื่นที่ได้มีสีจางลงและสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติบางประการให้กับน้ำมันหล่อลื่นในกระบวนการผลิตได้

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันหล่อลื่นที่ได้มาจากปิโตรเลียมได้แก่

- สารประกอบประเภทพาราฟินที่เป็นทั้งโซ่ตรงและโซ่กิ่ง
- สารประกอบประเภทแนฟทา
- สารประกอบพวกแอโรแมติกที่มีโครงสร้างไม่อิ่มตัว

3. น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานจากน้ำมันสังเคราะห์

น้ำมันหล่อลื่นประเภทนี้จะได้จากกระบวนการทางเคมีที่เกิดการรวมตัวของสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำเกิดเป็นน้ำมันที่มีความหนืดเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นสารหล่อลื่น โดยสารเริ่มต้นที่ใช้ในการผลิตส่วนใหญ่ได้มาจากผลิตภัณฑ์พวกปิโตรเลียม และการที่น้ำมันสังเคราะห์เป็นน้ำมันที่สร้างขึ้นจากกระบวนการทางเคมีจึงง่ายต่อการควบคุมให้มีคุณสมบัติและมีโครงสร้างของโมเลกุลตามที่ต้องการ

สำหรับน้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์

กลุ่มไฮโดรคาร์บอนสังเคราะห์นี้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนบริสุทธิ์ที่ผลิตขึ้นจากวัตถุดิบที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ ที่นิยมใช้กันมี 3 ชนิด ได้แก่ โอลิฟินโอลิโกเมอร์ อัลคิลเตเตอะโรมาติ และโพลีบิวทีน ซึ่งข้อได้เปรียบเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ ความมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง ใช้งานได้ในระยะยาว มีดัชนีค่าความหนืดที่สูง มีการไหลที่ภาวะอุณหภูมิต่ำ มีการระเหยที่ต่ำและไม่มีไข

2. กลุ่มเอสเทอร์อินทรีย์

เอสเทอร์อินทรีย์เป็นสารหล่อลื่นที่ถูกนำไปใช้งานในด้านต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่น ถูกใช้เป็นสารหล่อลื่นในเครื่องยนต์เจ็ทของอากาศยานและใช้ในเครื่องยนต์ระบบไฮดรอลิก เป็นต้น เอสเทอร์อินทรีย์ที่นำมาใช้ มีอยู่ 2 ชนิด คือ ไดเบสิกเอซิดเอสเตอร์ หรือที่เรียกว่า ไดเอสเทอร์ ซึ่งได้จากปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมีระหว่างไดเบสิกเอซิดกับโมโนไฮดรอกอลกอฮอล์ ส่วนอีกชนิดก็คือ โพลีโอลเอสเทอร์ ซึ่งได้จากปฏิกิริยาในกระบวนการทางเคมีระหว่างโพลีไฮดรอกแอลกอฮอล์ กับโมโนเบสิกเอซิด ข้อได้เปรียบเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำมันแร่ก็คือ การมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง มีการไหลที่ภาวะอุณหภูมิต่ำ และมีอายุการใช้งานในระยะที่ยาว

3. พอลิไกลคอลล์

พอลิไกลคอลล์เป็นสารหล่อลื่นชนิดหนึ่งที่มีจุดเดือดสูงแต่มีจุดไหลเทต่ำเหมาะนำมาใช้งานในภาวะที่อุณหภูมิสูง เช่น ถูกนำมาใช้เป็นน้ำมันเบรกและน้ำมันไฮดรอลิกที่สามารถติดไฟได้

4. ฟอสเฟตเอสเทอร์

ฟอสเฟตเอสเทอร์เป็นสารหล่อลื่นที่มีคุณสมบัติในการทนไฟที่ดี จึงถูกนำมาใช้เป็นพวกน้ำมันไฮดรอลิกสำหรับอากาศยานและน้ำมันไฮดรอลิกประเภทที่ไม่ติดไฟด้วย

5. น้ำมันหล่อลื่นสังเคราะห์อื่นๆ

ซิลิโคนจัดเป็นสารหล่อลื่นสังเคราะห์อื่น ๆ ที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงมากคือ อยู่ที่ 300 ขึ้นไป และมีจุดไหลเทต่ำจึงเหมาะสมที่จะนำมาการใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างและในกรณีพิเศษสามารถนำมาใช้เป็นน้ำมันไฮดรอลิกได้ เช่น ใช้เป็นสปริงของเหลว นอกจากนี้ยังมีซิลิเคตเอสเทอร์ที่จัดเป็นสารหล่อลื่นสังเคราะห์อื่น ๆ ที่มีค่าดัชนีความหนืดสูงแต่จุดไหลเทต่ำเช่นกัน

2.1.2 สารเพิ่มคุณภาพ

สารเพิ่มคุณภาพคือสารที่ถูกนำมาเติมลงไปในการหล่อลื่นเพื่อที่จะช่วยให้น้ำมันหล่อลื่นมีคุณภาพดียิ่งขึ้น โดยสารเพิ่มคุณภาพนั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

- ละลายในน้ำมันหล่อลื่นได้
- ไม่สลายตัวหรือเกิดเปลี่ยนแปลงในขณะเก็บหรือใช้งาน
- ต้องมีความสามารถทำให้คุณสมบัติบางประการของน้ำมันหล่อลื่นดีขึ้น

2.1.3 คุณสมบัติของน้ำมันหล่อลื่น [14, 15]

1. **ความหนืด** หมายถึง ความใสและความเข้มข้นของน้ำมันซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิและความดัน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นจะลดลง แต่เมื่อความดันเพิ่มจะทำให้ความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ที่ความหนืดต่ำจะไหลได้ง่ายแต่เยื่อหล่อลื่นบาง ในทางตรงกันข้ามถ้าความหนืดสูงจะไหลได้ยากมีเยื่อหล่อลื่นหนาสามารถทดสอบโดยใช้วิธีตาม ASTM D 4452 ความหนืดเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการควบคุมการผลิตและในการเลือกน้ำมันไปใช้งานต่อไป

2. **ดัชนีความหนืด** ความหนืดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นน้ำมันจะมีความใสมากขึ้น และจะมีความข้นมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การเปลี่ยนแปลงนี้สามารถนำมาวัดได้เป็นดัชนีความหนืด เมื่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่มากส่งผลให้ความหนืดเปลี่ยนแปลงไปน้อยแสดงว่าน้ำมันมีค่า VI สูง ส่วนน้ำมันที่มีการเปลี่ยนแปลงของความหนืดมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยแสดงว่าน้ำมันนั้นมีค่า VI ต่ำ

3. **จุดวาบไฟและจุดติดไฟ** หมายถึง อุณหภูมิที่ทำให้น้ำมันสามารถระเหยกลายเป็นไอเพียงพอที่ผิว และสามารถเกิดการลุกไหม้ได้เมื่อโดนเปลวไฟ แต่ที่อุณหภูมินี้จะไม่เพียงพอที่ทำให้การลุกไหม้นั้นคงอยู่และดำเนินต่อไปจึงทำให้เปลวไฟดับลงได้เองในทันที แต่ถ้ามีการให้ความร้อน

แก่น้ำมันต่อไปอีกส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น สูงจนถึงอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดการลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วินาที อุณหภูมิ ณ จุดนี้เรียกว่าจุดติดไฟ จุดวาบไฟของน้ำมันหล่อลื่นนั้นจะแปรผันกับความหนืด คือความหนืดสูงก็จะมีจุดวาบไฟที่สูง การทดสอบจุดวาบไฟและจุดติดไฟสามารถทดสอบโดยใช้วิธีตาม ASTM D 92 ค่าทั้งสองนี้มีความสำคัญไม่เพียงเฉพาะในด้านความอันตรายจากการลุกไหม้ แต่ยังมีผลในด้านการระเหยของน้ำมันด้วย น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจะมีค่าจุดวาบไฟสูง เนื่องจากการมีการละลายของน้ำมันอื่นๆหรือน้ำมันเชื้อเพลิงอื่นๆลงไปผสม

4. จุดไหลเท (pour point) คือ จุดที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้น้ำมันยังคงไหลได้ภายใต้สภาวะการทดสอบที่กำหนด ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวโน้มของน้ำมันที่จะหยุดไหลจากระบบปั๊ม ซึ่งสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเติมสารที่เรียกว่า Pour point depressant สารนี้จะช่วยป้องกันการเจริญเติบโตของผลึกที่แข็งที่จะกลายเป็นผลึกแข็งต่อไป ความสำคัญของจุดไหลเทอยู่ที่การนำไปใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ เช่น น้ำมันหล่อลื่นตู้เย็น หรือน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศอุณหภูมิต่ำ สามารถทดสอบโดยใช้วิธีทดสอบตาม ASTM D 97

5. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) และ Relative Density & API gravity ค่าทั้งสองจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการควบคุมการผลิต และเมื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบกับข้อมูลของค่าอื่นๆสามารถบอกที่มาของน้ำมันที่ไม่ทราบแหล่งได้ เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะทั้งสองจะสัมพันธ์กับองค์ประกอบโดยประมาณ สามารถทดสอบได้โดยใช้วิธี ASTM D1298 หากเมื่อนำค่าความถ่วงจำเพาะไปเปรียบเทียบกับน้ำมันใหม่ที่ยังไม่ได้ผ่านการใช้งาน ถ้าค่ามีการเปลี่ยนแปลงไม่ว่าจะมากขึ้นหรือน้อยลงอาจเป็นเพราะมีสิ่งสกปรก น้ำ หรือน้ำมันเชื้อเพลิงเจือปนอยู่

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity, Sp.gr.) คืออัตราส่วนที่แสดงให้เห็นว่าสารนั้นหนักกว่าสารบริสุทธิ์เป็นกี่เท่าในปริมาตรที่เท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกัน

Specific Gravity = ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง / ความหนาแน่นของน้ำ

Relative Density & API Gravity ใช้วัดความถ่วงจำเพาะของน้ำมันเช่นเดียวกัน แต่เนื่องจากเวลาอ่านจะไม่อ่านค่าหลังจุดทศนิยมจึงทำให้สะดวกและง่ายกว่า โดยค่า API Gravity สามารถหาได้จาก Specific Gravity โดยใช้สมการดังนี้

$$\text{Gravity} = 141.5 / (\text{Sp.gr } 60/60^{\circ}\text{F}) - 131.5$$

6. ปริมาณกำมะถัน (Sulphur Content) โดยปกติแล้วในน้ำมันเกือบทุกชนิดจะมีกำมะถันเจือปนอยู่ ถึงแม้ว่าน้ำมันนั้นจะผ่านการกลั่น และการกำจัดออกแล้วก็ตาม อันตรายที่เกิดจากกำมะถันคือจะทำให้ภาชนะเกิดการกัดกร่อน และถ้าในน้ำมันเชื้อเพลิงมีปริมาณกำมะถันอยู่มากเมื่อเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้จะทำให้เกิดออกไซด์ของกำมะถันขึ้นนั่นก็คือ ก๊าซซัลเฟอร์ได

ออกไซด์ (SO₂) และก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ที่มีความสามารถในการกัดกร่อนโลหะได้และมีกลิ่นที่เหม็น สามารถทดสอบได้โดยใช้วิธี ASTM D 1226

7. **ค่าพลังงานความร้อน (Heat of Combustion)** คือค่าของการเผาไหม้ โดยการหาค่าพลังงานสามารถทดสอบโดยใช้วิธี ASTM D 240

8. **เถ้าประเภทซัลเฟต (Sulphated Ash)** ในน้ำมันบางชนิดจะมีสารประเภทซัลเฟตเจือปนอยู่ ดังนั้นการทดสอบเพื่อให้ทราบว่าในน้ำมันนั้นมีเหลือปริมาณมากน้อยเพียงใดสามารถทดสอบออกมาได้เป็นค่าในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก ซึ่งส่งผลทำให้ทราบได้ว่าปริมาณโลหะที่ผสมในน้ำมันนั้นมากน้อยเพียงใด สามารถทดสอบได้โดยใช้วิธี ASTM D 874

9. **การทดสอบเพื่อหาสารประเภทของเถ้า (Nature of Ash)** การทดสอบนี้จะทำให้ทราบได้ว่าในน้ำมันมีโลหะชนิดใด ประเภทใด และมีอยู่ในปริมาณเท่าใด สามารถทดสอบโดยใช้วิธี ASTM D 482

10. **ความต้านทานการรวมตัวกับออกซิเจน** เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความซับซ้อน เมื่อสัมผัสกับออกซิเจนจะเกิดการทำปฏิกิริยากันและจะเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในอุณหภูมิที่สูง ส่งผลทำให้สมบัติของน้ำมันเปลี่ยนแปลงไป เช่น ความเป็นกรด ความเหนียวหนืด ดังนั้นน้ำมันที่ดีควรที่จะรวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ยาก

2.1.4 หน้าที่ของน้ำมันหล่อลื่น [2,3]

ในปัจจุบันน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้มีหลายชนิด ทั้งที่นำไปหล่อลื่นเครื่องยนต์และเครื่องจักรกลต่างๆ โดยหน้าที่หลักและประโยชน์จากการใช้น้ำมันหล่อลื่นมีดังนี้

1. **ช่วยหล่อลื่น (lubricate)** ฟิล์มหรือเยื่อบางๆของน้ำมันหล่อลื่นที่เคลือบผิวโลหะหรือชิ้นงานจะทำหน้าที่ลดการเสียดสีกันโดยตรง โดยมีผลทำให้ระยะเวลาในการใช้งานโลหะหรือชิ้นงานนั้นยาวนานขึ้นหรือเป็นการลดการสึกหรอของชิ้นงานนั่นเอง น้ำมันหล่อลื่นที่ดีนั้นต้องมีคุณสมบัติในการคงความหนาของฟิล์มหรือเยื่อน้ำมันให้เกือบคงที่ตลอดเวลา แม้เมื่อมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า ดัชนีความเข้มข้นใส (Viscosity index)

2. **ช่วยระบายความร้อน (coolant)** การช่วยระบายความร้อนที่ดีเป็นคุณสมบัติที่สำคัญข้อหนึ่งของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ ซึ่งต้องทำหน้าที่ลดอุณหภูมิหรือระบายความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกระบอกสูบ และช่วยระบายความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีที่ผิวของชิ้นส่วนต่างๆ

3. **ช่วยรักษาความสะอาด (clean)** คือสามารถชะล้างหรือขจัดคราบสกปรกต่างๆบนผิวชิ้นงานได้

4. **ช่วยป้องกันการเกิดสนิมและการกัดกร่อน (protect)** น้ำมันหล่อลื่นที่ดีจะต้องไม่มีสารที่ก่อให้เกิดอันตรายในการกัดกร่อน และเมื่อมีสารจากภายนอกที่เป็นผลทำให้เกิดการกัดกร่อน เช่น ก๊าซไอเสีย ละอองน้ำ จะต้องทำให้กรดนั้นเจือจาง เพื่อที่จะไม่สามารถกัดกร่อนโลหะของชิ้นงานได้

5. **ช่วยกระจายความสกปรก (dispersancy)** สิ่งสกปรกที่หลุดออกมาที่เป็นผลจากสมบัติการกำจัดสิ่งสกปรกออกจากชิ้นงานนั้นน้ำมันหล่อลื่นที่ดีก็ต้องทำหน้าที่กระจายสิ่งสกปรกด้วย เพื่อไม่ให้สิ่งสกปรกเหล่านั้นรวมตัวกันได้ง่ายขึ้น เพราะการรวมตัวกันของสิ่งสกปรกจะทำให้เกิดยางเหนียวอุดตันในชิ้นงาน

นอกจากหน้าที่ที่สำคัญเหล่านี้แล้ว น้ำมันหล่อลื่นยังจำเป็นต้องมีคุณสมบัติพิเศษอื่นๆอีกที่เป็นผลจากการเติมสารเพิ่มคุณภาพ ซึ่งขึ้นอยู่กับงานที่นำไปใช้ เช่น ไม่เกิดฟองง่าย รับแรงกดได้สูง เป็นต้น

2.1.5 การเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่น [2,3]

น้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่เป็นพวกน้ำมันแร่ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ แต่พวกที่เป็นน้ำมันสังเคราะห์ก็ยังคงมีใช้อยู่บ้างแต่จะใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

น้ำมันหล่อลื่นมีมากมายหลายชนิด ความแตกต่างของคุณสมบัติและคุณภาพในแต่ละชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับงานนำไปใช้งาน เมื่อถูกใช้งานแล้วคุณสมบัติและคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นจะเปลี่ยนไปและจะต้องสูญเสียหรือเสื่อมลงไปเรื่อยๆจนในที่สุดไม่อยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานได้อีกต่อไป ลักษณะของการเสื่อมสภาพของน้ำมันหล่อลื่นถูกจำแนกได้ 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. **การเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของตัวเนื่อน้ำมัน** ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็วเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลทำให้น้ำมันเปลี่ยนสภาพไป ความเป็นกรดและความหนืดของน้ำมันสูงขึ้น ถ้ายิ่งปล่อยให้มีความเป็นกรดสูงมากๆจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพลงอย่างรวดเร็วของเนื่อน้ำมัน เกิดเป็นพวงยางเหนียวมาเกาะตามบริเวณร่องรูทางผ่านของน้ำมันหล่อลื่น และในที่สุดจะไปกัดกร่อนเนื้อโลหะในเครื่องจักรกล ในน้ำมันที่มีการเติมสารเพิ่มในการป้องกันการเกิดปฏิกิริยานี้ หากสารที่เติมนี้ใช้หมดไปหรือเสื่อมสภาพลงน้ำมันก็จะเกิดปฏิกิริยาได้อีกกับอากาศที่อุณหภูมิสูงๆ

2. **สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันใช้หมดไปหรือเสื่อมสภาพลง** สารเพิ่มคุณภาพในน้ำมันช่วยให้น้ำมันหล่อลื่นมีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมกับสภาพการใช้งานก็จริง แต่สารเหล่านี้ก็มีวันหมดและเสื่อมคุณภาพได้ หากใช้หมดหรือเปลี่ยนสภาพไปเป็นสารอื่นแล้วก็จะไม่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติอีกต่อไป

3. สารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกเข้าไปปะปน สารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกที่มาจากภายนอก เช่น น้ำฝุ่นผง เขม่า เป็นต้น เมื่อเข้าไปปะปนกับน้ำมันหล่อลื่นแล้วอาจมีผลทำให้น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมคุณภาพได้ ถึงแม้จะเป็นน้ำมันหล่อลื่นเหมือนกันแต่ต่างชนิดกันก็ไม่ควรนำมาผสมกัน เพราะอาจทำให้คุณภาพและสมบัติบางประการเสียไป สารอินทรีย์หรือสิ่งสกปรกที่มีผลต่อน้ำมัน เช่น น้ำ เมื่อมาปนอยู่กับน้ำมันทำให้ความหนืดเปลี่ยนไปทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้งานต่อไป พวกน้ำมันเครื่องยนต์ที่ปะปนในน้ำมันเทอร์ไบน์ถึงแม้เพียงเล็กน้อยอาจจะทำให้คุณภาพในการป้องกันสนิมของน้ำมันเทอร์ไบน์เสียไป เนื่องจากสารเพิ่มคุณภาพที่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์อาจจะไปทำปฏิกิริยากับสารช่วยป้องกันสนิมที่อยู่ในน้ำมันเทอร์ไบน์ทำให้สารที่ช่วยป้องกันสนิมแปรและเปลี่ยนสภาพไป

2.1.6 การจัดการเกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว [1]

วิธีการกำจัดน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีหลายวิธี ได้แก่

1. ผสมกับน้ำมันดิบนำเข้ากลั่นในโรงกลั่นน้ำมัน วิธีนี้นั้นจะต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดในขั้นต้นก่อน แต่เนื่องจากพบว่ามีอัตราการเกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ในโรงกลั่นที่สูง ประกอบกับจำเป็นต้องมีกระบวนการกำจัดกากของเสียที่เกิดขึ้น ด้วยเหตุนี้เองจึงไม่คุ้มค่าที่จะดำเนินการ วิธีการนี้จึงเป็นที่นิยมและไม่ค่อยใช้ในเมืองไทย

2. นำไปเข้ากระบวนการกลั่นหรือกรอง วิธีการนี้จะต้องคำนึงถึงมาตรฐานและคุณภาพของโรงกลั่นและน้ำมันที่ได้เป็นอย่างไร วิธีการกำจัดเป็นที่ยอมรับของทางวิชาการหรือไม่ ปัจจุบันนี้โรงกลั่นในเมืองไทยมีการกรองน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเกิดขึ้นหลายโรง แต่ยังไม่พบว่ามีโรงใดที่สามารถกำจัดกากของเสียแล้วเป็นที่ยอมรับได้

3. ใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในเตาเผา เป็นการนำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วไปผสมกับน้ำมันเชื้อเพลิงในอัตราส่วนที่ประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก วิธีการนี้ต้องคำนึงถึงมลพิษทางอากาศและกากของเสียที่เกิดขึ้นด้วย ในเมืองไทยขณะนี้มีการใช้อยู่บ้าง แต่ส่วนใหญ่จะไม่ได้ตรวจสอบและไม่สามารถควบคุมมลพิษและของเสียที่เกิดขึ้นได้อย่างจริงจัง

4. กำจัดโดยการเผาในเตาเผาขยะ ในปัจจุบันกรมโรงงานได้มีโครงการที่จะสร้างแผนที่เพื่อติดตั้งเตาเผาแต่ต้องใช้งบลงทุนสูงมากซึ่งไม่เหมาะสมกับสภาพเศรษฐกิจของประเทศในปัจจุบัน จึงต้องยืดเวลาในการสร้างโครงการออกไปก่อน อย่างไรก็ตามการกำจัดด้วยวิธีนี้จะต้องมีการตรวจสอบมลพิษที่ถูกปล่อยจากปล่องอุตสาหกรรมอย่างสม่ำเสมอ

5. การกำจัดน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วในเตาเผาซีเมนต์ เตาเผาซีเมนต์เป็นเตาที่มีอุณหภูมิสูง โดยให้ความร้อนสูงถึง 1,450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาการเผาไหม้นานพอที่ทำให้สารอินทรีย์ถูก

ทำลายได้อย่างสมบูรณ์ ไม่มีกากที่เป็นเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ให้ต้องกำจัดอีก วิธีการนี้เป็นการนำพลังงานมาใช้ประโยชน์ได้ดีและสามารถลดการใช้ทรัพยากรเชื้อเพลิงได้ ปัจจุบันมีเตาเผาปูนซีเมนต์ที่ใช้งานเป็นจำนวนมากกระจายอยู่ในแทบทุกภาคของประเทศ วิธีการนี้จึงถูกยอมรับและใช้อย่างแพร่หลายในยุโรป อเมริกา และญี่ปุ่นเพราะเหตุผลหลักที่สำคัญคือไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.2 ปฏิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิริยา (Catalyst reaction) [6, 7]

เป็นกระบวนการที่นำตัวเร่งปฏิริยาเข้ามาใช้เพื่อให้ปฏิริยาที่เกิดขึ้นสามารถดำเนินไปได้อย่างรวดเร็วขึ้น มีกลไกที่ไปทำให้พลังงานการกระตุ้นของปฏิริยาลดลง โดยตัวเร่งปฏิริยาต้องไม่ทำปฏิริยากับสารตั้งต้นหรือเข้าไปรบกวนให้สมดุลของปฏิริยาเปลี่ยนไป จึงสรุปได้ว่า ตัวเร่งปฏิริยาเป็นตัวที่ทำหน้าที่เพิ่มอัตราการเกิดปฏิริยาเท่านั้น โดยสมดุลของปฏิริยายังคงที่ ซึ่งตามทฤษฎีแล้วเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิริยาจะได้ตัวเร่งปฏิริยากลับมาเท่าเดิมหรือเท่ากับปริมาณที่ใช้ไปในตอนเริ่มแรกโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพ แต่ในทางปฏิบัติแล้วตัวเร่งปฏิริยาสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือองค์ประกอบไปได้ เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของออกซิเจนต่อโลหะในตัวเร่งปฏิริยาโลหะออกไซด์บางชนิดที่ภาวะอุณหภูมิสูง หรือการสัมผัสกันของสารตั้งต้นในระหว่างการเกิดปฏิริยา

2.3 ตัวเร่งปฏิริยา (Catalyst) [3]

2.3.1 ความหมายของตัวเร่งปฏิริยา

ตัวเร่งปฏิริยา (Catalyst) คือ สารที่เติมลงไปในปฏิริยาแล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิริยา (Reaction rate) เร็วขึ้นโดยที่สารนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังเสร็จสิ้นปฏิริยาลงแล้ว

2.3.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิริยา

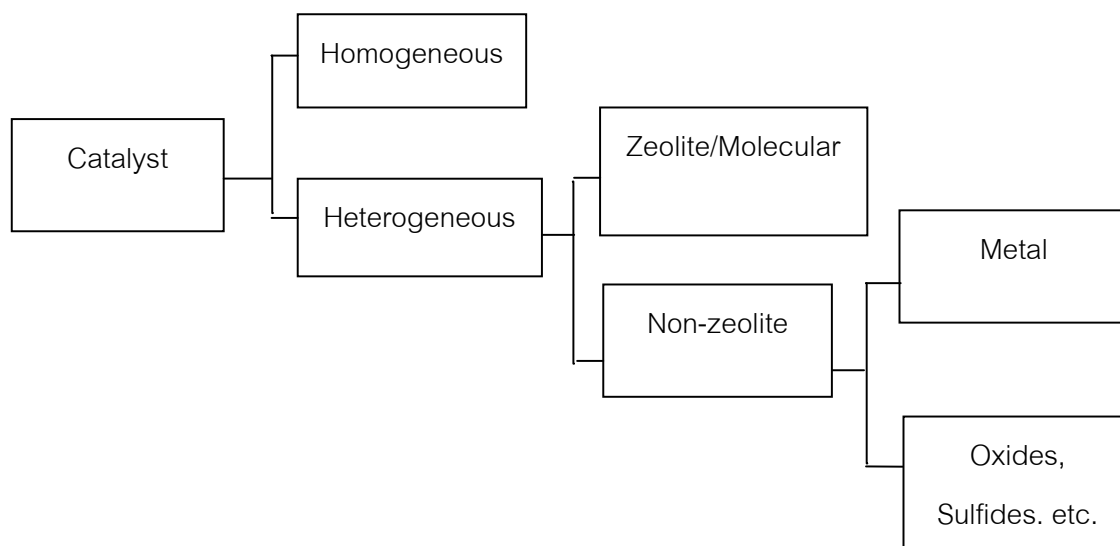
1. ไม่ไปรบกวนสมดุลของปฏิริยา
2. ลดพลังงานกระตุ้นของปฏิริยา
3. เป็นสารไม่ใช่พลังงาน

2.3.3 ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิริยา

1. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่างๆ เช่น Catalytic cracking, Catalytic reforming เป็นต้น
2. ใช้ในการควบคุมไอเสียที่เกิดและออกมาจากรถยนต์ (Catalytic converters)
3. ใช้ในการกำจัดของเสีย (Waste) หรือสารพิษ (Toxic) ในกระบวนการในอุตสาหกรรมด้านต่าง ๆ
4. สามารถช่วยลดสภาวะที่รุนแรงในการเกิดปฏิกิริยาได้
5. สามารถลดค่าใช้จ่ายที่ใช้ในด้านพลังงานและอุปกรณ์อื่น ๆ ลงได้

2.3.4 ประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา

การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นนิยมทำโดยการพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นว่าอยู่ในวัฏภาค (phase) เดียวกันหรือไม่ ซึ่งทำให้สามารถแบ่งตัวเร่งปฏิกิริยาออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นอยู่ในวัฏภาคเดียวกันจัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst) แต่ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นอยู่คนละวัฏภาคจัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalyst) การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาได้แสดงไว้ในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 การแบ่งประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยา [8]

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์จะมีลักษณะคือ ตัวเร่งปฏิกิริยาทุกโมเลกุลที่เติมเข้าไปในระบบกับสารตั้งต้นนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันและอยู่ในสถานะเดียวกัน ดังนั้นภาพแบบของการทำปฏิกิริยาจึงเหมือนกันด้วย ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์นั้นส่วนมากจะอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็ง

โดยส่วนที่มีการทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นนั้นจะเกิดเฉพาะส่วนของโครงสร้างที่อยู่บนพื้นที่ผิวเท่านั้น ไอออน อะตอม หรือหมู่โครงสร้างในตำแหน่งต่างๆที่ต่างกันบนของโครงสร้างผลึกจะมีคุณสมบัติในการทำปฏิกิริยาที่ต่างกัน จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆนอกเหนือจากปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่าย

ถึงแม้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มีทุกโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมือนกันหมดจึงให้ค่าการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ก็ตาม แต่ข้อเสียของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ก็คือมีเสถียรภาพที่ต่ำ เนื่องจากโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทนี้อาจเกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิสูง ส่งผลทำให้ไม่สามารถนำไปใช้งานที่อุณหภูมิสูงซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็ว และนอกจากนั้นในตอนแยกเอาตัวเร่งปฏิกิริยาออกมาจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก รวมถึงในบางครั้งยังมีปัญหาเรื่องเกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยข้อจำกัดต่างๆที่เกิดขึ้นทำให้การใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ในอุตสาหกรรมเคมีกลับน้ำมัน และปิโตรเคมีจึงอยู่ในวงแคบกว่าการใช้งานตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์

2.3.5 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

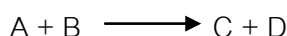
การเกิดปฏิกิริยามีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 ทฤษฎีคือ

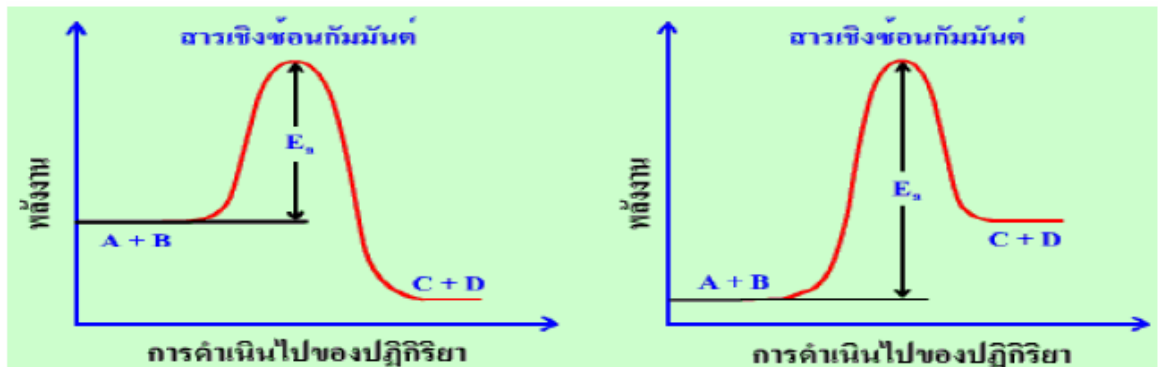
1. ทฤษฎีการชน (Collision Theory) สิ่งที่ทำให้ปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้มีดังต่อไปนี้

- มีการชนกันของสารตั้งต้น
- การชนมีทิศทางที่เหมาะสม
- พลังงานที่เกิดจากการชนกันมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้น

ในกรณีนี้สารตั้งต้นจะถูกตัวเร่งปฏิกิริยาดึงเอามาสะสมไว้ที่บริเวณผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้การชนกันของสารตั้งต้นมีโอกาสเกิดได้มากยิ่งขึ้น

2. ทฤษฎีทรานซิชันสเตต (Transition state Theory) ทฤษฎีนี้ได้กล่าวไว้ว่าการที่สารตั้งต้นจะเกิดปฏิกิริยาแล้วเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์นั้นจะต้องเกิดผ่านตัวกลางตัวหนึ่งซึ่งเป็นสารที่เรียกว่า Activated complex แล้ว Activated complex จะเกิดการสลายตัวให้เป็นผลิตภัณฑ์ ดังภาพที่ 2.3





ภาพที่ 2.3 การเกิด Activated complex และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา [15]

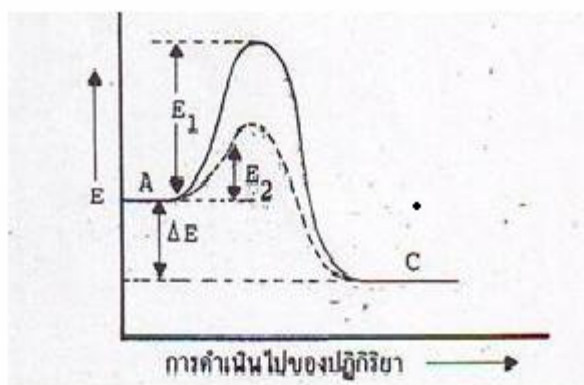
อัตราในการเกิดผลิตภัณฑ์จะช้าหรือเร็วขึ้นอยู่กับพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยานั้นๆว่ามีค่าสูงหรือต่ำเพียงใด

$$K = Ae^{-E_a/RT}$$

และ อัตราการเกิดปฏิกิริยา = $k [A]^a [B]^b$

จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) พบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate Constant, k) ส่วนค่า K นั้นขึ้นอยู่กับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยานั้นๆ (Activation Energy, E_a)

ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นส่วนช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วยิ่งขึ้น กล่าวคือตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปช่วยลดค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยานั้นๆ แต่จะไปเปลี่ยนทิศทางการเกิดของปฏิกิริยาให้ไปในทิศทางใหม่ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำกว่าเดิมจึงส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ดังภาพที่ 2.4



E_1 = พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา

เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

E_2 = พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเมื่อ

มีตัวเร่งปฏิกิริยา

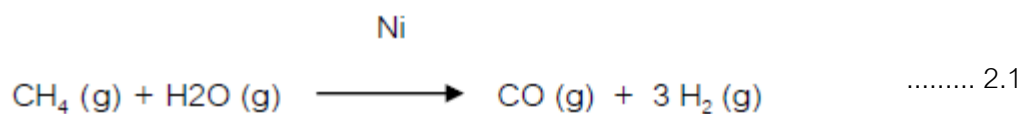
ΔE = พลังงานของปฏิกิริยา

ภาพที่ 2.4 การดำเนินไปของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา [15]

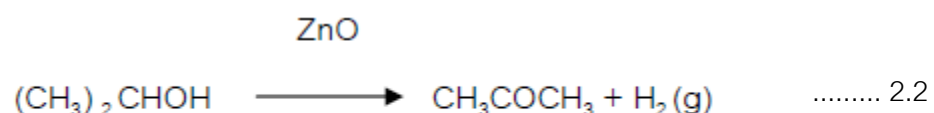
2.3.6 ปฏิกิริยาสะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis) [9]

ปฏิกิริยาแบบนี้เป็นปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นมีสถานะต่างกันไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่จะเป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นนั้นอาจเป็นของเหลว หรือแก๊ส หรือสารผสมระหว่างของเหลวและแก๊สก็ได้ ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยานั้นจะขึ้นกับพื้นที่ผิวที่สัมผัสกันระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้น จึงจำเป็นต้องให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับสารตั้งต้นให้ได้มากที่สุดซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น นำตัวเร่งปฏิกิริยาไปทำการบดให้ละเอียดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว หรือการใช้ตัวรองรับ (support)

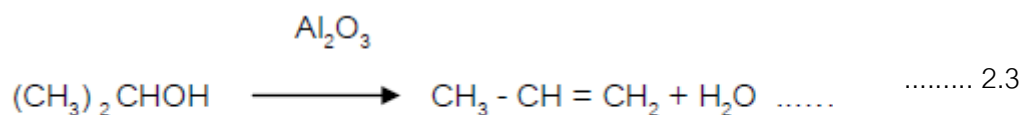
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่นิยมใช้กัน ได้แก่ พวกโลหะทรานซิชัน (Fe, Ni, Pt, Ag) และพวกออกไซด์ของโลหะ (NiO, ZnO, V₂O₅, Bi₂O₃, Al₂O₃, SiO₂) หรือพวกที่นำโลหะมาผสมกับออกไซด์ของโลหะ 2 ชนิด เพื่อช่วยเสริมให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานดีขึ้นหรือมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆมากมายในอุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน ได้แก่ กระบวนการ Hydrogenation Dehydrogenation Oxidation Reduction และ Polymerization ตัวอย่างเช่น การผลิตแก๊สสังเคราะห์ (CO/H₂) โดยจะเกิดปฏิกิริยา Steam Reforming ของ CH₄ ดังสมการที่ 2.1



ถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกันในสารตั้งต้นตัวเดียวกัน อาจทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ต่างชนิดกัน เช่น ปฏิกิริยาการสลายตัวของ Isopropanol หรือ (CH₃)₂CHOH ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น ZnO จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Dehydrogenation ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Acetone ดังสมการที่ 2.2



ในขณะที่ถ้าใช้ Al₂O₃ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยา Dehydrogenation ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Propylene ดังสมการที่ 2.3



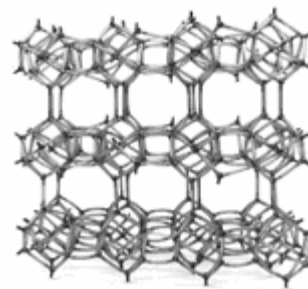
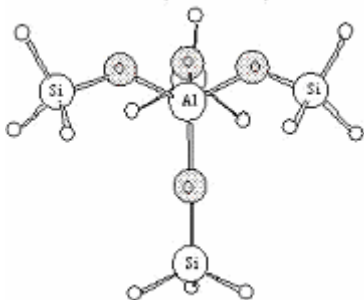
กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalytic process) จะเกิดปฏิกิริยาที่มีขั้นตอนดังนี้

1. สารตั้งต้นแพร่เข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. เกิดการแพร่ของสารตั้งต้นไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา
3. สารตั้งต้นถูกดูดซับลงบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา
4. เกิดปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้น
5. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลุดออกจากผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา
6. ผลิตภัณฑ์แพร่เข้าไปใน Bulk gas phase
7. ผลิตภัณฑ์แพร่ออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.4 ซีโอไลต์ (zeolite) [4]

ซีโอไลต์คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) มีหน่วยย่อยที่ประกอบไปด้วยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม สร้างพันธะกันเป็นภาพทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมอยู่ตรงกลางถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนทั้งสี่มุม ซึ่งแต่ละโครงสร้างจะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน (ภาพที่ 2.5) ก่อให้เกิดเป็นโครงร่างผลึกขนาดใหญ่มีช่องว่างระหว่างโมเลกุล ส่งผลทำให้ซีโอไลต์มีลักษณะเป็นผลึกแข็งที่มีรูพรุนต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบแบบสามมิติ โดยขนาดรูพรุนซีโอไลต์จะอยู่ในช่วง 2-10 อังสตรอม

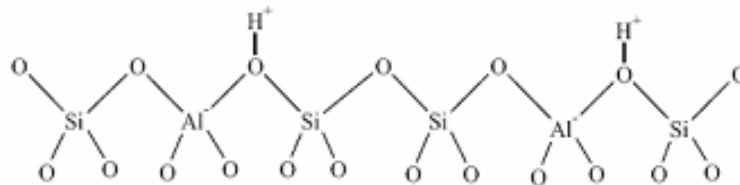


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างหน่วยย่อยของซีโอไลต์ ภาพที่ 2.6 โครงร่างผลึกของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง

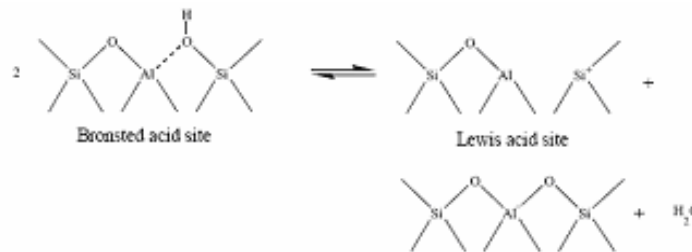
2.4.1 สมบัติสำคัญของซีโอไลต์ [6]

ซีโอไลต์มีสมบัติที่สำคัญสำหรับการช่วยเร่งปฏิกิริยา 2 ประการ คือ สมบัติการเลือกจำเพาะและความเป็นกรด โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดนั้น ๆ เป็นตัวกำหนดสมบัติในการเลือกจำเพาะ ดังนั้นสารตั้งต้นจำเป็นต้องมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของซีโอไลต์ จึงจะสามารถแพร่เข้าไปเกิดปฏิกิริยาภายในรูพรุนได้ ส่วนในด้านสมบัติความเป็นกรดของซีโอไลต์แบ่งได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่

1. ชนิดของตำแหน่งกรด มี 2 ชนิดหลัก ๆ คือ กรดบราวน์สเตท (Bronsted acid) มีตำแหน่งกรดเป็น Si-OH-Al ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สำคัญในการช่วยเร่งปฏิกิริยาในหลายปฏิกิริยา ดังภาพที่ 2.7 และกรดลิวอิส (Lewis acid) ที่อุณหภูมิสูงตำแหน่งกรดบราวน์สเตท (Bronsted acid site) สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส (Lewis acid site) ได้โดยเกิดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้างซึ่งเป็นการปรับสภาพของซีโอไลต์ ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างตำแหน่งกรดบราวน์สเตท (Bronsted acid site)



ภาพที่ 2.8 การแปลงสภาพของตำแหน่งกรดบราวน์สเตทเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส

2. ปริมาณของตำแหน่งกรด ถูกกำหนดด้วยอัตราส่วนของ Si/Al ถ้าปริมาณของอะลูมิเนียมต่ำจะส่งผลทำให้ซีโอไลต์มีตำแหน่งกรดมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มลักษณะการชอบน้ำให้แก่ซีโอไลต์ สารตั้งต้นจะถูกดูดซับบนพื้นผิวซีโอไลต์มากขึ้น บางครั้งอาจทำให้เกิดผลเสียคือเกิดการอุดตันในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาได้

3. ความแรงของตำแหน่งกรด ถูกกำหนดด้วยอัตราส่วนของ Si/Al เช่นเดียวกัน ถ้าลดปริมาณอะลูมิเนียมลงจะทำให้ความแรงของตำแหน่งกรดเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่อัตราส่วนของ Si/Al ต่ำมากจะไม่ส่งผลต่อความแรงของตำแหน่งกรด

สามารถปรับแต่งสมบัติความเป็นกรดของซีโอไลต์ได้โดยการบำบัดด้วยกรดหรือเบส หรือการกราฟ (grafting) หมู่อินทรีย์ลงบนพื้นผิวซีโอไลต์

2.4.2 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ [6]

ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นกรด (acid properties) และมีการเลือกจำเพาะ (selective properties) ที่สูง มีความเสถียรทางความร้อนทั้งในภาวะที่ไม่มีและมีน้ำ (thermal and hydrothermal stability) จึงสามารถฟื้นฟูสภาพของซีโอไลต์ด้วยความร้อน (thermal

regeneration) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการนำไปเผา (calcination) ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน ซีโอไลต์ถูกนำมาใช้งาน 4 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

1. **ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา** เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) เป็นต้น โดยก่อนการนำไปใช้จะมีการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของซีโอไลต์ให้เหมาะสมกับปฏิกิริยานั้นๆมากขึ้น เช่น ในงานวิจัยของ A. Gola et al. ต้องการเพิ่มความเป็นกรดให้แก่ซีโอไลต์ จึงทำการปรับอัตราส่วนระหว่างซิลิกอน Y โดยการนำซีโอไลต์ Y ผ่านไอน้ำ (hydrothermal steaming) ทำให้อะตอมของอะลูมิเนียมถูกดึงออกจากโครงสร้างซีโอไลต์ (dealumination) จากนั้นทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate: NH_4NO_3) แล้วนำไปเผา (calcination) ทำให้อะตอมของซิลิกอนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่โดยไปแทนที่อะตอมของอะลูมิเนียมที่หลุดออกไป ส่งผลให้อัตราส่วนของ Si/Al สูงขึ้น ความเป็นกรดของซีโอไลต์จึงเพิ่มขึ้น และที่สำคัญคือได้โครงสร้างที่คงทนต่อความร้อนมากขึ้น เรียกว่า Ultrastable Y (USY)

ในปัจจุบัน USY ถูกนำมาใช้ในกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) กระบวนการแตกตัว (cracking) และกระบวนการแอลคิเลชันของสารไฮโดรคาร์บอนในโรงกลั่นน้ำมันมากขึ้น

2. **ใช้เป็นตัวดูดซับ (sorption agent)** ซีโอไลต์มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนทำให้มีสมบัติการเลือกจำเพาะ สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาดของรูพรุนและโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด มีการนำซีโอไลต์มาใช้ในการแยกสาร (seperation) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการทำให้แห้ง (dehydration) เนื่องจากซีโอไลต์สามารถดูดซับและคายน้ำได้ โดยเมื่อให้ความร้อน น้ำในรูพรุนของซีโอไลต์จะระเหยออกไป แต่เมื่อซีโอไลต์ได้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้งความสามารถในการดูดซับน้ำก็จะเกิดขึ้นอีก นอกจากนี้ยังมีการนำซีโอไลต์ไปใช้ในการดูดซับสารอื่นๆอีกด้วย เช่น ไอโอดีน ตะกั่ว และแอมโมเนีย เป็นต้น

3. **เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำ (water softener)** ซีโอไลต์จะมีประจุบวกของโลหะแอลคาไลเกาะอยู่อย่างหลวมๆ จึงสามารถที่จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออนซึ่งเป็นประจุของโลหะที่อยู่ในน้ำกระด้างได้ ทำให้ความกระด้างของน้ำลดลง

4. **ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin)** ซีโอไลต์มีความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียได้ โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในรูพรุน รวมทั้งสามารถใช้กำจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ที่มีอยู่ในไอเสียที่เกิดจากเครื่องยนต์ให้กลายเป็นแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนเป็นการช่วยลดมลพิษที่ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.4.3 ลักษณะที่เอื้อต่อการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ความเสถียรทางความร้อน (Thermal Stability)

โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมจะใช้อุณหภูมิค่อนข้างสูงประมาณ 300- 600°C ในการทำให้เกิดปฏิกิริยา และจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในกระบวนการด้วย ซึ่งมีความจำเป็นที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องเสถียรในสภาวะที่ทำการปฏิกิริยาเป็นเวลานานและต่อเนื่อง และการที่ซีโอไลต์เป็นสารประกอบ aluminosilicate ที่เป็นผลึกแข็งจึงมีความเสถียรต่อความร้อนที่สูง เมื่อพิจารณาอัตราส่วน Si/Al แล้วพบว่าซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al สูงจะทนความร้อนสูง และถ้าใช้ขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ในการจำแนกพบว่าซีโอไลต์ชนิดที่มีขนาดรูพรุนเล็กจะทนต่อความร้อนได้สูงกว่าซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่ แต่ด้วยความที่ซีโอไลต์ส่วนใหญ่มีความเสถียรจึงสามารถใช้ได้ทั้งปฏิกิริยา endothermic เช่น cracking และ reforming ซึ่งเกิดที่ภาวะอุณหภูมิที่สูง และปฏิกิริยา exothermic เช่น alkylation และ isomerization ซึ่งเกิดที่ภาวะอุณหภูมิต่ำ

2. พื้นที่ผิวในการเร่งปฏิกิริยาสูง (High Surface Area)

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์จะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสมาก ซึ่งจะส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากบริเวณเร่งจะอยู่ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่านั้น และจากการที่ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงโดยพื้นที่โดยส่วนใหญ่คือ พื้นที่ผิวในรูพรุนซึ่งจะมีบริเวณเร่งอยู่ และการใช้โครงสร้างที่มีรูพรุนขนาดเล็กจะทำให้พื้นที่ผิวด้านนอกเพิ่มมากขึ้นทำให้สารสามารถแพร่เข้าไปได้มากขึ้นจึงให้ผลดีกว่าโครงสร้างรูพรุนขนาดใหญ่

3. ปฏิกิริยาระดับโมเลกุล (Molecular reactor)

ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยซีโอไลต์ สารตั้งต้นจะต้องแพร่และถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนก่อนแล้วค่อยเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์ในบริเวณที่ถูกดูดซับ โดยสิ่งที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนทั้งหมดจะมีขนาดจำกัด และมีความใกล้เคียงกับขนาดของโมเลกุลสำหรับที่เป็นปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเดี่ยว (Monomolecular Reaction) คือมีสารตั้งต้นเพียงตัวเดียวอยู่ภายในโพรงเดี่ยวและเกิดปฏิกิริยาในทุกๆโพรงในลักษณะเดียวกัน ส่งผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงได้น้อย และด้วยการที่ตัวเร่งปฏิกิริยาดูดซับสารตั้งต้นไว้ ก็ส่งผลให้มีความเข้มข้นสูงจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็ว ส่วนในปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเชิงคู่ (Bimolecular Reaction) ต้องอาศัยการชนกันของโมเลกุลของสารตั้งต้นอย่างน้อย 2 ตัว เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้น โดยรูพรุนจะมาทำหน้าที่คล้าย Molecular Reaction ที่ช่วยเพิ่มความเข้มข้นให้กับสารตั้งต้น ทำให้โอกาสในการชนกัน เกิดได้มากยิ่งขึ้น

4. การคัดสรรต่อขนาด และภาพร่าง (Shape selectivity aspect)

การคัดสรรขนาดและภาพร่างเป็นความสามารถพิเศษของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ไม่พบในตัวเร่งตัวอื่นๆ เนื่องจากซีโอไลต์มีบริเวณเร่งอยู่ภายในรูพรุนด้วยขนาดที่จำกัด ดังนั้นสารตั้ง

ต้นจะต้องแพร่ผ่านเข้าไปภายในรูพรุนให้ได้ก่อนถึงจะมีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็ต้องแพร่ผ่านออกจากรูพรุนให้ได้อีกด้วย จึงทำให้ขนาดของรูพรุนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีบทบาทเข้ามาควบคุมทั้งขนาดและภาพร่างของโมเลกุลที่เกิดขึ้นทั้งหมดในปฏิกริยานั้นๆ สามารถแบ่งได้ใน 3 ลักษณะ ได้แก่

4.1 การคัดสรรโมเลกุลของสารตั้งต้น (Reactant shape selectivity)

สารตั้งต้นจะถูกคัดขนาดเข้าไปทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ต้องการ เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนพวกอัลเคน (C6 – C8) ซึ่งโครงสร้างมีทั้งที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่ง ซึ่งสายโซ่กิ่งจะเป็นโครงสร้างที่ดีมีค่าออกเทนสูงจึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ดีกว่าพวกสายโซ่ตรง ดังนั้นจึงมีการนำเอาซีโอไลต์มาแยกพวกสายโซ่ตรงโดยการดูดซับเข้าไปในรูพรุนที่เข้าไปได้เนื่องจาก kinetic diameter เล็กกว่าพวกสายโซ่กิ่งและเมื่อเข้าไปในรูพรุนแล้วจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดขึ้น ซึ่งรูพรุนนี้พวกสายโซ่กิ่งไม่สามารถที่จะเข้าไปเกิดปฏิกิริยาได้เลย เป็นผลจากการคัดสรรสารตั้งต้นของตัวเร่งปฏิกริยานั่นเอง แต่การคัดสรรก็ขึ้นกับการเลือกใช้ชนิดของซีโอไลต์ด้วยเช่นกัน

4.2 การคัดสรรภาพร่างของสารมัธยันต์ (Intermediate shape selectivity)

สารมัธยันต์เป็นตัวที่กำหนดทิศทางการเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการเลือกใช้ซีโอไลต์จึงมีผลต่อการคัดเลือกปฏิกิริยาด้วย เช่น การเกิดปฏิกิริยา disproportionation ของ m-xylene ซึ่งจะเกิดผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ 1,2,4-trimethylbenzene และ 1,3,5-trimethylbenzene เป็นผลมาจากการมีสารมัธยันต์ที่ต่างกัน โดยปฏิกิริยาจะเกิดผ่านปฏิกิริยาแบบโมเลกุลเชิงคู่ของ xylene ซึ่ง 1,3,5-trimethylbenzene เกิดจากสารมัธยันต์ที่มีความเกะกะมากกว่าสารมัธยันต์ของ 1,2,4-trimethylbenzene การที่จะแยกการเกิดปฏิกิริยาเป็นสารมัธยันต์จึงขึ้นกับการเลือกซีโอไลต์มาใช้แยกจากความต่างของความเกะกะที่เกิดขึ้น

4.3 การคัดสรรภาพร่างของสารผลิตภัณฑ์ (Product shape selectivity)

สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นต้องสามารถแพร่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ให้ได้ ถ้าเกิดว่าไม่สามารถแพร่ผ่านไปได้ อาจเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ หรืออาจทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นไปเลย เพื่อสุดท้ายแล้วให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่แพร่ผ่านรูพรุนออกมาได้

2.4.4 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกริยา (Catalyst deactivation)

การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา หมายถึง การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการสูญเสียความว่องไว (Activity) ในการเข้าทำปฏิกิริยาและสูญเสียความสามารถในการเลือกจำเพาะเจาะจงลงไป (Selectivity) สาเหตุอาจเกิดมาจากสิ่งต่างๆดังต่อไปนี้

1. **การเป็นพิษ (Poisoning)** เกิดมาจากการที่มีสิ่งแปลกปลอม (Impurity) เข้าไปเจือปนอยู่ในสารที่นำมาใช้ในปฏิกิริยา ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่องไวลดลง

2. **การอุดตัน (Fouling)** เป็นปัญหาทางด้านกายภาพที่เกิดขึ้นจากฝุ่นผง ละอองหรือพวกสารคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยานั้นๆมาเกาะหรือไปอุดตันอยู่ในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลทำให้ความว่องไวและความสามารถในการเลือกจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

3. **การรวมตัว (Sintering)** เป็นผลมาจากความร้อนในปฏิกิริยา โดยในกระบวนการผลิตจะมีการใช้อุณหภูมิที่สูงทำให้โลหะเกิดการหลอมเหลว เมื่ออุณหภูมิลดลงโลหะที่หลอมเหลวจะเกิดการรวมตัวกันแข็งและมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ตำแหน่งที่ว่องไวหรือบริเวณเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง หรือมีผลอาจทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปความว่องไวในตัวเร่งปฏิกิริยาจึงลดต่ำลง

4. **การสูญเสียสารที่ว่องไว (Loss of active species)** เกิดการระเหยของสารประกอบบางสารในตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป ซึ่งสารนั้นอาจจะเป็นสารที่ว่องไวจึงส่งผลให้ความว่องไวในตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

2.4.5 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Characterization) [18]

การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งในด้านทางกายภาพและทางเคมี โดยอาศัยเทคนิคต่าง ๆ เข้ามาช่วยในการตรวจสอบ การตรวจสอบคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทางกายภาพส่วนใหญ่จะเน้นไปในเรื่องของการหาพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีที่นิยม ได้แก่ วิธีการดูดซับแก๊สโดยใช้เทคนิค BET และการตรวจสอบโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยอาศัยเทคนิคทางฟิสิกส์เข้ามาช่วย ได้แก่ X-Ray Powder Diffraction (XRD) Transmission Electron Microscopy (TEM) Scanning Electron Microscopy (SEM) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการดูดซับแก๊สโดยเทคนิค BET X-Ray Powder Diffraction (XRD) และ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

1. การหาพื้นที่ผิว (Surface area) จากวิธีการดูดซับแก๊สโดยใช้เทคนิค BET

ทฤษฎีของ BET เป็นทฤษฎีสำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) ซึ่งพัฒนามาจากทฤษฎีของ Langmuir ซึ่งเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ทฤษฎีนี้ถูกพัฒนาโดยนักวิจัยชื่อ Brunauer, Emmett and Teller ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า

- การเกิดการดูดซับโมเลกุลของแก๊สไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเต็มบนผิวหน้า แต่มีเพียงแค่ชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น
- มีเพียงแค่การดูดซับโดยไม่เกิดการเคลื่อนย้าย (Localize)
- การดูดซับลงบนพื้นผิวจะใช้พลังงานเท่ากัน โอกาสในการดูดซับจึงเท่ากันตลอดทั่วพื้นผิว
- แรงแล็กและแรงดูดที่เกิดขึ้นจากโมเลกุลข้างเคียงจะไม่นำมาพิจารณา
- บริเวณเร่งจะมีจำนวนที่คงที่
- ลักษณะที่เข้าไปเกาะของโมเลกุลในชั้นที่ 2 บนชั้นที่ 1 จะตรงกัน
- เมื่อก๊าซที่ถูกดูดซับตั้งแต่ชั้นที่สองขึ้นไปนั้น คุณสมบัติจะเหมือนกับแก๊สหรือของเหลวในวัฏภาคของแก๊สหรือของเหลวนั้นๆ
- เมื่อตัวถูกดูดซับมีค่าความดันย่อยเท่ากับความดันไออิ่มตัวแล้ว จะเกิดการควบแน่นของตัวดูดซับบนชั้นดูดซับ โดยจำนวนชั้นของการดูดซับจะเกิดในลักษณะที่เป็นแบบไม่จำกัด จากสมมติฐานข้างต้นเกิดเป็นสมการของ BET ดังสมการที่ 2.4

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

เมื่อ P = ความดันของสารที่จะมาเกาะ

P_0 = ความดันไออิ่มตัวของแก๊สที่อุณหภูมิการทดลอง

V = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดันของสารที่มาเกาะ

V_m = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับ โดยการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

C = ค่าคงที่ที่มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของการดูดซับและการกลายเป็นของเหลวของแก๊ส

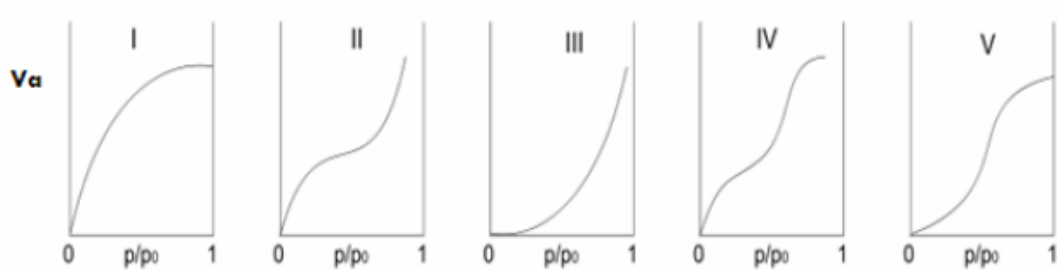
นั่นคือ $C = C^{(q_1 - q_2)} / RT$

เมื่อ q_1 = ค่าความร้อนของการดูดซับที่ชั้นแรก

q_2 = ค่าความร้อนของแก๊สที่กลายมาเป็นของเหลวเพื่อเกิดการดูดซับบนชั้น

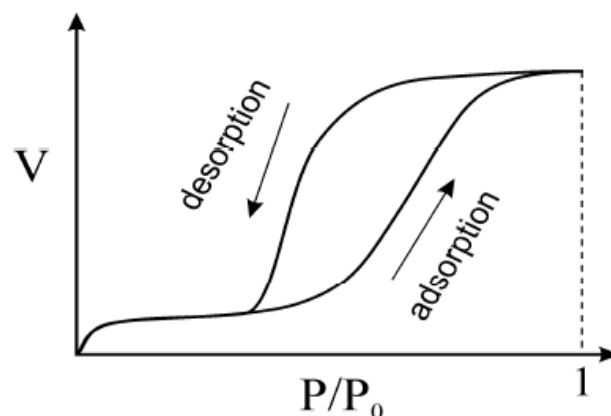
วิธีการทดลองจะทำให้ภาวะอุณหภูมิคงที่ โดยหาปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ภาวะความดัน (P) หรือ ความเข้มข้น (C) ที่แตกต่างกัน จะได้เป็นเส้นไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption

Isotherm) ขึ้นมา Brunauer ได้เสนอรูปแบบของเส้นไอโซเทอร์มในลักษณะการดูดซับต่างๆ ออกมา 5 แบบ ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 รูปแบบของเส้นไอโซเทอร์มในลักษณะการดูดซับต่างๆ ที่ถูกเสนอโดย Brunauer

โดยปกติจะใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับ เพราะราคาที่ถูก มีความบริสุทธิ์สูง สามารถดูดซับได้ง่ายและรวดเร็วเมื่อเทียบกับแก๊สชนิดอื่นๆ ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิจุดเดือด (-195.8°C) ในช่วงความดันหนึ่งต่ำกว่า 1 บรรยากาศ ปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ดูดซับจะถูกวัด โดยโมเลกุลของไนโตรเจนจะถูกดูดซับในลักษณะเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ แต่ค่าที่ต้องการเป็นค่าปริมาณการดูดซับเพียงชั้นเดียว ดังนั้นความดันไอย่อยที่ใช้ควรอยู่ในช่วง 10 – 100 kPa เพื่อให้ค่าของ P/P_0 จะได้อยู่ในช่วง 0.05 - 0.3 Brunauer ได้พบว่าแก๊สไนโตรเจนจะให้ลักษณะการดูดซับเป็นเส้นไอโซเทอร์มแบบ II (S-Shape Isotherm) ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 Adsorption Isotherm แบบที่ II

ลักษณะเส้นไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบที่ II หรือ Sigmoid หรือ S-Shape Isotherm ซึ่งจะพบในวัสดุที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดไม่ใหญ่ จุดโค้งหรือที่เรียกว่า Knee เป็นจุดที่แสดงว่าเกิดการเปลี่ยนจากการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ไปเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)

ปัญหาที่พบจากการใช้เทคนิค BET คือความไม่แน่นอนของผู้วัดและเครื่องมือที่ใช้ ซึ่งค่าความผิดพลาดในการวัดด้วยเครื่องเดียวกันจะต้องไม่เกิน 1% และค่าความผิดพลาดในการวัดด้วยเครื่องต่างเครื่องกันจะต้องไม่เกิน 3%

2. เทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) [2]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) จะใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกที่มุมต่างๆกันของสารตัวอย่าง ผลจากการวิเคราะห์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลเพื่อระบุวิภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง หลักการการวิเคราะห์คือวัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มี d หรือมีระยะห่างระหว่างระนาบ โดยค่าจะแตกต่างกันไปขึ้นกับธรรมชาติของผลึกนั้นๆ เงื่อนไขของการเลี้ยวเบนของรังสีเกิดเป็นดังสมการ 2.5 ที่เรียกว่า "Bragg's Equation"

$$\begin{aligned}
 &AB + BC = n\lambda \\
 \text{แต่ } &AB = BC = d \sin \theta \\
 \text{ดังนั้น } &d \sin \theta = n\lambda \qquad \dots\dots\dots 2.5
 \end{aligned}$$

- เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบมีหน่วยเป็นอังสตรอม (interplanar spacing, Å)
- λ คือ ความยาวคลื่นมีหน่วยเป็นอังสตรอม (wavelength, Å)
- θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบ
- n คือ จำนวนเต็ม

การที่สารมีสารประกอบหรือโครงสร้างที่แตกต่างกันทำให้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดในมุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้จึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ และนอกจากนั้นสามารถนำมาใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของสารนั้น ๆ ได้

3. เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry [25]

เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารที่นำมาทดสอบ ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และสารแขวนลอย โดยอาศัยหลักการเมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานจะส่งผลทำให้ชิ้นงานปล่อยโฟตอนออกมา เนื่องจากโฟตอนของธาตุชนิดต่างๆในชิ้นงานที่ถูกปล่อยออกมาจะมีความยาวคลื่น เฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นที่อยู่ในสารตัวอย่าง จึงนำข้อมูลนี้มาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่อยู่ในสารตัวอย่างได้

2.5 ปฏิกริยาการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอน [5,21]

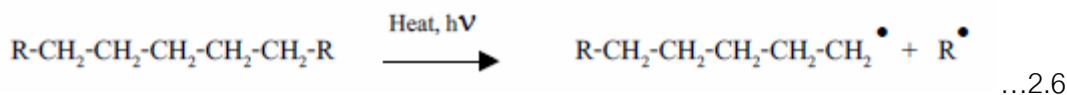
ปฏิกริยาการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

2.5.1 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (Thermal cracking)

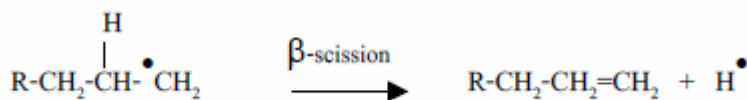
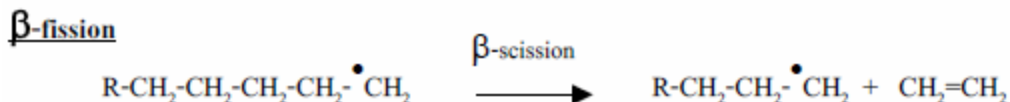
การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง หากมีการควบคุมให้เกิดการแตกตัวอย่างพอดี จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ เนื่องจากถ้าให้ความร้อนที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการแตกตัวได้เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในสถานะที่เป็นแก๊ส C_1-C_4 ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและนำมาใช้ประโยชน์ไม่ได้

กระบวนการแตกตัวโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อนประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ

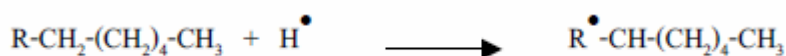
1. ขั้นเริ่มต้น (Initiation step) เป็นขั้นตอนที่เกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) โดยความร้อนจะไปทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขาดออกจากกันและเกิดเป็นอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระนี้เองจะไปทำปฏิกริยาในขั้นตอนต่อไป ดังสมการที่ 2.6



2. ขั้นการเกิดปฏิกริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation step) อนุมูลอิสระจากขั้นเริ่มต้นจะเข้าไปทำปฏิกริยาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไอโซเมอร์เกิดการเปลี่ยนรูปและแตกตัวไปเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง และเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระจากขั้นเริ่มต้นสามารถไปทำปฏิกริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นๆและเกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นได้เช่นกัน ซึ่งทำให้โมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนมีขนาดเล็กลงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังสมการที่ 2.7

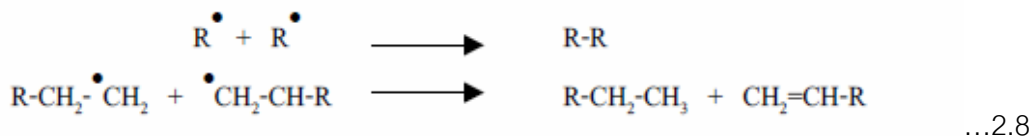


Chain transfer



...2.7

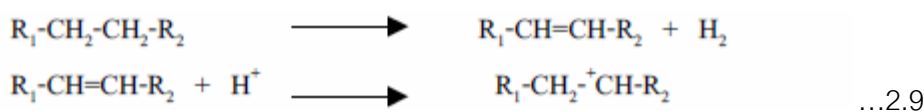
3. ขั้นสิ้นสุดหรือหยุดปฏิกิริยา (Termination step) อนุมูลอิสระจะทำหน้าที่ไปหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยจะไปทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น โดยอาจเกิดได้ทั้งที่เป็นโมเลกุลใหม่ โมเลกุลเดี่ยว หรือแตกไปเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ดังสมการที่ 2.8



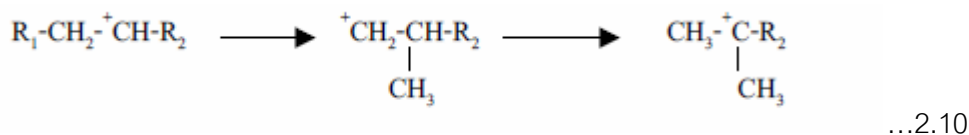
2.5.2 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

เป็นกระบวนการที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาใช้ร่วมในการเกิดปฏิกิริยา โดยจะช่วยในการแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงและมีโครงสร้างที่เหมาะสม คุณภาพของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้เหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ตามที่ต้องการ กลไกของการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีดังนี้

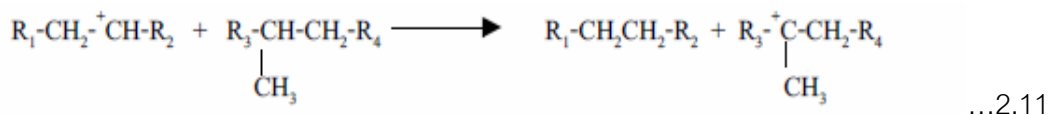
1. การเกิดไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) และการเกิดคาร์บอเนียมไอออน (Carbonium ion) โดยโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนจะเกิดการสูญเสียไฮโดรต์ไอออนที่มีประจุลบให้แก่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ส่งผลให้คาร์บอเนียมไอออนที่เกิดขึ้นมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอเนียมไอออนจะมีเสถียรภาพที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับโครงสร้างของไอออนซึ่ง tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากที่สุดและมากกว่า secondary ion และ primary ion ดังสมการที่ 2.9



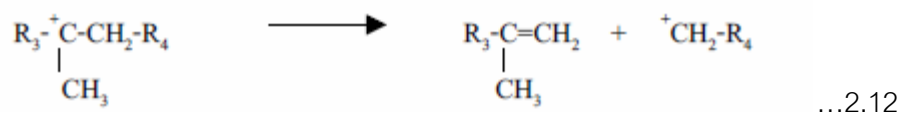
2. ปฏิกิริยาที่มีการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์โบเนียมไอออน ผลมาจากการที่โครงสร้างของคาร์โบเนียมไอออนมีความเสถียรที่แตกต่างกัน ดังสมการที่ 2.10



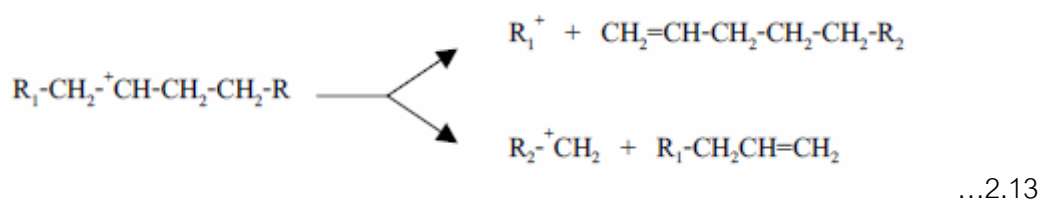
โดยการเคลื่อนย้ายไฮโดรต์ (hydride transfer) จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอเนียมไอออนกับโมเลกุลในสายไฮโดรคาร์บอน ดังสมการที่ 2.11



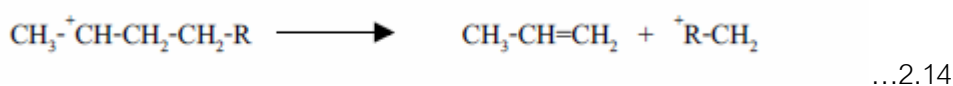
สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่สามารถเกิดเป็นปฏิกิริยา β -scission ได้ โดยจะเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่ง β ซึ่งจะได้เป็นสารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลงเป็น primary carbonium ion ดังสมการที่ 2.12



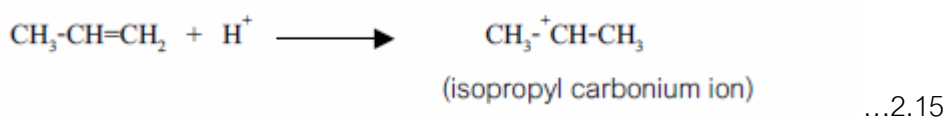
ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ในการเกิด secondary carbonium ion ดังสมการที่ 2.13



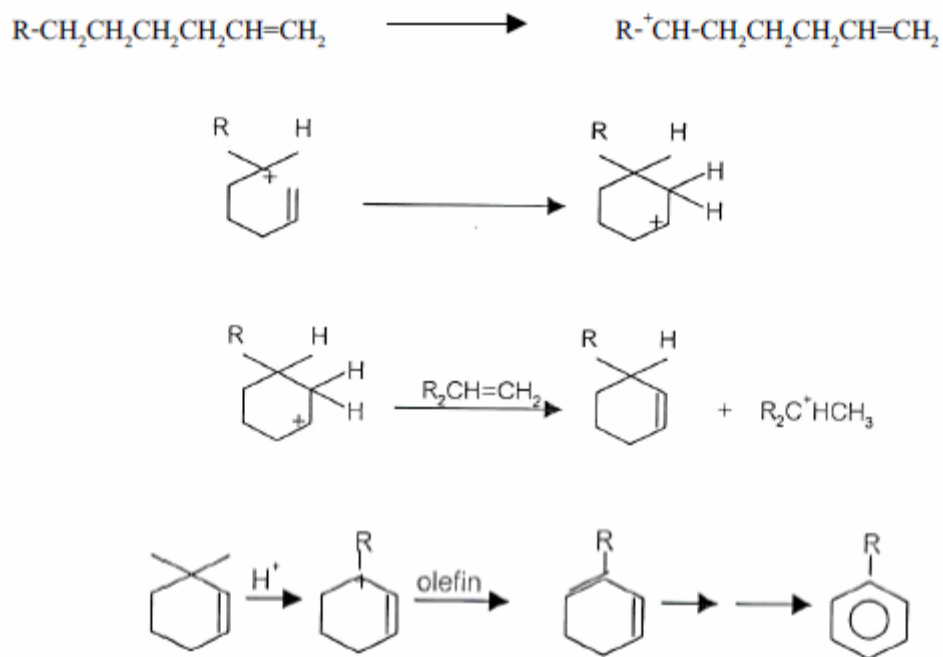
ถ้า R_1 เป็น H ในการเกิดผลิตภัณฑ์นั้นจะเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการที่ 2.14



ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ โพรพีน โดยจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและจะอยู่ในรูปของคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้ ดังสมการที่ 2.15



ผลิตภัณฑ์โพรเพนจะเกิดจากการเคลื่อนย้ายของไฮโดรด์ระหว่าง Isopropyl carbonium ion กับโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นๆ หรืออาจเกิดจากการสูญเสียโปรตอน ในปฏิกิริยา dehydrocyclization จะเกิดเป็นวงแหวนแอมโรแมติก เริ่มต้นจากโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออน แล้วเกิดปฏิกิริยา β -scission ได้เป็นสารประกอบ olefin carbonium ion ในลักษณะที่เป็นวงแหวน สารประกอบนี้จะเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน มีการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาได้เป็น allylic carbonium ion ที่มีความเสถียร จากนั้นจะรับโปรตอนจาก cyclohexadine สุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอมโรแมติก ดังสมการที่ 2.16



...2.16

จากการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบที่เป็นเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกแอมเตติกและโอเลฟินอยู่มาก องค์ประกอบที่เป็นน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กาก น้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) โดยโค้กจะเกาะติดบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดการอุดตันส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพลงโดยพื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

2.5.3 กระบวนการแตกโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking)

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่ใช้บทบาทในด้านของคุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาและไฮโดรเจนที่เติมลงไปทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมากซึ่งเป็นพวกพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนในโมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจนให้แก่ปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทำหน้าที่ทั้ง 2 อย่างได้พร้อมๆกันจึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นจะเริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นบริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดคาร์บอนเนียมไฮออนตรงตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่ตำแหน่งนี้เกิดการแตกตัว และมีการเติมไฮโดรเจนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อิ่มตัวในที่สุด นอกจากนั้นการเติมไฮโดรเจนบริเวณตำแหน่งที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยกำจัดโค้กซึ่งเป็นทำความสะอาดผิวของตัวเร่งปฏิกิริยานั่นเอง

กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิที่เกิดภายในเครื่องปฏิกรณ์จึงเป็นเรื่องสำคัญที่จำเป็นจะต้องมีการควบคุมเป็นอย่างดี เนื่องจาก

อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะทำให้เกิดโค้กในปริมาณที่มาก เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา เครื่องปฏิกรณ์เกิดความเสียหายและผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็ไม่เป็นตามที่ต้องการ

2.6 การเกิดโค้ก (Coking) [7, 18]

โค้ก (coke) เป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอนกับไฮโดรเจน โดยมีอัตราส่วนอะตอมไฮโดรเจนต่ออะตอมคาร์บอนจะน้อยกว่า 1 โค้กที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะมีไฮโดรเจนที่ปริมาณที่สูง แต่เมื่อทำปฏิกิริยายาวนานขึ้นปริมาณของไฮโดรเจนจะลดลง การเกิดโค้กพบได้ในปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น dehydrogenation isomerization reforming catalytic cracking หรือปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารอินทรีย์ เป็นต้น สารประกอบแอโรแมติกที่มีวงแหวนหลายวง (polynuclear aromatics) โอลิฟิน (olefins) และพอลิโอเลฟิน (polyolefins) จะก่อให้เกิดโค้กในปริมาณที่มากกว่าสารประกอบพวกแนฟทีน (naphthenes) และพาราฟิน (parafins) อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดโค้กไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่เป็นที่ยอมรับกันว่าเริ่มจากการที่สารตั้งต้นถูกดึงไฮโดรเจนออกไปเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวจะเกิดการรวมตัวกันเป็นพอลิแอโรแมติก

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kim, S.S., Chun, B.H., Kim, S.H. [13] ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) ของน้ำมันหล่อลื่นสำหรับยานยนต์ที่ใช้แล้วด้วย thermogravimetric analysis (TGA) โดยในการศึกษานั้นจะให้อัตราความร้อนที่ 0.50 1.00 และ 2.00 องศาเซลเซียส ต่อนาทีในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีการหมุนวน พบว่าน้ำมันหล่อลื่นส่วนใหญ่แตกตัวที่อุณหภูมิระหว่าง 400 ถึง 460 องศาเซลเซียส ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาคือพลังงานกระตุ้น ซึ่งพลังงานกระตุ้นนี้จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามการดำเนินไปของการสลายตัวทางความร้อน

Y.S. Prasad [14] ศึกษาการเปลี่ยนแปลง canola oil ให้ได้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงโดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ fixed bed ขนาดเล็ก พบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิเวลามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ canola oil ไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง และการใช้วิธีทางสถิติช่วยในการออกแบบการทดลองซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเหลวร้อยละ 60 ถึง 95 โดยน้ำหนัก

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้จะอยู่ในช่วงจุดเดือดของแก๊สโซลีน น้ำมันชนิดเบาและน้ำ ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง

กมลวรรณ กิ่งพุทธพงษ์และคณะ [20] ศึกษาถึงการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียม HMS โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของน้ำมันหล่อลื่นต่อตัวเร่งปฏิกิริยา คือ 10:1 เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 30 45 60 และ 120 นาที ตามลำดับ พบว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามากขึ้นส่งผลให้ร้อยละการเกิดผลิตภัณฑ์ของเหลว และแก๊สมีปริมาณที่เพิ่มสูงขึ้นและส่วนผลิตภัณฑ์หรือองค์ประกอบอื่นๆที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา และเมื่อมีการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาไปร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียม HMS พบว่าความแตกต่างของปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเพียงเล็กน้อย

จินตนา สุมารินทร์ [21] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ โดยปฏิกิริยาดำเนินไปภายใต้อุณหภูมิที่ 390-450 องศาเซลเซียส อัตราเร็วการไหลเข้าของสาร 0.34 - 3.30 กรัมต่อนาที ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เติมลงไป 3 - 10 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.1 - 1.0 โดยน้ำหนัก พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 430 - 450 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 2.77 กรัมต่อนาที ปริมาณไฮโดรเจนเริ่มต้นที่เติมลงไป 10 มิลลิลิตรต่อนาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันร้อยละ 57.21 - 57.36 โดยน้ำหนัก

วิชชากร จารุศิริ [25] ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของกลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตเอสเตอร์เพื่อให้ได้เป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ใช้อุณหภูมิที่ 400 - 600 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนของสารตั้งต้น 1.23- 9.45 กรัมต่อนาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ออกซิเจนเกิดการแตกตัวและเปลี่ยนไปเป็นของเหลวได้สูงสุดถึงร้อยละ 95.85 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนของสารตั้งต้น 3.30 กรัมต่อนาที ซึ่งเมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพบว่าให้เป็นแก๊สโซลีนสูงที่สุดคือร้อยละ 35.85 โดยน้ำหนัก เคนซีน ร้อยละ 10.68 โดยน้ำหนัก แก๊สเอทิลร้อยละ 29.29 โดยน้ำหนัก และกากน้ำมันร้อยละ 24.28 โดยน้ำหนัก

อราดา วงศ์ศุภลักษณ์ [23] ศึกษาการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al₂O₃ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 75 มิลลิลิตร โดยมีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการทดลอง 350-400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60-180 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร้อยละ 0.1-1 โดยน้ำหนัก เหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al₂O₃ ร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วที่ให้ปริมาณค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุดเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด HZSM-5 คือที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 88.3 โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์จะได้ภาวะเหมาะสมที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 370 องศาเซลเซียสเวลา 120 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 88.7 โดยน้ำหนักและเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิด Co-Mo/Al₂O₃ พบว่าภาวะเหมาะสมคือที่อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 370 องศาเซลเซียสเวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 91.2 โดยน้ำหนัก

อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล [29] ศึกษาการเปลี่ยนของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิตินัมบนอะลูมินา และ HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กรูปทรงกระบอก โดยใช้ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นในช่วง 5 - 10 บาร์ อุณหภูมิในการทำการทดลอง 375 - 425 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 - 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์ และโมลิตินัมบนอะลูมินาอยู่ในช่วงร้อยละ 1.00 ถึง 5.00 โดยน้ำหนัก และ HZSM-5 อยู่ในช่วงร้อยละ 0.10 - 10.00 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนน้ำมันหล่อลื่นได้แก่ อุณหภูมิในการทดลอง ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยเมื่อเพิ่มปัจจัยทั้งสามจะพบว่าแก๊สผลิตภัณฑ์ แก๊สไฮลีน เคโรซีน และแก๊สออกซิลเบามีปริมาณที่เพิ่มขึ้น โดยภาวะที่ให้แก๊สไฮลีนสูงสุดคือที่อุณหภูมิในการทดลอง 425 องศาเซลเซียส ความดัน 5 บาร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โคบอลต์และโมลิตินัมบนอะลูมินาร้อยละ 5.00 โดยน้ำหนัก และ HZSM-5 ร้อยละ 1.00 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้นยังพบว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ปริมาณร้อยละผลได้ของแก๊สไฮลีนสูงสุด

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Micro-reactor) มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก สามารถบรรจุปริมาตรได้ 250 มิลลิลิตร สร้างจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 ด้านบนมีฝาปิดที่ทำจากสแตนเลสซึ่งถูกต่อด้วยชุดอุปกรณ์สำหรับการอัดแก๊สและวาล์วนิรภัย เครื่องปฏิกรณ์นี้สามารถทนความร้อนภายใต้ภาวะการทดลองที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคาล โดยในระหว่างการทดลองจะมีการใส่เทอร์โมคัปเปิลทางด้านบนเพื่อตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ แสดงดังภาพที่ 3.1



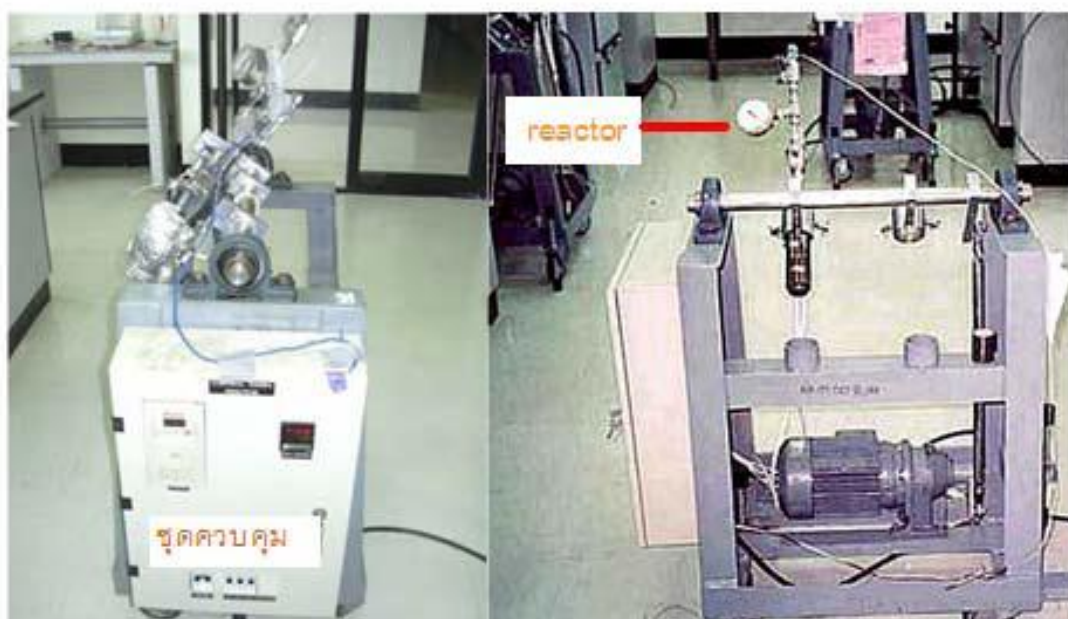
ภาพที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร (Micro-reactor)

2. ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ชุดอุปกรณ์นี้จะทำงานเป็นระบบดิจิทัล ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ส่งไปยังเครื่องปฏิกรณ์ โดยกระแสไฟฟ้าที่ออกจากหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังขดลวดความร้อนและตัวจ่ายกระแสตามค่าของอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ ความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิของชุดอุปกรณ์นี้อยู่ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส

3. ขดลวดความร้อนที่ใช้ให้ความร้อนแก่เครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบ Injection โดยมีแรงดัน 230 โวลต์ และมีกำลัง 400 วัตต์

4. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดอุณหภูมิระหว่างการทดลอง ภายในเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นแบบเค (K-type) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

5. ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ให้เครื่องปฏิกรณ์สามารถเกิดการแกว่งได้ โดยจะมีมอเตอร์สร้างกำลังในการขับเคลื่อนแกนหมุน นอกจากนี้ยังสามารถปรับความเร็วรอบของการแกว่งได้ ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์สำหรับควบคุมอุณหภูมิและการแกว่ง

6. ชุดกรองสูญญากาศสำหรับในขั้นตอนการแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วที่ต่อเข้ากับเครื่องดูดอากาศ ในการแยกนั้นทำผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ

7. เครื่องสำหรับชั่งน้ำหนักละเอียด (ทศนิยม 2 ตำแหน่ง)
8. เครื่องสำหรับชั่งน้ำหนักละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
9. นาฬิกาจับเวลา
10. ตู้อบความร้อน
11. โถแก้วดูดความชื้น (Desiccator)
12. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) ที่มีซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 พร้อมด้วยเครื่องตรวจวิเคราะห์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ตามจุดเดือดที่ อุณหภูมิต่างๆ ตามมาตรฐาน ASTM D2887 [49] แสดงดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น
(Simulated Distillation Gas Chromatography: Varian CP-3800)

13. เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

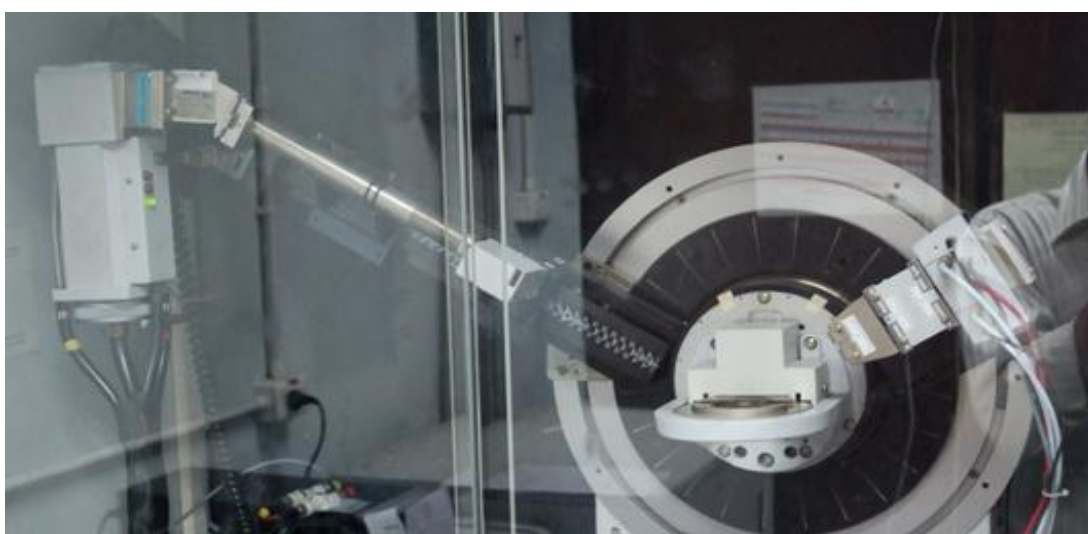
เทคนิค XRF อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานจะส่งผลทำให้ชิ้นงานปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอนของธาตุชนิดต่างๆในชิ้นงานที่ถูกปล่อยออกมาจะมีความยาวคลื่น เฉพาะของธาตุนั้นๆ จึงสามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นที่อยู่ในสารตัวอย่าง จึงนำข้อมูลนี้มาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดที่อยู่ในสารตัวอย่างได้ แสดงดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

14. เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

เทคนิค XRD อาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึกที่มีมุมต่างๆกันของสารตัวอย่าง ผลจากการวิเคราะห์จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลเพื่อระบุวิวัฒนาการองค์ประกอบของสารตัวอย่าง และการที่สารมีสารประกอบหรือโครงสร้างที่แตกต่างกันทำให้การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เกิดในมุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้จึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้และนอกจากนั้นสามารถนำมาใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของสารนั้น ๆ ได้ แสดงดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

15. เครื่องหาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area)

การวัดพื้นที่ผิวด้วยเทคนิค BET ทำได้โดยวัดปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (absorb) ลงบนผิวสารตัวอย่าง แล้วนำมาเข้าสู่ตรรกศาสตร์ของ BET เพื่อคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) แสดงดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 เครื่องหาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (BET surface area)

16. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer

Fourier Transform Infrared (FT-IR) Spectroscopy เป็นเครื่องที่ใช้เทคนิคทางด้าน Infrared Spectroscopic มีประสิทธิภาพในการจำแนกประเภทของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และพันธะเคมีในโมเลกุล รวมถึงสามารถบ่งบอกถึงปริมาณองค์ประกอบและใช้วิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ แสดงดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 เครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer)

17. เครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry

Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) เป็นเครื่องที่สามารถใช้ทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีในผลิตภัณฑ์น้ำมันได้อย่างค่อนข้างแม่นยำ โดยอาศัยการเปรียบเทียบ Fingerprint ของเลขมวล (Mass number) ขององค์ประกอบนั้นๆ ที่ตรวจวัดได้กับข้อมูลที่มีอยู่ใน Library นอกจากนี้ยังสามารถใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพได้ แสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 เครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) รุ่น A SHIMADZU
GC-MS QP2010

18. เครื่อง Chemisorption Analyzer

Chemisorption Analyzer ใช้หลักการการดูดซับทางเคมี (chemisorption) และการคาย (desorption) ระหว่าง probe molecules ของ NH_3 กับตำแหน่งที่ว่างไว (active sites) บนพื้นผิวหรือรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา และใช้โปรแกรมไว้คือ temperature-programmed desorption (TPD) เพื่อวิเคราะห์หาค่าความแรงของตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเครื่องนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพจะได้ข้อมูลเป็นชนิดของตำแหน่งที่ว่างไว และในเชิงปริมาณจะได้ข้อมูลเป็นปริมาณของตำแหน่งที่ว่างไวในแต่ละชนิด แสดงดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 เครื่อง Chemisorption Analyzer รุ่น Micromeritics AutoChem II 2920

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

1. น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว
2. Toluene (Commercial grade ที่มีความบริสุทธิ์ 80%)
3. แก๊สไฮโดรเจน 99.99% (บริษัท TIG Trading จำกัด)
4. ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

3.3 การดำเนินการวิจัย

1. วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีในเชิงคุณภาพและปริมาณของสารตั้งต้นที่ใช้ก่อนการทดลอง

2. หาตัวแปรต่างๆที่จะทำมาศึกษาถึงอิทธิพลที่มีผลต่องานวิจัยก่อนการทดลอง โดยในการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆดังนี้

1. ศึกษาหาช่วงภาวะของตัวแปรต่างๆที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการทดลอง

2. ศึกษาหาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆจากการทดลอง

โดยในงานวิจัยการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจะออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2^4 Factorial experimental design) ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันแก๊สไฮโดรเจน ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษากการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตัวแปร		ระดับ		หน่วย
		ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)	
A=	อุณหภูมิ	410	450	องศาเซลเซียส
B=	เวลา	30	60	นาที
C=	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1	5	ร้อยละโดยน้ำหนัก
D=	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	5	บาร์

3. ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลผลิตภัณฑ์ที่ได้และการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน ซึ่งได้แก่ เป็นแนฟทา (Naphtha) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light gas oil) แก๊สออยล์ (Gas oil) และกากน้ำมันหนัก (Long residue) ตาม ASTM D2887

- ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อปฏิกิริยาดังนี้ 410, 430 และ 450 องศาเซลเซียส
- ศึกษาเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาดังนี้ 30, 45 และ 60 นาที
- ศึกษาผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วดังนี้ 1, 3, 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา
- ศึกษาผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีผลต่อปฏิกิริยาดังนี้ 1, 3 และ 5 บาร์ และไม่เติมความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

การทดลอง	ตัวแปร			
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)
1.1	450	60	5	5
1.2				
2.1	450	60	5	1
2.2				
3.1	450	60	1	5
3.2				
4.1	450	60	1	1
4.2				
5.1	450	30	5	5
5.2				
6.1	450	30	5	1
6.2				
7.1	450	30	1	5
7.2				
8.1	450	30	1	1
8.2				
9.1	410	60	5	5
9.2				
10.1	410	60	5	1
10.2				

การทดลอง	ตัวแปร			
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)
10.1	410	60	5	1
10.2				
11.1	410	60	1	5
11.2				
12.1	410	60	1	1
12.2				
13.1	410	30	5	5
13.2				
14.1	410	30	5	1
14.2				
15.1	410	30	1	5
15.2				
16.1	410	30	1	1
16.2				
17.1	430	45	3	3
17.2				
17.3				

4. นำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและทางเคมีในเชิงคุณภาพและปริมาณตามที่ต้องการศึกษา

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมวัสดุดิบและสารตั้งต้น

1. วิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วก่อนการทดลองด้วยเครื่อง DGC (Simulated Distillation Gas Chromatography)
2. วิเคราะห์หาองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีที่ใช้แล้วก่อนการทดลองด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (Surface Area) โดยใช้เทคนิค BET และวิเคราะห์ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเทคนิค NH_3 -TDP
3. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง
4. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วหลังการเผาไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) วิเคราะห์หาพื้นที่ผิว (Surface Area) โดยใช้เทคนิค BET และวิเคราะห์ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเทคนิค NH_3 -TDP เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วก่อนการเผา

3.4.2 ขั้นตอนทำการทดลอง

1. นำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว 20 กรัมและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีในปริมาณตามที่ต้องการใส่ในเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนต่างๆให้เรียบร้อย
2. ไล่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นอัดแก๊สไฮโดรเจนตามความดันที่ต้องการ โดยสามารถนำน้ำสบู่มาทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์
3. ต่อเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิลและอุปกรณ์ขดลวดความร้อน หลังจากนั้นทำการหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างทำการทดลอง
4. ทำการทดลองตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้วนำฉนวนและขดลวดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง แล้วนำเทอร์โมคัปเปิลออก
5. ไล่แก๊สออกจากเครื่องปฏิกรณ์โดยทำการเก็บแก๊สไว้ในถุงเก็บแก๊สเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบภายในด้วยเครื่อง MicroGC3000 gas chromatograph
6. แยกผลิตภัณฑ์น้ำมันออกจากกากของแข็งด้วยการกรองแบบสุญญากาศ
7. นำผลิตภัณฑ์น้ำมันและกากของแข็งที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก

8. ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography หาค่าการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ และวิเคราะห์องค์ประกอบที่เกิดขึ้นภายในผลิตภัณฑ์

9. คำนวณร้อยละการเปลี่ยนของสารตั้งต้น

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนเป็นน้ำมัน (\% conversion)} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้น} \times 100}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้นที่เริ่มต้น}}$$

ร้อยละการเปลี่ยนไปเป็นเนฟทา = % ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ x % off ของร้อยละผลได้เนฟทา

10. นำผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) รุ่น A SHIMADZU GC-MS QP2010 เพื่อหาค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบที่อยู่ในผลิตภัณฑ์

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเพื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวต่อไปได้ ในการทดลองจะศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันด้านสมบัติทางกายภาพและเคมีทั้งในเชิงปริมาณและในเชิงคุณภาพ ตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนนี้ได้แก่ อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น ตลอดจนศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรดังกล่าวที่มีผลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ของน้ำมันและแก๊สอีกด้วย

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

4.1.1 องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

1. วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเครื่อง Simulated distillation gas chromatograph ผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว

Composition	%Recovered
Naphtha	0
Kerosene	0.47
Light gas oil	3.85
Heavy gas oil	8.72
Long residue	86.96

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ดังตารางที่ 4.1 พบว่ามีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกากน้ำมันหนักหรือ long residue โดยมีมากถึงร้อยละ 86.96 โดยน้ำหนัก ทำให้เห็น

ได้นำน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่ทำมาใช้ทดลองมีสารที่เป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่และไม่พบปริมาณองค์ประกอบที่เป็นแอฟทาเลย

4.1.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

1. วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิค XRF

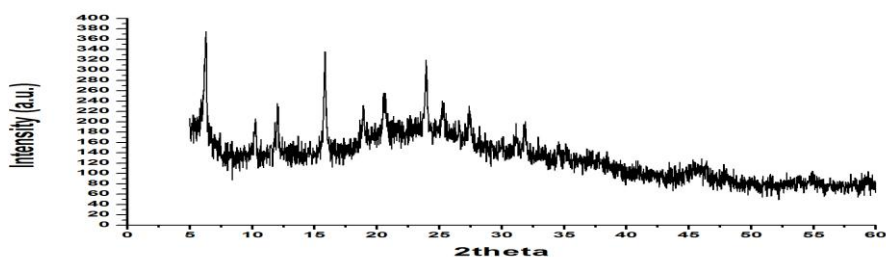
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว		ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Na	0.58	Na	0.31
Al	42.07	Al	40.3
Si	40.13	Si	42.03
P	0.12	P	0.2
S	0.3	S	0.49
K	0.32	K	0.24
Ca	0.4	Ca	0.37
Ti	2.67	Ti	3.08
V	0.34	V	0.34
Mn	0.2	Mn	0.19
Fe	3.12	Fe	3.29
Ni	1.65	Ni	1.27
Cu	0.08	Cu	0.11

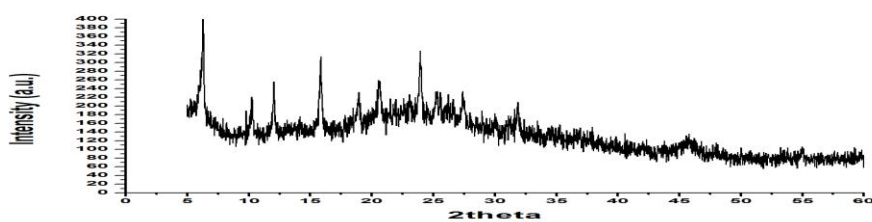
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว		ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส	
ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
Zn	0.07	Zn	0.07
La	6.29	La	7.06
Ge	0.49	Ge	0.64
Ga	0.04	Ga	0.02

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าในตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา มีปริมาณธาตุ Si และ Al ที่มาก จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเหตุนี้เองจึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา มาวิเคราะห์ต่อด้วยเทคนิค XRD เพื่อหาว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยานี้เป็นซีโอไลต์ชนิดใด

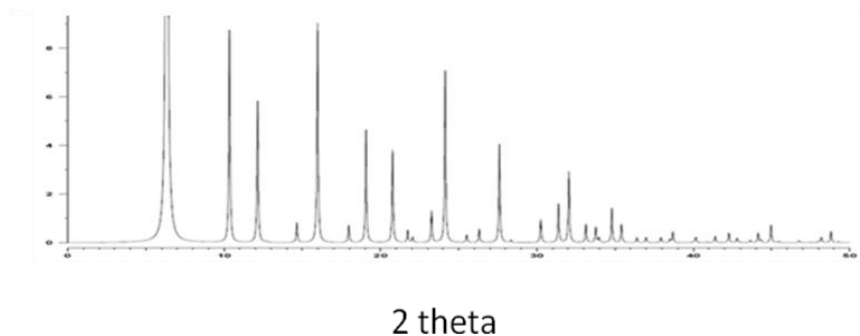
2. วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิค XRD



ภาพที่ 4.1 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก่อนการเผา



ภาพที่ 4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4.3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็น XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับพบว่าลักษณะของ peak ที่ปรากฏในภาพทั้ง 2 มีความใกล้เคียงกับ XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาในภาพที่ 4.3 ซึ่งคือ Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated จึงทำให้สามารถระบุได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วนั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภท USY

3. วิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผาด้วยเทคนิค BET

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก่อนและหลังการเผา

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (S_{BET}) ตารางเมตร/กรัม	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore Size) นาโนเมตร	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว	79.84	6.92	0.13
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว เผาที่อุณหภูมิ 550 °C	103.65	8.89	0.15

จากพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (surface area) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะทำให้พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมดสูงขึ้น เนื่องจากการเผาเป็นการกำจัดไค้และสารปนเปื้อนบางส่วนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาแล้วไปติดค้างบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนั้นการนำไปเผายังส่งผลทำให้อัตราส่วนของสารประกอบระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงขึ้น เนื่องจากอะตอมของซิลิกอนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่อะตอมของอะลูมิเนียมที่หลุดออกไป ด้วยเหตุนี้เองความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์จึงเพิ่มสูงขึ้นและมีโครงสร้างที่คงทนต่อความร้อนมากขึ้น ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่เพิ่มขึ้นนั้นสามารถยืนยันได้จากตารางที่ 4.4

4. วิเคราะห์ความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา โดยใช้เทคนิค NH_3 -TDP

ตารางที่ 4.4 แสดงความแรงของตำแหน่งกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทั้งก่อนและหลังการเผา

ตัวเร่งปฏิกิริยา	ความแรงของตำแหน่งกรด (mmol H^+ /g)
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	0.22
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เผาที่อุณหภูมิ 550 °C	0.36

4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยนี้มีขึ้นเพื่อศึกษากลไกของกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและหาภาวะที่ดีที่สุดในการเกิดผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วในภาวะของตัวแปรที่ต่าง ๆ กัน ผลของตัวแปรต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือและเทคนิคต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ โดยคำนวณหาร้อยละของการเกิดผลิตภัณฑ์ นำผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สไปทำการวิเคราะห์เพื่อหา

องค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมัน ซึ่งข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆ คือ

- ศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว
- ศึกษาผลของการกระจายตัวขององค์ประกอบแนฟทา (Naphtha) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light gas oil) แก๊สออยล์ (Gas oil) และกากน้ำมันหนัก (Long residue) ในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการวิเคราะห์ตาม ASTM D2887
- ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบต่างๆที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมัน
- ศึกษาผลของการกระจายตัวขององค์ประกอบ C_1-C_4 ในผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้
- ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ในกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว
- ศึกษาสารประกอบที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

4.3 การกำหนดภาวะที่ใช้ในการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ภาวะที่เลือกใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิในการทำการทดลอง 410–450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30–60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ใช้ 1-5 บาร์ การเลือกช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไปนั้น เนื่องจากขั้นแรกได้ทำการทดลองทำการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ยังมีความหนืดที่สูงและเกิดเป็นแว็กซ์ จึงทำการทดลองที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นคือ ตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไปพบว่าไม่เกิดปัญหาดังกล่าว แต่เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 450 องศาเซลเซียสพบว่าจะทำให้เกิดการแยกสลายไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่มากซึ่งไม่ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการและเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน การเลือกระยะเวลาของการทำ

ปฏิกิริยาในช่วง 30-60 นาที เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของผลที่เกิดขึ้นจากการทดลอง โดยได้ทำปฏิกิริยาในระยะเวลาที่มากกว่า 60 นาทีพบว่าจะทำให้เกิดการแยกสลายไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่มากเกินไป การเลือกปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาช่วงปริมาณร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีสมบัติการเลือกจำเพาะสูง ทำให้สามารถเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีองค์ประกอบตามต้องการได้ และมีบทบาทในการช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการแยกสลายได้รวดเร็วขึ้น แต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยามีตำแหน่งว่องไวในปริมาณที่มาก และสำหรับการเลือกเอพซีซีที่ใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากในโรงกลั่นน้ำมันทั่วไปจะใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเพื่อเปลี่ยนเนฟทาให้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโอเลฟิน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจึงเกิดการเสื่อมสภาพ โดยสูญเสียความว่องไวและการเลือกจำเพาะเจาะจงซึ่งเป็นผลมาจากสิ่งเจือปน ผุ่นผงหรือพวกคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยามาเกาะหรือไปอุดตันที่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา จึงทำให้ความสามารถในการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการในงานวิจัยที่ต้องการให้เกิดแก๊สน้อยแต่ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันหรือของเหลวที่มาก ด้วยเหตุนี้จึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมาใช้ในการวิจัย โดยนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วไปฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อนหรือนำไปเผา ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด ขนาดรูพรุนเฉลี่ย ปริมาตรรูพรุนและความแรงของตำแหน่งที่เป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นดังผลในตารางที่ 4.3 และ 4.4 และการเลือกช่วงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ เนื่องจากถ้าเติมแก๊สไฮโดรเจนมากและเมื่อรวมกับแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระบบทำให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์มีความดันแก๊สสูง ส่งผลทำให้อาจเกิดแก๊สรั่วได้ ดังนั้นในการทดลองจึงต้องกำหนดช่วงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นให้อยู่ในขอบเขตที่จำกัด

4.4 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจากโปรแกรม Design-Expert

การศึกษาปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วได้ออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลเป็นแบบ 2^4 แฟกทอเรียล และมีการทำการทดลองซ้ำแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วงร้อยละ 62.87 – 78.71 โดยน้ำหนัก และจากภาพที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ อุณหภูมิในการทดลอง เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแสดงว่าตัวแปรต่างๆเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์

ความแปรปรวน (Analysis of variance) พบว่า คุณหมุมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเช่นเดียวกัน เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert บ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าปัจจัยต่างๆ ได้แก่ คุณหมุมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นปัจจัยหลักในการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ยังสามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันกับปัจจัยดังกล่าว เพื่อใช้ในการทำนายค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันได้อีกด้วยดังนี้

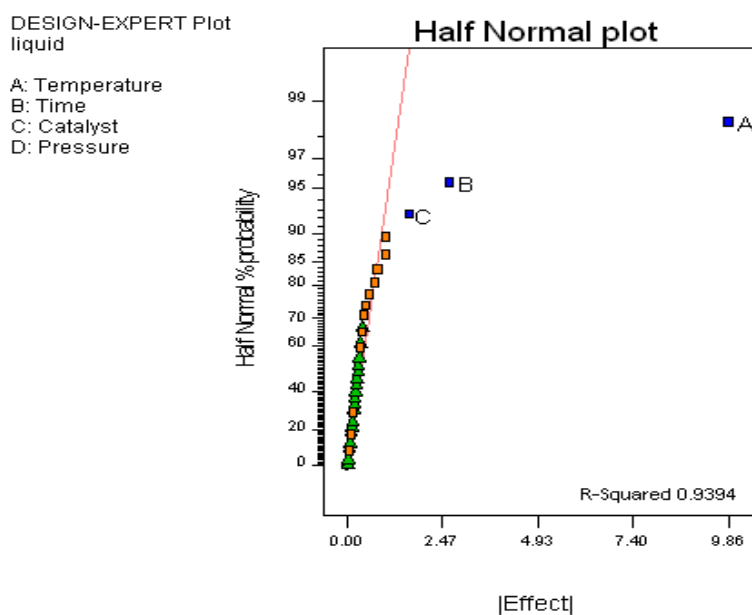
$$\% \text{ ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้} = 182.71781 - 0.24655A - 0.089021B - 0.40172C$$

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^4 factorial design)

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน
	คุณหมุมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์)	
1.1	450	60	5	5	62.87
1.2					64.13
2.1	450	60	5	1	63.02
2.2					64.32
3.1	450	60	1	5	68.87
3.2					68.23
4.1	450	60	1	1	64.15
4.2					65.58
5.1	450	30	5	5	66.16
5.2					66.71

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์)	
6.1	450	30	5	1	68.9
6.2					67.56
7.1	450	30	1	5	67.66
7.2					66.93
8.1	450	30	1	1	70.98
8.2					68.9
9.1	410	60	5	5	72.99
9.2					74.83
10.1	410	60	5	1	74.04
10.2					76.68
11.1	410	60	1	5	77.76
11.2					74.29
12.1	410	60	1	1	75.87
12.2					74.87
13.1	410	30	5	5	76.7
13.2					77.01
14.1	410	30	5	1	78.38
14.2					76.71
15.1	410	30	1	5	78.71
15.2					77.41

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์ น้ำมัน
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์)	
16.1	410	30	1	1	78.62
16.2					77.89
17.1	430	45	3	3	69.45
17.2					71.04
17.3					70.43

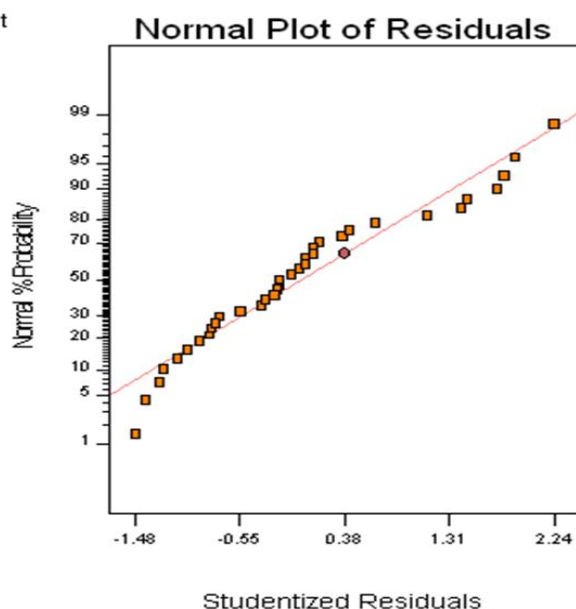


ภาพที่ 4.4 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาการ
แยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณณ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

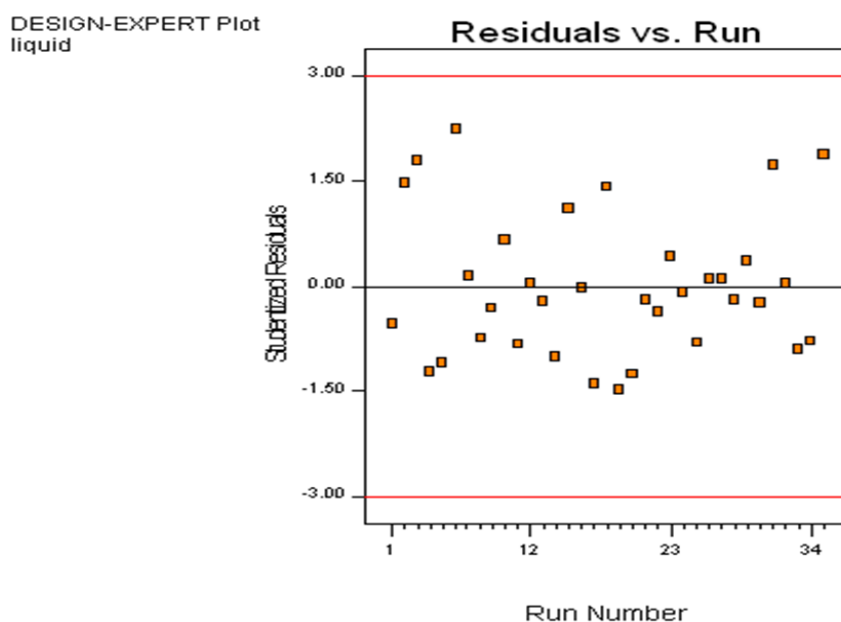
Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F Value
Model	855.77	3	285.26	155.05	<0.0001
A	788.05	1	788.05	422.91	<0.0001
B	57.06	1	57.06	31.01	<0.0001
C	20.66	1	20.66	11.23	0.0022
Curvature	3.85	1	3.85	2.09	0.1583
Residual	55.19	30	1.84		
Total	914.81	34			

DESIGN-EXPERT Plot
liquid



ภาพที่ 4.5 Normal Plot of Residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณณ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

นำผลที่ได้จากการทดลองมาตรวจสอบความถูกต้องของภาพแบบเพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลในการทดลองมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ โดยแสดงเป็น Normal Plot of Residuals ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าค่า Residuals สำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงจึงทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติจริง



ภาพที่ 4.6 Residuals vs. Run ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิบัติการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

จากภาพแสดงค่า residuals กับ run หรือลำดับการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของผลการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาพแบบการกระจายตัวของค่า residuals ที่สัมพันธ์กับลำดับของการทำการทดลองของชุดการทดลองทั้งหมดเป็นการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งแสดงว่ากระบวนการทำการทดลองเป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ทำให้ค่าผิดพลาดต่างๆที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้กระจายตัวเข้าถึงทุกหน่วยของการทดลองอย่างเท่าเทียมกัน

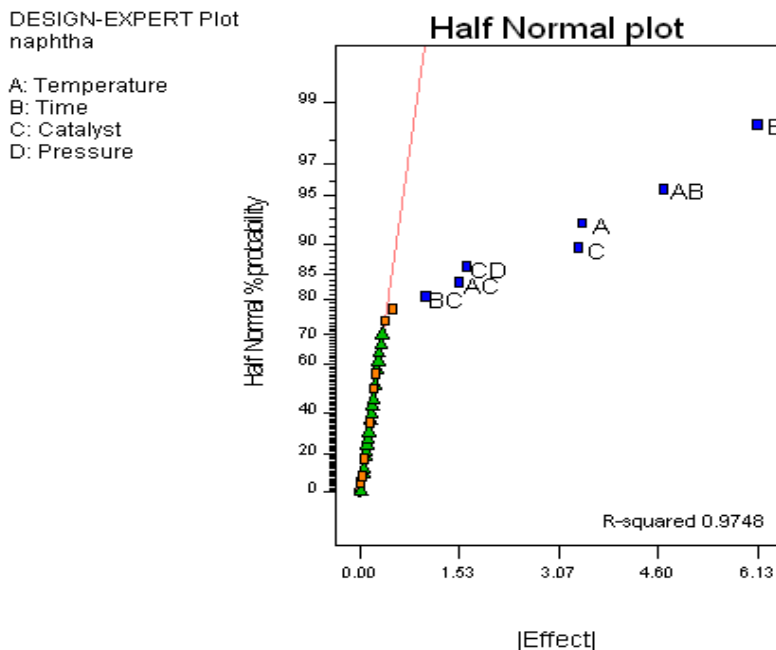
ตารางที่ 4.7 ร้อยละผลได้ขององค์ประกอบแนฟทาจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^4 factorial design)

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ แนฟทา
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์)	
1.1	450	60	5	5	32.17
1.2					33.84
2.1	450	60	5	1	34.8
2.2					34.89
3.1	450	60	1	5	37.92
3.2					35.76
4.1	450	60	1	1	36.96
4.2					36.45
5.1	450	30	5	5	36.21
5.2					34.12
6.1	450	30	5	1	35.87
6.2					37.2
7.1	450	30	1	5	38.17
7.2					37.72
8.1	450	30	1	1	37.04
8.2					35.89
9.1	410	60	5	5	22.77
9.2					23.27
10.1	410	60	5	1	25.84
10.2					24.95

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ แนฟทา
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (นาที)	ปริมาณตัวเร่ง ปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดย น้ำหนัก)	ความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น (บาร์)	
11.1	410	60	1	5	30.67
11.2					32.18
12.1	410	60	1	1	28.91
12.2					28.95
13.1	410	30	5	5	35.83
13.2					35.18
14.1	410	30	5	1	36.88
14.2					36.43
15.1	410	30	1	5	41.32
15.2					40.25
16.1	410	30	1	1	39.14
16.2					39.24
17.1	430	45	3	3	36.73
17.2					34.02
17.3					35.98

การศึกษาปฏิบัติการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เอพซีซีใช้แล้วได้ออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลเป็นแบบ 2^4 แฟกทอเรียล และมีการทำการทดลองซ้ำ แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทาอยู่ในช่วงร้อยละ 22.77 – 41.32 โดยน้ำหนัก และจากภาพที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ นำมาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ อุณหภูมิในการทดลอง เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างเวลากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ซึ่งแสดงว่า ตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา นอกจากนี้เมื่อพิจารณา ตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) พบว่า อุณหภูมิในการทดลอง เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างเวลากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของการเกิดแนฟทาพบเช่นเดียวกัน เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แนฟทา ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่าปัจจัยต่างๆได้แก่ อุณหภูมิในการทดลอง เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างเวลากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นปัจจัยหลักในการเกิดแนฟทาอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังสามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ของค่าร้อยละผลได้ของแนฟทากับปัจจัยดังกล่าว เพื่อใช้ในการทำนายค่าร้อยละผลได้ของน้ำมันได้อีกด้วยดังนี้

$$\% \text{ ผลได้ของแนฟทา} = 34.34 + 1.73A + 3.07B + 1.70C - 2.35AB - 0.77AC - 0.51BC - 0.84CD$$



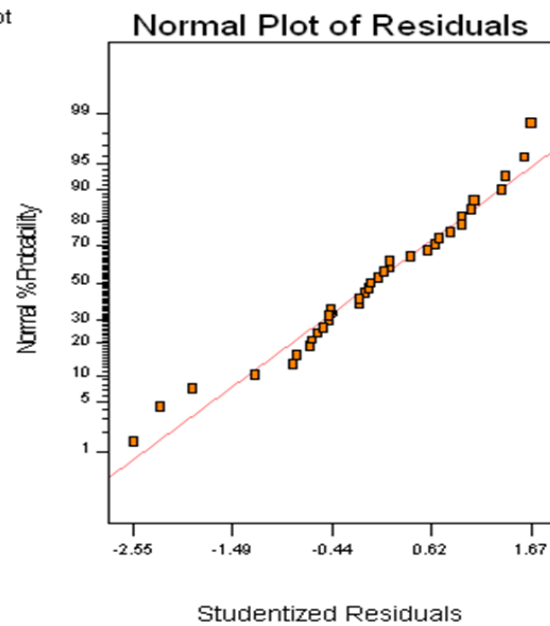
ภาพที่ 4.7 Normal Probability Plot ของร้อยละผลได้องค์ประกอบเนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.8 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F Value
Model	705.02	7	100.72	144.03	<0.0001
A	88.45	1	88.45	126.48	<0.0001
B	288.96	1	288.96	413.21	<0.0001
C	99.12	1	99.12	141.75	<0.0001
AB	186.73	1	186.73	267.02	<0.0001

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F Value
AC	16.10	1	16.10	23.03	<0.0001
BC	6.32	1	6.32	9.04	0.0058
CD	19.34	1	19.34	27.66	<0.0001
Curvature	4.64	1	4.64	6.64	0.0168
Residual	18.18	26	0.70		
Total	727.85	34			

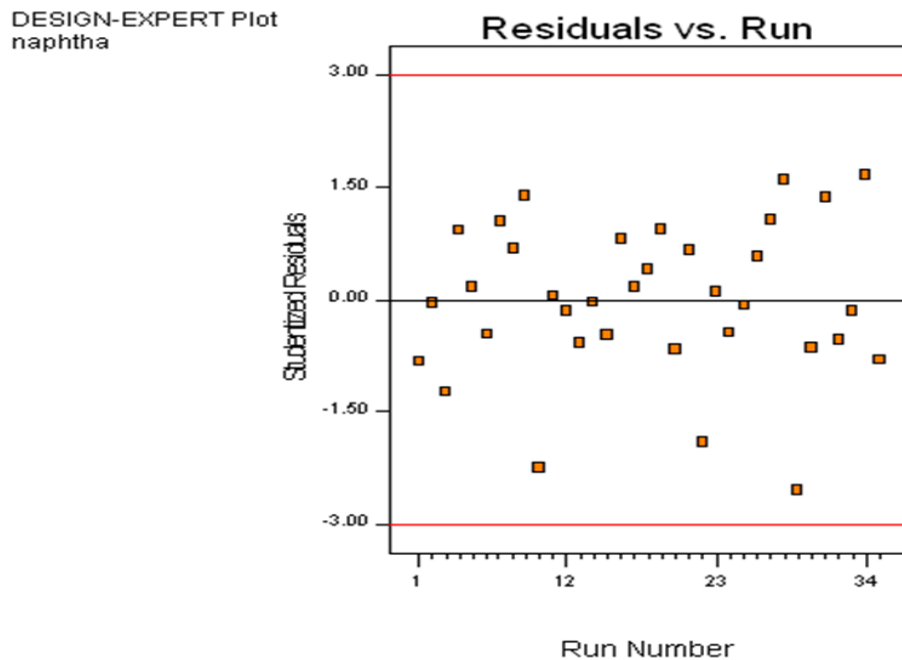
DESIGN-EXPERT Plot
naphtha



ภาพที่ 4.8 Normal Plot of Residuals ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทิสีใช้แล้ว

นำผลที่ได้จากการทดลองมาตรวจสอบความถูกต้องของภาพแบบเพื่อตรวจสอบว่าข้อมูลในการทดลองมีความน่าเชื่อถือหรือไม่ โดยแสดงเป็น Normal Plot of Residuals ซึ่งเมื่อพิจารณา

แล้วพบว่าค่า Residuals สำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีการเรียงตัวเป็นเส้นตรงจึงทำให้สรุปได้ว่าข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติจริง



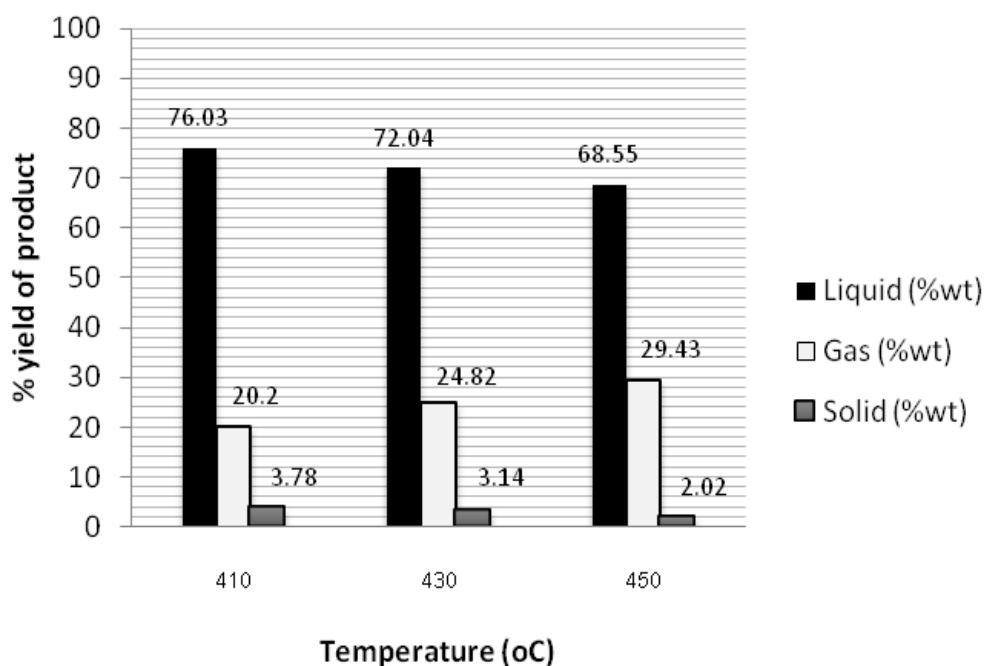
ภาพที่ 4.9 Residuals vs. Run ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ได้จากปฏิบัติการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

จากภาพแสดงค่า residuals กับ run หรือลำดับการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการตรวจสอบความเป็นอิสระ (independent) ของผลการทดลอง ซึ่งเมื่อพิจารณาจากแบบการกระจายตัวของค่า residuals ที่สัมพันธ์กับลำดับของการทำการทดลองของชุดการทดลองทั้งหมดเป็นการกระจายตัวแบบไร้รูปแบบ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งแสดงว่ากระบวนการทำการทดลองเป็นแบบสุ่มสมบูรณ์ทำให้ค่าผิดพลาดต่างๆที่เกิดจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้กระจายตัวเข้าถึงทุกหน่วยของการทดลองอย่างเท่าเทียมกัน

4.5 อิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

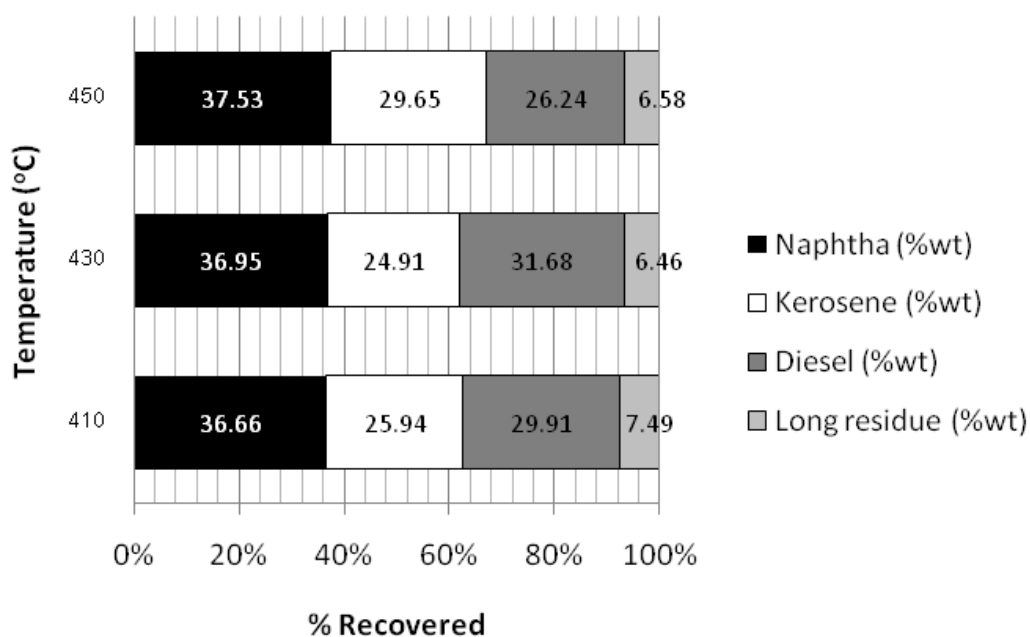
4.5.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการทดลองที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 410 430 และ 450 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ที่เวลาทำการทดลอง 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนักพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะทางกายภาพเป็นน้ำมันหนืดข้นคิดเป็นร้อยละ 76.03 โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 410 องศาเซลเซียสไปเป็น 430 องศาเซลเซียส โดยภายใต้ภาวะการทดลองเดียวกันจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีความหนืดลดลงและมีปริมาณร้อยละ 72.04 โดยน้ำหนัก และพบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดลง จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียสได้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่น้อยลงต่างจากที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียสอย่างชัดเจน ซึ่งเป็นผลมาจากการแยกสลายของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทดลองเป็น 450 องศาเซลเซียสภายใต้ภาวะการทดลองเดียวกันพบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันคิดเป็นร้อยละ 68.55 โดยน้ำหนัก พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนในปริมาณมากขึ้นถึงร้อยละ 29.43 โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากอิทธิพลของการแยกสลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแตกย่อยของโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจนได้โมเลกุลขนาดเล็กมากจนอยู่ในสภาพของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน $C_1 - C_4$ โดยผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เกิดเป็นแก๊สมากขึ้นที่อุณหภูมิ 430 และ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับและได้ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์ของน้ำมันน้อยลงด้วย



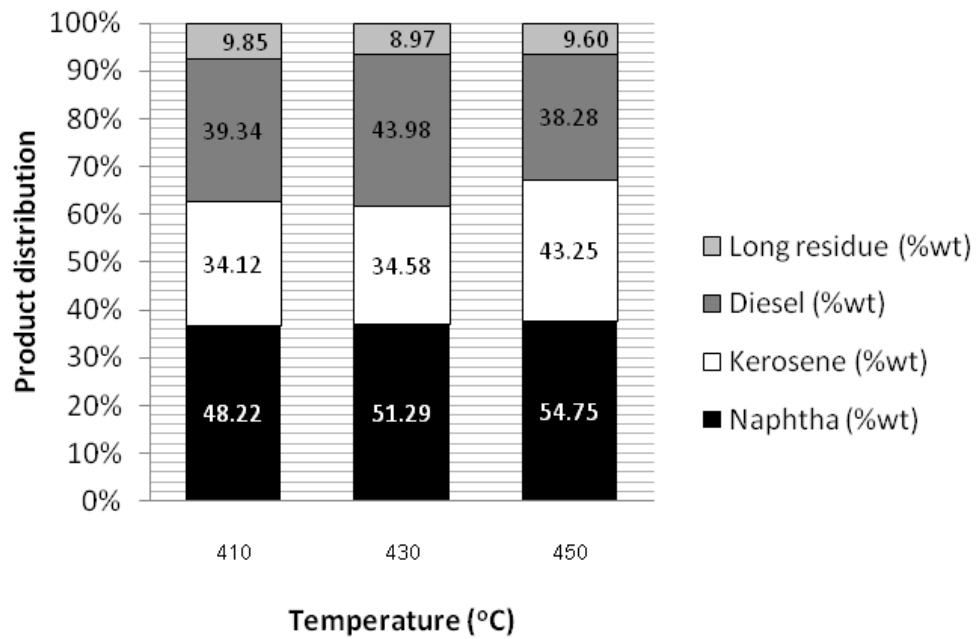
ภาพที่ 4.10 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิระหว่าง 410-450 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที บน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

เมื่อวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อหาค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่อง Simulated distillation gas chromatograph ผลการวิเคราะห์แสดงดังภาพที่ 4.11 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณแนฟทาจะเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการที่น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วสามารถเกิดการแตกตัวได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางจำพวกเคโรซีนและแก๊สออยล์ ต่อจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วก็จะเข้ามาบทบาทในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กจำพวกแนฟทา โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมากจะส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนทำให้เกิดการแตกตัวอย่างรุนแรงจนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจำพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอน C_1 - C_4 จากภาพที่ 4.11 สังเกตที่อุณหภูมิ 410 430 และ 450 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณของแนฟทาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ คือร้อยละ 36.66 36.95 และ 37.53 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะคงยังมีบทบาทในการแตกตัวให้ได้สารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงได้อีกจึงทำให้ได้ปริมาณของแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นด้วยซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวด้วย

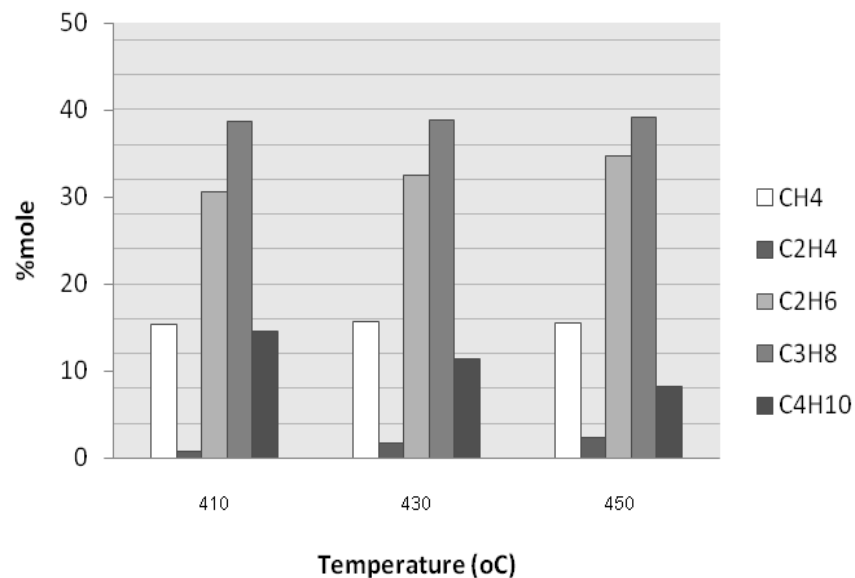


ภาพที่ 4.11 ร้อยละผลได้องค์ประกอบต่างๆของผลิตภัณฑ์จากเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatograph ที่อุณหภูมิ 4100-450 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

โดยจากการวิเคราะห์หาปริมาณแฉะทั้งหมดแสดงดังภาพที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ได้ปริมาณน้ำมันลดลงและปริมาณแฉะรวมลดลง ดังนั้นการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วสามารถแตกตัวได้ดีที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป และจากการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลในด้านของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยใช้เอพซีซีใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีองค์ประกอบที่ดีที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 410 องศาเซลเซียสได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 76.03 โดยน้ำหนัก แก๊สไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 20.2 โดยน้ำหนัก กากของแข็งร้อยละ 3.78 โดยน้ำหนัก มีองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยรวมเป็นแฉะร้อยละ 27.87 โดยน้ำหนัก เคโรซีนร้อยละ 19.72 โดยน้ำหนัก ดีเซล(แก๊สออยล์เบาบวกกับแก๊สออยล์)ร้อยละ 22.74 โดยน้ำหนัก และโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายยาวร้อยละ 5.69 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.12 ร้อยละผลได้การกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จาก อุณหภูมิ 410-450 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้น 5 บาร์ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

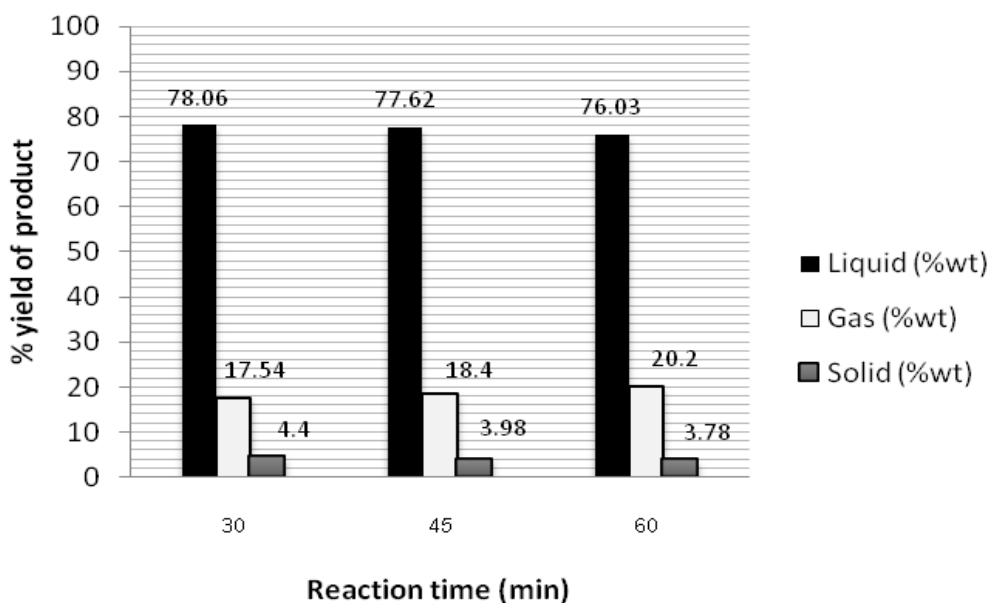


ภาพที่ 4.13 ร้อยละผลได้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากอุณหภูมิ 410-450 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 4.13 แสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วพบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาประกอบกับสมบัติการเลือกจำเพาะที่สูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เข้ามามีบทบาทในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยจะช่วยให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กเกิดการแยกสลายได้ดีเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กมากยิ่งขึ้น สังเกตได้จากที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณของ C_4H_{10} ที่ลดลงจากอุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนจะประกอบไปด้วย CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} ในปริมาณร้อยละ 15.54, 2.38, 34.71, 39.14 และ 8.23 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.5.2 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

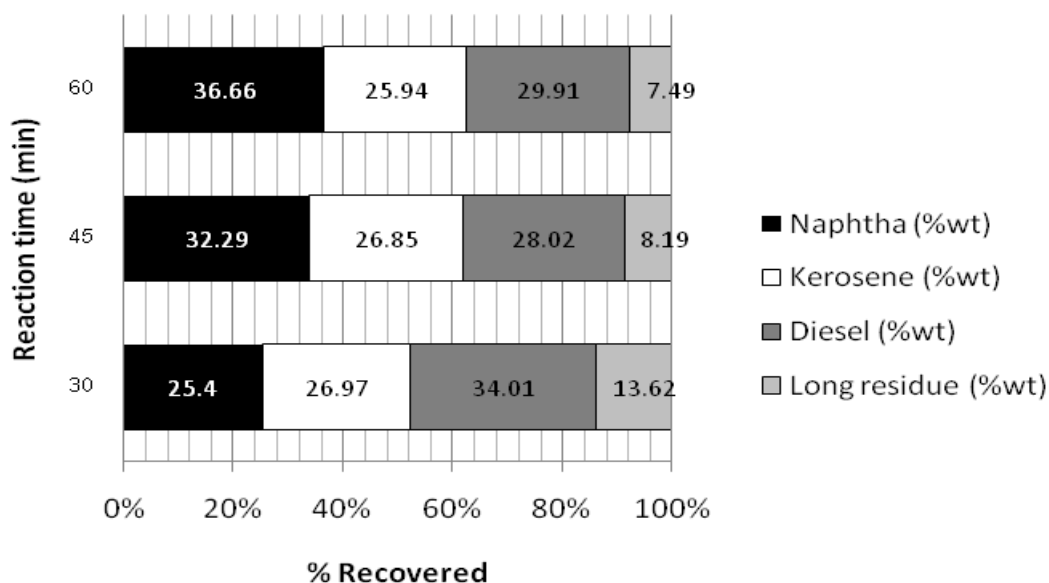
การศึกษาถึงอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยทำการศึกษาผลของเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่างๆ กัน ระหว่าง 30-60 นาทีที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.10 ที่เวลา 30 45 และ 60 นาที พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้เป็นร้อยละ 78.06 77.62 และ 76.03 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะลดลงโดยเปลี่ยนเป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่ระบบเป็นเวลานานจะส่งผลให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเกิดการแตกตัวเป็นสารโมเลกุลขนาดเล็กลง ส่วนโมเลกุลขนาดกลางจะมีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามา มีบทบาทช่วยในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่ได้จากการแตกตัวจากความร้อน โดยเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนก็จะแตกตัวจนมีขนาดเล็กและอยู่ในสภาพที่เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ส่วนที่เวลาทำการทดลองมากกว่า 60 นาที จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเวลานานมากขึ้นทำให้สารตั้งต้นเกิดเปลี่ยนเป็นแก๊สได้มากขึ้น โดยพบเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุดคือที่ 30 นาที แต่หากทำการทดลองโดยลดเวลาลงให้น้อยกว่า 30 นาที จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมากกว่าที่ 30 นาทีแต่จะมีลักษณะขุ่นเหนียวหนืดซึ่งเกิดจากการที่เวลาน้อยยังไม่เพียงพอต่อการแยกสลายของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วซึ่งเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่



ภาพที่ 4.14 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการทดลอง 30-60 นาที อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

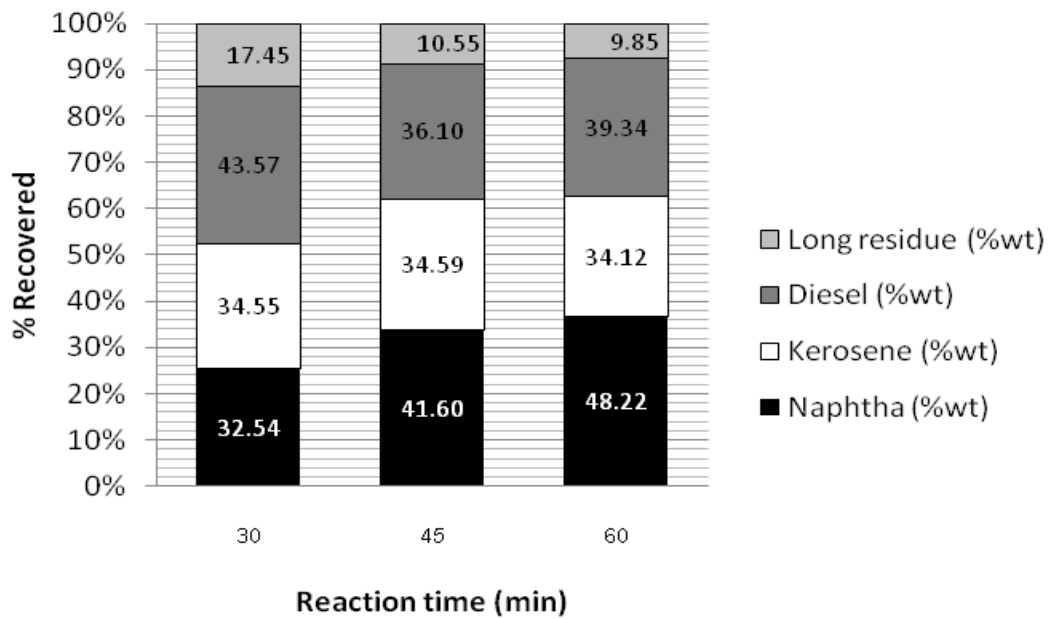
เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์เพื่อค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องมือ Simulated distillation gas chromatograph แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพ 4.14 พบว่าเมื่อใช้เวลาทำการทดลองต่าง ๆ กัน จะเห็นได้ว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นอันตรกิริยากับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิในการทดลองจาก 410 องศาเซลเซียสไปเป็น 450 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที จะทำให้ได้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที จะทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาลดลง แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากโดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูง จะทำให้สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดการแยกสลายกลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กที่ดี เนื่องจากมีเวลามากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแยกสลายได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีได้ร้อยละผลได้ของแนฟทาลดลง โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้คือในขั้นแรกจะเกิดการแยกสลายตัวด้วยความร้อน อุณหภูมิจะมีอิทธิพลอย่างมากทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะสายโซ่ยาวและซับซ้อนแตกตัวไปเป็นสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง เมื่อเวลาผ่านไปยังได้รับอิทธิพลจากความร้อนอย่างต่อเนื่องจะทำให้ได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กและแก๊สไฮโดรคาร์บอน เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้เกิดการ

เคลื่อนย้ายไฮโดรคาร์บอนและเกิดการแยกสลายของโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กไปเป็นผลิตภัณฑ์เนฟทาที่ต้องการ

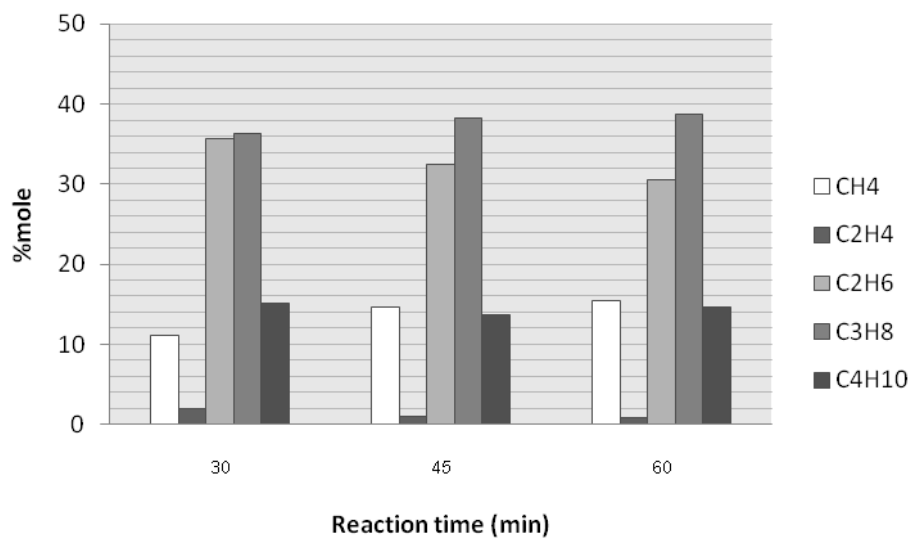


ภาพที่ 4.15 ร้อยละผลได้องค์ประกอบต่างๆของผลิตภัณฑ์จากเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatograph เวลาในการทดลอง 30-60 นาที อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ บนตัวเรอกปฏิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

โดยจากการวิเคราะห์หาปริมาณเนฟทาทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลานานขึ้นทำให้อิทธิพลของอุณหภูมิในการทำปฏิริยายังคงมีผลต่อเนื่องต่อปฏิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนทำให้สารโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่แตกตัวไปเป็นสารโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก เนื่องจากบทบาทของตัวเร่งปฏิริยาเอพซีซีใช้แล้วมีผลต่อการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่บริเวณเร่งและแตกตัวได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แต่ทำให้เกิดมากขึ้นเนื่องจากอิทธิพลของความร้อนต่อเนื่อง ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีองค์ประกอบดีที่สุดคือเวลาที่การทำปฏิริยา 60 นาที อุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิริยา 410 องศาเซลเซียส ความดัน 5 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิริยาเอพซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 76.03 โดยน้ำหนัก แก๊สไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 20.2 โดยน้ำหนัก กากของแข็งร้อยละ 3.78 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณเนฟทาร้อยละ 27.87 โดยน้ำหนัก เคโรซีนร้อยละ 19.72 โดยน้ำหนัก ดีเซล(แก๊สออยล์เบาพร้อมกับแก๊สออยล์)ร้อยละ 22.74 โดยน้ำหนัก และโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวร้อยละ 5.69 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.16 ร้อยละผลได้การกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากเวลาในการทดลอง 30-60 นาที อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

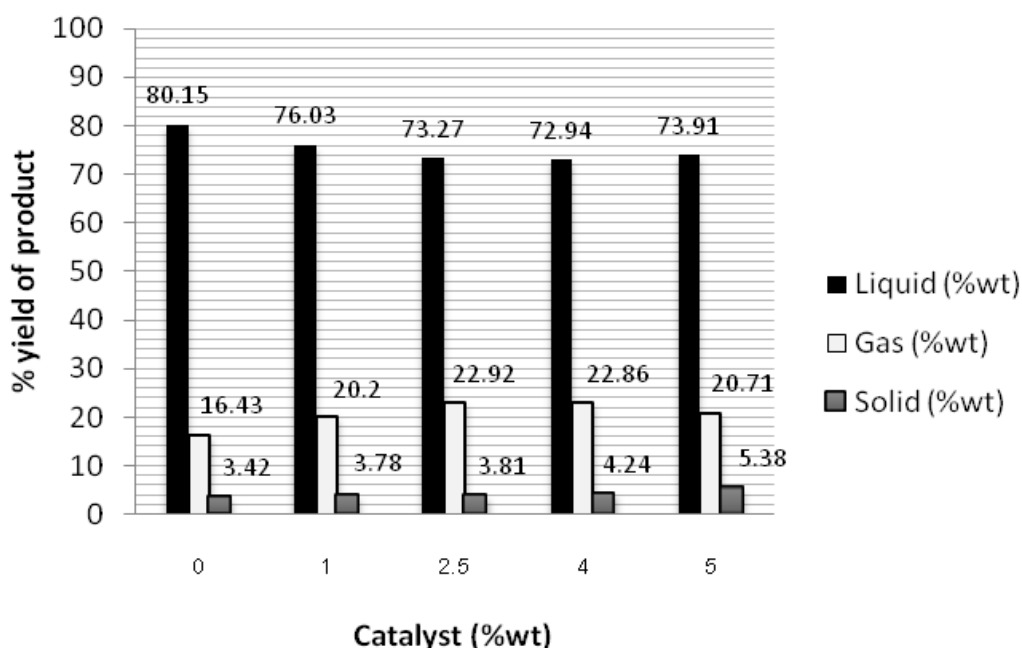


ภาพที่ 4.17 ร้อยละผลได้องค์ประกอบในผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากเวลาในการทดลอง 30-60 นาที อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 4.17 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วพบว่า เวลาในการทำปฏิกิริยามีผลต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สอย่างชัดเจน คือเมื่อเพิ่มเวลาในการทำการทดลองจาก 30 นาที ไปเป็น 60 นาทีจะทำให้ปริมาณของ CH_4 เพิ่มขึ้นจาก 11.12 ไปเป็น 15.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ C_2H_4 ยังเกิดการแตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่เล็กลงโดยที่อุณหภูมิ 410°C มีปริมาณ C_2H_4 1.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและที่อุณหภูมิ 430°C มีปริมาณ C_2H_4 0.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากเวลาที่เพิ่มขึ้นช่วยส่งเสริมให้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปทำปฏิกิริยากับน้ำมันอย่างทั่วถึงทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กเกิดการแตกตัวได้ดีเกิดไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงยิ่งขึ้น โดยที่เวลาในการทำการทดลอง 60 นาที ผลิตภัณฑ์แก๊สจะประกอบไปด้วย CH_4 C_2H_4 C_2H_6 C_3H_8 และ C_4H_{10} ในปริมาณร้อยละ 15.38 0.80 30.50 38.73 และ 14.59 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

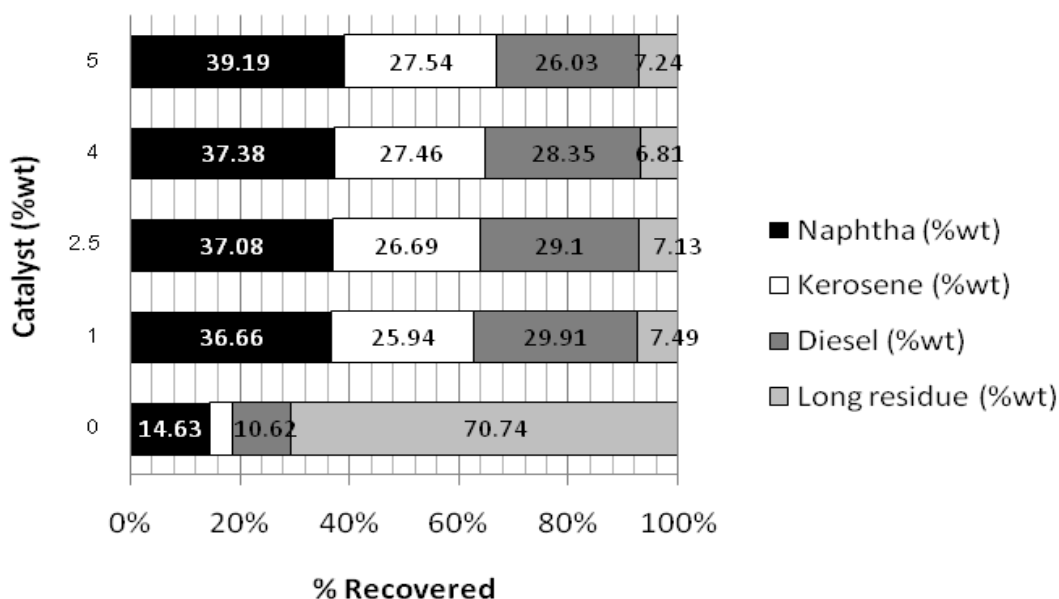
4.5.3 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การศึกษาถึงอิทธิพลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่าง ๆ กัน ระหว่างร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 410°C องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาทีจากผลการทดลองแสดงดังภาพ 4.18 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจากร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนัก ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยในช่วงแรกเมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไปเป็นร้อยละ 1 และ 2.5 โดยน้ำหนักจะส่งผลกระทบต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันมากที่สุดคือเกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 76.03 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 73.27 โดยน้ำหนักตามลำดับ เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 2.5 4 และ 5 โดยน้ำหนัก ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าลดลงเล็กน้อยหรือแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลงเลย แต่จะเห็นการเปลี่ยนแปลงร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้อย่างชัดเจนระหว่างไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาและใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาคือเกิดเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 80.15 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 76.03 โดยน้ำหนักตามลำดับ เนื่องจากการตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้าไปมีบทบาทในการแตกตัวของสารตั้งต้นให้เป็นสารผลิตภัณฑ์ได้มากจึงทำให้สารตั้งต้นนั้นแตกตัวจากโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กลงจนอาจจะเล็กลงเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้นจึงทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำลง แต่ทั้งที่ทั้งนั้นการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมันจะเพิ่มขึ้นกับปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่าใดนัก



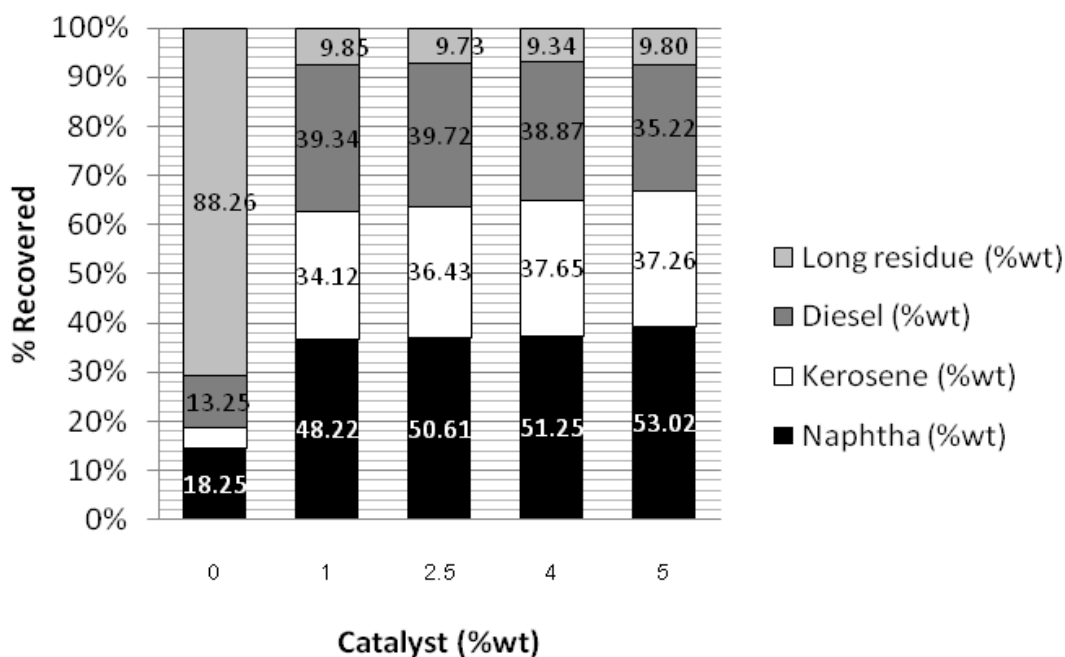
ภาพที่ 4.18 ปริมาณร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาทำการวิเคราะห์เพื่อค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่องมือ Simulated distillation gas chromatograph แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพ 4.19 พบว่าเมื่อปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นซึ่งอาจจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือบริเวณเร่งทำให้ปฏิกิริยาเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนได้ดีช่วยแยกสลายโครงสร้างสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก และผลจากบทบาทในการเลือกจำเพาะที่ดีของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นได้เป็นแนฟทาตามต้องการ และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวเมื่อมีการเติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนในการแตกตัวของสารเป็นอย่างมาก โดยมีผลต่างของร้อยละผลิตภัณฑ์แนฟทามากถึงร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก โดยพบร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แนฟทาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักเป็นร้อยละ 14.63 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 36.66 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีทั้ง active site และความร้อนที่ช่วยในการแตกตัวของสารตั้งต้น ขณะที่เมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีเพียงความร้อนเท่านั้น ซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นถึงจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

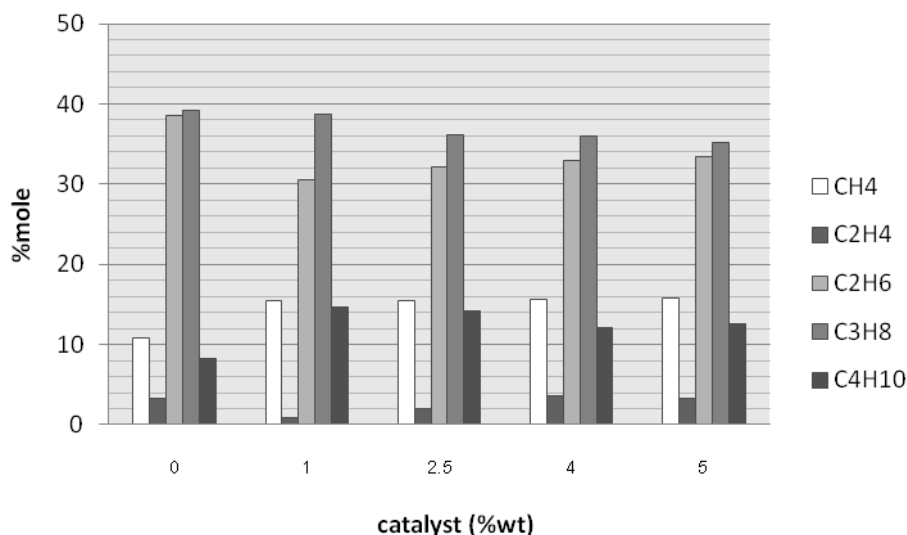


ภาพที่ 4.19 ร้อยละผลได้ขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์จากเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatograph ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.20 พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 - 5 โดยน้ำหนัก อาจให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำแต่การกระจายตัวของเนฟทาที่ได้สูงขึ้นเรื่อยๆ และเมื่อเปรียบเทียบหาผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยรวมแล้วพบว่าการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักจะได้ปริมาณเนฟทาทั้งหมดสูงที่สุด เพราะถึงแม้ว่าจะทำการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไปเรื่อยๆแนวโน้มในการเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นเนฟทาสูงขึ้นแต่จะไม่แตกต่างกันมากนัก ถ้าทำการเลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่สูงกว่านี้ก็จะเป็นการสิ้นเปลืองตัวเร่งปฏิกิริยาโดยเปล่าประโยชน์ ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักจึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วที่อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที ให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 73.91 โดยน้ำหนัก แก๊สไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 20.71 โดยน้ำหนัก กากของแข็งร้อยละ 5.38 โดยน้ำหนัก โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณเนฟทา ร้อยละ 28.97 โดยน้ำหนัก เคโรซีนร้อยละ 20.35 โดยน้ำหนัก ดีเซล(แก๊สออยล์เบา รวมกับแก๊สออยล์) ร้อยละ 19.24 โดยน้ำหนัก โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวร้อยละ 5.35 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.20 ร้อยละผลได้ของการกระจายตัวขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนัก และไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

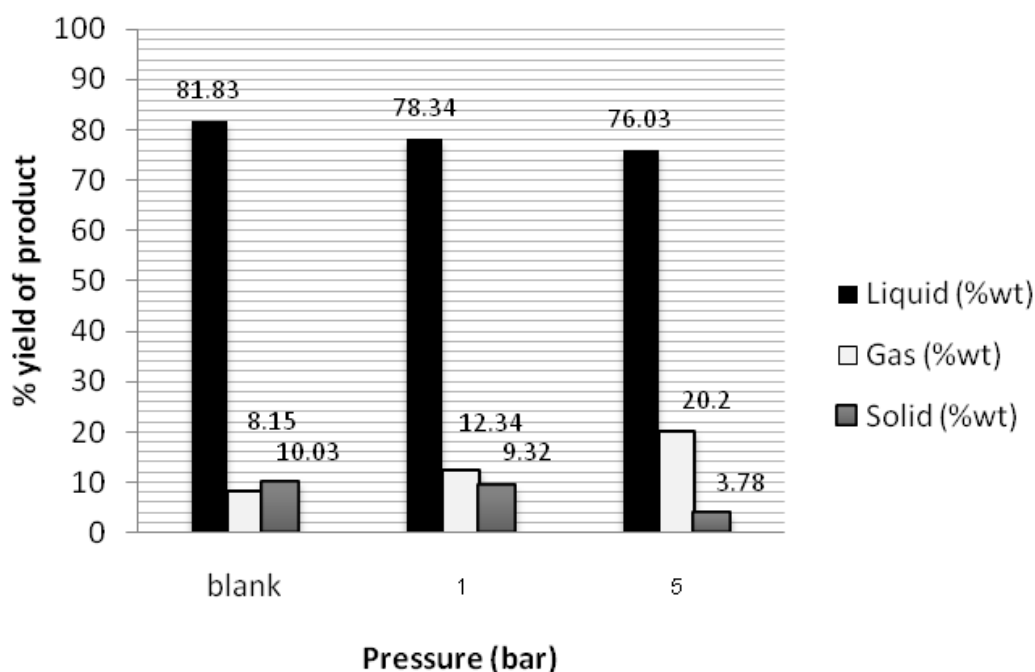


ภาพที่ 4.21 ร้อยละผลได้ขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างร้อยละ 1 – 5 โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจน 5 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

ภาพที่ 4.21 แสดงผลของปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้การแตกตัวของสารไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนเกิดได้ดี แต่อย่างไรก็ตามปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ส่งผลต่อปริมาณองค์ประกอบแก๊สไฮโดรเจนเท่าใดนัก โดยที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ประกอบไปด้วย CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_8 และ C_4H_{10} ในปริมาณร้อยละ 15.68 3.27 33.45 35.13 และ 12.47 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

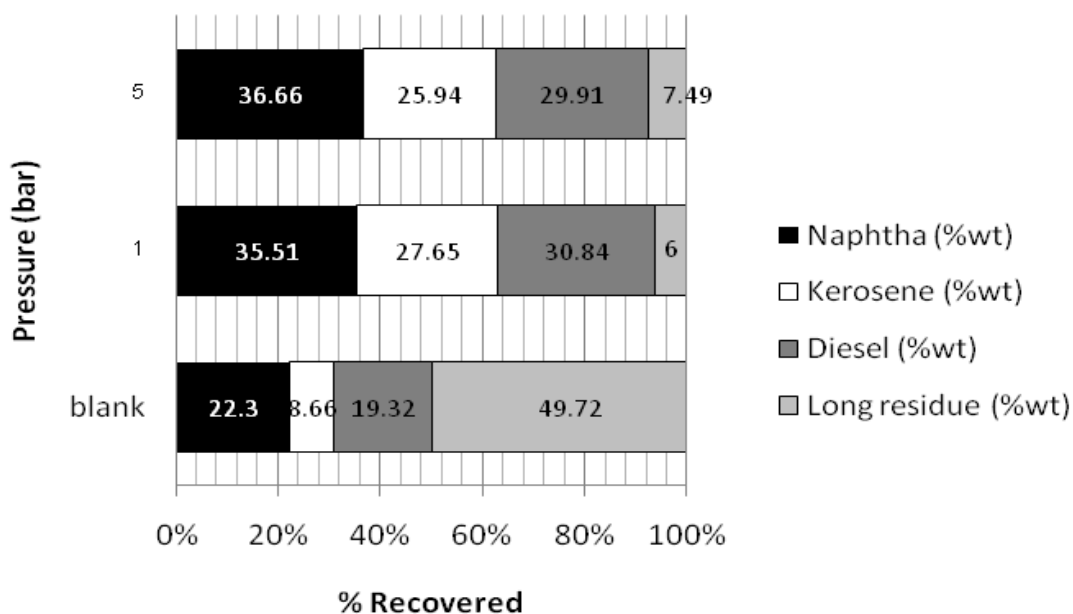
4.5.4 อิทธิพลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน

การศึกษาถึงอิทธิพลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีผลต่อการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพื่อศึกษาผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 – 5 บาร์ และไม่ใช่ความดันไฮโดรเจน เมื่อใช้อุณหภูมิทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาอิทธิพลของความดันแก๊สไฮโดรเจนแสดงผลการทดลองดังภาพ 4.22 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันจะทำให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง และพบว่าที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 - 5 บาร์ ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดและเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวโดยไม่อัดแก๊สไฮโดรเจน โดยเมื่อไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจนนั้นให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงกว่า ไฮโดรเจนที่จะเข้าไปช่วยให้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีและการเติม ไฮโดรเจนจะทำให้อนุมูลอิสระได้รับไฮโดรเจนและเกิดปฏิกิริยาได้ดี จึงทำให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลงได้ และนอกจากนั้นความจำเป็นในการเติมความดันไฮโดรเจนเข้าไปในระบบก็เนื่องมาจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วมีโครงสร้างซับซ้อนและเกาะตัวอย่างแน่นหนา การเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาถูกใช้ที่จะส่งผลต่อการทำให้น้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วแตกตัวเป็นโมเลกุลสายโซ่ขนาดกลางด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวเป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นต้องเพิ่มแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบเพื่อส่งเสริมให้เกิดปฏิกิริยา Hydrocracking และปฏิกิริยา Hydrogenation เพื่อให้เกิดการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ขนาดสั้นลง



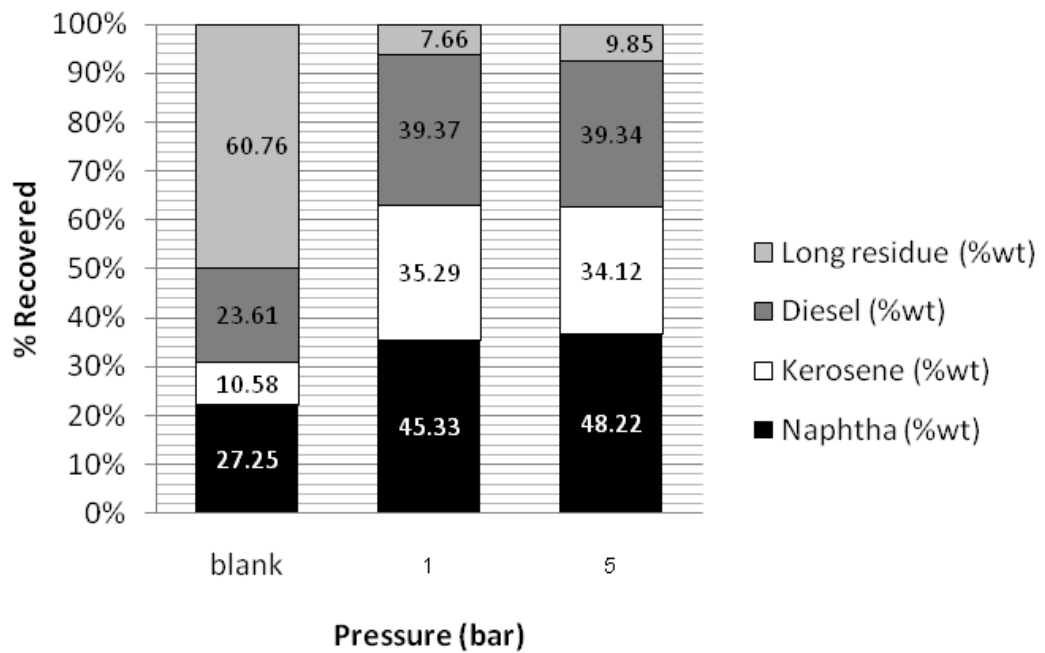
ภาพที่ 4.22 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการศึกษาอิทธิพลของความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 – 5 บาร์ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพื่อค่าการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดโดยใช้เครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph แสดงผลการวิเคราะห์ดังภาพ 4.23 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันของแก๊สไฮโดรเจนให้กับระบบที่อุณหภูมิคงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแนฟทาและเคโรซีนในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งมีผลมาจากการที่แก๊สไฮโดรเจนไปมีบทบาทในการส่งเสริมปฏิกิริยา Hydrocracking ของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วให้เป็นสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง โดยในช่วงแรกจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นอนุโมลอิสระและเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบลูกโซ่โดยอิทธิพลของความร้อน จากนั้นความดันแก๊สไฮโดรเจนจึงไปมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยา Hydrocracking จนได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลง รวมถึงจะมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยา Hydrogenation ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างอิ่มตัวด้วย จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเข้ามามีอิทธิพลในการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนให้มีขนาดเล็กลงอีก และจากกระบวนการ Hydrocracking จึงได้ปริมาณของแนฟทามากด้วย นอกจากนี้การเพิ่มความดันไฮโดรเจนจะทำให้ระบบได้รับไฮโดรเจนมากขึ้นและเป็นการทำความสะอาบบริเวณเร่งของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วทำให้ยังมีสภาพที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่

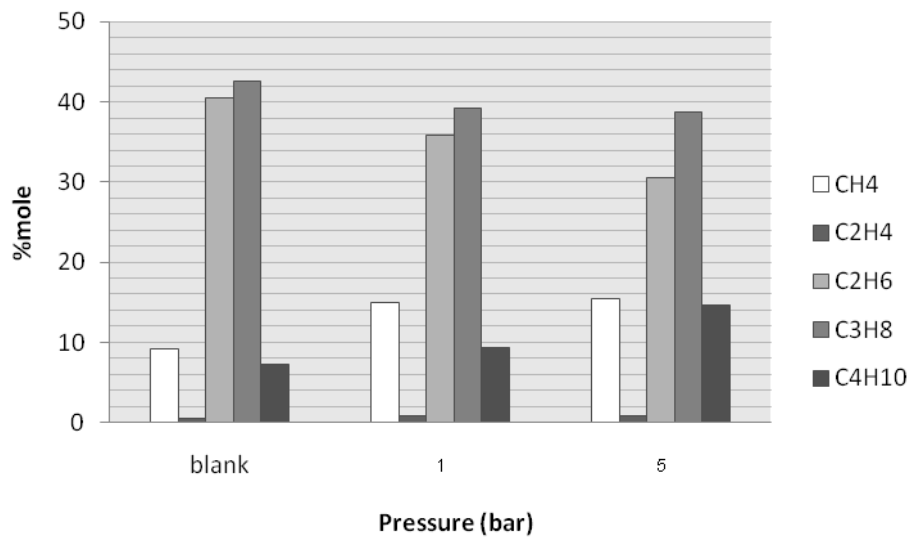


ภาพที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatograph ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 – 5 บาร์ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.24 พบว่าความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นมีผลต่อค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบในผลิตภัณฑ์ โดยค่าการกระจายตัวของแนฟทาที่ใส่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นจะมีค่าสูงกว่าค่าการกระจายตัวของแนฟทาในภาวะที่ไม่ได้ใส่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อใส่ความดันเพิ่มขึ้นก็จะมีผลทำให้ปริมาณแนฟทาโดยรวมมากขึ้น คือที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์จะได้ปริมาณแนฟทาโดยรวมมากที่สุด แต่จะเห็นได้ว่าปริมาณแนฟทาที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 และ 5 บาร์จะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ดังนั้นที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ จึงเป็นความดันที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีแล้ว อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เนื่องจากถ้าเลือกความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 5 บาร์จะเป็นการสิ้นเปลืองแก๊สไฮโดรเจนโดยเปล่าประโยชน์ โดยให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 78.34 โดยน้ำหนัก แก๊สไฮโดรคาร์บอนร้อยละ 12.34 โดยน้ำหนัก กากของแข็งร้อยละ 9.32 โดยน้ำหนัก โดยองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณแนฟทาร้อยละ 27.82 โดยน้ำหนัก เคโรซีนร้อยละ 21.66 โดยน้ำหนัก ดีเซล(แก๊สฮอยล์เบาบวกกับแก๊สฮอยล์)ร้อยละ 24.16 โดยน้ำหนัก โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวร้อยละ 4.70 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 – 5 บาร์ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที บนตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 – 5 บาร์ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง 410 องศา เซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 4.25 แสดงผลของความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้นที่มีต่อองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วพบว่า ปริมาณของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นมีผลต่อปริมาณองค์ประกอบแก๊สผลิตภัณฑ์ คือเมื่อเพิ่มความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นจะทำให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัวที่ดีได้เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง ทั้งนี้เนื่องมาจากความดันแก๊สไฮโดรเจนจึงไปมีบทบาทในการเกิดปฏิกิริยา Hydrocracking นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อัดความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นมีปริมาณที่แตกต่างจากองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนที่ภาวะที่มีความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นได้อย่างชัดเจน โดยที่ความดันของไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สที่ประกอบไปด้วย CH_4 C_2H_4 C_2H_6 C_3H_8 และ C_4H_{10} ในปริมาณร้อยละ 15.38 0.8 30.5 38.73 และ 14.59 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

4.6 คำแนะนำภาวะเหมาะสมจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วโดยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยโปรแกรม Design-Expert

ตารางที่ 4.9 ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design-Expert

ตัวแปร	ขอบเขต	ระดับต่ำ	ระดับสูง	หน่วย
อุณหภูมิ	ในช่วง	410	450	°C
เวลา	ในช่วง	30	60	min
ตัวเร่งปฏิกิริยา	ในช่วง	1	5	wt%
ความดัน	ในช่วง	1	5	bar
แก๊ส	ค่าต่ำสุด	15.23	28.63	wt%
ของเหลว	ค่าสูงสุด	62.87	78.71	wt%
แนฟทา	ค่าสูงสุด	22.77	41.32	wt%
เคโรซีน	ค่าสูงสุด	23.17	35.32	wt%
ดีเซล	ค่าสูงสุด	22.38	37.57	wt%

การใช้โปรแกรม Design-Expert เพื่อทำการหาภาวะที่เหมาะสม โดยค่าที่นำมาพิจารณา ได้แก่ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของแนฟทา ค่าร้อยละผลได้ของเคโรซีน และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล โดยกำหนดให้ค่าร้อยละผลได้

ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นให้ต่ำที่สุด ส่วนค่าที่เหลือ ได้แก่ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของแนฟทา ค่าร้อยละผลได้ของเคโรซีน และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล กำหนดให้ค่าสูงที่สุด จากตารางที่ 4.10 ภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 46 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1 โดยน้ำหนักและใช้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จะทำให้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นเป็นร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นร้อยละ 77.12 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละผลได้ของแนฟทาเป็นร้อยละ 29.75 โดยน้ำหนัก และค่าร้อยละผลได้ของดีเซลเป็นร้อยละ 32.43 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.10 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert

อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	ความดัน (bar)	แก๊ส (%)	ของเหลว (%)	แนฟทา (%)	ดีเซล (%)
410	46	1.12	1	18.16	77.12	29.75	32.43

หลังจากที่ได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้ว จึงทำการทดลองจริงที่ภาวะที่เหมาะสม เพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรม โดยมีการทำการทดลองจริง 1 ครั้ง และทดลองทำซ้ำอีก 1 ครั้ง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม

ตารางที่ 4.11 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert และจากการทดลองจริง

การทดลอง	สภาวะที่ใช้ในการทดลอง				แก๊ส (%)	ของเหลว (%)	แนฟทา (%)	ดีเซล (%)
	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (min)	ตัวเร่งปฏิกิริยา (wt%)	ความดัน (bar)				
จากโปรแกรม	410	46	1.12	1	18.16	77.12	29.75	32.43
จากการทดลอง	410	46	1.12	1	16.87	78.15	28.47	30.46
จากการทดลอง	410	46	1.12	1	17.59	77.89	29.91	34.05

เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและกรณีไม่มี ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น

นำภาวะเหมาะสมมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่ภาวะทั้งสองไม่มีผล ต่อผลิตภัณฑ์น้ำมันและผลิตภัณฑ์แก๊สโดยค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สไฮโดรเจน มีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนค่าร้อยละผลได้ของเนฟทาและค่าร้อยละผลได้ของดีเซลเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 33.26 และ 32.25 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.12 เนื่องจากการแยกสลายด้วยความร้อน ในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาทำให้โมเลกุลของสารไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เกิดการแตกตัวไป เป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง หลังจากนั้นสมบัติการเลือกจำเพาะของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเข้ามา มีบทบาทสำคัญในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางที่สามารถแพร่เข้าไป เกิดปฏิกิริยาในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาได้ และเกิดเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก ร้อยละ ผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจึงลดน้อยลงแต่จะเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สมากขึ้น และในงานวิจัยมี สมมติฐานว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพิซีซีใช้แล้วจะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สลดลง ซึ่ง จากผลที่ได้ตามที่แสดงในตารางพบว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่คาดไว้

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบระหว่างภาวะที่เหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาวะที่ใช้ทดลอง	แก๊ส (wt%)	ของเหลว (wt%)	เนฟทา (wt%)	ดีเซล (wt%)
ภาวะเหมาะสม	16.84	78.42	33.26	32.25
ภาวะที่ไม่มีตัวเร่ง ปฏิกิริยา	16.43	80.15	14.63	10.62

นำภาวะเหมาะสมมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น พบว่าเมื่อไม่มี ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 8.15 เป็น 16.84 โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทาและดีเซลจะ ลดลง จากตารางที่ 4.13 ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทาลดลงจากร้อยละ 33.26 ไปเป็น 14.63 โดย น้ำหนัก และค่าร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจากร้อยละ 32.25 ไปเป็น 10.62 โดยน้ำหนัก เนื่องจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเข้าไปในปฏิกิริยาทำ ให้ในปฏิกิริยาเกิดการถ่ายโอนไฮโดรเจนส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความอิ่มตัวและไม่เกิดการ แตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นได้อีกต่อไป ผลจากการแยกสลายโดยใช้ไฮโดรเจน

ร่วมทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สในภาวะที่มีการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นมีค่าน้อยกว่าภาวะที่ไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น

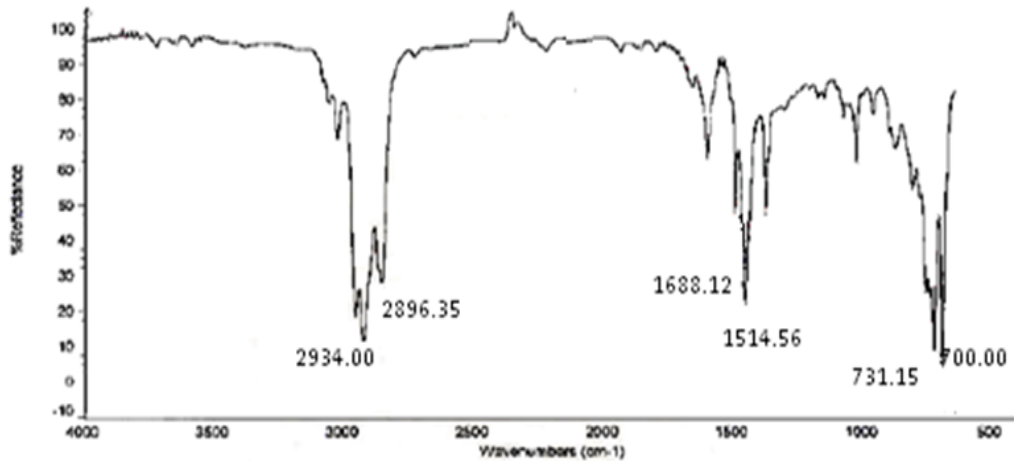
ภาวะที่ใช้ทดลอง	แก๊ส (wt%)	ของเหลว (wt%)	แนฟทา (wt%)	ดีเซล (wt%)
ภาวะเหมาะสม	16.84	78.42	33.26	32.25
ภาวะที่ไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	8.15	81.83	22.3	19.32

4.7 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทดลอง

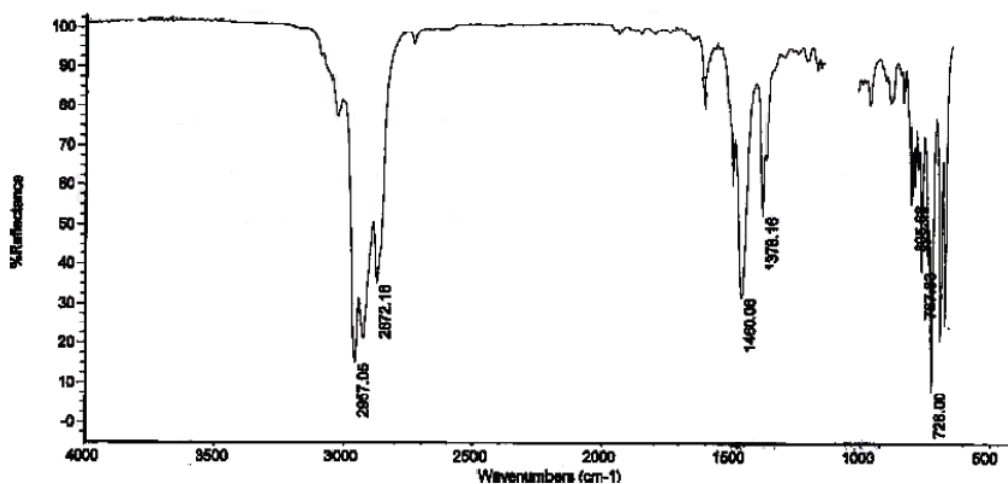
การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เมื่อทำการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมแล้วนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักที่เป็นสายโซ่แโรแมติก (Long chain aromatic) เป็นองค์ประกอบหลักมีอยู่จำนวนมาก ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทำการทดลองภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เวลาที่ใช้ในการทดลอง 46 นาทีโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนักพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพวกแอลิฟาติกที่มีโครงสร้างเป็นวงที่มีคาร์บอนอยู่ 5 – 6 โมเลกุล และแสดงความเป็นแโรแมติก (Aromatic compound) แสดงดังภาพที่ 4.26 จะเห็นพีคที่เห็นได้ชัดเจน ได้แก่พีคที่ 1686 cm^{-1} ซึ่งจะแสดงเป็นพันธะคู่ของ C=C ในแโรแมติก พีคที่ 1514.56 cm^{-1} แสดงเป็นหมู่ฟังก์ชันของเมทิล (methyl group) พีคที่ 700 cm^{-1} และ 731.5 cm^{-1} แสดงถึงวงแหวนเบนซีน ส่วนพีคที่ 3000 cm^{-1} และ 3100 cm^{-1} แสดงถึง =C-H หรือแอลเคนแโรแมติกด้วย เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมีส่วนช่วยให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่มีขนาดที่เล็กลง ดังที่เห็นในภาพจะพบว่ามีหมู่ฟังก์ชันเป็นเมทิล (methyl group) แทนที่อยู่บนวงแหวนไฮโดรคาร์บอน ส่วนความเป็นแโรแมติกที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลมาจากการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมนั่นเอง

เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันน้ำมันเบนซินออกเทน 95 พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักที่เป็นสายโซ่แโรแมติก (Long chain aromatic) จำนวนมาก มีหมู่ฟังก์ชันจำพวกอะลิฟาติกที่มีโครงสร้างเป็นวงที่มีคาร์บอน 5 – 6 โมเลกุลเกิดขึ้น และแสดงให้เห็นถึงความเป็นแโรแมติก (Aromatic compound) ในน้ำมัน ดังภาพที่ 4.27 ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้

จากการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วจะเห็นได้ว่าทั้งสองมีหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายกันแสดงว่าผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวนั้นสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการนำไปเป็นเชื้อเพลิงต่อไปได้ดีและมีประสิทธิภาพได้



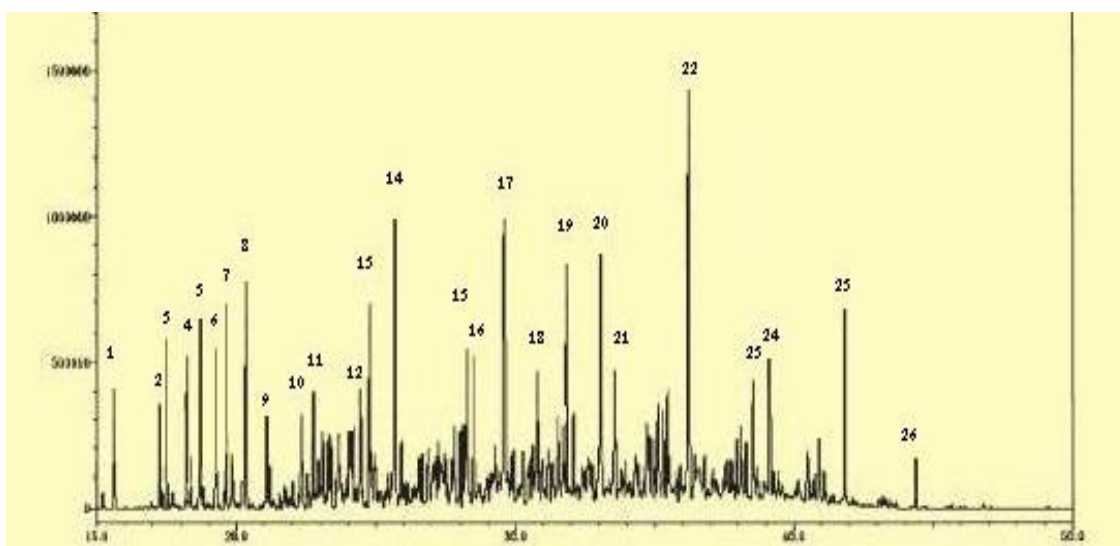
ภาพที่ 4.26 FTIR spectrum จากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วที่อุณหภูมิทำการทดลอง 410 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 46 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 4.27 FTIR spectrum จากผลิตภัณฑ์น้ำมันเบนซินออกเทน 95

4.8 การวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทดลอง

การแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้บนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว เมื่อทำการทดลองหาภาวะที่เหมาะสมแล้วนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์หาด้วยเครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry พบว่าองค์ประกอบหลักในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีส่วนใหญ่ที่พบจะเป็นพวกพาราฟินไซตรง พวกพาราฟินที่มีกิ่ง และพวกที่เป็นแโรแมติก โดยสังเกตได้ว่าพวกพาราฟินสายไซตรงที่ได้จากการแตกตัวนี้จะมีคาร์บอนอะตอมอยู่ในช่วงของแนฟทาจนถึงพวกแก๊สออยล์เบา ส่วนพวกแโรแมติกส่วนใหญ่จะพบองค์ประกอบที่เป็นทูลีน เอทิลเบนซีน ไซลีน และเบนซีน



ภาพที่ 4.28 Interpreting spectra ที่ได้จากเครื่อง GC-MS

ตารางที่ 4.13 องค์ประกอบต่างๆที่พบในผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ลำดับ	สารประกอบ	ประเภท
1	n-Heptane (C ₇ H ₁₆)	Alkane
2	3-Methyl hexane (C ₇ H ₁₆)	Alkane
3	2,4-Dimethyl hexane (C ₈ H ₁₈)	Alkane
4	Toluene (C ₇ H ₈)	Alkyl-benzene
5	n-Octane (C ₈ H ₁₈)	Alkane
6	Ethylbenzene (C ₈ H ₁₀)	Alkyl-benzene
7	1,3-Dimethyl benzene (C ₈ H ₁₀)	Alkyl-benzene
8	o-Xylene (C ₈ H ₁₀)	Alkyl-benzene
9	n-Nonane (C ₉ H ₂₀)	Alkane
10	2,3,4-Trimethyl hexane (C ₉ H ₂₀)	Alkane
11	2,4-Dimethyl heptane (C ₉ H ₂₀)	Alkane
12	1-Ethyl-3-methyl benzene (C ₉ H ₁₂)	Alkyl-benzene
13	1,2,3-Trimethyl benzene (C ₉ H ₁₂)	Alkyl-benzene
14	n-Decane (C ₁₀ H ₂₂)	Alkane
15	1,2,4-Trimethyl benzene (C ₉ H ₁₂)	Alkyl-benzene
16	4-Ethyl-1,2-dimethyl benzene (C ₁₀ H ₁₄)	Alkyl-benzene
17	n-Undecane (C ₁₁ H ₂₄)	Alkane
18	1-Phenyl-1-butene (C ₁₀ H ₁₂)	Alkyl-benzene
19	Naphthalene (C ₁₀ H ₈)	Naphthalene
20	1-Ethyl-2,4,5-trimethyl benzene (C ₁₁ H ₁₆)	Alkyl-benzene
21	Dodecane (C ₁₂ H ₂₆)	Alkane
22	Tridecane (C ₁₃ H ₂₈)	Alkane
23	1-Methyl naphthalene (C ₁₁ H ₁₀)	Alkyl-naphthalene
24	2-Methyl naphthalene (C ₁₁ H ₁₀)	Alkyl-naphthalene
25	Tetradecane (C ₁₄ H ₃₀)	Alkane
26	Pentadecane (C ₁₅ H ₃₂)	Alkane

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วจำเป็นต้องทำในภาวะที่ใช้อุณหภูมิและความดันที่สูง เนื่องจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วเป็นสารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่รวมถึงต้องมีการเติมแก๊สไฮโดรเจนให้กับน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในปฏิกิริยาการแตกตัวให้ดียิ่งขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณและคุณภาพของเหลวซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงต่อไป สำหรับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการทดลองนี้ประกอบไปด้วยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้สามารถนำไปวิเคราะห์ในเชิงปริมาณเพื่อหาร้อยละของการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลว และทำการวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพโดยวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ในช่วงจุดเดือดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Simulated distillation gas chromatograph) ในการหาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาได้ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลและออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียลมีการทำการทดลองซ้ำออกแบบและคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert โปรแกรมนี้สามารถบ่งบอกได้ว่าตัวแปรใดมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและร้อยละผลได้ขององค์ประกอบต่างๆในผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้ยังมีการนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันและหาสารประกอบที่เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR) และเครื่อง Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) ตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นและคุณภาพของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองสามารถสรุปถึงภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดกระบวนการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วดังนี้

1. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญจากการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา

2. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญจากการแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อันตกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลา อันตกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตกิริยาระหว่างเวลากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตกิริยาระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น

3. ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้ว ที่ให้แนวโน้มของผลิตภัณฑ์น้ำมันและค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุดจากการคำนวณด้วยโปรแกรมดังนี้

- อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 410 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 46 นาที
- ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 1.12 โดยน้ำหนัก
- ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

โดยที่ภาวะการทดลองข้างต้นได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 77.12 โดยน้ำหนัก ผลิตภัณฑ์แก๊สร้อยละ 18.16 โดยน้ำหนักและของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยาร้อยละ 4.72 โดยน้ำหนัก การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณของแนฟทาร์้อยละ 29.75 โดยน้ำหนัก และดีเซลร้อยละ 32.43 โดยน้ำหนัก โดยมีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็นแอมโรแมติกไฮโดรคาร์บอน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมจากการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพื่อนำไปขยายส่วนในระดับการผลิตขนาดใหญ่ขึ้น

2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแยกสลายด้วยความร้อนของสารตั้งต้นบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วชนิดอื่นนอกจากชนิด USY

3. ศึกษาสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วหลังผ่านกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วเพื่อนำเอามาปรับปรุงในการใช้งานต่อไป

4. ศึกษาความเป็นไปได้และเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวหรือสารเคมีที่ได้จากการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว

รายการอ้างอิง

- [1] Available from : http://www.suriyothai.ac.th/library/studentshow/2549/m6-6/no11-14-16-49/lubricant_oil1.html [16 ธันวาคม 2553]
- [2] Available from : http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm
[17 มิถุนายน 2554]
- [3] Available from : http://www.chaiwbi.com/0drem/web_children/2545/m5302/oil.html
[17 มิถุนายน 2554]
- [4] Available from : <http://library.kmitnb.ac.th/fulltext/tech41/16005.html> [24 มิถุนายน 2554]
- [5] ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: สุนทรออฟเซท, 2537.
- [6] วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. ปฏิกิริยาเร่งเคมีเกี่ยวกับพื้นที่ผิวและปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547.
- [7] ศุภวรรณ □ ตันตยานนท □. ปิโตรเคมี. (2542):6-1 –6-11,7-1 –7-5, 9-5 –9-8
- [8] Chaiprasert P., One-Step Catalytic Hydrotreatment of Used Automotive Lubricating Oil. Master's Thesis, Program of Petrochemistry and Polymer Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, 1999.
- [9] Charles N. Satterfield. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. New York: McGraw-Hill,1991.
- [10] Harold H. Schobert, The Chemistry of Hydrocarbon fuel. NewYork: 1991.
- [11] James A. Casumano. Catalysis in Coal. New York : Academics Press, 1978. Matar S., Manfred J.M., Hassan A.T. Catalysis in Petrochemical Processes. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (1989): 46-48.
- [12] Kenneth H. C. Recycling Chemistry & Industry. 14(1989): 440-442.
- [13] Kim, S.-S., Chun, B.H., Kim, S.H., Pyrolysis kinetics of waste automobile lubricating oil. Fuel, 79(2000): 1943-1949.
- [14] 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.

- [15] Satterfield C.N., Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. 2nd Ed., McGraw-Hill. 1991
- [16] Serrano, D.P., Aguado, J., Escola, J.M., Catalytic conversion of polystyrene over HZSM-5, HMCM-41 and amorphous SiO₂-Al₂O₃ comparison with thermal cracking, *Journal of Applied Catalysis B*, 25, (2000): 181-189.
- [17] Wang, L., Yoo, J., Park, S., Heon J., Ho, T.L., Deuk K.L. "Optimization of pyrolytic coprocessing of waste plastics and waste motor oil into fuel oils using statistical pentagonal experimental design", *Journal of Fuel*, 78, (1999): 809 – 813.
- [18] 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.
- [19] Williams P.T. and Chishti H.M. Two stage pyrolysis of oil shale using a Zeolite Catalyst. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2000: 217–234.
- [20] กมลวรรณ กิ่งพุทธพงษ์และโสภณวี ไชยอนันต์สุจริต. การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาอะลูมิเนียม HMS. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [21] จินตนา สุมารินทร์. การแตกตัวของน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [22] นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุล. การแยกสลายด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบ แบบตซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [23] ประชาวัฒน์ แต่มักดี. การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [24] พิษร์ณัฐ เสวตรรัตน์. ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของกลีเซอรอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [25] วิชชากร จารุศิริ, จินตนา อุบลวัฒน์. การแตกตัวด้วยความร้อนของกลีเซอรอลที่เหลือจากกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันให้เป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนบนเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. การประชุม

- วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3. สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [26] วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. คະຕະໂລໂສ໌ແບບເສທເທວໂຣຈີເນຍສ ທີ່ລັກທະຊະກຳແລະການປະຍຸກຕ໌. ກຸງເທພ: ກາຄວິຊາເຄມີ ຄຸນະວິທະຍາສາສຕ໌ຣ໌ ຈຸຟຳລຸງກຣຸນ໌ ມາວິທະຍາລຳຍ໌, 2534.
- [27] วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. ປູກິຣິຍາເຣ່ງເຄມີເຄີຍວກັບພື້ນທີ່ຜົວແລະປີໂຕຣເຄມີ. ກຸງເທພ ສມາຄມສ່ງເສຣີມ ທເຄໂນໂລຍີ (ໄທຍ-ຣູ໌ປຸ່ນ), 2547.
- [28] สไบทิพย์ ตุงคะมณี. ຜລກຣະທບຂອງອຸນຫຼຸມທີ່ໃຊ້ໃນການເຕີຣີຍມຕໍ່ອໂຄຣງສ່ຽງແລະພື້ນທີ່ຜົວຂອງ ຕົວເຣ່ງປູກິຣິຍາ Ru/Al₂O₃. ກາຄວິຊາເຄມີອຸຕສາຫຣຣມ ຄຸນະວິທະຍາສາສຕ໌ຣ໌ປຣະຍຸກຕ໌ ສຸຄາບັນ ທເຄໂນໂລຍີພຣະຈອມເຄຳພຣະນຄຣເນືອ, 2545.
- [29] อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล. ການປ່ຽນນ້ຳມັນຫລ່ອລືນທີ່ໃຊ້ແລ້ວໃຫ້ເປັນເຂື່ອເຟລິງເລງບນຕົວເຣ່ງ ປູກິຣິຍາບນຄ່ານກັມມັນຕ໌ ໂຄບອລຕ໌ແລະໂມລີບດີນັມບນອະລູມີນາ ແລະ HZSM-5. ວິທະຍານິພົນ໌ ປຣິຣູຣຸຯາດຸຊະກຳບັດທິຕ, ກາຄວິຊາເຄມີເທຄນິຄ ຄຸນະວິທະຍາສາສຕ໌ຣ໌ ຈຸຟຳລຸງກຣຸນ໌ ມາວິທະຍາລຳຍ໌, 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก1 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2^4 factorial design) สำหรับการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
1	410	30	1	1	77.89	15.23	6.88	22.77	32.81	37.57	6.85
1R	410	30	1	1	78.62	16.64	4.74	23.27	32.97	36.17	7.59
2	410	30	1	5	78.71	17.7	3.59	25.84	26.16	34.26	3.74
2R	410	30	1	5	77.41	17.38	5.21	24.95	27.78	33.76	3.51
3	410	30	5	1	78.38	17.67	3.95	30.67	29.67	30.23	9.43
3R	410	30	5	1	76.71	19.41	3.88	32.18	27.51	29.81	10.5
4	410	30	5	5	76.7	17.12	6.18	28.91	28.37	31.54	11.18
4R	410	30	5	5	77.01	17.62	5.37	28.95	27.78	32.36	10.91
5	410	60	1	1	75.87	19.67	4.46	35.83	28.61	30.76	4.8
5R	410	60	1	1	74.87	18.01	7.12	35.18	26.69	30.92	7.21
6	410	60	1	5	77.76	20.32	1.92	36.88	26.2	27.81	9.11
6R	410	60	1	5	74.29	20.07	5.64	36.43	25.67	32.01	5.89
7	410	60	5	1	74.04	20.86	5.1	41.32	23.53	27.81	7.34
7R	410	60	5	1	76.68	18.04	5.28	40.25	23.21	28.61	7.93
8	410	60	5	5	72.99	21.27	5.74	39.14	26.13	26.32	11.37
8R	410	60	5	5	74.83	20.14	5.03	39.24	28.91	25.73	9.12
9	450	30	1	1	70.98	24.76	4.26	32.17	30.91	31.28	5.64
9R	450	30	1	1	68.9	24.71	6.39	33.84	30.19	29.38	6.59
10	450	30	1	5	67.66	25.61	6.73	34.8	30.07	30.15	4.98
10R	450	30	1	5	66.93	26.09	6.98	34.89	32.32	30.78	2.01
11	450	30	5	1	68.9	25.16	5.94	37.92	27.28	26.93	7.87
11R	450	30	5	1	67.56	26.19	6.25	35.76	29.25	26.46	8.53

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
12	450	30	5	5	66.71	26.32	6.97	36.96	31.01	30.52	1.51
12R	450	30	5	5	66.16	25.37	8.47	36.45	31.73	26.01	5.81
13	450	60	1	1	64.15	27.51	8.34	36.21	28.14	25.76	9.89
13R	450	60	1	1	65.58	25.25	9.71	34.12	29.72	26.31	9.85
14	450	60	1	5	70.87	27.92	1.21	36.87	31.63	24.7	6.8
14R	450	60	1	5	70.23	26.94	2.83	38.2	27.67	27.78	6.35
15	450	60	5	1	64.32	26.68	9.00	38.17	35.32	23.16	3.35
15R	450	60	5	1	63.02	26.27	10.71	37.72	35.31	23.33	3.64
16	450	60	5	5	62.87	28.63	8.5	37.04	30.71	22.38	9.87
16R	450	60	5	5	64.13	27.97	7.9	35.89	29.09	25.87	9.15
17	430	45	3	3	69.45	24.07	6.48	36.73	29.35	28.21	5.71
17R	430	45	3	3	71.04	23.93	5.03	34.02	30.53	27.15	8.3
17R	430	45	3	3	70.43	25.28	4.29	35.98	26.69	30.92	6.41

ตาราง ก2 แสดงผลการศึกษากาภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
1	410	60	1	5	76.03	20.2	3.78	36.66	25.94	29.91	7.49
2	430	60	1	5	72.04	24.82	3.14	36.95	24.91	31.68	6.46
3	450	60	1	5	68.55	29.43	2.02	37.53	30.65	29.24	6.58

ตาราง ก3 แสดงผลการศึกษาก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ออกมาจากปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อปริมาณองค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ได้

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	CH ₄ (%wt)	C ₂ H ₄ (%wt)	C ₂ H ₆ (%wt)	C ₃ H ₈ (%wt)	C ₄ H ₁₀ (%wt)
1	410	60	1	5	15.38	0.80	30.50	38.73	14.59
2	430	60	1	5	15.60	1.70	32.42	38.91	11.37
3	450	60	1	5	15.54	2.38	34.71	39.14	8.23

ตาราง ก4 แสดงผลการศึกษาก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
1	410	30	1	5	78.06	17.54	4.4	25.4	26.97	34.01	13.62
2	410	45	1	5	77.62	18.4	3.98	32.29	26.85	28.02	8.19
3	410	60	1	5	76.03	20.2	3.78	36.66	25.94	29.91	7.49

ตาราง ก4 แสดงผลการศึกษาก๊าซไฮโดรคาร์บอนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อปริมาณองค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ได้

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	CH ₄ (%wt)	C ₂ H ₄ (%wt)	C ₂ H ₆ (%wt)	C ₃ H ₈ (%wt)	C ₄ H ₁₀ (%wt)
1	410	30	1	5	11.12	1.89	35.60	36.24	15.15
2	410	45	1	5	14.68	0.97	32.42	38.19	13.74
3	410	60	1	5	15.38	0.80	30.50	38.73	14.59

ตาราง ก6 แสดงผลการศึกษากวาระปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
1	410	60	0	5	80.15	16.43	3.42	14.63	4.01	10.62	70.74
2	410	60	1	5	76.03	20.2	3.78	36.66	25.94	29.91	7.49
3	410	60	2.5	5	73.27	22.92	3.81	37.08	26.69	29.1	7.13
4	410	60	4	5	72.94	22.86	4.24	37.38	27.46	28.35	6.81
5	410	60	5	5	73.91	20.71	5.38	39.19	27.54	26.03	7.24

ตาราง ก7 แสดงผลการศึกษากวาระปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อปริมาณองค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ได้

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	CH ₄ (%wt)	C ₂ H ₄ (%wt)	C ₂ H ₆ (%wt)	C ₃ H ₈ (%wt)	C ₄ H ₁₀ (%wt)
1	410	60	0	5	10.84	3.21	38.60	39.15	8.20
2	410	60	1	5	15.38	0.80	30.50	38.73	14.59
3	410	60	2.5	5	15.47	1.94	32.16	36.21	14.22
4	410	60	4	5	15.64	3.51	32.87	35.90	12.08
5	410	60	5	5	15.68	3.27	33.45	35.13	12.47

ตาราง ก8 แสดงผลการศึกษากวาระความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการแตกตัวน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	Liquid (%wt)	Gas (%wt)	Solid (%wt)	Naphtha (%wt)	Kerosene (%wt)	Diesel (%wt)	Long residue (%wt)
1	410	60	1	blank	81.83	8.15	10.03	22.3	8.66	19.32	49.72
2	410	60	1	1	78.34	12.34	9.32	35.51	27.65	30.84	6
3	410	60	1	5	76.03	20.2	3.78	36.66	25.94	29.91	7.49

ตาราง ก9 แสดงผลการศึกษากาหะความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อปริมาณองค์ประกอบต่างๆที่อยู่ในผลิตภัณฑ์แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่ได้

run	Temp. (oC)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)	CH ₄ (%wt)	C ₂ H ₄ (%wt)	C ₂ H ₆ (%wt)	C ₃ H ₈ (%wt)	C ₄ H ₁₀ (%wt)
1	410	60	1	blank	9.160	0.480	40.530	42.500	7.330
2	410	60	1	1	14.920	0.870	35.800	39.150	9.260
3	410	60	1	5	15.38	0.80	30.50	38.73	14.59

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์เชิงสถิติได้วางภาพแบบการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับ ที่อยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์นั้นมีความสัมพันธ์กันเป็นแบบเส้นตรง

1. สัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

1.1 k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่นำมาทำการศึกษา

1.2 n หมายถึง จำนวนของการทดลองที่ภาวะการทดลองเดียวกัน

1.3 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ (A, B, C, D) แทนปัจจัยที่ต้องการทำการการศึกษา เช่น อุณหภูมิในการทดลอง เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

1.4 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ที่เขียนติดกัน (Combination) เช่น AB, AC, ABC หมายความว่า อันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย (Interaction)

1.5 อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กที่เขียนติดกัน เช่น ab, ac, abc หมายถึงการทดลองที่เกิดจากการรวมกันของอิทธิพลจากปัจจัยต่างๆ เรียกว่า Treatment combination

ในการทดลองที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จะแทนแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ระดับต่ำเป็น -1 และที่ระดับสูงเป็น +1

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบเนฟทาจากปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยความร้อนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ออกแบบการทดลองเป็น 2^k แฟกทอเรียล โดยมีการกำหนดสัญลักษณ์ และระดับของตัวแปร ดังนี้

ตาราง ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการการศึกษา

ตัวแปร	ระดับ	
	(-1) ต่ำ	(+) สูง
A = อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส	410	450
B = เวลา, นาที	30	60
C = ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา, ร้อยละโดยน้ำหนัก	1	5
D = ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น, บาร์	1	5

สัญลักษณ์ที่ใช้แทนการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลในปัจจัยต่างๆ มีความหมายคือ ในการทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ปัจจัยใด แสดงว่าทำการทดลองนั้นที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้น และปัจจัยใดที่ไม่ปรากฏสัญลักษณ์แสดงว่าได้ทำการทดลองนั้นที่ระดับ -1 เช่น

(-1) แสดงว่า ทำการทดลองนั้นที่ระดับ -1 ในทุกปัจจัย

a แสดงว่า ทำการทดลองนั้นที่ระดับของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา +1 และปัจจัยอื่นๆจะทำที่ระดับ -1 ดังนั้นภาวะการทดลองคือ อุณหภูมิ 410 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดัน 1 บาร์

ab แสดงว่า ทำการทดลองนั้นที่ระดับของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น +1 และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็น +1 ส่วนปัจจัยอื่นๆจะทดลองที่ -1

2. ความหมายของคำสำคัญ

อิทธิพลหลัก (Main effect) หมายถึงอิทธิพลของตัวแปรที่ทำการศึกษา

อันตรกิริยา (Interaction) หมายถึง การแสดงให้เห็นว่าระดับต่างๆในปัจจัยหนึ่งนั้นไม่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปยังระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

อิทธิพลแฟกทอเรียล (Factorial effect) หมายถึง อิทธิพลต่างๆ ทั้งที่เป็นอิทธิพลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมดของการทดลองซึ่งจะมีเท่ากัน จำนวนการรวมตัว -1 หรือคือองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom) ของสิ่งที่ทำการทดลอง

3. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลส่วนใหญ่ใช้ในการทดลองที่มีตัวแปรหลายตัวแปร เพื่อศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบที่เกิดขึ้นจากตัวแปรเหล่านั้น กรณีพิเศษในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่สำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่การทดลองมีตัวแปร k ตัวแปร ซึ่งแต่ละตัวแปรจะประกอบไปด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจได้จากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิในการทดลอง ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น หรือเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นต้น หรืออาจได้จากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร ปฏิกรณ์ หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวมานี้จะแทนระดับที่สูงหรือต่ำของตัวแปรหนึ่งๆ หรือบ่งบอกถึงการมีหรือไม่มีของตัวแปรนั้นๆก็ได้ โดยใน 1 เวกเตอร์ที่บริบูรณ์ของการออกแบบลักษณะนี้จะเรียกว่าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบ 2^k ต่อการทดลองที่มีตัวแปรจำนวนมากจะช่วยให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของตัวแปรทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบ 2^k จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับกรองตัวแปรที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง

4. สูตรในการคำนวณ

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_T)

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

5. Sum of Squares Error (SS_E)

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

6. Mean of Square (MS)

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

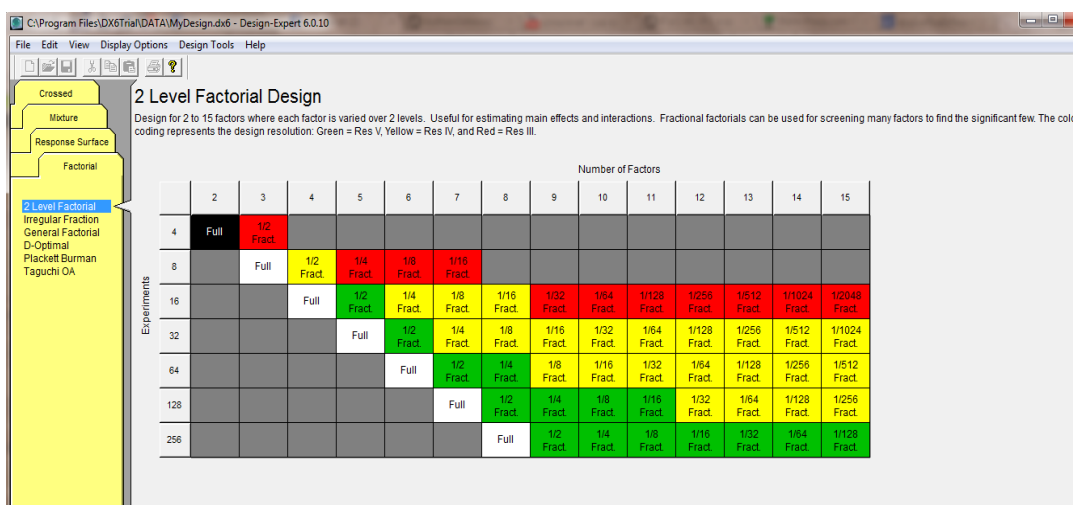
7. % Normal Probability = $[(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100]$

Total Cumulative frequency

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

5. การใช้โปรแกรม Design-Expert ในการคำนวณ

1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรม จะไปคลิกที่ file ----> New Design แสดงดังภาพ ข2



ภาพที่ ข2 แสดงตารางของ 2 Level factorial design

2. ทำการเลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง โดยในการทดลองนี้จะศึกษาอิทธิพลของ อุณหภูมิ เวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น คือทั้งหมด 4 ตัวแปร เลือกที่ Full ของช่อง 4 จากนั้นกรอกจำนวนที่ทำการทดลองซ้ำช่อง Replicates และกรอกจำนวนที่ทำการทดลองซ้ำค่ากลาง ช่อง Center point per block ยกตัวอย่าง Replicates = 2, Center point per block = 3 กดที่ Continue จะปรากฏภาพดังแสดงในภาพที่ 3x เมื่อกรอกตัวแปรทั้งหมดเสร็จคลิกที่ Continue

	Name	Units	Type	Low	High
A:	A		Numeric	-1	1
B:	B		Numeric	-1	1
C:	C		Numeric	-1	1
D:	D		Numeric	-1	1

	Name	Units	Type	Low	High
A:	temperature		Numeric	410	450
B:	pressure		Numeric	1	5
C:	time		Numeric	30	60
D:	Amount cataly		Numeric	1	5

ภาพที่ 3x แสดงตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

3. เลือก Responses กรอกชื่อ Responses หรือผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบที่เราต้องการ พร้อมกรอก Unit หรือหน่วยของตัวแปรนั้นๆ ดังแสดงในภาพที่ 4x เมื่อกรอกข้อมูลทั้งหมดเสร็จคลิกที่ 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	

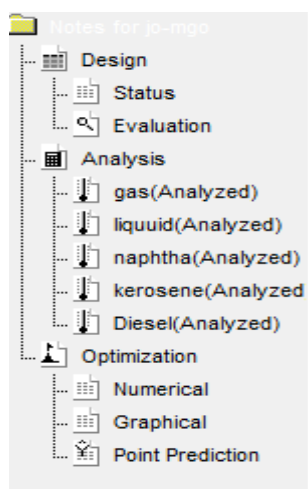
ภาพที่ 4x แสดง Response และ หน่วยที่ต้องการของการทดลอง

4. จากนั้นโปรแกรมจะขึ้นตัวแปรที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ตัวอย่างเช่น มีผลการทำการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง ทำการทดลองซ้ำการทดลองละ 2 ครั้ง ทำการทดลองที่ค่ากลาง 1 การทดลองโดยทำซ้ำ 3 ครั้ง รวมจะได้ผลการทดลองทั้งหมด 19 การทดลอง จากนั้นนำข้อมูล ตัวแปรต่างๆในการทดลองกรอกในช่องดังแสดงในภาพที่ ข5

Std	Run	Block	Factor 1 A:Temperature oC	Factor 2 B:Time min	Factor 3 C:Catalyst %wt	Factor 4 D:Pressure bar	Response 1 gas %wt	Response 2 liquid %wt	Response 3 naphtha %wt	Response 4 kerosene %wt	Response 5 diesel %wt
2	1	Block 1	410.00	30.00	1.00	1.00	13.23	70.89	22.77	32.81	37.57
21	2	Block 1	410.00	60.00	1.00	5.00	18.32	79.76	36.88	26.2	27.81
3	3	Block 1	450.00	30.00	1.00	1.00	20.76	66.98	32.17	30.91	31.28
31	4	Block 1	450.00	60.00	5.00	5.00	28.63	70.87	37.04	30.71	22.38
15	5	Block 1	450.00	60.00	5.00	1.00	26.27	63.02	38.17	35.32	23.16
24	6	Block 1	450.00	60.00	1.00	5.00	23.92	70.87	35.87	32.63	24.7
4	7	Block 1	450.00	30.00	1.00	1.00	21.71	67.9	33.84	30.19	29.38
27	8	Block 1	450.00	30.00	5.00	5.00	25.37	69.16	36.45	31.73	26.01
28	9	Block 1	450.00	30.00	5.00	5.00	23.32	68.71	36.96	31.01	30.52
33	10	Block 1	430.00	45.00	3.00	3.00	24.93	71.04	34.02	30.53	27.15
19	11	Block 1	450.00	30.00	1.00	5.00	21.61	72.66	34.8	30.07	30.15
1	12	Block 1	410.00	30.00	1.00	1.00	12.64	71.62	23.27	32.97	36.17
25	13	Block 1	410.00	30.00	5.00	5.00	17.12	76.7	28.91	28.37	31.54
30	14	Block 1	410.00	60.00	5.00	5.00	21.27	72.99	39.14	23.17	26.32
9	15	Block 1	410.00	30.00	5.00	1.00	15.67	79.38	30.67	29.67	30.23
6	16	Block 1	410.00	60.00	1.00	1.00	19.67	70.87	35.83	28.61	30.76
20	17	Block 1	450.00	30.00	1.00	5.00	21.09	72.93	34.89	32.32	30.78
11	18	Block 1	450.00	30.00	5.00	1.00	25.16	66.9	37.92	27.28	26.93
8	19	Block 1	450.00	60.00	1.00	1.00	22.51	64.15	36.21	28.14	25.76
22	20	Block 1	410.00	60.00	1.00	5.00	18.07	79.29	36.43	25.67	32.01
14	21	Block 1	410.00	60.00	5.00	1.00	22.86	76.04	41.32	23.53	27.81
7	22	Block 1	450.00	60.00	1.00	1.00	24.25	65.58	34.12	29.72	26.31
29	23	Block 1	410.00	60.00	5.00	5.00	20.14	74.83	39.24	25.91	25.73
16	24	Block 1	450.00	60.00	5.00	1.00	26.68	64.32	37.72	35.31	23.33

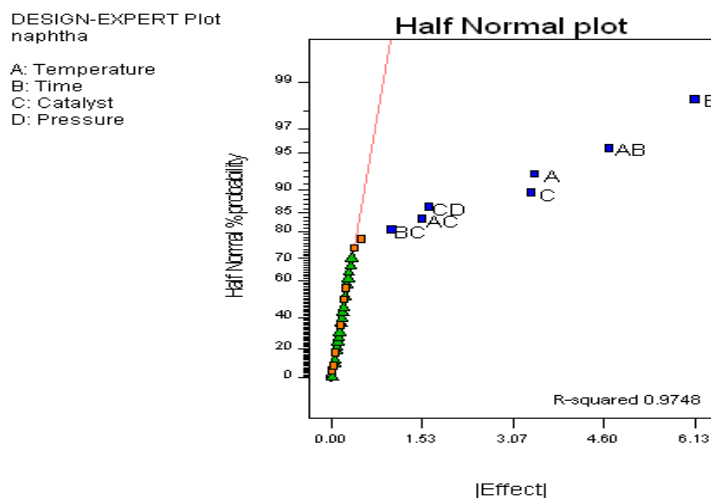
ภาพที่ ข5 แสดงข้อมูลการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยโปรแกรม Design-Expert โดยไปคลิกข้อมูลที่ ต้องการให้โปรแกรมวิเคราะห์ ตัวอย่างเช่น ต้องการวิเคราะห์ผลของ Liquid ทำโดยไปคลิกที่ Liquid ดังแสดงในภาพที่ ข6 จากนั้นไปคลิกที่ Effect



ภาพที่ ข6 แสดงแถบของ gas liquid kerosene และ diesel

6. เมื่อคลิก Effect จากนั้นทำการเลือกจุดที่ปรากฏในกราฟ Normal Probability Plot เพื่อให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ ๗



ภาพที่ ๗ Half Normal probability plot

จากภาพบ่งบอกได้ว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรง ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับเวลา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างเวลากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา

7. คลิกที่คำว่า ANOVA เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณและเป็นการยืนยันผลของ Normal probability ดังแสดงในภาพที่ ๗8

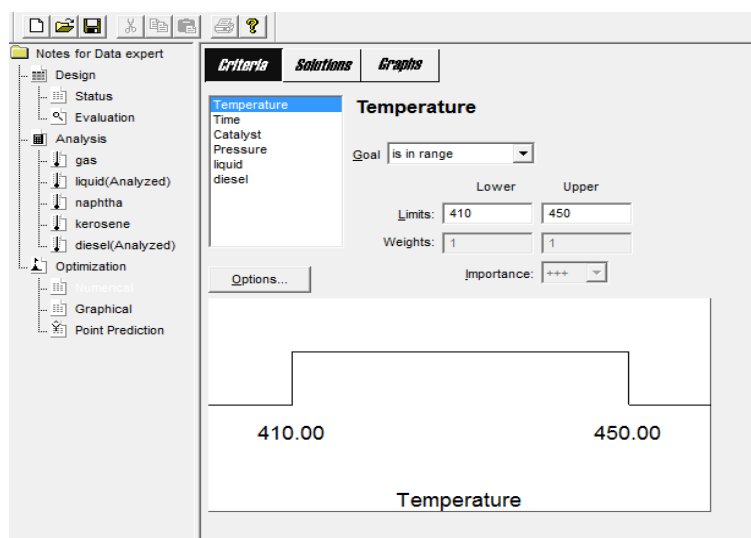
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	781.88	6	130.31	62.60	< 0.0001	significant
A	502.37	1	502.37	241.34	< 0.0001	
B	27.62	1	27.62	13.27	0.0011	
D	90.42	1	90.42	43.44	< 0.0001	
AC	33.11	1	33.11	15.91	0.0005	
CD	91.84	1	91.84	44.12	< 0.0001	
ACD	36.53	1	36.53	17.55	0.0003	
Curvature	5.90	1	5.90	2.83	0.1039	significant
Residual	56.20	27	2.08			

ภาพที่ ๗8 แสดงการคำนวณผลของ ANOVA

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์นั้นอย่างมีนัยสำคัญ

8. วิเคราะห์ตัวแปรอื่นๆ โดยใช้วิธีเช่นเดียวกันกับข้อ 5-7

9. หาภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง โดยคลิกที่ numerical --- > พร้อมใส่ขอบเขตที่ต้องการในช่อง Limit ดังแสดงในภาพที่ ข 9



ภาพที่ ข 9 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

10. คลิกที่ Solution จะได้ภาวะที่เหมาะสมออกมาดังแสดงในภาพที่ ข10

Constraints						
Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Temperature	is in range	410	450	1	1	3
Time	is in range	30	60	1	1	3
Catalyst	is in range	1	5	1	1	3
Pressure	is in range	1	5	1	1	3

Solutions						
Number	Temperature*	Time*	Catalyst*	Pressure*	Desirability	
1	419.04	39.23	4.57	2.41	1.000	Selected
2	438.00	55.71	1.65	2.24	1.000	
3	410.59	58.34	1.16	3.17	1.000	
4	443.46	46.00	2.02	3.10	1.000	
5	421.47	33.99	1.60	1.42	1.000	
6	437.72	50.33	3.74	3.57	1.000	
7	440.71	33.20	2.19	3.07	1.000	
8	440.13	31.86	2.85	3.47	1.000	
9	432.36	47.90	1.71	4.98	1.000	
10	426.99	39.34	1.71	2.32	1.000	

ภาพที่ ข 10 แสดงภาวะที่เหมาะสมและขอบเขตของการทดลอง

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด (Boiling Distribution)

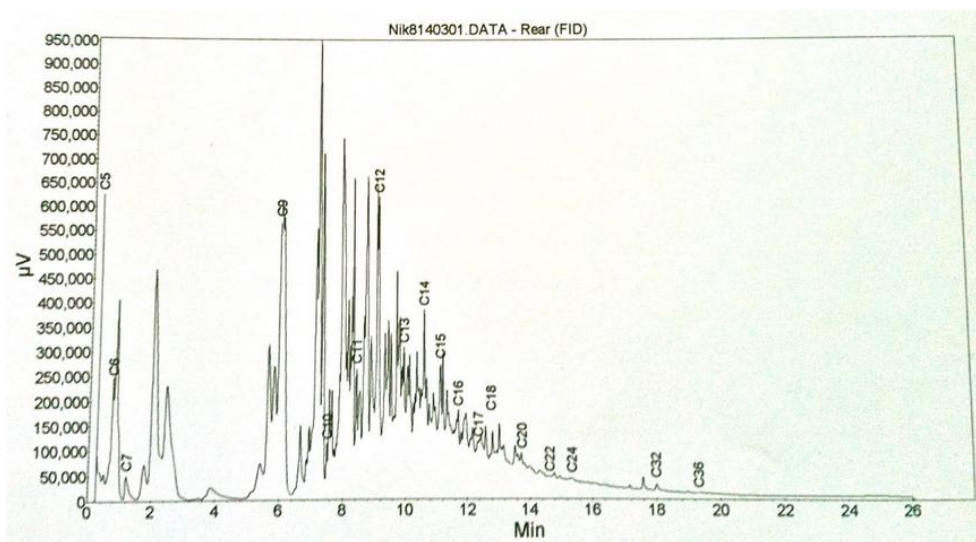
การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography โดยจะวิเคราะห์ตามจุดเดือดของแต่ละสารดังต่อไปนี้

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

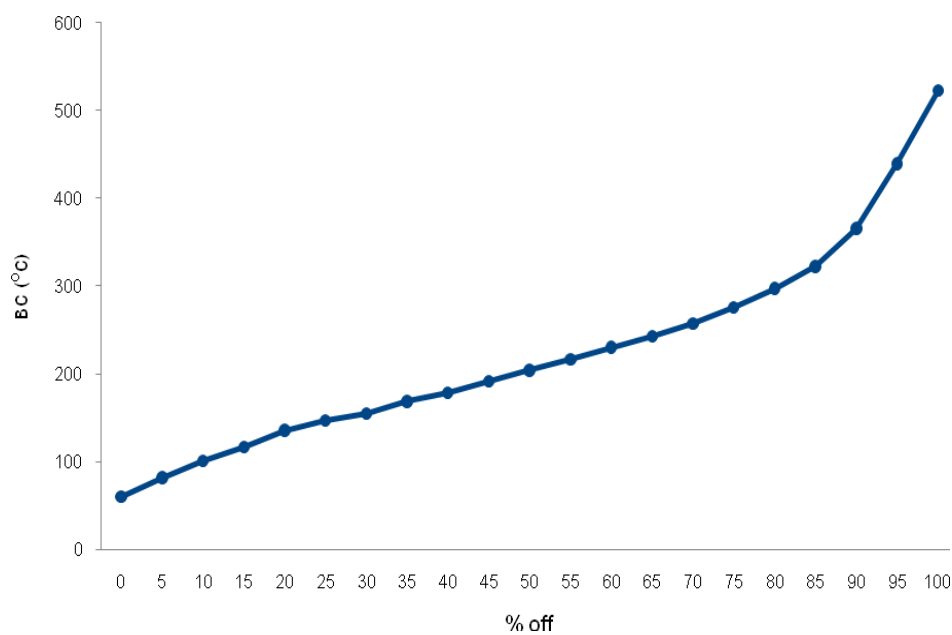
การวิเคราะห์ทำได้โดยเริ่มต้นจากการเตรียมสารตัวอย่างคือนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปทำการละลายในสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) ในอัตราส่วน 1 ต่อ 100 โดยปริมาตร หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆตามมาตรฐาน ASTM D2887 พร้อมทั้งมีดีเทคเตอร์แบบ FID มีการใช้ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation ส่วนคอลัมน์ที่ใช้จะเป็น Capillary column มี stationary phase คือ CP-SIL 5CB ที่ยาว 15 เมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และมีความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมครอน ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์คือที่อุณหภูมิหัวฉีด (Injector Temperature) 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ (Column Temperature or Oven Temperature) 30-320 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียส ต่อนาที อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Detector Temperature) 320 องศาเซลเซียส และมี carrier gas เป็นแก๊สฮีเลียมที่อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วย split ratio 2

ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม Simulated Distillation โดยจะทำการเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 (Standard)

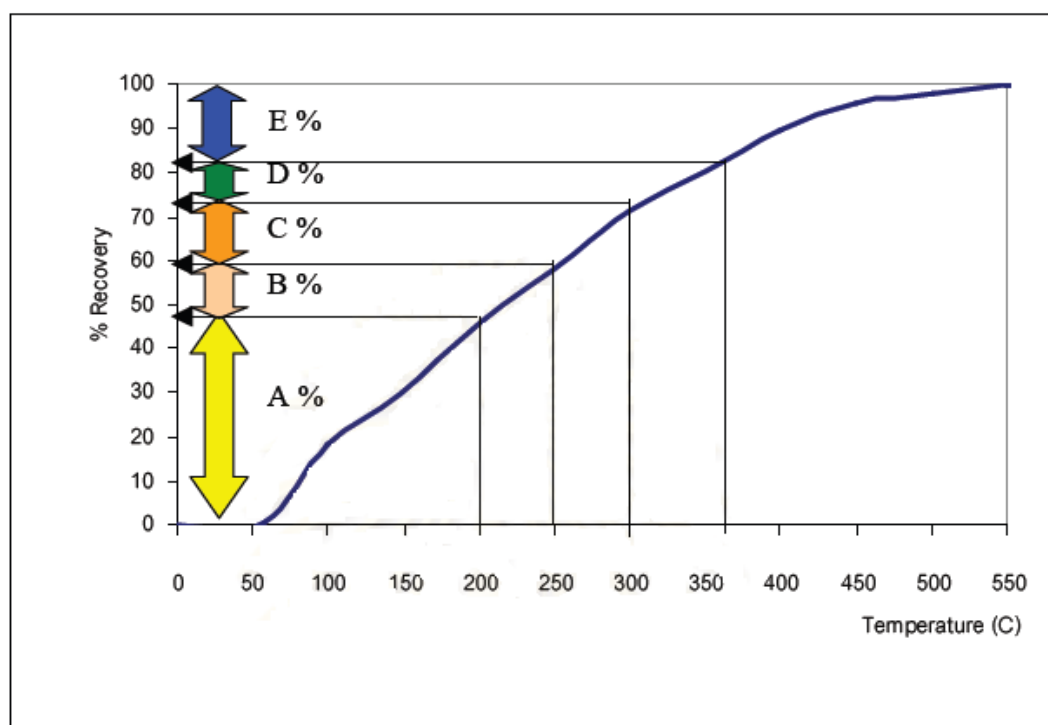


ภาพที่ ค1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



ภาพที่ ค2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน (%off) กับจุดเดือดของสาร

ตัวอย่างการคำนวณ



ภาพที่ ค3 ตัวอย่างกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องมือ Simulated Distillation Gas Chromatography และการคำนวณปริมาณขององค์ประกอบต่าง ๆ

การคำนวณหาปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบน้ำมันตามคาบจุดเดือด

ปริมาณ naphtha ที่อ่านจากกราฟ A %

$$\text{ดังนั้น \% naphtha ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = (A \times W)/100$$

ปริมาณ kerosene ที่อ่านจากกราฟ B%

$$\text{ดังนั้น \% kerosene ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = (B \times W)/100$$

ปริมาณ light gas oil ที่อ่านจากกราฟ C%

$$\text{ดังนั้น \% light gas oil ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม} = (C \times W)/100$$

ปริมาณ gas oil ที่อ่านจากกราฟ D%
ดังนั้น % gas oil ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม = $(D \times W)/100$

ปริมาณ long residue ที่อ่านจากกราฟ E%
ดังนั้น % long residue ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน W กรัม = $(E \times W)/100$

ภาคผนวก ง

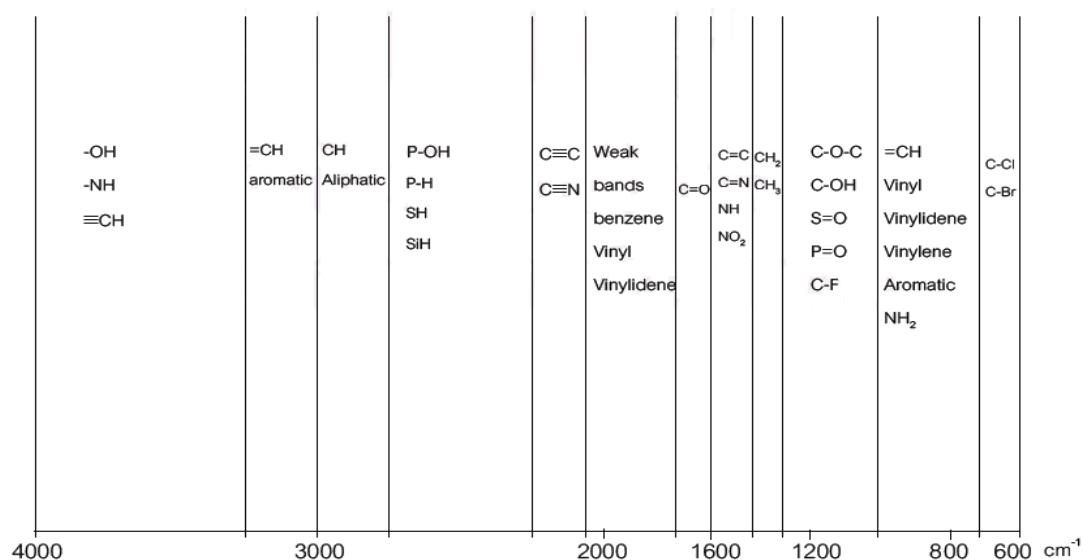
การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย FT – IR

การพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrophotometer จะแบ่งการพิจารณาแถบการดูดกลืน Infrared Spectrum ออกเป็น 3 ช่วง คือ

1. ช่วงความถี่ $1300 - 1400 \text{ cm}^{-1}$ เรียกว่า Functional group regional เป็นช่วงที่บ่งบอกถึงชนิดของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุล ถ้าหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันในช่วงนี้เลยจะเป็นการแสดงให้เห็นว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่ในโมเลกุลสารตัวอย่าง แต่ทั้งนี้การแปลความหมายจากข้อมูลที่ได้ต้องทำอย่างระมัดระวัง เนื่องจากโครงสร้างบางชนิดให้แถบดูดกลืนที่กว้างจนยากต่อการสังเกต

2. ช่วงความถี่ $910 - 1300 \text{ cm}^{-1}$ เรียกว่า Finger print regional ซึ่งแถบดูดกลืนในช่วงนี้มีความซับซ้อนมาก แต่แถบที่ปรากฏนั้นจะมีลักษณะเฉพาะของโมเลกุลในแต่ละชนิด ซึ่งจะช่วยให้ยืนยันว่าสารทั้ง 2 ที่สงสัยว่าเป็นสารเดียวกันเป็นสารเดียวกันจริงหรือไม่ สามารถทำได้โดยการเทียบสเปกตรัมของสารตัวอย่างในตัวอย่างกลางชนิดเดียวกัน หากปรากฏแถบการดูดกลืนในช่วงนี้เหมือนกันหรือทับกันทุกตัวแสดงว่าเป็นสารเดียวกัน

3. ช่วงความถี่ $650 - 910 \text{ cm}^{-1}$ จะบ่งบอกถึงการจัดตัวของหมู่แทนที่บนวงแหวนสารประกอบแอโรแมติก ซึ่งหากไม่ปรากฏแถบการดูดกลืนบริเวณนี้จะแสดงว่าสารตัวอย่างไม่มีองค์ประกอบเป็นแอโรแมติก

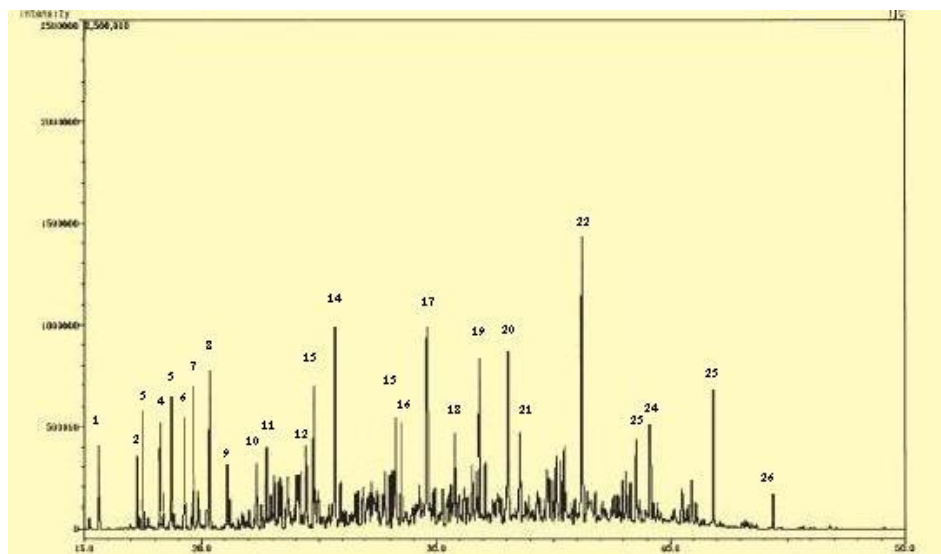


ภาพที่ ง1 แถบการดูดกลืนของ Infrared Spectra ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

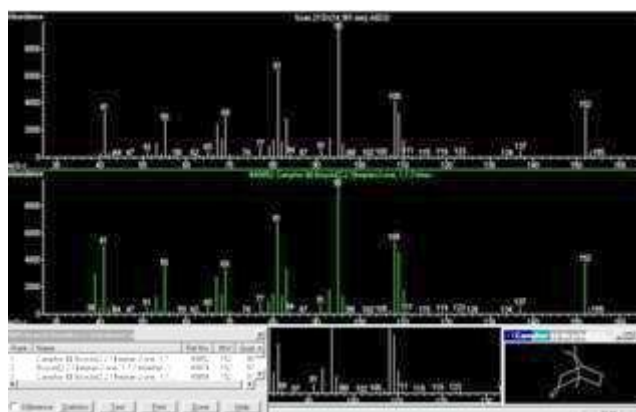
ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วย GC-MS

Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) เป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีในผลิตภัณฑ์น้ำมันได้อย่างค่อนข้างแม่นยำโดยอาศัยการเปรียบเทียบ Fingerprint ของเลขมวล (Mass number) ขององค์ประกอบนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ใน Library



ภาพที่ จ1 Interpreting spectra ที่ได้จากเครื่อง GC-MS



ภาพที่ จ2 Library search result

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกฤษณ์ ปิ่นเวหา เกิดเมื่อวันที่ 17 เมษายน 2530 ที่จังหวัดอุดรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554