การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

นางสาวกรกช จันทร์โสภาพิศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CATALYTIC CRACKING OF BEEF TALLOW ON Fe/ACTIVATED CARBON

Miss Korrakot Chansopapit

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 2009
Copyright of Chulalongkorn University

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

โดย น.ส.กรกช จันทร์โสภาพิศ

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

.... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรกช จันทร์โสภาพิศ : การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์. (CATALYTIC CRACKING OF BEEF TALLOW ON Fe/ACTIVED CARBON) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์, 120 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบแบตช์ อิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและสัดส่วนของแนฟทาที่เหมาะสม ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ 400-430 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.25-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน และเมื่อทำการวิเคราะห์โดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อสัดส่วนของแนฟทาคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ภาวะที่เหมาะสมของการทดลองคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 69.51 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ โดยให้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 68.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ได้มีปริมาณสัดส่วนของแนฟทา เคโรซีน และ ดีเซล 33.68 9.22 และ 21.00 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละการเปลี่ยน 95.29 โดยน้ำหนัก

ภาควิชา......เคมีเทคนิค..................ลายมือชื่อนิสิต......กรกช จันทร์โสภาพิศ......

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค..................ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก........................

ปีการศึกษา..2552.........

5172205723: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: CATALYTIC CRACKING/ Fe/ACTIVED CARBON/NAPHTHA

KORRAKOT CHANSOPAPIT: CATALYTIC CRACKING OF BEEF TALLOW ON Fe/ACTIVATE CARBON. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF. THARAPONG VITIDSANT,Ph.D., 120 pp.

The main objective of this research was aimed to study the catalytic cracking of beef tallow on Fe/Activate carbon into liquid fuels. The two level factorial experimental design was used to study the effect of operating conditions over yield of hydrocarbon fuel where performed in a batch microreactor at temperature of 400-450 °C, time of reaction of 30-90 minutes, Fe/Activate carbon 0.25-1 wt%, and initial hydrogen pressure of 1-5 bar. From the results, it was found that temperature and residence time were significantly affected to liquid fuels. The analyzed liquid fuels from Gas Chromatography (GC Simulated Distillation) was found that temperature, residence time, interaction between temperature and residence time, and interaction between temperature and initial hydrogen pressure were significantly affected to naphtha fraction. The optimum values of reaction temperature of 400 °C, Fe/Activate carbon 0.75 wt%, time of reaction of 69.51 minutes, and initial hydrogen pressure 1 bar were obtained for maximum yield of liquid fuels 68.14 wt%, naphtha fraction 33.68 wt%, kerosene fraction 9.22 wt% , diesel fraction 21 wt% and conversion with liquid fuels 95.29 wt%.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Chemical Technology Student's Signature C. Korrakot

Field of Study : Chemical Technology Advisor's Signature T. Vitidsant

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อ.ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการ (ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก) ที่กรุณาให้ความเห็น คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติ ด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ซึ่งต้องขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลืออำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู สั่งสอน ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย..	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..	จ
กิตติกรรมประกาศ..	ฉ
สารบัญ..	ช

บทที่

1	บทนำ..	1
	1.1 วัตถุประสงค์...	2
	1.2 ขอบเขตของงานวิจัย..	2
	1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้..	2
	1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย...	2
2	ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง...	4
	2.1 ไขวัว..	4
	2.2 ชนิดของกรดไขมัน..	4
	2.2.1 กรดไขมันอิ่มตัว...	5
	2.2.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว...	6
	2.3 สมบัติทางกายภาพของกรดไขมัน..	8
	2.3.1 โครงสร้างของกรดไขมัน..	8
	2.3.2 จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของกรดไขมัน....................................	8
	2.3.3 กรดไขมันที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากัน................................	8
	2.4 การเหม็นหืน..	8
	2.5 ปฏิกิริยาคะตะไลซิส..	10
	2.5.1 ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบเอกพันธุ์...	10
	2.5.2 ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์..	10
	2.5.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์..	10
	2.6 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา...	10

บทที่		หน้า
	2.6.1 วิธีการตกตะกอน	10
	2.6.2 วิธีการแบบฝัง	11
	2.7 ตัวรองรับ	12
	2.7.1 หน้าที่ของตัวรองรับ	12
	2.7.2 การเลือกตัวรองรับ	12
	2.8 ถ่านกัมมันต์	13
	2.8.1 วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์	13
	2.8.2 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	13
	2.8.3 ลักษณะและชนิดของถ่านกัมมันต์	16
	2.8.4 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์	18
	2.8.5 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์	19
	2.8.6 การดูดซับของถ่านกัมมันต์	23
	2.9 ซีโอไลต์	24
	2.10 กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน	26
	2.10.1 การเริ่มต้น	27
	2.10.2 การเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่	27
	2.10.3 การหยุดปฏิกิริยา	27
	2.11 กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	29
	2.12 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม	34
	2.13 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมัน	35
	2.14 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง	41
	3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	53
	3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี	53
	3.3 การดำเนินการวิจัย	53
	3.3.1 การวิเคราะห์กรดไขมันเบื้องต้นของไขวัว	53
	3.3.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ	53

บทที่ หน้า

3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด........... 54

3.3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบไขวัวด้วยแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์........... 54

3.3.5 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์........... 54

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย........... 55

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ........... 55

3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง........... 55

4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง........... 56

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น........... 58

4.2 การกำหนดภาวะที่ใช้ในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์........... 59

4.3 ผลการทดลองที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลว........... 60

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์........... 60

4.3.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดของแนฟทา (naphtha)........... 66

4.3.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดดีเซล (diesel)........... 73

4.3.4 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน(conversion) จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์........... 78

4.4 การเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดที่ภาวะต่างๆ........... 85

4.4.1 การศึกษาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะเหมาะสมเปรียบเทียบกับภาวะต่างๆจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์........... 86

บทที่		หน้า
	4.4.2 การศึกษาร้อยละการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดที่ภาวะเหมาะสมเปรียบเทียบกับภาวะต่างๆจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์	87
	4.5 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน	90
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	92
	5.1 สรุปผลการทดลอง	92
	5.2 ข้อเสนอแนะ	93
รายการอ้างอิง		94
ภาคผนวก		98
	ภาคผนวก ก	99
	ภาคผนวก ข	101
	ภาคผนวก ค	111
	ภาคผนวก ง	112
	ภาคผนวก จ	113
	ภาคผนวก ฉ	114
	ภาคผนวก ช	117
	ภาคผนวก ซ	118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		120

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบร้อยละโดยมวลของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของไขมันสัตว์และน้ำมันพืช..	5
2.2	สมบัติและโครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวบางชนิด........	7
2.3	ขนาดของโมเลกุลในน้ำมันประเภทต่างๆ…………………………………....	27
3.1	ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/ถ่านกัมมันต์	53
3.2	วิธีการทดลองโดยการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม Design-Expert……..	54
4.1	องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของไขวัวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น..	58
4.2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันของไขวัว...	58
4.3	ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์…..	61
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์...	63
4.5	การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา (naphtha) และดีเซล (diesel)..	67
4.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา (naphtha)…...	69
4.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล (diesel)..	75
4.8	ค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์…………………………..	79
4.9	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์………………………….....	81
4.10	ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design – Expert 6.0.10	85

ตารางที่		หน้า

4.11 ค่าเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 กับ ค่าที่ได้จากการทดลองจริง........ 85
4.12 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน........ 91
5.1 เปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมกับภาวะต่างๆ........ 93
ก1 ผลการทดลองจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ที่ภาวะการทดลองต่างๆ........ 99
ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา........ 101
ค1 แสดงองค์ประกอบของไขวัวโดยการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์........ 111
ง1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว และ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว calcine ที่อุณหภูมิ 500 °C........ 112
ฉ1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว calcine ที่อุณหภูมิ 500 °C........ 114

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 ไขมันจากสัตว์ 6
2.2 ไขมันจากพืช 7
2.3 โครงสร้างของกรดไขมัน........ 8
2.4 สารประกอบประเภทฟีนอล........ 9
2.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอไนซ์........ 14
2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์........ 15
2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพ........ 16
2.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพโดยมีการกำจัดโมเลกุลแปลกปลอม........ 16
2.9 เปรียบเทียบขนาดและการวางตัวของรูพรุนขนาดต่าง ๆ........ 18
2.10 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์........ 20
2.11 การเคลื่อนที่ของไพอิเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์........ 20
2.12 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์........ 21
2.13 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด........ 22
2.14 ตัวอย่างการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นเบส........ 23
2.15 การแตกตัวของโมโนกลีเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์........ 25
2.16 ชนิดของ acid site ของสารประกอบซีโอไลต์........ 25
2.17 ชนิดของโซ่กิ่งและสารประกอบแอโรแมติก........ 26
2.18 การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของการแตกตัวด้วยความร้อน........ 29
2.19 การเกิดคาร์โบเนียมอิออน........ 31
2.19.1 ปฏิกิริยาห่วงโซ่ของคาร์โบเนียมอิออน........ 32
2.19.2 ปฏิกิริยาห่วงโซ่ของคาร์โบเนียมอิออน........ 32
2.20 ปฏิกิริยาลำดับสอง........ 33
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 250 มิลลิลิตร........ 41
3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลและเครื่องเขย่า...... 42
3.3 ชุดกรองสุญญากาศ และกระดาษกรองใยแก้ว........ 42

ภาพที่		หน้า
3.4	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น..	43
3.5	แก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์..	45
3.6	ส่วนประกอบพื้นฐานของ GC..	45
3.7	ส่วนประกอบพื้นฐานของ MS..	46
3.8	Electron Ionization..	47
3.9	Chemical Ionization..	47
3.10	กลไกการเกิด fragment ของ EI และ CI..	48
3.11	Quadrupole Detector..	48
3.12	Electron Multiplier Schematic..	49
3.13	Interpreting spectra..	49
3.14	Library search results..	50
3.6	เครื่อง BET surface area analysis..	51
4.1	Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์..	63
4.2	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์..	64
4.3	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์..	65
4.4	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแก๊สที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์..	65
4.5	Normal probability plot ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา..	68
4.6	ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์..	70

ภาพที่		หน้า
4.7	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทาที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์............................	71
4.8	ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ความดันไฮโดรเจน ริ่มต้น 3 บาร์...........................	72
4.9	ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที..	73
4.10	Normal probability plot ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล.......................................	74
4.11	ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์.............................	76
4.12	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซลที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์........................	77
4.13	ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซลที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์...	78
4.14	Normal probability plot ของค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์..	81
4.15	ผลของอุณหภูมิต่อที่ค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์...	82
4.16	ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) ที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์..	83

ภาพที่ หน้า

4.17 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์.. 84

4.18 ผลของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะต่างๆที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 69.51 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์.. 87

4.19 ผลของการกระจายตัวผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ภาวะต่างๆที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 69.51 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์.. 89

ข1 ตารางของ 2 Level Factorial Design.. 103

ข2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง... 104

ข3 Responses และ หน่วยที่ต้องการของการทดลอง.. 104

ข4 ตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ.. 105

ข5 แถบของ gas liq conversion naphtha และ diesel... 106

ข6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % probability กับ Effect ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน... 106

ข7 การคำนวณผลของ ANOVA... 107

ข8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับ Studentized Residuals... 108

ข9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับผลิตภัณฑ์น้ำมัน.. 108

ข10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์น้ำมัน.......................... 109

ข11 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง.. 109

ข12 ภาวะเหมาะสมและขอบเขตของการทดลอง... 110

จ1 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10% เหล็ก/ถ่านกัมมันต์... 113

ฉ1 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว... 115

ฉ2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว cal 500 ºC.................................... 115

ฉ3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated..... 116

บทที่ 1

บทนำ

การใช้ปริมาณน้ำมันในปัจจุบันมีจำนวนมากขึ้นและนับวันเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆโดยแหล่งที่มาส่วนใหญ่เกิดจากการขุดเจาะและสำรวจทางปิโตรเคมี ไม่นานนักแหล่งต่างๆนี้จะหมดลง ดังนั้น จึงพยายามมองหาทางเลือกใหม่ที่เป็นการนำสิ่งที่มีอยู่และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมพลังงานเชื้อเพลิงทางชีวภาพ (Biofuels) จึงเป็นพลังงานที่น่าสนใจ เนื่องจากจำนวนประชากรของโลกได้เพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นปริมาณการบริโภคอาหารจึงมากขึ้น ทำให้มีการบริโภคเนื้อสัตว์มากขึ้น และเนื้อสัตว์จะมีในส่วนที่เรียกว่าไขมัน ซึ่งในส่วนนี้ในเนื้อวัวนั้นไม่นิยมนำมาบริโภค รวมทั้งมีราคาที่ค่อนข้างถูก สามารถหาได้ง่าย อีกทั้งโครงสร้างของไขวัวเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ค่อนข้างยาว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเห็นว่าไขวัวมีความน่าสนใจที่จะนำมาศึกษาเพื่อหาพลังงานทางเลือกใหม่ในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน ซึ่งในปัจจุบันก็ได้มีการนำไขวัวมาผลิตเป็นไบโอดีเซล แต่เนื่องจากการผลิตไบโอดีเซลพบว่าปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์เกิดเป็นไบโอดีเซลเพียงบางครั้ง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าไขวัวมีคุณภาพไม่สม่ำเสมอ

เนื่องจากสารตั้งต้นที่ได้ทำการศึกษามีขนาดโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีความพยายามศึกษากระบวนการที่จะทำให้สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ให้กลายมีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงโดยขบวน การที่น่าสนใจคือ กระบวนการแตกตัว (Cracking) ซึ่งกระบวนนี้สามารถแบ่งออกเป็นหลายส่วน โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่ง (Catalytic Cracking) และ กระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม(Hydrocracking)

กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) เป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนสูงเป็นระยะเวลาที่ยาวนานโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็น C1-C4 ในส่วนของกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking) เป็นกระบวนที่ใช้ตัวเร่งมาช่วยในการแตกตัวโดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นแกโซลีน และสุดท้ายกระบวนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) เป็นกระบวนการที่คล้ายกับกระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งแต่จะมีการเติมไฮโดรเจนร่วมด้วยทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นสายที่เป็นพาราฟินส์มากขึ้น

โดยการศึกษาในส่วนของวิธีการทดลองจะใช้ Design of Experimental และการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบ Analysis of Variance ซึ่งการออกแบบการทดลองนี้จะช่วยให้ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนไขวัวไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว รวมทั้งช่วยในการหาภาวะที่เหมาะที่สุดต่อการทดลองซึ่งวิธีการทดลองสามารถเชื่อถือได้ 95% รวมทั้งช่วยลดปริมาณการทดลองและสามารถ

ครอบคลุมการทดลองได้ทั้งหมด วิธีนี้เป็นวิธีที่น่าสนใจ ในงานวิจัยนี้ก็จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปร เช่น อุณหภูมิ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น และ ตัวเร่งปฏิกิริยา ในการแตกสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนในไขวัวที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลที่เล็กลงและกลายเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปิโตรเลียม

1.1 วัตถุประสงค์

ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการแตกตัวของไขวัว เช่น อุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในปฏิกิริยา ซึ่งศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ที่ให้ร้อยละและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันดีที่สุด ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัว
2. ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปิโตรเลียม

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เตรียมวัตถุดิบ สารเคมีและเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
3. หาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวไขวัวที่ใช้แล้ว ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส, เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-90 นาที ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ เหล็กบนถ่านกัมมันต์ในปริมาณ 0.25 – 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
4. วิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการ กลั่น (DGC)

5. วิเคราะห์หาชนิดองค์ประกอบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างละเอียดด้วย แก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC/MS)

6. วิเคราะห์พื้นที่ผิวสัมผัสของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET)

7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยชิ้นนี้ โดยมีหัวข้อหลักดังนี้ ไขวัว ชนิดของกรดไขมัน สมบัติทางกายภาพของกรดไขมัน การเหม็นหืนปฏิกิริยาคะตะไลซิส การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวรองรับ ถ่านกัมมันต์ ซีโอไลต์ กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมัน และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไขวัว [10]

ไขวัวได้จากการเจียวไขมันวัวที่อุณหภูมิต่ำ (32 องศาเซลเซียส) เป็นเวลาหลายวันจนน้ำมันบางส่วนแข็งตัว ส่วนที่แข็งตัวเป็นไขมันชื่อ โอลิโอสเตียริน ส่วนที่ไม่แข็งตัวเป็นน้ำมันโอลีโอ ใช้วิธีกรองแยกให้ออกจากกันได้ แต่ก่อนใช้น้ำมันโอลีโอทำเนยเทียมจึงเรียกชื่อเนยเทียม องค์ประกอบส่วนใหญ่ของไขวัวเป็นกรดไขมันอิ่มตัว จะมีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวก็จะมีสถานะเป็นของเหลว เช่น น้ำมันมะกอก น้ำมันข้าวโพดและน้ำมันถั่วเหลือง บริโภคไขมันที่ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวเป็นปริมาณมากอาจมี ผลเสียต่อร่างกาย เพราะอาจเป็นสาเหตุทำให้หลอดเลือดอุดตันได้

การเหม็นหืนเกิดจากออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมัน ได้แอลดีไฮด์และกรดไขมันโมเลกุลเล็กๆ ซึ่งมีกลิ่นเหม็นหืน นอกจากนี้การเหม็นหืนของไขมันและน้ำมันอาจเกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรลิซิสระหว่างไขมันกับน้ำโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในอากาศเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันโมเลกุลเล็กที่ระเหยง่ายและมีกลิ่นเหม็น ดังนั้นการเก็บไขมันและน้ำมันไว้โดยไม่ให้เกิดการเหม็น หืนหรือชะลอให้เหม็นหืนช้าที่สุดจะต้องเก็บไว้ในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ และต้องปิดภาชนะให้สนิทไม่ให้สัมผัสออกซิเจนและไอน้ำในอากาศ เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นและปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

เมื่อพิจารณาข้อมูลในตารางที่ 2.1 พบว่าน้ำมันพืชมีไม่อิ่มตัวมากกว่าไขมันสัตว์ จึงน่าจะเกิดการเหม็นหืนได้ง่ายกว่าไขมันสัตว์ แต่น้ำมันพืชที่ขายอยู่ทั่วไปจะมีการเติมสารเคมีบางชนิดลเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เช่น สาร BHA BHT ซึ่งช่วยป้องกันการเหม็นหืนได้สารป้องกันการเหม็นหืนบางชนิดอาจมีอยู่ตามธรรมชาติ เช่น วิตามินอี

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบร้อยละโดยมวลของกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวของไขมันสัตว์และน้ำมันพืช [10]

ไขมันหรือน้ำมัน	ร้อยละโดยมวลของกรดไขมัน						
	ไม่อิ่มตัว				อิ่มตัว		
	ไลโนเลนิก	กรดไลโนเลอิก	กรดโอเลอิก	ปริมาณรวม	กรดสเตียริก	กรดปาล์มิติก	ปริมาณรวม
ไขมันสัตว์							
เนย	-	-	-	36	1	-	64
ไขมันหมู	-	6.0	47.5	53.5	11.9	28.3	40.2
ไขมันวัว	0.5	1.8	41.8	44.1	24.1	24.9	49
น้ำมันพืช							
น้ำมันมะพร้าว	-	3	6	9	0	91	91
น้ำมะกอก	-	8	75	83	16	-	16
น้ำมันข้าวโพด	-	59	24	83	17	-	17
น้ำมันถั่วลิสง	-	29	47	76	18	-	18
น้ำมันเมล็ดฝ้าย	-	50	21	71	25	-	25
น้ำมันถั่วเหลือง	7	50	26	83	6	9	15
น้ำมันดอกทานตะวัน	-	65	23	88	12	-	12
น้ำมันดอกคำฝอย	-	75	13	88	12	-	12
น้ำมันงา	-	45	42	87	13	-	13
น้ำมันรำข้าว	1	35	48	84	17	-	17
น้ำมันดอกอีฟนิ่งพริมโรส	-	81	11	92	2	6	8

2.2 ชนิดของกรดไขมัน [11]

กรดไขมันที่ได้จากการนำไตรกลีเซอไรด์มาไฮโดรไลซ์จะเป็นโซ่ตรง และมีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่อยู่ระหว่าง 12–24 อะตอม กรดไขมันที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติมีประมาณ 40 ชนิด ซึ่งแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้

2.2.1 **กรดไขมันอิ่มตัว** (saturated fatty acid) เป็นกรดไขมันที่พันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนกับคาร์บอนยึดเหนี่ยวด้วยพันธะเดี่ยวทั้งหมด มีสูตรทั่วไปเป็น $C_nH_{2n}O_2$ หรือ

$C_nH_{2n+1}COOH$ หรือ เขียนสูตรได้เป็น $CH_3(CH_2)_nCOOH$ เช่น กรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 18 อะตอม จะมีสูตรทั่วไปเป็น $C_{18}H_{36}O_2$ ซึ่งเขียนสูตรดังนี้

$CH_3(CH_2)_{14}COOH$ กรดปาล์มมิติก (palmitic acid)

หรือ $C_{17}H_{35}COOH$ กรดสเตียริก (stearic acid)

กรดไขมันอิ่มตัวที่พบมากที่สุด ได้แก่ กรดปาล์มิติก (palmitic acid) และกรดสเตียริก (stearic acid)

รูปที่ 2.1 ไขมันจากสัตว์ [11]

2.2.2 **กรดไขมันไม่อิ่มตัว** (unsaturated fatty acid) เป็นกรดไขมันที่พันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนกับคาร์บอนยึดเหนี่ยวด้วยพันธะคู่อย่างน้อย 1 พันธะ ซึ่งมีจำนวนอะตอมคาร์บอนน้อยกว่ากรดไขมันอิ่มตัว 2 อะตอม มีสูตรทั่วไปเป็น $C_nH_{2n-2}O_2$ หรือ $C_nH_{2n-1}COOH$ หรือเขียนสูตรได้เป็น $CH_3(CH_2)_yCH{=}CH(CH_2)_xCOOH$ เช่น กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 18 อะตอม มีพันธะคู่ที่คาร์บอนตำแหน่ง 9–10 จะมีสูตรทั่วไปเป็น $C_{18}H_{34}O_2$ ซึ่งเขียนสูตรดังนี้

$CH_3(CH_2)_7CH{=}CH(CH_2)_7COOH$ กรดโอเลอิก (oleic acid)

หรือ $C_{17}H_{33}COOH$ กรดไลโนเลอิก (linoleic acid)

กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากที่สุด ได้แก่ กรดโอเลอิก (oleic acid) และกรดไลโนเลอิก (linoleic acid) ไขมันและน้ำมันที่ได้จากสัตว์และพืชประกอบด้วยของผสมของกรดไขมันหลายชนิดของผสมที่มีร้อยละของกรดไขมันอิ่มตัวสูงจะเป็นของแข็ง ก็คือเป็นไขมัน เช่น ไขวัว แต่ถ้ามีร้อยละของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงก็จะเป็นน้ำมัน เช่น น้ำมันพืช

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

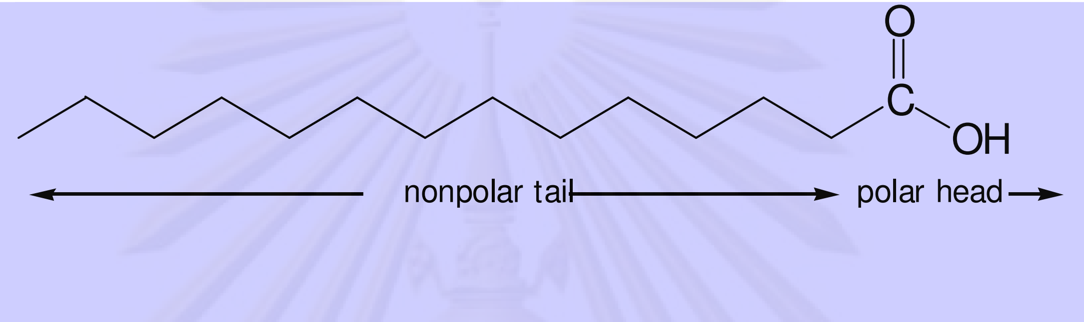
รูปที่ 2.2 ไขมันจากพืช [11]

ตารางที่ 2.2 สมบัติและโครงสร้างของกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัวบางชนิด[11]

ชื่อ	จำนวน C	โครงสร้าง	จุดหลอมเหลว (^{o}C)
กรดไขมันอิ่มตัว			
Luaric acid	12	$CH_3(CH_2)_{10}COOH$	44
Myristic acid	14	$CH_3(CH_2)_{12}COOH$	54
Palmitic acid	16	$CH_3(CH_2)_{14}COOH$	53
Stearic acid	18	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	70
Arachidic acid	20	$CH_3(CH_2)_{18}COOH$	75
กรดไขมันไม่อิ่มตัว			
Palmitoleic acid	16	$CH_3(CH_2)_5CH=CH(CH_2)_7COOH$	32
Oleic acid	18	$CH_3(CH_2)_7CH=CH(CH_2)_7COOH$	13
Linoleic acid	18	$CH_3(CH_2)_4(CH=CHCH_2)_2(CH_2)_6COOH$*(cis)*	–5
Linoleic acid	18	$CH_3(CH_2CH=CH)_3(CH_2)_7COOH$*(cis , cis)*	–11
Arachidonic acid	20	$CH_3(CH_2CH=CHCH_2)_4(CH_2)_2COOH$*(all cis)*	–50

2.3 สมบัติทางกายภาพของกรดไขมัน

2.3.1 โครงสร้างของกรดไขมันประกอบด้วยส่วนที่มีขั้วคือหมู่คาร์บอกซิล และส่วนที่ไม่มีขั้วคือสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ต่อกับหมู่คาร์บอกซิล ดังนั้นยิ่งสายโซ่ยาวยิ่งขึ้น ยิ่งทำให้กรดไขมันมีขั้วน้อยลง



รูปที่ 2.3 **โครงสร้างของกรดไขมัน** [11]

2.3.2 จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของกรดไขมันชนิดอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนหรือเพิ่มขึ้นตามจำนวนอะตอมคาร์บอน ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวต่ำกว่าของกรดไขมันอิ่มตัวที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีจำนวนคาร์บอนเท่ากันแต่มีพันธะคู่ต่างกัน จะพบว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่มากกว่าจะมีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวต่ำกว่า

2.3.3 กรดไขมันที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากัน แต่มีจำนวนพันธะคู่ต่างกัน จำนวนพันธะคู่ที่เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้จุดหลอมเหลวลดลง

2.4 การเหม็นหืน

การเหม็นหืนมีสาเหตุดังนี้

ก. ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดจากออกซิเจนในอากาศเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่งพันธะคู่ระหว่างอะตอมคาร์บอนในโมเลกุลของกรดไขมัน ได้แอลดีไฮด์และกรดไขมันโมเลกุลเล็ก ๆ ซึ่งมีกลิ่นเหม็นหืน

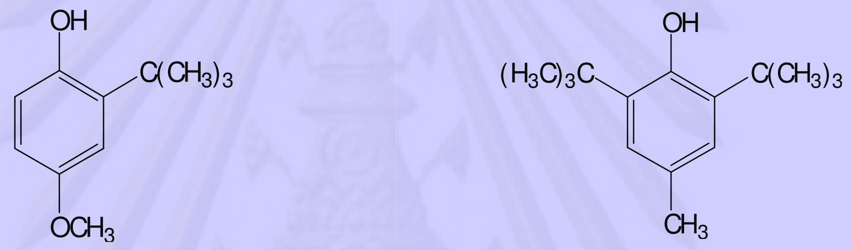
ข. ปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส ระหว่างไขมันกับน้ำ โดยมีเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในอากาศเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันโมเลกุลเล็กที่ระเหยง่ายและมีกลิ่นเหม็น

<u>การป้องกันการเหม็นหืน</u>

1. การเก็บไขมันหรือน้ำมันโดยไม่ให้เกิดการเหม็นหืน หรือชะลอการเหม็นหืนให้ช้าที่สุดจะต้องเก็บในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ต้องปิดฝาภาชนะให้สนิท ไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนและไอน้ำในอากาศเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

2. ในธรรมชาติจะมีวิตามินอี ช่วยป้องกันการเหม็นหืนได้

3. น้ำมันพืชมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่าไขมันสัตว์ จึงน่าจะเหม็นหืนง่ายกว่าไขมันสัตว์ แต่มีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไป เช่น BHT, BHA เพื่อป้องกันการเหม็นหืน สารทั้งสองชนิดเป็นสารประกอบประเภทฟีนอล มีสูตรโครงสร้างดังนี้



BHA (Butylated hydroxyl anisole) BHT (Butylated hydroxyl toluene)

รูปที่ 2.4 **สารประกอบประเภทฟีนอล** [11]

2.5 ปฏิกิริยาคะตะไลซิส (Catalysis reaction) [16.17.18]

เป็นปฏิกิริยาที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาใช้เพื่อให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้รวดเร็วขึ้น โดยมีกลไกที่ไปลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยาตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้จะมีหน้าที่ไปลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา โดยไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น หรือไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา จึงมีความหมายตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาถึงค่าคงที่ของสมดุลของปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งของปฏิกิริยาจะต้องไม่ทำให้ค่าคงที่ของสมดุลเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาไปข้างหน้า และอัตราเร็วของปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้วเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาเท่ากับปริมาณที่ใช้เริ่มต้นโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพ แต่ในทางปฏิบัติตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง หรือองค์ประกอบได้ เช่น การเปลี่ยนอัตราส่วนของออกซิเจนต่อโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ

ออกไซด์บางชนิดที่อุณหภูมิสูง หรือการสัมผัสของสารตั้งต้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาโดยสามารถแบ่งปฏิกิริยาคะตะไลซิสจากเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้น ได้เป็น 3 ประเภทคือ

2.5.1 **ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบเอกพันธุ์** (Homogeneous catalytic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน เช่น การสังเคราะห์ CH_3COOH จาก CH_3OH และ CO โดยใช้ rhodium complex ประเภทของปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบเอกพันธุ์

2.5.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแก๊ส ได้แก่ Nitrogen oxide ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Sulfor dioxide ในกระบวนการผลิตกรด H_2SO_4

2.5.1.2 สภาพที่เป็นของเหลว เช่น การใช้กรดและเบสในกระบวนการไฮโดรลิซิสของพวกเอสเทอร์

2.5.2 **ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์** (Heterogeneous catalytic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของโพรเพน

2.5.3 **ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์** (enzyme) Enzymatic Catalysis มีทั้งแบบเอกพันธุ์และแบบวิวิธพันธุ์ ส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันเป็นแบบเอกพันธุ์ (เอนไซม์เป็น mobilized enzyme) แต่ได้มีการพัฒนา immobilized enzyme ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

2.6 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา [1]

2.6.1 **วิธีการตกตะกอน** (Precipitation Method) เป็นการผสมสารละลาย 2 ชนิดหรือมากกว่าทำให้เกิดการตกตะกอนแล้วตามด้วย การกรอง การล้าง การทำให้แห้ง การจัดรูปร่างและการให้ความร้อนเพื่อทำให้เกิดเป็นสารเนื้อเดียวและเกิดเป็นสารประกอบขึ้นโดยการแพร่กระจายของความร้อนการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแบบตกตะกอน สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

2.6.1.1 การตกตะกอนแบบธรรมดา

เติมสารละลายที่เป็นเกลือของโลหะลงในสารละลายพวกอัลคาไฮดรอกไซด์ (Alkaline hydroxide) หรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide) หรือแอมโมเนียมคาร์บอเนต(Ammonium carbonate) จะทำให้เกิดการตกตะกอนในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ แล้วให้ความร้อนเปลี่ยนตะกอนให้อยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ (Metal oxide)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.1.2 การตกตะกอนร่วม (Coprecipitation)

เตรียมสารละลายของเกลือโลหะ 2 ชนิด เช่น การเตรียมโลหะบนตัวรองรับแมกนีเซียมออกไซด์ ต้องเตรียมสารละลายเกลือโลหะ และเกลือแมกนีเซียมก่อนจากนั้นเติมสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอน (Precipitation agent) เช่น โลหะอัลคาไลน์คาร์บอเนต (Na_2CO_3, $NaHCO_3$) ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น (Catalyst precursor) แล้วให้ความร้อนเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาตั้งต้น (Catalyst precursor) สลายตัวได้โลหะออกไซด์บนตัวรองรับ (Support) ที่ต้องการ เช่น แมกนีเซียมออกไซด์ และอลูมินา เป็นต้น

ข้อควรระวังในการเตรียม

1. ควบคุมสภาวะในการเตรียม เช่น ความเป็นกรด-เบส (pH) อัตราการผสมอัตราการเติมสารที่ทำให้ตกตะกอน เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ มีผลต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก

2. การเลือกเกลือโลหะเริ่มต้น จะต้องเป็นประเภทที่หาง่ายและละลายน้ำได้ดีบางกรณีต้อง หลีกเลี่ยงการ ใช้ธาตุที่เป็นพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น คลอไรด์เนื่องจากกรดที่มาจากการเผาคลอไรด์ที่อุณหภูมิสูงมีฤทธิ์กัดกร่อน หรือโซเดียม ซึ่งสารประกอบโซเดียมจะช่วยให้เกิดการรวมตัวที่อุณหภูมิสูงได้

3. ตัวเร่งปฏิกิริยาสุดท้ายเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีตัวรองรับ ไม่สามารถใช้เป็นโลหะซัลเฟตได้ เนื่องจากโลหะซัลเฟตสามารถถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ที่เป็นสารพิษต่อตัวเร่งปฏิกิริยาได้

2.6.2 **วิธีการแบบฝัง (Impregnation Method)** เป็นวิธีการที่ง่าย และใช้กันมากที่สุด ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาทำได้โดยการเติมตัวรองรับ (Support) เช่น อะลูมินาในสารละลายของเกลือโลหะ เช่น เกลือไนเตรท เกลือโลหะจะแพร่กระจายสู่ตัวรองรับ จากนั้นทำให้เกลือโลหะร้อน เพื่อให้เกลือโลหะที่อยู่บนตัวรองรับสลายตัวให้เกลือโลหะออกไซด์เกาะบนตัวรองรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยวิธีการแบบฝังตัว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

2.6.2.1 การฝังตัวแบบเปียก (Wet-Impregnation)

เติมตัวรองรับลงในสารละลายของเกลือโลหะที่มีปริมาณมากเกินพอ โดยปริมาณของเกลือโลหะที่เกาะบนตัวรองรับ จะหาจากปริมาณที่แตกต่างของเกลือโลหะก่อนและหลัง

2.6.2.2 การฝังตัวชนิดแห้ง (Dry-Impregnation or Impregnation to incipient wetness)

ตัวรองรับจะถูกทำให้กระจายตัวและพ่นด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยปริมาตรของสารละลายที่ใช้ต้องมีปริมาณเท่ากับ ปริมาตรของรูพรุนทั้งหมดของตัวรองรับหรือน้อยกว่าเล็กน้อย ซึ่งสามารถควบคุมปริมาณขององค์ประกอบที่ว่องไวที่เกาะบนตัวรองรับได้อย่างถูกต้อง หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกทำให้แห้งและเผาที่อุณหภูมิสูงปริมาณและการแจกแจง (Dispersion) ของเกลือโลหะบนพื้นผิวภายในของตัวรองรับมีผลต่อสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมขึ้น ปริมาณและการแลกเปลี่ยนขึ้นอยู่กับลักษณะการดูดซับของเกลือเข้าไปอยู่ในรูพรุนของตัวรองรับในขั้นตอนแรกการแจกแจงของเกลือโลหะยังไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงต้องปล่อยทิ้งไว้ในภาชนะปิดที่มีความชื้นสัมพัทธ์อิ่มตัวอย่างน้อย 1 ชั่วโมง จะทำให้การแจกแจงของเกลือโลหะเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งในตอนแรกปริมาณการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย และเมื่อการดูดซับถึงจุดอิ่มตัวแล้วความเข้มข้นจะไม่มีผลต่อการดูดซับ เมื่อการดูดซับอิ่มตัวแล้วจะนำตัวเร่งปฏิกิริยามาอบแห้ง เพื่อเป็นการกำจัดตัวทำละลายการอบจะมีการให้ความร้อนอย่างช้า ๆ เพื่อให้การระเหยเป็นไปอย่างช้า ๆ (เนื่องจากตัวรองรับมีขนาดรูพรุนต่างกัน เมื่อทำการระเหยสารละลายที่มีอยู่ในรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าจะระเหยไปเนื่องจากความดันจะดันสารละลายไปอยู่ในรูพรุน ที่มีขนาดเล็กกว่า)

2.7 **ตัวรองรับ** (Support) [1]

เป็นสารเฉื่อยที่ใช้สำหรับการกระจายตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาแพง อาจอยู่ในรูปของเม็ด (Pellet) หรือผง (Powder) ที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม คือ Al_2O_3 (Alumina), SiO_2 (Silica) และ Activated carbon

2.7.1 **หน้าที่ของตัวรองรับ** (Support)

- ทำให้เกิดการกระจายตัวของโลหะ (Metal active site) ได้ดีที่สุด
- เพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรง
- เพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของตำแหน่งว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active site)
- เพิ่มความสามารถในการต้านทานภาวะการรวมตัวกันเนื่องจากความร้อน

2.7.2 **การเลือกตัวรองรับ** (Support)

- เฉื่อยต่อปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ

- มีสมบัติเชิงกลที่ต้องการ เช่น ทนต่อการขัดสี, มีความแข็งแรง หรือทนต่อแรงกด
- เสถียรภายใต้สภาวะของปฏิกิริยาและสภาวะที่ใช้เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
- ควรมีพื้นที่ผิวมาก แต่ต้องคำนึงถึงขนาดของโมเลกุล
- มีรูพรุน ประกอบด้วยขนาดรูพรุนเฉลี่ยและการกระจายตัวของรูพรุน
- ราคาถูก

2.8 **ถ่านกัมมันต์** (Activated carbon) [19,20]

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ของคาร์บอน ซึ่งเป็นตัวดูดซับชนิดหนึ่ง มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปของผง หรือเม็ดได้ มีโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็ก มีพื้นที่ผิวดูดซับสูงทำให้มีสมบัติการดูดซับที่ดี ใช้ประโยชน์ในการกำจัดกลิ่น สี หรือแก๊ส โดยทั่วไป มักจะเลือกวัตถุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเป็นของเหลือทิ้งหรือมีราคาถูก มีปริมาณคาร์บอนสูง มีปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ มีปริมาณเถ้าต่ำและมีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บไว้นานๆโดยนำวัตถุดิบซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น กะลา มะพร้าว กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม มาผ่านกระบวนการกระตุ้นให้มีพื้นที่ผิวสูงมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีการจุในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

2.8.1 **วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์**

วัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์ควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นวัสดุเหลือทิ้ง หรือเป็นวัสดุที่มีราคาถูก
- มีปริมาณคาร์บอนสูง
- มีปริมาณสารอนินทรีย์ต่ำ
- มีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

การเตรียมถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบโดยตรง หรือผลิตจากวัตถุดิบที่ถูกเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านชาร์แล้วก็ได้ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์มักเป็นพวกอินทรีย์วัตถุเป็นส่วนใหญ่

2.8.2 **กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์**

การเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว หรือการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น Mukherjee (1947) ได้พิจารณาความหมายของการกระตุ้นไว้ 3 ลักษณะคือ

- การเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดซับขึ้นมาแทน

-เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึงการทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น

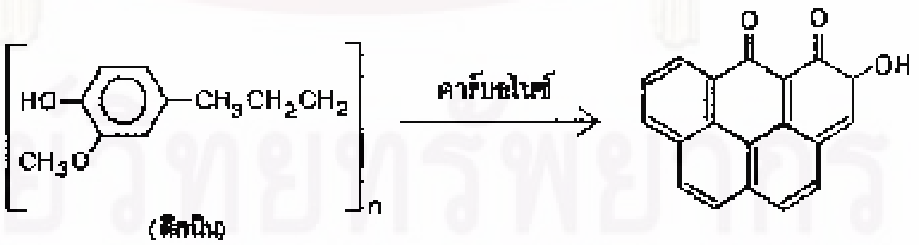
- เป็นการกำจัดอินทรียวัตถุและอนินทรีย์วัตถุต่าง ๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ

ในปัจจุบันกรรมวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์มีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นวัตถุดิบลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการเตรียมถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.8.2.1) **การคาร์บอไนเซชัน** (Carbonization)

การคาร์บอไนเซชันเป็นกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) รูปแบบหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยใช้ความร้อนไล่ความชื้น และสารระเหยได้ต่างๆ ออกจากวัตถุดิบทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็งสีดำ เรียกว่า ถ่านชาร์ (Char) ส่วนที่หลุดออกมา คือ แก๊สและน้ำมัน ทาร์ กระบวนการคาร์บอไนเซชันเป็นการเพิ่มร้อยละของคาร์บอนให้สูงขึ้น การคาร์บอไนซ์ให้ได้ถ่านที่มีสมบัติที่ต้องการทำได้โดยการปรับภาวะให้เหมาะสม โดยมีตัวแปรที่สำคัญดังนี้

- อุณหภูมิ
- อัตราการให้ความร้อน
- ตัวกลางของปฏิกิริยา
- ธรรมชาติของวัตถุดิบ

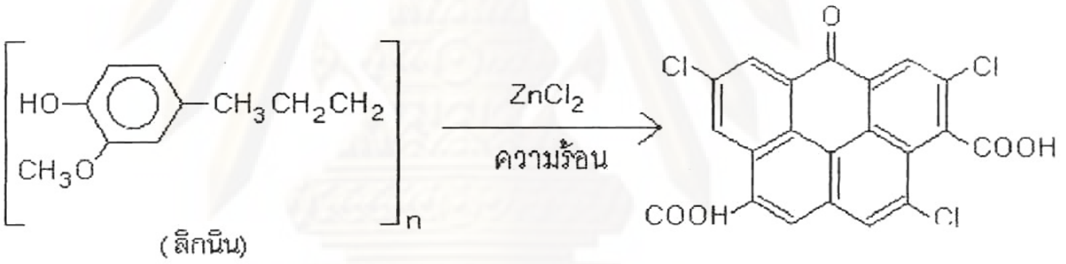


รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการคาร์บอไนซ์ [19,20]

2.8.2.2) การกระตุ้น (Activation) [21]

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ แบ่งตามกลไกที่เกิดได้ 2 ประเภท

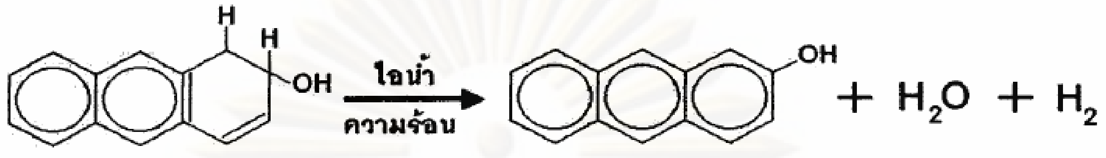
2.8.2.2.1 การกระตุ้นทางเคมี เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 2.6 โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นต้น ข้อดีของวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมากนัก (400 – 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ ทำให้ต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน ในการผลิตถ่านกัมมันต์ทางการค้าโดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี



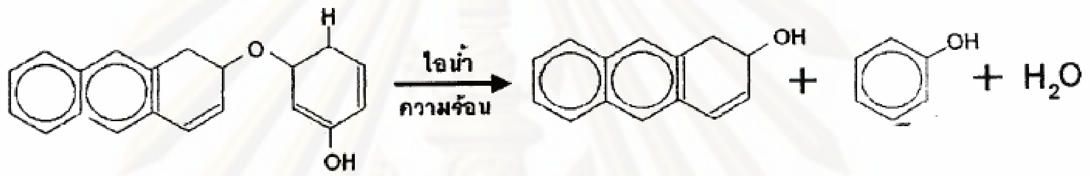
รูปที่ 2.6 **การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางเคมีด้วยซิงค์คลอไรด์** [20]

2.8.2.2.2 การกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ แสดงดังรูปที่ 2.7 และ 2.8 โดยมีการจัดเรียงตัวใหม่ในโครงสร้าง ซึ่งเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้นนิยมใช้แก๊สออกซิเดชันต่างๆ เช่นไอน้ำร้อน ยอดยิ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สออกซิเจนร่วมกับการใช้ความร้อน ปฏิกิริยากระตุ้นนี้อาจใช้ความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้ความร้อนสูงมากถึง 1200 องศาเซลเซียส และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดย การกระตุ้นด้วยแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับ

ความร้อน ข้อดีของการกระตุ้นวิธีนี้คือไม่มีสารเคมีตกค้าง แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าวิธีกระตุ้นด้วยสารเคมี



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพ [20]



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากกระตุ้นทางกายภาพโดยมีการกำจัดโมเลกุลแปลกปลอม [20]

2.8.3 ลักษณะและชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง สารดูดซับชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นของแข็ง มีสีดำ อาจอยู่ในรูปผง หรือเม็ดก็ได้ใช้ประโยชน์ในการดูดซับกลิ่น สี หรือแก๊ส โดยทั่วไปมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก
- มีพื้นที่ผิวสูง
- มีความจุในการดูดซับสูง
- มีความว่องไวในการดูดซับสูง
- มีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (Microporous Structure)

ชนิดของถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับเกณฑ์การแบ่ง ดังนี้

2.8.3.1) แบ่งตามชนิดของการกระตุ้น

- การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับผิวคาร์บอน ถ่านกัมมันต์ที่ได้มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ตัวกระตุ้นที่ใช้ได้แก่ $ZnCl_2$ และ NaCl เป็นต้น

- การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้แก๊สออกซิไดซ์เช่น ไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ อากาศ ร่วมกับความร้อน ถ่านกัมมันต์ที่ได้มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2.8.3.2) แบ่งตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

- ขนาดเล็ก (Micropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนเล็กกว่า 1.5 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับแก๊สหรือสารระเหย

- ขนาดกลาง (Mesopore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 1.5 ถึง 200 นาโนเมตร มักใช้ประโยชน์ในปฏิกิริยาที่มีตัวเร่ง (Catalytic reaction) ใช้ดูดซับสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น ฟอกสี

- ขนาดใหญ่ (Macropore) คือถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนมากกว่า 200 นาโนเมตร โดยปกติไม่มีความสำคัญในการดูดซับสารต่าง ๆ แต่เป็นตัวช่วยให้สารที่ถูกดูดซับสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ง่ายขึ้น มักนำไปใช้ประโยชน์ในการฟอกสีและการผลิตยา

2.8.3.3) แบ่งตามลักษณะของรูปร่าง

- ประเภทผง (Powder) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตร ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นผง ใช้สำหรับฟอกสีและดูดกลิ่นในของเหลว

- ประเภทเม็ด (Pellet) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ผ่านตะแกรงร่อนขนาด 150 นาโนเมตรไม่เกินกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก มีลักษณะเป็นเม็ดซึ่งได้จากการอัดผ่านเครื่องอัด หรืออาจทำให้เป็นเกล็ดใช้สำหรับทำแก๊สให้บริสุทธิ์ หรือการทำตัวทำละลายที่ใช้แล้วให้บริสุทธิ์นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการปฏิกิริยาของแก๊สและใช้ทำหน้ากากป้องกันแก๊สและไอพิษต่าง ๆ

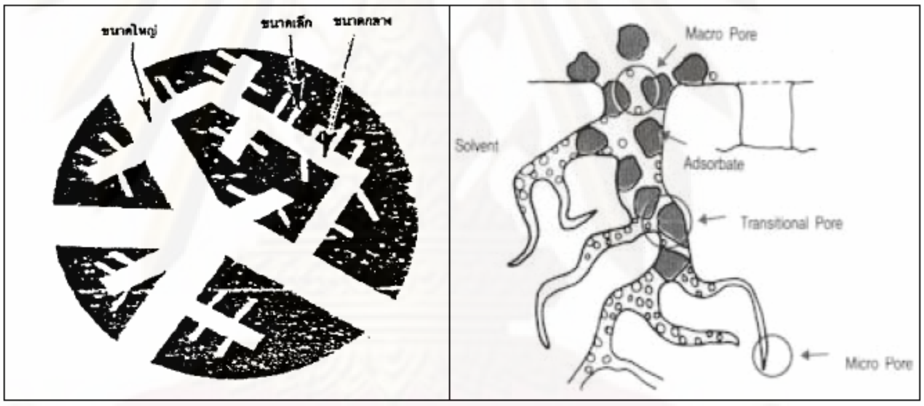
2.8.3.4) แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์

- ความหนาแน่นต่ำ มักใช้ประโยชน์ในภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น ฟอกสีน้ำตาล หรือทำ น้ำให้บริสุทธิ์

- ความหนาแน่นสูง ใช้ในการดูดซับแก๊ส หรือไอระเหย

2.8.4 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ [19,20]

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์แล้วจะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่เข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด แสดงดังรูปที่ 2.9 คือ ขนาดเล็ก (Micropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร ขนาดกลาง (Mesopore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และขนาดใหญ่ (Macropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ เชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาด หรือที่เรียกว่าการกระจายขนาดรูพรุน(Poresize distribution) จะขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้และวิธีการกระตุ้น



รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบขนาดและการวางตัวของรูพรุนขนาดต่าง ๆ [19]

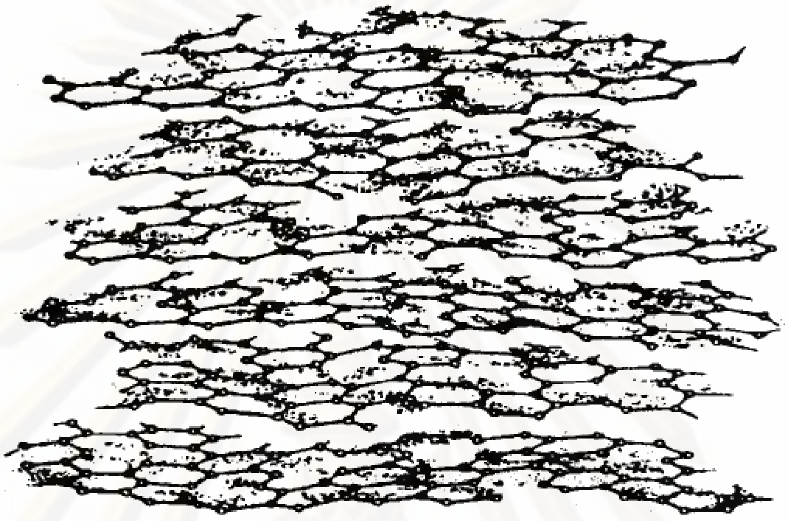
รูพรุนขนาดใหญ่จะเกิดขึ้นในช่วงการกระตุ้นด้วยแก๊สออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการกำจัดสารอินทรีย์ต่าง ๆ ออกจากช่องว่างของถ่านที่ใช้เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น รวมทั้งเกิดการจัดเรียงและเคลื่อนย้ายอะตอมเพื่อให้เกิดช่องว่างที่มีอำนาจการดูดซับ รูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดซับเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่มีผลต่อความจุในการดูดซับแต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับสำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้นสามารถดูดซับโมเลกุลของของเหลวได้บ้าง แต่จะมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 - 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับจึงมีผลต่อความจุในการดูดซับโดยเฉพาะการดูดซับที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90 ถึง

95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่า ความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือ ถ้าผิวของถ่านกัมมันต์เป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอวาลส์ หรืออาจเกิดจากไพอิเล็กตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้จะดูดซับได้แต่ก็มีโอกาสจะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชัน การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกมาจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และพวกออกไซด์ของเบส ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800 ถึง 1000 องศาเซลเซียส

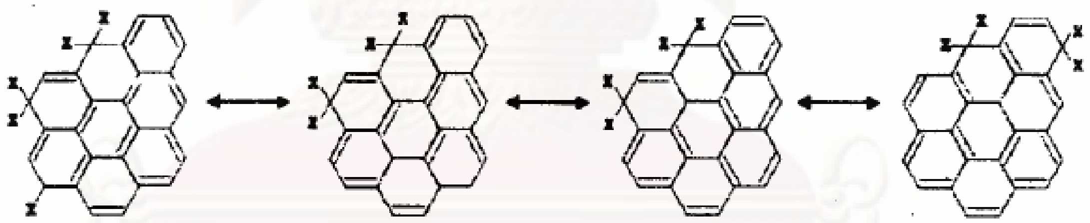
2.8.5 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ [6,19]

ถ่านกัมมันต์มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาสลายสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการคาร์บอไนเซชัน (Carbonization) ในระหว่างการเผาสลายอะตอมต่าง ๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนเช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจนถูกกำจัดออกในรูปแก๊ส อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้น ๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแอโรแมติก (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรงซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาสลาย ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้นโดยการล้างพวกทาร์และสารต่าง ๆ ที่ได้จากการเผาสลายออกจากช่องว่างหรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วยถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายผลึกแกรไฟต์ กล่าวคือ อะตอมของคาร์บอนจะเรียงตัวเป็นชั้น ๆ แสดงดังรูปที่ 2.8 แต่ละชั้นห่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้น คือ แรงแวนเดอวาลล์ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนัก แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมคาร์บอนแต่ละตัวจะใช้ซิกมาอิเล็กตรอน(Sigma electron)สร้างพันธะเดี่ยวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวพันธะระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวเป็นไพอิเล็กตรอนใช้ในการสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัวคือพันธะคู่ แต่โดยทั่วไปถ่านหรือถ่านกัมมันต์จะมีอิเล็กตรอนไม่ครบคู่ อะตอมคาร์บอนบางตัวจึงต้องรับอิเล็กตรอนดังกล่าวไว้ ทำให้มีความหนาแน่นประจุสูง อะตอมดังกล่าวจะปล่อยให้

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังอะตอมข้างเคียงเพื่อลดความหนแน่นของประจุ แสดงดังรูปที่ 2.11 เพื่อทำให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.10 **โครงสร้างของถ่านกัมมันต์** (Mattson et al 1971) [19]

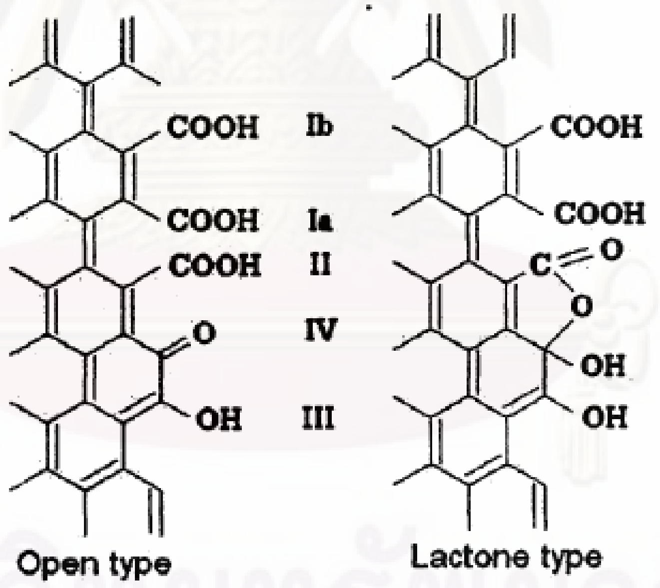


รูปที่ 2.11 **การเคลื่อนที่ของไพอิเล็กตรอนในโครงสร้างของถ่านและถ่านกัมมันต์** [19]

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระในวงโคจรนอกสุดมีไม่ครบ 2 หรือ 8 (Unsaturated valencies) ตามกฎออกเตต จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่น เช่น ออกซิเจนในอากาศ หรืออะตอมต่าง ๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้นกระบวนการกระตุ้นจะช่วยให้การเกาะกันของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะเคมีที่แข็งแรง มักเกิดกับอะตอมที่อยู่ที่วงแอโรแมติก ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับแบบเคมี (Chemisorbtion) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 ถึง 500 องศาเซลเซียส และเปลี่ยนเป็นออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจนซึ่ง

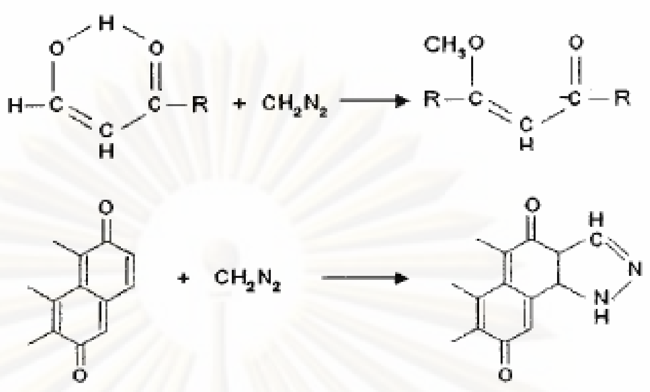
จะไม่หลุดออกแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1000 องศาเซลเซียส รวมทั้งสามารถดึงอะตอมของไนโตรเจนออกจากโมเลกุลของแอมโมเนีย ดึงอะตอมซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลของไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจนออกจากโมเลกุลฮาโลเจนทั้งที่อยู่ในสภาพแก๊สหรือของเหลวก็ได้ เกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่าผิวออกไซด์นั้นมี 2 ชนิด คือ

2.8.5.1 ชนิดที่เป็นกรด มักเกิดในถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิไม่สูงมาก หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติคล้ายกรดได้แก่ carbonyl, phenols, lactones, aldehydes, ketones, quinones, hydroquinones, anhydride เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.12 สามารถดูดซับโมเลกุลที่เป็นเบสได้ แสดงดังรูปที่ 2.13 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์เหล่านี้ค่อนข้างที่จะเสถียรที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้เล็กน้อย จะสลายตัวเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้มากจะเกิดการสลายตัวให้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน



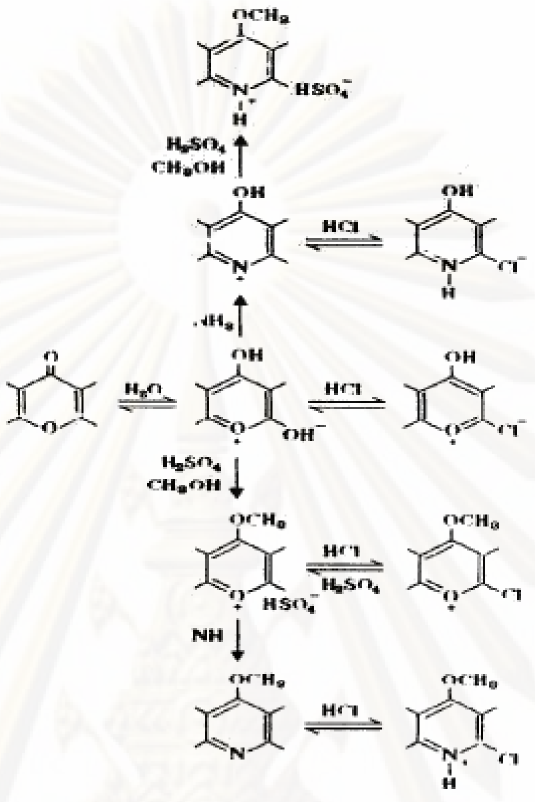
Surface oxides on carbon surface I : Carbonyl group, a. Removed by 200°C b. Removed above 325°C II : Carbonyl group which exists as lactol group III : Phenolic hydroxyl group IV : Carbonyl group

รูปที่ 2.12 ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนผิวถ่านกัมมันต์ [6]



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างปฏิกิริยาของถ่านกัมมันต์ที่ผิวเป็นกรด [6]

2.8.5.2 ชนิดที่เป็นเบส มักเป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส หมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนผิวถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับโมเลกุลของกรดได้ดี ได้แก่ hydroxyl , carbonate เป็นต้น ตัวอย่างปฏิกิริยาการดูดซับของถ่านกัมมันต์ประเภทนี้แสดงในรูปที่ 2.14 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อถ่านกัมมันต์ประเภทนี้เกิดปฏิกิริยาดูดซับกับออกซิเจนและกรดไฮโดรคลอริก จะเกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ขึ้นมาด้วย มีผู้อธิบายโดยใช้ทฤษฎีต่าง ๆ เช่น ทฤษฎีโครมีน (Chromene groups) ทฤษฎีออกไซด์เป็นต้น แต่ปัจจุบันยังไม่เป็นที่ยอมรับ เชื่อกันว่าโมเลกุลของกรดจะถูกดูดซับด้วยแรงทางฟิสิกส์ โปรตอนและไอออนลบจะถูกยึดด้วยแรงดูดซับจากผิวของถ่านกัมมันต์ แต่โปรตอนจะถูกแรงกระทำมากกว่าจึงอยู่ใกล้ผิวของถ่านกัมมันต์ แล้วจึงเกิดการดูดซับไอออนลบเป็นชั้นที่สอง เมื่อนำถ่านกัมมันต์มากระตุ้นพบว่า เกิดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงร้อยละ 10 ของปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในถ่านกัมมันต์ จึงคาดว่าอะตอมคาร์บอนที่อยู่ในถ่านกัมมันต์มี 2 แบบ คือ แบบที่สลายตัวกลายเป็นแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและแบบที่สลายตัวไปเป็นสารอื่นที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการดูดซับโมเลกุลกรดด้วยถ่านกัมมันต์ที่มีผิวเป็นเบส [6]

อย่างไรก็ตามถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นในตลาดการผลิตถ่านกัมมันต์เม็ด อาจได้รับผลจากการที่ในอุตสาหกรรมบางส่วนได้ใช้ถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการผ่านกระบวนการการนำกลับมาใช้ใหม่ ในการพิจารณาถึงการที่จะนำถ่านกัมมันต์กลับมาใช้ใหม่นั้นจะต้องคำนึงถึง ค่าใช้จ่าย ปริมาณของถ่านกัมมันต์ ชนิดของตัวถูกดูดซับ และเกณฑ์ที่บังคับด้านสิ่งแวดล้อม

2.8.6 การดูดซับของถ่านกัมมันต์ [6]

ความจุของการดูดซับของถ่านกัมมันต์ (Adsorption Capacity) จะขึ้นกับ

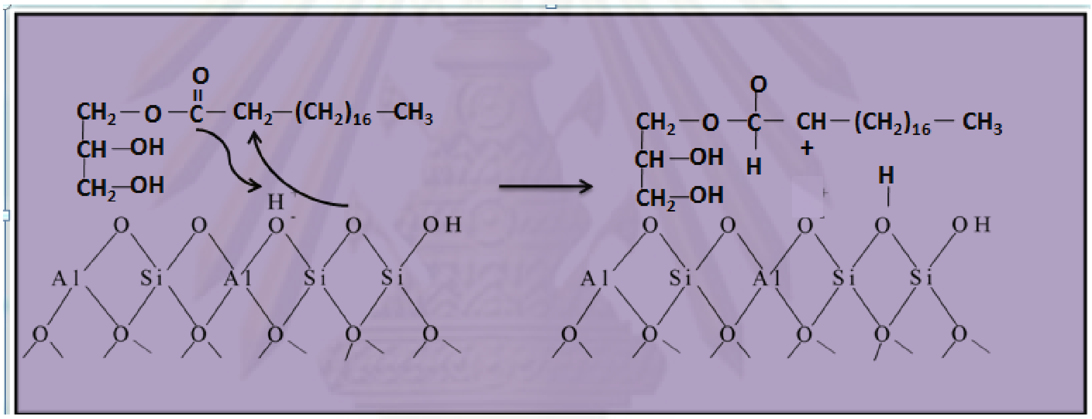
- พื้นที่ผิวทั้งหมด (total surface area)
- โครงสร้างรูพรุนในเนื้อถ่าน (poreous structure)
- ชนิดของหมู่ฟังก์ชัน (functional group) กรุ๊ปต่าง ๆ บนผิวรูพรุนของถ่าน

ขนาดรูพรุนบริเวณผิวจะเป็นสิ่งหนึ่งที่กำหนดความจุในการดูดซับ โดยโครงสร้างทางเคมีที่ผิวถ่านกัมมันต์ จะมีผลต่อสารที่ถูกดูดซับในกรณีที่สารนั้นมีขั้วหรือไม่มีขั้ว นอกจากนั้นตำแหน่งที่ว่องไวบริเวณผิวถ่านกัมมันต์ จะเป็นสิ่งที่กำหนดชนิดของปฏิกิริยาเคมีที่ผิวถ่านกับโมเลกุลอื่นดังนั้น ในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวอย่างเดียว ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวเท่ากันแต่ได้จากการเตรียมที่มีวิธีต่างกัน อาจจะเป็นวิธีการกระตุ้นที่ต่างกันก็สามารถให้ลักษณะการดูดซับ (adsorption characteristics) ที่ต่างกัน ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่ดีจึงควรมีพื้นที่ผิวมากและมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมกับสปีชีส์ (species) ที่ถูกดูดซับ ที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ จะมีผลึกคาร์บอนอยู่ที่บริเวณผิวและขอบของผลึกคาร์บอนโดยจะมีตำแหน่งวาเลนซ์ที่เหลืออยู่จึงทำให้บริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่ว่องไวจะเห็นได้จากการดูดซับทางเคมีที่บริเวณผิวถ่าน ธาตุที่ถูกดูดซับเข้ามาอาจเป็นออกซิเจนไนโตรเจน ไฮโดรเจน คลอรีน โบรมีน ไอโอดีน และซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นการดูดซับแบบซับซ้อนที่บริเวณผิวจึงไม่สามารถเขียนกลไกการดูดซับออกมาในรูปแบบของสมการเคมีได้เมื่อพิจารณาหมู่ฟังก์ชันนับที่บริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ พบว่าหมู่ฟังก์ชันที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบมีความสำคัญมากที่สุด เมื่อตรวจสอบที่บริเวณผิวของคาร์บอนโดยใช้เอกซ์เรย์พบว่าอะตอมของออกซิเจนจะสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอน ซึ่งจะมีเป็นจำนวนมากที่บริเวณขอบของโมเลกุลคาร์บอนที่เกาะตัวเป็นแอโรแมติกโดยพันธะระหว่างออกซิเจนและไฮโดรเจนจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ เช่น ความเป็นกรดที่บริเวณผิว การแลกเปลี่ยนไอออนบวก รวมถึงการดูดซับแก๊สและไอที่มีขั้วและไม่มีขั้ว

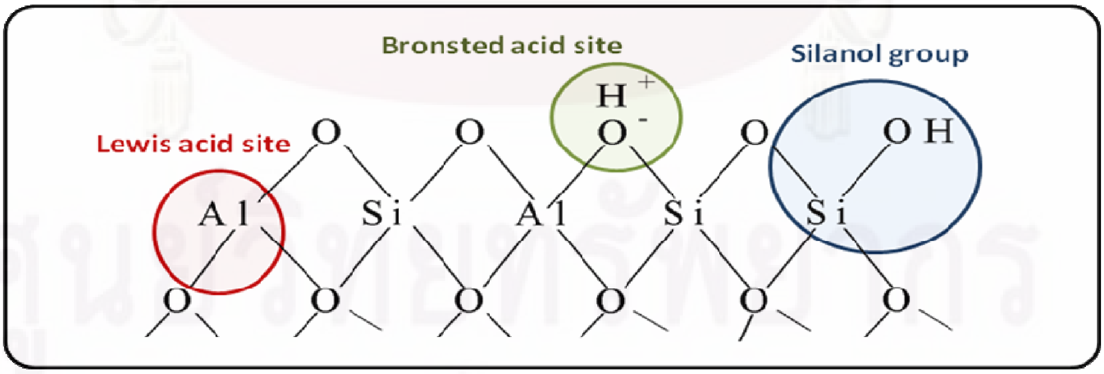
2.9 **ซีโอไลต์** (Zeolite) [4,34]

ซีโอไลต์เป็นสารที่มีความเป็นผลึก มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นระเบียบ เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตของธาตุแอลคาไลน์หรือแอลคาไลน์เอิร์ต โดยธาตุที่พบมากได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเซียม (Sr) และแบเรียม (Ba) ซีโอไลต์มีโครงร่างเป็นตาข่าย (Framework structure) 3 มิติ มีรูปร่างและขนาดโพรงแตกต่างกันตามชนิดของซีโอไลต์ โครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการต่อกันของโครงสร้างเตตระฮีดรอนของซิลิกอนเตตระออกไซด์ $(SiO_4)^{4-}$ และอะลูมิเนียมเตตระออกไซด์ $(AlO_4)^{5-}$ โดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน โครงสร้างของซีโอไลต์จึงมีลักษณะเป็นรูพรุน มีโพรงและมีช่องว่างที่มีรูปแบบที่แน่นอน โดยขนาดของช่องเปิดของโครงผลึกขึ้นอยู่กับจำนวนออกซิเจนในวงแหวน (ring) ที่ต่อกันเป็นทรงสี่หน้า ซึ่งอาจมีจำนวนอะตอมออกซิเจนเป็น 6 8 10 หรือ

12 ในวงแหวน แล้วแต่ชนิดของซีโอไลต์ เนื่องจากซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดแบบวิวิธพันธุ์ โดยชนิดของกรดที่มีในซีโอไลต์แสดงในรูปที่ 2.15 ดังนั้นจึงสามารถทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้น (ในกรณีรูปที่ 2.16 คือ โมโนกลีเซอไรด์) เกิดการแตกตัวได้อยู่ในรูปของช่วงคาร์บอนประมาณ 5-12 โมเลกุล ซึ่งอยู่ในช่วงของแกโซลีน นอกจากนี้ซีโอไลท์ยังช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยา Aromatization และ Cyclization ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของสารประกอบแอโรแมติก สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีด้านอื่นๆอีกด้วย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปฏิกิริยา Deoxygenation ทำให้เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีองค์ประกอบของออกซิเจนลดลง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงเหลวอีกด้วย

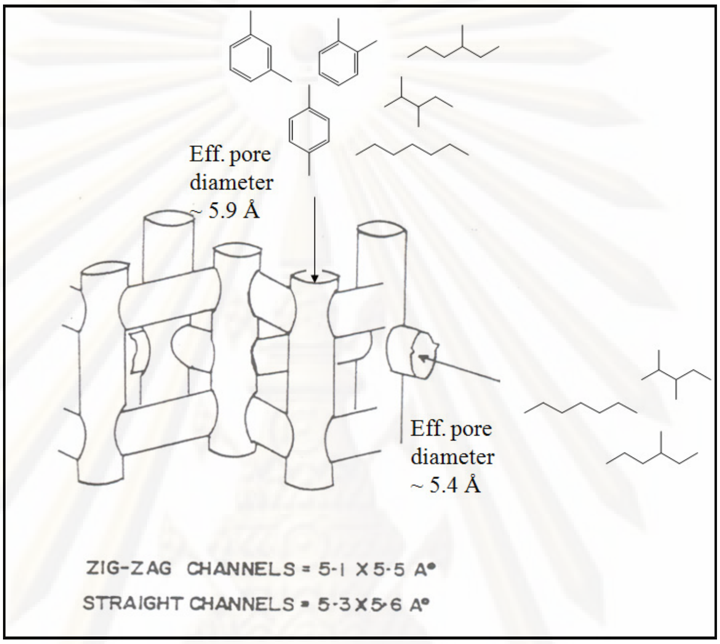


รูปที่ 2.15 **การแตกตัวของโมโนกลีเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์** [34]



รูปที่ 2.16 **ชนิดของ** acid site **ของสารประกอบซีโอไลต์** [34]

ชนิดของโครงสร้างที่นิยมนำมาใช้ในปฏิกิริยาการแตกตัวคือ ZSM-5 เนื่องจากมีขนาดของรูพรุนอยู่ที่ประมาณ 5.1-5.6 นาโนเมตร มีความเลือกสรรผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในช่วงคาร์บอน 5-6 อะตอม โดยเป็นชนิดของโซ่กิ่งและสารประกอบแอโรแมติกแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ชนิดของโซ่กิ่งและสารประกอบแอโรแมติก [34]

2.10 กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน (Thermal Cracking) [3]

คือการเปลี่ยนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กๆ โดยใช้อุณหภูมิสูง การแตกตัวนี้ถ้าเป็นไปได้ควรแตกให้พอดีๆ จึงเรียกว่ามีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์พอเหมาะ เพราะแตกเป็นโมเลกุลเล็กเกิดไป เช่น เป็น C1-C4 จะเป็นแก๊สสูญไปไม่ต้องการ จะเห็นจากตารางที่ 2.3 ว่าต้องการผลิตแก๊สออยล์หรือทำการลดความหนืดโมเลกุลของกากน้ำมันที่ป้อนเข้าไม่ควรจะแตก เกินกว่า 2-3 เสี่ยง แต่ถ้าต้องการทำเบนซินควรจะต้องแตกถึง 4-5 เสี่ยง ทั้งนี้เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดโมเลกุลกำลังดี การแตกตัวด้วยความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะส่วนที่มีแขนโอเลฟินและไดโอเลฟิน ทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ทำปฏิกิริยากันเองต่อไป โดยเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน และ คอนเดนเซชัน กากน้ำมันจากกระบวนการนี้ จึงไม่ค่อยอยู่ตัวอาจเกิดตะกอนน้ำมันได้ ง่ายและมีความหนืดเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นการทำปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดโค้กขึ้น กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน จัดเป็น

ปฏิกิริยาประเภทราดิคอลเสรี (Free Radical) แบบเป็นห่วงโซ่ ประกอบด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18 คือ

ตารางที่ 2.3 ขนาดของโมเลกุลในน้ำมันประเภทต่าง ๆ

ประเภทน้ำมัน	จำนวนคาร์บอนอะตอมในโมเลกุล	น้ำหนักโมเลกุล	% โดยน้ำหนักไฮโดรเจน
Gas C4	1-4	16-60	20
Gasoline C5 – 165°C	5-10	60-140	15
Gas Oil 165-135°C	10-20	140-280	12.5
Flashed Distillate 350-480°C	20-30	280-120	12-13
Long Residue 350°C			
Short Residue 480°C	20-50	280-700	11-12
	30-50	420-700	9-11

2.10.1 **การเริ่มต้น** (Initiation) กล่าวคือ การเกิดราดิคอลเสรีขึ้น ซึ่งปฏิกิริยานี้จะทำให้แขนยึดระหว่างอะตอมคาร์บอนแตกออกจากกัน และเกิดเป็นราดิคอลเสรีอันเป็นต้นกำเนิดของปฏิกิริยาอื่นๆต่อไป

2.10.2 **การเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่** (Chain-Carrying) ราดิคอลที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อเนื่อง คือ เกิดการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์ และแตกตัวเป็นโมเลกุลย่อยต่อไปพร้อมกับเกิดราดิคอลเสรีตัวใหม่ขึ้น เช่นเดียวกับราดิคอลเสรีอาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น เกิดเป็นราดิคอลเสรีตัวใหม่ขึ้นอีก และได้ไฮโดรคาร์บอนตัวที่ย่อยลง ปฏิกิริยาเหล่าจะต่อเนื่องไปเรื่อยๆ

2.10.3. **การหยุดปฏิกิริยา** (Termination) ราดิคอลเสรีจะหยุดปฏิกิริยาแบบต่อเนื่อง โดยการทำปฏิกิริยากันเอง รวมเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ขึ้น ซึ่งอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหญ่โมเลกุลเดียว หรือเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล โดยสรุปผลรวมของปฏิกิริยาจะเป็นดังนี้

1) พาราฟินส์ จะแตกตัวและถูกดึงไฮโดรเจนออกผลที่ได้ คือ ได้พาราฟินส์โมเลกุลเล็กลง โอเลฟิน และไฮโดรเจน

2) โอเลฟินจะเกิดปฏิกิริยาได้ 3 แบบ

ก) แตกตัวและถูกดึงไฮโดรเจนออก ได้พาราฟินส์โมเลกุลเล็กลง, โอเลฟิน, ไดโอเลฟิน และไฮโดรเจน

ข) โอเลฟินจะทำปฏิกิริยากับไดโอเลฟิน ได้เป็นไซคลิกโอเลฟิน หรือโอเลฟินในรูปวงแหวน หรืออาจรวมตัวกันจนเป็นโค้ก

3) แอโรแมติก จะเกิดเป็นปฏิกิริยา คือ

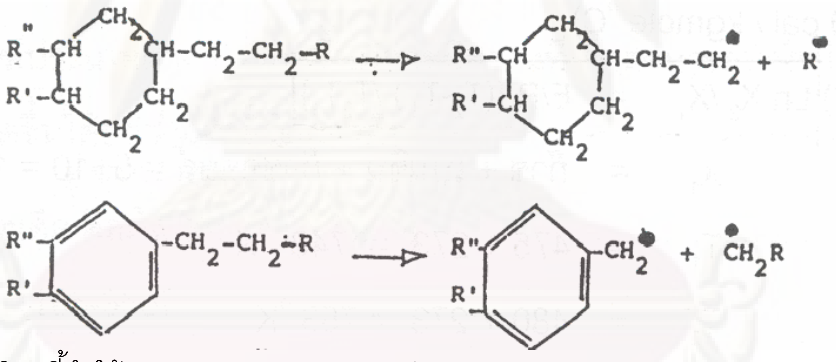
ก) แขนของแอโรแมติกจะแตกตัวก่อนเป็น พาราฟินส์, โอเลฟิน และแอโรแมติก

ข) แอโรแมติกจะรวมตัวเข้าด้วยกันเกิดเป็นโค้ก

4) แนฟทีนซึ่งนอกจากจะทำปฏิกิริยากับโอเลฟินแล้วตัวมันเองก็จะถูกดึงไฮโดรเจนออกเกิดเป็นสารแอโรแมติกต่างๆ

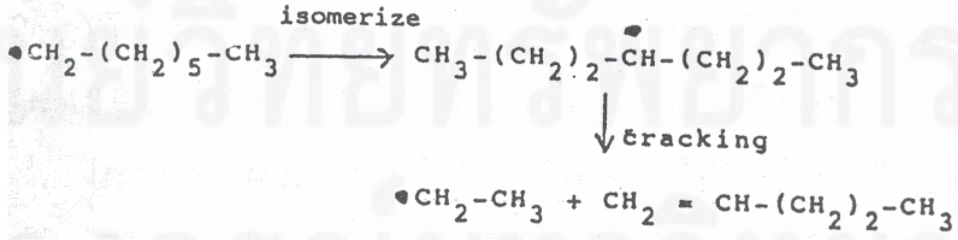
ความว่องไวต่อปฏิกิริยานั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโมเลกุลที่ป้อนเข้าทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปโมเลกุลจะแตกตัวง่ายเกิดโมเลกุลใหม่ และเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องอื่นๆ ตามมาดังนั้นสารป้อนหนัก เช่น กากน้ำมัน จะแตกตัวได้เร็วโดยไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นสารป้อนเบาจะต้องใช้อุณหภูมิสูงมากจึงจะได้ปฏิกิริยาที่ต้องการ (การแตกตัวกากน้ำมัน ทำที่อุณหภูมิประมาณ 430 °C แต่การแตกตัวอีเทนต้องใช้อุณหภูมิ 830 °C)

1. **Initiation เกิด** Free Radical ขึ้นเช่น

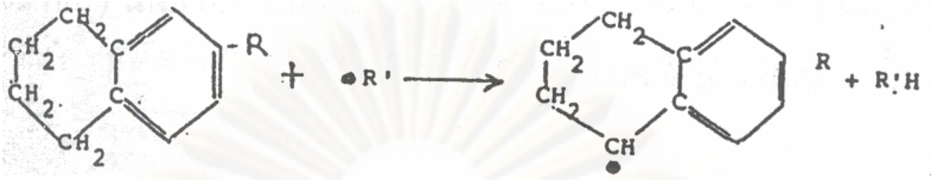


ปฏิกิริยานี้ทำให้ c-c bond แตกออกจากกัน

2. Chain-carrying เป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องซึ่ง Free Radical จะทำปฏิกิริยา Isomerization, Cracking

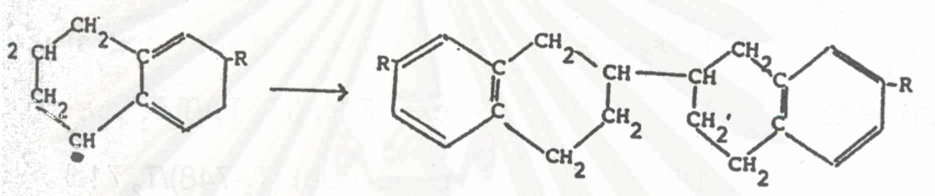


Chain Transfer

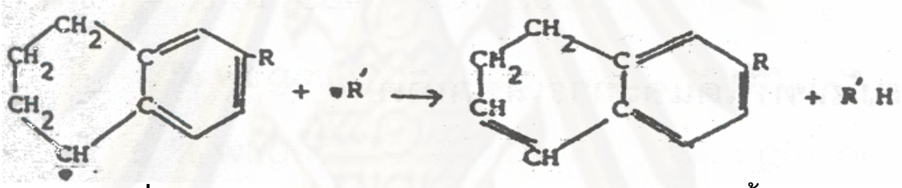


3.Termination ปฏิกิริยาห่วงโซ่จะหยุดโดย

Coupling



Disproportionation



รูปที่ 2.18 การเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของเทอร์มอลแคร้กกิ้ง [3]

2.11 กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking) [3]

กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดขึ้นด้วยปฏิกิริยาของคาร์โบเนียมอิออน (Carbonium ion) ซึ่งตรงกันข้ามกับกระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน ซึ่งอาศัยฟรีราดิคอล (Free Radical) ฟรีราดิคอลของไฮโดรคาร์บอนเกิดจากการที่ไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรเจนอะตอมไป แต่ตัวมันจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนคาร์โบเนียมอิออนเกิดจากการที่ไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรอิออนที่มีประจุลบไป ตัวมันเองจึงมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า

โดยสรุปขั้นตอนต่างๆของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามลำดับดังนี้

2.11.1 การเกิดคาร์โบเนียมอิออน (รูปที่ 2.19) ซึ่งโปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีส่วนสำคัญคาร์โบเนียมอิออน อาจเกิดขึ้นจากโอเลฟิน, พาราฟินส์ หรือแอโรแมติก โดย

ก) โปรตอน รวมตัวเข้ากับแขนคู่ของโอเลฟิน เกิดคาร์โบเนียมอิออนขึ้น

ข) พาราฟินส์ จะแตกตัวออกเป็นคาร์โบเนียมอิออนและไฮโดรด์อิออน

ค) โปรตอน รวมตัวเข้ากับโมเลกุลแอโรแมติก ก่อให้เกิดแอโรแมติกคาร์โบเนียมอิออนขึ้น

2.11.2 ปฏิกิริยาห่วงโซ่ของคาร์โบเนียมอิออน (รูป 2.19.1) เมื่อคาร์โบเนียมอิออนเกิดขึ้นแล้ว จะทำปฏิกิริยาห่วงโซ่ต่อไปดังต่อไปนี้ คือ

ก) แคร้กกิ้ง หรือ การแตกตัวออก การแตกตัวจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งบีตาของแขน นับจากจุดที่ประจุบวก ทำให้เกิดโอเลฟิน และคาร์โบเนียมไอออนที่เล็กลง หลังจากนั้นอาจเกิดการแตกตัวต่อไปอีก หรือเกิดคาร์โบเนียมอิออนใหม่ขึ้นมาอีก

ข) เกิดการเปลี่ยนรูปไอโซเมอร์ขึ้น ซึ่งเกิดขึ้นได้สองวิธี คือ

(i) เปลี่ยนที่ระหว่างประจุบวกกับไฮโดรเจน หรือเรียกว่าเปลี่ยนตำแหน่งไฮโดรเจน

(ii) เปลี่ยนที่ระหว่างประจุบวกกับกลุ่มเมททิล หรือเรียกว่าเปลี่ยนตำแหน่งเมทิลปฏิกิริยานี้จะเกิดกับ Primary Carbon Position มากที่สุด สำหรับ Secondary และ Tertiary จะเกิดขึ้นน้อยลง และเป็นเหตุให้เกิดไอโซพาราฟินส์ขึ้นมากกว่านอร์มัลพาราฟินส์ ซึ่งต่างจากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน

ค) การเกิดโมเลกุลวงแหวน ซึ่งเป็นต้นกำเนิดให้เกิดสารอะโรมาติกต่อไป

ง) การเกิดโมเลกุลโอเลฟินขึ้นและคายโปรตอนออกมา

จ) การรวมตัวขึ้นเป็นพอลิเมอร์

ฉ) การสลับโมเลกุลกัน

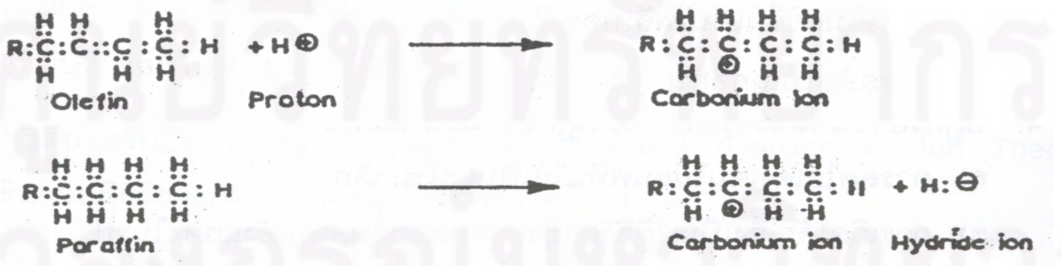
2.11.3 ปฏิกิริยาหยุดห่วงโซ่ (Termination) คาร์โบเนียมอิออนจะหยุดปฏิกิริยาห่วงโซ่ได้โดยการทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยาเองเป็นการหยุดปฏิกิริยาต่อไป

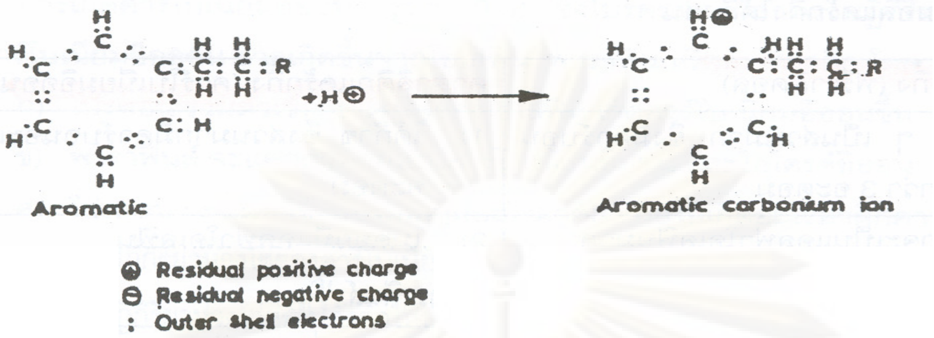
2.11.4 ปฏิกิริยาชั้นที่สอง (รูปที่ 2.20) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ

ก) การลดไฮโดรเจนในแนฟทีนให้เป็นแอโรแมติก

ข) การเกิดโค้ก ซึ่งเป็นปฏิกิริยายุ่งยากหลายขั้นตอน ดังแสดงในรูป 2.20

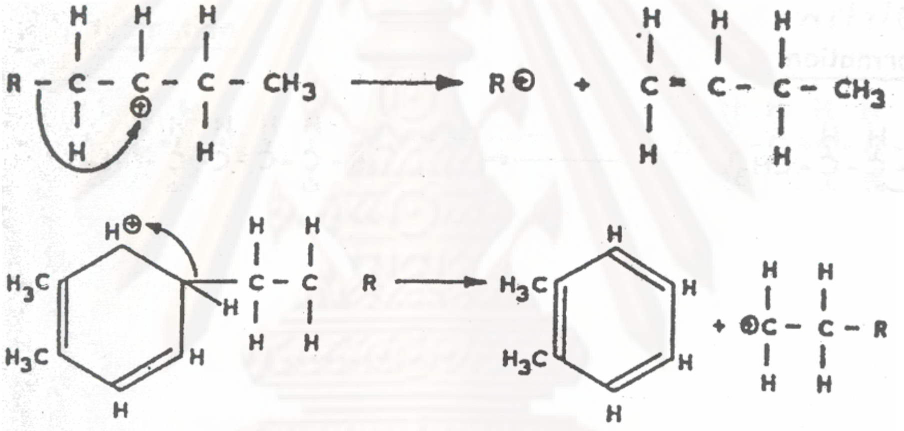
Carboniumion Formation



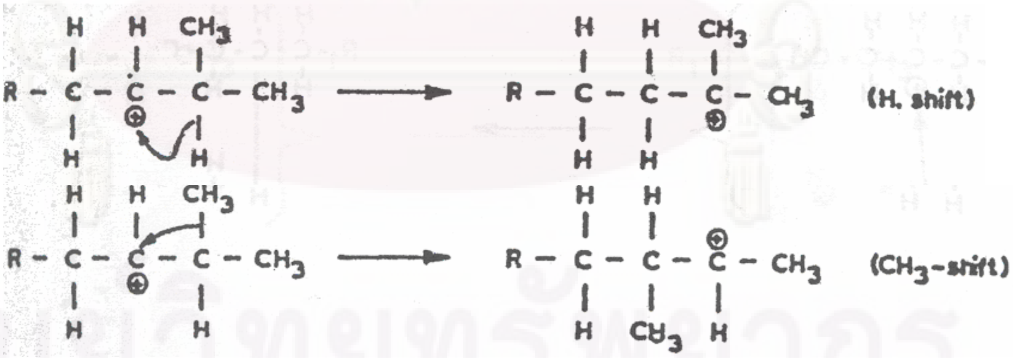


รูปที่ 2.19 การเกิดคาร์โบเนียมอิออน [3]

1.Cracking

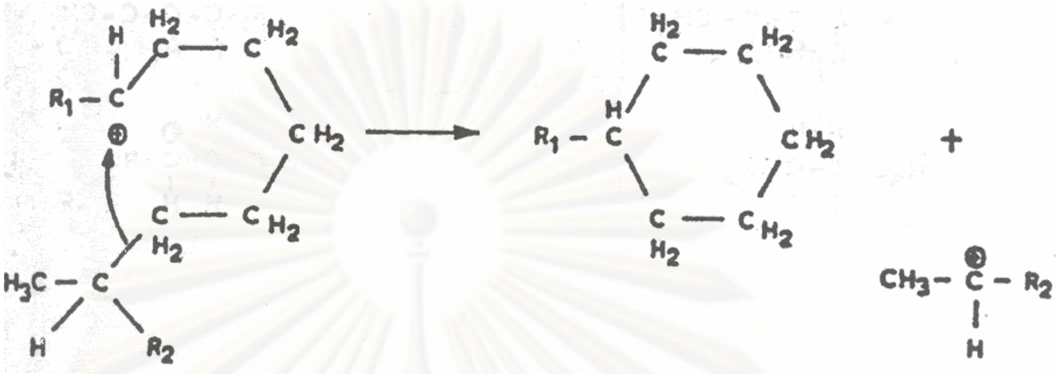


2. Isomerization



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

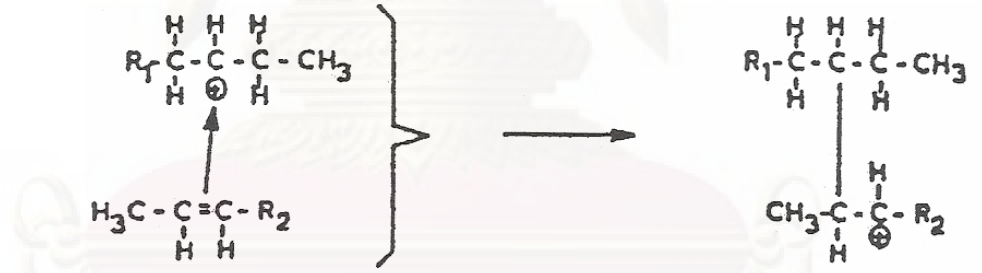
3. Cyclization



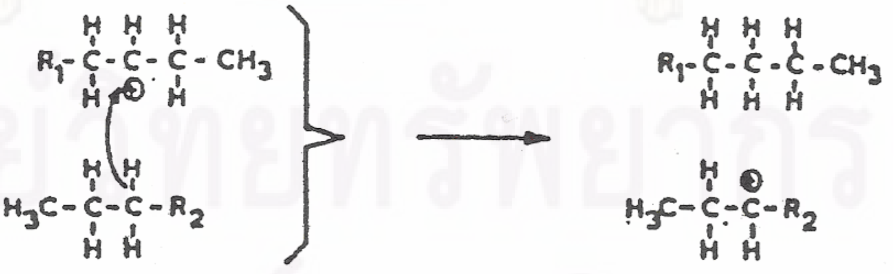
รูปที่ 2.19.1 ปฏิกิริยาห่วงโซ่ของคาร์โบเนียมอิออน [3]

4. Olefin Formation

5. Polymerization



6. Intermolecular exchange

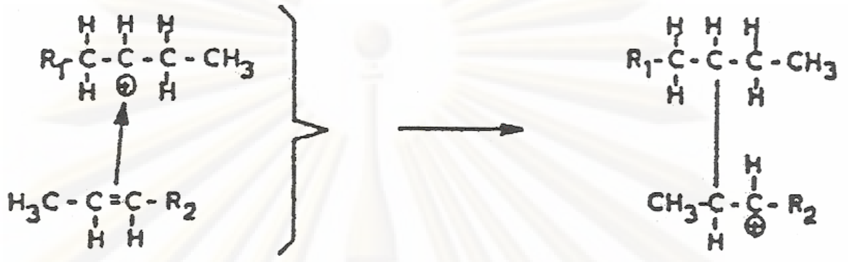


รูปที่ 2.19.2 ปฏิกิริยาห่วงโซ่ของคาร์โบเนียมอิออน [3]

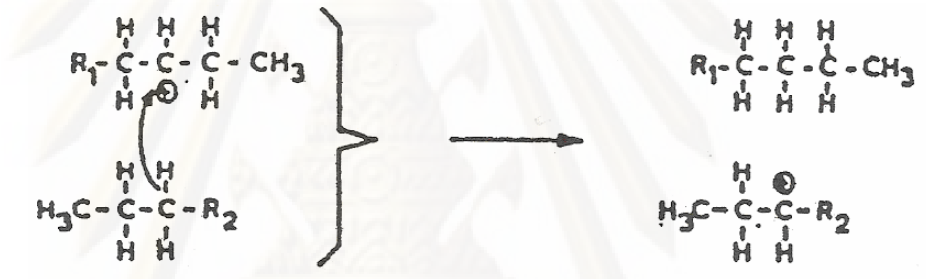
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.Olefin Formation

5. Polymerization



6. Intermolecular exchange



รูปที่ 2.20 **ปฏิกิริยาลำดับสอง** [3]

จากขั้นตอนของปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถอธิบายผลความแตกต่างของการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา

การแตกโมเลกุลด้วยความร้อน	**การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา**
1) ได้แก๊สเบาๆ เป็นส่วนมาก ซึ่งมีคาร์บอนอะตอมต่ำกว่า 3 อะตอม	1)ได้แก๊ส ซึ่งส่วนมากมีคาร์บอนอะตอม 3-6 อะตอม
2) โอเลฟิน มักจะเป็นแอลฟาโอเลฟินมาก	2) ไม่ค่อยมีแอลฟาโอเลฟิน
3) พาราฟินส์ จะเป็นแกนตรง	3) พาราฟินส์ จะเป็นแกนแยกแบบไอโซพาราฟินส์
4) แนฟทีน ไม่ไวต่อปฏิกิริยาไม่เกิดปฏิกิริยา	4) แนฟทีน ที่ได้ไวต่อปฏิกิริยาและเกิดปฏิกิริยาชั้นสอง
5) การแตกแขนของแอโรแมติก จะเหลือคาร์บอนอะตอมติดอยู่กับวงแหวนอีก 1-2 อะตอม	5) การแตกแขน จะไม่เหลือคาร์บอนอะตอมติดกับวงแหวนเลย
6) วงแหวนแอโรแมติก จะไม่ค่อยเปลี่ยน	6) วงแหวนแอโรแมติกก็จะไม่เปลี่ยน

2.12 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) [3,21,22,23,24]

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินส์และแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆกับการเติมไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดคาร์บอเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$R_1\text{-}CH_2\text{-}CH_2\text{-}R_2 \xrightarrow{\text{catalyst}} R_1\text{-}CH_2\text{-}CH\text{-}R_2 + H^-$$

คาร์บอเนียมไอออนอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยการกำจัดโปรตอนออกจากโอเลฟินหรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า (β-scission) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินและคาร์บอเนียมไอออนตัวใหม่ จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและการดึงไฮโดรเจน โอเลฟินที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็นสารประกอบประเภทพาราฟินส์

$$R_1\text{-}CH_2\text{-}{}^{+}CH\text{-}R_2 \xrightarrow{-H^+} R_1\text{-}CH{=}CH\text{-}R_2$$

$$R_1\text{-}CH_2\text{-}{}^{+}CH_2\text{-}R_2 \xrightarrow{\beta\text{-scission}} R_2\text{-}CH{=}CH_2 + R^+$$

$$R_2\text{-}CH{=}CH_2 + H_2 \xrightarrow{\text{catalyst}} R_2\text{-}CH_2\text{-}CH_3$$

หากปฏิกิริยาเกิดในภาวะที่อุณหภูมิ 400-480 องศาเซลเซียส ความดัน 35-170บรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่อิ่มตัวค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้แกโซลีนที่ได้จากกระบวนการนี้มีค่าออกเทนที่ต่ำกว่ากระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องมาจากผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีปริมาณสารประกอบแอโรแมติกน้อย เพราะเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนมากกว่าสารที่ได้จึงมักนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องบิน (jet fuel) รวมทั้งยังได้สารประกอบประเภท LPG ซึ่งใช้เป็นสารป้อนในกระบวนการปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ใดๆ นั้นต้องอาศัยปัจจัยอื่นๆควบคู่กันไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นต้องขึ้นกับเวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งชนิดของปฏิกิริยาและชนิดของพลาสติกนอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยทำความสะอาดให้กับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปพร้อมๆกันด้วย เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่

เกิดขึ้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นอย่างดี เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความสามารถไปหรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.13 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมัน [3,9,16]

เป็นวิธีการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมันดิบอย่างละเอียด เพื่อหาองค์ประกอบและสมบัติของส่วนต่างๆ ในน้ำมันดิบเริ่มต้นเพื่อหาปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่มีอยู่โดยวิธี Gas chromatography แล้วนำน้ำมันมากลั่นแยกเป็นส่วนตามคาบจุดเดือด (Boiling range) อย่างละเอียด โดยแบ่งเป็นส่วนแคบ ๆ ชนิดคาบจุดเดือดเพียง 5-10 องศาเซลเซียส แต่มีค่าใช้จ่ายที่แพงมากและใช้เวลานานจึงไม่นิยมทำกัน ปัจจุบันจึงใช้วิธีแยกน้ำมันดิบออกตามคาบจุดเดือดกว้าง ๆให้พอดีกับที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูปกล่าวอย่างหยาบสามารถแบ่งได้เป็น

1. พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่ IBP (Initial boiling point) จนถึง 200 องศาเซลเซียสเรียกว่าส่วนของแกโซลีน (Gasoline fraction) มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน
2. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200-250 องศาเซลเซียส เรียกว่าส่วนน้ำมันก๊าด (Kerosene fraction) มักใช้ในน้ำมันก๊าดที่ให้แสงสว่าง ถ้าจุดเกิดควันไม่ต่ำจนเกินไปน้ำมันก๊าดคุณภาพที่ดี และมีจุดเยือกแข็งต่ำจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้ซึ่งต้องขึ้นกับ สมบัติอื่น ๆ ด้วย
3. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 – 350 องศาเซลเซียส เราเรียกว่าส่วนของแก๊สออยล์ชนิดเบา (Light gas oil fraction) เหมาะในการนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์
4. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350 – 370 องศาเซลเซียส เราเรียกว่าส่วนของแก๊สออยล์ (Gas oil fraction) เหมาะในการนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์ดีเซล
5. พวกที่มีคาบจุดเดือดเหนือกว่า 370 องศาเซลเซียส เรียกว่า กากน้ำมัน (Residue) อาจนำไปใช้ได้หลายอย่างแล้วแต่สมบัติของกากน้ำมัน เช่น นำมาใช้เป็นน้ำมันเตาหรือ นำไปผลิตเป็นยางมะตอย หรือผลิตเป็นน้ำมันเครื่องหรือ นำมาเป็นสารป้อน (Feed stock)

2.14 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Benxian S. **และคณะ** [25] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดสัดส่วนของแกโซลีนที่ดีที่สุดในผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยใช้กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันเมล็ดฝ้าย ด้วย เครื่อง Fixed-Fluidized bed และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนเข้า ที่มีผลต่อการแตกโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดฝ้ายด้วยสารเร่งปฏิกิริยาโดยสภาวะที่ทำให้สัดส่วนของแกโซลีนดีที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 426.2 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50.2 วินาที และ อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนเข้า 7.8 กรัมต่อกรัม โดยสัดส่วนของแกโซลีนที่ได้คือ 33.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Pramila T. **และ** Subhash B. [26] ได้ศึกษาคล้ายกับ Benxian S. และคณะ แต่ใช้สารป้อนเข้าเป็นน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ Transport riser reactor ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้โปรแกรมการออกแบบการทดลอง (experimental of design) เข้าช่วยเพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้สัดส่วนของแกโซลีนที่ดีที่สุดในผลิตภัณฑ์ของเหลวซึ่งสภาวะที่เหมาะที่สุดคือ อุณหภูมิที่ 450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที และ อัตราส่วนระหว่างการไหลของตัวเร่งต่อสารป้อนเข้า 5 กรัมต่อกรัม โดยสัดส่วนของแกโซลีนที่ได้คือ 33.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารเติมแต่ง HZSM-5(40) จะให้สัดส่วนของแกโซลีนในผลิตภัณฑ์ของเหลวของน้ำมันปาล์มดิบมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 40.9 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

Thiam L. **และคณะ** [27] เป็นการศึกษาการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของกากน้ำมันปาล์ม และน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้วเพื่อเกิดเป็นเชื้อเพลิงทางชีวภาพที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ระยะในการทำปฏิกิริยา 20 วินาที อัตราส่วนตัวเร่งต่อน้ำมันที่ 5 กรัมตัวเร่งปฏิกิริยาต่อกรัมของน้ำมัน และพิจารณาอิทธิพลของตัวเร่งไปฏิกิริยาได้แก่ HZSM-5, beta zeolite, SBA-15 และ AlSBA-15 โดยการเพิ่มตัวเติม Rare earth-Y เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ให้มีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น จากการทดลองพบว่า เมื่อเติม HZSM-5(40) ลงใน REY zeolite ในน้ำมันปาล์มดิบสามารถให้เปอร์เซ็นต์ของ conversion ได้เท่ากับ 95.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นส่วนของแกโซลีนอยู่ 40.9 เปอร์เซ็นต์โดยการใช้กากน้ำมันปาล์มที่ใช้แล้ว ขณะที่น้ำมันปาล์ม ที่ใช้แล้วจะให้เปอร์เซ็นต์ของ conversion ได้เท่ากับ 82.8 ซึ่งเป็นส่วนของแกโซลีน 38.6 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลที่ได้ทำให้ทราบว่าการเพิ่มสารเติมแต่งลงใน REY zeolite จะช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของconversionได้ เปอร์เซ็นต์ของแกโซลีนได้ดี โดย HZSM-5(40) จะให้ค่าที่ดีที่สุด

Farouq A. T. **และคณะ** [28] ได้ศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนรูปน้ำมันปาล์มดิบให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ fixed bed โดยศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

ของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ได้แก่ HZSM-5, zeolite β และ ultrastable Y (USY) zeolite ที่ภาวะการทดลองต่าง ๆ กันได้แก่ อุณหภูมิระหว่าง 350 – 450 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1 – 4 ชั่วโมง ภายใต้ความดันบรรยากาศ ผลการศึกษาพบว่าผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ ให้ผลการเปลี่ยนเป็นของเหลวที่แตกต่างกัน โดย HZSM-5 ให้ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดระหว่าง 17 – 28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าขนาด pore sizeและรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นของเหลว USY zeolite มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงให้ร้อยละผลิตภัณฑ์ในช่วงของ kerosene และ diesel และ HZSM-5 มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงให้ร้อยละของแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนถึงร้อยละ 20 – 38 %โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรคาร์บอนพบว่าเมื่อใช้เวลาทำปฏิกิริยามากขึ้นโมเลกุลของน้ำมันปาล์มดิบจะถูกย่อยให้มีขนาดเล็กจนอยู่ในรูปแก๊ส ที่มีองค์ประกอบเป็นเอทิลีน อีเทน โพรพิลีน โพรเพน และบิวเทน และเมื่อพิจารณาของแข็งหรือโค้กที่เหลือจากปฏิกิริยาพบว่า HZSM-5 ให้ร้อยละของการเปลี่ยนแปลงเป็นโค้กน้อยที่สุดการศึกษาอิทธิพลของการผสม HZSM-5 กับ USY และ HZSM-5 กับ zeolite β พบว่าการผสม HZSM-5 กับ USY เมื่อเพิ่มร้อยละของ HZSM-5 มากขึ้น จะให้ร้อยละของการเปลี่ยนแปลง

Farouq A. T. และคณะ [29] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มเป็นเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบ fixed bed ภายใต้ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 723 เคลวิน และทำการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 มีรูพรุนขนาดกลาง ด้วยสัดส่วน Si/Al เท่ากับ 50 โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล ซึ่งมีพื้นที่ผิวระหว่าง 550–1200 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.8 – 2.8 นาโนเมตรจากการศึกษาพบว่า MCM-41 มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์ม โดยเปลี่ยนจากน้ำมันปาล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (palm kernel oil) ไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวในสัดส่วนที่สูงกว่าการเปลี่ยนแปลงจากน้ำมันปาล์มที่มีน้ำหนโมเลกุลสูง (palm olein oil) และตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41 เลือกทำปฏิกิริยาเกิดเฉพาะอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน โดยขึ้นกับชนิดของน้ำมันปาล์มที่ใช้ โดยเฉพาะ C13 เมื่อใช้น้ำมันปาล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และ C17 เมื่อใช้น้ำมันปาล์มที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และพบว่าผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลงเมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าการเลือกเกิดแกโซลีน เคโรซีน หรือดีเซล โดยขึ้นกับขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้พบว่าเกิดโค้กเป็นจำนวนมากบนตัวเร่งปฏิกิริยา MCM-41

Y.S. Prasad และคณะ [30] ศึกษาการเปลี่ยนแปลง Canola Oil ไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง โดยใช้HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Fixed bed ขนาดเล็ก โดยศึกษาอิทธิพลอุณหภูมิ เวลา ที่มีผลต่อ

การเปลี่ยนแปลงไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยอาศัยวิธีการทางสถิติช่วยในการออกแบบการทดลองร้อยละของการเปลี่ยนแปลงไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวถึง 60 – 95 % ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วงจุดเดือดของแกโซลีน light gas และน้ำ โดยเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของของเหลวที่ได้พบว่ามีปริมาณเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน C3 และ C4 โดยภาวะที่ดีสุดที่ให้ร้อยละของการเปลี่ยนสูงที่สุดอยู่ที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

Weibing D. **และคณะ** [31] ศึกษาถึงการสังเคราะห์ของเหลวจากพลาสติกเหลือทิ้งเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ โดยได้ศึกษาถึงภาวะที่ใช้คืออุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส และ 525 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และ 10 นาที และ ศึกษาถึงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ประกอบด้วย Ni-Mo/Al2O3, Ni-Mo/(HZSM5-+SiO-Al2O3),Ni/(HZSM-5+SiO-Al2O3) และ KC-2600 ที่สามารถให้ร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสูง และนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เมื่อทำการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ความดัน 300 Psig ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันถึงร้อยละ 88.7 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่ความดัน 300 Psig โดยเพิ่มเวลาการทดลองเป็น 10 นาที ให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเพียงร้อยละ 60 ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวในปริมาณน้อยกว่าการใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพียง 5 นาทีเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของเหลวที่เป็นน้ำมันที่ได้จากระบบที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส และ 520 องศาเซลเซียส ให้ของเหลวที่มีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน C4-C40 และ C4-C20 ตามลำดับ โดยไม่มีองค์ประกอบที่เป็นไอโซพาราฟินส์จึงไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ได้ แต่เมื่อทำการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ กันพบว่า ในระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ดีกว่าและจะใช้ภาวะที่รุนแรงน้อยกว่านอกจากนี้เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของNiMo/(HZSM-5+SiO-Al2O3) และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ Ni/(HZSM-5+SiO-Al2O3) ในภาวะอุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 1000 Psig เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวถึงร้อยละ 47.9 และ 64.8 ตามลำดับ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวในระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้

Nakamura I. **และ** Fujimoto K. [32] ศึกษาการแตกตัวเป็นของเหลวของพอลิพรอพิลีน ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอน โดยศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอน (Yallourn-coal-base) ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอน และปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จากการศึกษาพบว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการเปลี่ยนของพอลิพรอพิ

ลีนไปเป็นของเหลวได้ดีกว่าการไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีร้อยละของการเปลี่ยนแปลงถึงร้อยละ 92 โดยพอลิพรอพิลีนมีกลไกของปฏิกิริยาเป็นแบบการเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนด้วยความร้อนให้เป็นอนุมูลอิสระและเกิดปฏิกิริยาแบบลูกโซ่แบบต่อเนื่องจนได้สายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่เล็ก ในระบบที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการเติม H_2S สามารถทำให้พอลิพรอพิลีนแตกตัวเป็นของเหลวได้ดีกว่าการใช้ CS_2 เนื่องจากสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในการเปิดโครงสร้างของพอลิพรอพิลีนและเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของไฮโดรคาร์บอนได้ดีกว่า และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่า ผลของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็ก บน SiO_2 – Al_2O_3 ยังมีกากของแข็งที่เหลือจากปฏิกิริยาสูงกว่าปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนคาร์บอนประมาณ 3 ใน 4 เท่า

วิชชากร จารุศิริ [5] ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของกลีเซอรอลจากกระบวนการผลิตเอสเทอร์เพื่อให้ได้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.925 เซนติเมตร ความยาว 12 เมตร ภายใต้ภาวะ อุณหภูมิ 400 - 600 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนของสารตั้งต้น 1.23– 9.45 กรัมต่อนาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนไปเป็นของเหลวได้สูงสุดถึงร้อยละ 95.85 ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนของสารตั้งต้น 3.30 กรัมต่อนาที เมื่อนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปวิเคราะห์องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น พบว่าให้องค์ประกอบเป็นแกโซลีนสูงที่สุด 35.85% เคโรซีน 10.68% แก๊สออยล์ 29.29 %และกากน้ำมัน 24.28%

ประชารัตน์ แต้ภักดี [7] ศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร กระบวนการแตกตัวนี้ทำการศึกษาถึงเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีน อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก อุณหภูมิ 390-450 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 45-105 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-10 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.1-1.5 กรัม ปริมาณสารตั้งต้นจำนวน 15 กรัม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ดังนี้ เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์คือ 5% อัตราส่วนพอลิพรอพิลีนต่อพอลิสไตรีนคือ 70:30 อัตรา ส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติกคือ 60:40 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 75 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.8 กรัม ซึ่งภาวการณ์ทดลองข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 75.65% ผลิตภัณฑ์แก๊ส 17.37 % และของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยา 6.98% เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาวิเคราะห์หาการ

กระจายตัวของผลิตภัณฑ์พบว่ามีปริมาณของแกโซลีน 61.25% เคโรซีน 13.25% แก๊สออยล์เบา 15.84% แก๊สออยล์ 3.65% และกากน้ำมันหนัก 6.01% และเมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ผลของผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด

มารีนา มงคล [8] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 400-430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 45-60 นาที และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีตัวแปรคือ น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5-2.0 กรัม ภายใต้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-30 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 น้ำหนัก 0.05-0.2 กรัม ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-20 บาร์ จากผลการทดลองพบว่าภาวะที่ส่งผลต่อการเกิดปริมาณแนฟทาที่สูงที่สุดคือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 79.74 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีร้อยละผลได้ของแนฟทา 28.14 เคโรซีน 16.56 แก๊สออยล์เบา 21.86 แก๊สออยล์ 3.26 และกากน้ำมันหนัก 9.91 กรณีใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยภาวะการทดลองที่ดีที่สุดคือ 430 องศาเซลเซียส ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และHZSM-5 0.05 กรัม ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 83.60 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของแนฟทา 26.75 เคโรซีน 13.79 แก๊สออยล์เบา 22.99 แก๊สออยล์ 3.76 และกากน้ำมันหนัก 16.30 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาจากตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดโดยเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟ (3000MicroGC) พบว่าประกอบด้วย ร้อยละผลได้โดยโมลของมีเทนอยู่ในช่วง 13-22 อีเทน 12-16 โพรเพน 6-8 บิวเทน 1-3 และคาร์บอนไดออกไซด์สูงถึงร้อยละ 54-65

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือและวิธีการทดลองในงานวิจัยชิ้นนี้ โดยมีหัวข้อหลักดังนี้ เครื่องมือและอุปกรณ์ สารตั้งต้นและสารเคมี การดำเนินการวิจัย และ ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Microreactor) รูปทรงกระบอกปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสเตนเลสเหนียวอย่างดี มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส และวาล์วนิรภัย สามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคัล มีชุดสำหรับใส่เทอร์โมคัพเพิลสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง

รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 250 มิลลิลิตร

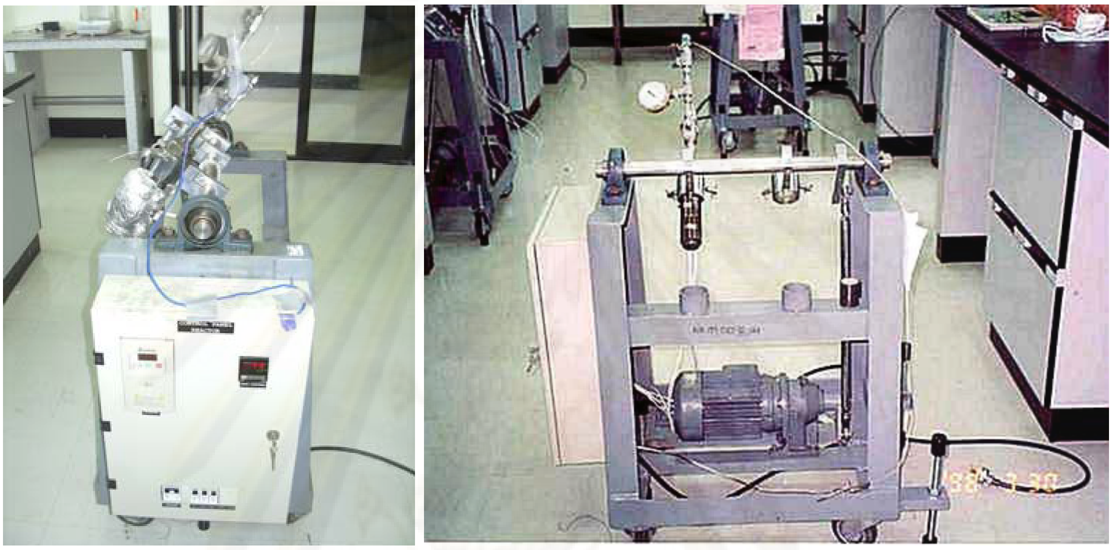
3.1.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Temperature Control) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดความร้อนและตัดการจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 15 องศาเซลเซียส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3 ขวดลวดทนความร้อน Injection แรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 350 วัตต์

3.1.4 เทอร์โมคัพเพิล สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นแบบเค (K-Type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

3.1.5 ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็ว



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลและเครื่องเขย่า

3.1.6 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศเพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว

รูปที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ และกระดาษกรองใยแก้ว

3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.9 นาฬิกาจับเวลา

3.1.10 ตู้อบ (Oven)

3.1.11 เครื่องแก้ว ประกอบด้วย บีกเกอร์ หลอดทดลอง ขวดใส่สารตัวอย่าง

3.1.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 พร้อมดีเทคเตอร์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดงดังรูปที่ 3.4 [27]

หลักการ เป็นวิธีการหาช่วงจุดเดือด (boiling range distribution) ในตัวอย่างประเภทปิโตรเลียมโดยการแยกด้วยเครื่อง Gas Chromatrograph ตามวิธีของ ASTM 2887,3710 CT D-6352 ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็ว ถูกต้องและสามารถทวนกลับได้ดีกว่าวิธีการกลั่นแบบเดิม

3.1.12.1 ฟังก์ชันการใช้งาน : การวิเคราะห์มีอยู่ 3 ฟังก์ชันคือ

3.1.12.1.1 การหาช่วงจุดเดือด (boiling range distribution) อุณหภูมิไม่เกิน $260^{\circ}C$ (ASTM D-3710)

3.1.12.1.2 การหาช่วงจุดเดือด (boiling range distribution) อุณหภูมิไม่เกิน $538^{\circ}C$ (ASTM D- 2887)

3.1.12.1.3 การหาช่วงจุดเดือด (boiling range distribution) อุณหภูมิไม่เกิน $700^{\circ}C$ (ASTM D-6352)

- ตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ :

  Gasoline Faction, Petroleum Faction, Crude oil, Lube oil, Motor oil

รูปที่ 3.4 **เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น** (Simulated Distillation Gas Chromatography : Varian CP-3800 [12]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.12.2 การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด (Boiling Distribution)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph (DGC) การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยวิธีนี้จะวิเคราะห์ตามจุดดือดของสารดังต่อไปนี้

IBP – 200 ^{o}C = naphtha

200 ^{o}C – 250 ^{o}C = kerosene

250 ^{o}C – 350 ^{o}C = light gas oil

350 ^{o}C – 370 ^{o}C = heavy gas oil

370 ^{o}C – FBP = long residue

การวิเคราะห์เริ่มด้วยการนำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ในอัตราส่วน 1:100 โดยปริมาตร วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887พร้อมทั้งดีเทคเตอร์แบบ FID ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation รุ่น Star Simulated DistillationVersion 5.5 คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary Column มี Stationary Phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมครอน ภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิหัวฉีด (Injector Temperature) เท่ากับ 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ (Column Temperature or Oven Temperature) ซึ่งจะใช้เป็นแบบโปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature Program) 1 ขั้นตอน และมีไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิด้วย คือ เริ่มต้นที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 0.01 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายที่ 320 องศาเซลเซียสแล้วคงที่เป็นเวลา 8.50 นาที อุณหภูมิดีเทคเตอร์ (Detector Temperature) เท่ากับ 320 องศาเซลเซียส แก๊สตัวพา (Carrier Gas) เป็นแก๊สฮีเลียมโดยมีอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วย Split ratio เท่ากับ 2

3.1.13 แก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatrography-Mass Spectrometer) [14]

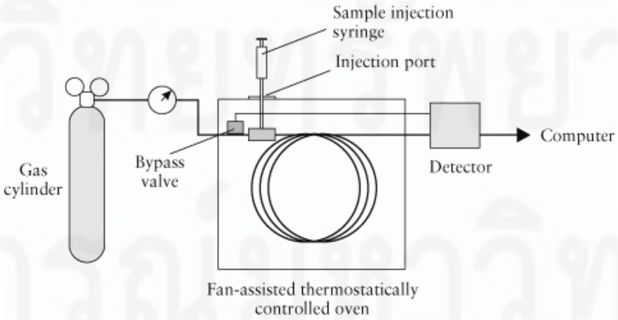
เป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารได้อย่างค่อนข้างแม่นยำโดยอาศัยการเปรียบเทียบ Fingerprint ของเลขมวล (Mass number) ของ

สารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ใน Library นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณ (Quantitative analysis) และเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) GC-MS ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่อง GC (Gas chromatography) และส่วนของแมสสเปกโตรมิเตอร์

รูปที่ 3.5 แก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ [13]

3.1.13.1 Gas Chromatograph (GC)

ทำหน้าที่ในการแยกองค์ประกอบของสารที่สามารถระเหยกลายเป็นไอ (Volatile organic compounds) ได้เมื่อถูกความร้อน กลไกที่ใช้ในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ในสารตัวอย่างอาศัยหลักของความชอบที่แตกต่างกันขององค์ประกอบในตัวอย่างที่มีต่อเฟส 2 เฟส คือ Stationary phase และ Mobile phase องค์ประกอบที่สำคัญของเครื่อง GC สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบพื้นฐานของ GC [14]

3.1.13.1.1 Injector คือ ส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่เครื่องและระเหยเป็นไอก่อนที่จะเข้าสู่ Column อุณหภูมิที่เหมาะสมของ injector ควรเป็นอุณหภูมิที่สูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างสามารถระเหยได้แต่ต้องไม่ทำให้สารสลายตัว ตัวอย่างของ injectorได้แก่ Split, Splitless, On column

3.1.13.1.2. Oven คือ ส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุ Column และเป็นส่วนที่ควบคุมอุณหภูมิของ Column ให้เปลี่ยนไปตามความเหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของ Oven นั้นมี 2 แบบ คือ

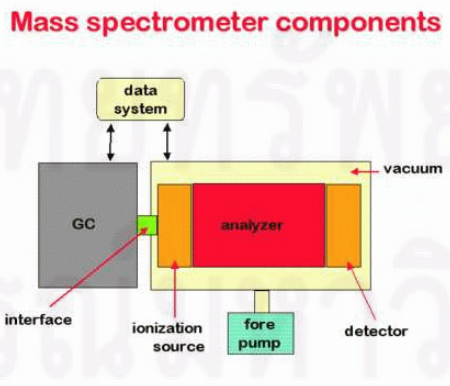
3.1.13.1.2.1 Isocratic Temperature

3.1.13.1.2.2 Gradient Temperature ข้อดีของการทำ Gradient temperature คือสามารถใช้กับสารตัวอย่างที่มีจุดเดือดกว้าง (Wide boiling range) และยังช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์

3.1.13.1.3 Detector คือส่วนที่จะใช้สำหรับตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและดูว่าสารตัวอย่างชนิดที่เราสนใจมีปริมาณอยู่เท่าใด

3.1.13.2 Mass Spectrometer (MS)

เป็น Detector ที่ใช้ตรวจวัดองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง โดยอาศัยกลไก คือ โมเลกุลขององค์ประกอบที่ถูกแยกออกมาจากสารตัวอย่างโดยเครื่อง GCจะถูกไอออไนซ์ในสภาวะสุญญากาศแล้วตรวจวัดออกมาเป็นเลขมวล (Mass number) เทียบกับฐานข้อมูลอ้างอิง แล้วแปลผลออกมาเป็นชื่อขององค์ประกอบนั้นๆ องค์ประกอบสำคัญของ MS แบ่งออกเป็น

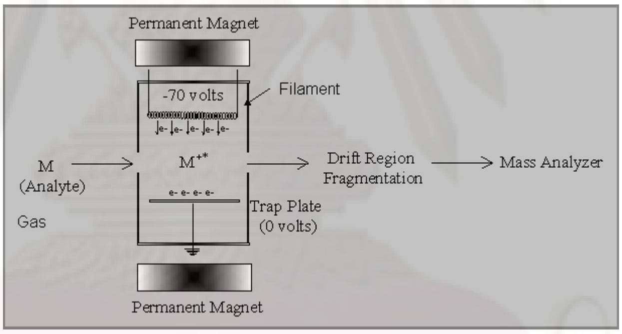


รูปที่ 3.7 **ส่วนประกอบพื้นฐานของ** MS [14]

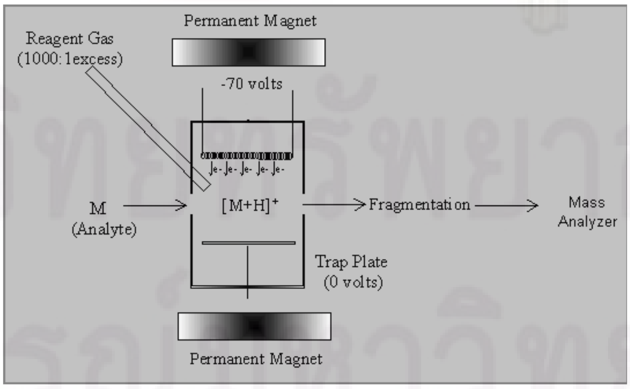
3.1.13.2.1 Ionization Source แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

Electron Ionization (EI) เป็นการทำให้สารเกิด Fragment โดยใช้ลำ Electron ซึ่ง Ionization chamberต้องมีความดันต่ำประมาณ 10 -8 Torr โดย Electron จาก Filament ที่ร้อนจะถูกโฟกัสผ่านห้องนี้และถูกดึงเข้าหา repeller voltage ที่มีความต่างศักย์ 70 โวลต์ ซึ่งจะให้พลังงานกับ Electron เป็น 70 eV ทำให้ของผสมที่ซับซ้อนของไอออนเกิดการแตกหัก (Fragmentation ion) ที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างและความอุดมสัมพัทธ์ (Relative abundance)

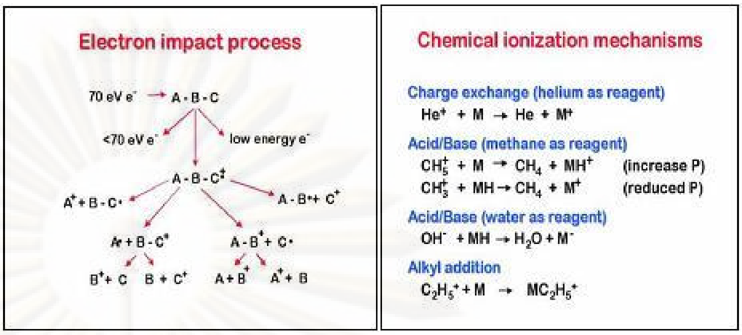
Chemical Ionization (CI) เป็นการทำให้สารเกิดการ Fragment ด้วยวิธีทางเคมีโดยผสมสารตัวอย่าง (ความดัน10 -4Torr) เข้ากับแก๊สที่ทำปฏิกิริยาด้วย (ความดัน 1 Torr) แล้วผ่านสารผสมเข้าไปใน Ionization chamber โดยการทำให้เกิดการ Fragment ด้วยการชนกับ Electron เช่นเดียวกันแก๊สที่ใช้ได้แก่ Methane, Isobutane, Ammonia



รูปที่ 3.8 Electron Ionization [14]



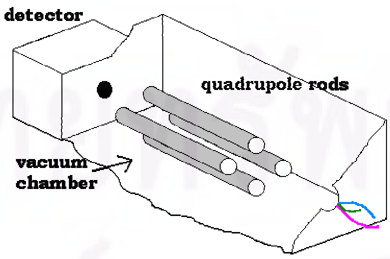
รูปที่ 3.9 Chemical Ionization [14]



รูปที่ 3.10 **กลไกการเกิด** fragment **ของ** EI **และ** CI [14]

3.1.13.2.2 Mass Analyzer

เป็นเครื่องวิเคราะห์มวลมีหลายแบบ คือ Magnetic-sector analyzer, Electrostatic analyzer, Time-of-flight analyzer, Ion cyclotron resonance analyzer, Quadrupole mass spectrometer-Quadrupole Mass Spectrometer ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยสนามแม่เหล็ก คือ เป็น Path-stability mass spectrometer ซึ่งมีแหล่งผลิต Ion source 2 ส่วนโดยส่วนแรกจะทำให้ตัวอย่างกลายเป็นไอออน และส่วนที่ 2 ทำให้สารมาตราฐานกลายเป็นไอออนลำไอออนทั้งสองจะถูกบังคับให้ผ่านเครื่องแยกไอออนชุด เดียวกัน ดังนั้นไอออนทั้งหมดจะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กในสภาวะเดียวกัน แต่ถูกตรวจและวัดด้วยเครื่อง Detector แยกกันซึ่งมีข้อดีคือทำให้สามารถวัดมวลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

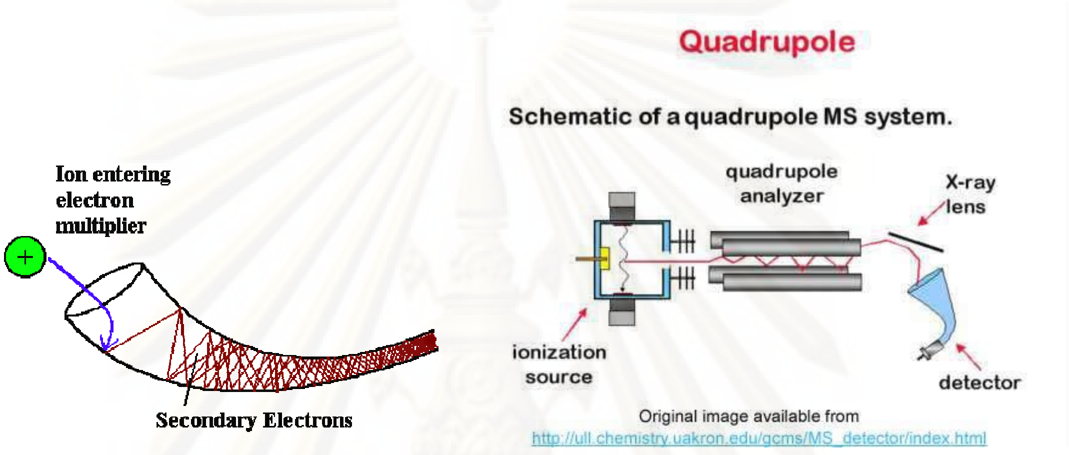


รูปที่ 3.11 Quadrupole Detector [14]

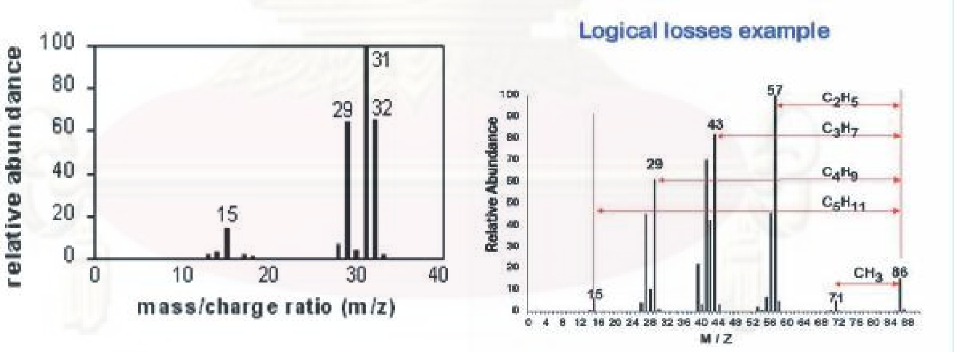
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.13.2.3 Detector

ที่ใช้โดยทั่วไปมีหลายอย่าง คือ Faraday cup dectector, Electron multiplier detector, Scintillation counter dectector, Photographic plate dectector

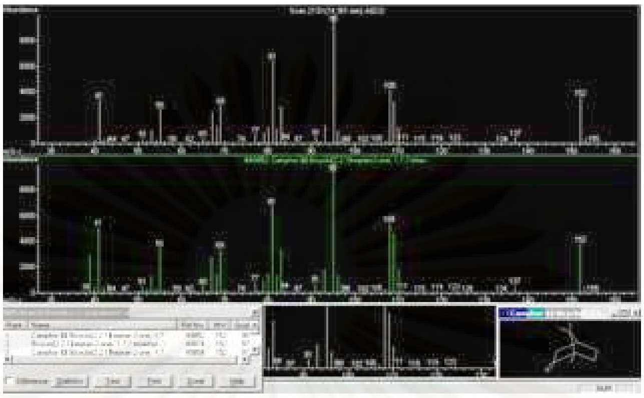


รูปที่ 3.12 Electron Multiplier Schematic [14]



รูปที่ 3.13 Interpreting spectra [14]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.14 Library search results [14]

ข้อดีของ GC-MS

1. สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งแบบทั่วไปและแบบเฉพาะเจาะจงให้ Sensitivity ที่สูง
2. สามารถบ่งชี้ชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างได้
3. สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ

ข้อเสียของ GC-MS

1. ราคาแพง และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเครื่องสูง
2. ต้องใช้บุคลากรที่มีความชำนาญสูง

3.1.14 เครื่องวัดพื้นที่ผิว BET surface area analysis [2]

พื้นที่ผิว (Surface area) ของสาร เป็นสมบัติทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำสารนั้นไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีคุณภาพตามที่ต้องการหรือตามที่มาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่จะกล่าวในที่นี้อาศัยการวัดจากปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (absorb) บนผิวสาร แล้วนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) ของสารต่อไป

หลักการเบื้องต้น

เครื่องวัดพื้นที่ผิวในรูป 3.6 เป็นเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะของสารจะอาศัยหลักการวัดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของแก๊สในขณะที่แก๊สมีการการเคลื่อนที่ (dynamic analysis) โดยแก๊สที่เป็นตัวดูดซับ (แก๊สไนโตรเจน) จะถูกผสมกับแก๊สเฉื่อย (inert gas) (แก๊สฮีเลียม) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมและในการวัดปริมาตรของ

แก๊สที่ไหลผ่านเซลล์นำความร้อน (Thermal Conductivity Cell, TCD) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้

รูปที่ 3.6 เครื่อง BET surface area analysis [5]

3.1.14.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง

- ตัวจ่ายแก๊ส (gas supplier) ทำหน้าที่จ่ายแก๊สไปสู่ระบบต่างๆของเครื่อง
- เครื่องควบคุมการไหล (flow controller) ของแก๊ส ทำหน้าที่ควบคุมอัตราไหลของแก๊สผสม 2 ชนิด คือแก๊สไนโตรเจน และแก๊สฮีเลียมซึ่งเป็นแก๊สพาหะ (carrier gas) ในอัตราส่วนที่เหมาะสม ซึ่งอัตราการไหลของแก๊สผสมที่ผ่านเครื่องจะถูกควบคุมอยู่ที่ประมาณ 12 ถึง 15 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
- ระบบใส่ตัวอย่าง เป็นส่วนที่ใช้สำหรับใส่ตัวอย่างที่ต้องการวัดพื้นที่ผิว ซึ่งจะอยู่ระหว่างขั้นเซลล์นำความร้อนด้านขวาและด้านซ้าย
- เซลล์นำความร้อน มีด้วยกัน 2 ชุด ทำหน้าที่เป็นตัววัดปริมาตรการนำความร้อนที่แตกต่างกันระหว่างขั้วเซลล์นำความร้อนทั้งสอง (เกิดจากความแตกต่างของปริมาณความเข้มข้นของแก๊สผสมของเซลล์นำความร้อนทั้งสอง) เมื่อเกิดการ

ดูดซับและการคายแก๊สออกมา แล้วจึงแปลงสัญญาณนั้นออกมาเป็นปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับและคายออกมา

3.1.14.2 การเตรียมตัวอย่าง

ก่อนที่จะทำการวัดพื้นที่ผิวของสาร สิ่งสำคัญที่ควรคำนึง คือ สารที่ใช้การวัดต้องแห้งและปราศจากสิ่งปนเปื้อนที่อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่าพื้นที่ผิวของสารที่ได้นั้นเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นจึงต้องทำการไล่แก๊ส (degassing) ออกจากสารก่อนทุกครั้งที่นำมาวัด โดยใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับสารนั้น โดยต้องไม่ทำให้โครงสร้างผิวของสารเปลี่ยนไป

ในวิจัยชิ้นนี้ การหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ นำตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.07 กรัม หลังจากนั้นนำไปบดและเลือกใช้สภาวะที่อุณหภูมิที่ 300 องศาเซลเซียส โดยคงที่ที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นเวลา 60 นาที ขณะที่ค่าความดันสุญญากาศ เท่ากับ 50 มิลลิเมตรปรอท

ข้อควรระวัง

- ประสิทธิภาพของการทำงานของเครื่องจะลดลงถ้าในสารตัวอย่างมีความชื้น ดังนั้นควรทำให้สารตัวอย่างแห้งก่อนนำมาวัด
- สารบางชนิด เมื่อถูกความร้อนจะปล่อยไอที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ซึ่งไอกรดดังกล่าวสามารถทำลายส่วนประกอบของเครื่องได้ ดังนั้นไม่ควรนำสารชนิดดังกล่าวมาวัด
- ห้ามคว่ำหลอดสารตัวอย่างหลังจากเติมสารตัวอย่างลงในหลอดใส่ตัวอย่างและติดตั้งหลอดใส่ตัวอย่างแล้ว เพื่อป้องกันไม่ให้สารตัวอย่างไหลออกไปยังส่วนของที่ยึดตัวอย่างที่จะเชื่อมกับตัวเครื่องซึ่งถ้ามีสารตัวอย่างตกค้างอยู่ในบริเวณดังกล่าวจะส่งผลให้เครื่องทำงานผิดพลาด นอกจากนี้ยังทำให้เกิดความผิดพลาดเกี่ยวกับน้ำหนักของสารตัวอย่างที่ใช้ ด้วยในกรณีเช่นนี้ควรทำความสะอาดหลอดใส่ตัวอย่างและชั่งน้ำหนักสาร ตัวอย่างใหม่ก่อนทำการวัดต่อไป
- ห้ามเติมไนโตรเจนเหลวในขณะทำการวัดเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจะมีผลต่ออัตราการไหลแก๊ส

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 ไขมันวัวผ่านการให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนให้เป็นไข และเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำในภาชนะ ปิดสนิทไม่ให้สัมผัสออกซิเจนและไอน้ำในอากาศเพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยา ออกซิเดชันและปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส

3.2.2 10% Fe/Activated Carbon จากประเทศญี่ปุ่น

3.2.3 แก๊สไฮโดรเจน (99.99%) บรรจุในถังเก็บแบบ High Pressure ขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร จากบริษัท TIG Trading

3.2.4 โทลูอีน 99% จาก Fisher Chemicals

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์กรดไขมันเบื้องต้นของไขวัว

วิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันของไขวัว โดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย จากผลการวิเคราะห์พบว่าองค์ประกอบของไขมัน (กรัมต่อ100 มิลลิลิตร) ไขวัวให้ Cis-9-Octadecenoic acid (C18:1 n-9) 30.46 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร รองลงมาคือ Palmitic acid (C16:0) 28.24 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร

3.3.2 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ

เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาการแตกตัวของไขวัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ (10% Fe/Active Carbon) โดยวางรูปแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

ตัวแปร	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	400	450
2. ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที), B	30	90
3. ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก), C	0.25	1
4. ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์), D	1	5

จากตารางที่ 3.1 จะได้วิธีการทดลองดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 วิธีการทดลองโดยการออกแบบการทดลองโดยโปรแกรม Design-Expert

การทดลองที่	**อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส),A**	**ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B**	**ปริมาณตัวเร่ง (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C**	**ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D**
1	400	30	0.25	1
2	450	30	0.25	1
3	400	90	0.25	1
4	450	90	0.25	1
5	400	30	1	1
6	450	30	1	1
7	400	90	1	1
8	450	90	1	1
9	400	30	0.25	5
10	450	30	0.25	5
11	400	90	0.25	5
12	450	90	0.25	5
13	400	30	1	5
14	450	30	1	5
15	400	90	1	5
16	450	90	1	5

3.3.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด

3.3.3.1 วิเคราะห์ปริมาณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของไขวัว

3.3.3.2 วิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography มีวิธีการมาตรฐาน ASTM D-2887

3.3.4 การวิเคราะห์ไขวัวด้วยแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Gas Chromatrography-Mass Spectrometer)

3.3.5 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิว BET surface area analysis

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

นำไขมันวัวมาให้ความร้อนเพื่อเปลี่ยนจากไขมันไปเป็นไข

3.4.2 ขั้นตอนทำการทดลอง

3.4.2.1 ชั่งน้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กและไขวัวด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียด ทศนิยม 2 ตำแหน่ง และตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง ตามสัดส่วนที่กำหนด

3.4.2.2 ใส่สารตั้งต้นและตัวเร่งปฏิกิริยาลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย

3.4.2.3 นำเครื่องปฏิกรณ์ไปไล่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปอย่างช้าๆ แล้วอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่กำหนด สังเกตความดันจาก Regulator ที่ต่อระหว่างถังบรรจุแก๊สไฮโดรเจนกับเครื่องปฏิกรณ์ ตรวจรอยรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำสบู่ตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์ หากปรากฏว่าไม่มีรอยรั่วของแก๊สไฮโดรเจนค่อยๆหมุนวาล์วปิดเพื่อไม่ให้แก๊สออก

3.4.2.4 นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ และต่ออุปกรณ์ขดลวดความร้อนแบบ Injection เข้ากับเครื่องปฏิกรณ์ แล้วหุ้มด้วยฉนวนทับเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลองต่อเทอร์โมคัพเพิลเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์

3.4.2.5 ปรับกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับขดลวดให้ความร้อนและเปิดสวิตซ์เพื่อเขย่า

3.4.2.6 เริ่มทำการจับเวลาตามที่กำหนดเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ เมื่อครบเวลาในการทำปฏิกิริยาแล้วปิดหม้อแปลงไฟฟ้า จากนั้นนำฉนวนและขดลวดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนภายในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้องปล่อยแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์เปิดฝาออก จากนั้นนำเครื่องปฏิกรณ์ไปชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.4.2.7 กรองผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลวใส่หลอดทดลองเพื่อนำไปแกว่งให้ของเหลวที่ได้ไม่แยกชั้นหลังจากนั้นเก็บไว้ในขวดแก้วเพื่อรอวิเคราะห์ ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสายละลายโทลูอีน เช็ดทำความสะอาดด้วยด้วยกระดาษทิชชู่ที่ได้ชั่ง

น้ำหนักไว้แล้ว จากนั้น นำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษทิชชู่ไปอบในตู้อบ Dry Oven ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำไปชั่งเพื่อหาร้อยละของผลที่ได้

3.4.2.8 นำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography) เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงจุดเดือดอุณหภูมิต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง โดยเรียงลำดับการอธิบายคือ การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น การกำหนดภาวะที่ใช้ในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลว การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ การวิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดของแนฟทา การวิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดของดีเซล การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ การเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน และการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดที่ภาวะเหมาะสมกับภาวะต่างๆ การศึกษาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะเหมาะสมเปรียบเทียบกับภาวะต่างๆจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ การศึกษาร้อยละการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดที่ภาวะเหมาะสมเปรียบเทียบกับภาวะต่างๆจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยแบบการทดลองเพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการแตกตัวของไขวัว เช่น อุณหภูมิ ความดัน ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในปฏิกิริยา ซึ่งศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก รวมทั้งศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการทดลองเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปิโตรเลียม

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น สมบัติเบื้องต้นของไขวัว เมื่อทดสอบการวิเคราะห์การกระจายตัวของไขวัวตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น จากตารางที่ 4.1 พบว่า ไขวัวไม่มีสมบัติที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยมีองค์ประกอบที่เป็นกากน้ำมัน สูงถึงร้อยละ 91.21 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันของไขวัว แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบตามคาบจุดเดือดของไขวัว

องค์ประกอบ	% SELECTIVITY
แนฟทา (naphtha)	0.82
เคโรซีน (kerosene)	0.14
แก๊สออยล์เบา (light gas oil)	5.77
แก๊สออยล์ (gas oil)	2.06
กากน้ำมันหนัก (long residue)	91.21

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันของไขวัว (กรัมต่อ100 มิลลิลิตร)

Composition of fatty acid (%)		
C12:0	Lauric acid	0.30
C14:0	Myristic acid	6.55
C15:0	Pentadecanoic acid	0.60
C16:0	Palmitic acid	28.24
C17:0	Heptadecanoic acid	1.49
C18:0	Stearic acid	24.32
C20:0	Arachidic acid	0.27
C22:0	Behenic acid	0.05
C23:0	Tricosanoic acid	0.02
C24:0	Lignoceric acid	0.02
Total saturated fatty acid		61.86
C14:1	Myristoleic acid	0.93
C16:1	Palmitoleic acid	1.97
C17:1	Cis-10-Heptadecenoic acid	0.54
C18:1	Oleic acid	30.46
C18:2	Linoleic acid	0.83
C18:3	Linolenic acid	0.09
C18:4	Moroctic acid	0.10

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบกรดไขมันของไขวัว, กรัมต่อ100 มิลลิลิตร (ต่อ)

Composition of fatty acid (%)		
C20:1	Cis-11-Eicosenoic acid	0.15
C20:3	Cis-8,11,14-Eicosatrienoic acid	0.02
C20:4	Cis-5,8,11.14-Eicasatetraenic acid	0.02
C22:5	Docosapentaenoic acid	0.01
Total unsaturated fatty acid		35.12
Unidentified peak		3.02

ที่มา : วิเคราะห์ผลโดย สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
วิเคราะห์วันที่ 30 พฤศจิกายน 2552

จากตารางที่ 4.2 พบว่าไขวัวมีกรดไขมันอิ่มตัวร้อยละ 61.86 ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จำนวนคาร์บอนอะตอมประมาณ 16 และมีปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวถึงร้อยละ 35.12 เป็นกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเช่นกันโมเลกุลส่วนใหญ่ประกอบด้วยจำนวนคาร์บอนอะตอมประมาณ18

4.2 การกำหนดภาวะที่ใช้ในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

ภาวะที่เลือกใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 – 0.2 กรัม และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 – 5 บาร์ การเลือกในช่วงอุณหภูมิที่ตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป เนื่องจากลองทำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซสเซียส แล้วเกิดไขหลังจากปล่อยทิ้งไว้ แสดงว่าโมเลกุลเกิดการ polymerization กลับมาเป็นสายโซ่ที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล แต่เมื่อทำ การทดลอง ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป พบว่าไม่เกิดปัญหาดังกล่าว และค่าที่สูงสุดอยู่ที่ 450 องศาเซลเซียส เนื่องจากข้อกำจัดในสมรรถภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ การเลือกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 – 90 นาที เพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลการทดลอง อีกทั้งถ้าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามากกว่า 90 นาที จะทำให้เกิดแก๊สมากเกินไป การเลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 0.05 – 0.2 กรัม เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทในการส่งเสริมการแตกตัวทำให้เกิดแก๊สมากขึ้น เมื่อแก๊สมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดความดันสูงเกิดการรั่วไหลของแก๊สในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส ดังนั้นจึงกำหนดช่วงที่จำกัด และที่เลือก 10%Fe/Activated Carbon เนื่องจาก ประชารัตน์ แต้ภักดี [25] ศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นที่

ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ได้ศึกษา 1%Fe/Activated Carbon 5%Fe/Activated Carbon และ 10%Fe/Activated Carbon พบว่าเมื่อปริมาณของเหล็กที่มากขึ้นจะทำให้เกิดการบดบังในการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้ที่ 5%Fe/Activated Carbon ซึ่งมีพื้นที่ผิวรูพรุน 774 ตารางเมตรต่อกรัม มีความเหมาะสมต่อการแตกตัวของ พอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้ว แต่งานวิจัยนี้ได้ใช้ 10%Fe/Activated Carbon ซึ่งมีขนาดพื้นที่ผิวรูพรุน 763 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งมีขนาดพื้นที่ผิวรูพรุนที่ใกล้เคียงกัน รวมทั้งมีปริมาณเหล็กอยู่ 10 เปอร์เซ็นต์ทำให้บริเวณของ active site มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้น 10%Fe/Activated Carbon จึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่น่าสนใจในการศึกษา และการเลือกช่วงของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 - 5 บาร์ เนื่องจากถ้าเติมแก๊สไฮโดรเจนมากและเมื่อรวมกับแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระบบทำให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์มีความดันแก๊สสูง ส่งผลให้แก๊สเกิดการรั่วไหล ดังนั้นจึงต้องกำหนดช่วงของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นอยู่ในขอบเขตที่จำกัด

4.3 ผลการทดลองที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลว

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งได้ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล ทำการทดลอง 2 ซ้ำ (replicate) แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 54.00 - 83.00 โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.1 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าตัวแปรนี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.4 แสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 พบว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.0001 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ซึ่งยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น ปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากการคำนวณด้วยโปรแกรมสมการในการคำนวณหาค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันคือ

% yield liquid fuel = 169.4158 – 0.2148*Temperature – 0.1612*Time

(เมื่อ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400 – 450 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อยู่ในช่วง 30 – 90 นาที)

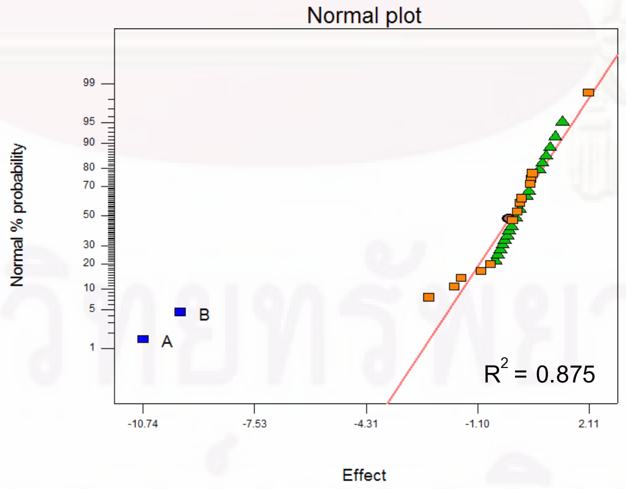
ตารางที่ 4.3 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
1	400	30	0.25	1	78.87
2					83.24
3	450	30	0.25	1	65.07
4					68.33
5	400	90	0.25	1	69.26
6					68.18
7	450	90	0.25	1	64.84
8					61.36
9	400	30	1	1	78.95
10					82.53
11	450	30	1	1	63.72
12					63.27
13	400	90	1	1	67.73
14					67.58
15	450	90	1	1	60.34
16					59.88
17	400	30	0.25	5	80.40
18					77.46
19	450	30	0.25	5	71.28
20					68.41
21	400	90	0.25	5	70.19
22					67.23

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
23	450	90	0.25	5	55.36
24					59.93
25	400	30	1	5	76.64
26					79.65
27	450	30	1	5	64.46
28					70.37
29	400	90	1	5	64.60
30					68.70
31	450	90	1	5	58.35
32					54.42
33	425	60	0.63	3	65.65
34					66.47
35					64.50



รูปที่ 4.1 Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

Response: liq

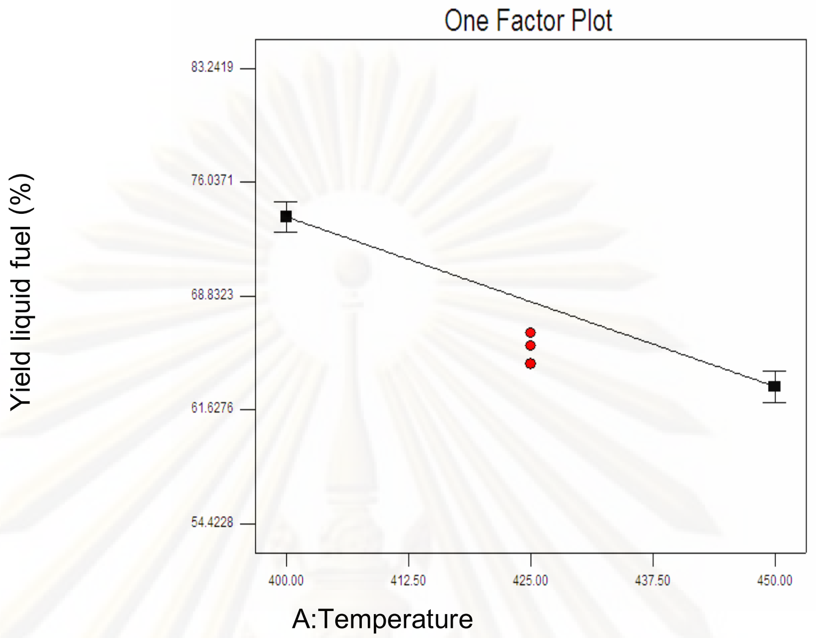
ANOVA for Selected Factorial Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	1670.92	2	835.46	108.50	< 0.0001	significant
A	*922.75*	*1*	*922.75*	*119.84*	*< 0.0001*	
B	*748.16*	*1*	*748.16*	*97.16*	*< 0.0001*	
Curvature	23.30	1	23.30	3.03	0.0918	not significant
Residual	238.70	31	7.70			
Lack of Fit	*147.22*	*13*	*11.32*	*2.23*	*0.0580*	*not significant*
Pure Error	*91.48*	*18*	*5.08*			
Cor Total	1932.92	34				

4.3.1.1 **ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน**

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากผลการทดลองที่ ระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.2 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะทำให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 73.82 เป็น 63.09 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน ในช่วงแรกอิทธิพลของ อุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่ขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก ในขณะที่ให้เวลาในการทำการทดลองดำเนินต่อไป และอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้โมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็ก แตกตัวไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอนจำพวก C1 – C4 ได้มากขึ้น ส่งผลให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง

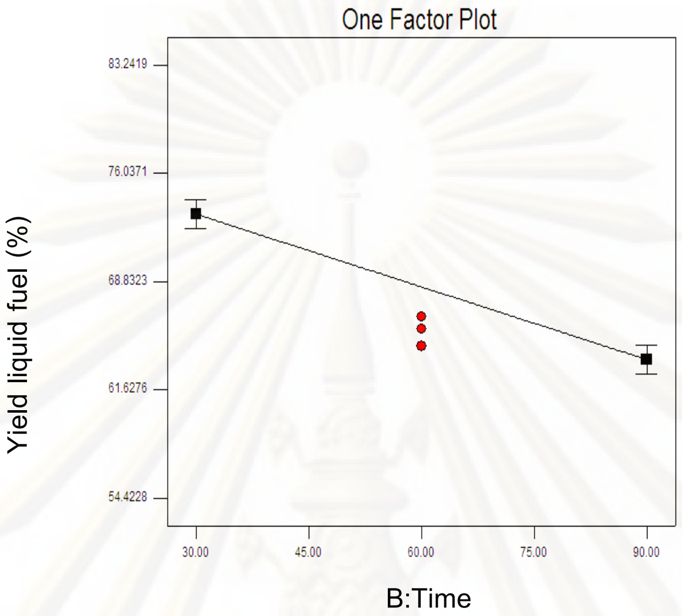


รูปที่ 4.2 **ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา** 60 **นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา** 0.63 **เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น** 3 **บาร์**

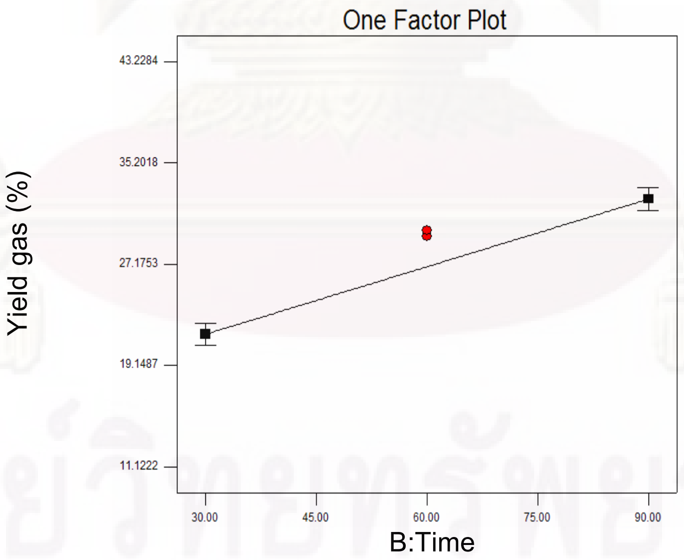
4.3.1.2 **ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน**

การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จาก ผลการทดลองที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที จนถึง 90 นาทีจะทำให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 73.29 เป็น 63.26 โดยน้ำหนัก เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเปลี่ยนเป็นแก๊สมากขึ้น โดยระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 90 นาที จะทำให้แก๊สมากสุดคือ 33.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ดังรูปที่ 4.4) ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวนั้นมีค่าน้อยสุด คือ 63.62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ดังรูปที่ 4.3) เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ยังคงได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง และเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ส่งผลให้โมเลกุลที่แตกตัว

เป็นโมเลกุลขนาดเล็กแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน เห็นได้จากปริมาณแก๊สเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง



รูปที่ 4.3 **ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ** 425 **องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา** 0.63 **เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น** 3 **บาร์**



รูปที่ 4.4 **ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแก๊สที่อุณหภูมิ** 425 **องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา** 0.63 **เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น** 3 **บาร์**

4.3.2 การวิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดของแนฟทา (naphtha)

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งได้ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล ทำการทดลอง 2 ซ้ำ (replicate) แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 54.00 - 83.00 โดยน้ำหนัก จากนั้น นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟจำลองการกลั่นซึ่งจะได้สัดส่วนของแนฟทา แสดงในตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของแนฟทาอยู่ในช่วง 6.00 – 38.00 โดยน้ำหนัก รูป ที่ 4.5 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น แสดงให้เห็นว่าตัวแปรนี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของแนฟทา นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.6 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 พบว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.0001 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อสัดส่วนของแนฟทา ซึ่งยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยหลักที่มีผลสัดส่วนของแนฟทาอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การคำนวณโดยโปรแกรมได้สมการในการคำนวณหาสัดส่วนของแนฟทาคือ

% yield naphtha = 26.30 + 5.74A + 5.06B – 5.13AB + 1.94AD

(เมื่ออุณหภูมิ (A) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (B) และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (D) แทนค่าปัจจัยระดับต่ำเป็น -1 ถึง ปัจจัยระดับสูงเป็น 1)

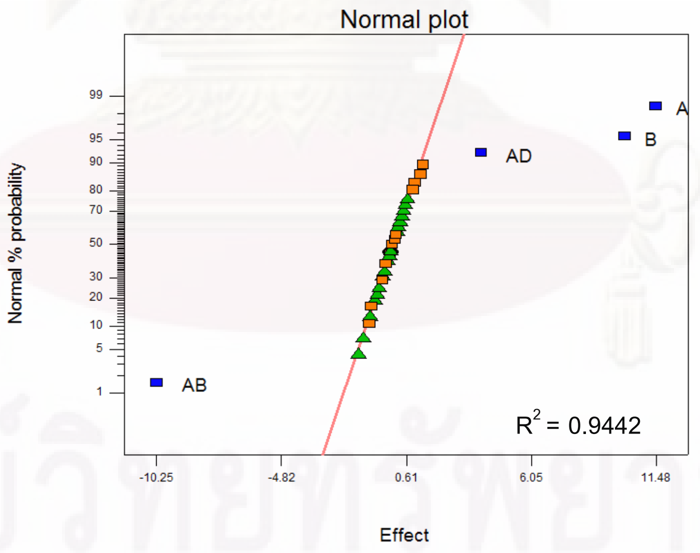
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา (naphtha) **และ ดีเซล** (diesel)

การทดลอง	ตัวแปร				สัดส่วนของแนฟทา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	สัดส่วนของดีเซล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D		
1	400	30	0.25	1	12.70	35.78
2					12.92	41.96
3	450	30	0.25	1	29.04	18.65
4					30.36	22.20
5	400	90	0.25	1	29.44	23.83
6					34.19	17.13
7	450	90	0.25	1	30.51	18.91
8					28.32	16.83
9	400	30	1	1	13.48	34.82
10					8.56	45.42
11	450	30	1	1	28.04	17.48
12					32.28	15.43
13	400	90	1	1	36.89	17.61
14					32.89	17.42
15	450	90	1	1	31.28	12.25
16					32.04	13.58
17	400	30	0.25	5	9.39	40.57
18					11.36	37.47
19	450	30	0.25	5	32.64	21.85
20					36.44	17.63
21	400	90	0.25	5	31.72	21.17
22					28.08	22.00
23	450	90	0.25	5	29.64	13.90
24					33.98	12.36
25	400	30	1	5	6.95	39.41
26					7.62	42.62

ตารางที่ 4.5 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา (naphtha) และ ดีเซล (diesel) (ต่อ)

การทดลอง	ตัวแปร				สัดส่วนของแนฟทา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	สัดส่วนของดีเซล (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D		
27	450	30	1	5	30.74	17.55
28					37.31	15.86
29	400	90	1	5	29.26	18.23
30					23.53	24.57
31	450	90	1	5	36.12	11.53
32					33.94	9.56
33	425	60	0.63	3	28.75	19.06
34					29.14	20.50
35					29.40	17.35



รูปที่ 4.5 Normal probability plot ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา (naphtha)

Response: naptha

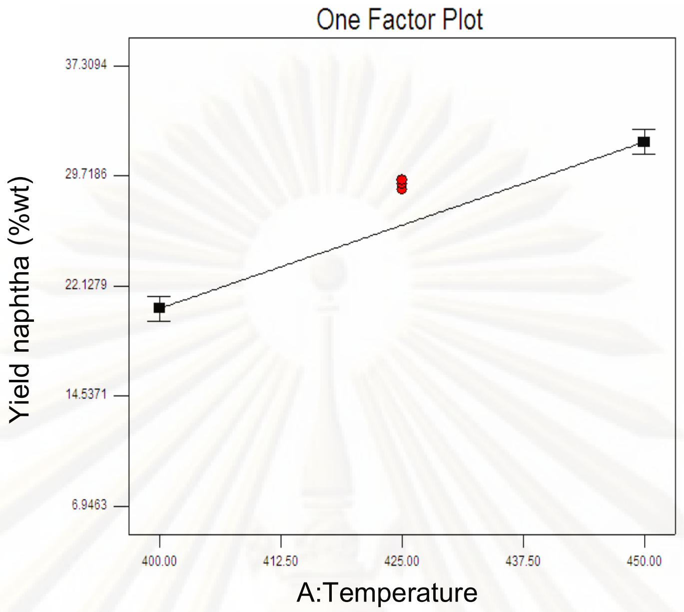
ANOVA for Selected Factorial Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	2836.37	4	709.09	122.67	< 0.0001	significant
A	*1054.40*	*1*	*1054.40*	*182.41*	*< 0.0001*	
B	*820.26*	*1*	*820.26*	*141.91*	*< 0.0001*	
AB	*841.13*	*1*	*841.13*	*145.52*	*< 0.0001*	
AD	*120.58*	*1*	*120.58*	*20.86*	*< 0.0001*	
Curvature	21.47	1	21.47	3.71	0.0638	not significant
Residual	167.63	29	5.78			
Lack of Fit	*57.56*	*11*	*5.23*	*0.86*	*0.5937*	*not significant*
Pure Error	*110.07*	*18*	*6.12*			
Cor Total	3025.46	34				

4.3.2.1 **ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา**

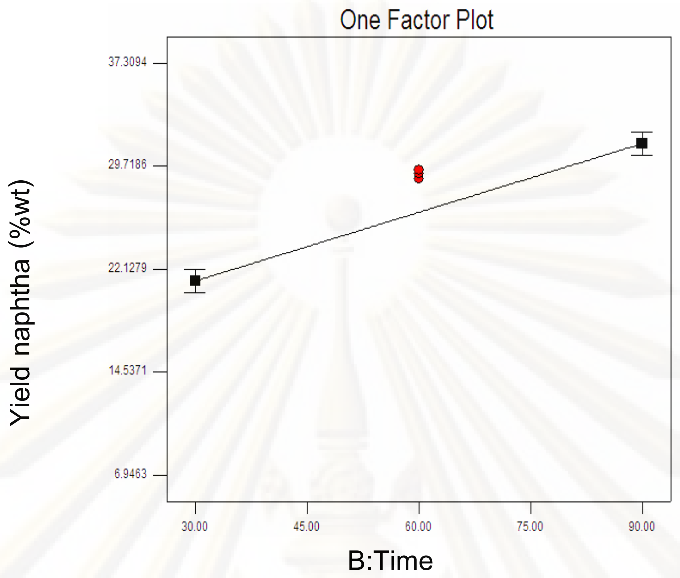
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ทำให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 20.56 เป็น 32.04 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำพวกสัดส่วนของกากน้ำมันหนัก โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลอิสระ (free radical) และเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก จากนั้นขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม ส่งผลให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.6 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์

4.3.2.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา

การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา จากการทดลองที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีถึง 90 นาที ทำให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 21.24 เป็น 31.36 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ยังคงได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง และเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก จากนั้นขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม เกิดเป็นสัดส่วนของแนฟทาที่เพิ่มขึ้น

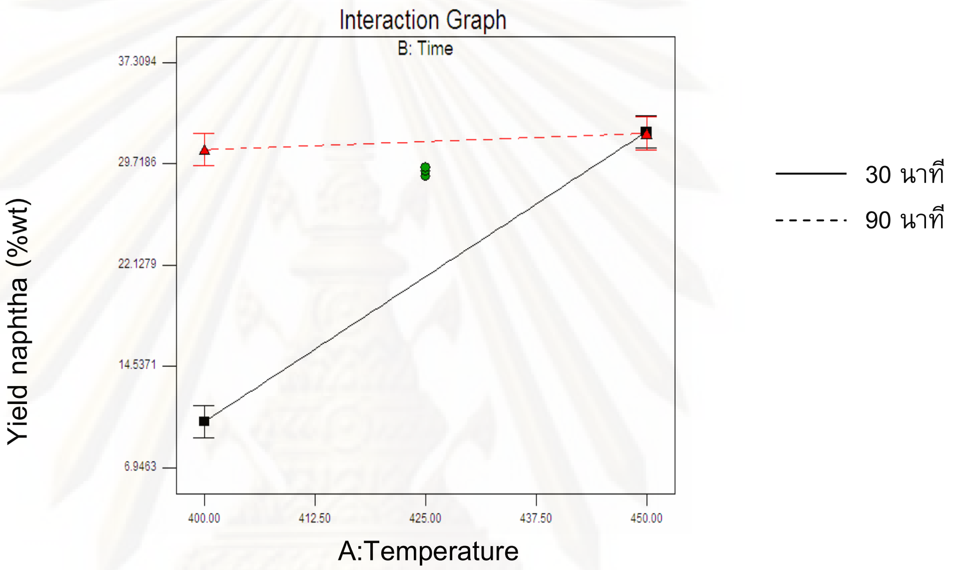


รูปที่ 4.7 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทาที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์

4.3.2.3 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียสถึง 450 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 10.37 เป็น 32.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ทำให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 30.75 เป็น 32.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากกราฟสังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที มีความชันของเส้นตรงที่ชันมาก แต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที มีความชันของเส้นตรงที่ไม่แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อสัดส่วนของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที แต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที อุณหภูมิไม่ส่งผลเท่าไหร่นัก

เนื่องจากในช่วงแรกอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากในการแตกสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก จากนั้นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องและเป็นเวลานานจะมีบทบาทสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างทั่วถึง ทำให้เกิดการแตกสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางไปเป็นขนาดเล็ก อีกทั้งขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดสัดส่วนของแนฟทามากขึ้น



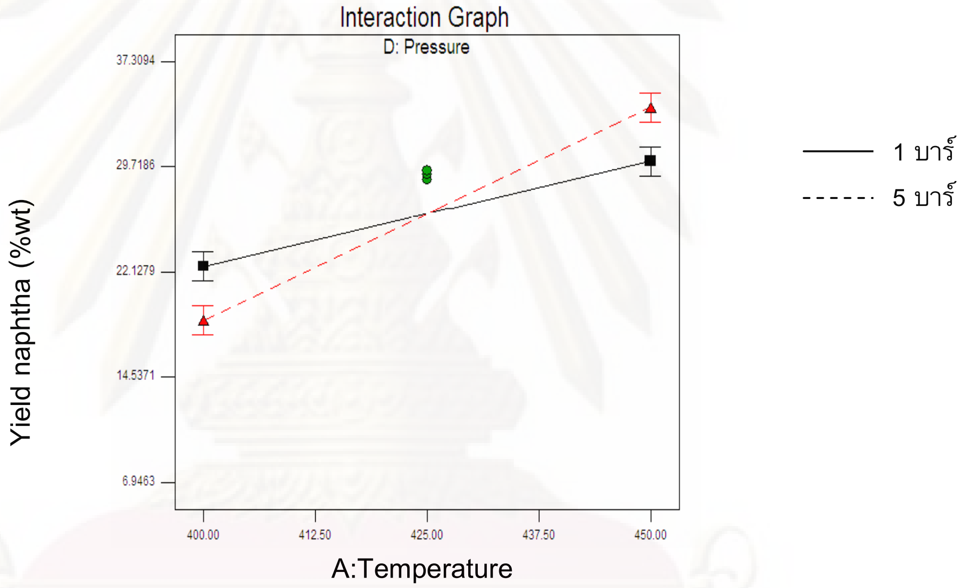
รูปที่4.8ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์

4.3.2.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทา จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาทีจากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก400องศาเซลเซียสถึง 450 องศาเซลเซียส ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ทำให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 22.50 เป็น 30.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ทำให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 18.62 เป็น 33.98 เปอร์เซ็นต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการแตกสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่ 1 และ 5 บาร์ พบว่าความชันของกราฟที่เกิดขึ้นมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นจากผลการทดลองนี้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นจึงไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของแนฟทา แต่เนื่องจากเป็นการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กและช่วงความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นที่จำกัด จึงทำให้ไฮโดรเจนเริ่มต้นไม่มีผลทางนัยสำคัญ อุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสัดส่วนของแนฟทา



รูปที่ 4.9 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของแนฟทาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที

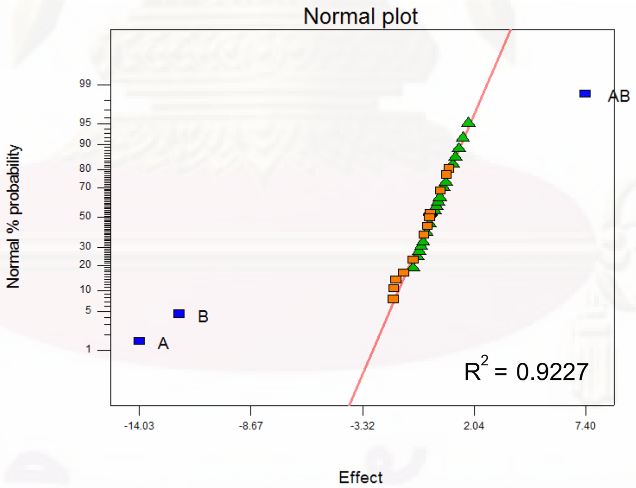
4.3.3 การวิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์เป็นเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือดของดีเซล (diesel)

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งได้ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียล สัดส่วนของดีเซลที่ได้จากการทดลองแบบแฟกทอเรียล ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ร้อยละผลได้ของดีเซล (การรวมระหว่างแก๊สออยล์เบากับแก๊สออยล์) อยู่ในช่วง 9.00 –

46.00 โดยน้ำหนัก จาก รูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งแสดงในเห็นว่าตัวแปรนี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของดีเซล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.7 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 จะพบว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.0001 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อสัดส่วนของดีเซล ซึ่งยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลสัดส่วนของดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การคำนวณโดยโปรแกรมได้สมการในการคำนวณหาสัดส่วนของดีเซลคือ

% yield diesel = 280.0759 - 0.5764*Temperature - 2.2977*Time + 4.9312E-003*Temperature*Time

(เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 400 – 450 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อยู่ในช่วง 30 – 90 นาที)



รูปที่ 4.10 Normal probability plot **ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล**

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล (diesel)

Response: diesel

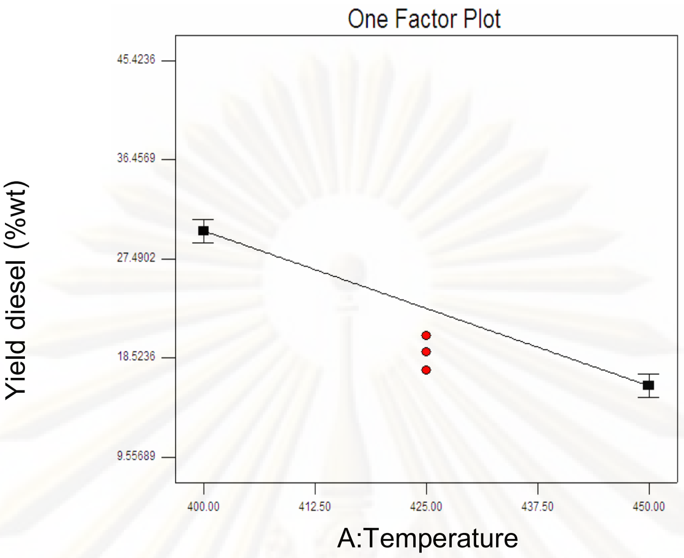
ANOVA for Selected Factorial Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	3185.69	3	1061.90	119.32	< 0.0001	significant
A	*1574.03*	*1*	*1574.03*	*176.87*	*< 0.0001*	
B	*1173.96*	*1*	*1173.96*	*131.91*	*< 0.0001*	
AB	*437.70*	*1*	*437.70*	*49.18*	*< 0.0001*	
Curvature	44.29	1	44.29	4.98	0.0333	significant
Residual	266.98	30	8.90			
Lack of Fit	*108.92*	*12*	*9.08*	*1.03*	*0.4613*	*not significant*
Pure Error	*158.06*	*18*	*8.78*			
Cor Total	3496.96	34				

4.3.3.1 **ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล**

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียสจนถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ทำให้สัดส่วนของดีเซลลดลงจาก 30.00 เป็น 15.97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่จำพวกสัดส่วนของกากน้ำมันหนัก โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลอิสระ (free radical) และเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก จากนั้นขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม ส่งผลให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.6 อีกทั้งการเติมไฮโดรเจนทำให้โมเลกุลอิสระเกิดความเสถียรภาพมากขึ้นส่งผลให้เกิดแก๊สมากขึ้น เมื่อสัดส่วนของแนฟทาและแก๊สมากขึ้นทำให้สัดส่วนของดีเซลมีปริมาณน้อยลง

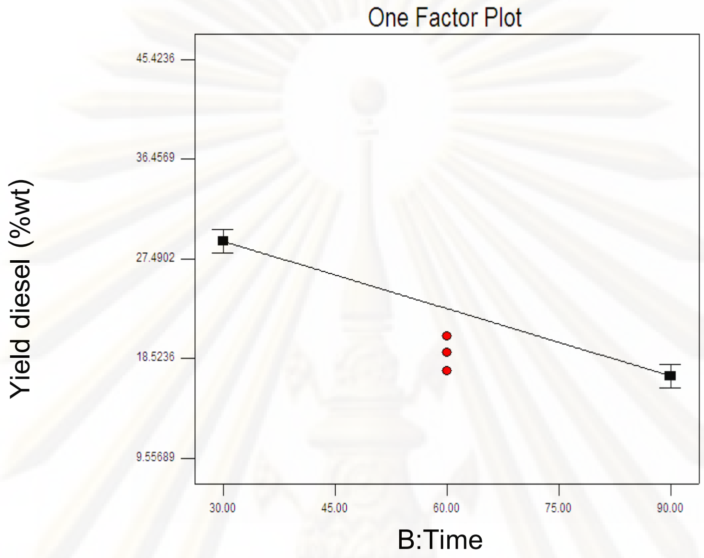


รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์

4.3.3.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล

การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล จากการทดลองที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีถึง 90 นาที ทำให้สัดส่วนของดีเซลลดลงจาก 29.04 เป็น 16.93 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน ยังคงได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง และเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็กเกิดเป็นแก๊สจำพวก C1 - C4 จากนั้นขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสมเกิดเป็นสัดส่วนของแนฟทาที่เพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.7 เมื่อ

เกิดสัดส่วนของแนฟทาและแก๊สเพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนของดีเซลจึงมีปริมาณลดลง

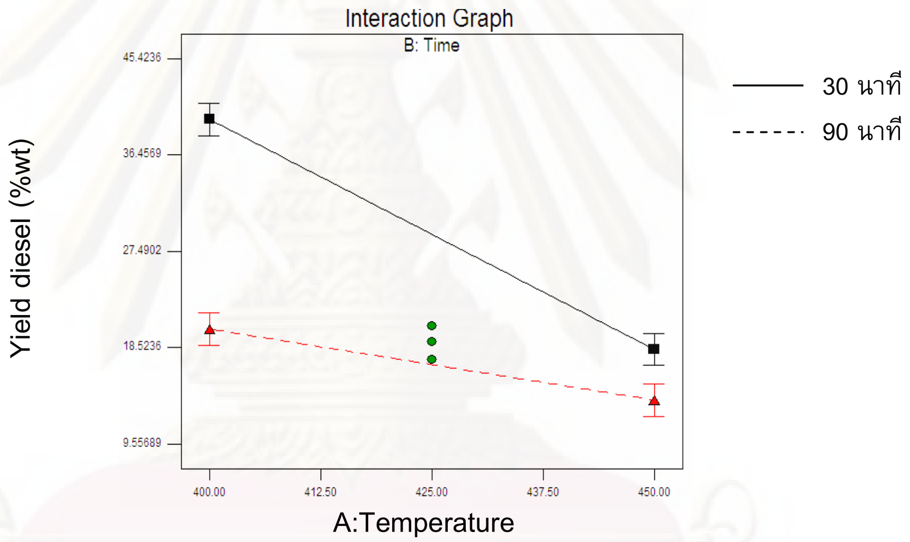


รูปที่ 4.12 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซลที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์

4.3.3.3 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซล

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซลจากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซสเซียสถึง 450 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำให้สัดส่วนของดีเซลลดลงจาก 39.76 เป็น 18.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที ทำให้สัดส่วนของดีเซลลดลงจาก 20.25 เป็น 13.62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากกราฟสังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30นาทีมีความชันของเส้นตรงที่ชันมาแต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที มีความชันของเส้นตรงที่ไม่แตกต่างกัน สามารถอธิบายได้ว่า อุณหภูมิมี

อิทธิพลอย่างมากต่อสัดส่วนของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที แต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาทีอุณหภูมิไม่ส่งผลเท่าไหร่นัก เนื่องจากในช่วงแรกอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากในการแตกสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่จำพวกกากน้ำมันหนักไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก จากนั้นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องและเป็นเวลานานจะมีบทบาทสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างทั่วถึงทำให้เกิดการแตกสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางไปเป็นขนาดเล็กและแก๊ส อีกทั้งขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดสัดส่วนของแนฟทามากขึ้น แสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อสัดส่วนของแนฟทาและแก๊สที่เพิ่มขึ้น ทำให้สัดส่วนของดีเซลมีปริมาณลดลง



รูปที่ 4.13 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของผลิตภัณฑ์ตามคาบจุดเดือดของดีเซลที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์

4.3.4 **การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน** (conversion) **จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์**

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยร้อยละการเปลี่ยนได้จากการทดลองแบบแฟกทอเรียล ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนอยู่ในช่วง 97.00 - 99.00 โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.14 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งแสดงในเห็นว่าตัวแปรนี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.9 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 จะพบว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.0001 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละการเปลี่ยน ซึ่งยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละการเปลี่ยนอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การคำนวณโดยโปรแกรมได้สมการในการคำนวณหาค่าร้อยละการเปลี่ยนคือ

Conversion = -124.0768 + 0.4943*Temperature + 2.5842*Time - 5.7968E003*Temperature*time

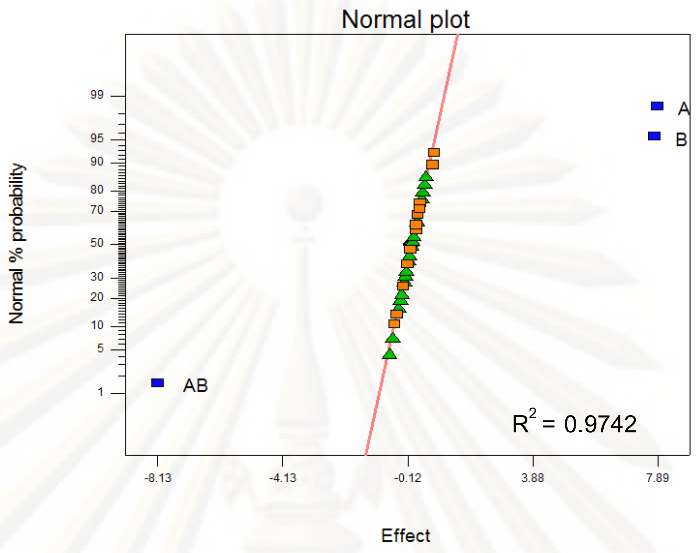
(เมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 400 – 450 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อยู่ในช่วง 30 – 90 นาที)

ตารางที่ 4.8 ค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

การทดลอง	ตัวแปร				ค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
1	400	30	0.25	1	82.19
2					80.93
3	450	30	0.25	1	97.44
4					97.55
5	400	90	0.25	1	96.77
6					98.62
7	450	90	0.25	1	96.97
8					97.34
9	400	30	1	1	86.10
10					80.67

ตารางที่ 4.8 ค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ (ต่อ)

การทดลอง	ตัวแปร				ค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion)
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
11	450	30	1	1	97.37
12					97.82
13	400	90	1	1	98.63
14					97.79
15	450	90	1	1	97.28
16					97.19
17	400	30	0.25	5	80.49
18					82.27
19	450	30	0.25	5	97.14
20					97.85
21	400	90	0.25	5	97.64
22					97.68
23	450	90	0.25	5	98.16
24					95.66
25	400	30	1	5	79.98
26					80.10
27	450	30	1	5	97.89
28					97.80
29	400	90	1	5	97.97
30					97.42
31	450	90	1	5	97.90
32					97.68
33	425	60	0.63	3	97.79
34					97.85
35					97.92



รูปที่ 4.14 Normal probability plot **ของค่าร้อยละการเปลี่ยน** (conversion) **จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์**

ตารางที่ 4.9 **การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละการเปลี่ยน** (conversion) **จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์**

Response: conversion

ANOVA for Selected Factorial Model

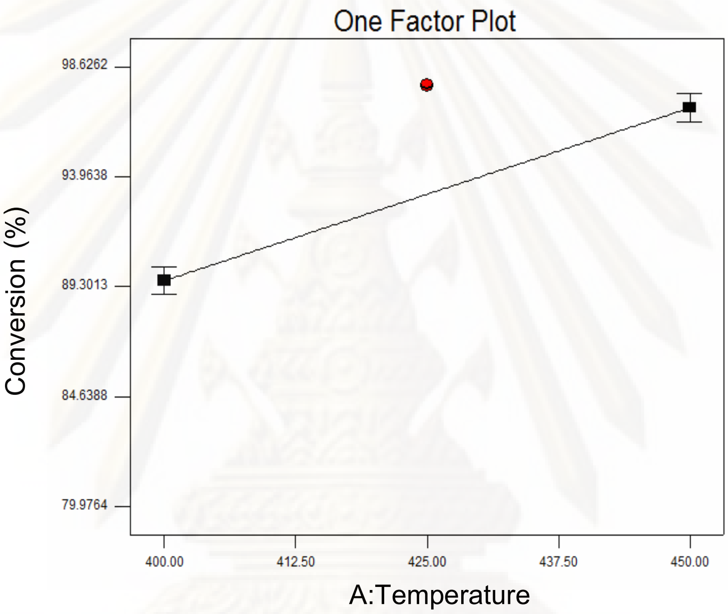
Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	**Sum of Squares**	**DF**	**Mean Square**	**F Value**	**Prob > F**	
Model	1512.69	3	504.23	376.91	< 0.0001	significant
A	*497.40*	*1*	*497.40*	*371.81*	*< 0.0001*	
B	*486.16*	*1*	*486.16*	*363.41*	*< 0.0001*	
AB	*529.13*	*1*	*529.13*	*395.53*	*< 0.0001*	
Curvature	51.93	1	51.93	38.82	< 0.0001	significant
Residual	40.13	30	1.34			
Lack of Fit	*14.69*	*12*	*1.22*	*0.87*	*0.5916*	*not significant*
Pure Error	*25.44*	*18*	*1.41*			
Cor Total	1604.75	34				

4.3.4.1 ผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.15 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนเพิ่มขึ้นจาก 89.56 เป็น 97.44 โดยน้ำหนัก เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้สัดส่วน ของกากน้ำมันหนักเกิดการแตกโซ่โมเลกุล ให้มีขนาดเล็กลงเกิดเป็นสัดส่วนของแนฟทา เคโรซีน ดีเซล ซึ่งสัดส่วนเหล่านี้เป็น ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ น้ำมันปิโตรเลียม

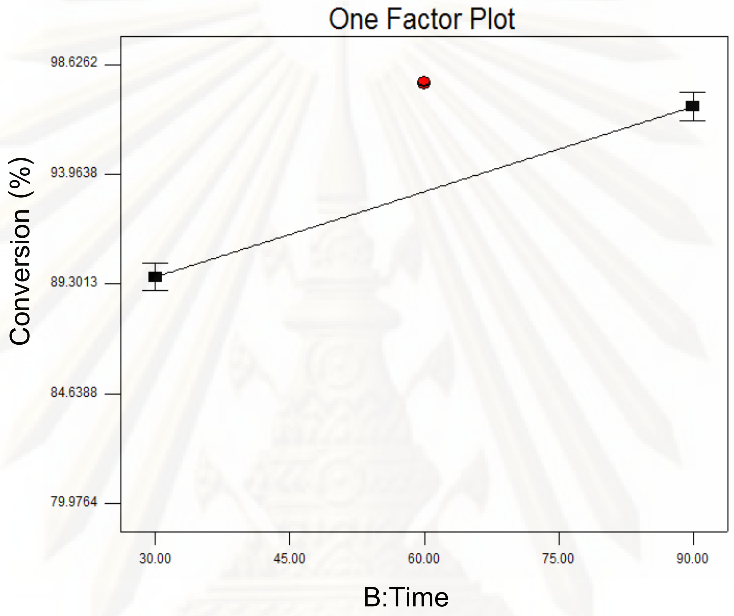


รูปที่ 4.15 **ผลของอุณหภูมิต่อที่ค่าร้อยละการเปลี่ยน** (conversion) **ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา** 60 **นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา** 0.63 **เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น** 3 **บาร์**

4.3.4.2 **ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน** (conversion)

การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน ของการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีถึง 90 นาที ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนของการ

กระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมัน เพิ่มขึ้นจาก 89.60 เป็น 97.40 โดยน้ำหนัก เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ยาวนานและต่อเนื่องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้อย่างทั่วถึง ส่งเสริมให้เกิดการแตกสายโซ่โมเลกุลของกากน้ำมันหนักให้กลายเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กเกิดเป็น สัดส่วนของแนฟทา เคโรซีน ดีเซล

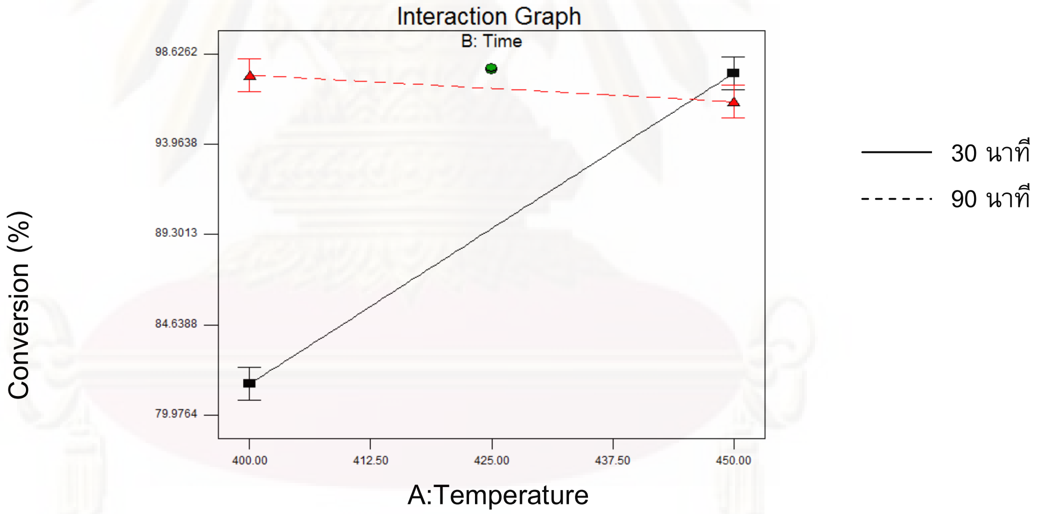


รูปที่ 4.16 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน (conversion) **ที่อุณหภูมิ 425 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์**

4.3.4.3 **ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน** (conversion)

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน การทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 0.63 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซสเซียสถึง 450 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนเพิ่มขึ้นจาก 81.59 เป็น 97.61 โดยน้ำหนัก แต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที มีค่าร้อยละการเปลี่ยนที่ค่อนข้างคงที่จาก 97.52 เป็น 97.27 โดยน้ำหนัก จากกราฟ

สังเกตได้ว่าที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที มีความชันของเส้นตรงที่ชันมาก แต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที มีความชันของเส้นตรงที่ค่อนข้างคงที่ สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากต่อสัดส่วนของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที แต่ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที อุณหภูมิไม่ส่งผลเท่าไหร่นักเนื่องจากในช่วงแรกอุณหภูมิมีอิทธิพลอย่างมากในการแตกสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่จำพวกกากน้ำมันหนักไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก จากนั้นระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องและเป็นเวลานานจะมีบทบาทสำคัญที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างทั่วถึงทำให้เกิดการแตกสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางไปเป็นขนาดเล็กและแก๊ส อีกทั้งขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดสัดส่วนของแนฟทา เคโรซีน ดีเซล มากขึ้น ทำให้ร้อยละการเปลี่ยนมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.17 **ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของค่าร้อยละการเปลี่ยน** (conversion) **ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา** 0.63 **เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น** 3 **บาร์**

4.4 การเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดที่ภาวะเหมาะสมกับภาวะต่างๆ

การศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองแบบแฟกทอเรียล และคำนวณหาภาวะเหมาะสมของการทดลองโดยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 คือ อุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 69.51 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และได้กำหนดขอบเขตที่ต้องการเพื่อหาภาวะเหมาะสม ดังตารางที่ 4.10 จากการคำนวณให้ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ สัดส่วนแนฟทา ดีเซล และร้อยละการเปลี่ยน ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.10 ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design – Expert 6.0.10

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit
Temperature	is in range	400	450
Time	is in range	30	90
Cat	is in range	0.25	1
Pressure	is in range	1	5
gas	minimize	11.1222	43.2284
liq	maximize	54.4228	83.2419
conversion	maximize	79.9764	98.6262
naptha	maximize	6.9463	37.3094
diesel	maximize	9.55689	45.4236

ตารางที่ 4.11 ค่าเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 **กับค่าที่ได้จากการทดลองจริง**

Response	Program	Real
Yield liquid fuel (%)	72.29	68.18
Yield naphtha (%wt)	25.73	33.68
Yield diesel (%wt)	26.90	21.00
Converion (%)	92.08	95.29

4.4.1 การศึกษาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะเหมาะสมเปรียบเทียบกับภาวะต่าง ๆจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

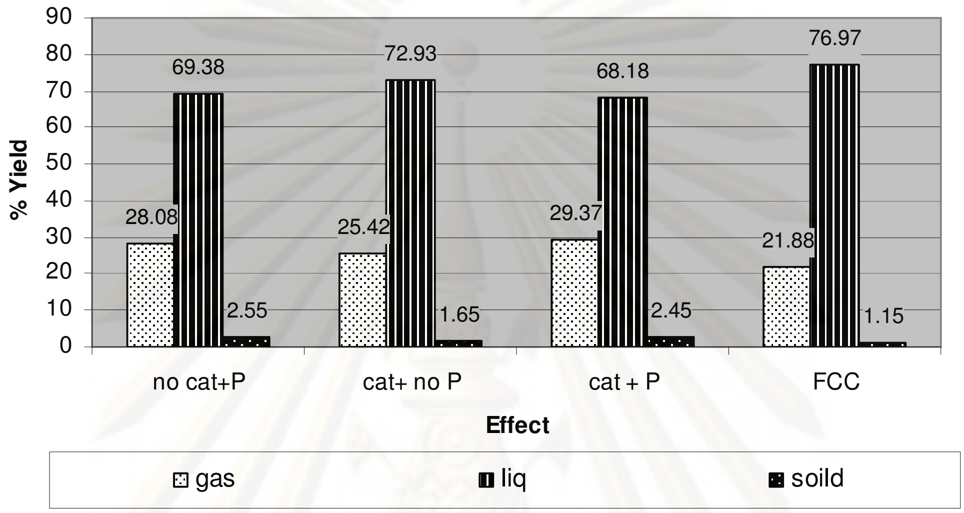
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาภาวะเหมาะสมของการทดลองซึ่งผลการทดลองโปรแกรม Design – Expert 6.0.10 พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 69.51 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 1 บาร์ จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.18

4.4.1.1 **การศึกษาการเปรียบร้อยละผลได้ระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา** แสดงให้เห็นว่าเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันมี ค่าจาก 68.18 เป็น 69.38 เปอร์เซ็นต์ และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส 29.37 เป็น 28.08 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้ค่าที่ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากขนาดรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลเหมาะสม ซึ่งเป็นสายโซ่ขนาดกลาง ทำให้ไม่เกิดแก๊สเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ทั้งผลิตภัณฑ์น้ำมัน แก๊ส ของแข็ง ไม่แตกต่างกัน

4.4.1.2 **การศึกษาการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น** พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ภาวะเหมาะสม กับกรณีที่ไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก 68.18 เป็น 72.93 เปอร์เซ็นต์ และร้อยละผลได้ของแก๊สลดลงจาก 29.37 เป็น 25.42 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดการแตกตัวการเติมไฮโดรเจนช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการแตกตัว และช่วยส่งเสริมการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนในโมเลกุลอิสระทำให้โมเลกุลมีความเสถียรมากขึ้นส่งผลให้เกิดแก๊สมากขึ้น ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจึงมีค่าลดลง

4.4.1.3 **การศึกษาการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วแทนเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่เท่ากัน** พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้ว (ที่ผ่านการเผาไหม้ด้วยอากาศ) ทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน เพิ่มขึ้น จาก 68.18 เป็น 76.97

เปอร์เซ็นต์ และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊สลดลงจาก 29.37 เป็น 21.88 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีช่วยลดปริมาณร้อยละผลได้ของของแก๊สที่เกิดขึ้นส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้น



Cat = 10%Fe/Activated Carbon

รูปที่ 4.18 ผลของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะต่าง ๆที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 69.51 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

4.4.2 การศึกษาร้อยละการกระจายตัวขององค์ประกอบตามคาบจุดเดือดที่ภาวะเหมาะสมเปรียบเทียบกับภาวะต่าง ๆ จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์

การศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองแบบแฟกทอเรียล และคำนวณหาภาวะเหมาะสมของการทดลองโดยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 คือ อุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 69.51 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.19

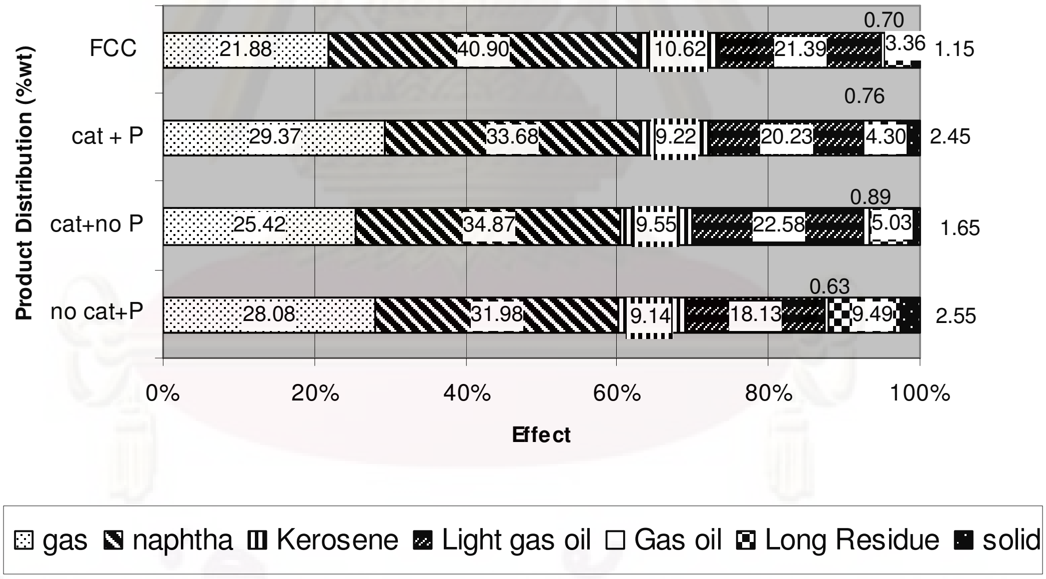
4.4.2.1การศึกษาการเปรียบเทียบร้อยละการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 31.98 เป็น

33.68 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพล จากการแตกตัวด้วย ตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการเลือกขนาดที่เหมาะสมกับรูพรุนทำให้เกิดสัดส่วนของแนฟทามากขึ้น และผลจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติของพื้นที่ผิวรูพรุนจำนวนมาก และ ปริมาณของเหล็กร้อยละ 10 ทำให้มีบริเวณที่เป็น active site สามารถช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดี ทำให้ได้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจำพวกแนฟทา [8] ขณะที่เมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีเพียงความร้อนเท่านั้น ซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นถึงจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ [7]

4.4.2.2การศึกษาการเปรียบเทียบร้อยละการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น พบว่าเมื่อเติมแก๊สไฮโดรเจนทำให้สัดส่วนของแนฟทาจาก 34.87 เป็น 33.68 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่าที่ ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่การเติมไฮโดรเจนนั้นจะทำให้ร้อยละเปลี่ยนมีเพิ่มจาก 94.48 เป็น 95.29 แสดงในตารางที่ 5.1 เนื่องการเติมไฮโดรเจนจะช่วยกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยา และช่วยส่งเสริมการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้สัดส่วนของกากน้ำมันหนักแตกสายโซ่โมเลกุลจากขนาดใหญ่ให้มีขนาดกลางและขนาดเล็ก เนื่องจากในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดการปกคลุมของแก๊สไฮโดรเจนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา การอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนจะส่งเสริมการถ่ายโอนสาร (Mass Transfer) จาก gas ghase ไปยังพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง รวมทั้งแก๊สไฮโดรเจนจะถูกเติมในสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มกลายเป็นอิ่มตัวมากขึ้น

4.4.2.3การศึกษาการเปรียบเทียบร้อยละการกระจายตัวตามคาบจุดเดือดระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วแทนเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่เท่ากัน พบว่าเมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วทำให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 33.68 เป็น 40.90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่พื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาของเอฟซีซีที่ใช้แล้ว มีขนาดของรู

พรุนที่เหมาะสมกว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วมีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 6.77 นาโนเมตร และ 10% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเท่ากับ 2.18 นาโนเมตร เนื่องจากขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เล็กกว่าของ 10% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ทำให้การเลือกเกิดของแก๊สได้ดี แสดงในรูปที่ 4.18 แต่ขนาดของรูพรุนเฉลี่ยที่ใหญ่กว่าของเอฟซีซีที่ใช้แล้วทำให้ในการเลือกเกิดของสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางมากกว่า ทำให้สัดส่วนของแนฟทาของตัวเร่งปฏิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วดีกว่า 10% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ และการลดลงของ active site บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองชนิดนี้ เป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกคาร์บอนมาปกคลุมบนตำแหน่งกัมมันต์ของตัวเร่งปฏิกิริยา การบล็อกของคาร์บอนที่ปากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาจะขัดขวางการแพร่ของสารตั้งต้นเข้าไปยังทำผิวภายในตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา [33]



Cat = 10%Fe/Activated Carbon

รูปที่ 4.19 ผลของการกระจายตัวผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ภาวะต่าง ๆที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 69.51 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน 1 บาร์

4.5 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

Benxian S. และคณะ [16] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดสัดส่วนของแก๊สโซลีนที่ดีที่สุดในผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยใช้กระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันเมล็ดฝ้าย ด้วยเครื่อง Fixed-Fluidized bed และทำการศึกษาผลของอุณหภูมิระหว่าง 400 – 500 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสารป้อนเข้า โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี

มารีนา มงคล [26] ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 400-430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 45-60 นาที และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งมีตัวแปรคือ น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5-2.0 กรัม ภายใต้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-30 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 น้ำหนัก 0.05-0.2 กรัม ที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-20 บาร์

จากผลการวิจัยและงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน สามารถเปรียบเทียบภาวะที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลองในตารางที่ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	Benxian S. และ **คณะ**	**มารีนา มงคล**	**งานวิจัยนี้**
สารตั้งต้น	น้ำมันเมล็ดฝ้าย	น้ำมันปาล์ม	ไขวัว
เครื่องที่ใช้ในการทดลอง	เครื่องFixed-Fluidized bed	เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตซ์ขนาดเล็ก	เครื่องปฏิกรณ์แบบแบตซ์ขนาดเล็ก
ตัวเร่งปฏิกิริยา	เอฟซีซี	5% เหล็กบนถ่านกัมมันต์	10% เหล็กบนถ่านกัมมันต์
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (กรัมต่อกรัม)	7.8	0.05	0.15
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	426.2	430	400
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	50.2 วินาที	60 นาที	69.51 นาที
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	ไม่มีไฮโดรเจน	10	1
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน (โดยน้ำหนัก)	65.6	79.74	68.18
ร้อยละผลได้ของแนฟทา (โดยน้ำหนัก)	33.7	28.14	33.68
ร้อยละผลได้ของดีเซล (โดยน้ำหนัก)	-	26.75	21.00

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการแตกตัวของไขวัว เช่น อุณหภูมิ ความดัน ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก นำไปวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดต่างๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Simulated Distillation Gas Chromatography) ซึ่งทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลและออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล ทำการทดลอง 2 ซ้ำ (replicated) ออกแบบและคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 โปรแกรมนี้สามารถบ่งบอกได้ว่าตัวแปรใดมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ร้อยละผลได้ของแนฟทาและดีเซล ค่าร้อยละการเปลี่ยน นอกจากนี้การคำนวณของโปรแกรมสามารถบอกถึงภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา
2. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น
3. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา
4. ปัจจัยหลักที่มีต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนอย่างมีนัยสำคัญ คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และ อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา
5. ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ จากการคำนวณด้วยโปรแกรม คือ

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	400	องศาเซลเซียส
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	69.51	นาที
ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	0.75	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	บาร์

โดยภาวะการทดลองข้างต้นให้ผลร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 68.18 โดยน้ำหนักร้อยละผลได้ของแก๊ส 29.37 โดยน้ำหนัก และร้อยละผลได้ของแข็ง 2.45 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณ สัดส่วน ของแนฟทา เคโรซีน ดีเซล และกากน้ำมันหนัก 33.68 9.22 21.00 และ 4.30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ค่าร้อยละการ เปลี่ยน 95.29 โดยน้ำหนัก

6. ผลการทดลองเมื่อเปรียบภาวะที่เหมาะสมกับภาวะต่างๆดังนี้ แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบภาวะที่เหมาะสมกับภาวะต่างๆ

run	gas	liquid	solid	naphtha	kerosene	diesel	conversion
optimum	29.37	68.18	2.45	33.68	9.22	21.00	95.29
No cat	28.08	69.38	2.55	31.98	9.14	18.77	89.60
No P	25.42	72.93	1.65	34.87	9.55	23.47	94.48
FCC	21.88	76.97	1.15	40.90	10.62	22.09	96.32

7. ผลการทดลองแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นประกอบด้วยการแตกตัวด้วยความร้อน โดยการให้อุณหภูมิสูงๆ แก่ระบบเป็นระยะเวลาหนึ่ง และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาสูงขึ้น ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลต่อการทดลองเนื่องจากปริมาณตัวเร่งที่ใช้นั้นพอเหมาะกับการทดลอง แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาส่งผลต่อการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา ในระบบอื่นๆ เพื่อนำไปขยายส่วนการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น
2. ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีที่ใช้แล้วเนื่องจากเป็นผลที่เหลือจากการกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันในโรงงานและค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบการทดลองเบื้องต้นค่อนข้างดีเป็นที่น่าสนใจในการนำไปศึกษาต่อเพื่อลดต้นทุนในการผลิตจริง
3. ศึกษาความเป็นไปได้และเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว
4. ศึกษาหาสารตั้งต้นชนิดอื่นๆที่หาได้ง่าย ราคาถูก หรือเป็นของเหลือใช้จากขบวนการอื่น เพื่อลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม รวมทั้งช่วยคำนึงในแง่ของเศรษฐศาสตร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

[1] วิทยา เรืองพรวิสุทธิ์. คะตะไลซีสแบบเฮทเทอโรจีเนียส : หลักทฤษฎีและการประยุกต์. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

[2] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์ : ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย:กรุงเทพฯ, 2543.

[3] ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. พิมพ์ที่ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ:โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

[4] อธิชา ฉายสุวรรณ, วรินทร ชวศิริ และ วิมลรัตน์ ตระการพฤกษ์. แคตตะลิสต์ในโพรงซีโอไลต์วายสำหรับการออกซิเดชันสารประกอบไฮโดรเจน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[5] วิชชากร จารุศิริ, จินตนา อุบลวัฒน์. การแตกตัวด้วยความร้อนของกลีเซอรอลที่เหลือจากกระบวนการเอสเทอริฟิเคชันให้เป็นแก๊สโซลีนบนเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3.สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[6] วราวุฒิ ประชาสิริสกุล. การผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมันโดยการกระตุ้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

[7] ประชารัตน์ แต้ภักดี. การแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิพรอพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.

[8] มารีนา มงคล. การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก บนถ่านกัมมันต์และ HZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[9] วีระชัย เปรมโยธิน. เชื้อเพลิงและปิโตรเคมี. ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2534.

[10] ไขวัว. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://school.obec.go.th/mclschool/6.2.2/Lipid.htm [2552, ธันวาคม 19].

[11] ชนิดของกรดไขมัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.promma.ac.th/chemistry/boonrawd_site/kind_of_fattyacid.htm [2552, ธันวาคม 15].

[12] DGC. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.chemtech.sc.chula.ac.th/Analytical_unit/DGC.html [2552, ธันวาคม 18].

[13] GCMS. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.chemtech.sc.chula.ac.th/Analytical_unit/GCMS.html [2552, ธันวาคม 18].

[14] GC-MS. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://sakioki.exteen.com/20090303/k-me-gc-ms [2552, ธันวาคม 18].

[15] BET surface. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.chemtech.sc.chula.ac.th/Analytical_unit/GCMS.html [2552, ธันวาคม 18].

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ภาษาอังกฤษ</u>

[16] Charles N. Satterfield. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. New York : McGraw-Hill, 1991.

[17] James A. Casumano. Catalysis in Coal. New York : Academics Press, 1978.

[18] Matar S., Manfred J.M., Hassan A.T. Catalysis in Petrochemical Processes. Netherlands: Kluwer Academic Publishers,1989.

[19] Bansel R.C. Active Carbon. New York : Marcel Dekler, 1988.

[20] Matlson J.S. and Mark V.B. Active carbon surface chemistry and adsorption from solution. New York : Marcel Dekker, 1971.

[21] Harold H. Schobert, The Chemistry of Hydrocarbon fuel. New York, 1991.

[22] Gary J.H., Handwerk G.H. Petroleum of Refining:Technology and Economics. Vol.5 New York : Marcel Dekker, 1975.

[23] Gary J.H., Handwerk G.H. Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing. New York : Marcel Dekker, 1984.

[24] Hagen J. Industrial Catalysis. New York : Wiley-VCH, 1999.

[25] Hong L., Benxian S., J.C. Kabalu, Mominou N. Enhancing the production of biofuels from cottonseed oil by fixed-fluidized bed catalytic cracking. Renewable Energy 34 (2009) : 1033–1039.

[26] Pramila T., Subhash B. Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels: Optimization studies. Bioresource Technology 98 (2007) : 3593–3601.

[27] Thiam L. C., Subhash B. Effect of catalyst additives on the production of biofuels from palm oil cracking in a transport riser reactor. Bioresource Technology 100 (2009) : 2540–2545.

[28] Farouq A. T., Noor A.M. Z.i, and Subhash B. Catalytic Conversion of Palm Oil to Hydrocarbons : Performance of Various Zeolite Catalysts. Industrial & Engineering Chemistry Research 38 (1999) : 3230 – 3237.

[29] Farouq A.A. T., Noor A.M. Z., A.R. M. , and Subhash B. Catalytic Conversion of palm oil over mesoporous aluminosilicate MCM-41 for the production of liquid hydrocarbon fuels. Fuel Processing Technology 1660 (2003) : 1-16.

[30] Y.S Prasad, N.N. Bakshishi, J.F.Mathews and R.L. Eager. Catalytic Conversion of Canola Oil to Fuels and Chemical Feedstocks Part I. Effect of Process Conditions on the Performance of HZSM-5 Catalyst. Chemical Engineering 64 (1996) : 278-284.

[31] Weibing D., Jing L., and Laary L. A. Catalysis and processes for heavy oil conversion. International Symposium on Advances in Catalysis and Processes for Heavy oil Conversion. (1997) : 428–432.

[32] Nakamura I., Fujimoto K. Development of new disposable catalyst for waste plastics treatment for high quality transportation fule. Journal of Catalysis 27 (1996) : 175-179.

[33] Douglas C.Montgomery. Design and analysis of experiments. Sixth C, p.203-253.

[34] Breck, D.W. Zeolite Molecular Sieve: Structure, Chemistry and Use. New York: Willey, 1974.

[35] Lynne McCusker. Ultrastable Y,Dehydrated Dealuminated. [online]. Available from : http://www.iza-structure.org/ [2010, April 7].

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 ผลการทดลองจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ที่ภาวะการทดลองต่าง ๆ

Run No.	Factors				Product yield			Product distribution in liquid fuels				
	Temp.(°C)	Time (min)	Catalyst (%wt)	H_2 (bar)	% Yield liquid fuel	% Yield gas	% Yield solid	% Naphtha	% Kerosene	% Light gas oil	% Gas oil	% Long residue
1	400	30	0.25	1	78.87	15.53	5.59	12.70	14.15	32.72	3.06	16.24
					83.24	11.12	5.64	12.92	10.98	38.75	3.21	17.39
2	450	30	0.25	1	65.07	29.79	5.14	29.04	15.05	17.65	1.00	2.33
					68.33	26.97	4.70	30.36	13.54	21.15	1.05	2.23
3	400	90	0.25	1	69.26	26.11	4.63	29.44	13.04	22.64	1.19	2.94
					68.18	25.64	6.18	34.19	15.27	16.30	0.83	1.59
4	450	90	0.25	1	64.84	31.77	3.40	30.51	12.65	17.86	1.05	2.77
					61.36	34.45	4.19	28.32	13.79	15.90	0.93	2.42
5	400	30	1	1	78.95	14.81	6.25	13.48	17.97	31.93	2.89	12.68
					82.53	11.63	5.84	8.56	10.92	42.07	3.36	17.63
6	450	30	1	1	63.72	33.68	2.59	28.04	15.80	16.64	0.84	2.40
					63.27	32.93	3.79	32.28	13.58	14.67	0.77	1.99
7	400	90	1	1	67.73	26.83	5.44	36.89	11.97	16.92	0.70	1.25
					67.58	26.05	6.37	32.89	15.26	16.51	0.90	2.01
8	450	90	1	1	60.34	37.32	2.34	31.28	7.94	11.27	0.99	8.87
					59.88	37.72	2.40	32.04	9.87	12.85	0.73	4.39
9	400	30	0.25	5	80.40	15.50	4.10	9.39	12.65	37.55	3.02	17.79
					77.46	16.49	6.05	11.36	12.46	34.47	3.00	16.17
10	450	30	0.25	5	71.28	25.09	3.63	32.64	14.18	20.77	1.09	2.61
					68.41	28.05	3.54	36.44	12.38	16.72	0.91	1.96
11	400	90	0.25	5	70.19	25.12	4.69	31.72	15.14	20.24	0.93	2.15
					67.23	27.78	4.99	28.08	15.03	20.98	1.02	2.12

ตารางที่ ก1 ผลการทดลองจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของไขวัวบนเหล็ก/ถ่านกัมมันต์ที่ภาวะการทดลองต่างๆ (ต่อ)

Run No.	Factors				Product yield			Product distribution in liquid fuels				
	Temp.(^{o}C)	Time (min)	Catalyst (%wt)	H_2 (bar)	% Yield liquid fuel	% Yield gas	% Yield solid	% Naphtha	% Kerosene	% Light gas oil	% Gas oil	% Long residue
12	450	90	0.25	5	55.36	41.65	2.99	29.64	10.14	13.17	0.73	1.68
					59.93	37.08	2.99	33.98	9.62	11.63	0.73	3.96
13	400	30	1	5	76.64	14.54	8.81	6.95	12.02	36.29	3.12	18.26
					79.65	12.92	7.43	7.62	11.26	39.54	3.08	18.15
14	450	30	1	5	64.46	31.26	4.29	30.74	14.24	16.69	0.86	1.92
					70.37	25.69	3.94	37.31	15.19	14.89	0.97	2.01
15	400	90	1	5	64.60	30.65	4.74	29.26	15.26	17.31	0.92	1.85
					68.70	27.05	4.25	23.53	16.43	23.11	1.46	4.18
16	450	90	1	5	58.35	38.96	2.69	36.12	8.78	10.58	0.96	1.91
					54.42	43.23	2.35	33.94	8.81	8.81	0.74	2.12
17	425	60	0.63	3	65.65	29.39	4.95	28.75	15.82	18.11	0.94	2.02
					66.47	29.37	4.16	29.14	14.87	19.65	0.85	1.96
					64.50	29.83	5.67	29.40	15.85	16.44	0.92	1.90

Temp : อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

H_2 Pressure : ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)

Time : เวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที)

Catalyst : ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์เชิงสถิติได้วางรูปแบบการทดลองเป็น 2^k แฟกทอเรียล n เรพลิเคต และอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

1.สัญลักษณ์ของการทดลองแบบแฟกทอเรียล

- k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ทำการศึกษา
- n หมายถึง จำนวนการทดลองที่ภาวะการทดลองเดียวกัน
- อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ (A,B,C) แทนปัจจัยที่ต้องการศึกษาเช่น อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น
- อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ที่เขียนรวมกัน (Combination) เช่น AB, AC, BC, ABC หมายถึงปฏิกิริยาสัมพันธ์ (Interaction)
- อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กที่เขียนรวมกัน เช่น ab, ac, bc, abc หมายถึง การทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ เรียกว่า Treatment Combination

การทดลองที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จะแทนแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยเป็น -1 และ +1 โดย -1 แทนระดับต่ำ +1 แทนระดับสูง

ยกตัวอย่างงานวิจัยที่ได้ศึกษาการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของไขวัวโดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียลทำการทดลอง 2 ซ้ำ โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปรดังนี้

ตารางที่ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ปัจจัย	ระดับ	
	(-1)	(+1)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส),A	400	450
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	30	90
น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา Fe/Activated carbon (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	0.25	1
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	1	5

สัญลักษณ์แทนการทดลองซึ่งจากเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆมีความหมายคือ การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใดแสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้นและปัจจัยที่ไม่ปรากฏสัญลักษณ์ทำที่ระดับ -1 เช่น

(-1) แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ -1 ทุกปัจจัย

a ทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ +1 และปัจจัยอื่นๆ ทำที่ระดับ -1 ดังนั้นภาวการณ์ทดลองคือ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บาร์ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และ น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม

ab ทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ +1 ความดัน +1 และปัจจัยอื่นๆทำที่ระดับ -1

2. ความหมายของคำที่สำคัญ

อิทธิพลหลัก (Main Effect) หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา

ปฏิกิริยาสัมพันธ์ (Interaction) หมายถึง การแสดงออกของระดับต่างๆในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

อิทธิพลแฟกทอเรียล (Factorial Effects) หมายถึง อิทธิพลต่างๆทั้งอิทธิพลหลักและปฏิกิริยาสัมพันธ์ทั้งหมดในการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ จำนวนการรวมตัว –1 หรือเท่ากับองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom) ของสิ่งทดลอง

3.สูตรการคำนวณ

3.1 Contrast เท่ากับ ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment คูณกับสัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

3.2 Effect Estimate $_{AB...K} = \frac{2}{n\,2^k}(\text{Contrast}_{AB...K})$

3.3 Sum of Squares $_{AB...K}$: $SS_{AB...K} = \frac{2}{n\,2^k}(\text{Contrast}_{AB...K})^2$

3.4 Total of Sum of Squares :

$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk}^2 - y^2 .../N; N = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{n} y_{ijk}^2 - y^2 .../N; N =$ จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด

3.5 Mean of Square Error :

SS_E = SST – Sum Squares of Main Effect

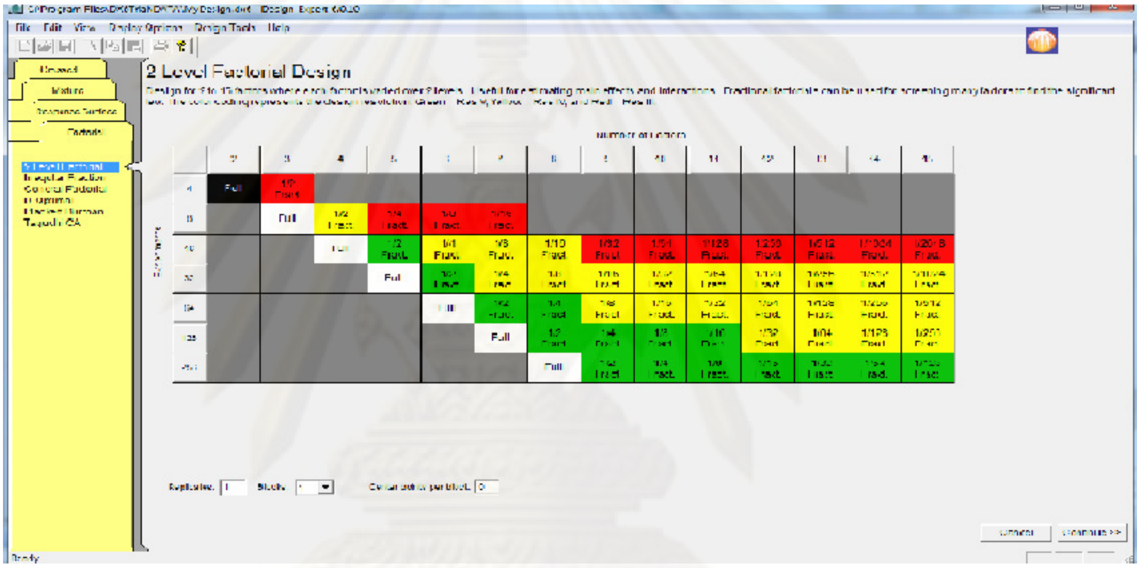
3.6 Mean of Square : MS = $\dfrac{Sum\ of\ Squares}{Degree\ of\ Freedom}$

3.7 %Normal Probability = $\dfrac{(Cumulative\ frequency - 0.5)x100}{(Total\ Cumulative\ frequency)}$

3.8 F_0 = Mean Square of Effect/Mean Square of Error

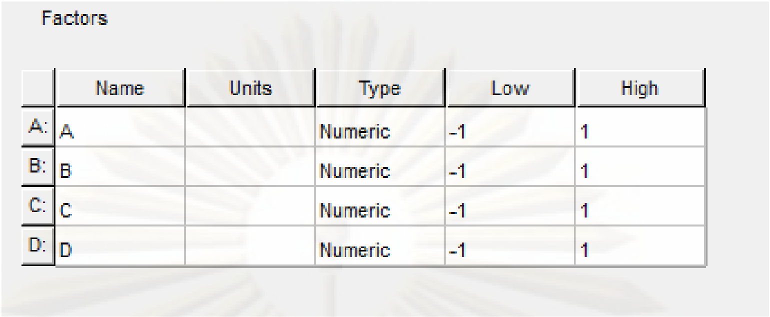
4.การใช้โปรแกรม Design-Expert

1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file ----> New Design และจะได้ดังรูป ข1



รูป ข1 ตารางของ 2 Level Factorial Design

2. เลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการศึกษายกตัวอย่างในการทดลองนี้จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น รวมทั้งหมด 4 ตัวแปร เลือกที่ Full ของช่อง 4 จากนั้นกรอกจำนวนที่ทำซ้ำช่อง Replicates และ กรอกค่าทำซ้ำที่ค่ากลาง ช่อง Center point per block ยกตัวอย่าง Replicates = 2, Center point per block = 3 กดที่ Continue จนขึ้นดังรูป ข2



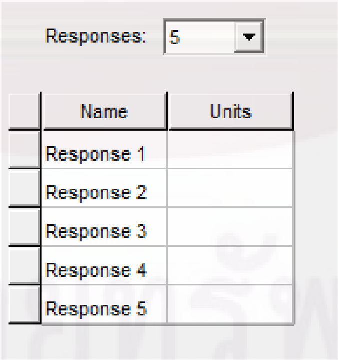
รูป ข2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

กรอกตัวแปรในช่อง ยกตัวอย่างเช่น

	Name	Units	Type	Low	High
A:	Temperature	°C	Numeric	400	450
B:	Time	min	Numeric	30	90
C:	Catalyst	%wt	Numeric	0.25	1
D:	Pressure	bar	Numeric	1	5

เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

3.เลือก Responses กรอกชื่อ Responses พร้อมกรอก Unit ของตัวแปรนั้นๆในช่องดังรูป ข3



รูป ข3 Responses และ หน่วยที่ต้องการของการทดลอง

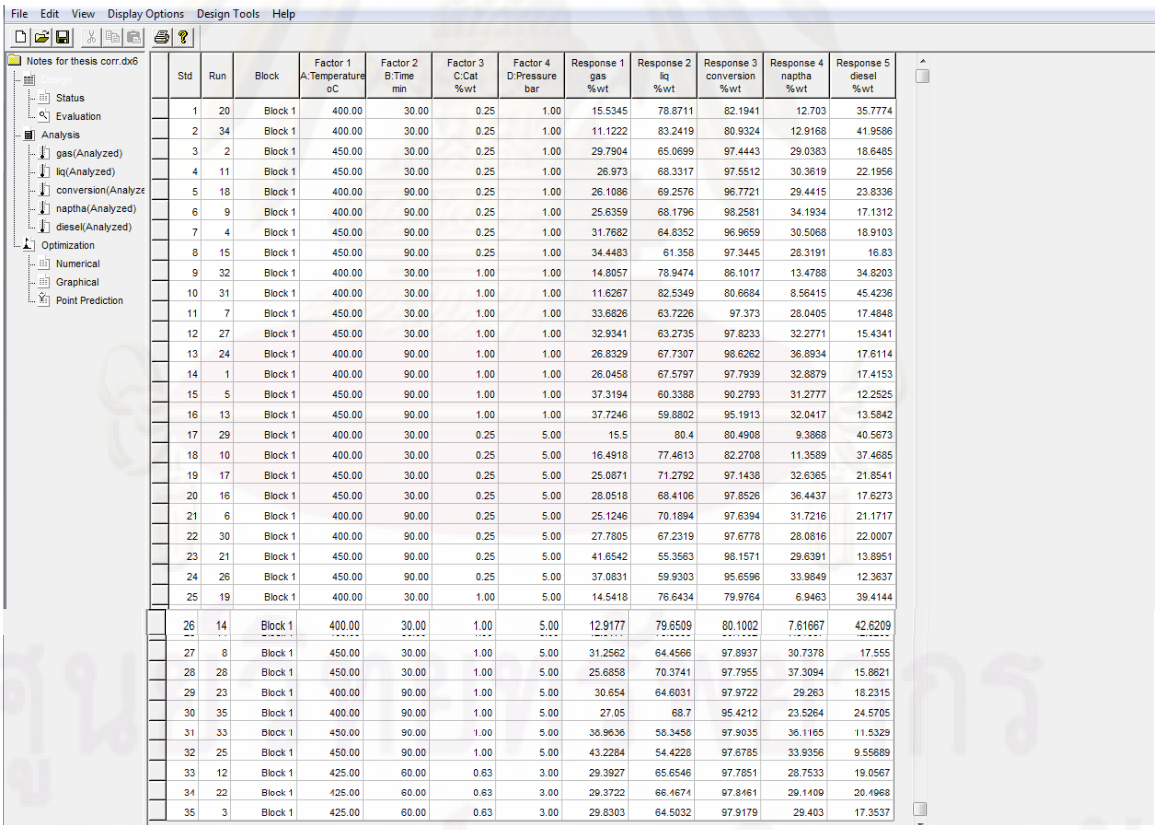
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยกตัวอย่างเช่น

Name	Units
gas	%wt
liq	%wt
conversion	%wt
naphtha	%wt
diesel	%wt

เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

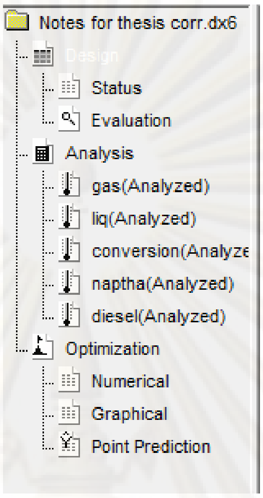
4. จากนั้นจะขึ้นตัวแปรที่ใช้ในการทดลองทำหมด ยกตัวอย่างเช่น มีทั้งหมด 16 การทดลองทำซ้ำการทดลองละ 2 ครั้ง ค่ากลาง 1 การทดลอง ทำซ้ำ 3 ครั้ง รวมการทดลองหมดที่ต้องทำ 35 การทดลอง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองกรอกในช่องดังรูป ข4



Std	Run	Block	Factor 1 A:Temperature oC	Factor 2 B:Time min	Factor 3 C:Cat %wt	Factor 4 D:Pressure bar	Response 1 gas %wt	Response 2 liq %wt	Response 3 conversion %wt	Response 4 naptha %wt	Response 5 diesel %wt
1	20	Block 1	400.00	30.00	0.25	1.00	15.5345	78.8711	82.1941	12.703	35.7774
2	34	Block 1	400.00	30.00	0.25	1.00	11.1222	83.2419	80.9324	12.9168	41.9586
3	2	Block 1	450.00	30.00	0.25	1.00	29.7904	65.0699	97.4443	29.0383	18.6485
4	11	Block 1	450.00	30.00	0.25	1.00	26.973	68.3317	97.5512	30.3619	22.1956
5	18	Block 1	400.00	90.00	0.25	1.00	26.1086	69.2576	96.7721	29.4415	23.8336
6	9	Block 1	400.00	90.00	0.25	1.00	25.6359	68.1796	98.2581	34.1934	17.1312
7	4	Block 1	450.00	90.00	0.25	1.00	31.7682	64.8352	96.9659	30.5068	18.9103
8	15	Block 1	450.00	90.00	0.25	1.00	34.4483	61.358	97.3445	28.3191	16.83
9	32	Block 1	400.00	30.00	1.00	1.00	14.8057	78.9474	86.1017	13.4788	34.8203
10	31	Block 1	400.00	30.00	1.00	1.00	11.6267	82.5349	80.6684	8.56415	45.4236
11	7	Block 1	450.00	30.00	1.00	1.00	33.6826	63.7226	97.373	28.0405	17.4848
12	27	Block 1	450.00	30.00	1.00	1.00	32.9341	63.2735	97.8233	32.2771	15.4341
13	24	Block 1	400.00	90.00	1.00	1.00	26.8329	67.7307	98.6262	36.8934	17.6114
14	1	Block 1	400.00	90.00	1.00	1.00	26.0458	67.5797	97.7939	32.8879	17.4153
15	5	Block 1	450.00	90.00	1.00	1.00	37.3194	60.3388	90.2793	31.2777	12.2525
16	13	Block 1	450.00	90.00	1.00	1.00	37.7246	59.8802	95.1913	32.0417	13.5842
17	29	Block 1	400.00	30.00	0.25	5.00	15.5	80.4	80.4908	9.3868	40.5673
18	10	Block 1	400.00	30.00	0.25	5.00	16.4918	77.4613	82.2708	11.3589	37.4685
19	17	Block 1	450.00	30.00	0.25	5.00	25.0871	71.2792	97.1438	32.6365	21.8541
20	16	Block 1	450.00	30.00	0.25	5.00	28.0518	68.4106	97.8526	36.4437	17.6273
21	6	Block 1	400.00	90.00	0.25	5.00	25.1246	70.1894	97.6394	31.7216	21.1717
22	30	Block 1	400.00	90.00	0.25	5.00	27.7805	67.2319	97.6778	28.0816	22.0007
23	21	Block 1	450.00	90.00	0.25	5.00	41.6542	55.3563	98.1571	29.6391	13.8951
24	26	Block 1	450.00	90.00	0.25	5.00	37.0831	59.9303	95.6596	33.9849	12.3637
25	19	Block 1	400.00	30.00	1.00	5.00	14.5418	76.6434	79.9764	6.9463	39.4144
26	14	Block 1	400.00	30.00	1.00	5.00	12.9177	79.6509	80.1002	7.61667	42.6209
27	8	Block 1	450.00	30.00	1.00	5.00	31.2562	64.4566	97.8937	30.7378	17.555
28	28	Block 1	450.00	30.00	1.00	5.00	25.6858	70.3741	97.7955	37.3094	15.8621
29	23	Block 1	400.00	90.00	1.00	5.00	30.654	64.6031	97.9722	29.263	18.2315
30	35	Block 1	400.00	90.00	1.00	5.00	27.05	68.7	95.4212	23.5264	24.5705
31	33	Block 1	450.00	90.00	1.00	5.00	38.9636	58.3458	97.9035	36.1165	11.5329
32	25	Block 1	450.00	90.00	1.00	5.00	43.2284	54.4228	97.6785	33.9356	9.55689
33	12	Block 1	425.00	60.00	0.63	3.00	29.3927	65.6546	97.7851	28.7533	19.0567
34	22	Block 1	425.00	60.00	0.63	3.00	29.3722	66.4674	97.8461	29.1409	20.4968
35	3	Block 1	425.00	60.00	0.63	3.00	29.8303	64.5032	97.9179	29.403	17.3537

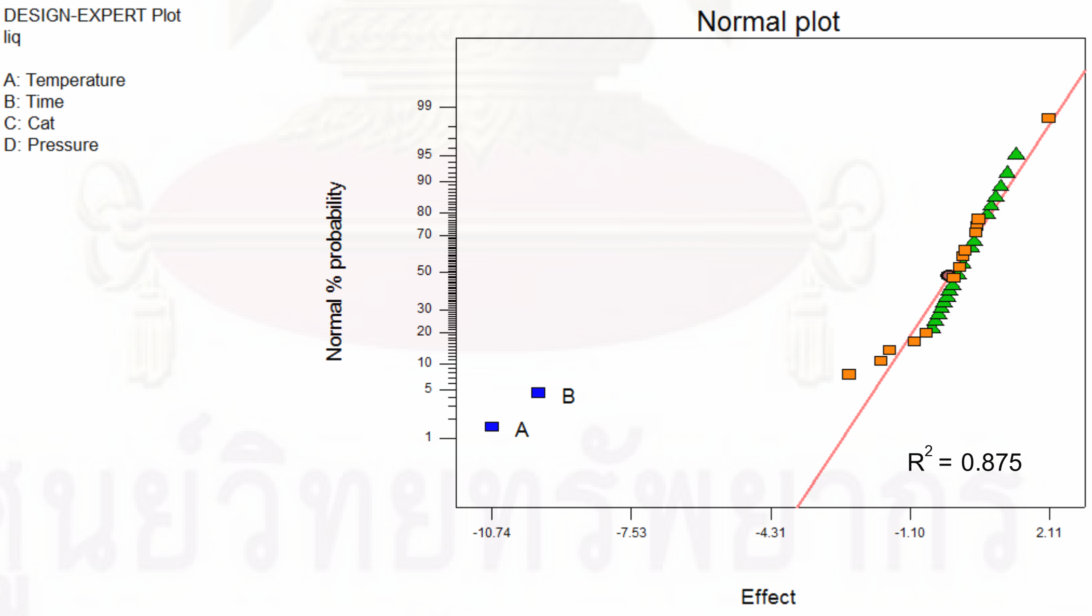
รูป ข4 ตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่าง ๆ

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยโปรแกรม Desgin-Expert ยกตัวอย่างเช่น วิเคราะห์ผลของ liq โดยคลิกที่ liq ดังรูป ข5 คลิกที่ Effect



รูป ข5 แถบของ gas liq conversion naphtha **และ** diesel

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



รูป ข6 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % probability **กับ** Effect **ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน**

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปอธิบายได้ว่า ตัวแปร A และ B ที่ออกนอกเส้นตรง คือ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นตัวแปรที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์น้ำมัน

7.คลิก ANOVA (ดังรูป ข7) เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวนและเป็นการยืนยันผลของ Normal % probability

Transform | Effects | ANOVA | Diagnostics | Model Graphs

Use your mouse to right click on individual cells for definitions.

Response: liq

ANOVA for Selected Factorial Model

Analysis of variance table [Partial sum of squares]

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Model	1670.92	2	835.46	108.50	< 0.0001	significant
A	*922.75*	*1*	*922.75*	*119.84*	*< 0.0001*	
B	*748.16*	*1*	*748.16*	*97.16*	*< 0.0001*	
Curvature	23.30	1	23.30	3.03	0.0918	not significant
Residual	238.70	31	7.70			
Lack of Fit	*147.22*	*13*	*11.32*	*2.23*	*0.0580*	*not significant*
Pure Error	*91.48*	*18*	*5.08*			
Cor Total	1932.92	34				

The Model F-value of 108.50 implies the model is significant. There is only
a 0.01% chance that a "Model F-Value" this large could occur due to noise.

Values of "Prob > F" less than 0.0500 indicate model terms are significant.
In this case A, B are significant model terms.
Values greater than 0.1000 indicate the model terms are not significant.
If there are many insignificant model terms (not counting those required to support hierarchy),
model reduction may improve your model.

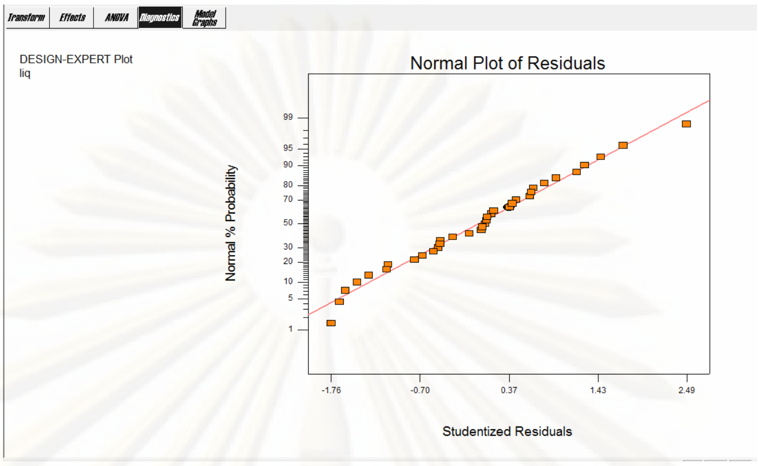
รูป ข7 การคำนวณผลของ ANOVA

จากรูปอธิบายได้ว่า ตัวแปร A และ B มีค่า Prob>F ดังนั้นตัวแปร A และ B จึงเป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ของเหลว และ ผลของ Lack of Fit ที่แสดงคำว่า not significant สามารถอธิบายได้ว่าตัวแปรอื่นไม่มีผลทางนัยสำคัญต่อผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และจากการวิเคราะห์ ANOVA สามารถแสดงสมการของการทดลอง คือ

% yield liquid fuel = 169.4158 – 0.2148*Temperature – 0.1612*Time

(สามารถใช้ได้ก็ต่อเมื่อ อุณหภูมิอยู่ในช่วง 400 – 450 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อยู่ในช่วง 30 – 90 นาที

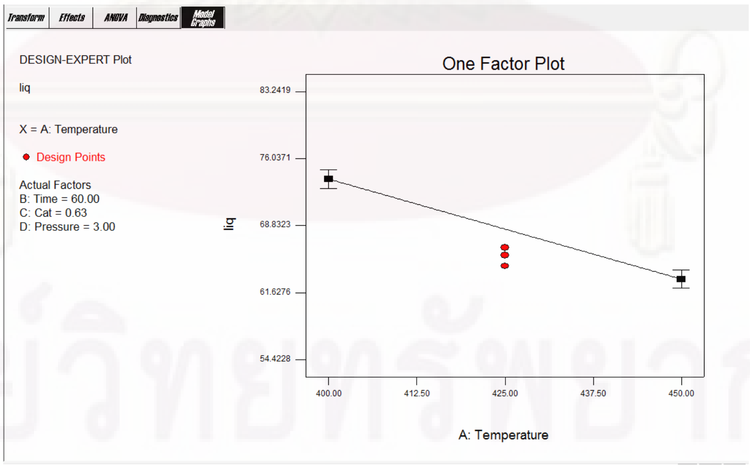
1. คลิก Diagnostics เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวข้อมูลของกราฟ Normal Plot of Residuals ดังรูป ข8



รูป ข8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Normal % Probability กับ Studentized Residuals

จากกราฟอธิบายได้ว่า การกระจายตัวเป็นการเส้นตรงของกราฟ สามารถยืนยันได้ว่าผลของการอธิบายทั้งส่วนของ Effect และ ANOVA สอดคล้องกับผลของ Diagnostics

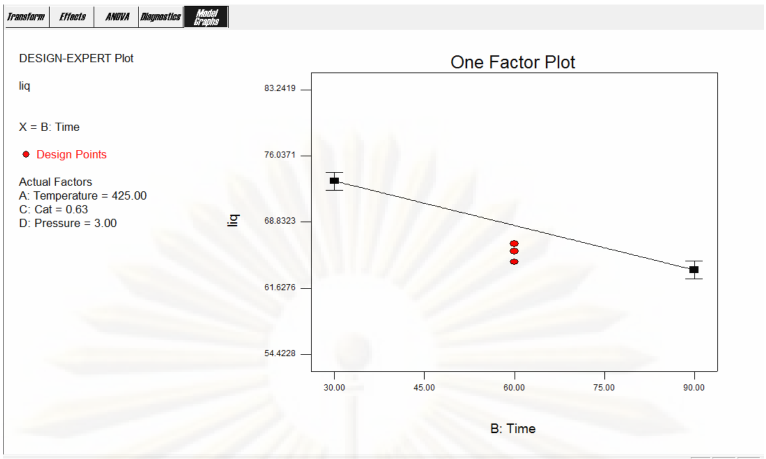
9. คลิก Model graphs เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ต่อผลิตภัณฑ์น้ำมัน ดังรูป ข9



รูป ข9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับผลิตภัณฑ์น้ำมัน

จากกราฟอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มทำให้เกิดการแตกสายโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนเป็นแก๊สมากขึ้นส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง ดังรูป ข10

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

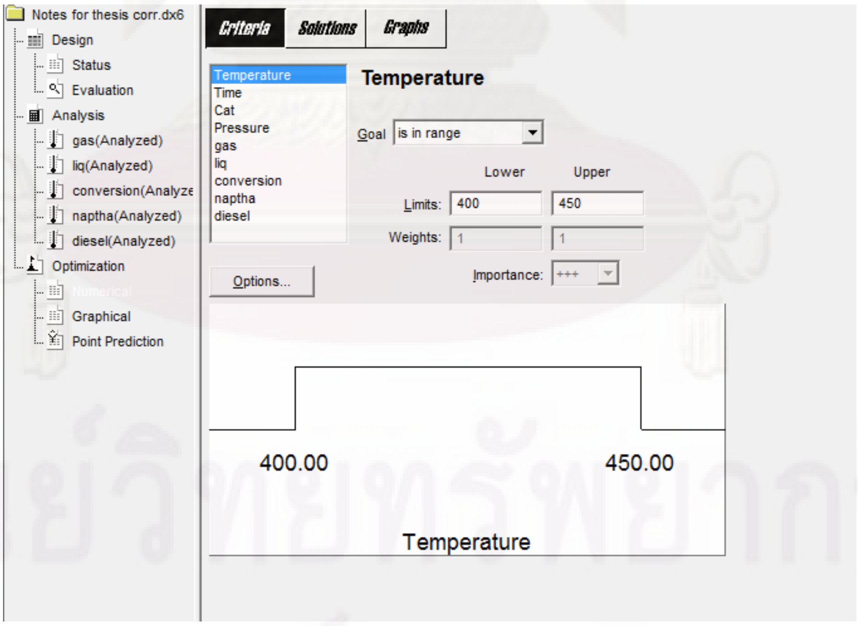


รูป ข10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์น้ำมัน

จากกราฟอธิบายได้ว่า เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำให้ช่วยกระตุ้นในการแตกสายของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากขึ้นส่งผลให้เกิดแก๊สมากขึ้นเช่นกัน ทำให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวลดลง

10. จากนั้นวิเคราะห์ตัวแปรอื่นๆตามข้อที่ 5-9

11. การวิเคราะห์หาภาวะเหมาะสมของการทดลอง คลิกที่ numerical ---> Criteria พร้อมกรอกขอบเขตที่ต้องการในช่องLimits ดังรูป ข11



รูป ข11 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

12. คลิกที่ Solutions ดังรูป ข12

Constraints

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Lower Weight	Upper Weight	Importance
Temperature	is in range	400	450	1	1	3
Time	is in range	30	90	1	1	3
Cat	is in range	0.25	1	1	1	3
Pressure	is in range	1	5	1	1	3
gas	minimize	11.1222	43.2284	1	1	3
liq	maximize	54.4228	83.2419	1	1	3
conversion	maximize	79.9764	98.6262	1	1	3
naptha	maximize	6.9463	37.3094	1	1	3
diesel	maximize	9.55689	45.4236	1	1	3

Solutions

Number	Temperature	Time	Cat*	Pressure	gas	liq	conversion	naptha	diesel	Desirability	
1	400.00	69.58	*0.40*	1.00	22.8684	72.2821	92.0995	25.7567	26.8854	0.598	Selected
2	400.00	69.47	*0.43*	1.00	22.8417	72.2995	92.071	25.7203	26.9204	0.598	
3	400.00	68.98	*0.25*	1.54	22.6347	72.3787	91.9405	25.0259	27.0802	0.595	
4	400.00	73.91	*0.99*	2.65	23.5455	71.5851	93.2476	25.6247	25.4792	0.589	
5	400.00	74.57	*1.00*	4.52	23.2179	71.4785	93.4232	24.0343	25.2641	0.580	
6	432.32	30.00	*1.00*	4.66	23.5851	71.7194	91.9459	24.892	25.9079	0.576	
7	432.39	30.00	*1.00*	4.34	23.6524	71.7048	91.9675	24.834	25.879	0.575	
8	432.23	30.01	*1.00*	3.65	23.7155	71.7367	91.9179	24.5645	25.9445	0.573	
9	430.27	30.00	*0.28*	2.86	23.2346	72.1593	91.2898	23.5012	26.7855	0.571	
10	431.79	30.00	*0.25*	2.80	23.7053	71.8339	91.7751	24.1359	26.1364	0.571	

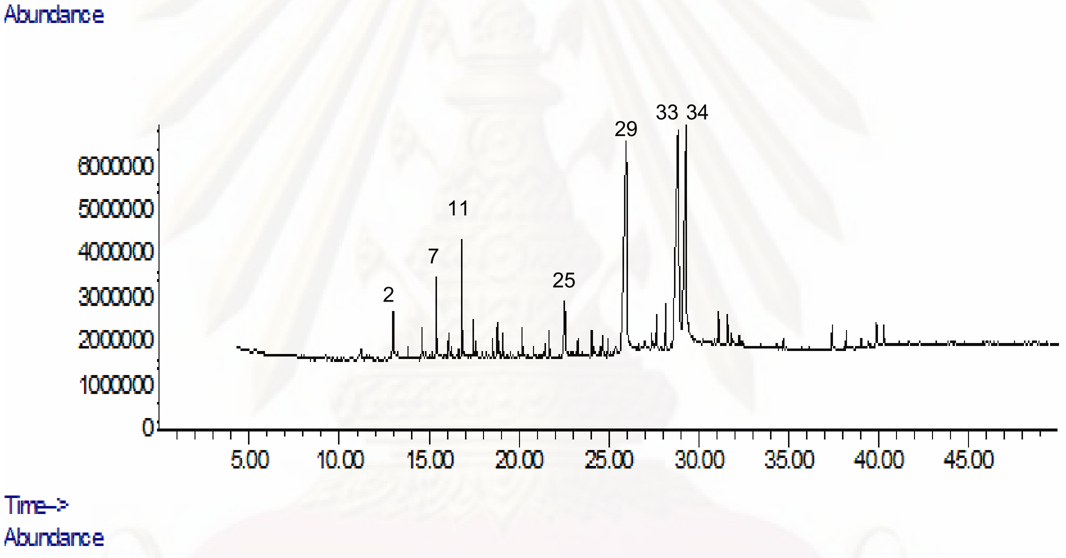
รูป ข12 ภาวะเหมาะสมและขอบเขตของการทดลอง

ภาคผนวก ค
แก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์
(Gas Chromatrography-Mass Spectrometer)

เป็นวิธีที่สามารถทำนายชนิดขององค์ประกอบที่มีอยู่ในสารได้อย่างค่อนข้างแม่นยำโดยอาศัยการเปรียบเทียบ Fingerprint ของเลขมวล (Mass number) ของสารตัวอย่างนั้นๆ กับข้อมูลที่มีอยู่ใน Llibrary ยกตัวอย่าง การวิเคราะห์ไขวัว ดังตารางที่ ง1

ขนาดและภาวะของแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์

- BB-5 MS ขนาด 30 mm x 0.2 mm x 0.25 μm
- Inlet 200 ^{0}C , split mode 100:1, Flow rate 1 mL/min and austemp 25 ^{o}C



ตารางที่ ค1 แสดงองค์ประกอบของไขวัวโดยการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟ-แมสสเปกโตรมิเตอร์

Peak	RT	Height	Area	Name
2	12.9849	1043497	23339421	Nonanal
7	15.3893	1808866	50174637	2-Decenal
11	16.8256	2690074	624994122	2-Dodecanal
25	22.5301	1212488	76163877	Myristic acid
29	25.9264	4701192	5.54E+08	Palmitic acid
33	28.8317	4908865	6.21E+08	Trans-Oleic acid
34	29.2754	4779719	4.6E+08	Stearic acid

ที่มา : ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ
วิเคราะห์วันที่ 24 มกราคม 2553

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง BET Surface Area Analysis ของตัวเร่งปฏิกิริยา

การตรวจวัดพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (Surface Area) ด้วยเครื่อง BET Surface Area แสดงในตาราง ง1

ตารางที่ ง1 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว และ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว calcine ที่อุณหภูมิ 500 °C

Catalyst	Average Pore size (nm)	Total Pore Volume (cm^3/g)	Surface Area (m^2/g)
[1]10%Fe/Activated Carbon	2.18	0.41	763.91
[2]Spent FCC	6.92	0.14	79.85
[2]Spent FCC (calcine 500 °C)	6.77	0.15	89.46

ที่มา :

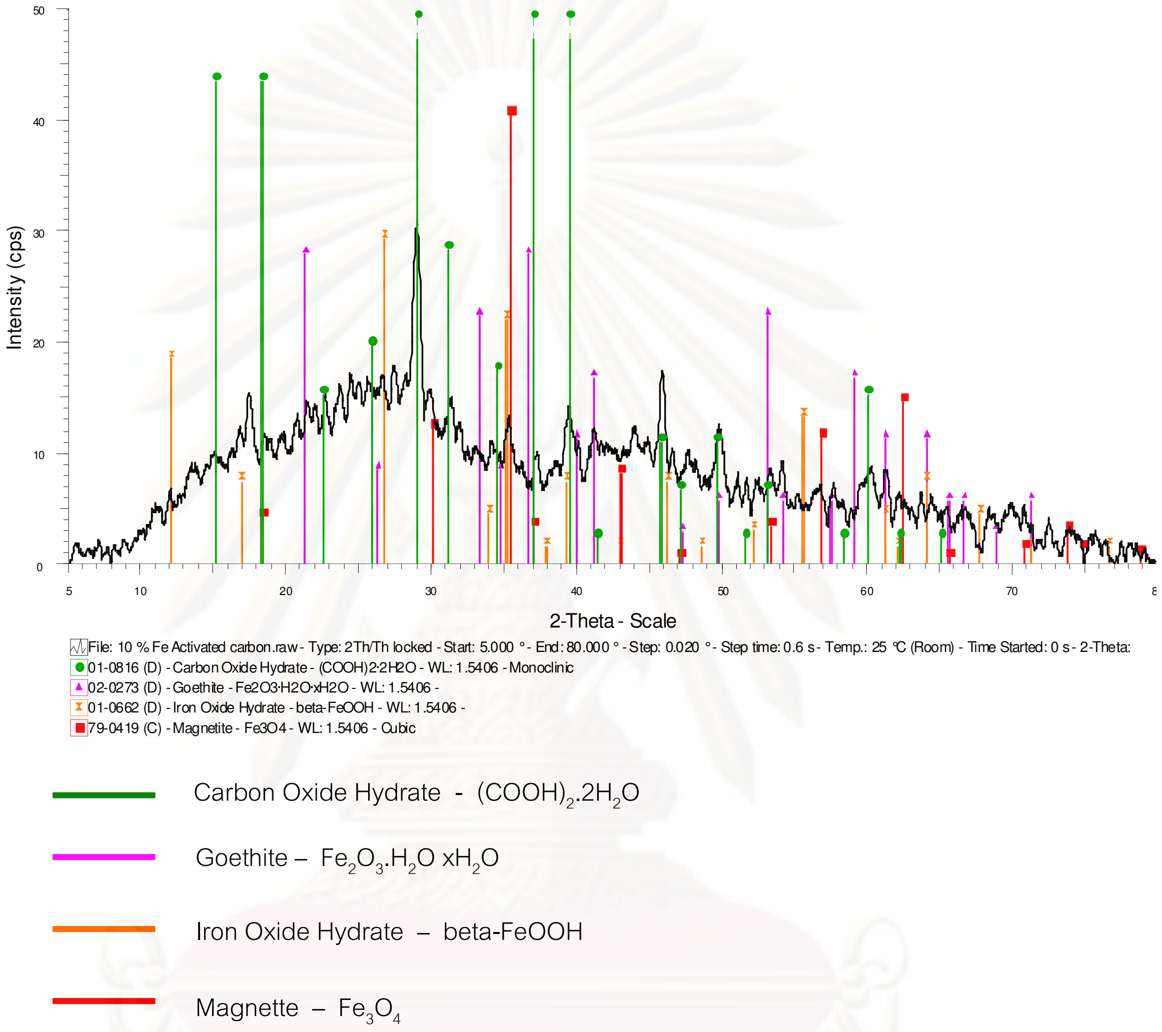
[1] ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิเคราะห์วันที่ 30 พฤศจิกายน 2552

[2] ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วิเคราะห์วันที่ 16 มีนาคม 2553

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ผลวิเคราะห์ XRD ของ 10%เหล็ก/ถ่านกัมมันต์



รูปที่ จ1 XRD ของตัวเร่งปฏิกิริยา 10% เหล็ก/ถ่านกัมมันต์

ที่มา: ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
วิเคราะห์วันที่ 9 เมษายน 2553

จากการวิเคราะห์ 10% เหล็ก/ถ่านกัมมันต์ด้วยเทคนิค XRD พบว่าองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยามี Carbon Oxide Hydrate, Goethite, Iron Oxide Hydrate และ Magnette

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

ตารางที่ ฉ1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว calcine **ที่อุณหภูมิ** 500 °C

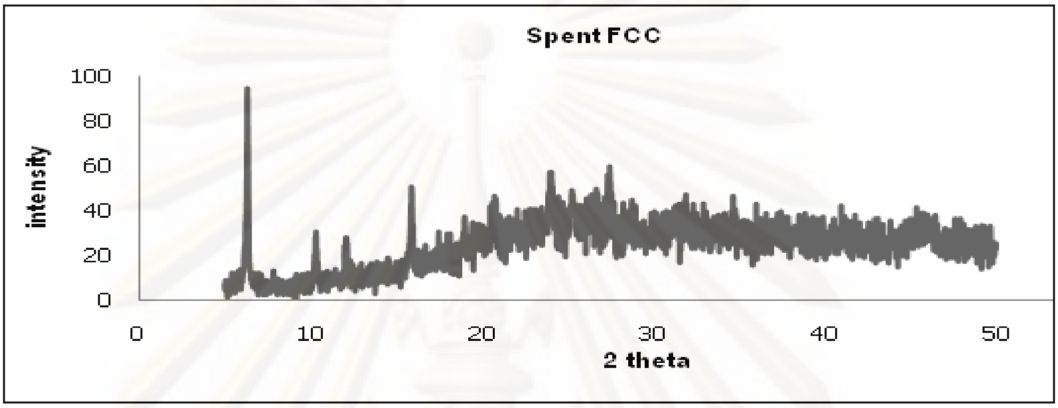
Spent FCC (element)	Concentration	Spent FCC cal 500 °C (element)	Concentration
Fe	3.12	Fe	2.73
Si	40.13	Si	42.86
Al	42.07	Al	41.78
Na	0.58	Na	0.54
P	0.12	P	0.13
S	0.30	S	0.28
K	0.32	K	0.29
Ca	0.40	Ca	0.35
Ti	2.67	Ti	2.42
V	0.34	V	0.30
Mn	0.20	Mn	0.18
Co	0.04	Ni	1.32
Ni	1.65	Cu	0.10
Cu	0.08	Zn	0.09
Zn	0.07	Ga	0.02
Ga	0.04	Sr	0.06
Sr	0.07	Zr	0.07
Y	0.02	La	5.47
Zr	0.07	Ce	0.46
La	6.29	Nd	0.20
Ce	0.49	Gd	0.12
Nd	0.26		
Sm	0.20		

วิเคราะห์ผลโดย : ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

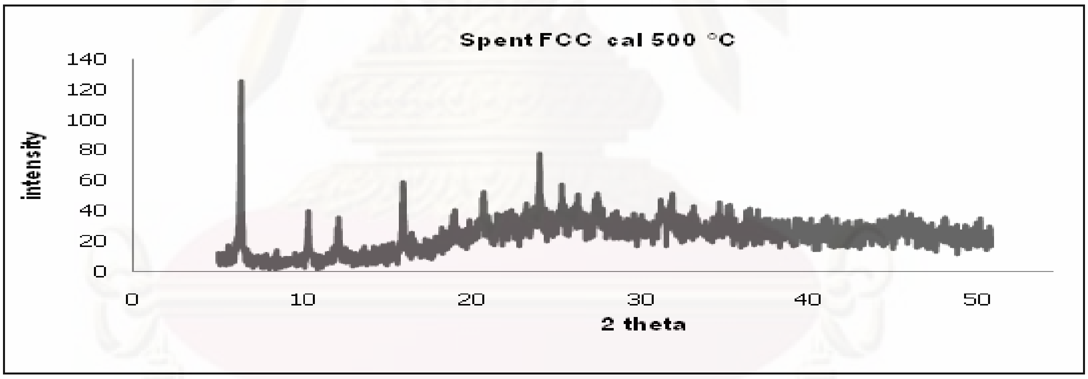
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วมีปริมาณ Si และ Al เป็นปริมาณมาก จึงคาดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์ จึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อตรวจสอบว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภทใด

การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิค XRD

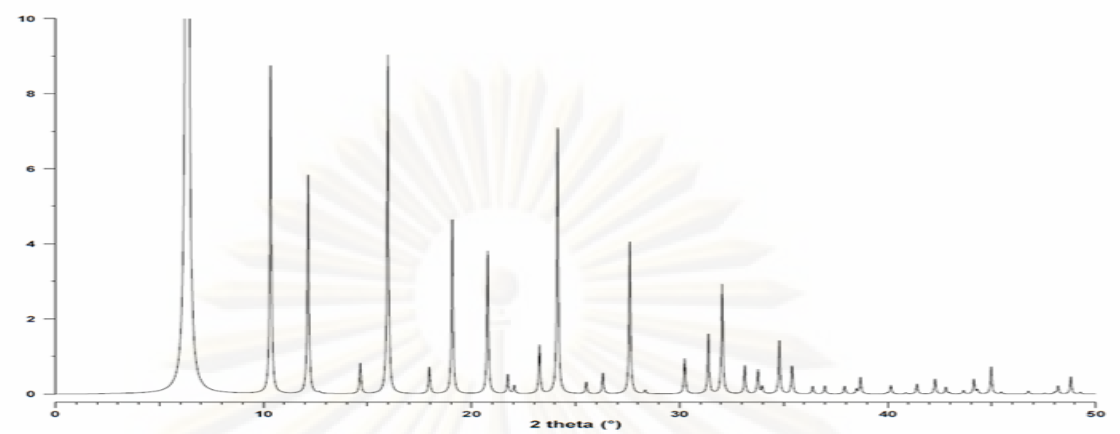


รูปที่ ฉ1 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว



รูปที่ ฉ2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว cal 500 ºC

ที่มา : ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ฉ3 XRD pattern **ของตัวเร่งปฏิกิริยา** Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated [35]

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็น XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วและ XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว cacine ที่อุณหภูมิ 500 ^{o}C ดังรูปที่ ฉ1และ ฉ2 ตามลำดับ พบว่าลักษณะของ peak ที่ปรากฏนั้นมีความใกล้เคียงกับ XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y,Dehydrated Dealuminated แสดงดังรูปที่ ฉ3 จึงสามารถระบุได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วนั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภท USY

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

สูตรคำนวณ

$$\% \ yield \ liquid \ fuels = \frac{weight \ of \ liquid \ fuels}{weight \ of \ initial \ Beef \ Tallow} x100$$

$$\% \ yield \ naphtha = \% \ yield \ naphtha \ from \ DGC \ technique \ x \ \% \ yield \ of \ liquid \ fuels$$

$$\% \ yield \ diesel = \% \ yield \ diesel \ from \ DGC \ technique \ x \ \% \ yield \ of \ liquid \ fuels$$

$$\% \ conversion = \frac{weight \ of \ initial \ long \ residue - weight \ of \ final \ long \ residue}{weight \ of \ initial \ long \ residue} x100$$

ภาคผนวก ซ

ตัวอย่างการคำนวณ

<u>Ex1</u> ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ โดยปริมาณไขวัวที่ชั่งได้ 20.02 กรัม ก่อนการทดลองน้ำหนักของ reactor เท่ากับ 1791.15 กรัม หลังการทดลองพบว่าน้ำหนักของ reactor ลดลงเป็น 1808.11 กรัม น้ำหนักกระดาษทิชชูและกระดาษกรองรวมกันเท่ากับ 7.91 กรัม หลังการทดลองน้ำหนัก ของกระดาษทิชชูและกระดาษกรองรวมกันเท่ากับ 9.08 กรัม ให้ค่าผลิตภัณฑ์น้ำมันกี่เปอร์เซ็นต์

<u>Sol</u> น้ำหนัก reactor ก่อน 1791.15 กรัม

น้ำหนัก reactor ทั้งหมดก่อนทำการทดลอง = reactor + ไขวัว + น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา

= 1791.15 + 20.02 + 0.05

= 1811.22 กรัม

น้ำหนัก reactor หลัง 1808.11 กรัม

แก๊สที่เกิด = 1808.11 – 1791.15

= 3.11 กรัม

ของแข็งที่เกิด = 9.08 - 7.91 - 0.05

= 1.12 กรัม

ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ = 20.02 – 3.11 – 1.12

= 15.79 กรัม

ดังนั้น % ผลิตภัณฑ์น้ำมัน $= \frac{15.79}{20.02} \times 100 = 78.87$

Ex2 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.05 กรัม ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ เมื่อนำไปวิเคราะห์โดยเครื่องโครมาโทกราฟจำลองการกลั่น พบว่า เครื่องให้ค่า Recovery ของ แนฟทาเท่ากับ 15.80 ค่า Recovery ของสัดส่วนทั้งหมดเท่ากับ 98.10 หาค่าเปอร์โดยน้ำหนักของแนฟทา และ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา

Sol % Recovery of Naphtha $= \frac{15.80 \times 100}{98.10} = 1270.30$

Naphtha (%wt) $= \frac{1270.30}{100} = 12.70$

Fe/Activated carbon (%wt) $= \frac{0.05 \times 100}{20.02} = 0.25$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกรกช จันทร์โสภาพิศ เกิดเมื่อวันที่ 31 สิงหาคม 2529 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2551

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย