

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบูดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบน HZSM-5



นางสาวรวีวรรณ สวัสดิ์รักษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CATALYTIC CRACKING OF JATROPHA OIL TO LIQUID FUELS ON HZSM-5



Miss Raweevan Sawasraksa

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การแตกตัวเชิงแรงปฏิกิริยาของน้ำมันสนู่ดำเป็นเชื้อเพลิง
เลขวนน HZSM-5

โดย

น.ส.รวิวรรณ สวัสดิ์รักษา

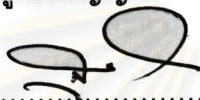
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

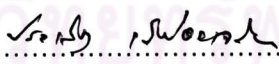
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)


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


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


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.วิษชากร จารุศิริ)

รวิวรรณ สวัสดิ์รักษา : การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวบน HZSM-5. (CATALYTIC CRACKING OF JATROPHA OIL TO LIQUID FUELS ON HZSM-5) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตรศานต์, 108 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ร่วมในกระบวนการ ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยเฉพาะแนฟทา โดยออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับปัจจัยและหาภาวะที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม design-expert 6.0.10 ร่วมกับ minitab 15 ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 390-440 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5-10 ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนคงที่ที่ 100 lb/in² (6.8 atm) เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatography) พบว่าจากการคำนวณด้วยโปรแกรม design-expert 6.0.10 ภาวะที่เหมาะสมที่ส่งผลต่อการเกิดปริมาณแนฟทาสูงสุดคือ อุณหภูมิ 426 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 56 นาที และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6.35 ได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 58.62 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของแนฟทาเท่ากับ 40.60 เมื่อนำภาวะที่เหมาะสมมาทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณพบว่าผลที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมาก คือมีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเท่ากับ 60.50 และ 57.40 ร้อยละผลได้ของแนฟทาเท่ากับ 38.35 และ 39.50 และเมื่อทำการทดลองโดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นเป็น 65.00 และ 67.00 และร้อยละผลได้ของแนฟทาลดลงเหลือ 20.10 และ 20.20 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อผู้ผลิต... พ.ศ. ๕๕๖๖๖๖ สวัสดิ์รักษา
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5172417423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CATALYTIC CRACKING / HZSM-5 / VEGETABLE OIL

RAWEEVAN SAWASRAKSA: CATALYTIC CRACKING OF JATROPHA OIL TO LIQUID FUELS ON HZSM-5. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 108 pp.

This research aimed to study the catalytic cracking of Jatropha oil to liquid fuels with HZSM-5 in Autoclave reactor for study the affect of variable of product liquid fuels expecially naphtha. Using two level factorial design from design-expert 6.0.10 and minitab 15 to design the experiment and determine the optimum condition. The operating condition were temperature between 390°C and 440°C, reaction time between 30 and 60 min and percent by weight of HZSM-5 between 2.5-10 at initial hydrogen pressure 100 lb/in². Liquid product were analyzed by simulated distillation gas chromatograph. After calculating with design-expert program, it was found that reaction temperature of 426°C, reaction time 56 min by using 6.35 percent by weight of HZSM-5 was the best condition that gave the highest yield of naphtha. The oil yield was 58.62 percent by weight, the naphtha yield was 40.60 percent by weight. Then do the experiment belong this condition to prepare between the result of the experiment and calculation from program, it was found that both of them are similar. The result conclude that reaction temperature, reaction time and percent by weight of HZSM-5 were significantly affected to oil yield.

Department : Chemical Technology.....

Student's Signature Raweevan Sawasraksa

Field of Study : Chemical Technology.....

Advisor's Signature T. Vitidsant

Academic Year : 2009.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็น คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ ดร.วิชชากร จารุศิริ กรรมการสอบที่กรุณาให้ความเห็น คำแนะนำ ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติทางปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ในการให้การสนับสนุนด้านงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ ขอขอบคุณนายรติ แสงบุญ, นายนิพัทธ์ ชูสวัสดิชัยรวมทั้งพี่ๆเพื่อนๆน้องๆที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

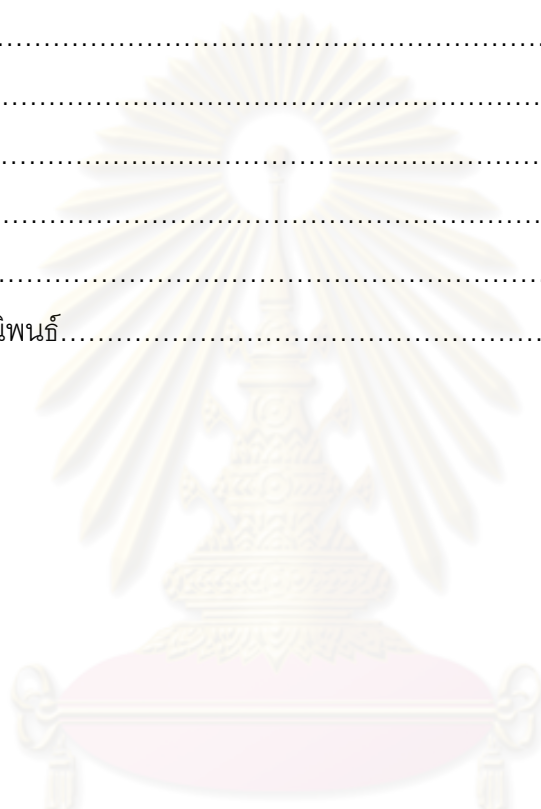
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ชีวมวล.....	4
2.2 ฟิชน้ำมัน.....	6
2.1.1 การใช้สบู่ดำทดแทนน้ำมัน.....	6
2.1.2 คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำและการนำไปใช้กับเครื่องยนต์.....	7
2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	11
2.3.1 ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิส.....	11
2.4 ซีโอดี.....	12
2.5 การแตกตัวด้วยความร้อน.....	14
2.6 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	16
2.7 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....	18
2.8 การออกแบบการทดลอง.....	19
2.8.1 หลักการออกแบบการทดลอง.....	21
2.8.2 คำจำกัดความ.....	21
2.8.3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	22
2.9 การทดลองแบบปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	23
2.9.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	23
2.9.2 การวิเคราะห์แบบจำลองผลกระทบคงที่.....	24
2.9.3 การแยกย่อยของผลรวมของกำลังสอง.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.9.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	28
2.10 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k	30
2.10.1 การออกแบบ 2^k	30
2.10.2 วิธีการพินิจผลตอบสนองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ....	34
2.10.3 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ.....	37
2.11 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมัน.....	38
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
3 เครื่องมือและการวิเคราะห์การทดลอง.....	43
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	43
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	45
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	46
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	47
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	49
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสนูปู่ดำ.....	49
4.1.1 การวิเคราะห์น้ำมันสนูปู่ดำด้วยเทคนิค DGC.....	49
4.1.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันสนูปู่ดำ.....	50
ที่ใช้ทำการทดลองเมื่อเทียบกับ <i>Jatropha diesel</i>	
4.1.3 การวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมัน.....	51
4.2 ผลการทดลองที่ได้มาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสนูปู่ดำ.....	51
4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลอง.....	54
แบบ 2^3 fractional central composite factorial design	
4.2.1.1 ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว.....	54
4.2.1.2 ร้อยละการเปลี่ยน.....	59
4.2.1.3 ร้อยละผลได้ของแนฟทา.....	63
4.2.1.4 ร้อยละผลได้ของแก๊สออกยล์.....	69
4.2.1.5 ร้อยละผลได้ของแก๊ส.....	73
4.2.2 ข้อสรุปที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ.....	77
2^3 fractional factorial design	

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	88
ภาคผนวก ก.....	89
ภาคผนวก ข.....	92
ภาคผนวก ค.....	93
ภาคผนวก ง.....	105
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำมันสบูดำตามทฤษฎี.....	8
2.2	องค์ประกอบของกรดไขมันตามทฤษฎี.....	8
2.3	การเปรียบเทียบระหว่างค่าความหนืดจำเพาะ ค่าความหนืด..... และค่าความร้อนของน้ำมันชนิดต่างๆ	9
2.4	คุณสมบัติของน้ำมันสบูดำ ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำ..... และมาตรฐานคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดเรบของประเทศออสเตรเลีย	10
2.5	ข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว	23
2.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียวแบบจำลองผลกระทบคงที่	30
3.1	ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษานับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	46
3.2	จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล..... สองระดับแบบส่วนประสมกลาง	46
4.1	องค์ประกอบของน้ำมันสบูดำก่อนทำการทดลอง.....	50
4.2	การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของน้ำมันสบูดำที่ใช้ในการทดลองนี้..... กับ Jatropha diesel	50
4.3	ชนิดของกรดไขมันของน้ำมันสบูดำ.....	51
4.4	ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	51
4.5	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว.....	54
4.6	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้..... ของเชื้อเพลิงเหลว	55
4.7	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละการเปลี่ยน.....	59
4.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน.....	60
4.9	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของเนฟทา.....	63
4.10	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา....	64
4.11	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา.... กรณีตัดปัจจัยกำลังสองออกจากสมการ	65

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.12	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแก๊สออกไซด์.....	69
4.13	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้..... ของแก๊สออกไซด์	70
4.14	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแก๊ส.....	73
4.15	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส.....	74
4.16	ค่าสถิติสำหรับสมการถดถอยของผลตอบสนองต่างๆ.....	77
4.17	ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสม.....	79
4.18	ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม Design-expert 6.0.10.....	79
4.19	ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำ..... ตามภาวะที่ได้จากการทดลองโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมที่ได้มาจากโปรแกรม Design-expert 6.0.10	80
5.1	ปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองต่างๆ.....	82
ก 1	ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ.....	89
ก 2	องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำเมื่อทำการทดลองที่ภาวะต่างๆ.....	90
ก 3	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม.....	91
ก 4	องค์ประกอบของน้ำมันที่ภาวะที่เหมาะสม.....	91
ค 1	ค่า Isothermal Tabular.....	93
ค 2	ค่า 2 theta และ intensity ของ ZSM-5.....	97
ค 3	ค่า 2 theta และ intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง.....	98

สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ปริมาณการใช้พลังงาน.....	1
2.1 วัฏจักรคาร์บอนไดออกไซด์.....	5
2.2 การแตกตัวของโมโนกลีเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์.....	13
2.3 ชนิดของ acid site ของสารประกอบซีโอไลต์.....	13
2.4 Pore structure channel ของ ZSM-5.....	14
2.5 รูปแบบของกระบวนการ Montgomery.....	20
2.6 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2^2	31
2.7 ภาพพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ.....	35
2.8 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง.....	35
2.9 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง.....	36
3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave ขนาด 250 มิลลิเมตร.....	43
3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล..... และเครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave	44
3.3 ชุดกรองสุญญากาศ.....	44
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น.....	45
4.1 ค่า Half normal plot of standardized effect..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว	55
4.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว	56
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว	56
4.4 อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนอง..... ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว	57
4.5 อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนอง..... ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว	57

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.6	59
ค่า Half normal plot of standardized effect..... ของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยน	
4.7	60
แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย..... ของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยน	
4.8	61
ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล..... ของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยน	
4.9	61
อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยน.....	
4.10	62
อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยน.....	
4.11	64
ค่า Half normal plot of standardized effect..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแนฟทา	
4.12	66
แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้แนฟทา	
4.13	66
ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้แนฟทา	
4.14	67
อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแนฟทา.....	
4.15	67
อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนอง..... ร้อยละผลได้ของแนฟทา	
4.16	69
ค่า Half normal plot of standardized effect..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊สออกยล์	
4.17	70
แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊สออกยล์	
4.18	71
ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊สออกยล์	
4.19	71
อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊สออกยล์.....	
4.20	72
อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนอง..... ร้อยละผลได้ของแก๊สออกยล์	

สารบัญภาพ(ต่อ)

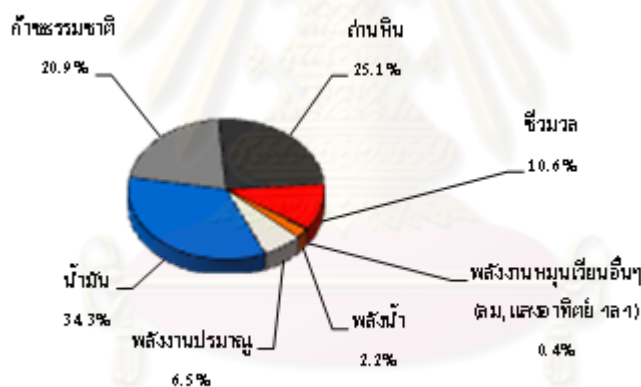
ภาพที่		หน้า
4.21	ค่า Half normal plot of standardized effect..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส	74
4.22	แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส	75
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล..... ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส	75
4.24	อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส.....	76
4.25	อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส.....	76
4.26	แสดง overlay plot ของร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว, ร้อยละการเปลี่ยนแปลง, ร้อยละผลได้ของเนฟทา เมื่อค่าร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา มีค่าเท่ากับ 6.35	79
4.27	พื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิและเวลา..... เมื่อร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6.35	80
ค 1	แสดงการ adsorption และ desorption ของ HZSM-5..... จากการคำนวณโดยใช้ Kelvin Equation	94
ค 2	ค่าความสัมพันธ์ของความดันกับ P/Q.....	95
ค 3	ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF.....	96
ค 4	ผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD.....	103
ค 5	ผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบกับ ZSM-5.....	103
ง 1	พื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว.....	105
ง 2	พื้นผิวตอบสนองของร้อยละการเปลี่ยนแปลง.....	105
ง 3	พื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของเนฟทา.....	106
ง 4	พื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของดีเซล.....	106
ง 5	พื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของแก๊ส.....	107

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

พลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันส่วนใหญ่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น ถ่านหิน น้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ไม่สามารถเกิดขึ้นใหม่ได้ ดังนั้นจึงต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนมาใช้แทนพลังงานดังกล่าว พลังงานที่มาใช้ทดแทนนั้นควรจะเป็นพลังงานที่ใช้ได้อย่างไม่หมดไปหรือสามารถใช้ได้อย่างไม่มีวันหมด ซึ่งพลังงานจากชีวมวลเป็นทางเลือกที่น่าสนใจมากกว่าพลังงานอื่นๆ สำหรับมาใช้ในประเทศไทยเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนชนิดอื่นๆ คือพลังงานจากลม พลังงานน้ำ พลังงานปรมาณู และพลังงานจากแสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 1.1 เนื่องจากพลังงานจากชีวมวลสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก นอกจากนี้ยังสามารถใช้พลังงานชีวมวลได้อย่างต่อเนื่องไม่เหมือนกับพลังงานอื่นๆ ที่กล่าวมา อีกทั้งกระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้กลายเป็นพลังงานสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการที่ไม่ซับซ้อนมากนัก



รูปที่ 1.1 แสดงปริมาณการใช้พลังงาน

ที่มา : IEA World Energy Outlook 2007

พลังงานชีวมวล คือ มวลอินทรีย์สารที่ได้จากซากพืชซากสัตว์ ขยะชุมชนหรือผลิตภัณฑ์ที่มาจากอุตสาหกรรมเกษตร โดยชีวมวลที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรที่เป็นพืชที่ให้น้ำมัน เนื่องจากปริมาณการใช้พลังงานที่อยู่ในรูปของของเหลวจะมีปริมาณการใช้ที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับแก๊ส และถ่านหินตามลำดับและไม่มีสารเจือปนเมื่อเทียบกับน้ำมันที่ผ่านการใช้งานมาก่อนแล้ว โดยน้ำมันที่นำมาใช้ในงานวิจัยคือ น้ำมันที่มาจากต้นสับดูดา ซึ่งจะสกัดน้ำมันออกมาจากส่วนของเมล็ดเนื่องจากให้ปริมาณของน้ำมันมากที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนอื่นๆ น้ำมันสับดูดาที่ผ่านการสกัดมาโดยปราศจากกระบวนการ

ใดๆ นอกจากเอาสิ่งสกปรกออกจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลมาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการเปลี่ยนรูปของน้ำมันสบู่ดำให้มีสมบัติใกล้เคียงกับแก๊สไลน์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันโดยใช้การแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave รูปทรงกระบอก ขนาด 250 มิลลิเมตร ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 6.80 บรรยากาศ เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด และหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันสบู่ดำ ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลผลิตของเหลวที่ได้จะนำไปคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบของน้ำมันโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated distillation gas chromatograph) หลังจากนั้นจะมาคำนวณหาปริมาณแก๊สไลน์ที่แท้จริงก่อนจะนำไปคำนวณทางสถิติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลว ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้ร้อยละผลได้ของแก๊สไลน์มากที่สุด

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงเหลวด้วยการแตกตัวโดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
2. เชื้อเพลิงเหลวที่ทำการสังเคราะห์ได้สามารถขยายส่วนการผลิตสำหรับการผลิตในภาคอุตสาหกรรม

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการทดลอง ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยพิจารณาผลจากร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบของน้ำมัน

1.5 วิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเอกลักษณ์ของน้ำมันสนูปู่ดำก่อนทำปฏิกิริยาด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph)
3. ออกแบบการทดลองโดยใช้แฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k factorial design) จากโปรแกรม Design-expert 6.0.10 ตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ (390 – 440 องศาเซลเซียส) เวลาในการทำปฏิกิริยา (30-60 นาที) และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (2.5 -10 wt %)
4. เตรียมและจัดระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave
5. วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว (ผลิตภัณฑ์น้ำมัน) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph) เพื่อทราบค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงจุดเดือดอุณหภูมิต่างๆ
6. นำผลตอบสนองที่ได้จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลวมาหาภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันสนูปู่ดำโดยใช้โปรแกรม design-expert 6.0.10
7. วิเคราะห์สรุปผลการวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ชีวมวล (biomass)

ชีวมวล (biomass) หมายถึง ผลผลิตจากพืชและสัตว์ (โดยที่ไม่นับการเป็นเชื้อเพลิงฟอสซิลไปแล้ว) ที่เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของโลก และถูกจัดเป็นพลังงานทดแทนพลังงานจากฟอสซิล ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ แบ่งชีวมวลตามแหล่งที่มาได้ดังนี้

1. พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต แป้งและน้ำตาล รวมถึงพืชน้ำมันต่างๆ ที่สามารถนำน้ำมันมาใช้เป็นพลังงานได้
2. เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (agricultural residues) เช่น ฟางข้าว เศษลำต้นข้าวโพด ชังข้าวโพด เหง้ามันสำปะหลัง
3. ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) เช่น ไม้โตเร็ว ยูคาลิปตัส กระถินณรงค์ เศษไม้จากโรงงานผลิตเครื่องเรือน และโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น
4. ของเหลือจากจากอุตสาหกรรมและชุมชน (waste streams) เช่น กากน้ำตาล และขานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล แกลบ ชี้เลี้ยง เส้นใยปาล์ม และกะลาปาล์ม

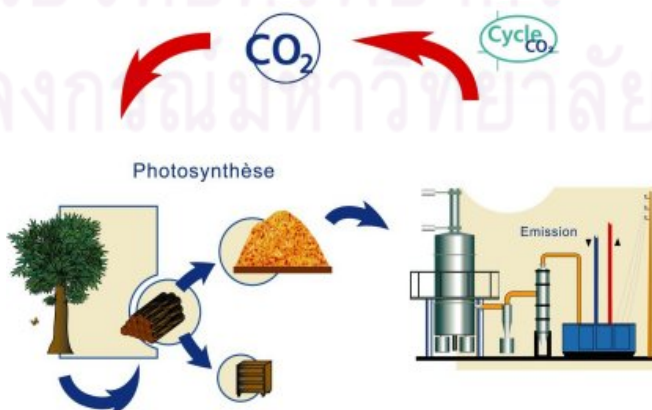
พลังงานชีวมวล (bio-energy) หมายถึง พลังงานที่ได้จากชีวมวลชนิดต่างๆ ดังที่กล่าวแล้วข้างต้น โดยกระบวนการแปรรูปชีวมวลไปเป็นพลังงานรูปแบบต่างๆ มีดังนี้คือ

1. การเผาไหม้โดยตรง (combustion) เมื่อนำชีวมวลมาเผา จะได้รับความร้อนออกมาตามค่าความร้อนของชนิดชีวมวล ความร้อนที่ได้จากการเผาสามารถนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำที่มีอุณหภูมิ และความดันสูง ไอน้ำนี้จะถูกนำไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำเพื่อผลิตไฟฟ้าต่อไป ตัวอย่างชีวมวลประเภทนี้คือ เศษวัสดุทางการเกษตร และเศษไม้
2. การผลิตแก๊ส (gasification) เป็นกระบวนการเปลี่ยนเชื้อเพลิงแข็งหรือชีวมวลให้เป็นแก๊สเชื้อเพลิง เรียกว่าแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ สามารถนำไปใช้สำหรับกังหันแก๊ส (gas turbine)
3. การหมัก (fermentation) เป็นการนำชีวมวลมาหมักด้วยแบคทีเรียในภาวะไร้อากาศ ชีวมวลจะถูกย่อยสลายและแตกตัว เกิดแก๊สชีวภาพ (biogas) ที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สำหรับผลิตไฟฟ้า นอกจากนี้ยังสามารถใช้ขยาะอินทรีย์ชุมชน มูลสัตว์ น้ำเสียจากชุมชนหรืออุตสาหกรรมเกษตร เป็นแหล่งวัตถุดิบชีวมวลได้
4. การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากพืช มีกระบวนการที่ใช้ผลิตดังนี้

- กระบวนการทางชีวภาพ ทำการย่อยสลายแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสจากพืชทางการเกษตร เช่น อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ข้าวฟ่างหวาน กากน้ำตาล และเศษลำต้นอ้อย ให้เป็นเอทานอล เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องยนต์เบนซิน
- กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมัน จากนั้นนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (transesterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล
- กระบวนการใช้ความร้อนสูง เช่นกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เมื่อวัสดุทางการเกษตรได้รับความร้อนสูงในสภาพไร้ออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวเกิดเป็นเชื้อเพลิงในรูปของเหลวและแก๊สผสมกัน

พลังงานเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลได้แก่ เอทานอล และไบโอดีเซล ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวลคือวงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้นต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย

ข้อดีที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อมคือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้าจะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก ในการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป จะทำให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่ เท่ากับปริมาณแก๊สที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต ในขณะที่การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลนั้น จะปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศอย่างรวดเร็ว อีกทั้งชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวล จะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่ง หรือถ่านหินในโรงไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 วงจรคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ cycle)

ที่มา : www.xylowatt.com/resEN.htm

แต่การใช้ชีวมวลก็มีข้อจำกัดบางประการคือ ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภทเช่นกากอ้อยมีจำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภท ต่างต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาระบบวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงสำคัญและจำเป็นอย่างมาก

2.2 พืชน้ำมัน

ปัญหาราคาน้ำมันเพิ่มสูงขึ้นตลอดเวลาเป็นปัญหาสำคัญของคนไทย ดังนั้นทำให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น และประเทศไทยสูญเสียเงินตราในการนำเข้าน้ำมันกว่า 140,000 ล้านบาทต่อปี ประกอบกับน้ำมันปิโตรเลียมใกล้จะหมดไปจากโลกทุกขณะ จากเหตุดังกล่าวจึงมีความพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทนหลากหลายวิธี เช่น พลังงาน แสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น พลังงานจากพืชนับเป็นอีกวิธีที่น่าสนใจ เพราะเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและเหมาะสมกับสภาพสังคมเกษตรกรรมของประเทศไทย พืชที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันได้ เรียกว่า "พืชน้ำมัน" มีหลายชนิด เช่น ถั่วเหลือง ปาล์ม ทานตะวัน มะพร้าว ฯลฯ

"สบู่ดำ" จัดเป็นพืชพลังงานชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้และกำลังเป็นพืชน้ำมันที่น่าสนใจของนักวิทยาศาสตร์ และนักวิชาการเกษตรเนื่องจากเหตุผลสำคัญ 3 ประการคือ

1. เป็นพืชน้ำมันที่ใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลได้เป็นอย่างดีโดยเฉพาะเครื่องยนต์รอบต่ำ
2. สามารถปรับตัวกับสภาวะแห้งแล้งหรือกึ่งแห้งแล้งได้
3. ใช้ควบคุมการสึกกร่อนของหน้าดินได้

ประกอบกับการปลูกพืชสบู่ดำไม่ต้องการพื้นที่ในการปลูกมาก เพราะไม่ใช่ไม้ยืนต้นขนาดใหญ่ แต่ปลูกไว้ตามหัวไร่ ปลายนา พื้นที่รกร้าง พื้นที่ริมถนน หรือแม้แต่กระทั่งปลูกไว้ตามบ้านเรือนก็ได้ รวมทั้งยังไม่มี การนำส่วนต่าง ๆ ของต้นสบู่ดำไปใช้ในการบริโภค จึงทำให้ต้นทุนในการผลิตไบโอดีเซลจากสบู่ดำยังต่ำอยู่ จึงเป็นพืชพลังงานที่น่าสนใจของเกษตรกร ประชาชน หรือนักวิทยาศาสตร์ที่จะต้องศึกษาค้นคว้าวิจัย หาแนวทางในการใช้ประโยชน์ให้เหมาะสมกับประเทศไทยมากที่สุด

2.2.1 การใช้สบู่ดำทดแทนน้ำมัน

สบู่ดำนับเป็นแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซลที่น่าสนใจเนื่องด้วยเหตุผลสำคัญทางเศรษฐศาสตร์ กล่าวคือ น้ำมันของสบู่ดำไม่สามารถใช้เพื่อการบริโภคสำหรับมนุษย์ได้ถ้าปราศจากการกำจัดสารพิษ ประกอบกับสบู่ดำให้ปริมาณน้ำมันต่อหน่วยเมล็ดแห้งมากที่สุด เป็นพืชที่สามารถทนสภาวะแวดล้อมที่แห้งแล้งได้ดี และสามารถปลูกได้ตามพื้นที่รกร้างทั่วไป เพราะเป็นพืชที่มีขนาดไม่ใหญ่ ทำให้ สบู่ดำกำลังเป็นที่สนใจอยู่ในขณะนี้ การใช้สบู่ดำในเครื่องยนต์ดีเซลเริ่มมีรายงานว่าเริ่มใช้ตั้งแต่สมัยสงครามโลกครั้งที่ 2

ที่ เกาะมาดากัสการ์ (Madagascar) เกาะเคป เวิร์ด (Cap Verde) และในประเทศเบนิน (Benin) เนื่องจากในเวลานั้นราคาน้ำมันพุ่งขึ้นสูงมาก นอกจากนี้ในประเทศมาลี (Mali) ได้มีการใช้น้ำมันสบูดำในเครื่องยนต์ดีเซลผลปรากฏว่าได้ผลดีกว่าการใช้น้ำมันก๊าด และยังเป็นสารหล่อลื่นในเครื่องยนต์ได้ด้วย

สบูดำพันธุ์ที่มีอยู่ในขณะนี้ มีน้ำมันภายในเมล็ดอยู่ประมาณ 30-40 เปอร์เซ็นต์ โดยเมล็ดสบูดำที่แก่จัดและเก็บมาจากต้นแล้วควรนำไปสกัดน้ำมันภายใน 1 เดือน มิฉะนั้นน้ำมันที่มีอยู่ในเมล็ดจะระเหยออกไปการสกัดน้ำมันจากเมล็ดสบูดำสามารถทำได้ 3 วิธี

1. การสกัดในห้องปฏิบัติการ สามารถทำได้โดยวิธีบดให้ละเอียดแล้วสกัดด้วยตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ (Petroleum ether) จะได้น้ำมัน 34.96 เปอร์เซ็นต์จากเมล็ดรวมเปลือก และ 54.68 เปอร์เซ็นต์จากเนื้อเมล็ด

2. การสกัดด้วยระบบไฮดรอลิก จะได้น้ำมันประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำมันตกค้างในกาก 10-15 เปอร์เซ็นต์

3. การสกัดด้วยระบบอัดเกลียว จะได้น้ำมันประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกัน

การสกัดด้วยวิธีที่ 2 และ 3 จะต้องนำเมล็ดมาทุบให้พอแตกแล้วนำไปตากแดด นึ่ง หรือเข้าตู้อบก่อนนำเข้าเครื่องสกัดเพื่อให้การสกัดน้ำมันทำได้ง่ายขึ้น แล้วนำน้ำมันที่ได้ไปกรองสิ่งสกปรกออก น้ำมันที่สกัดได้ใหม่ๆ จะไม่มีสีและกลิ่น แต่ถ้าตั้งทิ้งไว้จะเป็นสีเหลืองอ่อนหรือน้ำตาลปนเหลืองและมีกลิ่นไม่ชวนดม โดยเมล็ดสบูดำจำนวน 4 กิโลกรัม สามารถสกัดเป็นน้ำมันสบูดำได้ 1 กิโลกรัม (ประมาณ 1 ลิตร) เหลือเป็นกากสบูดำ 3 กิโลกรัม

2.2.2 คุณสมบัติของน้ำมันสบูดำและการนำไปใช้กับเครื่องยนต์

น้ำมันสบูดำมีคุณสมบัติที่โดดเด่นอยู่อย่างหนึ่งคือ ยังคงใสที่อุณหภูมิต่ำ คือจะแข็งตัวที่อุณหภูมิ -7 องศาเซลเซียส ทำให้ยังสามารถใช้ได้ดีในฤดูหนาวคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำมันสบูดำ (รพีพรรณและคณะ, 2525) น้ำมันสบูดำจะมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวปนเหลือง ใสและยังคงใสที่อุณหภูมิต่ำ และมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ และองค์ประกอบกรดไขมัน แสดงดังตารางที่ 2.1 และ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของน้ำมันสบู่ดำตามทฤษฎี (ที่มา: รพีพรรณและคณะ, 2525)

คุณสมบัติของน้ำมันสบู่ดำ	ค่าที่ได้
ปริมาณกรดไขมันอิสระ (Free fatty acid, % as oleic acid)	4.80
ค่าสaponification (Saponification value)	197.13
ค่าไอโอดีน (Iodine value, Wijs)	97.08
ดัชนีหักเห (Refractive index) ที่ 25°C	1.4670
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ที่ 25°C	0.9136
ความหนืด (Viscosity)ที่ 25°C (Gardner) (cp)	45.68

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของกรดไขมันตามทฤษฎี (ที่มา: รพีพรรณและคณะ, 2525)

องค์ประกอบของกรดไขมัน	ค่าร้อยละโดยน้ำหนัก
Palmitic acid (C 16:0)	16.17
Stearic acid (C18:0)	5.11
Total saturated fatty acid	21.28
Oleic acid (C18:1)	44.88
Linoleic acid (C18:2)	33.83
Total unsaturated fatty acid	78.71

นอกจากนี้ น้ำมันสบู่ดำที่สกัดได้ยังสามารถนำไปใช้กับเครื่องยন্ত্রรอบตัวได้โดยตรง โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยন্ত্রใดๆ เนื่องจากค่าความหนืดต่ำกว่าน้ำมันจากพืชชนิดอื่นๆ ตารางที่ 2.3 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนืด และค่าความร้อนของน้ำมันจากพืชชนิดต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบระหว่างค่าความถ่วงจำเพาะ ค่าความหนืดและค่าความร้อนของน้ำมันชนิดต่าง ๆ (ที่มา : ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ)

ชนิดของน้ำมัน	ค่าความถ่วงจำเพาะที่ 25 องศาเซลเซียส (g/ml)	ค่าความหนืดที่ 25 องศาเซลเซียส (cp)	ค่าความร้อน (kJ/kg)
ถั่วเหลือง	0.918	57.2	39,350
ทานตะวัน	0.918	60.0	39,490
มะพร้าว	0.915	51.9	37,540
ปาล์ม	0.898	88.6	39,550
สบู่ดำ	0.914	45.68	39,000
(ที่ 38 องศาเซลเซียส)			
ดีเซล	0.845	3.8	46,800

ผลจากการใช้น้ำมันสบู่ดำโดยตรงกับเครื่องยนต์ดีเซลรอบต่ำ เช่น เครื่องบินไฟ รถไถนา รถเพื่อการเกษตรกรรม รถแทรกเตอร์ เครื่องสูบน้ำ ผลปรากฏว่า น้ำมันสบู่ดำสิ้นเปลืองน้ำมันน้อยกว่าการใช้น้ำมันดีเซล แต่สังเกตว่าเรือน้ำมันทำงานหนักมากกว่าปกติเล็กน้อย การเดินเครื่องเป็นปกติสม่ำเสมอ ไม่มีการน็อก ไม่ว่าจะเดินเครื่องปกติหรือเร่งเครื่องก็ตาม นอกจากนี้น้ำมันสบู่ดำยังปล่อยแก๊สพิษน้อยกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย จากงานวิจัยที่ศูนย์วิจัยพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศพบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้สบู่ดำปล่อยควันดำน้อยกว่าน้ำมันดีเซลเล็กน้อย ในขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์จากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันสบู่ดำสูงกว่าที่ใช้น้ำมันดีเซลเล็กน้อย ส่วนซัลเฟอร์ไดออกไซด์จากปลายท่อไอเสียรถยนต์ พบว่าเมื่อเดินเครื่องด้วยน้ำมันสบู่ดำไม่พบซัลเฟอร์ไดออกไซด์เลย และเมื่อเดินเครื่องด้วยน้ำมันสบู่ดำครบ 1,000 ชั่วโมง ได้ถอดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ออกมาตรวจสอบพบว่า ลูกสูบ แหวน ลิน หัวฉีด และอื่น ไม่พบยางเหนียวจับ แสดงว่าน้ำมันสบู่ดำสามารถใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็กเพื่อเกษตรกรรมได้ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนการประกอบอาชีพของเกษตรกรได้ รวมทั้งเป็นการใช้พื้นที่กว้างว่างเปล่าให้เกิดประโยชน์ได้อย่างเต็มที่

นอกจากนี้ น้ำมันสบู่ดำยังสามารถนำไปทำเป็นน้ำมันไบโอดีเซล (น้ำมันจากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพให้สามารถใช้ทดแทนน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมฟอสซิลได้ในเครื่องยนต์ดีเซล) ซึ่งสามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์รอบสูงหรือเครื่องยนต์ของรถยนต์ทั่วไปได้เป็นอย่างดีและผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพของประเทศออสเตรเลียดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของน้ำมันสบูดำ ไบโอดีเซลจากน้ำมันสบูดำ และมาตรฐานคุณภาพ
น้ำมันไบโอดีเซลจากเมล็ดเรพของประเทศออสเตรเลีย
(ที่มา: ศูนย์วิจัยพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีการบินและอวกาศกองทัพอากาศ)

ค่า	หน่วย	น้ำมันสบูดำ	เมทิลเอสเทอร์ จาก น้ำมันสบูดำ	เอทิลเอสเทอร์ จากน้ำมันสบูดำ	มาตรฐานน้ำมัน จากประเทศ ออสเตรเลีย
ความหนาแน่นที่ 25 องศาเซลเซียส	g/cm ⁻³	0.914	0.879	0.886	0.87-0.89
ความหนืดที่ 25 องศาเซลเซียส	cSt	45.68	4.84	5.54	3.5-5.0 (20 องศาเซลเซียส)
จุดวาบไฟ (Flash point)	องศา เซลเซียส	240	191	190	>100
ค่าซีเทน (Cetane number)	-	-	51	59	≥48
ปริมาณซัลเฟต	%w/w	-	0.014	0.010	≤0.02

จากตารางแสดงให้เห็นว่าน้ำมันไบโอดีเซลจากสบูดำมีค่าความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลทั่วไป และมีค่าความหนืดที่สำคัญต่อการฉีดน้ำมันเข้าสู่ระบบอวกสูบผ่านเกณฑ์มาตรฐาน นอกจากนี้ยังมีค่าจุดวาบไฟ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่จุดระเบิดให้ติดเปลวไฟแสดงถึงความปลอดภัยในการจัดเก็บและการขนส่งสูงกว่าน้ำมันดีเซล ในขณะที่ค่าซีเทนซึ่งเป็นค่าการจุดติดไฟและแสดงถึงคุณภาพของน้ำมันนั้น น้ำมันไบโอดีเซลจากสบูดำมีค่ามากกว่าที่มาตรฐานกำหนด และในส่วนของปริมาณซัลเฟอร์ก็น้อยกว่ามาตรฐานที่กำหนดเช่นเดียวกัน

สรุปได้ว่า สบูดำเป็นพืชที่มีประโยชน์สามารถนำมาทำเป็นน้ำมันทดแทนน้ำมันดีเซลใช้กับเครื่องยนต์รอบต่ำได้โดยตรงโดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์แต่อย่างใด นอกจากนี้ น้ำมันไบโอดีเซลจากสบูดำยังสามารถใช้กับเครื่องยนต์รอบสูงหรือเครื่องยนต์ของรถยนต์ทั่วไป และมีการเผาไหม้ที่สะอาดกว่า

สบู่ดำจึงเป็นพืชน้ำมันที่น่าสนใจเพราะเหมาะกับสภาพสังคมการเกษตรของประเทศไทย มีความทนทานต่อสภาพอากาศแห้งแล้ง และไม่ต้องใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกมาก หากส่งเสริมให้มีการปลูกสบู่ดำและนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานก็จะสามารถช่วยลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ เป็นการลดการเสียดุลทางการค้าได้อีกทางหนึ่งด้วย นับได้ว่าประเทศไทยมีภูมิทรัพยากรทางด้านพลังงานอยู่เรือนของคนไทย ขาดแต่การวิจัยเพื่อนำไปสู่การใช้พลังงานภายในประเทศที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์และนำไปใช้ทดแทนพลังงานที่มาจากภายนอกประเทศ

2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา

เป็นสารที่เติมลงไปในปฏิกิริยาในจำนวนน้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้นแล้วทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยที่ตัวสารเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังจากปฏิกิริยาเสร็จสิ้น โดยสมมูลของปฏิกิริยาไม่เปลี่ยน

สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

1. ไม่รบกวนสมมูลของปฏิกิริยา
2. ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (E_a)
3. ต้องเป็นสารเสมอ

2.3.1 ปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยา (Catalysis reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาใช้เพื่อให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้รวดเร็วขึ้น โดยมีกลไกที่ปลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้จะมีหน้าที่ปลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา โดยที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น หรือไปรบกวนสมมูลของปฏิกิริยา จึงมีความหมายโดยสรุปว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาถึงค่าคงที่ของสมมูลของปฏิกิริยาก็คงพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องไม่ทำให้ค่าคงที่ของสมมูลเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้วเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาเท่ากับปริมาณที่ใช้ตอนเริ่มต้นโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพ แต่ในทางปฏิบัติตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง หรือองค์ประกอบได้ เช่น การเปลี่ยนอัตราส่วนของออกซิเจนต่อโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะออกไซด์บางชนิดที่อุณหภูมิสูง หรือการสัมผัสของสารตั้งต้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาโดยสามารถแบ่งปฏิกิริยาการเร่งปฏิกิริยาจากเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ปฏิกิริยาอะตอมเลซิสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Catalysis reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแก๊ส เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์

1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของเหลว ได้แก่ การใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างของสารละลายน้ำตาลกลูโคส

2. ปฏิกิริยาอะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ต่างสถานะ หรือไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยส่วนมากตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นเป็นแก๊ส หรือของเหลว หรือแก๊สรวมอยู่กับของเหลว โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีสมบัติทางเคมีของผิวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอะตะไลซิส โดยการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเฉพาะที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยมักจะเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ และไม่เกิดปฏิกิริยาทะลุเข้าไปถึงเนื้อในของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับ อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัมผัสกับสารตั้งต้นและความเข้มข้นของโมเลกุลที่ดูดซับบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

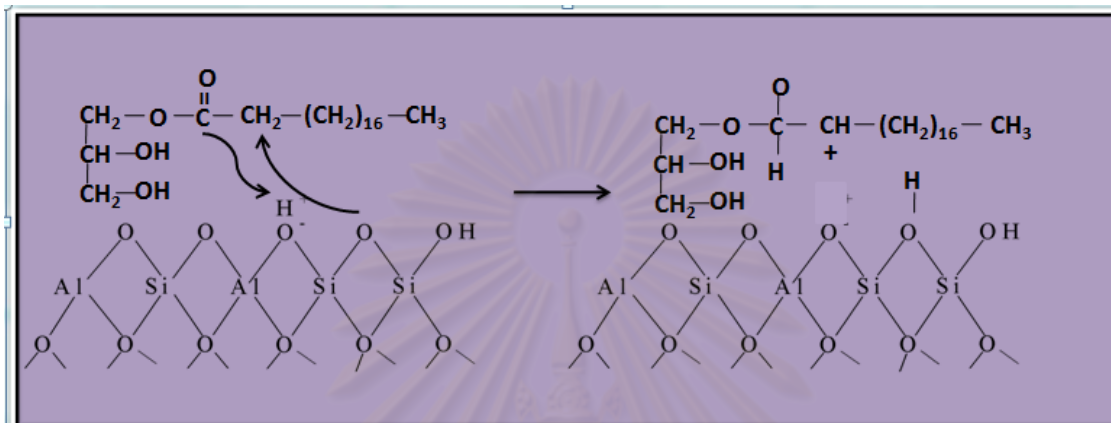
3. ปฏิกิริยาอะตะไลซิสแบบเอนไซม์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีโมเลกุลใหญ่ โดยมีความเกี่ยวข้องกับวิถีของการดำเนินปฏิกิริยาชีวเคมี และอยู่ก้ำกึ่งระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

2.4 ซีโอไลต์ (Zeolite) (อิริชา ฉายสุวรรณ, 2541; Breck, 1974)

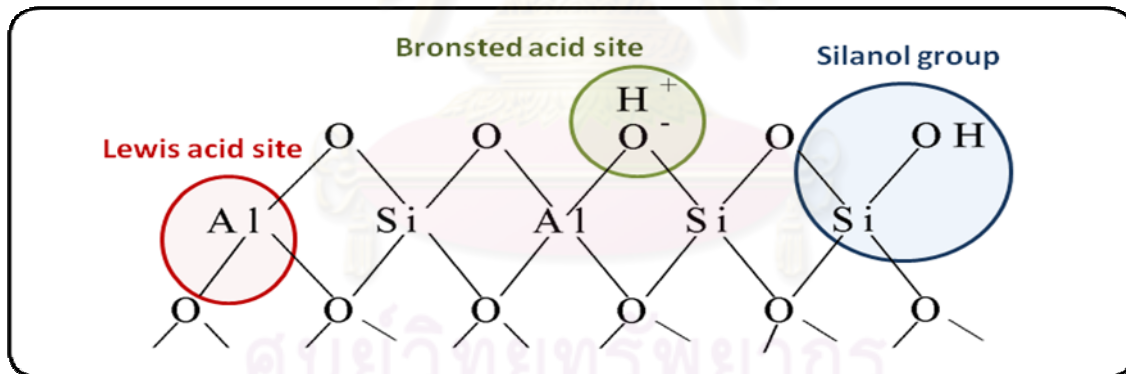
ซีโอไลต์เป็นสารที่มีความเป็นผลึก มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นระเบียบ เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตของธาตุแอลคาไลน์หรือแอลคาไลน์เอิร์ท โดยธาตุที่พบมากได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเซียม (Sr) และแบเรียม (Ba) ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นตาข่าย (Framework structure) 3 มิติ มีรูปร่างและขนาดโพรงแตกต่างกันตามชนิดของซีโอไลต์ โครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการต่อกันของโครงสร้างเตตระฮีดรอนของซิลิกอนเตตระออกไซด์ (SiO_4)⁴⁻ และอะลูมิเนียมเตตระออกไซด์ (AlO_4)⁵⁻ โดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน โครงสร้างของซีโอไลต์จึงมีลักษณะเป็นรูพรุน มีโพรงและมีช่องว่างที่มีรูปแบบที่แน่นอน โดยขนาดของช่องเปิดของโครงผลึกขึ้นอยู่กับจำนวนออกซิเจนในวงแหวน (ring) ที่ต่อกันเป็นทรงสี่หน้า ซึ่งอาจมีจำนวนอะตอมออกซิเจนเป็น 6 8 10 หรือ 12 ในวงแหวน แล้วแต่ชนิดของซีโอไลต์

เนื่องจากซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรดแบบวิวิธพันธุ์ โดยชนิดของกรดที่มีในซีโอไลต์แสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นจึงสามารถทำให้โมเลกุลของสารตั้งต้น (ในกรณีรูปที่ 2.2 คือ โมโนกลีเซอไรด์) เกิดการแตกตัวได้อยู่ในรูปของช่วงคาร์บอนประมาณ 5-12 โมเลกุล ซึ่งอยู่ในช่วงของแก๊สไลน์ นอกจากนี้ซี

ไอโกลท์ยังช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยา Aromatization และ Cyclization ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อยู่ในรูปของสารประกอบแอมโรแมติก สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีด้านอื่นๆ อีกด้วย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปฏิกิริยา Deoxygenation ทำให้เชื้อเพลิงเหลวที่ได้มีองค์ประกอบของออกซิเจนลดลง เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเชื้อเพลิงเหลวอีกด้วย

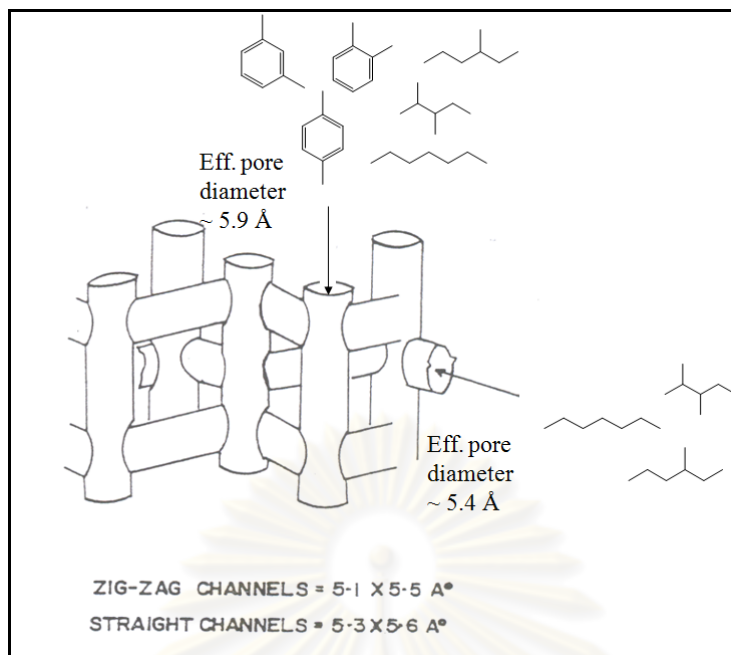


รูปที่ 2.2 การแตกตัวของโมโนกลีเซอไรด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์



รูปที่ 2.3 ชนิดของ acid site ของสารประกอบซีโอไลต์

ชนิดของโครงสร้างที่นิยมนำมาใช้ในปฏิกิริยาการแตกตัวคือ ZSM-5 เนื่องจากมีขนาดของรูพรุนอยู่ที่ประมาณ 5.1-5.6 นาโนเมตร มีความเลือกสรรผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในช่วงคาร์บอน 5-6 อะตอม โดยเป็นชนิดของซีกิงและสารประกอบแอมโรแมติกแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 pore structure channel ของ ZSM-5

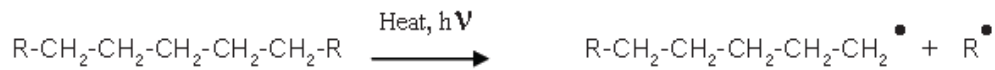
2.5 การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking)

อิทธิพลของความร้อนทำให้โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนสลายตัวออกไป Siliman ได้เสนอแนะวิธีนี้ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1871 (Gary, 1984; Satterfield, 1991) กระบวนการที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระบวนการแรก คือ Burton Process ได้ใช้แพร่หลายในช่วงปี ค.ศ. 1910-1920 หลังจากนั้นได้มีกระบวนการอื่น ๆ เกิดขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น กระบวนการ Dubbs เป็นต้น จนเมื่อหมดความนิยมเพราะมีกระบวนการแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาแทนที่ การใช้หน่วยเหล่านี้ก็เบนวัตถุประสงค์ไปคือ ใช้สำหรับการผลิตน้ำมันดีเซลเพิ่มขึ้นจากน้ำมันหนัก หรือกากน้ำมัน ซึ่งเรียกว่า Thermal Gas Oil Unit และใช้ช่วยลดความหนืดของกากน้ำมันในการผลิตน้ำมันเตาชนิดใส โดยเรียกชื่อหน่วยนี้ว่า Visbreaker นอกจากนี้ยังใช้ผลิตได้กปิโตรเลียมจากกากน้ำมันโดยเรียกว่า Thermal Coking Process ดังนั้นคำว่า Thermal cracking จึงเป็นคำกลาง ๆ ที่หมายถึง กระบวนการเหล่านี้กระบวนการใดก็ได้

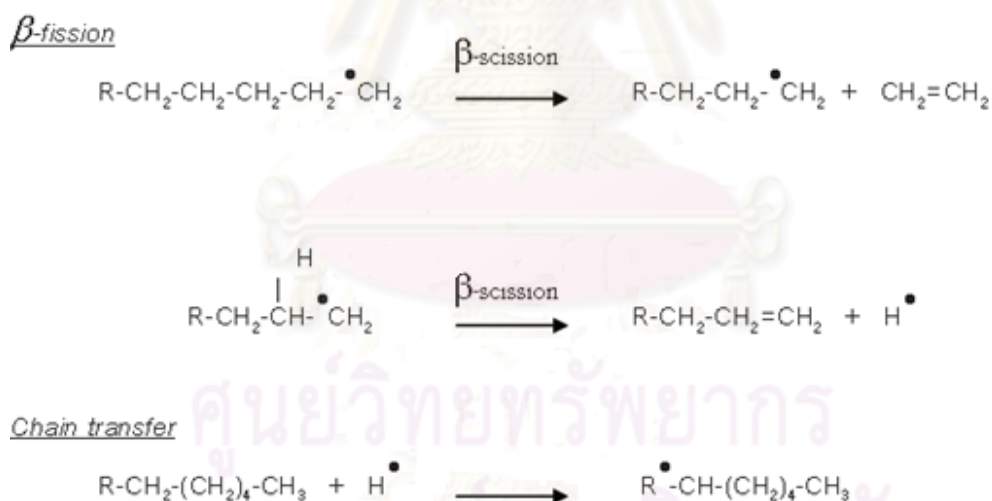
การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลที่เล็กลงโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิสูง โดยหากควบคุมให้การแตกตัวเป็นไปได้อย่างพอดี จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากการให้ความร้อนจะเกินพอดีจะทำให้การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในรูปแก๊ส C_1-C_4 ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยาโดยเฉพาะส่วนที่มีแชนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันเองต่อไป

กระบวนการแตกตัวโมเลกุลด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) แบบห่วงโซ่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน (Schobert, 1991; วิชากร, 2544)

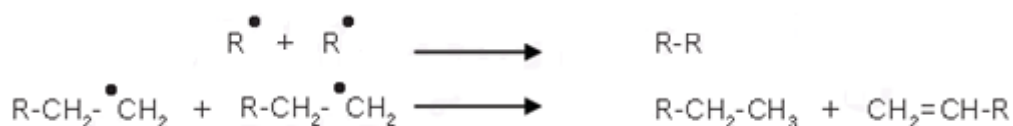
1. ขั้นเริ่มต้น (Initiation step) เป็นขั้นตอนในการเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) เกิดจากความร้อนไปทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขาดออกจากกัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยาในขั้นต่อไป



2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง การแตกตัวจะเริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปยังพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง β เกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้น (β -fission) ซึ่งทำให้ภายในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดความไม่เสถียรส่งผลให้เกิดขั้นตอนการถ่ายทอดไฮโดรเจน (chain transfer) เพื่อให้โมเลกุลเกิดความเสถียร จึงเกิดเป็นสารต่างๆที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงจากพอลิเมอร์เดิม พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นต่อ เพื่อเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ



3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (Termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยจะทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใหญ่ขึ้น โดยอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดี่ยว หรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล



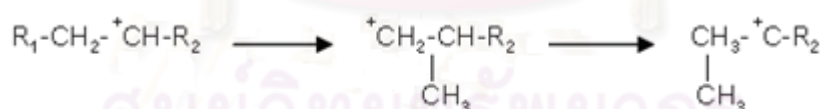
2.6 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีบทบาทในการช่วยแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้ขนาดเล็กลงให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมคุณภาพพอเหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการได้ (Satterfield, 1991; Schobert, 1991; วิชากร, 2544) กลไกของการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

1. การเกิดไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (Carbonium ion) ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรด์ไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออนโดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary ion และ primary ion ตามลำดับ



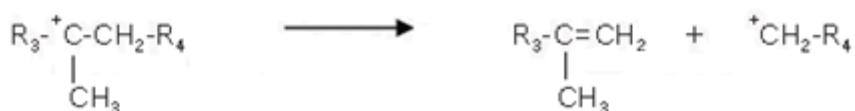
2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลของคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของคาร์บอนเนียมไอออนมีเสถียรภาพแตกต่างกัน



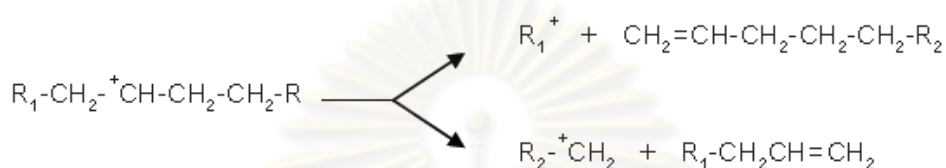
และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (Hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน



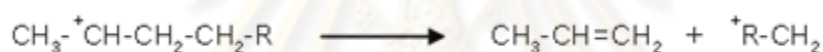
สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา β -scission หรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง β ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็ก โดยมักจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ



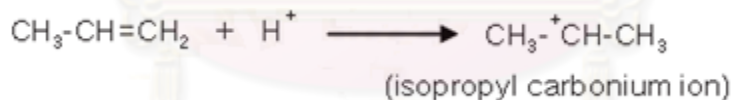
ในบางกรณีคาร์บอเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ในตัวอย่างของ secondary carbonium ion



ถ้า $\text{R}_1 = \text{H}$ การเกิด β -scission จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการ

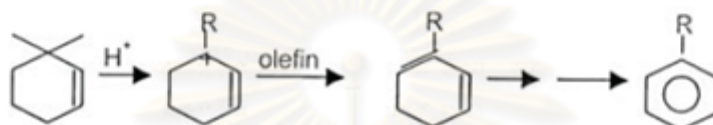
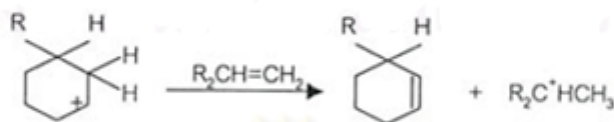


โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโพรพีนจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอเนียมไอออนซึ่งจะไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้



Isopropyl carbonium ion จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับโมเลกุลประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรือ อาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน

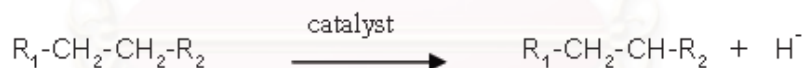
ในการเกิดวงแหวนแอโรแมติกจากปฏิกิริยาดีไฮโดรไซคลิกเซชัน (dehydrocyclization) โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา β -scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก cyclohexadiene ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอโรแมติก



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของเบนซินที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกแอมโรแมติกและโอเลฟินมาก (Satterfield, 1991; ปราโมทย์, 2537) องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่จะเกาะติดอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.7 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking)

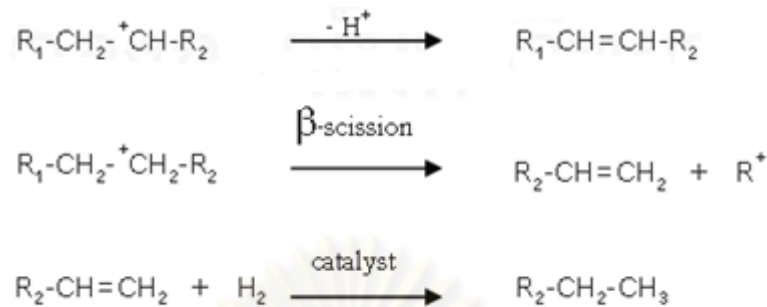
การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซีลิกา-อะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆ กับการเติมไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



คาร์บอนเนียมไอออนอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยการกำจัดโปรตอนออกจากโอเลฟินหรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ จากนั้น

เกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและการตั้งไฮโดรเจน
สารประกอบประเภทพาราฟิน

โอเลฟินที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็น



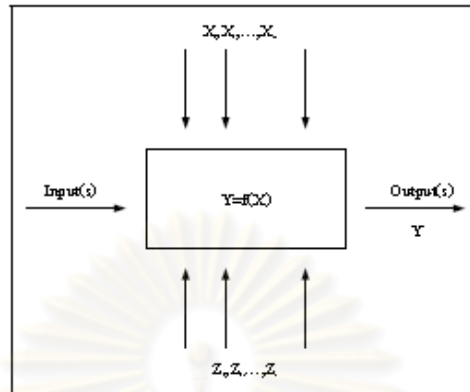
หากปฏิกิริยาเกิดในภาวะที่อุณหภูมิ 400-480 องศาเซลเซียส ความดัน 35-170 บรรยากาศ ผลิตรถยนต์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่อิมิตัวค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้แก๊สที่ได้นั้นมีปริมาณสารประกอบที่ต่ำกว่ากระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากผลิตรถยนต์ที่ได้นั้นมีปริมาณสารประกอบแอมโมเนีย เพราะเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนมากกว่า สารที่ได้จึงมักนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องบิน (jet fuel) รวมทั้งยังได้สารประกอบประเภท LPG ซึ่งใช้เป็นสารป้อนในกระบวนการปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ใดๆ นั้นต้องอาศัยปัจจัยอื่นๆควบคู่กันไป โดยผลิตรถยนต์ที่ได้นั้นต้องขึ้นกับเวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งชนิดของปฏิกิริยาและชนิดของพลาสติก

นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยทำความสะอาดให้กับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปพร้อมๆ กันด้วย เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นอย่างดี เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความสามารถไปหรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตรถยนต์ตามที่ต้องการ

2.8 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE)

Montgomery (2005) กล่าวว่า การทดลองถูกสร้างขึ้นโดยผู้ทดลองที่ต้องการค้นหาคำตอบจากกระบวนการที่ผู้ทดลองสนใจเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการ การทดลองในที่นี้หมายถึง การทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าหรือตัวแปรต้น (Input) ของกระบวนการ จะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองหรือผลลัพธ์หรือตัวแปรตาม (Output) มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น วัตถุประสงค์หลักของการทดลอง คือ การพัฒนากระบวนการหาความผันแปรภายนอกส่งผลกระทบต่อกระบวนการได้น้อย รวมถึงช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่และการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการผลิต

รูปที่ 2.5 แสดงรูปแบบของกระบวนการ ส่วนใหญ่ภาพของกระบวนการเป็นการร่วมกันของ เครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่นๆ และตัวแปรป้อนเข้า (Input) จะถูกเปลี่ยนรูปเป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งค่าหรือมากกว่านั้น



รูปที่ 2.5 รูปแบบของกระบวนการ Montgomery (2005)

โดยที่

X คือ ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรป้อนเข้าหรือตัวแปรต้นหรือปัจจัย

Y คือ ตัวแปรตอบสนองหรือผลลัพธ์หรือตัวแปรตาม

Z คือ ตัวแปรรบกวนหรือตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้

จากภาพที่ 2.5 พบว่ากระบวนการประกอบด้วยปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) คือ X_1, X_2, \dots, X_n กับปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) คือ Z_1, Z_2, \dots, Z_n

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ ในกระบวนการซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลอง เพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่างๆ ที่ คิดว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือผลลัพธ์ที่สนใจ

2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดได้ใน กระบวนการ เนื่องจากเกิดจากธรรมชาติของกระบวนการ เช่น เทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการ ควบคุมสูงมากหรือมีความรู้ไม่เพียงพอ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมากผู้ทำการทดลอง ควรพยายามจำกัดปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. หาตัวแปรที่มีผลต่อค่า Y มากที่สุด
2. กำหนดค่า X ที่ทำให้ค่า Y ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ
3. กำหนดค่า X ที่ทำให้ค่า Y มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
4. กำหนดค่า X ที่ทำให้ค่า Z มีผลน้อยมาก

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือสำคัญในระบบงานทางวิศวกรรม สำหรับเพิ่มสมรรถนะของกระบวนการผลิต ทำให้เกิดการพัฒนานวัตกรรมใหม่ การเพิ่มผลผลิต ลดความผันแปรลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการและลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา ถ้าใช้การออกแบบการทดลองกับผลิตภัณฑ์จะช่วยให้กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์มีความง่าย มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำและระยะเวลาในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่จะสั้น

2.8.1 หลักการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นการวางแผนการทดลอง ซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นถูกวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติ เพื่อใช้ทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปของวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ หลักการออกแบบการทดลองมีดังนี้

2.8.1.1 การทำซ้ำ (Replication) คือ การทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อกำจัดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ คือ ใช้ประมาณค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง และทำให้การประมาณค่าเฉลี่ยมีความมั่นใจมากขึ้น

2.8.1.2 การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การให้โอกาสในการเก็บข้อมูลแต่ละตัวเท่ากัน กำจัดความลำเอียงเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองเท่าๆกัน การทำแบบสุ่มสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีดังนี้

- ก) การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)
- ข) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- ค) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within

Block)

2.8.1.3 การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มการเก็บข้อมูลที่เป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลของวัสดุที่แตกต่างกันออกไปและจะสนใจผลการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

2.8.2 คำจำกัดความ

2.8.2.1 ปัจจัย (Factor) หมายถึง ตัวแปรต้นหรือสิ่งที่คิดว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองและนำมาพิจารณาในการทดลอง ปัจจัยอาจมีลักษณะเชิงปริมาณหรือเชิงคุณภาพก็ได้ ปัจจัยเชิงปริมาณสามารถกำหนดเป็นตัวเลขได้ แต่ปัจจัยเชิงคุณภาพกำหนดให้เป็นตัวเลขไม่ได้ เช่น การทดลองการชุบแข็งโลหะด้วยน้ำมัน จะใช้ชนิดของน้ำมันและอุณหภูมิในการชุบแข็งเป็นปัจจัยในการทดลอง ในที่นี้ชนิดของ

น้ำมันจะมีลักษณะเป็นเชิงคุณภาพแต่อุณหภูมิในการชุบแข็งมีลักษณะเป็นเชิงปริมาณ ปกติจะใช้อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่แทนปัจจัย เช่น A, B, C เป็นต้น

2.8.2.2 ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) หมายถึง ตัวแปรตามหรือตัวแปรที่มีผลจากปัจจัย

2.8.2.3 ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึง สภาวะต่างๆของปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งทุกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองต้องมีระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับ ปกติจะใช้อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กแทนจำนวนระดับของปัจจัย เช่น a แทนจำนวนระดับของปัจจัย A เป็นต้น

2.8.2.4 ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่ได้พิจารณาในการทดลองแต่ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง

2.8.3 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

2.8.3.1 การกำหนดปัญหา เป็นการระบุว่าความต้องการในกระบวนการคืออะไรและทำความเข้าใจถึงปัญหา ซึ่งเมื่อกำหนดปัญหาได้แล้วก็จะใช้เป็นวัตถุประสงค์ของการทดลองในการกำหนดปัญหาจะใช้ความคิดเห็นของหลายฝ่าย เช่น ฝ่ายวิศวกร ฝ่ายประกันคุณภาพฝ่ายการผลิต ฝ่ายการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้า เป็นต้น

2.8.3.2 การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย ขั้นตอนนี้ต้องใช้ทฤษฎี ประสบการณ์ที่ได้เรียนรู้จากการทำงานในกระบวนการ การทดลองที่ได้ทำมาแล้วในอดีต เพื่อพิจารณาว่าปัจจัยใดที่ควรนำมาใช้ในการทดลอง และในแต่ละปัจจัยควรมีช่วง (Range) ในการทดลองเท่าไรเพื่อใช้ระบุระดับของปัจจัย ในการกำหนดระดับของปัจจัยสามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังนี้

ก) แบบกำหนดตายตัว (Fixed Level) หมายถึง การกำหนดระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้คงที่แน่นอน

ข) แบบสุ่ม (Random Level) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าได้แน่นอนซึ่งผลการทดลองที่ได้จะเป็นตัวแทนของทั้งปัจจัย ไม่ได้เป็นตัวแทนของระดับใดระดับหนึ่ง

ค) แบบผสม (Mixed Level) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่เกิดจากแบบกำหนดตายตัวและแบบสุ่มรวมกัน

2.8.3.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง ผู้ทำการทดลองต้องมั่นใจว่าตัวแปรที่เลือกสามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ศึกษา การเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองอาจใช้เพียงค่าเดียวหรือหลายค่าก็ได้ และในการวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

2.8.3.4 การเลือกแบบการทดลอง ต้องพิจารณาขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ การทำแบบสุ่ม และการบล็อก รวมถึงต้นทุนที่ใช้ในการทดลองด้วย

2.8.3.5 การดำเนินการทดลอง ต้องทำตามที่วางแผนไว้ ข้อควรระวังในการทดลองคือ ความถูกต้องของกระบวนการ เครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

2.8.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล ใช้หลักการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ได้ด้วย เช่น โปรแกรม Minitab

2.8.3.7 สรุปผลและข้อเสนอนะ สรุปผลของการวิเคราะห์อาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ และให้ข้อเสนอนะจากการทดลอง

2.9 การทดลองแบบปัจจัยเดียวและการวิเคราะห์ความแปรปรวน

2.9.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ปารเมศ (2545) กล่าวไว้ว่า กระบวนการที่เหมาะสมเพื่อทดสอบความเท่ากันของมัชฌิมหลายค่า คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) สมมติว่ามีระดับซึ่งแตกต่างของปัจจัยเดียวที่ต้องการทำการเปรียบเทียบ และค่าตอบสนองที่ได้จากการสังเกตในแต่ละระดับเป็นตัวแปรสุ่ม ข้อมูลควรมีลักษณะเหมือนในตารางที่ 2.5 ซึ่งค่าต่างๆ ที่แสดงในตาราง เช่น y_{ij} หมายถึง ค่าสังเกตที่ j ภายใต้ระดับที่ i หรือโดยทั่วไปจะมีค่าสังเกต n ค่า ภายใต้ระดับ i

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลสำหรับการทดลองปัจจัยเดียว (ปารเมศ, 2545)

Treatment (level)	Observations				Totals	Averages
1	y_{11}	y_{12}	...	y_{1n}	$y_{1.}$	$\bar{y}_{1.}$
2	y_{21}	y_{22}	...	y_{2n}	$y_{2.}$	$\bar{y}_{2.}$
⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
α	$y_{\alpha 1}$	$y_{\alpha 2}$...	$y_{\alpha n}$	$y_{\alpha.}$	$\bar{y}_{\alpha.}$
					$y_{..}$	$\bar{y}_{..}$

เราสามารถที่จะอธิบายค่าสังเกตต่างๆ นี้ด้วยแบบจำลองทางสถิติเชิงเส้นคือ

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, \alpha \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.1)$$

โดยที่ y_{ij} เป็นค่าสังเกตที่ ij และ μ คือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันทุกระดับซึ่งเรียกว่า "มัชฌิมรวม (Overall Mean)" τ_i คือค่าพารามิเตอร์สำหรับระดับที่ i หรือผลกระทบจากระดับที่ i และ e_{ij} คือองค์ประกอบของความ

ผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จุดประสงค์ของเราคือเพื่อทำการทดสอบสมมติฐานที่เหมาะสมเกี่ยวกับผลกระทบของระดับต่างๆ และทำการประมาณค่าของมัน สำหรับการทดสอบสมมติฐาน ความผิดพลาดของแบบจำลองถูกสมมติให้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน ด้วยมัธยฐานเท่ากับ 0 และความแปรปรวน σ^2 ซึ่งสมมติให้มีค่าคงตัวตลอดทุกระดับของปัจจัยแบบจำลองนี้เรียกว่า “การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Analysis of Variance)” เพราะมีเพียงแค่ปัจจัยเดียวที่นำมาพิจารณา ยิ่งกว่านั้นลำดับในการทดลองจะต้องเป็นแบบสุ่มเพื่อให้สิ่งแวดล้อมที่ทำการทดลองในต่างๆ (เรียกว่า “หน่วยการทดลอง (Experimental unit)”) จะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นการทดลองนี้จึงเป็นการออกแบบการทดลองที่เรียกว่า “การออกแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design)” แบบจำลองทางสถิติในสมการ (2.1) อธิบายความแตกต่างของ 2 สถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของระดับ อันดับแรก คือ ระดับ a ระดับสามารถถูกกำหนดขึ้นโดยผู้ทดลอง ในที่นี้เราต้องการที่จะทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับมัธยฐานของระดับ และบทสรุปที่เกิดขึ้นจะนำไปประยุกต์ได้กับระดับของปัจจัยที่เราพิจารณาเท่านั้น ข้อสรุปที่ได้ไม่สามารถไปใช้กับระดับอื่นที่มีค่าใกล้เคียงที่เราไม่ได้พิจารณาหรือทำการทดลองได้ นอกจากนี้ เราก็อาจจะต้องการที่จะประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (μ, τ_i, σ^2) ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบคงที่ (Fixed Effects Model)” ในทางกลับกัน ถ้าระดับ a ถูกสุ่มเลือกจากประชากรขนาดใหญ่ของระดับต่างๆ ที่เป็นไปได้ ในกรณีนี้เราสามารถที่จะขยายผลสรุป (ซึ่งขึ้นกับตัวอย่างของระดับที่ใช้) ของเราไปยังทุกๆ ระดับของประชากรถึงแม้ว่าเราอาจจะไม่ได้ทำการพิจารณาระดับนั้นๆ อย่างชัดเจนก็ตาม ในการวิเคราะห์ ในที่นี้ τ_i คือ ตัวแปรสุ่ม และความรู้เกี่ยวกับค่าตัวแปรสุ่มตัวใดตัวหนึ่งจะไม่มีประโยชน์แต่อย่างใด เราทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับความแปรผันของ τ_i และพยายามที่จะประมาณค่าความแปรผันนี้ ซึ่งเรียกว่า “แบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม (Random Effect Model)”

2.9.2 การวิเคราะห์แบบจำลองผลกระทบคงที่

ปารเมศ (2545) กล่าวถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวของแบบจำลองผลกระทบคงที่ไว้ว่า ผลกระทบของระดับ (τ_i) มีนิยามเหมือนกับส่วนของค่าที่เบี่ยงเบนจากมัธยฐานรวม

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0 \quad (2.2)$$

ให้ y_i แทนค่าของค่าสังเกตทุกๆ ตัวของระดับ i ในทำนองเดียวกันให้ $y_{..}$ แทนค่าสังเกตทั้งหมด และ \bar{y}_i แทนค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตภายใต้ระดับที่ i ในทำนองเดียวกัน $y_{..}$ แทนผลรวมของค่าสังเกตทั้งหมด และ $\bar{y}_{..}$ แทนค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมด ซึ่งเราสามารถเขียนในรูปของสัญลักษณ์ คือ

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.3)$$

$$\bar{y}_{i.} = \frac{y_{i.}}{n} \quad (2.4)$$

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (2.5)$$

$$\bar{y}_{..} = \frac{y_{..}}{N} \quad (2.6)$$

โดยที่ $i = 1, 2, \dots, a$ และ $N = an$ คือ จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด จะสังเกตว่าเครื่องหมาย "." แทนผลรวมของตัวห้อย (Subscript) ที่เครื่องหมายนั้นเข้าไปแทนที่อยู่มีขัณมีของระดับ i คือ $E(y_{ij}) = \mu_i = \mu + \tau_i = 1, 2, \dots, a$ ดังนั้นมีขัณมีของระดับที่ i ประกอบด้วย มีขัณมีรวมบวกกับผลกระทบที่เกิดจากระดับที่ i เราสนใจในการทดสอบความเท่ากันของมีขัณมี a ระดับคือ

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ อย่างน้อยหนึ่งคู่ของ } (i, j)$$

ถ้าหาก H_0 เป็นจริง ทุกระดับจะมีมีขัณมีที่เท่ากันคือ μ เราอาจจะเขียนสมมติฐานใหม่ในรูปของผลกระทบของระดับ i ได้ คือ

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่ง } i$$

ดังนั้น เราสามารถกล่าวได้ว่า การทดสอบความเท่ากันของมีขัณมีของระดับหรือการทดสอบผลที่เกิดขึ้นจากระดับ (τ_i) เท่ากับศูนย์ก็ได้ กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความเท่ากันของมีขัณมีของระดับ a คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวน

2.9.3 การแยกย่อยของผลรวมของกำลังสอง

ปารเมศ (2545) กล่าวว่า คำว่า การวิเคราะห์ความแปรปรวน มาจากความหมายของการแบ่งความแปรปรวนทั้งหมดออกเป็นส่วนประกอบย่อยๆ จะได้ว่า Total Corrected Sum of Square คือ

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 \quad (2.7)$$

ใช้สำหรับวัดความแปรผันทั้งหมดของข้อมูล เป็นการเหมาะสมถ้าเราหาร SS_T ด้วยระดับขั้นความเสรีที่เหมาะสม (ในกรณีนี้ $an - 1 = N - 1$) เราจะได้ความแปรปรวนของตัวอย่าง y สังเกตว่า Total Corrected Sum of Square, SS_T สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n [(y_{ij} - \bar{y}_{i.}) + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})]^2 \quad (2.8)$$

หรือ

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 + 2 \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) (y_{ij} - \bar{y}_{i.}) \quad (2.9)$$

อย่างไรก็ตาม พจน์ของผลคูณไขว้ในสมการ (2.9) มีค่าเป็น 0 เพราะว่า

$$\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.}) = y_{i.} - n\bar{y}_{i.} = y_{i.} - n\left(\frac{y_{i.}}{n}\right) = 0 \quad (2.10)$$

ดังนั้น จะได้ว่า

$$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \quad (2.11)$$

สมการ (2.11) กล่าวว่า ความแปรปรวนทั้งหมดของข้อมูล ซึ่งวัดจาก Total Corrected Sum of Square สามารถแบ่งออกเป็น ส่วนของผลรวมกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม รวมกับผลรวมของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ค่าของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตเฉลี่ยของแต่ละระดับกับค่าเฉลี่ยรวม คือ ตัววัดความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของระดับ ในขณะที่ค่าความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตภายในระดับกับค่าเฉลี่ยของระดับคือ ความผิดพลาดสุ่ม (Random Error) ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการ (2.11) ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Treatment} + SS_E \quad (2.12)$$

ซึ่ง $SS_{Treatment}$ เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากระดับ (นั่นคือ ระหว่างระดับต่างๆ) และ SS_E เรียกว่า ผลรวมของกำลังสองที่เกิดเนื่องจากความผิดพลาด เนื่องจากมีค่าสังเกตทั้งหมด $an = N$ ค่า ดังนั้น SS_T จะมี $N - 1$ ระดับขั้นความเสรี ปัจจัยที่กำลังพิจารณาอยู่จะมี a ระดับ (และมีซ้ำของระดับจะมี a ค่า) ดังนั้น $SS_{Treatment}$ มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $a - 1$ และภายในทุกๆ ระดับจะมี n เพลทเคต ทำให้มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $n - 1$ สำหรับประมาณความผิดพลาดในการทดลอง ดังนั้นถ้าปัจจัยมี a ระดับ เราจะมี $a(n - 1) = an - a = N - a$ ระดับขั้นความเสรีสำหรับความผิดพลาด

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 = \sum_{i=1}^a \left[\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2 \right] \quad (2.13)$$

ในรูปแบบนี้ จะเป็นการง่ายที่พิจารณาพจน์ที่อยู่ในวงเล็บ ซึ่งถูกหารด้วย $n - 1$ ว่าเป็นความแปรปรวนของตัวอย่างในระดับที่ i

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n-1} \quad i = 1, 2, \dots, a \quad (2.14)$$

ตอนนี้ความแปรปรวนตัวอย่าง a ค่าอาจจะถูกรวมให้เป็นค่าประมาณหนึ่งค่าของความแปรปรวนร่วมของประชากร ซึ่งแสดงได้โดย

$$\begin{aligned} \frac{(n-1)S_1^2 + (n-1)S_2^2 + \dots + (n-1)S_a^2}{(n-1) + (n-1) + \dots + (n-1)} &= \frac{\sum_{i=1}^a \left[\sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \right]}{\sum_{i=1}^a (n-1)} \\ &= \frac{SS_E}{(N-a)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

ดังนั้น $\frac{SS_E}{(N-a)}$ คือค่าประมาณความแปรปรวนร่วมภายในระดับแต่ละระดับ ซึ่งมีทั้งหมด a ระดับ

ในทำนองเดียวกัน ถ้าหากไม่มีความแตกต่างระหว่างมัชฌิมของระดับทั้งหมด a ระดับ เราสามารถนำค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับกับค่าเฉลี่ยรวมเพื่อประมาณ σ^2 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

$$\frac{SS_{Treatments}}{a-1} = \frac{n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{a-1} \quad (2.16)$$

คือ ค่าประมาณของ σ^2 ถ้าหากมัชฌิมของระดับมีค่าเท่ากัน เหตุผลสำหรับอธิบายเป็นดังนี้คือ ค่า $\sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2 / (a-1)$ ประมาณ ค่าของ σ^2 / n ซึ่งหมายถึงความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของระดับ ดังนั้น $n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y})^2 / (a-1)$ จะเป็น ตัวประมาณของ σ^2 ถ้าหากไม่มีความแตกต่างในมัชฌิมของระดับ

เราพบว่าการวิเคราะห์เอกลักษณะณ์ความแปรปรวน (สมการ (2.11)) ทำให้ได้ค่าประมาณของ σ^2 2 ตัว ตัวหนึ่งเป็นความแปรผันภายในระดับ และอีกตัวหนึ่งอยู่ในความแปรผันระหว่างระดับ ถ้าหากไม่มีความแตกต่างในมัชฌิมของระดับ ค่าประมาณทั้ง 2 ค่า จะคล้ายคลึงกันมาก แต่หากว่าไม่เป็นเช่นนั้น ควรจะสงสัยว่า ความแตกต่างของค่าสังเกตต้องเกิดมาจากความแตกต่างของมัชฌิมของระดับ ถึงแม้ว่าค่ากล่าวนี้จะมาจากความรู้สึกเท่านั้น แต่ก็มียุทธวิธีการอย่างเป็นทางการที่สามารถนำมาใช้อธิบายได้เช่นกัน

เราเรียกจำนวน $MS_{Treatment} = SS_{Treatment} / (a-1)$ และ $MS_E = SS_E / (N-a)$ ว่า ค่ากำลังสองเฉลี่ย ตอนนี้เราจะมาพิจารณา ค่าคาดหวัง (Expected Value) ของค่ากำลังสองเฉลี่ยเหล่านี้ กล่าวคือ

$$E(MS_E) = \frac{1}{N-a} \left[N\mu^2 + n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 + N\sigma^2 - N\mu^2 - n \sum_{i=1}^a \tau_i^2 - a\sigma^2 \right] \quad (2.17)$$

หรือ

$$E(MS_E) = \sigma^2 \quad (2.18)$$

และในทำนองเดียวกัน

$$E(MS_{Treatment}) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \quad (2.19)$$

ดังนั้นเราสามารถกล่าวได้ว่า $MS_E = SS_E / (N-a)$ เป็นตัวประมาณของ σ^2 และถ้าหากไม่มีความแตกต่างของมัชฌิมของระดับ (ซึ่งหมายความว่า $\tau_i = 0$ $MS_{Treatment} = SS_{Treatment} / (a-1)$ จะเป็นตัวประมาณของ σ^2 เช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม สังเกตว่าถ้าหากมัชฌิมของระดับแตกต่างกัน ค่าคาดหวังของมัชฌิมของระดับยกกำลังสองจะมากกว่า σ^2 การทดสอบสมมติฐานซึ่งไม่มีความแตกต่างของมัชฌิมของระดับ สามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบ $MS_{Treatment}$ และ MS_E

2.9.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ปารเมศ (2545) ได้กล่าวถึง การทดสอบสมมติฐานอย่างเป็นทางการในกรณีที่ไม่มี ความแตกต่างในมัชฌิมของระดับ ($H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$ หรือ $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$) จะทำได้อย่างไร เนื่องจากเราต้องสมมติให้ ϵ_{ij} มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระต่อกัน มีมัชฌิม = 0 และค่าความแปรปรวน = σ^2 ค่าสังเกต y_{ij} มีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระ มีมัชฌิม = $\mu + \tau_i$ และความแปรปรวน σ^2 ดังนั้น SS_T คือ ผลรวมของกำลังสองของตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงแบบปกติ ดังนั้นเราสามารถแสดงได้ว่า SS_T / σ^2 จะมีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี $N-1$ ระดับขั้นความเสรี ยิ่งกว่านั้นเราสามารถแสดงได้ว่า SS_E / σ^2 มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี $N-a$ ระดับขั้นความเสรี และ $SS_{Treatment}$ มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่มี $a-1$ ระดับขั้นความเสรี ถ้าสมมติฐานหลัก $H_0: \tau_i = 0$ เป็นจริง อย่างไรก็ตาม ค่าผลรวมของกำลังสองทั้ง 3 ไม่ได้เป็นอิสระต่อกัน เพราะ SS_E และ $SS_{Treatment}$ รวมกันเป็น SS_T ทฤษฎีที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้มีประโยชน์ในการสร้างความเป็นอิสระให้แก่ SS_E และ $SS_{Treatment}$

2.9.4.1 ทฤษฎีของ Cochran

ให้ Z_i เป็น NID (0,1) สำหรับ $i = 1, 2, \dots, V$ และ $\sum_{i=1}^s Z_i^2 = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_s$ ซึ่ง $s \leq V$ และ Q_i มี V_i ระดับขั้นความเสรี ($i = 1, 2, \dots, s$) ดังนั้น Q_1, Q_2, \dots, Q_s เป็นการแจกแจง Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ด้วยค่า V_1, V_2, \dots, V_s ระดับขั้นความเสรีตามลำดับ ก็ต่อเมื่อ $V = V_1 + V_2 + \dots + V_s$ เพราะระดับขั้นความเสรีของ $SS_{Treatment}$ และ SS_E รวมกันเท่ากับ $N-1$ ซึ่งเป็นระดับขั้นความเสรีรวมทั้งหมด ทฤษฎีของ

Cochran บอกเป็นนัยว่า $SS_{\text{Treatment}}/\sigma^2$ และ SS_E/σ^2 เป็นตัวแปรอิสระที่มีการแจกแจงแบบ Chi-Square ที่เป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น ถ้าหากสมมติฐานหลักคือ ไม่มีความแตกต่างของมัชฌิมของระดับเป็นจริง ดังนั้น อัตราส่วน

$$F_0 = \frac{SS_{\text{Treatments}}/(a-1)}{SS_E/(N-a)} = \frac{MS_{\text{Treatments}}}{MS_E} \quad (2.20)$$

จะมีการแจกแจงแบบ F ด้วยระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $a-1$ และ $N-a$ สมการ (2.20) คือ สถิติทดสอบสำหรับสมมติฐานที่ว่าไม่มีความแตกต่างของมัชฌิมของระดับ

จากค่าคาดหวังกำลังสองเฉลี่ยเราพบว่า โดยทั่วไป MS_E จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 ภายใต้สมมติฐานหลัก $MS_{\text{Treatment}}$ จะเป็นค่าประมาณที่ไม่ลำเอียงของ σ^2 เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ถ้าสมมติฐานหลักเป็นเท็จ ค่าคาดหวังของ $MS_{\text{Treatment}}$ จะมากกว่า σ^2 ดังนั้นภายใต้สมมติฐานรอง ค่าคาดหวังของตัวตั้งของสถิติทดสอบ (สมการ (2-25)) จะมากกว่าค่าคาดหวังของตัวหาร และเราจะปฏิเสธ H_0 ถ้าค่าของสถิติทดสอบมีค่าที่มาก หรือค่าดังกล่าวตกอยู่ในบริเวณวิกฤตซึ่งหมายถึงพื้นที่ด้านขวาของค่าวิกฤต ($F_{\alpha, a-1, N-a}$) ดังนั้นเราจะปฏิเสธ H_0 และสรุปว่า มีความแตกต่างระหว่างมัชฌิมของระดับถ้า

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (2.21)$$

ซึ่ง F_0 คำนวณได้จากสมการ (2.20) หรือโดยการใช้ P-Value ในการตัดสินใจก็ได้สูตรสำหรับคำนวณผลรวมของกำลังสอง สามารถหาได้จากการเขียนและลดรูปของ $MS_{\text{Treatment}}$ และ SS_T ในสมการ (2.11) ให้ง่ายขึ้น ซึ่งจะได้ว่า

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n \left(y_{ij}^2 - \frac{y_{i.}^2}{N} \right) \quad (2.22)$$

และ

$$SS_{\text{Treatment}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_{i.}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \quad (2.23)$$

ค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสอง สามารถหาค่าได้จากการลบ กล่าวคือ

$$SS_E = SS_T - SS_{\text{Treatment}} \quad (2.24)$$

ขั้นตอนการทดสอบได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 2.6 ซึ่งเรียกว่า ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance Table)

ตารางที่ 2.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับปัจจัยเดียวแบบจำลองผลกระทบคงที่
(ปารเมศ, 2545)

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
Between treatments	$SS_{Treatment}$	$a - 1$	$MS_{treatments}$	$F_0 = \frac{MS_{treatments}}{MS_E}$
Error (within treatments)	SS_E	$N - a$	MS_E	
Total	SS_T	$N - 1$		

2.10 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

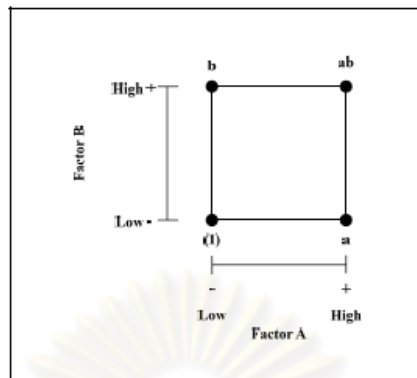
ปารเมศ (2545) กล่าวไว้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้นกรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้จะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เวิร์ลเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลดังนั้นก็ไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบ 2^k จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการทดลองแบบ 2^k ประกอบด้วย 2 ระดับ เราขอสมมติว่าผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเมื่อเราเพิ่งเริ่มต้นทำการศึกษาระบบ

2.10.1 การออกแบบ 2^k

การออกแบบ 2^k ชนิดแรกที่จะกล่าวถึง คือ การออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบนี้แสดงในรูปของกราฟดังรูปที่ 2.6 ตามปกติแล้วเราจะแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย

A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับ ต่ำ และ สูง จะแทนด้วยเครื่องหมาย + และ - บนแกน A และ B ตามลำดับ



รูปที่ 2.6 การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2^2 (ปารเมศ, 2545)

การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 สำหรับการออกแบบนี้จะแทนด้วยตัวอักษรเล็ก (รูปที่ 2.6) จะเห็นได้ว่าสำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆ จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้นสำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้นสำหรับการออกแบบ 2^k ในที่นี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ, b แทน A ที่ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ab แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1) แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

สำหรับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ระดับ กำหนดว่าผลเฉลี่ยของปัจจัยหนึ่ง คือความเปลี่ยนแปลงของผลตอบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ที่ถูกนำมาเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยอื่น สัญลักษณ์ (1), a, b และ ab แทนผลรวมของ n เวกติเคตของการทดลองร่วมปัจจัยนั้นๆ ผลของ A ที่ระดับต่ำของ B คือ $[a - (1)]/n$ และผลของ A ที่ระดับสูงของ B คือ $[ab - b]/n$ นำค่าทั้งคู่นี้มาเฉลี่ยจะได้ผลหลักของปัจจัย A คือ

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2n} \{[ab - b] - [a - (1)]\} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \end{aligned} \quad (2.25)$$

ค่าเฉลี่ยของผลหลักของปัจจัย B หาได้จากผลของ B ที่ A ระดับต่ำ คือ $[b - (1)]/n$ และที่ A ระดับสูง คือ $[ab - a]/n$ ซึ่งเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned}
 B &= \frac{1}{2n} \{ [ab - a] + [b - (1)] \} \\
 &= \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)]
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

ผลของอันตรกิริยาของ AB คือ ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของ A ที่ B ระดับสูง กับผลของ A ที่ B ระดับต่ำ ซึ่งก็คือ

$$\begin{aligned}
 AB &= \frac{1}{2n} \{ [ab - b] - [a - (1)] \} \\
 &= \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b]
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

ในทางกลับกัน เราอาจจะหาค่าของ AB ได้จากค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างผลของ B ที่ A ระดับสูง กับผลของ B ที่ A ระดับต่ำ ซึ่งจะให้ผลออกมาเช่นเดียวกับสมการ (2.27) สมการของผลของ A, B และ AB อาจจะได้โดยวิธีอื่นอีก เช่น ผลของ A สามารถหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบ ของ การทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองบนด้านขวามือของรูปที่เหลี่ยมจัตุรัสในรูปที่ 2.6 (เรียกว่า y^{A+} เนื่องจากมันคือค่าเฉลี่ยของผลตอบของการทดลองร่วมปัจจัยที่ A มีค่าสูง) กับการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองที่อยู่ ทางด้านซ้ายมือ (เรียกว่า y^{A-}) นั่นคือ

$$\begin{aligned}
 A &= \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} \\
 &= \frac{ab + a}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} \\
 &= \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)]
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

ซึ่งผลที่ได้จะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากสมการ (2.25) ทุกประการ ผลของ B ดังแสดงในสมการ (2.26) ก็สามารถหาได้จากผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองบนด้านบนของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (เรียกว่า y^{B+}) กับค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสองที่อยู่ด้านล่าง (เรียกว่า y^{B-}) นั่นคือ

$$\begin{aligned}
 B &= \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} \\
 &= \frac{ab + b}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} \\
 &= \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)]
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

สุดท้าย ผลของอันตรกิริยาของ AB หาได้จากค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยจากขวาไปซ้ายตามแนวเส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (ab และ (1)) ลบด้วยค่าเฉลี่ยของการทดลองร่วมปัจจัยจากซ้ายไปขวาตามแนวเส้นทแยงมุมของรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส (a และ b) หรือ

$$\begin{aligned} AB &= \frac{ab + (1)}{2n} - \frac{a + b}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \end{aligned} \quad (2.30)$$

ซึ่งค่าที่ได้มีค่าเดียวกันกับสมการ (2.27) ทุกประการในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ 2^k เราจะต้องตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของปัจจัยที่มีผลเพื่อที่จะหาว่า ตัวแปรตัวใดที่น่าจะเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลขึ้น และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาเป็นตัวยืนยันข้อสรุปนั้นพิจารณาผลรวมของกำลังสองของ A, B และ AB กำหนดให้ว่าคอนแทรกต์ที่จะใช้ในการประมาณผลของ A คือ

$$Contrast_A = ab + a - b - (1) \quad (2.31)$$

เราจะเรียกคอนแทรกต์นี้ว่า ผลทั้งหมด (Total Effect) ของ A จากสมการ (2.26) และ (2.27) เราพบว่าคอนแทรกต์นี้ยังสามารถใช้ในการประมาณผลของ B และ AB ได้อีกด้วย ยิ่งกว่านั้นคอนแทรกต์เหล่านี้ยังมีรูปแบบในเชิงตั้งฉาก (Orthogonal) และผลรวมของกำลังสองของคอนแทรกต์ใดๆ จะหาได้จากคอนแทรกต์ยกกำลังสองหารด้วยผลคูณของจำนวนของข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในคอนแทรกต์นั้น กับผลรวมกำลังสองของสัมประสิทธิ์ของคอนแทรกต์ ดังนั้นผลรวมของกำลังสองของ A, B, และ AB สามารถเขียนได้ดังนี้

$$SS_A = \frac{[ab + a - b - (1)]^2}{4n} \quad (2.32)$$

$$SS_B = \frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n} \quad (2.33)$$

$$SS_{AB} = \frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n} \quad (2.34)$$

และผลรวมทั้งหมดของกำลังสองสามารถหาได้จาก

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{4n} \quad (2.35)$$

2.10.2 วิธีการพื้นผิวผลตอบสนองเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของกระบวนการ

ปารเมศ (2545) ได้กล่าวว่า วิธีการพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์ และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบแทนที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ตัวและต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนองนี้ ตัวอย่างเช่น สมมุติว่ามีวิศวกรเคมีคนหนึ่งมีความต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะส่งผลให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับอุณหภูมิ และความดัน กล่าวคือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (2.36)$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดให้ $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของผิวพื้นที่ได้ดังนี้

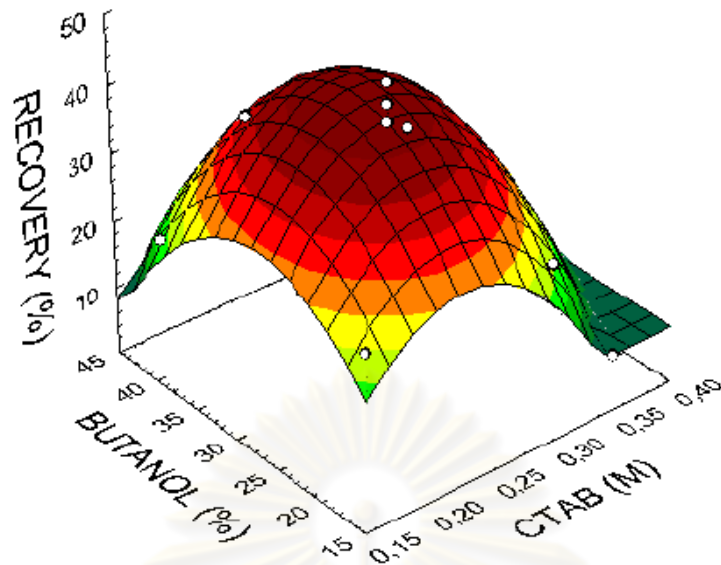
$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2.37)$$

ซึ่งเรียกว่าพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface) โดยมากแล้วจะทำการแสดงพื้นผิวผลตอบสนองในรูปของกราฟ (รูปที่ 2.7) โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อจะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่แล้วจะทำการพล็อต เป็นเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบสนอง (รูปที่ 2.8) ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบสนองที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่งในปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนมากจะไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนอง และตัวแปรอิสระดังนั้นขั้นตอนแรก คือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่กำลังต่ำๆ อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ประมาณความสัมพันธ์นี้คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง

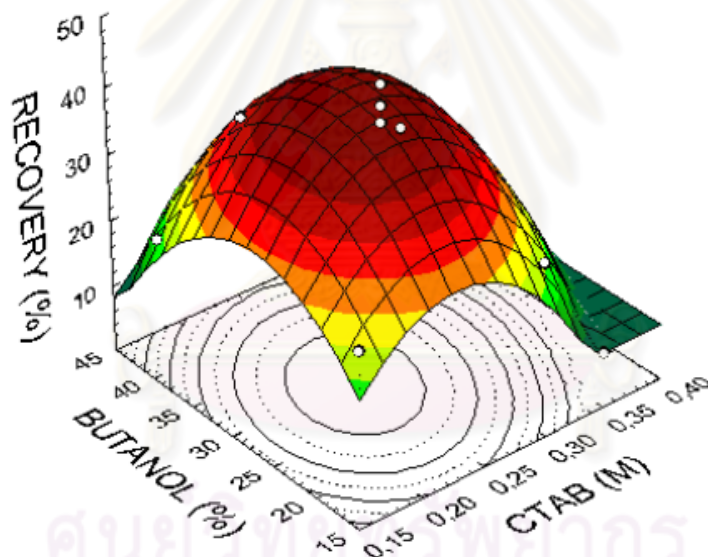
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.38)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องกับในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.7 ภาพพื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ

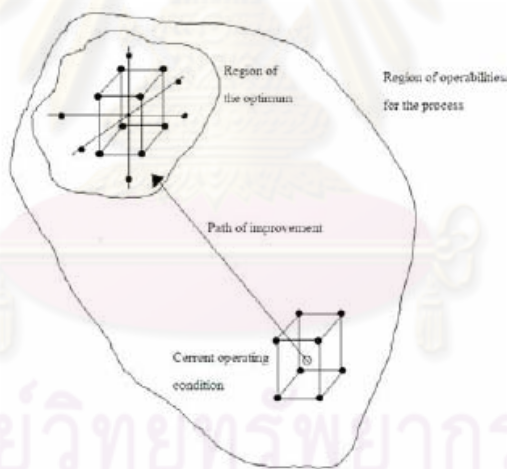


รูปที่ 2.8 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบสนอง

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบสนอง ส่วนใหญ่จะใช้แบบจำลอง 1 ใน 2 แบบที่กล่าวมาข้างต้น แน่แน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามดังกล่าวเหล่านี้ จะสามารถใช้ประมาณค่าความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของปัจจัยอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่สนใจมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้วแบบจำลองเหล่านี้ก็จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้น ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ฟังก์ชันผลตอบสนองได้เป็นอย่างดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้

จะสามารถประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริงพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองที่สามารถที่จะถูกประมาณค่าได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบโดยใช้พื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Design) การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เราอยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบสนองที่ห่างออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ณ เงื่อนไขการทำงานปัจจุบัน (รูปที่ 2.7) ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้ง และแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์ คือ การทำการทดลองไปตามทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะเป็นการค้นพบกับจุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อค้นพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่นแบบจำลองกำลังสอง เป็นต้น มาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะทำให้สามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากรูปที่ 2.9 จะพบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเปรียบเสมือนการปีนภูเขา ซึ่งยอดเขามักจะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด หรือกรณีถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าต่ำสุดในที่นี้อาจคิดเสมือนว่า กำลังเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุด



รูปที่ 2.9 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าผลตอบสนอง ส่วนใหญ่การจำลองกำลังสองมีรูปแบบดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon_i \quad (2.40)$$

จากตัวแบบข้างต้นผู้วิจัยสามารถสร้างแบบจำลองกำลังสอง เพื่อที่จะนำไปสู่การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองนี้ต้องมีระดับที่ 3 ของปัจจัย ซึ่งนอกจากอาศัยการออกแบบ 3^k Factorial Design แล้วยังมีการออกแบบเพื่อการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองอีกหลายชนิด เช่นการออกแบบส่วนประสมกลาง หรือ CCD การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design การออกแบบที่เรียกว่า Face-Centered Composite หรือ Face-Central Cube ซึ่งการออกแบบทดลองเหล่านี้จะทำให้สามารถลดเวลาค่าใช้จ่าย หรือลดการทดลองที่ไม่สามารถดำเนินการได้ เนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพของกระบวนการ แต่ยังคงสามารถวิเคราะห์ผลและสรุปได้ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบทางสถิติ

2.10.3 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model Adequacy Checking)

การทดสอบความถูกต้องของตัวแบบในการทดลองจะทดสอบถึงการกระจายของข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ตามสมมุติฐานหรือไม่ ทดสอบความอิสระของข้อมูล ทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

1. การตรวจสอบการกระจายว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่โดยใช้การทดสอบไคร้แคร์ (χ^2 - Goodness of Fit Test) การทดสอบแบบโคโกโมรอฟ-สเมียร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov Test) หรือการตรวจสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติการกระจายข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ หมายความว่า ข้อมูลแต่ละตัวเป็นตัวแทนสุ่มจะต้องมีแนวโน้มที่ค่าจะเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่งแล้วมีการกระจายรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตรหากข้อมูลไม่มีการแจกแจงแบบปกติแล้วทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้ จึงต้องค้นหาสาเหตุก่อนการวิเคราะห์

2. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล (Independent) จะตรวจสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจายของจุดที่แทนบนแผนภูมิ ว่ามีรูปแบบอิสระหรือไม่ ข้อมูลมีความอิสระหมายถึงข้อมูลแต่ละตัวที่ใช้ในการสร้างแบบการถดถอยจะต้องเป็นอิสระต่อกัน อันเนื่องมาจากการสุ่มทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลไม่มีการสุ่มแล้วจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ ค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหมายก็ไม่ได้เป็นตัวแทนของข้อมูล แสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีความเอนเอียง (Bias) จำเป็นต้องค้นหาสาเหตุการวิเคราะห์

3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) จะตรวจสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย ซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายความคลาดเคลื่อน (Residual Plot) ในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้าลักษณะการกระจายของข้อมูลไม่เป็นลักษณะที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน การที่ข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) หมายความว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นได้จากกระบวนการที่ได้มาตรฐานแล้ว ความแตกต่างของข้อมูลที่เกิดขึ้นมาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Chance Cause) ออกจากระบบ

การเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น หากข้อมูลไม่มีความเสถียรของความแปรปรวน แสดงว่าเกิดจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่มีการควบคุมต้องมีการค้นหาสาเหตุเพื่อแก้ไขก่อนทำการวิเคราะห์ผล

2.11 การวิเคราะห์คุณภาพของน้ำมัน (ปราโมทย์, 2537)

เป็นวิธีการวิเคราะห์หาคุณค่าของน้ำมันดิบอย่างละเอียด เพื่อหาค่าประกอบและสมบัติของส่วนต่างๆในน้ำมันดิบเริ่มต้นเพื่อหาปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สที่มีอยู่โดยวิธี Gas chromatography และนำน้ำมันมากลั่นแยกเป็นส่วนตามคาบจุดเดือด (Boiling range) อย่างละเอียดโดยแบ่งเป็นส่วนแคบๆ ชนิดและคาบจุดเดือดเพียง 5-10 องศาเซลเซียส แต่มีค่าใช้จ่ายที่แพงมากและใช้เวลานานจึงไม่นิยมทำกัน ปัจจุบันจึงใช้วิธีแยกน้ำมันดิบออกตามคาบและจุดเดือดกว้างๆให้พอดีกับที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูปกล่าวอย่างหยาบๆสามารถแบ่งได้เป็น

1. พวกที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่ IBP (Initial boiling point) จนถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่าส่วนของแก๊โซลีน (Gasoline fraction) มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน
2. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200-250 องศาเซลเซียส เรียกว่าส่วนของน้ำมันก๊าด (Kerosine fraction) มักใช้ในน้ำมันก๊าดที่ให้แสงสว่าง ถ้าจุดเกิดควันไม่ต่ำจนเกินไป น้ำมันก๊าดที่มีคุณภาพดี และมีจุดเยือกแข็งต่ำจะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับสมบัติอื่น ๆ ด้วย
3. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250-350 องศาเซลเซียส เราเรียกกันว่าส่วนของแก๊สออยล์ชนิดเบา (Light gas oil fraction) เหมาะในการนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์
4. พวกที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 350-370 องศาเซลเซียส เราเรียกว่าส่วนของแก๊สออยล์ (Gas oil fraction) เหมาะแก่การนำมาใช้เป็นน้ำมันเครื่องยนต์ดีเซล
5. พวกที่มีคาบจุดเดือดสูงกว่า 370 องศาเซลเซียส เรียกว่า กากน้ำมัน (residue) อาจนำไปใช้ได้หลายอย่างแล้วแต่สมบัติของกากน้ำมัน เช่น นำมาใช้เป็นน้ำมันเตาหรือนำไปผลิตเป็นยางมะตอย หรือนำมาผลิตเป็นน้ำมันเครื่อง

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Li H. และคณะ (2008) ศึกษาปริมาณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวและแก๊สที่ได้จากน้ำมันที่สกัดมาจากเมล็ดฝ้ายเปรียบเทียบกรณีที่ใส่และไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือ ซีโอไลต์ เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้จะเป็นแบบเบดนิ่ง ผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการทดลองโดยให้อุณหภูมิคงที่ที่ 450°C แล้วเปรียบเทียบปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวที่ได้ จะพบว่าการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาจะให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว (ปริมาณไบโอแก๊โซลีน ไบโอดีเซล แก๊สปิโตรเลียมเหลว) มากกว่าการแตกตัวด้วย

ความร้อน และการแตกตัวด้วยความร้อนจะให้ปริมาณของไบโอแก๊สที่มากกว่าการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา แสดงว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปมีผลทำให้ได้ปริมาณของเชื้อเพลิงเหลวในรูปของแก๊สที่มากขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิต่อชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ พบว่าในช่วงแรกของการแตกตัวนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบพวกโอเลฟิน แต่หลังจากนั้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ก็จะเป็นการเร่งให้สารประกอบดังกล่าวแตกตัวและมีการเกิดปฏิกิริยา Aromatization หรือ reforming กลายเป็นสารประกอบแอโรแมติก โดยที่การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นการช่วยให้เกิดปฏิกิริยา Aromatization หรือ reforming ได้สารประกอบแอโรแมติกมากขึ้น

Padmaja K.V. และคณะ (2008) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันดิบที่ได้มาจากต้นรักโดยมีการเปรียบเทียบระหว่างการแตกตัวด้วยความร้อนและการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบแบทช์ ในการทดลองการแตกตัวด้วยความร้อนพบว่าค่าร้อยละการเปลี่ยนของเชื้อเพลิงเหลวในปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยมีปริมาณของแก๊สที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งปริมาณของแก๊สที่เพิ่มขึ้นมีผลมาจากการแตกตัวของน้ำมันในช่วงที่จุดเดือดสูงกว่า ในการทดลองขั้นต่อไปจะเป็นการพิจารณาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยมีการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้กับสารป้อนเข้ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิว่ามีผลอย่างไรต่อร้อยละของการเปลี่ยนของเชื้อเพลิงเหลวที่ต้องการรวมทั้งแก๊สที่เกิดขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารป้อนเข้าจะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารป้อนเข้าจะทำให้สารป้อนเข้ามีเวลาสัมผัสกับตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้นจึงเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นได้เชื้อเพลิงเหลวที่มากขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้เกิดการแตกตัวที่มากขึ้นจึงทำให้ได้เชื้อเพลิงเหลวมากขึ้น

Zhang H. และคณะ (2008) ศึกษาการแตกตัวของซังข้าวโพดเปรียบเทียบระหว่างการแตกตัวด้วยความร้อนและการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา โดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นแบบเบดเคลื่อนที่ ทดลองการแตกตัวด้วยความร้อนเพื่อศึกษาว่าตัวแปรดังต่อไปนี้คือ อุณหภูมิ อัตราการป้อนก๊าซ ความสูงของเบดและขนาดของอนุภาค ตัวแปรใดมีผลต่อร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิในช่วงแรกก่อนถึง 550°C ปริมาณร้อยละผลได้ของของเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น แต่หลังจากอุณหภูมิ 550-700 °C กลับมีค่าที่ลดลง เนื่องมาจากในช่วงแรกที่อุณหภูมิไม่สูงมากการแตกตัวของซังข้าวโพดจะเป็นการแตกตัวของสารโมเลกุลขนาดใหญ่กลายเป็นของเหลวและก๊าซ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่สูงมากเกินไปจะทำให้การแตกตัวไปอยู่ในช่วงของก๊าซมากกว่าของเหลว รวมทั้งผลิตภัณฑ์ของเหลวเองก็เกิดการแตกตัวไปเป็นก๊าซด้วย จึงทำให้ปริมาณของของเหลวมีค่าลดลง กรณีของการเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซ ความสูงของเบดและขนาดของอนุภาคจะพบว่าไม่มีผลต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ ภาวะที่เหมาะสมสำหรับ

การแตกตัวด้วยความร้อนที่จะทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวมากที่สุดคือ อุณหภูมิ 550 °C อัตราการป้อน 3.4 L/min ความสูงของเบด 10 cm ขนาดอนุภาค 1-2 mm และการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้เกิดปฏิกิริยา deoxygenated ซึ่งจะกำจัดออกซิเจนโมเลกุลให้อยู่ในรูปของ CO และ CO₂ จึงทำให้ร้อยละผลได้น้ำมันลดลง แต่ปริมาณก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจะพบว่าการใช้ HZSM-5 มีผลทำให้ได้สารประกอบ แอโรแมติกเพิ่มสูงขึ้นมากและลดองค์ประกอบของสารอื่นๆ

Tamunaidu P. และคณะ (2007) ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มของน้ำมันปาล์ม โดยมีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษาคือ REY ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ (400-500 °C) อัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์ม (5-10) และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (10-30 นาที) จากการคำนวณทางสถิติที่ร้อยละความชื้นเท่ากับ 95 โดยพิจารณาค่าตอบสนอง 4 ค่า คือ ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลว อัตราส่วนของแก๊สและร้อยละผลได้น้ำมัน โดยกำหนดให้ค่าแก๊สที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยที่สุดคืออยู่ในช่วง 10-30 wt% อีก 3 ค่าตอบสนองที่เหลือกำหนดให้เกิดขึ้นปริมาณมากที่สุด ได้แก่ 55-95 wt% 50-80 wt% และ 30-50 wt% ตามลำดับ จะพบว่าภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 20 นาที และอัตราส่วนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับน้ำมันปาล์มเท่ากับ 5 กรัมต่อกรัม จะทำให้ได้ร้อยละการเปลี่ยนเท่ากับ 75.8 ร้อยละผลิตภัณฑ์ของเหลวเท่ากับ 53.5 อัตราส่วนของแก๊สเท่ากับ 33.5 และร้อยละผลได้น้ำมันเท่ากับ 14.2

บุญชัย อารยะสนองกุล (2550) ศึกษาตัวแปรของเครื่องปั๊มแม่เหล็กสูงที่จะทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุด โดยได้ประยุกต์การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับปัจจัยซึ่งมีตัวแปรทั้งสิ้น 6 ตัว กรองปัจจัยโดยใช้ Model Screening Analysis และได้สมการถดถอยเป็น $Y = 7.484 - 1.984 A - 6.109E + 2.047AE$ จากรูปแบบสมการพบว่ามีความสัมพันธ์ของ 2 ตัวแปรกับการเกิดของเสีย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นโดยค่าความสูงใบมีด (Dept of cut 1) และ Speed 2 มีอิทธิพลทำให้การเกิดจำนวนของเสียแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $\alpha = 0.05$ ส่วน ความเร็วส่ง (Speed 1), Inverter 1 ความสูงใบมีด (Dept of cut 2) และ Inverter 2 ไม่มีนัยสำคัญต่อการเกิดของเสีย ซึ่งสภาวะเหมาะสมที่ทำให้เกิดของเสีย (Y) น้อยที่สุดคือความสูงใบมีด (Dept of cut 1) ที่ 1002 mm และความเร็วส่ง (Speed 2) ที่ 35 M. /Min. เมื่อนำผลจากการวิจัยมาใช้ในกระบวนการทำงานจริงพบว่า จำนวนของเสียลดลงอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิมเฉลี่ย 4.18 เหลือเพียง 3.381 % ถ้าของเสียที่เกิดขึ้นก่อนการปรับปรุงเท่ากับ 4,428,917 ชิ้น และของเสียที่เกิดหลังการปรับปรุงเท่ากับ 3,582,390 ชิ้น ดังนั้นคาดว่าสามารถลดของเสียภายในครึ่งปีหลังคิดเป็นเงินทั้งสิ้น 1,693,054 บาท

มารีนา มงคล (2546) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ตัวแปรที่ใช้ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 400-430 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 45-60 นาที และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งมีตัวแปรคือ น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5-2.0 กรัม ภายใต้ความดันบรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-30 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 น้ำหนัก 0.05-2.0 กรัม ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10-20 บาร์ ได้ดำเนินการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาทั้งในเชิงปริมาณเพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน และเชิงคุณภาพโดยวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือดต่างๆ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Simulation Distillation Gas Chromatography) ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ที่ให้แนวโน้มการกระจายตัวผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม โดยภาวะข้างต้นได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 79.74 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 17.78 และร้อยละผลได้ของแข็ง 2.48 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณร้อยละผลได้ของเนฟทา 28.14 เคโรซีน 16.56 แก๊ส ออยล์เบา 21.86 แก๊สออยล์ 3.26 และกากน้ำมันหนัก 9.91 โดยน้ำหนัก และภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของน้ำมันพีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ให้แนวโน้มการกระจายตัวผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุดคือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.05 กรัม โดยภาวะข้างต้นได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 83.60 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 15.30 และร้อยละผลได้ของแข็ง 1.10 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณร้อยละผลได้ของเนฟทา 26.75 เคโรซีน 13.79 แก๊ส ออยล์เบา 22.99 แก๊สออยล์ 3.76 และกากน้ำมันหนัก 16.30 โดยน้ำหนัก

วิษชากร จารุศิริ (2544) ศึกษาการสังเคราะห์ของเหลวจากพอลิพรอพิลีนและแอนทราไซต์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ในเครื่องปฏิกรณ์เล็ก เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์และองค์ประกอบของเหลวที่ดีที่สุด ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยสัดส่วนระหว่างพอลิพรอพิลีนต่อแอนทราไซต์ตั้งแต่ 1.0 ต่อ 0 ถึง 0 ต่อ 1.0 น้ำหนักรวม 20 กรัม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 380-430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 30-60 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-75 นาที และเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 1 ถึง 10 % จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการทดลองโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC Simulation Distillation) พบว่าภาวะที่ส่งผลต่อการเกิดปริมาณเนฟทาได้มากที่สุดคือ อัตราส่วนของพอลิพรอพิลีนต่อแอนทราไซต์เป็น 0.8 ต่อ 0.2 น้ำหนักรวม 20 กรัม อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 40 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1% เหล็กบนถ่านกัมมันต์ ได้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์

น้ำมัน 53.45 ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณร้อยละของเนฟทา 32.07 เคโรซีน 7.48 น้ำมันก๊าด 8.82 และ โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 5.08



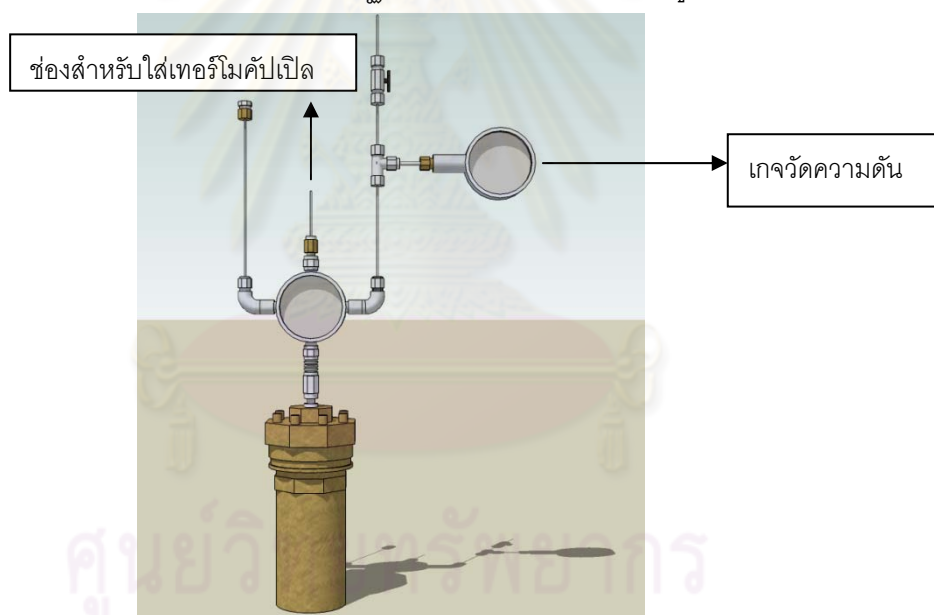
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวโดยการแตกตัวของน้ำมันสบู่น้ำมันตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้เพื่อหาภาวะการทดลองที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave รูปทรงกระบอก ปริมาตร 250 มิลลิลิตรทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลส มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส และวาล์วนิรภัย สามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคาล มีช่องสำหรับเทอร์โมคัปเปิลเปิดทางด้านบนสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง และ เกจสำหรับวัดความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์ด้านขวามือ แสดงดังรูป 3.1



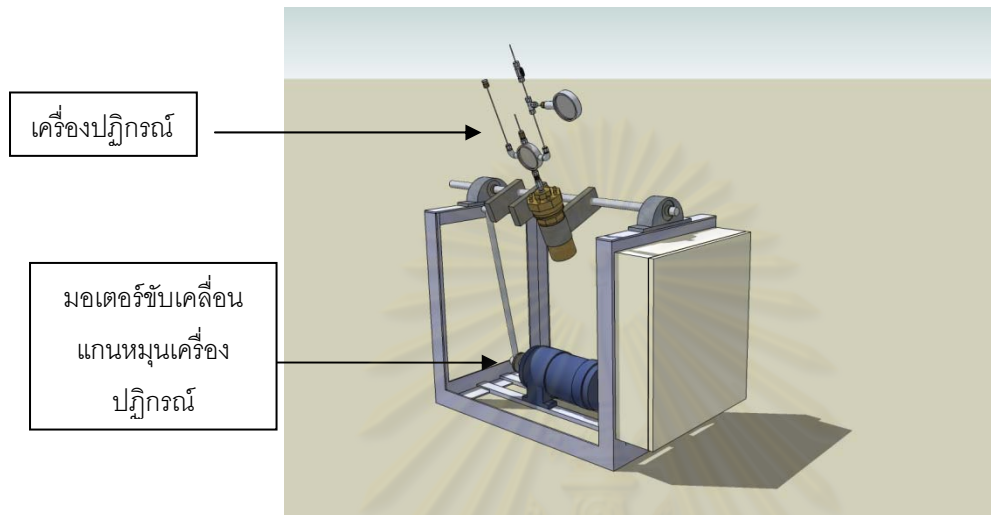
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave ขนาด 250 มิลลิเมตร

3.1.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Temperature controller) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดความร้อนและตัวจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส

3.1.3 ขดลวดความร้อนแบบ Injection แรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 400 วัตต์

3.1.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) สำหรับตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นแบบเค (K-type) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร

3.1.5 ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนกำลังขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็วดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัลและเครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave

3.1.6 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว แสดงดังรูป 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ

3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งได้ละเอียดตศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งได้ละเอียดตศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.9 นาฬิกาจับเวลา

3.1.10 ตู้อบ

3.1.11 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 พร้อมเครื่องตรวจวิเคราะห์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดง ดังรูป 3.4



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น
(Simulated Distillation Gas Chromatograph: Varian CP-3800)

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 น้ำมันสนุดำ ที่ได้จาก โรงงานน้ำมันสนุดำไทย จังหวัดปทุมธานีทำการเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 15 พฤศจิกายน 2551 บรรจุในภาชนะที่บแสงเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์ มีสมบัติทางกายภาพและชนิดของกรดไขมันแสดงดังตารางที่ 4.1 และ 4.2

3.2.2 แก๊สไฮโดรเจน 99.99 % บรรจุในถังเก็บแบบ high pressure ขนาด 6 ลูกบาศก์เมตร จาก บริษัท TIG Trading

3.2.3 โทลูอีน 99% จาก Fisher Chemicals

3.2.4 HZSM-5 จากประเทศญี่ปุ่นนำเข้าเมื่อปี 2548 บรรจุในภาชนะที่บดแสงเพื่อป้องกันการออกซิไดซ์

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสบู่ดำก่อนการทดลองโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีรุ่น GC2010 และเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 และทำการวัดปริมาณกรดไขมัน

3.3.2 ออกแบบการทดลองแปดทอเรียลสองระดับแบบส่วนประสมกลางเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำ โดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีค่าต่ำสุดและสูงสุดแสดงดังตารางที่ 3.2 วิเคราะห์ผลการทดลองจากค่าปริมาณของเหลวที่ได้และผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ด้วยวิธีการตาม ASTM D2887 เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light gas oil) แก๊สออยล์ (Gas oil) และกากน้ำมันหนัก (Long residue) โดยใช้โปรแกรม Design expert เวอร์ชัน 6.0.10 เพื่อให้ได้แบบจำลองสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษานบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ตัวแปร	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส),A	390	440
เวลา (นาที),B	30	60
ร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์),C	2.5	10

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแปดทอเรียลสองระดับแบบส่วนประสมกลาง

Temperature (°C)	time (min)	weight catalyst (%)	Treatment combination		
390	30	2.5	-	-	-
440	30	2.5	+	-	-
390	60	2.5	-	+	-
440	60	2.5	+	+	-

ตารางที่ 3.2(ต่อ) จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับ
แบบส่วนประสมกลาง

Temperature (°C)	time (min)	weight catalyst (%)	Treatment combination		
390	30	2.5	-	-	+
440	30	2.5	+	-	+
390	60	10	-	+	+
440	60	10	+	+	+
415	45	6.25	0	0	0
457	45	6.25	+ α	0	0
373	45	6.25	- α	0	0
415	70.2	6.25	0	+ α	0
415	19.8	6.25	0	- α	0
415	45	2.51	0	0	+ α
415	45	0	0	0	- α

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 วิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำมันสนู้ด้าด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph

3.4.2 ชั่งน้ำหนักน้ำมันสนู้ด้า 20 กรัมพร้อมกับเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง และ ชั่ง HZSM-5 ปริมาณที่ต้องการด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง

3.4.3 ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ชั่งได้ตามที่ต้องการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ แล้วประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังรูป 3.1

3.4.4 นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่ต้องการ ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สด้วยน้ำสบู่ตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์

3.4.5 นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิล และอุปกรณ์ขดลวดความร้อน จากนั้นหุ้มด้วยฉนวน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง

3.4.6 ทดลองตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้วนำฉนวนและขวดวัดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง

3.4.7 แยกผลิตภัณฑ์น้ำมันออกจากกากของแข็งด้วยการกรองแบบสุญญากาศ

3.4.8 นำผลิตภัณฑ์น้ำมันและกากของแข็งที่ได้ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งละเอียดตศนิยม 4 ตำแหน่ง.

3.4.9 นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ และวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหลวที่เกิดขึ้น

3.4.10 คำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว แนฟทา ดีเซล ร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละผลได้ของแก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงเหลวที่ได้} \times 100}{\text{น้ำหนักสบูดำเริ่มต้น}}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแนฟทา (\% Overall naphtha yield)} = \% \text{ของแนฟทาที่ได้} \times \% \text{ของแกโซลีน}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์ (\% Overall gas oil yield)} = \% \text{ของแนฟทาที่ได้} \times \% \text{ของแก}$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยน (\% conversion)} = \frac{(\text{น้ำหนักสบูดำเริ่มต้น} - \text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้น}) \times 100}{\text{น้ำหนักสบูดำเริ่มต้น}}$$

$$\text{ร้อยละผลได้ของแก๊ส (\% Overall gas yield)} = \frac{\text{น้ำหนักแก๊สที่ได้} \times 100}{\text{น้ำหนักน้ำมันสบูดำเริ่มต้น}}$$

3.4.11 นำผลของผลิตภัณฑ์น้ำมันและผลของแกโซลีนที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์หาภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ผลได้ของแกโซลีนมากที่สุดด้วยโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 15 ร่วมกับโปรแกรม Design expert เวอร์ชัน 6.0.10

3.4.12 เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมด้วยโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 15 นำภาวะดังกล่าวไปทำการทดลองอีกครั้งเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจากการคำนวณ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันสนูปด้าเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง ซึ่งดำเนินการออกแบบการทดลอง แฟคทอเรียลสองระดับแบบส่วนประสมกลาง (2^k factorial central composite design) เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง ซึ่งได้แก่ ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของแนฟทา ร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์ ร้อยละผลได้ของแก๊ส มีการศึกษาที่ช่วงอุณหภูมิ 390-440 °C เลือกทำการศึกษาที่ช่วงอุณหภูมินี้เนื่องจากน้ำมันสนูปด้าเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำกว่า 390 °C ลักษณะของน้ำมันหลังจากการแตกตัวจะมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลและมีสีเหลืองปนอยู่แสดงว่า ความร้อนที่ต่ำกว่า 390 °C น้ำมันสนูปด้ายังแตกตัวไม่สมบูรณ์ที่อุณหภูมินี้และเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้สามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ไม่เกิน 440 °C และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาก็คือ 30-60 นาที และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5-10 wt% ก่อนทำการทดลองจะมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสนูปด้าโดยเทคนิค DGC วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันสนูปด้าเทียบกับ *Jatropha diesel* และวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมัน จากนั้นทำการทดลองตามการทดลองที่ออกแบบเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนอง ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของแนฟทา ร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์ มากที่สุด และร้อยละผลได้ของแก๊สน้อยที่สุด เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมทำการทดลองที่ภาวะดังกล่าวโดยไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปรียบเทียบค่าตัวแปรตอบสนองว่าผลแตกต่างกันอย่างไร

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันสนูปด้า

4.1.1 การวิเคราะห์น้ำมันสนูปด้าด้วยเทคนิค DGC

จากการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของน้ำมันสนูปด้าตามจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 จะแสดงผลดังนี้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำมันสบู่มาก่อนทำการทดลองจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคDGC

จุดเดือด(°C)	องค์ประกอบ	%
IBP-200	Naphtha(C ₅ -C ₁₂)	4.52
200-250	Kerosene(C ₁₂ -C ₁₅)	0.50
250-350	Light Gas oil(C ₁₅ -C ₂₅)	10.30
350-370	Gas oil(C ₂₅ -C ₃₃)	3.02
370-FBP	Long Residue(>C ₃₃)	81.66

จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าน้ำมันสบู่มาก่อนทำการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณของ long residue อยู่สูงที่สุดคือ 81.66 % มีปริมาณของ naphtha และ kerosene อยู่่น้อยมาก แสดงให้เห็นว่า น้ำมันสบู่มาก่อนประกอบไปด้วยสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีความยาวมากกว่า 33 เป็นองค์ประกอบ

4.1.2 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของน้ำมันสบู่มาก่อนที่ใช้ทำการทดลองเมื่อเทียบกับ Jatropha diesel

ผลการวิเคราะห์ทางกายภาพของน้ำมันสบู่มาก่อนที่ใช้ในการทดลองนี้กับ Jatropha diesel แสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพของน้ำมันสบู่มาก่อนทำการทดลองเทียบกับ Jatropha diesel (ที่มา: Deepak A. และคณะ)

Property	Fuel	
	Jatropha oil	Jatropha diesel
Density (kg/m ³)	900	917
API gravity	22	22.87
K °C	39.54	35.98
Cloud point (°C)	2	9
Pour point (°C)	-10	4
Frash point(°C)	280	229
Fire point (°C)	300	274
Calorific value (MJ/kg)	59	59.071

4.1.3 การวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมัน

ตารางที่ 4.3 ชนิดของกรดไขมันของน้ำมันสบู่ดำ
(ที่มา : สถาบันวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย)

องค์ประกอบของกรดไขมัน	กรัม/ 100 มิลลิลิตร
Palmetic acid (C16:0)	15.29
Palmitoleic acid (C16:1)	0.98
Heptadecanoic acid (C17:0)	0.13
Stearic acid (C18:0)	5.84
Cis-9-Octadecanoic acid (C18:1 n-9)	37.32
Cis-9,12-Octadecanoic acid (C18:2 n-6)	39.78
Cis-9,12,15-Octadecanoic acid (C18:3 n-3)	0.19
Arachidic acid (C20:0)	0.18
Behenic acid (C22:0)	0.04
Lignoceric acid (C24:0)	0.04

องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันสบู่ดำมากที่สุด 3 อันดับแรกคือ Cis-9,12-Octadecanoic acid (C18:2 n-6) ,Cis-9-Octadecanoic acid (C18:1 n-9) ,Palmetic acid (C16:0) ซึ่งมีองค์ประกอบเหมือนกับน้ำมันสบู่ดำที่ได้จากแหล่งอื่นๆ แสดงว่าวิธีการทดสอบและผลการทดลองน้ำมันสบู่ดำในห้องวิจัยสามารถปรับมาใช้ได้กับน้ำมันสบู่ดำที่มาจากแหล่งอื่นๆ

4.2 ผลการทดลองที่ได้จากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำ

ตารางที่ 4.4 ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

number	condition			% yield liquid	% conversion	% yield naphtha	% yield gas oil	% yield gas
	temp (°C)	time (min)	catalyst (g)					
1	390	30	0.5001	62.69	76.95	12.72	24.54	22.46
2	390	30	0.5000	69.42	76.78	13.06	31.23	16.13

ตารางที่ 4.4(ต่อ) ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

number	condition			% yield liquid	% conversion	% yield naphtha	% yield gas oil	% yield gas
	temp (°C)	time (min)	catalyst (g)					
3	440	30	0.5002	35.88	98.21	16.94	10.43	38.22
4	440	30	0.5001	32.23	97.92	14.06	10.30	46.12
5	390	60	0.4992	47.36	90.04	13.53	18.39	23.63
6	390	60	0.5006	61.47	84.18	15.74	25.30	25.09
7	440	60	0.4992	57.05	97.54	32.01	13.54	36.47
8	440	60	0.5005	63.24	96.91	33.69	15.87	33.20
9	390	30	2.0003	48.29	81.36	17.64	11.71	25.28
10	390	30	1.9966	61.08	87.07	27.55	15.66	26.87
11	440	30	2.0048	40.05	97.64	25.76	7.11	30.82
12	440	30	2.0094	50.34	97.21	32.50	8.96	34.09
13	390	60	2.0023	51.55	96.81	31.49	10.20	31.20
14	390	60	1.9990	48.76	96.74	29.12	10.02	37.82
15	440	60	2.0103	56.73	97.44	38.52	9.28	39.15
16	440	60	2.0086	45.70	98.54	31.86	6.99	48.32
17	440	60	2.0078	55.44	96.76	36.24	9.69	36.63
18	415	45	1.2572	61.12	96.46	38.37	11.59	31.02
19	415	45	1.2571	53.82	95.96	33.39	9.99	35.73
20	415	45	1.2504	60.60	95.64	37.31	11.54	25.86
21	415	45	1.2524	65.49	95.68	40.60	12.50	27.48
22	415	45	1.2494	58.27	95.05	34.87	11.47	31.06

ตารางที่ 4.4(ต่อ) ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา

number	condition			% yield liquid	% conversion	% yield naphtha	% yield gas oil	% yield gas
	temp (°C)	time (min)	catalyst (g)					
23	390	60	0.5083	68.22	92.19	29.56	21.99	24.19
24	390	30	2.0203	58.84	87.87	25.97	15.70	29.24
25	440	30	2.0019	51.19	96.18	31.07	10.49	39.86
26	390	60	2.0010	51.85	95.53	29.35	11.51	35.21
27	390	30	0.5001	71.55	87.22	24.24	27.82	18.95
28	457	45	1.2493	47.40	97.09	31.21	8.20	42.42
29	373	45	1.2552	69.52	83.74	30.97	17.54	20.34
30	415	45	2.5136	52.14	97.17	25.91	14.28	29.77
31	415	45	0	50.45	90.02	22.92	13.12	35.01
32	415	70.2	1.2517	49.64	97.24	25.97	13.72	35.50
33	415	19.8	1.2515	54.36	95.45	26.35	16.92	36.67

จากค่าตอบสนองที่ได้มาจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสุญุดำ จะทำการพิจารณาทั้งหมด 5 ค่าได้แก่ ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของแนฟทา ร้อยละผลได้ของดีเซล ร้อยละผลได้ของแก๊ส จากผลการทดลองที่แสดงดังตารางที่ 4.2 สามารถนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อรูปแบบของสมการถดถอย โดยในช่วงแรกจะวิเคราะห์ความแปรปรวนของพจน์ต่างๆ ในสมการถดถอยก่อน ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก (Main effect) อันตรกิริยาอันดับสอง (2-Way interaction) ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

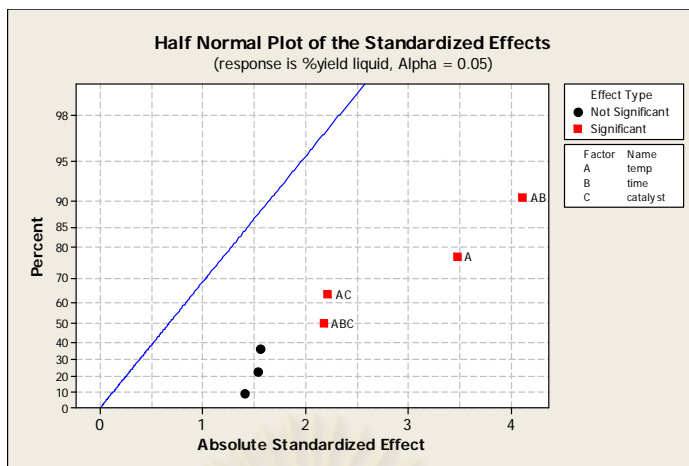
4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 fractional central composite factorial design

4.2.1.1 ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว

Source	Degree of freedom	Sum of square	Adjust sum of square	Adjust mean square	F value	P value
Main effect	3	628.5	729.9	243.29	5.91	0.005
2-way	3	863.7	949.5	316.49	7.68	0.001
Interactions						
3-way interaction	1	194.9	194.9	194.89	4.73	0.042
Residual Error	19	782.5	782.5	41.18		

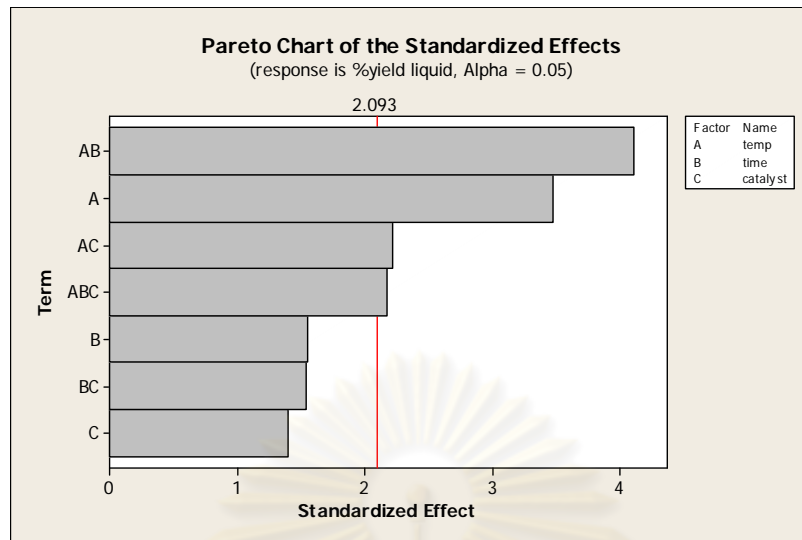
จากข้อมูลทีวิเคราะห์ได้โดยโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 15 ที่แสดงดังตารางที่ 4.5 จะพบว่าค่า P-value ของทั้งปัจจัยหลัก อันตรกิริยาสองปัจจัยและอันตรกิริยาแบบสามปัจจัยมีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าทั้งปัจจัยหลักและอันตรกิริยาของสองปัจจัยและสามปัจจัยมีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ค่า residual ที่ได้หลังจากคำนวณโดยมีปัจจัยตามที่กำหนดตามตารางแล้วพบว่ามีค่าน้อย แสดงว่าพจน์ที่มีอันตรกิริยาร่วมมากกว่าสองไม่มีนัยสำคัญ และจากตารางที่ 4.6 แสดงค่าความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Design expert เวอร์ชัน 6.0.10 โดยจะทำการศึกษาปัจจัยแบบกำลังสองร่วมด้วยจะพบว่า ปัจจัย A AB AC ABC เท่านั้นที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และเมื่อพิจารณาค่า Half Normal plot of standardized Effect ที่แสดงดังรูปที่ 4.1 ก็พบว่าปัจจัยที่มีแนวโน้มเบี่ยงเบนไปจากเส้นตรงเป็นปัจจัยเดียวกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งปัจจัยที่มีผลมากที่สุดเรียงตามลำดับเมื่อดูจากรูปที่ 4.2 ได้แก่ AB A AC ABC



รูปที่ 4.1 ค่า Half Normal plot of standardized Effect ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว

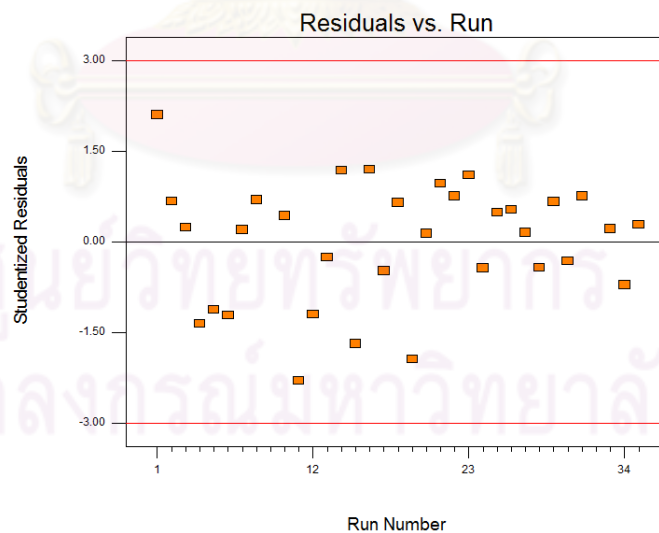
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	P Value
Model	2087.88	10	208.79	6.48	0.0001
A	772.36	1	772.36	23.98	< 0.0001
B	54.05	1	54.05	1.68	0.2086
C	45.88	1	45.88	1.42	0.2454
A ²	4.36	1	4.36	0.14	0.7165
B ²	117.02	1	117.02	3.63	0.0698
C ²	138.40	1	138.40	4.30	0.0501
AB	678.94	1	678.94	21.08	0.0001
AC	234.28	1	234.28	7.27	0.0132
BC	90.70	1	90.70	2.82	0.1075
ABC	184.77	1	184.77	5.74	0.0256
Residual	708.51	22	32.20		
Lack of Fit	91.86	4	22.96	0.67	0.6210
Pure Error	616.65	18	34.26		
Cor Total	2796.39	32			

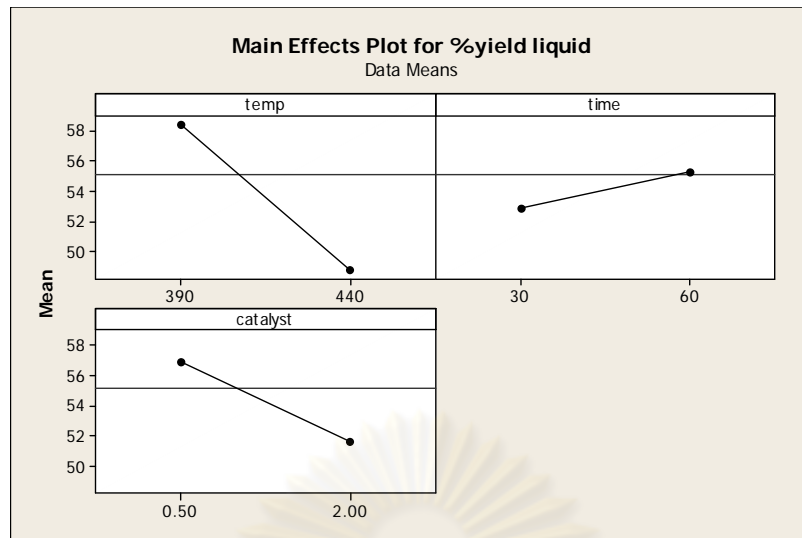


รูปที่ 4.2 แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัย
ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว

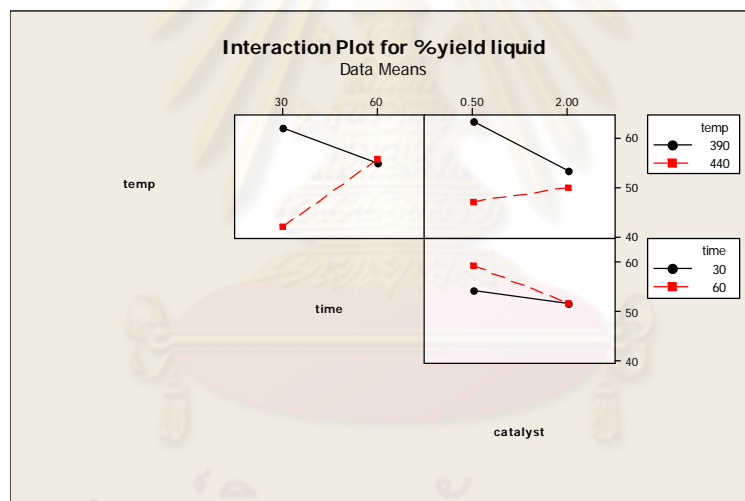
จากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ในรูปที่ 4.3 จะพบว่ามีการแปรปรวนไม่คงที่ แสดงว่าลำดับของการทดลองไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวสามารถทำการทดลองใดก่อนหลังก็ได้



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order)
ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว



รูปที่ 4.5 อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยว่าส่งผลอย่างไรต่อ ค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว จากรูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของปัจจัยหลักพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีแนวโน้มลดลง แต่การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มการลดลงของร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวจะเด่นชัดกว่าปัจจัยหลักที่เหลือ สามารถอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิ 390 °C อุณหภูมิยังไม่มีผลเพียงพอที่จะทำให้ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน

ขนาดกลางและขนาดเล็ก แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่จะสามารถแตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดกลางและขนาดเล็กได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวมีค่าลดลง การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กมีเวลาในการเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันกลายเป็นสายโซ่ขนาดใหญ่ได้จึงทำให้มีค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมากขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดอยู่ในช่วงของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กมากขึ้น ร้อยละโดยน้ำหนักของเชื้อเพลิงเหลวจึงมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราการไหลของปฏิกิริยาของปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาในรูปที่ 4.4 จะพบว่าที่อุณหภูมิ 390 °C การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากที่อุณหภูมิ 390 °C ยังมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดกลางและขนาดเล็ก การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะช่วยทำให้ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวสามารถแตกตัวได้ดีขึ้น กลายเป็นสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็ก นอกจากนี้สายโซ่ขนาดกลางที่แตกตัวโดยผลของอุณหภูมิเมื่อได้รับอิทธิพลของเวลาก็จะแตกตัวกลายเป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่เล็ก จึงทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวลดลง แต่ที่อุณหภูมิ 440 °C การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิ 440 °C ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวสามารถแตกตัวเป็นสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็กได้เป็นส่วนใหญ่การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็กกลับมาเป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว จึงทำให้ค่าร้อยละของเชื้อเพลิงเหลวลดลงจากช่วงแรก อัตราการไหลของอุณหภูมิและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีแนวโน้มที่คล้ายกันคือ ที่อุณหภูมิ 390 °C การเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีค่าลดลง เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีคุณสมบัติยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กผ่านเข้าไปใน pore size การเพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีค่าลดลง แต่ที่อุณหภูมิ 440 °C เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง ปริมาณไฮโดรคาร์บอนสายโซ่เล็กจึงลดลงทำให้ค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาอัตราการไหลระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบว่าทั้งเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 และ 60 นาทีการเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม)จะมีผลทำให้ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวมีแนวโน้มที่ลดลงแต่ลดลงอย่างไม่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวน้อยกว่าอุณหภูมิ

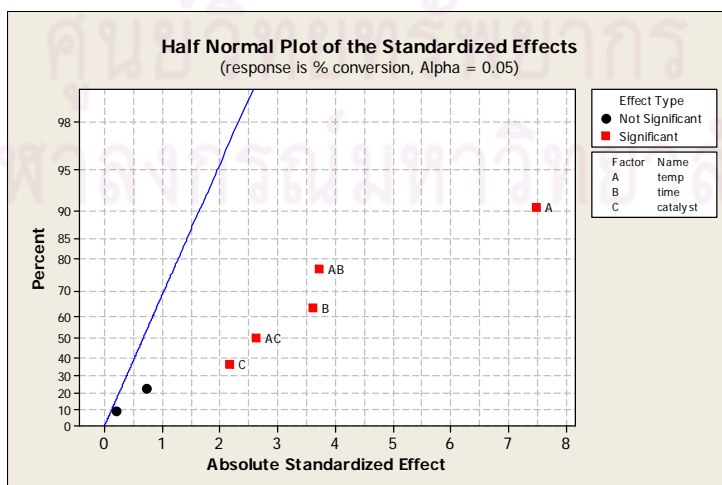
อิทธิพลของอัตราการไหลของปฏิกิริยาสามปัจจัยยังไม่มีกราฟที่สามารถบอกแนวโน้มได้ชัดเจนจึงไม่ได้ทำการวิเคราะห์ผลในส่วนนี้บอกได้แต่เพียงว่ามีอิทธิพลของอัตราการไหลสามปัจจัย

4.2.1.2 ร้อยละการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละการเปลี่ยนแปลง

Source	Degree of freedom	Sum of square	Adjust sum of square	Adjust mean square	F value	P value
Main effect	3	737.30	727.29	242.43	26.09	0.000
2-way	3	198.24	194.699	64.898	6.98	0.002
Interactions						
3-way interaction	1	0.35	0.354	0.354	0.04	0.847
Residual Error	19	176.57	176.569	41.18		

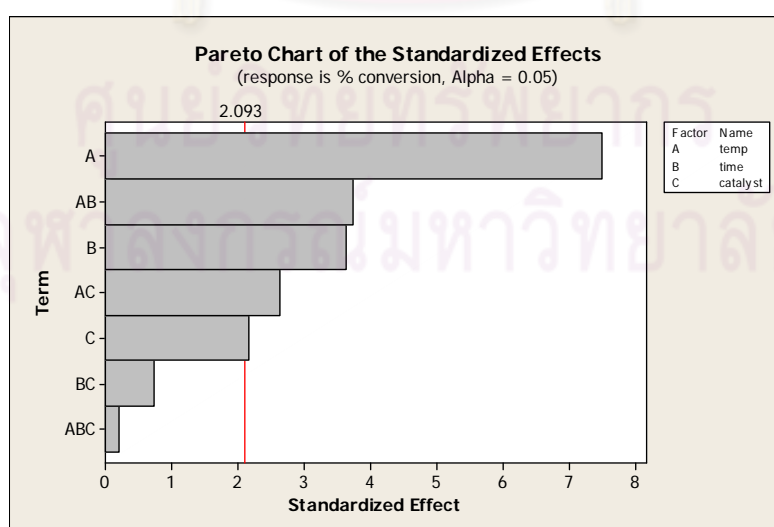
จากข้อมูลวิเคราะห์ที่ได้โดยโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 15 ที่แสดงดังตารางที่ 4.7 จะพบว่าปัจจัยหลักและอันตรกิริยาสองปัจจัยเท่านั้นที่มีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง แต่อันตรกิริยาแบบสามปัจจัยไม่มีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากมีค่า P-valueมากกว่า 0.05 ซึ่งก็สอดคล้องกับรูปที่ 4.6 เนื่องจากปัจจัยที่มีผลนั้นคือ A AB B AC C เท่านั้น โดยไม่มีอันตรกิริยาสามปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง และจากการคำนวณค่าความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยจะพบว่าปัจจัยกำลังสองและอันตรกิริยาสามปัจจัยมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งปัจจัยที่มีผลมากที่สุดเรียงตามลำดับเมื่อดูจากรูปที่ 4.7 ได้แก่ A AB B AC C



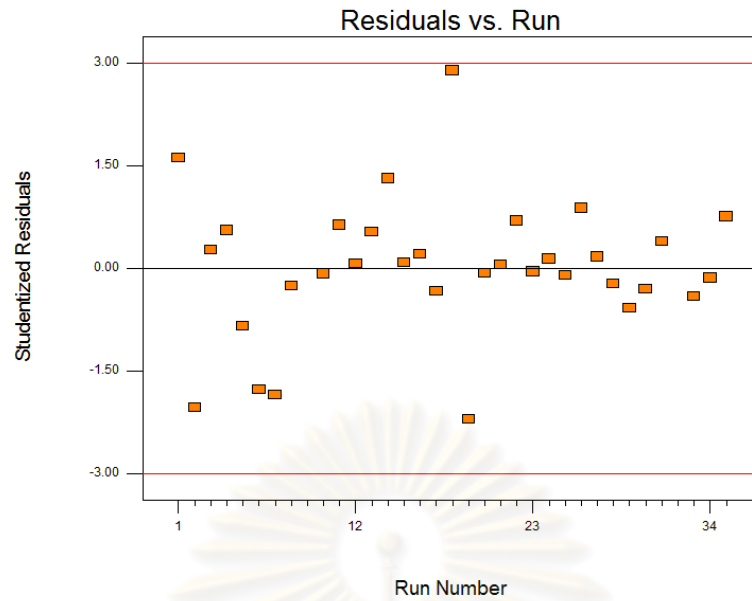
รูปที่ 4.6 ค่า Half Normal plot of standardized Effect ของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละการเปลี่ยน

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	P Value
Model	1106.94	9	122.99	17.76	< 0.0001
A	594.61	1	594.61	85.84	< 0.0001
B	108.33	1	108.33	15.64	0.0006
C	72.26	1	72.26	10.43	0.0037
A ²	65.00	1	65.00	9.38	0.0055
C ²	14.04	1	14.04	2.03	0.1680
AB	134.20	1	134.20	19.37	0.0002
AC	58.71	1	58.71	8.47	0.0079
BC	5.91	1	5.91	0.85	0.3653
ABC	0.16	1	0.16	0.022	0.8823
Residual	159.32	23	6.93		
Lack of Fit	23.18	5	4.64	0.61	0.6914
Pure Error	136.14	18	7.56		
Cor Total	1266.26	32			

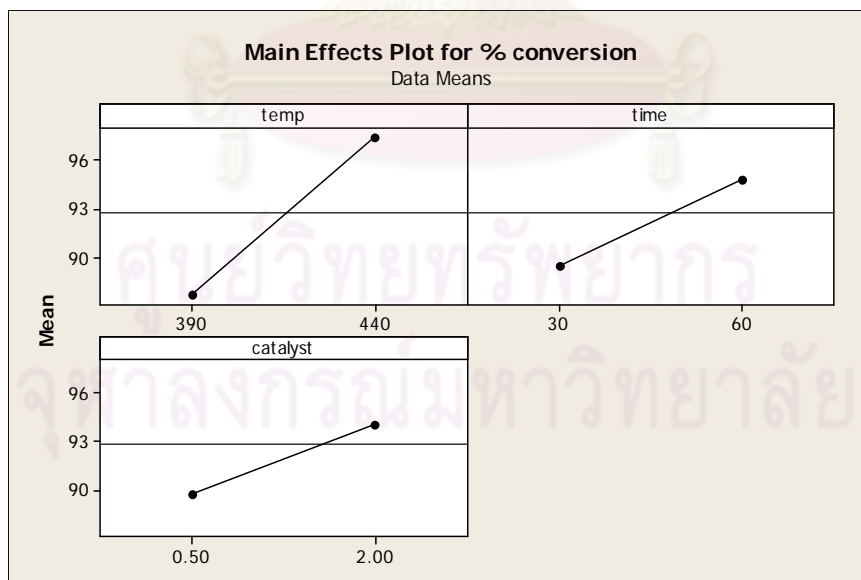


รูปที่ 4.7 แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยน

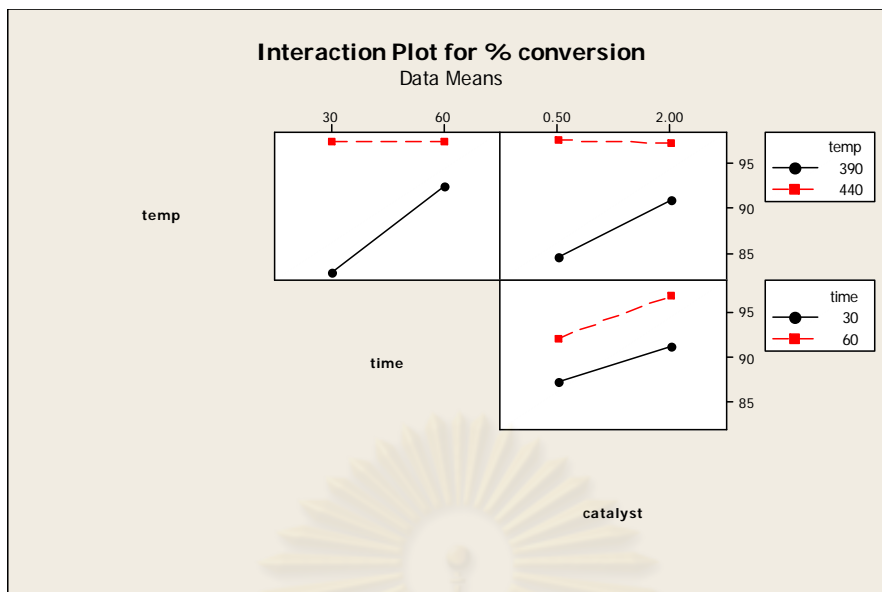


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยนแปลง

จากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ในรูปที่ 4.8 จะพบว่ามี การแปรปรวนไม่คงที่ แสดงว่าลำดับของการทดลองไม่มีผลต่อค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลง จึงสามารถทำการทดลองใดก่อนหลังก็ได้



รูปที่ 4.9 อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.10 อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละการเปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักในรูปที่ 4.9 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากในการแตกตัวด้วยความร้อนช่วงแรก อิทธิพลของอุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็ก จึงทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด การเพิ่มของเวลาในการทำปฏิกิริยาให้มากยิ่งขึ้นย่อมทำให้การแตกตัวไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีโอกาสเกิดได้มาก พร้อมกันนั้นอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มเข้ามามีบทบาท โดยสมบัติของ HZSM-5 ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนและ pore size ขนาดเล็กจึงทำให้เกิดการเลือกเกิด (selectivity) ของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กเท่านั้นที่จะผ่าน pore size และจัดรูปไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจำพวกแนฟตามากขึ้น จึงทำให้มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่ามากขึ้น เมื่อตัวแปรทั้งสามมีค่ามากขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยในรูปที่ 4.10 ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าที่อุณหภูมิ 390°C เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 30-60 นาทีทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้ว่าที่อุณหภูมิ 390 °C ไม่มีผลเพียงพอที่จะทำให้ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวแตกตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็กได้ทั้งหมด การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลทำให้ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวสามารถแตกตัวได้ดีขึ้น จึงทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 440 °C การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ร้อยละการเปลี่ยนแปลงมีค่าเท่าเดิม เนื่องจากที่อุณหภูมินี้ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวสามารถแตกตัวได้ดีและเปลี่ยนเป็นสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็กได้เกือบทั้งหมด การเพิ่มขึ้นของเวลาในการทำปฏิกิริยาจึงไม่มีผลทำให้ค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลง

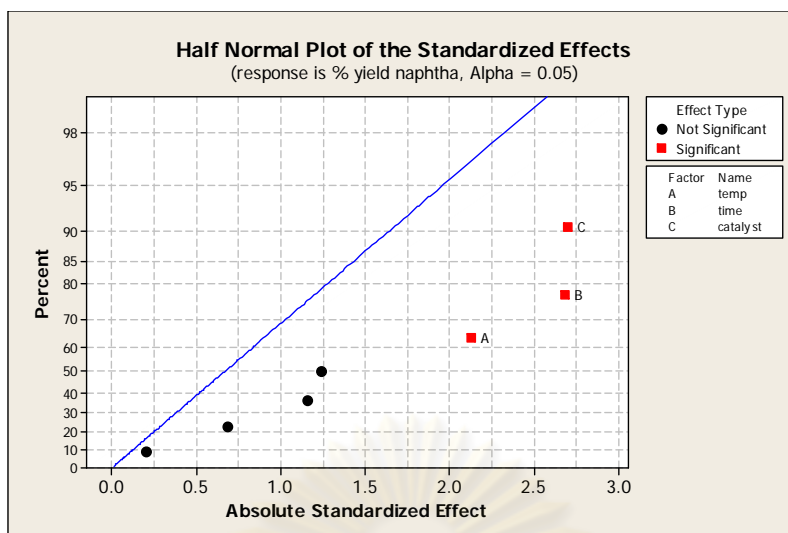
มีค่าเพิ่มขึ้น ผลของอันตรกิริยาสองปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีแนวโน้มคล้ายกันคือ ที่อุณหภูมิ 390 °C เมื่อเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม) มีผลทำให้ร้อยละการเปลี่ยนมีเพิ่มขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 440 °C การเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้ร้อยละการเปลี่ยนมีค่าเท่าเดิม สามารถอธิบายได้ว่ามาจากผลของอุณหภูมิได้ เช่นเดียวกับผลของอันตรกิริยาสองปัจจัยระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ผลของอันตรกิริยาสองปัจจัยระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบว่า ทั้งเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 30 นาทีและ 60 นาทีการเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม) มีผลทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาทีจะทำให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนมีค่าที่มากกว่า สามารถอธิบายได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ลงไปมีผลทำให้ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเกิดการแตกตัวไปเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดกลางและขนาดเล็กได้มากขึ้น และเวลาที่มากขึ้นก็ทำให้ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเกิดการแตกตัวไปเป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดกลางและขนาดเล็กได้มากขึ้นเช่นเดียวกัน

4.2.1.3 ร้อยละผลได้ของแนฟทา

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแนฟทา

Source	Degree of freedom	Sum of square	Adjust sum of square	Adjust mean square	F value	P value
Main effect	3	928.57	987.39	329.13	6.84	0.003
2-way		62.42	81.60	27.20	0.57	0.645
Interactions	3					
3-way interaction	1	74.17	74.17	74.17	1.54	0.230
Residual Error	19	914.29	914.29	48.12		

จากข้อมูลทีวิเคราะห์ได้โดยโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 15 ที่แสดงดังตารางที่ 4.9 จะพบว่า มีแค่ปัจจัยหลักเพียงอย่างเดียวที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของแนฟทา และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 ร่วมด้วยจะพบว่าผลที่ได้เหมือนกันคือเฉพาะปัจจัย A B C เท่านั้นที่มีการเบี่ยงเบนไปจากเส้นตรง



รูปที่ 4.11 ค่า Half Normal plot of standardized Effect ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแนฟทา

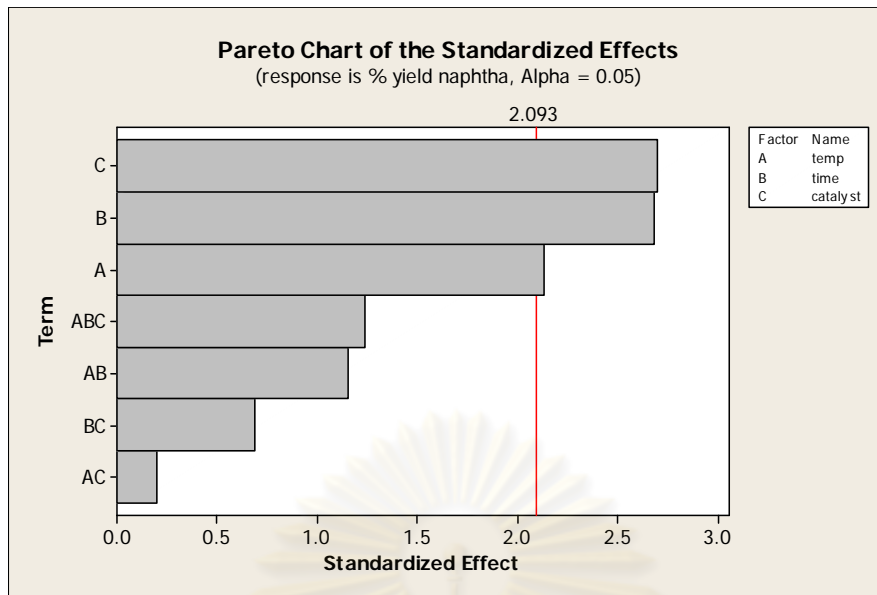
ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้ของแนฟทา

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	P Value
Model	1644.39	13	126.49	6.18	0.0002
A	127.34	1	127.34	6.22	0.0220
B	241.35	1	241.35	11.78	0.0028
C	227.53	1	227.53	11.11	0.0035
A ²	83.46	1	83.46	4.07	0.0579
B ²	249.43	1	249.43	12.18	0.0025
C ²	329.56	1	329.56	16.09	0.0007
A ³	38.00	1	38.00	1.86	0.1891
B ³	77.10	1	77.10	3.76	0.0673
C ³	51.20	1	51.20	2.50	0.1304
AB	64.53	1	64.53	3.15	0.0919
AC	0.15	1	0.15	0.007	0.9336
BC	22.73	1	22.73	1.11	0.3053
ABC	74.23	1	74.23	3.62	0.0722
Residual	389.13	19	20.48		
Lack of Fit	5.92	1	5.92	0.28	0.6045
Pure Error	383.21	18	21.29		
Cor Total	2033.52	32			

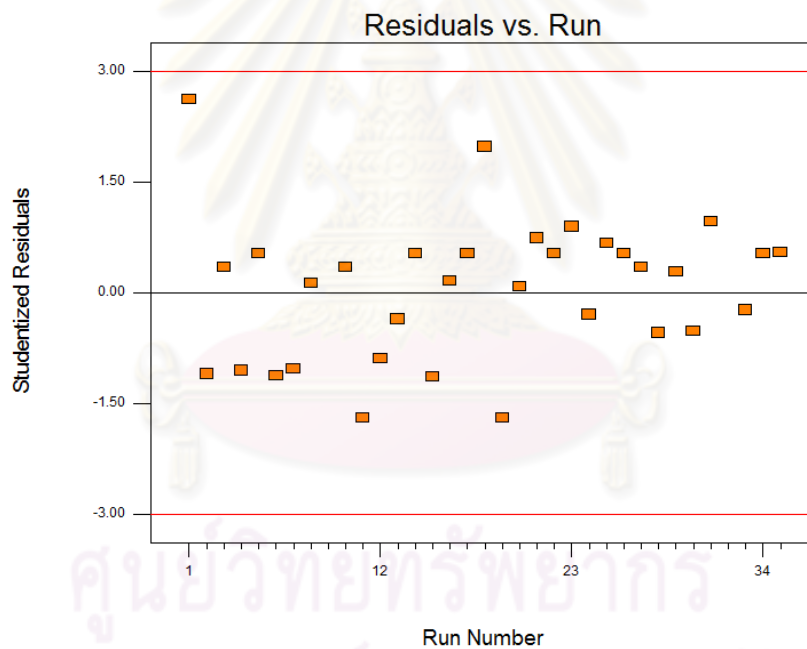
จากการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของแต่ละปัจจัย จากตารางที่ 4.10 จะพบว่านอกจาก A B C ที่ค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แล้ว ปัจจัย B² และ C² ก็มีค่าน้อยกว่า 0.05 ด้วยเช่นกัน แสดงว่าสมการถดถอยของร้อยละผลได้ของแนฟทาสามารถใช้สมการเส้นตรงในการอธิบายไม่ได้ ถ้าทำการตัดปัจจัยกำลังสองออกไปจะทำให้จะพบว่าทำให้ lack of fit ที่แสดงในตารางที่ 4.11 มีนัยสำคัญซึ่งหมายความว่าปัจจัยที่ตัดออกไปมีผลต่อค่าผลตอบสนองร้อยละผลได้ของแนฟทา นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า P-value ของ model จะพบว่าค่า P-value ของตารางที่ 4.10 มีค่าที่มากกว่า 0.05 ดังนั้นผลสำหรับค่าร้อยละผลได้ของแนฟทาคือ A B C B² และ C² แต่ค่ายกกำลังสองของปัจจัยที่แสดงนั้นมีผลกับค่าตอบสนองเหมือนกับค่าที่ไม่ยกกำลัง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลมีเพียง A B และ C เท่านั้นและผลของปัจจัยเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยคือ C B และ A ดังแสดงตามรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้ของแนฟทากรณีตัดปัจจัยกำลังสองออกจากสมการ

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	P Value
Model	902.40	7	128.91	2.85	0.0249
A	183.32	1	183.32	4.05	0.0550
B	271.23	1	271.23	5.99	0.0217
C	324.62	1	324.62	7.17	0.0129
AB	57.71	1	57.71	1.28	0.2695
AC	1.82	1	1.82	0.040	0.8426
BC	18.72	1	18.72	0.41	0.5259
ABC	66.90	1	66.90	1.48	0.2353
Residual	1131.12	25	45.24		
Lack of Fit	747.91	7	106.84	5.02	0.0027
Pure Error	383.21	18	21.29		
Cor Total	2033.52	32			

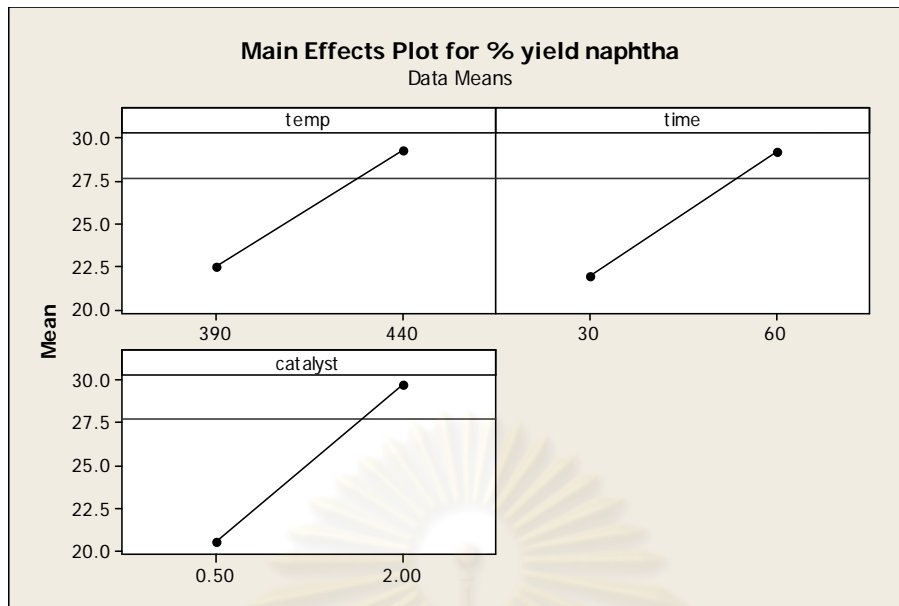


รูปที่ 4.12 แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแนฟทา

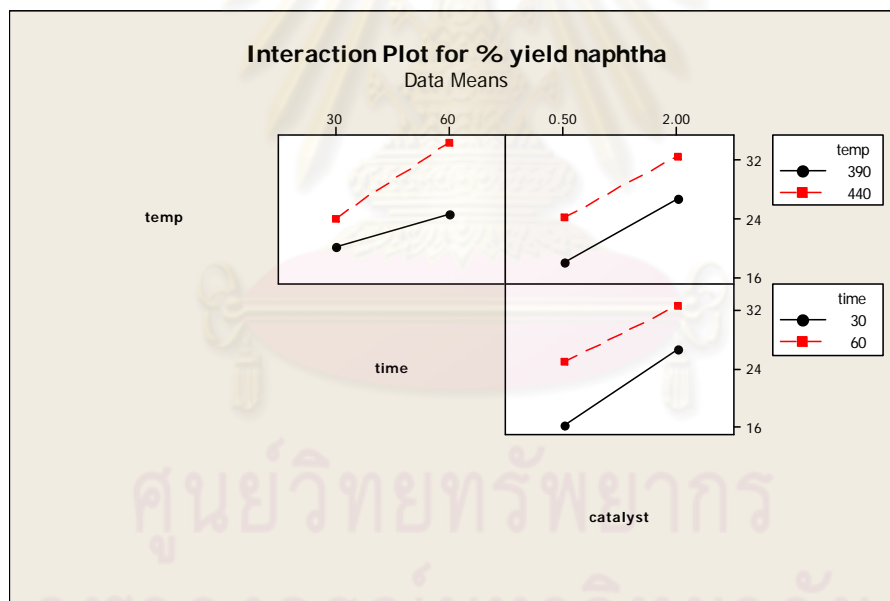


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแนฟทา

จากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ตามรูปที่ 4.13 จะพบว่าการแปรปรวนไม่คงที่ แสดงว่าลำดับของการทดลองไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของแนฟทาสามารถทำการทดลองใดก่อนหลังก็ได้



รูปที่ 4.14 อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแนฟทา



รูปที่ 4.15 อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแนฟทา

อิทธิพลของปัจจัยหลักตามรูปที่ 4.14 สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทามีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแตกตัวด้วยความร้อนในช่วงแรก อิทธิพลของอุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็ก โดยเมื่อ

เพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาให้มากขึ้นย่อมทำให้การแตกตัวไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีโอกาสเกิดได้มาก
พร้อมกันนั้น อิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มเข้ามามีบทบาท โดยสมบัติของ HZSM-5 ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุน
และ pore size ขนาดเล็ก จึงทำให้เกิดการเลือกเกิด (selectivity) ของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก
เท่านั้นที่จะผ่าน pore size และจัดรูปไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจำพวกแนฟทาได้มากขึ้น

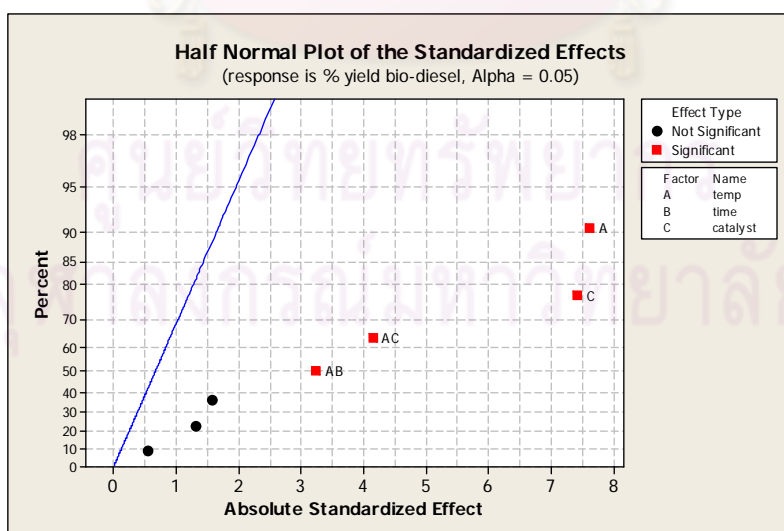
อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยตามรูปที่ 4.15 อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำ
ปฏิกิริยาทั้งที่อุณหภูมิ 390 °C และ 440 °C ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30-60 นาทีจะมีผลทำให้ค่าร้อยละ
ผลผลิตได้ของแนฟทามีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 440 °C จะมีผลทำให้ค่าร้อยละผลผลิตได้ของแนฟทามีค่า
มากกว่า สามารถอธิบายได้ว่าเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นจนถึงช่วง 390 °C ไฮโดรคาร์บอน
สายโซ่ยาวจะเริ่มมีการแตกตัวกลายเป็นสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็ก การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา
จาก 30 นาทีเป็น 60 นาทีจะทำให้สายโซ่มีเวลาในการแตกตัวมากขึ้น จึงทำให้ค่าร้อยละผลผลิตได้ของแนฟทา
ซึ่งเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็น 440 °C ก็จะทำให้
ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวมีการแตกตัวเป็นสายโซ่ขนาดกลางและขนาดเล็กได้ดีขึ้น การเพิ่มเวลาในการทำ
ปฏิกิริยาจาก 30 นาทีเป็น 60 นาทีจะทำให้สายโซ่มีเวลาในการแตกตัวมากขึ้น จึงทำให้ค่าร้อยละผลผลิตได้ของ
แนฟทาซึ่งเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดเล็กมีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและร้อยละ
ผลผลิตโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาและอันตรกิริยาระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนัก
ของตัวเร่งปฏิกิริยาก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ ที่อุณหภูมิทั้ง 390 °C และ 440 °C เมื่อเพิ่มร้อยละโดย
น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม) สามารถอธิบายได้จากสมบัติของ HZSM-5
ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนและ pore size ขนาดเล็ก จึงทำให้เกิดการเลือกเกิด (selectivity) ของโมเลกุล
ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กเท่านั้นที่จะผ่าน pore size และจัดรูปไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจำพวก
แนฟทาได้มากขึ้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยาทั้ง 30 และ 60 นาที การเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่ง
ปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม) มีผลทำให้ค่าร้อยละผลผลิตได้ของแนฟทามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเมื่อ
พิจารณาจากกราฟ ที่เวลา 60 นาทีจะมีค่าร้อยละผลผลิตได้ของแนฟทาที่สูงกว่าที่เวลา 30 นาที สามารถ
อธิบายได้ว่าเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวมีเวลาในการแตกตัวเป็นสายโซ่
ขนาดกลางและขนาดเล็กได้มากขึ้น จึงเพิ่มปริมาณร้อยละผลผลิตได้ของแนฟทา นอกจากนี้อิทธิพลของ
HZSM-5 ที่มีพื้นที่ผิวรูพรุนและ pore size ขนาดเล็ก จึงทำให้เกิดการเลือกเกิด (selectivity) ของโมเลกุล
ไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กเท่านั้นที่จะผ่าน pore size และจัดรูปไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนจำพวกแนฟ
ทาได้มากขึ้น

4.2.1.4 ร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์

Source	Degree of freedom	Sum of square	Adjust sum of square	Adjust mean square	F value	P value
Main effect	3	801.86	790.64	263.546	42.95	0.000
2-way Interactions	3	164.26	170.47	56.825	9.26	0.001
3-way interaction	1	15.10	15.10	15.098	2.46	0.133
Residual Error	19	116.57	116.57	6.135		

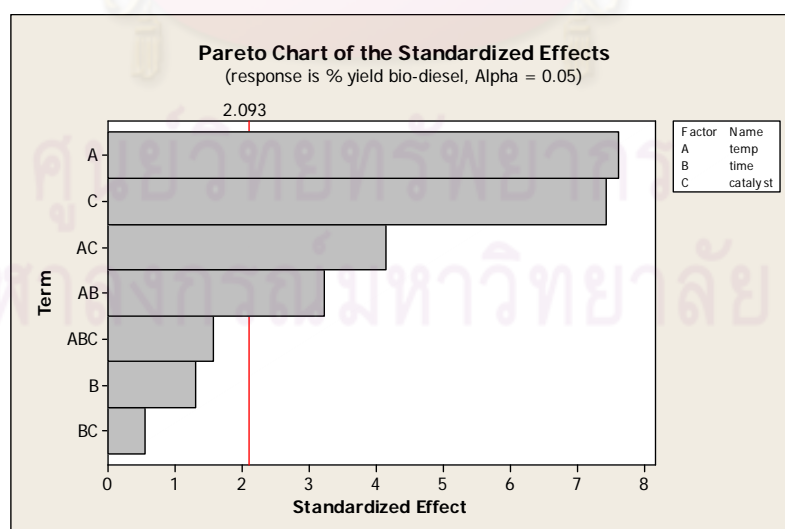
จากข้อมูลทีวิเคราะห์ได้โดยโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 15 ที่แสดงดังตารางที่ 4.12 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของดีเซลคือปัจจัยหลักและอันตรกิริยาของปัจจัย ซึ่งถ้าพิจารณาจากรูปที่ 4.16 ปัจจัยที่มีผลคือ A C AC และ AB และค่าที่ได้จากการคำนวณความแปรปรวนก็ให้ผลที่เหมือนกัน โดยปัจจัยที่มีผลเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยคือ A C AC AB แสดงดังรูปที่ 4.17



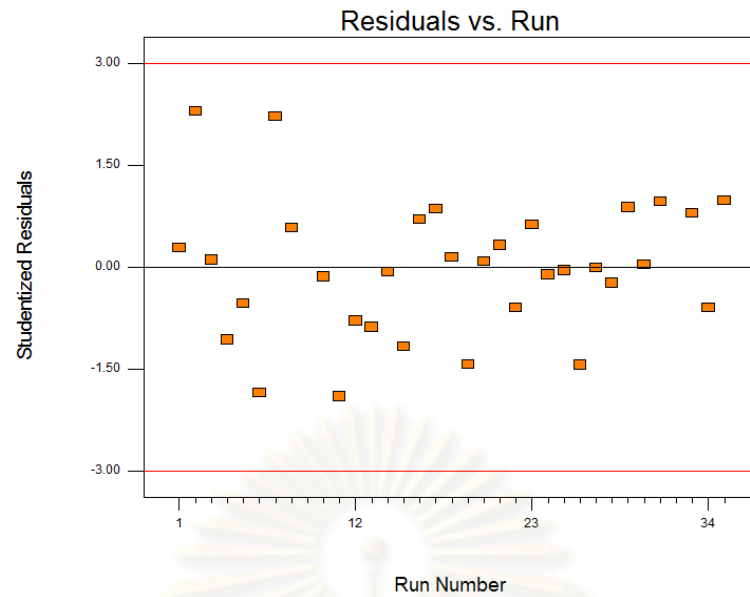
รูปที่ 4.16 ค่า Half normal plot of standardized effect ของค่าตอบสนองของร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้ของแก๊สออกยล

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	P Value
Model	1071.19	11	97.38	24.76	< 0.0001
A	383.30	1	383.30	97.46	< 0.0001
B	15.32	1	15.32	3.90	0.0617
C	255.02	1	255.02	64.84	< 0.0001
A ²	6.67	1	6.67	1.70	0.2070
B ²	34.71	1	34.71	8.83	0.0073
C ²	13.70	1	13.70	3.48	0.0760
C ³	87.04	1	87.04	22.13	0.0001
AB	64.05	1	64.05	16.28	0.0006
AC	98.19	1	98.19	24.97	< 0.0001
BC	1.78	1	1.78	0.45	0.5087
ABC	14.95	1	14.95	3.80	0.0647
Residual	82.59	21	3.93		
Lack of Fit	8.51	3	2.84	0.69	0.5704
Pure Error	74.08	18	4.12		
Cor Total	1153.79	32			

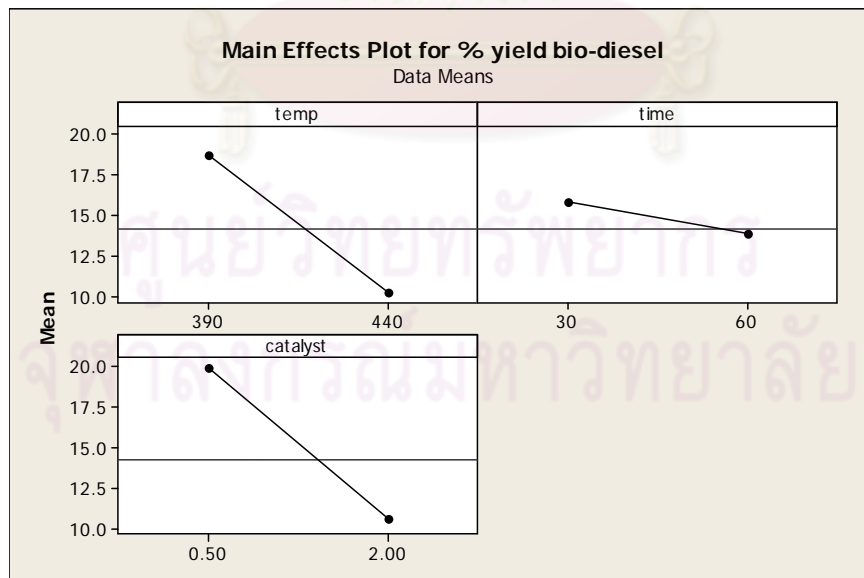


รูปที่ 4.17 แผนภูมิพาเรโต้ (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊สออกยล

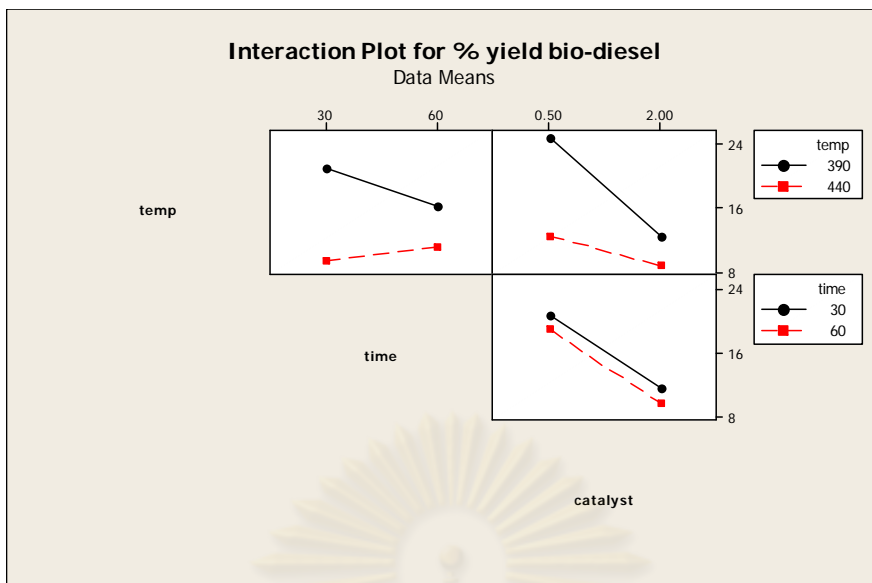


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์

จากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ตามรูปที่ 4.18 จะพบว่าการแปรปรวนไม่คงที่ แสดงว่าลำดับของการทดลองไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์ สามารถทำการทดลองใดก่อนหลังก็ได้



รูปที่ 4.19 อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์



รูปที่ 4.20 อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์

อิทธิพลของปัจจัยหลักตามรูปที่ 4.19 สามารถอธิบายได้ว่า การเพิ่มของอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์มีค่าลดลง เนื่องจากดีเซลเป็นช่วงของโมเลกุลสายโซ่ขนาดกลาง ผลที่ได้จึงมีค่าสลับกับค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา ดังที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 4.2.1.3

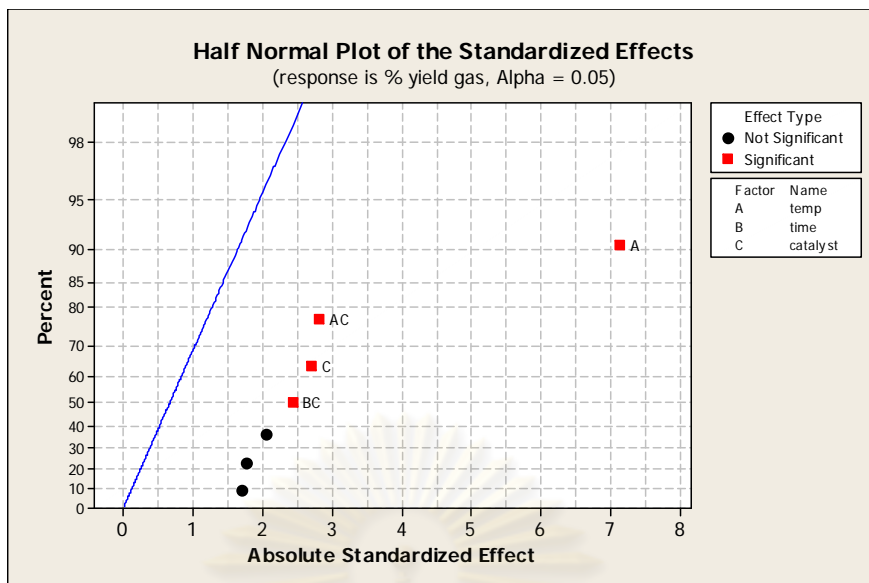
อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยตามรูปที่ 4.20 สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อพิจารณาอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 390 °C การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์มีค่าลดลง แต่ที่อุณหภูมิ 440 °C การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยามีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากที่อุณหภูมิ 390 °C ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 390°C การเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม)มีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์มีค่าลดลงและมีแนวโน้มเดียวกันที่อุณหภูมิ 440°C ผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจะพบว่าทั้งที่เวลา 30 และ 60 นาที การเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม)มีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์มีค่าลดลง

4.2.1.5 ร้อยละผลได้ของแก๊ส

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับร้อยละผลได้ของแก๊ส

Source	Degree of freedom	Sum of square	Adjust sum of square	Adjust mean square	F value	P value
Main effect	3	990.45	985.41	328.47	22.16	0.000
2-way	3	233.79	252.80	84.27	5.68	0.006
Interactions						
3-way interaction	1	42.50	42.50	42.50	2.87	0.107
Residual Error	19	281.67	281.67	14.82		

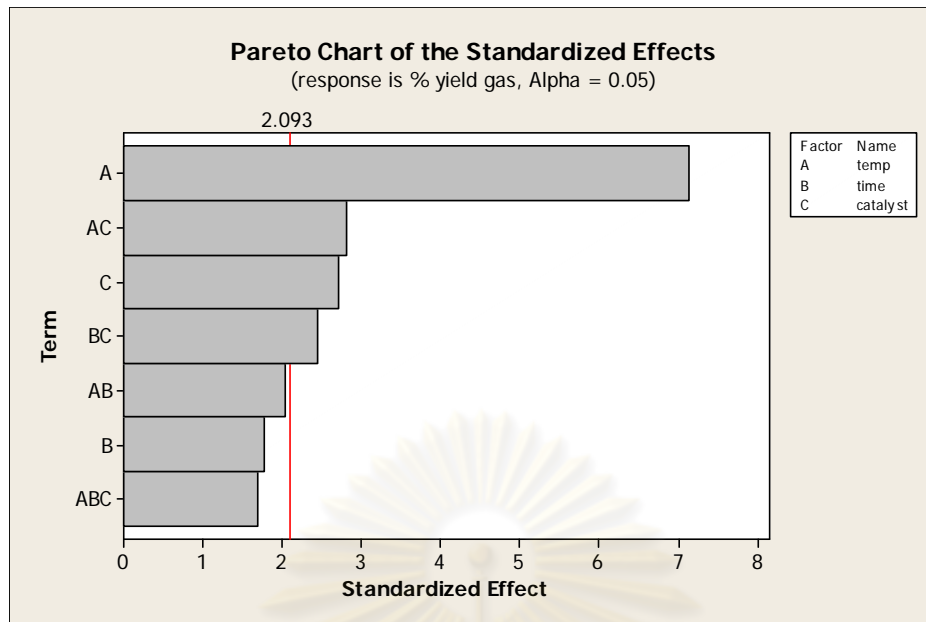
จากข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ได้โดยโปรแกรม Minitab เวอร์ชัน 15 ดังตารางที่ 4.14 พบว่าเฉพาะปัจจัยหลักและอันตรกิริยาของปัจจัยเท่านั้นที่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส และปัจจัยที่มีผลจากรูปที่ 4.21 ได้แก่ A AC C BC แต่ผลจากการคำนวณค่าความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม design expert 6.0.10 จะพบว่าปัจจัยที่มีผลมีเพียง A AC BC ค่า P-value ของ C มีค่ามากกว่า 0.05 จึงไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส เมื่อการคำนวณจากสองโปรแกรมมีความขัดแย้งกัน จะใช้โปรแกรม minitab15 เป็นหลัก ดังนั้นจึงสรุปว่าปัจจัยที่มีผลคือ A AC C BC และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.22 จะพบว่าปัจจัยที่มีผลเรียงตามลำดับจากมากไปน้อยได้แก่ A AC C BC



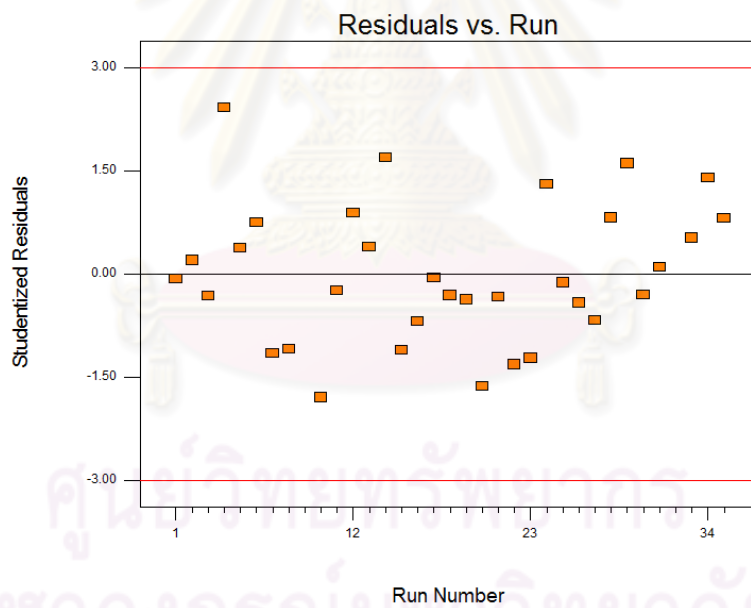
รูปที่ 4.21 ค่า Half normal plot of standardized effect ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส

ตารางที่ 4.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละปัจจัยต่อค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	P Value
Model	1452.15	7	207.45	13.12	< 0.0001
A	1031.72	1	1031.72	65.27	< 0.0001
B	32.57	1	32.57	2.06	0.1636
C	55.14	1	55.14	3.49	0.0736
AB	65.26	1	65.26	4.13	0.0529
AC	131.06	1	131.06	8.29	0.0081
BC	92.18	1	92.18	5.83	0.0234
ABC	45.18	1	45.18	2.86	0.1034
Residual	395.19	25	15.81		
Lack of Fit	131.52	7	18.79	1.28	0.3132
Pure Error	263.67	18	14.65		
Cor Total	1847.34	32			

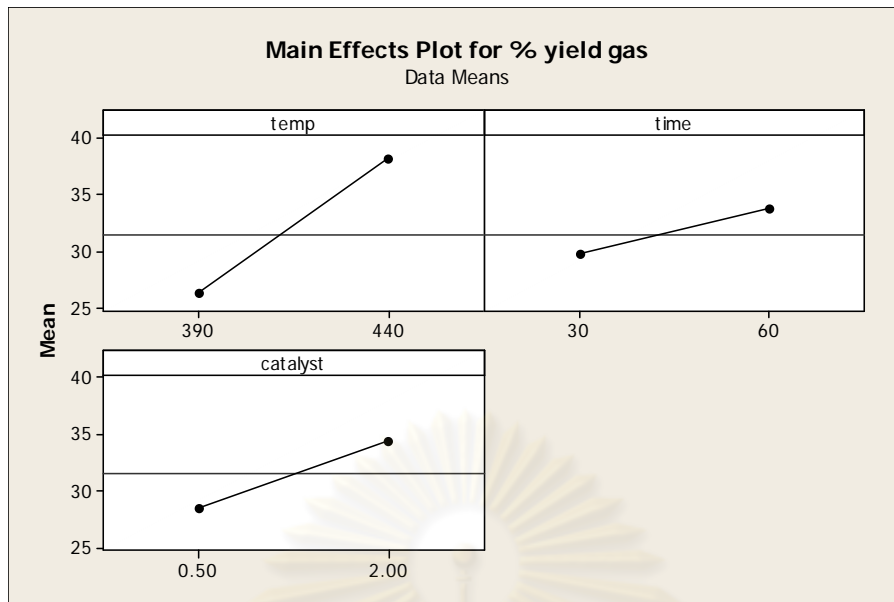


รูปที่ 4.22 แผนภูมิพาเรโต (Pareto) ของอิทธิพลในแต่ละปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส

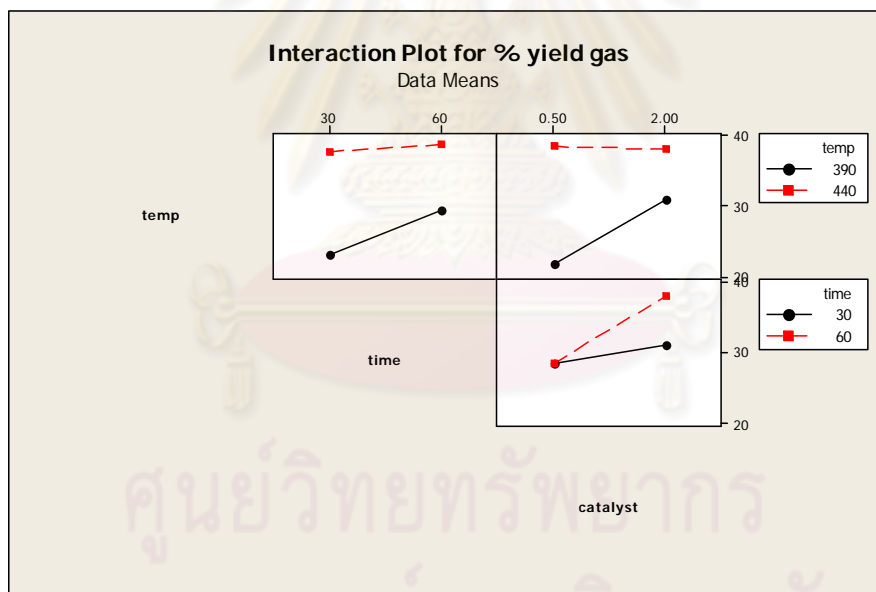


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และ ลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส

จากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และลำดับการเก็บข้อมูล (Run Order) ตามรูปที่ 4.23 จะพบว่าการแปรปรวนไม่คงที่ แสดงว่าลำดับของการทดลองไม่มีผลต่อค่าร้อยละผลได้ของแก๊สสามารถทำการทดลองใดก่อนหลังก็ได้



รูปที่ 4.24 อิทธิพลของปัจจัยหลักของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส



รูปที่ 4.25 อิทธิพลของอันตรกิริยาสองปัจจัยของค่าตอบสนองร้อยละผลได้ของแก๊ส

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักในรูปที่ 4.24 จะพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา จะมีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอันตรกิริยาแบบสองปัจจัยในรูปที่ 4.25 อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 390°C เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30-60 นาที จะมีผลทำให้

ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 440 °C การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 30-60 นาที จะมีผลทำให้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้นเล็กน้อย อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 390 °C การเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม) มีผลทำให้ร้อยละผลได้ของแก๊สเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิ 440 °C การเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลทำให้ร้อยละผลได้ของแก๊สลดลงเล็กน้อย อันตรกิริยาระหว่างเวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที การเพิ่มร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 2.5-10 wt% (0.5-2.0 กรัม) มีผลทำให้ร้อยละผลได้ของแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ก็มีแนวโน้มเดียวกัน

4.2.2 ข้อสรุปที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบ 2^3 fractional factorial design

จากค่าตอบสนองทั้ง 5 ค่าคือร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของแนฟทา ร้อยละผลได้ของดีเซลและร้อยละผลได้ของแก๊ส จะได้สมการถดถอยเรียงตามลำดับดังนี้

$$Y_{\text{Liquid}} = 59.87 - 5.34A + 1.42B - 1.30C - 0.55A^2 - 2.83B^2 - 3.08C^2 + 5.63AB + 3.30AC - 2.06BC - 2.94ABC$$

$$Y_{\text{conversion}} = 95.79 + 4.68A + 2.00B + 1.63C - 2.10A^2 - 0.98C^2 - 2.50AB - 1.65AC + 0.53BC - 0.085ABC$$

$$Y_{\text{naphtha}} = 36.97 + 4.58A + 6.31B + 6.12C - 2.39A^2 - 4.13B^2 - 4.75C^2 + 1.74AB - 0.083AC - 1.03BC - 1.59A^3 - 2.27B^3 - 1.85C^3 - 1.87ABC$$

$$Y_{\text{bio-diesel}} = 11.39 - 3.76A - 0.75B - 6.48C + 0.68A^2 + 1.54B^2 + 0.97C^2 + 1.73AB + 2.14AC - 0.29BC + 2.41C^3 - 0.84ABC$$

$$Y_{\text{gas}} = 32.25 + 6.17A + 1.10B + 1.43C - 1.75AB - 2.47AC + 2.08BC + 1.45ABC$$

ตารางที่ 4.16 ค่าสถิติสำหรับสมการถดถอยของผลตอบสนองต่างๆ

	R-Squared	Adj R-Squared	C.V.	PRESS	Adeq Precision
ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว	0.7466	0.6315	10.34	1565.31	10.508
ร้อยละการเปลี่ยน	0.8742	0.8249	2.83	327.41	12.641
ร้อยละผลได้แนฟทา	0.8086	0.6777	16.40	1101.58	7.178
ร้อยละผลได้ดีเซล	0.9284	0.8909	14.00	204.50	17.233
ร้อยละแก๊ส	0.7861	0.7262	12.50	700.03	12.091

โดยค่าสถิติที่แสดงในตารางที่ 4.16 สามารถอธิบายได้พอสังเขปดังนี้

- ค่า R^2 แสดงถึงปริมาณข้อมูลจากการทดลองที่ยังไม่ได้ผ่านการปรับแต่ง
- ค่า Adjusted R-Squared (Adj. R^2) แสดงถึงปริมาณข้อมูลจากการทดลองที่สมการถดถอยสามารถอธิบายได้ ซึ่งสมการถดถอยที่ดีจะมีค่านี้เข้าใกล้ 1
- ค่า Coefficient of variation (C.V.) แสดงถึงความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มในชุดข้อมูลที่ ได้จากการทดลองในรูปร้อยละต่อค่าเฉลี่ยของผลตอบสนอง
- ค่า Prediction error sum of square (PRESS) แสดงถึงความสามารถในการทำนายค่าในระดับปัจจัยอื่น ที่มีได้ทำการทดลองจริง ซึ่งหากมีค่ามากแสดงว่าสมการถดถอยจะทำนายค่าได้ไม่ดี
- ค่า Adequate Precision แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to noise ratio) หาก มีค่าน้อยกว่า 4 แสดงว่าค่าที่ได้เป็นค่าจากสิ่งรบกวนมากกว่าค่าจริง

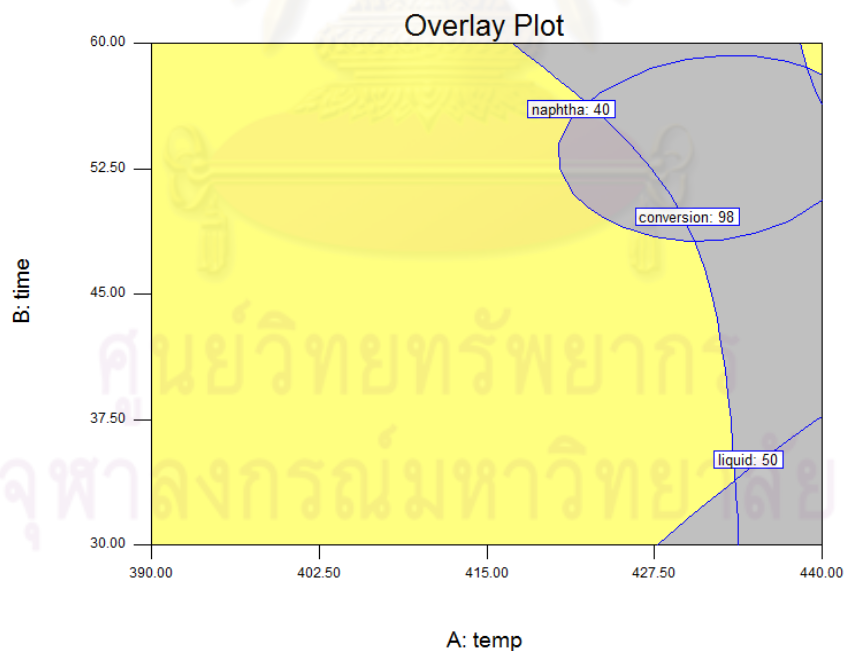
หลังจากที่หาสมการถดถอยได้แล้ว จะทำการหาภาวะที่เหมาะสม โดยทำการพิจารณาค่า ตอบสนองเพียง 3 ค่า คือ ค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ค่าร้อยละการเปลี่ยนและค่าร้อยละผลได้ของ แนฟทา โดยจะพิจารณาให้มีค่ามากที่สุด ส่วนค่าตอบสนองที่เหลือซึ่งได้แก่ ร้อยละผลได้ของดีเซลและ ร้อยละผลได้ของแก๊สเป็นค่าตอบสนองที่ไม่สำคัญมากจึงไม่ได้นำมาพิจารณา ซึ่งค่าตอบสนองที่พิจารณา นั้นจะกำหนดให้มีค่ามากที่สุด โดยจะใช้โปรแกรม design-expert 6.0.10 ในการหาภาวะที่เหมาะสม ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมจะแสดงดังตารางที่ 4.17 ภาวะที่เหมาะสมจะแสดงดังตารางที่ 4.18 คือที่อุณหภูมิ 426.72 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 56.30 นาทีและร้อยละโดยน้ำหนักของ ตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6.35 จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว, ร้อยละการเปลี่ยนและร้อยละ ผลได้ของแนฟทาเท่ากับ 58.6281 98.1831 40.6012 ตามลำดับ ค่า desirability ที่แสดงในตารางจะ บ่งบอกถึงความแม่นยำของภาวะที่หาได้จากการคำนวณ เมื่อนำไปทดลองจริงจะได้ค่าตอบสนองตามที่ คำนวณ ซึ่งนอกจากภาวะดังกล่าวจะทำให้ได้ค่าตอบสนองทั้ง 3 ค่ามากที่สุดแล้ว เมื่อพิจารณา overlay plot ตามรูปที่ 4.26 จะพบว่าพื้นที่ที่แรเงาจะมีผลทำให้ได้ค่าตอบสนองเป็นไปตามที่กำหนดด้วยเช่นกัน และค่าพื้นผิวตอบสนองที่ทำให้ได้ภาวะเหมาะสมจะแสดงดังรูปที่ 4.27 เมื่อกำหนดให้ค่าร้อยละผลได้ของ ตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าคงที่ที่ 1.27 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่า ภาวะที่เหมาะสมจะมีผลทำให้ค่าตอบสนอง Desirability มีค่าเท่ากับ 0.871 ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่า ผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง แต่อย่างไรก็ตามจะต้องมีการทดลองภาวะที่เหมาะสมอีก ครั้งเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ

ตารางที่ 4.17 ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสม

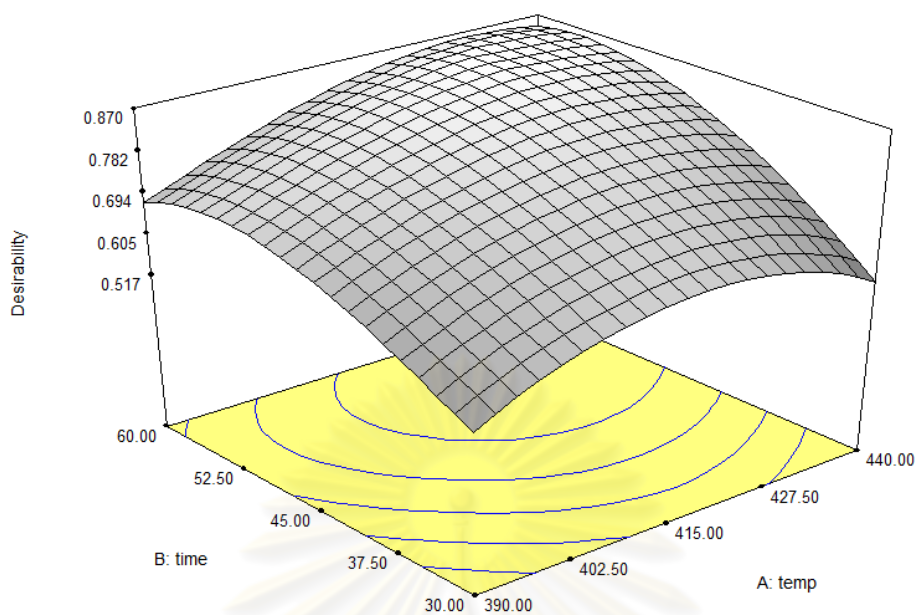
name	goal	Lower limit	Upper limit	Unit
Temp	is in range	390	440	°C
Time	is in range	30	60	min
Catalyst	is in range	2.5	10	wt%
Liquid	maximize	32.23	71.55	%
Conversion	maximize	76.78	98.54	%
naphtha	maximize	12.71	40.60	%

ตารางที่ 4.18 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม design-expert 6.0.10

temperature	time	Catalyst (wt %)	Liquid (%)	Conversion (%)	Naphtha (%)	Desirability
426.72	56.30	6.35	58.62	98.18	40.60	0.871



รูปที่ 4.26 overlay plot ของร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของเนฟทา เมื่อค่าร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 6.35



รูปที่ 4.27 พื้นผิวตอบสนองระหว่างอุณหภูมิ เวลา และค่า desirability
เมื่อร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6.35

หลังจากได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้วจะทำการทดลองเพิ่มขึ้นมาจากเดิมอีก 4 การทดลองแสดงในตารางที่ 4.19 ดังนี้

ตารางที่ 4.19 ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองการแตกตัวของน้ำมันสบู่ดำตามภาวะที่ได้จากการทดลอง

number	condition			%	%	%	%	%
	temp (°C)	time (min)	catalyst (wt %)	yield liquid	conversion	yield naphtha	yield gas oil	yield gas
34	426	56	6.35	60.50	98.50	38.35	18.00	25.0
35	426	56	6.35	61.40	98.55	39.50	17.75	27.0
36	426	56	-	65.00	95.00	20.10	25.00	18.0
37	426	56	-	67.00	94.50	20.20	26.30	18.4

การทดลองที่ 34 และ 35 จะเป็นภาวะที่ได้จากโปรแกรม ซึ่งค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม จึงสามารถนำผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมมาทำการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองต่อไป การทดลองที่ 36 และ 37 เป็นการทดลองโดยไม่มีการใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปเพื่อพิจารณาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าตอบสนองต่างๆ ซึ่งพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใส่ลงไปจะทำให้ได้ ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของแก๊สและแนฟตามากขึ้น แต่ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวและร้อยละผลได้ของดีเซลมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ใส่ลงไปมีผลทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่เล็กลงมากขึ้น มีความเลือกสรรที่จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงของแนฟตามากขึ้น ซึ่งในงานวิจัยต้องการร้อยละของแนฟทาให้มีความมากที่สุด ดังนั้นจึงควรใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ลงไปเพื่อเพิ่มร้อยละผลได้ของแนฟทาให้ได้มากที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันสบู่ดำให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวในเครื่องปฏิกรณ์แบบ Autoclave โดยออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ 390-440 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-60 นาที และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 2.5-10 wt% ซึ่งจะทำให้การศึกษาผลตอบสนอง 3 ค่าคือ ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว ร้อยละการเปลี่ยน ร้อยละผลได้ของแนฟทา ส่วนร้อยละผลได้ของดีเซล และร้อยละผลได้ของแก๊สจะไม่นำมาพิจารณา ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อผลตอบสนองของการทดลอง เมื่อกำหนดให้ A B และ C เป็นอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยาและร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาตามลำดับ ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าตอบสนองต่างๆ

ตัวแปรผลตอบ	ปัจจัยที่มีผล
ร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว	A AB AC ABC
ร้อยละการเปลี่ยน	A B C AB AC
ร้อยละผลได้ของแนฟทา	A B C
ร้อยละผลได้ของแก๊สออยล์	A C AB AC
ร้อยละผลได้ของแก๊ส	A C AC BC

2. ภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ผลตอบสนองมีค่ามากที่สุดจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม design-expert 6.0.10 ได้แก่ อุณหภูมิ 426.72 °C เวลาในการทำปฏิกิริยา 56.30 นาที และร้อยละโดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 6.35 จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลวเท่ากับ 58.62 ร้อยละการเปลี่ยนเท่ากับ 98.18 และร้อยละผลได้ของแนฟทาเท่ากับ 40.60 และเมื่อทำการทดลองตามภาวะที่เหมาะสมจากการคำนวณจะพบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณ

3. ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ใส่เข้าไประหว่างการทำปฏิกิริยาจะมีผลต่อการแตกตัวของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ในน้ำมันสบู่ดำให้มีโมเลกุลที่เล็กลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของน้ำมันสปูดำให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยมีการขยายส่วนการผลิตให้มีขนาดใหญ่ขึ้น
2. ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆ ที่มีราคาไม่แพง และหาวิธีในการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาจากกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่
3. ศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัญจนา บุญยเกียรติ. เชื้อเพลิงและการเผาไหม้. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- ชวลิต งามจรุสศรีวิชัย. เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยา. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- บุญชัย อารายสนองกุล. การเพิ่มประสิทธิผลของปัมพ์แม่นยำสูงด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.
- ปราโมชย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : สุนทรออฟเซต, 2537.
- ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- นพิตา หิญาธีระนันท์. เอกสารประกอบการเรียนวิชาเทคโนโลยีการเร่งปฏิกิริยา. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- ไพจิตร จันทรวงศ์. พืชน้ำมันและน้ำมันพืช 52 ชนิด. โรงพิมพ์คุรุสภา. กรุงเทพฯ. , 2530.
- มารีนา มงคล. การแตกตัวของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์และHZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- แม่น อมรสิทธิ์. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เครื่องมือ. กรุงเทพฯ : ชวนพิมพ์, 2535.
- รพีพันธุ์ ภาสบุตร, สุขสันต์ สุทธิผลไพบูลย์, ไพจิตร จันทรวงศ์, วีระศักดิ์ อินัมบุตร, มาลี ประภาวัต, วิไล กาญจนภูมิ และ อรรวรรณ หวังดีธรรม. เดินเครื่องด้วยน้ำมันสุุดำ, 2525.
- เรืองวิทย์ สว่างแก้ว. การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์ระดับนำร่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- วิซชากร จารุศิริ. กระบวนการร่วมของพอลิฟิล์มและแอนทราไซต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต.ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย, 2544.
- วิทยา เรื่องพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส : หลักการทฤษฎีและการประยุกต์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534
- เอกรัฐ เมนะจินดา. การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยในการทดลองแบบแฟคทอเรียล. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาสถิติประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2542.

อธิชา นายสุวรรณ, วรินทร์ ชวศิริ และ วิมลรัตน์ ตระการพุกฤษ. แคตตาลิสต์ในโพรงซีไอไลต์ วยสำหรับการ
ออกซิเดชันสารประกอบไฮโดรเจน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2546.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

Available from: [http:// www.IEA World Energy Outlook 2007](http://www.IEA World Energy Outlook 2007)

Available from: [http:// www.xyLOWATT.com/resEN.htm](http://www.xyLOWATT.com/resEN.htm)

Available from:<http://www.wikipedia.org>

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

Casumano, J.C. Catalysis in Coal. New York: Academics Press, 1978.

Daniela G. Lima, Valerio C.D. Soares , Eric B. Ribeiro ,Daniel A. Carvalho , Érika C.V. Cardoso , Flávia C. Rassi ,Kleber C. Mundima, Joel C. Rubima, Paulo A.Z. Suarez. Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils. Journal Analytical Applied Pyrolysis 71. (2004) : 987–996.

Douglass C. Montgomery. Design and Analysis of Experiment. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

Gary J.H.,Handweck G.H. Petroleum and Refining : Technology and Economics. New York , 1975.

Hanny Johanes Berchmans, Shizuko Hirata. Biodiesel production from crude Jatropha curcas L. seed oil with a high content of free fatty acids .Bioresource Technology99. (2008) :1716–1721.

Hicks, C.R. Fundamental Concepts in the Design of Experiments. 4th ed. New York: Oxford University Press, 1993.

Lima D.G., Soares V. C.D., Ribeiro E.B., Carvalho D.A.,Cardoso É.C.V., Rassi F.C., Mundima K.C., Rubima J.C., and Suarez P. A.Z. “Diesel-like fuel obtained by Pyrolysis of vegetable oils”, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 71. (2004) : 987-996.

Minitab. User’s Guide 2: Data Analysis and Quality Tools. United States of America: Minitab, 2000.

Mosio-Mosiexski J., Marek W., Morawski I., Dobrzanski T. “High-pressure catalytic and thermal cracking of polyethylene” Journal of fuel processing Technology 88. (2007) : 359-364.

N. Foidl, G. Foidl, M. Sanchez, M. Mittelbach and b & S. Hackel. Jatropha curcus L. as a source for the production of biofuels in Incaragua Bioresource Technology 58. (1996): 77-82

Padmaja K.V., Atheya N., Bhatnagar A.K., Singh K.K. “conversion of Calotropis procera biocrude to liquid fuels using thermal and catalytic cracking “Journal of fuel. (2008) :780-785.

Satterfield, C.N. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. New York: McGraw-Hill Inc., 1991.

Schobert, H.H. The Chemistry of Hydrocarbon fuel. New York: 1991

Song, C., Chang, S. H., and Isao, M. Chemistry of Diesel Fuels. London: Taylor & Francis,

Srivastava, A.; and Pasad, R. Triglycerides-based diesel fuels. Renewable and Sustainable Energy Reviews 4 (2000): 111-133.

Tamunaidu P., Bhatia S., Catalytic cracking of Palm oil for the production of biofuels: Optimization studies. Bioresource Technology 98. (2007): 3593-3601.

Thomas A. Milne, Robert J. Evans, Nicholas Nagle. Catalytic Conversion of Microalgae and Vegetable Oils to Premium Gasoline, with Shape-Selective Zeolites Biomass. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 71. (1990): 219-232

Von Ballmoos, R., Higgins, J., Collection of Simulated XRD Powder Patterns For Zeolites 10.(1990): 442



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก 1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ

number	condition			reactor weight (g)	oil weight (g)	reactor + oil after (g)	gas weight (g)	liquid weight (g)	solid weight (g)
	temp (°C)	resident time(min)	catalyst weight (g)						
1	390	30	0.5001	1790.87	19.99	1806.87	4.49	12.5325	3.4675
2	390	30	0.5000	1790.76	20.03	1808.06	3.23	13.905	3.3950
3	440	30	0.5002	1790.62	19.99	1803.47	7.64	7.1718	5.6782
4	440	30	0.5001	1790.62	19.99	1801.89	9.22	6.4431	4.8270
5	390	60	0.4992	1790.67	20.01	1806.45	4.72	9.4771	6.3029
6	390	60	0.5006	1790.69	20.01	1806.18	5.02	12.3000	3.1900
7	440	60	0.4992	1790.72	20.04	1803.95	7.30	11.4322	1.8031
8	440	60	0.5005	1790.81	20.03	1804.69	6.65	12.6664	1.2135
9	390	30	2.0003	1791.12	20.06	1808.11	5.07	9.6873	7.3027
10	390	30	1.9966	1791.07	20.01	1807.70	5.37	12.2225	4.4075
11	440	30	2.0048	1791.16	19.97	1806.98	6.15	7.9979	7.8221
12	440	30	2.0094	1791.12	20.09	1806.37	6.84	10.1135	5.1365
13	390	60	2.0023	1791.14	20.04	1806.93	6.25	10.3313	5.4587
14	390	60	1.9990	1791.14	20.04	1805.60	7.57	9.7716	4.6884
15	440	60	2.0103	1791.53	20.00	1805.71	7.83	11.3453	2.8347
16	440	60	2.0086	1791.40	19.99	1803.74	9.65	9.1359	3.2041
17	440	60	2.0078	1791.68	20.03	1806.38	7.33	11.1040	3.5960
18	415	45	1.2572	1792.51	19.98	1807.55	6.19	12.2108	2.8292
19	415	45	1.2571	1792.58	20.03	1806.71	7.15	10.7793	3.3507
20	415	45	1.2504	1792.33	19.99	1808.40	5.17	12.1135	3.9565
21	415	45	1.2524	1792.09	20.02	1807.86	5.50	13.1110	2.6590
22	415	45	1.2494	1791.53	19.99	1806.56	6.20	11.6488	3.3815
23	390	60	0.5083	1791.50	20.00	1807.17	4.83	13.6447	2.0253
24	390	30	2.0203	1791.55	20.01	1807.73	5.85	11.7742	4.4058
25	440	30	2.0019	1791.48	20.00	1805.51	7.97	10.2370	3.7930
26	390	60	2.0010	1791.40	20.08	1806.41	7.07	10.4119	4.5981
27	390	30	0.5001	1791.37	20.00	1808.08	3.79	14.3096	2.4004
28	457	45	1.2493	1785.73	19.99	1797.24	8.48	9.4746	3.2847
29	373	45	1.2552	1785.91	20.01	1801.85	4.07	13.9119	3.2833
30	415	45	2.5136	1785.89	20.02	1799.95	5.96	10.4386	6.135
31	415	45	0	1785.84	20.02	1798.84	7.01	10.1006	2.9094
32	415	70.2	1.2517	1785.8	20.11	1798.77	7.14	9.9822	4.2395
33	415	19.8	1.2515	1785.95	19.99	1799.58	7.33	10.866	3.0455

ตาราง ก 2 องค์ประกอบของน้ำมันสบูดำเมื่อทำการทดลองที่ภาวะต่างๆ

number	condition			oil fraction in liquid (wt%)					light gas oil + gas oil
	temp (°C)	time(min)	catalyst (g)	naphtha	kerosene	light gas oil	gas oil	long residue	
1	390	30	0.5001	12.72	9.51	22.35	2.18	15.93	24.54
2	390	30	0.5000	13.06	9.09	28.89	2.34	16.04	31.23
3	440	30	0.5002	16.94	7.27	9.96	0.47	1.24	10.43
4	440	30	0.5001	14.06	6.44	9.77	0.52	1.44	10.30
5	390	60	0.4992	13.53	8.57	17.09	1.30	6.88	18.39
6	390	60	0.5006	15.74	9.50	23.36	1.94	10.93	25.30
7	440	60	0.4992	32.01	9.79	12.84	0.70	1.70	13.54
8	440	60	0.5005	33.69	11.53	15.03	0.84	2.14	15.87
9	390	30	2.0003	17.64	6.06	9.99	1.72	12.88	11.71
10	390	30	1.9966	27.55	8.94	13.54	2.12	8.94	15.66
11	440	30	2.0048	25.76	5.54	6.46	0.65	1.63	7.11
12	440	30	2.0094	32.50	6.95	8.04	0.92	1.93	8.96
13	390	60	2.0023	31.49	7.67	9.30	0.90	2.20	10.20
14	390	60	1.9990	29.12	7.37	9.00	1.02	2.25	10.02
15	440	60	2.0103	38.52	7.16	8.39	0.88	1.77	9.28
16	440	60	2.0086	31.86	5.85	6.38	0.60	1.01	6.99
17	440	60	2.0078	36.24	7.27	8.76	0.93	2.24	9.69
18	415	45	1.2572	38.37	8.72	10.31	1.28	2.44	11.59
19	415	45	1.2571	33.39	7.65	8.91	1.08	2.79	9.99
20	415	45	1.2504	37.31	8.73	10.29	1.25	3.01	11.54
21	415	45	1.2524	40.60	9.40	11.24	1.26	2.98	12.50
22	415	45	1.2494	34.87	8.51	10.17	1.29	3.42	11.47
23	390	60	0.5083	29.56	11.28	20.45	1.54	5.39	21.99
24	390	30	2.0203	25.97	8.79	13.64	2.05	8.38	15.70
25	440	30	2.0019	31.07	6.99	9.40	1.09	2.64	10.49
26	390	60	2.0010	29.35	7.90	10.23	1.28	3.09	11.51
27	390	30	0.5001	24.24	10.66	25.63	2.19	8.83	27.82
28	457	45	1.2493	31.21	5.97	7.26	0.93	2.01	8.20
29	373	45	1.2552	30.97	9.78	15.26	2.28	11.24	17.54
30	415	45	2.5136	25.91	9.99	13.54	0.74	1.96	14.28
31	415	45	0	22.92	7.52	12.44	0.67	6.90	13.12
32	415	70.2	1.2517	25.97	8.04	12.96	0.75	1.91	13.72
33	415	19.8	1.2515	26.35	7.94	15.88	1.05	3.14	16.92

ตาราง ก 3 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยใช้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม

number	condition			reactor weight (g)	oil weight (g)	reactor + oil after (g)	gas weight (g)	liquid weight (g)	solid weight (g)
	temp (°C)	resident time(min)	weight catalyst (g)						
34	426	56	1.27	1790.55	20.00	1805.55	5.00	12.10	2.90
35	426	56	1.27	1790.76	20.03	1805.93	5.40	11.48	3.15
36	426	56	-	1790.70	20.02	1807.12	3.60	13.00	3.42
37	426	56	-	1790.58	20.00	1806.90	3.68	13.40	2.92

ตาราง ก 4 องค์ประกอบของน้ำมันที่ภาวะที่เหมาะสม

number	condition			oil fraction in liquid					light gas oil + gas oil
	temp (°C)	time(min)	catalyst (g)	naphtha	kerosene	light gas oil	gas oil	long residue	
34	426	56	1.27	38.35	0.31	16.44	1.56	3.84	18.00
35	426	56	1.27	39.50	0.27	16.15	1.60	3.88	17.75
36	426	56	-	20.10	3.51	22.68	2.32	16.39	25.00
37	426	56	-	20.20	3.54	23.86	2.44	16.96	26.30

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด (Boiling Distribution)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วย Simulated Distillation Gas Chromatography จะวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของสารดังต่อไปนี้

IBP - 200°C = naphtha

200°C - 250°C = kerosene

250°C - 350 °C = light gas oil

350°C - 370°C = gas oil

} Diesel

370°C - FBP = long residue

การวิเคราะห์เริ่มด้วยการนำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปละลายในคาร์บอนไดซัลไฟด์ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วน โดยปริมาตร วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟียี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 พร้อมทั้งดีเทคเตอร์แบบ FID ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation รุ่น Star Simulated Distillation Version 5.5 คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary column มี Stationary Phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 ไมครอน ภาวะที่ใช้คือ

อุณหภูมิหัวฉีด (Injector Temperature) เท่ากับ 298 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิคอลัมน์ (Column Temperature or Oven Temperature) ซึ่งจะใช้เป็นแบบโปรแกรมอุณหภูมิ (Temperature Program) 1 ขั้นตอน และมีไนโตรเจนเหลวเป็นตัวให้ความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิด้วย 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 มิลลิลิตรต่อนาทีด้วย split ratio เท่ากับ 2

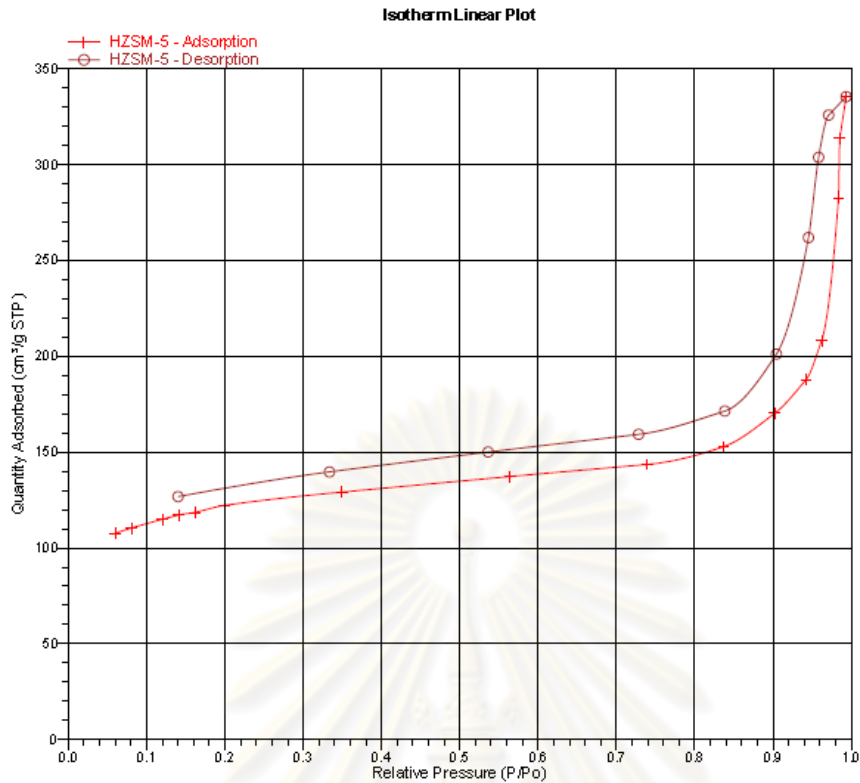
ภาคผนวก ค
สมบัติของ HZSM-5

การหาค่าพื้นที่ผิวของรูพรุนโดยมีค่าต่างๆดังนี้

- น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ 0.0764 g
- การวิเคราะห์การดูดซับจะใช้ N₂
- อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์ -195.727°C
- Warm Free space 28.39 cm³
- Cold Free space 87.0428 cm³

ตารางที่ ค 1 ค่า Isotherm Tabular

Relative Pressure (P/Po)	Absolute Pressure (mmHg)	Quantity Adsorbed (cm ³ /g STP)	Elapsed Time (h:min)	Saturation Pressure (mmHg)
			01:13	766.35388
0.059750848	45.79029	107.5880	01:25	
0.080379314	61.59900	110.3428	01:28	
0.120283866	92.18001	114.9551	01:31	
0.140948266	108.01625	117.1293	01:33	
0.161570195	123.81995	118.5112	01:35	
0.199650054	153.00259 1	122.2092	01:37	
0.349718086	268.00781	129.1237	01:40	
0.564571459	432.66153	137.2494	01:42	
0.739632359	566.82013	143.5457	01:45	
0.836842827	641.31775	152.7991	01:48	
0.902223983	691.42285	170.2150	01:52	
0.942343633	722.16870	187.8285	01:56	
0.962194155	737.38123	208.2036	02:00	
0.983729616	753.88501	282.4556	02:10	
0.985403724	755.16797	313.6502	02:16	
0.993352709	761.25970	335.3957	02:18	
0.971134703	744.23285	325.7762	02:21	
0.958319017	734.41150	303.7467	02:26	
0.945329311	724.45679	261.8626	02:33	
0.904398730	693.08948	201.1126	02:41	
0.838488661	642.57904	171.3549	02:46	
0.728400625	558.21265	159.2313	02:49	
0.536265220	410.96893	149.9926	02:51	



รูปที่ ค1 การ adsorption และ desorption ของ HZSM-5
จากการคำนวณโดยใช้ Kelvin Equation

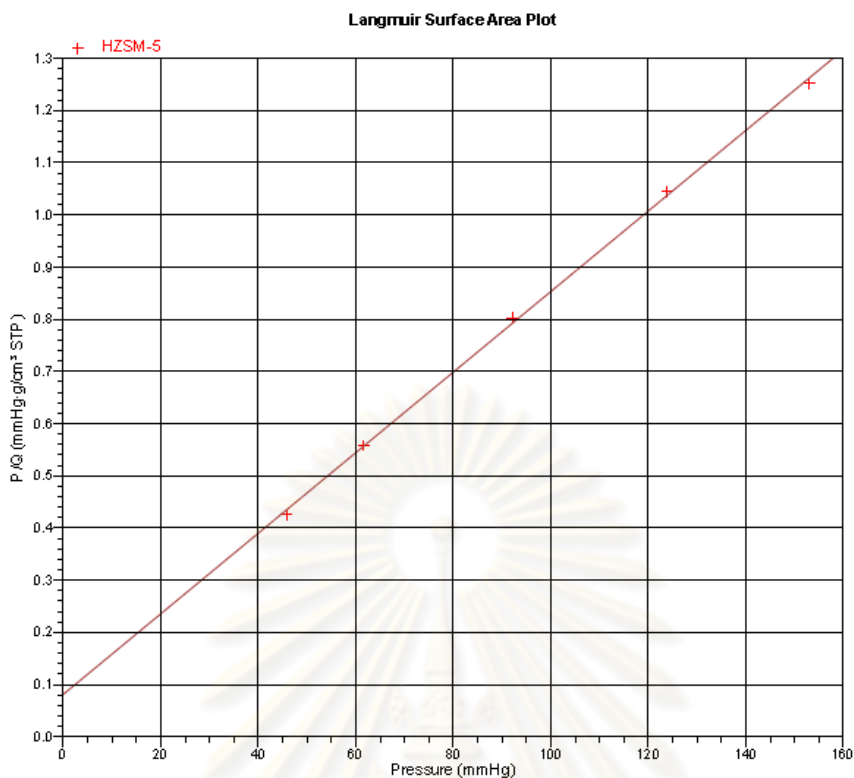
$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{-2\sigma V_m \cos \theta}{r_K RT} \quad (A)$$

- เมื่อ
- P = vapor pressure of liquid over the curved surface
 - P₀ = vapor pressure of liquid a plane surface
 - σ = surface tension of the liquid adsorbate (contact angle)
 - r_K = radius of curvature (Kelvin radius)
 - R = gas constant
 - T = absolute temperature
 - V_m = liquid molal volume

$$r(^{\circ}A) = 9.52 \left(\ln \frac{P_0}{P} \right)^{-1} + \delta \quad (B)$$

เมื่อได้ค่า $\ln P_0/P$ นำมาแทนในสมการจะทราบว่า Pore size เมื่อ ค่า δ หาได้จากสมการ (C)

$$\delta (^{\circ}A) = 7.34 \left(\ln \frac{P_0}{P} \right)^{-1/3} \quad (C)$$



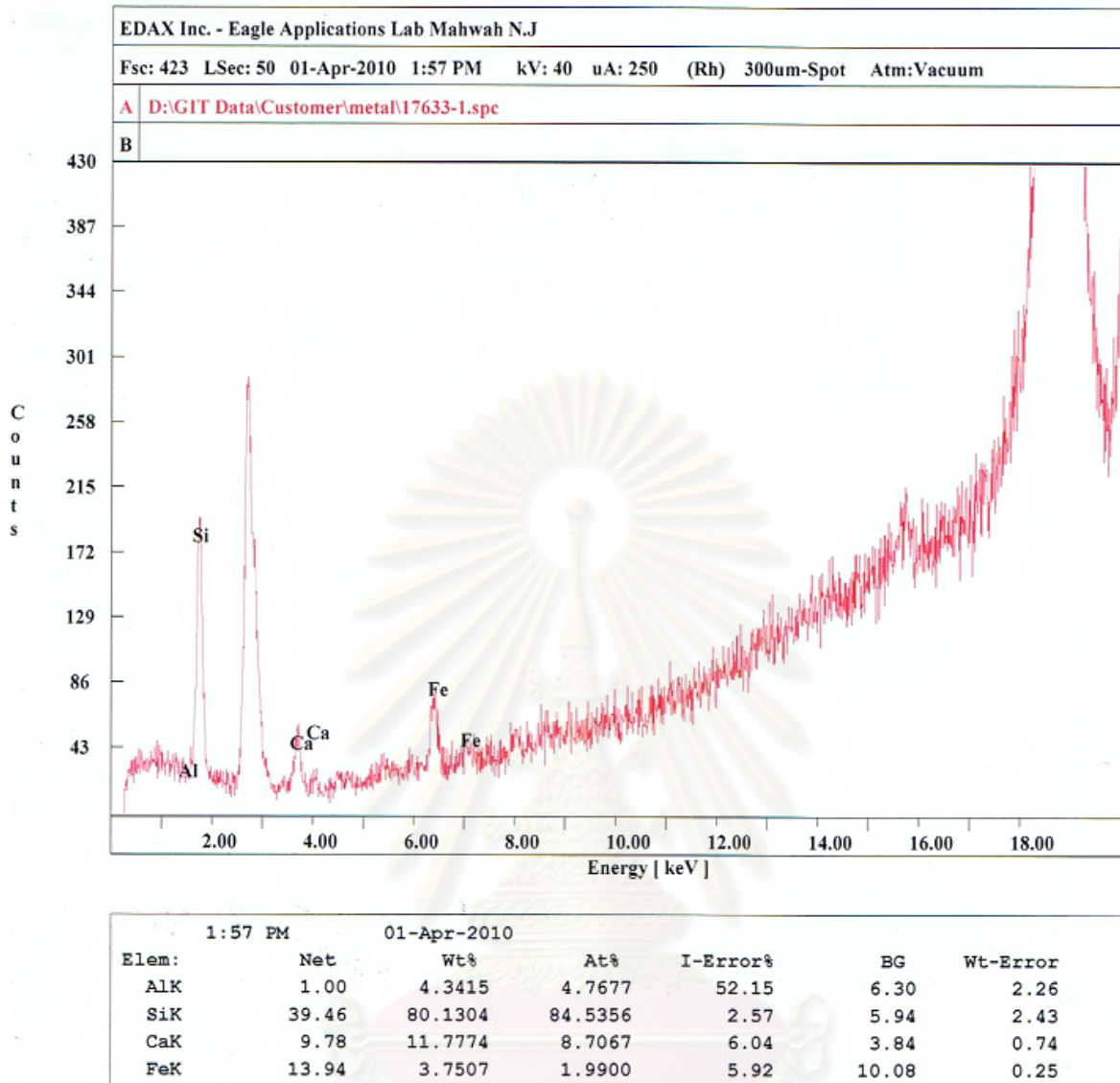
รูปที่ ค 2 ค่าความสัมพันธ์ของความดันกับ P/Q

การหาพื้นที่ของ HZSM-5 หาได้จากสมการ (D)

$$1/\theta_A = 1/K_A \cdot (1/P_A) + 1 \quad (D)$$

เมื่อดำเนินการตามสมการจะได้ค่า surface area เท่ากับ 563.97 m²/g และ pore volume เมื่อ adsorption เท่ากับ 0.485 cm³/g เมื่อ desorption เท่ากับ 0.504 cm³/g

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค 3 ผลจากการวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค XRF
ที่มา : ภาควิชาอัญมณี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อนำ HZSM-5 ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF เพื่อวิเคราะห์หาสารประกอบที่มีอยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการศึกษาและอัตราส่วนของ Si/Al ในองค์ประกอบดังกล่าว จากรูปที่ ค 3 ค่า wt% ของ Al กับ Si มีค่าเท่ากับ 4.3415 และ 80.1304 ตามลำดับ ทำการเปลี่ยนให้เป็นโมลได้ดังนี้

$$\frac{4.3415}{26.981} : \frac{80.1304}{28.0855}$$

$$0.161 : 2.853$$

$$1 : 18$$

แสดงว่าอัตราส่วนของ Si/Al มีค่าเท่ากับ 18 (ที่มาของมวลโมเลกุล: www.wikipedia.org)

ตารางที่ ค 2 ค่า 2 theta และ intensity ของ ZSM-5

ที่มา : Collection of Simulated XRD Powder Patterns For Zeolites , volume 10,page 442s

2th	i	2th	i	2th	i	2th	i	2th	i	2th	i
7.944	63	15.538	10			25.610	3	28.477	3	34.782	2
7.954	47	15.918	6	20.934	9	25.640	1	28.637	1	34.952	2
8.823	29	15.947	5	21.793	3	25.949	14	29.317	12	35.062	1
8.883	34	16.017	3	22.232	6	26.299	1	29.377	1	35.222	1
9.103	24	16.537	2	22.252	1	26.419	2	29.417	1	35.302	1
9.882	4	16.557	1	22.272	2	26.619	1	29.956	1	35.721	1
11.031	1	17.306	3	22.612	1	26.699	3	29.966	8	35.761	1
11.891	3	17.336	1	22.692	1	26.749	6	30.026	1	35.851	3
11.921	10	17.706	2	23.092	4	26.859	3	30.066	9	36.081	2
12.530	5	17.816	5	23.172	100	26.999	10	30.196	1	36.131	2
13.220	6	19.295	8	23.212	1	27.079	1	30.406	7	36.161	2
13.939	16	19.345	2	23.302	79	27.378	1	31.315	2	36.181	1
14.639	8	19.435	1	23.721	31	27.528	1	32.154	1	36.311	1
14.818	10	19.994	3	23.971	48	27.538	4	32.214	1	36.321	1
14.898	4	20.384	12	24.021	4	27.538	4	32.864	5	36.780	1
15.478	1	20.384	12	24.041	2	28.058	1	33.513	1	37.010	1
15.538	10	20.824	3	24.441	40	28.098	1	34.462	7	37.220	1
15.918	6	20.864	4	24.860	1	28.238	1	34.662	1	37.320	3
15.947	5	20.934	9	25.610	3	28.477	3	34.782	2	37.540	1

ตารางที่ ค 2(ต่อ) ค่า 2 theta และ intensity ของ ZSM-5

2th	i	2th	i	2th	i	2th	i
37.540	1	45.553	9	51.707	1	53.475	1
37.590	2	45.642	3	51.777	1	53.945	1
37.630	2	46.312	1	51.947	1	54.834	1
37.769	1	46.342	1	51.976	1	55.043	2
38.369	1	46.601	4	52.126	2	55.113	3
38.809	2	47.471	2	52.546	1	55.253	1
40.407	1	47.511	1	52.886	1	55.273	1
41.046	1	47.641	1	53.475	1	55.353	1
42.535	1	47.660	2	53.945	1	55.423	1
42.885	1	48.550	1	54.834	1	55.483	3
42.965	1	48.670	2	55.043	2	55.933	1
43.305	1	48.710	4	55.113	3	56.142	1
43.624	2	49.559	1	55.253	1	56.832	1
43.794	1	49.589	1	55.273	1	56.862	1
45.213	7	49.848	1	55.353	1	57.191	1
45.253	7	50.048	1	55.423	1	57.391	1
45.403	3	50.268	1	55.483	3	58.560	1
45.483	4	51.507	1	55.933	1	59.040	1
45.553	9	51.707	1	56.142	1	59.159	1

ตารางที่ ค 3 ค่า 2 theta และ intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

2th	i	2th	i	2th	i	2th	i
7.06	8.3333	8.22	33.333	9.38	16.667	10.54	8.3333
7.08	5	8.24	35	9.4	13.333	10.56	5
7.1	3.3333	8.26	45	9.42	6.6667	10.58	3.3333
7.12	3.3333	8.28	26.667	9.44	5	10.6	8.3333
7.14	6.6667	8.3	21.667	9.46	1.6667	10.62	1.6667
7.16	6.6667	8.32	23.333	9.48	5	10.64	5
7.18	6.6667	8.34	21.667	9.5	11.667	10.66	6.6667
7.2	6.6667	8.36	28.333	9.52	11.667	10.68	5
7.22	6.6667	8.38	15	9.54	13.333	10.7	1.6667
7.24	3.3333	8.4	23.333	9.56	5	10.72	5
7.26	1.6667	8.42	13.333	9.58	15	10.74	1.6667
7.28	8.3333	8.44	6.6667	9.6	10	10.76	6.6667
7.3	10	8.46	20	9.62	6.6667	10.78	3.3333
7.32	3.3333	8.48	18.333	9.64	8.3333	10.8	3.3333
7.34	11.667	8.5	11.667	9.66	1.6667	10.82	1.6667
7.36	1.6667	8.52	8.3333	9.68	18.333	10.84	3.3333
7.38	1.6667	8.54	3.3333	9.7	11.667	10.86	6.6667
7.4	11.667	8.56	16.667	9.72	8.3333	10.88	0.05
7.42	6.6667	8.58	16.667	9.74	13.333	10.9	6.6667
7.44	1.6667	8.6	21.667	9.76	10	10.92	3.3333
7.46	10	8.62	15	9.78	10	10.94	6.6667
7.48	5	8.64	16.667	9.8	6.6667	10.96	6.6667
7.5	13.333	8.66	15	9.82	3.3333	10.98	3.3333
7.52	8.3333	8.68	23.333	9.84	5	11	8.3333
7.54	15	8.7	33.333	9.86	11.667	11.02	5
7.56	6.6667	8.72	26.667	9.88	8.3333	11.04	8.3333
7.58	8.3333	8.74	35	9.9	1.6667	11.06	3.3333
7.6	13.333	8.76	51.667	9.92	10	11.08	3.3333
7.62	6.6667	8.78	56.667	9.94	3.3333	11.1	6.6667
7.64	20	8.8	53.333	9.96	8.3333	11.12	13.333
7.66	33.333	8.82	91.667	9.98	6.6667	11.14	6.6667
7.68	13.333	8.84	103.33	10	8.3333	11.16	10
7.7	18.333	8.86	120	10.02	11.667	11.18	6.6667
7.72	21.667	8.88	113.33	10.04	6.6667	11.2	6.6667
7.74	16.667	8.9	148.33	10.06	3.3333	11.22	6.6667
7.76	30	8.92	141.67	10.08	6.6667	11.24	5
7.78	26.667	8.94	170	10.1	3.3333	11.26	3.3333
7.8	45	8.96	161.67	10.12	1.6667	11.28	3.3333
7.82	58.333	8.98	128.33	10.14	3.3333	11.3	11.667
7.84	40	9	123.33	10.16	3.3333	11.32	0.05
7.86	63.333	9.02	108.33	10.18	3.3333	11.34	5
7.88	80	9.04	125	10.2	5	11.36	5
7.9	100	9.06	108.33	10.22	6.6667	11.38	1.6667
7.92	115	9.08	80	10.24	8.3333	11.4	3.3333
7.94	126.67	9.1	80	10.26	10	11.42	5
7.96	156.67	9.12	76.667	10.28	1.6667	11.44	5
7.98	186.67	9.14	68.333	10.3	8.3333	11.46	3.3333
8	190	9.16	70	10.32	3.3333	11.48	1.6667
8.02	236.67	9.18	70	10.34	3.3333	11.5	10
8.04	255	9.2	56.667	10.36	3.3333	11.52	5
8.06	248.33	9.22	53.333	10.38	6.6667	11.54	5
8.08	230	9.24	38.333	10.4	6.6667	11.56	6.6667
8.1	208.33	9.26	45	10.42	5	11.58	5
8.12	155	9.28	26.667	10.44	5	11.6	5
8.14	116.67	9.3	33.333	10.46	3.3333	11.62	6.6667
8.16	106.67	9.32	25	10.48	5	11.64	8.3333
8.18	85	9.34	31.667	10.5	3.3333	11.66	6.6667
8.2	70	9.36	25	10.52	1.6667	11.68	6.6667

ตารางที่ ค 3(ต่อ) ค่า 2 theta และ intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

2th	i	2th	i	2th	i	2th	i
11.7	11.667	12.86	3.3333	14.02	53.333	15.18	10
11.72	6.6667	12.88	5	14.04	33.333	15.2	10
11.74	8.3333	12.9	6.6667	14.06	46.667	15.22	20
11.76	8.3333	12.92	6.6667	14.08	56.667	15.24	18.333
11.78	1.6667	12.94	5	14.1	41.667	15.26	11.667
11.8	8.3333	12.96	8.3333	14.12	41.667	15.28	20
11.82	11.667	12.98	8.3333	14.14	33.333	15.3	6.6667
11.84	10	13	3.3333	14.16	25	15.32	15
11.86	8.3333	13.02	5	14.18	26.667	15.34	10
11.88	10	13.04	10	14.2	21.667	15.36	16.667
11.9	15	13.06	1.6667	14.22	11.667	15.38	10
11.92	20	13.08	10	14.24	13.333	15.4	5
11.94	10	13.1	6.6667	14.26	15	15.42	11.667
11.96	28.333	13.12	8.3333	14.28	11.667	15.44	16.667
11.98	13.333	13.14	11.667	14.3	13.333	15.46	13.333
12	20	13.16	6.6667	14.32	1.6667	15.48	11.667
12.02	25	13.18	21.667	14.34	16.667	15.5	15
12.04	13.333	13.2	5	14.36	5	15.52	16.667
12.06	6.6667	13.22	15	14.38	11.667	15.54	18.333
12.08	20	13.24	15	14.4	5	15.56	31.667
12.1	11.667	13.26	21.667	14.42	10	15.58	50
12.12	18.333	13.28	26.667	14.44	11.667	15.6	46.667
12.14	10	13.3	26.667	14.46	3.3333	15.62	46.667
12.16	11.667	13.32	23.333	14.48	6.6667	15.64	48.333
12.18	11.667	13.34	20	14.5	11.667	15.66	40
12.2	6.6667	13.36	23.333	14.52	6.6667	15.68	56.667
12.22	3.3333	13.38	16.667	14.54	13.333	15.7	63.333
12.24	6.6667	13.4	25	14.56	10	15.72	26.667
12.26	8.3333	13.42	20	14.58	8.3333	15.74	38.333
12.28	3.3333	13.44	10	14.6	8.3333	15.76	31.667
12.3	6.6667	13.46	11.667	14.62	6.6667	15.78	35
12.32	8.3333	13.48	15	14.64	16.667	15.8	31.667
12.34	5	13.5	16.667	14.66	23.333	15.82	25
12.36	5	13.52	11.667	14.68	16.667	15.84	30
12.38	3.3333	13.54	10	14.7	36.667	15.86	23.333
12.4	6.6667	13.56	8.3333	14.72	35	15.88	25
12.42	11.667	13.58	13.333	14.74	26.667	15.9	25
12.44	8.3333	13.6	10	14.76	26.667	15.92	50
12.46	8.3333	13.62	11.667	14.78	46.667	15.94	38.333
12.48	10	13.64	11.667	14.8	43.333	15.96	41.667
12.5	6.6667	13.66	6.6667	14.82	43.333	15.98	41.667
12.52	13.333	13.68	11.667	14.84	40	16	40
12.54	11.667	13.7	6.6667	14.86	53.333	16.02	63.333
12.56	26.667	13.72	5	14.88	78.333	16.04	40
12.58	10	13.74	5	14.9	40	16.06	68.333
12.6	10	13.76	13.333	14.92	58.333	16.08	53.333
12.62	6.6667	13.78	15	14.94	61.667	16.1	53.333
12.64	13.333	13.8	11.667	14.96	61.667	16.12	40
12.66	13.333	13.82	18.333	14.98	31.667	16.14	40
12.68	10	13.84	11.667	15	46.667	16.16	36.667
12.7	5	13.86	30	15.02	35	16.18	28.333
12.72	6.6667	13.88	11.667	15.04	30	16.2	26.667
12.74	3.3333	13.9	11.667	15.06	20	16.22	11.667
12.76	11.667	13.92	30	15.08	36.667	16.24	20
12.78	10	13.94	20	15.1	15	16.26	16.667
12.8	10	13.96	13.333	15.12	15	16.28	13.333
12.82	3.3333	13.98	35	15.14	21.667	16.3	21.667
12.84	15	14	50	15.16	16.667	16.32	16.667

ตารางที่ ค 3(ต่อ) ค่า 2 theta และ intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

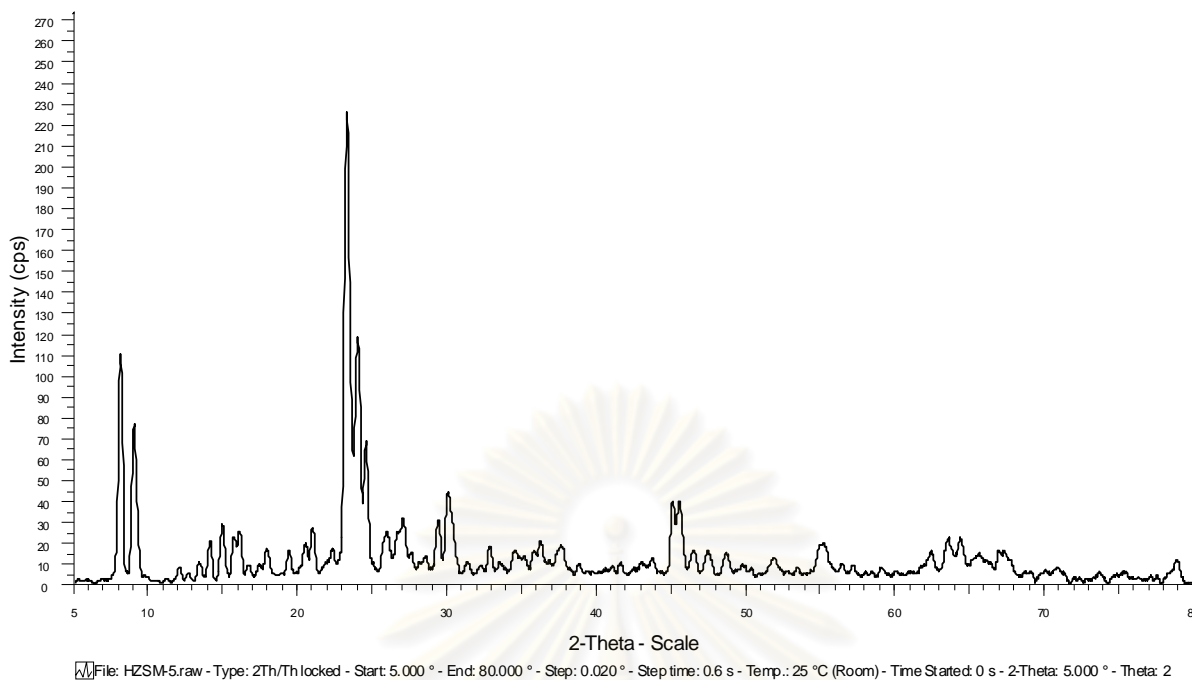
2th	i	2th	i	2th	i	2th	i
16.34	13.333	17.5	16.667	18.66	16.667	19.82	15
16.36	8.3333	17.52	10	18.68	16.667	19.84	16.667
16.38	3.3333	17.54	16.667	18.7	10	19.86	13.333
16.4	6.6667	17.56	10	18.72	10	19.88	8.3333
16.42	16.667	17.58	21.667	18.74	8.3333	19.9	16.667
16.44	15	17.6	18.333	18.76	11.667	19.92	10
16.46	3.3333	17.62	11.667	18.78	15	19.94	23.333
16.48	16.667	17.64	31.667	18.8	13.333	19.96	18.333
16.5	15	17.66	23.333	18.82	13.333	19.98	13.333
16.52	16.667	17.68	11.667	18.84	6.6667	20	13.333
16.54	18.333	17.7	20	18.86	15	20.02	15
16.56	18.333	17.72	33.333	18.88	10	20.04	16.667
16.58	11.667	17.74	18.333	18.9	16.667	20.06	20
16.6	18.333	17.76	20	18.92	10	20.08	8.3333
16.62	30	17.78	18.333	18.94	13.333	20.1	6.6667
16.64	21.667	17.8	40	18.96	20	20.12	23.333
16.66	26.667	17.82	33.333	18.98	20	20.14	25
16.68	23.333	17.84	38.333	19	10	20.16	23.333
16.7	10	17.86	23.333	19.02	16.667	20.18	26.667
16.72	18.333	17.88	30	19.04	13.333	20.2	16.667
16.74	11.667	17.9	28.333	19.06	13.333	20.22	28.333
16.76	11.667	17.92	45	19.08	8.3333	20.24	30
16.78	23.333	17.94	35	19.1	8.3333	20.26	15
16.8	10	17.96	28.333	19.12	13.333	20.28	25
16.82	5	17.98	31.667	19.14	11.667	20.3	15
16.84	16.667	18	30	19.16	15	20.32	20
16.86	13.333	18.02	28.333	19.18	15	20.34	33.333
16.88	11.667	18.04	26.667	19.2	15	20.36	36.667
16.9	18.333	18.06	25	19.22	18.333	20.38	26.667
16.92	11.667	18.08	13.333	19.24	25	20.4	38.333
16.94	11.667	18.1	8.3333	19.26	26.667	20.42	33.333
16.96	10	18.12	13.333	19.28	26.667	20.44	50
16.98	5	18.14	16.667	19.3	41.667	20.46	50
17	13.333	18.16	23.333	19.32	35	20.48	41.667
17.02	5	18.18	13.333	19.34	33.333	20.5	36.667
17.04	11.667	18.2	18.333	19.36	30	20.52	38.333
17.06	13.333	18.22	18.333	19.38	45	20.54	40
17.08	10	18.24	13.333	19.4	33.333	20.56	36.667
17.1	6.6667	18.26	11.667	19.42	35	20.58	25
17.12	11.667	18.28	11.667	19.44	21.667	20.6	28.333
17.14	8.3333	18.3	10	19.46	25	20.62	28.333
17.16	15	18.32	13.333	19.48	21.667	20.64	23.333
17.18	8.3333	18.34	20	19.5	20	20.66	15
17.2	10	18.36	8.3333	19.52	26.667	20.68	21.667
17.22	26.667	18.38	11.667	19.54	18.333	20.7	35
17.24	18.333	18.4	11.667	19.56	15	20.72	20
17.26	15	18.42	11.667	19.58	5	20.74	15
17.28	11.667	18.44	16.667	19.6	23.333	20.76	31.667
17.3	28.333	18.46	10	19.62	21.667	20.78	30
17.32	23.333	18.48	5	19.64	15	20.8	36.667
17.34	13.333	18.5	20	19.66	11.667	20.82	33.333
17.36	21.667	18.52	8.3333	19.68	16.667	20.84	41.667
17.38	28.333	18.54	5	19.7	11.667	20.86	43.333
17.4	13.333	18.56	16.667	19.72	20	20.88	36.667
17.42	16.667	18.58	13.333	19.74	16.667	20.9	36.667
17.44	20	18.6	6.6667	19.76	10	20.92	55
17.46	18.333	18.62	13.333	19.78	6.6667	20.94	63.333
17.48	20	18.64	5	19.8	6.6667	20.96	61.667

ตารางที่ ค 3(ต่อ) ค่า 2 theta และ intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

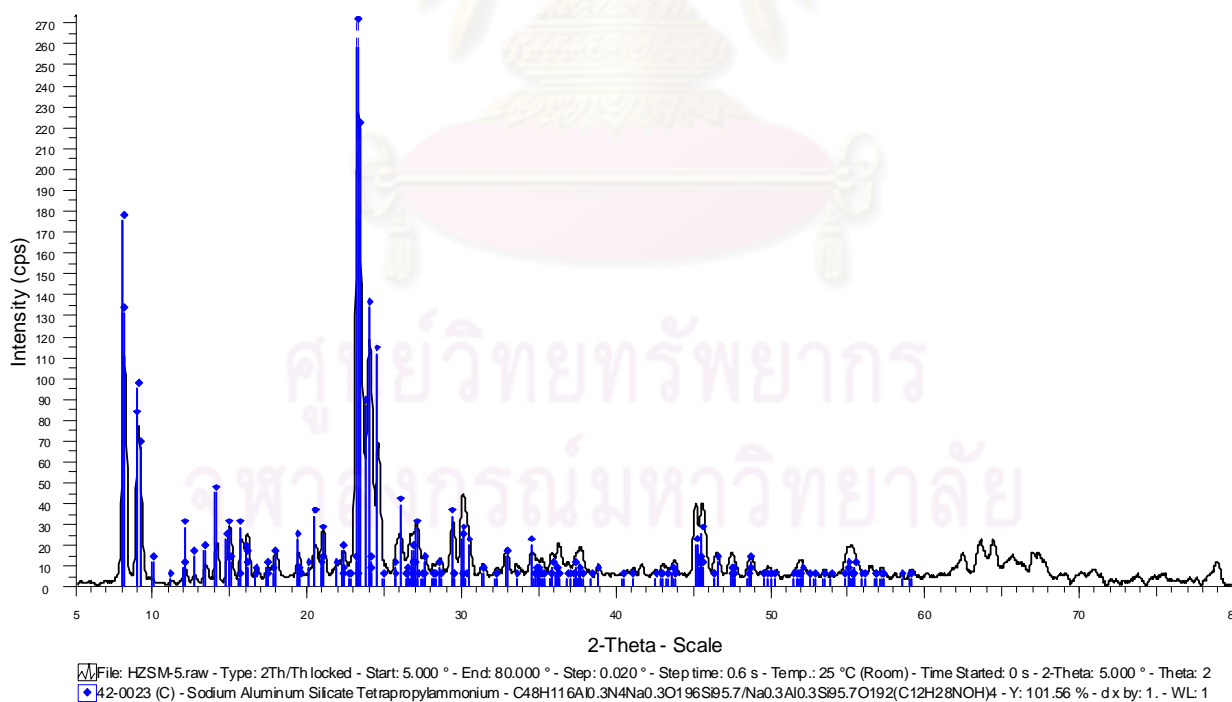
2th	i	2th	i	2th	i	2th	i
20.98	68.333	22.14	25	23.3	348.33	26.46	20
21	48.333	22.16	20	23.32	288.33	26.48	30
21.02	51.667	22.18	30	23.34	303.33	26.5	31.667
21.04	50	22.2	21.667	23.36	305	26.52	35
21.06	45	22.22	31.667	23.38	296.67	26.54	30
21.08	35	22.24	38.333	23.4	320	26.56	33.333
21.1	28.333	22.26	40	23.42	313.33	26.58	53.333
21.12	15	22.28	35	23.44	253.33	26.6	50
21.14	21.667	22.3	36.667	23.46	253.33	26.62	35
21.16	35	22.32	36.667	23.48	265	26.64	45
21.18	31.667	22.34	33.333	23.5	200	26.66	75
21.2	20	22.36	30	23.52	183.33	26.68	51.667
21.22	10	22.38	38.333	23.54	168.33	26.7	48.333
21.24	21.667	22.4	35	23.56	125	26.72	41.667
21.26	10	22.42	18.333	23.58	110	26.74	65
21.28	16.667	22.44	20	23.6	110	26.76	46.667
21.3	13.333	22.46	16.667	23.62	78.333	26.78	31.667
21.32	8.3333	22.48	20	23.64	83.333	26.8	41.667
21.34	15	22.5	25	23.66	96.667	26.82	46.667
21.36	10	22.52	10	23.68	105	26.84	41.667
21.38	8.3333	22.54	28.333	23.7	130	26.86	48.333
21.4	15	22.56	18.333	23.72	86.667	26.88	46.667
21.42	25	22.58	20	23.74	148.33	26.9	38.333
21.44	20	22.6	20	23.76	131.67	26.92	45
21.46	15	22.62	16.667	23.78	131.67	26.94	63.333
21.48	18.333	22.64	23.333	23.8	170	26.96	51.667
21.5	5	22.66	31.667	23.82	161.67	26.98	61.667
21.52	8.3333	22.68	25	23.84	161.67	27	75
21.54	21.667	22.7	33.333	23.86	141.67	27.02	55
21.56	13.333	22.72	26.667	23.88	153.33	27.04	51.667
21.58	11.667	22.74	25	23.9	215	27.06	58.333
21.6	20	22.76	40	23.92	150	27.08	51.667
21.62	30	22.78	11.667	23.94	175	27.1	63.333
21.64	18.333	22.8	30	23.96	211.67	27.12	71.667
21.66	21.667	22.82	23.333	23.98	215	27.14	56.667
21.68	16.667	22.84	33.333	24	198.33	27.16	41.667
21.7	20	22.86	43.333	24.02	206.67	27.18	36.667
21.72	13.333	22.88	48.333	24.04	208.33	27.2	46.667
21.74	13.333	22.9	50	24.06	208.33	27.22	30
21.76	21.667	22.92	61.667	24.08	226.67	27.24	25
21.78	11.667	22.94	51.667	24.1	211.67	27.26	25
21.8	31.667	22.96	61.667	24.12	176.67	27.28	28.333
21.82	18.333	22.98	93.333	24.14	143.33	27.3	35
21.84	13.333	23	125	24.16	100	27.32	41.667
21.86	38.333	23.02	123.33	24.18	136.67	27.34	36.667
21.88	23.333	23.04	166.67	24.2	73.333	27.36	16.667
21.9	21.667	23.06	143.33	24.22	70	27.38	15
21.92	20	23.08	218.33	24.24	70	27.4	36.667
21.94	30	23.1	276.67	24.26	76.667	27.42	28.333
21.96	23.333	23.12	283.33	24.28	58.333	27.44	36.667
21.98	26.667	23.14	345	24.3	61.667	27.46	30
22	25	23.16	453.33	24.32	41.667	27.48	31.667
22.02	23.333	23.18	398.33	24.34	86.667	27.5	23.333
22.04	26.667	23.2	456.67	24.36	83.333	27.52	33.333
22.06	18.333	23.22	441.67	24.38	68.333	27.54	35
22.08	13.333	23.24	423.33	24.4	86.667	27.56	20
22.1	25	23.26	360	24.42	100	27.58	21.667
22.12	30	23.28	350	24.44	88.333	27.6	38.333

ตารางที่ ค 3(ต่อ) ค่า 2 theta และ intensity ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง

2th	i	2th	i	2th	i	2th	i
27.62	21.667	28.78	26.667	29.94	71.667	31.1	13.333
27.64	25	28.8	20	29.96	91.667	31.12	21.667
27.66	45	28.82	25	29.98	86.667	31.14	11.667
27.68	36.667	28.84	15	30	86.667	31.16	26.667
27.7	28.333	28.86	11.667	30.02	116.67	31.18	18.333
27.72	16.667	28.88	15	30.04	81.667	31.2	23.333
27.74	31.667	28.9	18.333	30.06	81.667	31.22	20
27.76	23.333	28.92	21.667	30.08	56.667	31.24	18.333
27.78	18.333	28.94	13.333	30.1	88.333	31.26	23.333
27.8	10	28.96	21.667	30.12	60	31.28	20
27.82	21.667	28.98	13.333	30.14	71.667	31.3	31.667
27.84	11.667	29	23.333	30.16	65	31.32	21.667
27.86	10	29.02	23.333	30.18	73.333	31.34	25
27.88	16.667	29.04	30	30.2	66.667	31.36	23.333
27.9	21.667	29.06	23.333	30.22	63.333	31.38	25
27.92	13.333	29.08	16.667	30.24	66.667	31.4	36.667
27.94	18.333	29.1	25	30.26	68.333	31.42	23.333
27.96	36.667	29.12	20	30.28	81.667	31.44	20
27.98	20	29.14	23.333	30.3	56.667	31.46	25
28	30	29.16	18.333	30.32	55	31.48	23.333
28.02	15	29.18	25	30.34	56.667	31.5	20
28.04	25	29.2	33.333	30.36	60	31.52	21.667
28.06	11.667	29.22	46.667	30.38	58.333	31.54	18.333
28.08	18.333	29.24	51.667	30.4	50	31.56	16.667
28.1	26.667	29.26	38.333	30.42	45	31.58	18.333
28.12	20	29.28	48.333	30.44	50	31.6	16.667
28.14	25	29.3	50	30.46	48.333	31.62	18.333
28.16	23.333	29.32	33.333	30.48	36.667	31.64	18.333
28.18	21.667	29.34	80	30.5	38.333	31.66	11.667
28.2	23.333	29.36	55	30.52	46.667	31.68	18.333
28.22	31.667	29.38	56.667	30.54	30	31.7	13.333
28.24	26.667	29.4	61.667	30.56	50	31.72	11.667
28.26	30	29.42	65	30.58	35	31.74	13.333
28.28	21.667	29.44	56.667	30.6	33.333	31.76	20
28.3	13.333	29.46	58.333	30.62	33.333	31.78	13.333
28.32	15	29.48	63.333	30.64	30	31.8	23.333
28.34	23.333	29.5	40	30.66	18.333	31.82	10
28.36	20	29.52	38.333	30.68	20	31.84	15
28.38	30	29.54	50	30.7	21.667	31.86	18.333
28.4	23.333	29.56	41.667	30.72	13.333	31.88	8.3333
28.42	21.667	29.58	26.667	30.74	21.667	31.9	16.667
28.44	23.333	29.6	25	30.76	13.333	31.92	6.6667
28.46	33.333	29.62	23.333	30.78	31.667	31.94	23.333
28.48	28.333	29.64	33.333	30.8	13.333	31.96	18.333
28.5	28.333	29.66	31.667	30.82	21.667	31.98	23.333
28.52	23.333	29.68	18.333	30.84	21.667	32	15
28.54	40	29.7	43.333	30.86	11.667	32.02	11.667
28.56	28.333	29.72	25	30.88	18.333	32.04	13.333
28.58	33.333	29.74	23.333	30.9	11.667	32.06	11.667
28.6	18.333	29.76	21.667	30.92	15	32.08	25
28.62	35	29.78	25	30.94	16.667	32.1	20
28.64	26.667	29.8	36.667	30.96	13.333	32.12	16.667
28.66	21.667	29.82	43.333	30.98	11.667	32.14	26.667
28.68	26.667	29.84	43.333	31	16.667	32.16	16.667
28.7	16.667	29.86	55	31.02	13.333	32.18	21.667
28.72	11.667	29.88	55	31.04	15	32.2	30
28.74	20	29.9	53.333	31.06	25	32.22	30
28.76	28.333	29.92	58.333	31.08	18.333	32.24	13.333



รูปที่ ค 4 ผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD
ที่มา : ภาควิชาธรณี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค 5 ผลจากการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD เปรียบเทียบกับ

ZSM-5

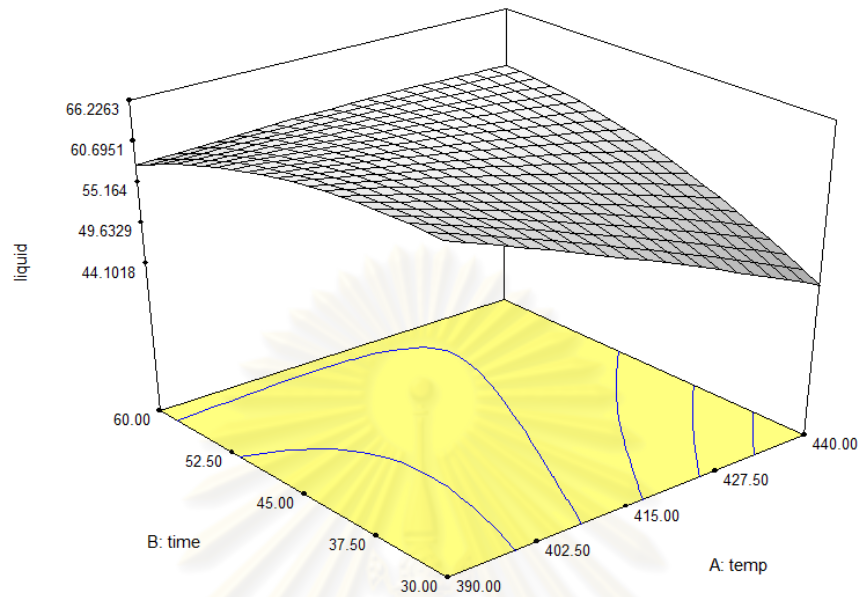
ที่มา : ภาควิชาธรณี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะพบว่าเมื่อนำค่า 2 theta ของ ZSM-5 เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ใช้ในการทดลองจะพบว่าค่าที่ทำให้ intensity ของแต่ละตัวมีค่ามากอยู่ตรงตำแหน่งของ 2 theta ที่เหมือนกัน ดังนี้คือที่ 2 theta เท่ากับ 7.94-7.96, 8.88-8.92, 23.16-23.2, 23.3, 23.96-23.98 และเมื่อนำกราฟของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองมาเทียบกับ ZSM-5 จาก Collection of Simulated XRD Powder Patterns For Zeolites พบว่ามีความคล้ายกัน สามารถสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นสารประกอบ ZSM-5

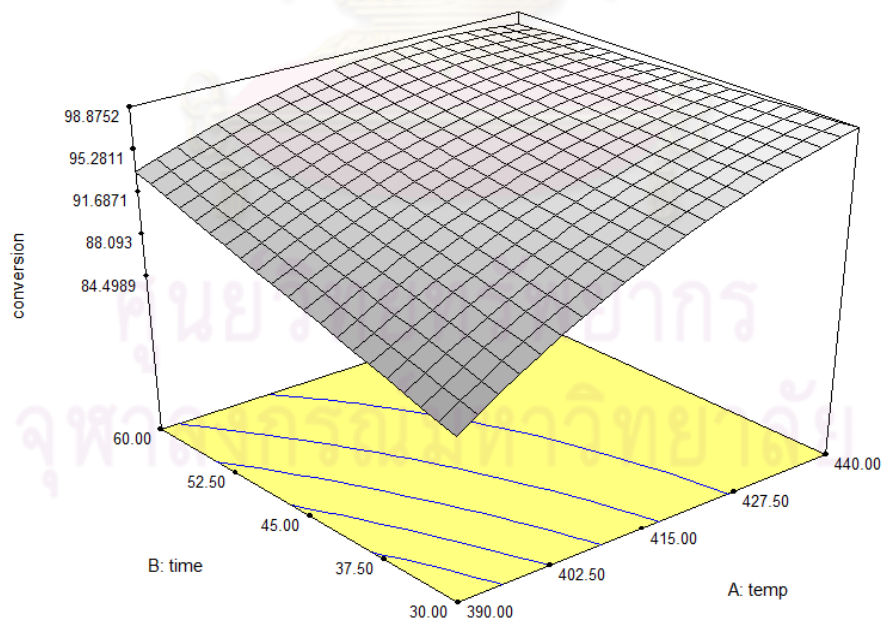


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

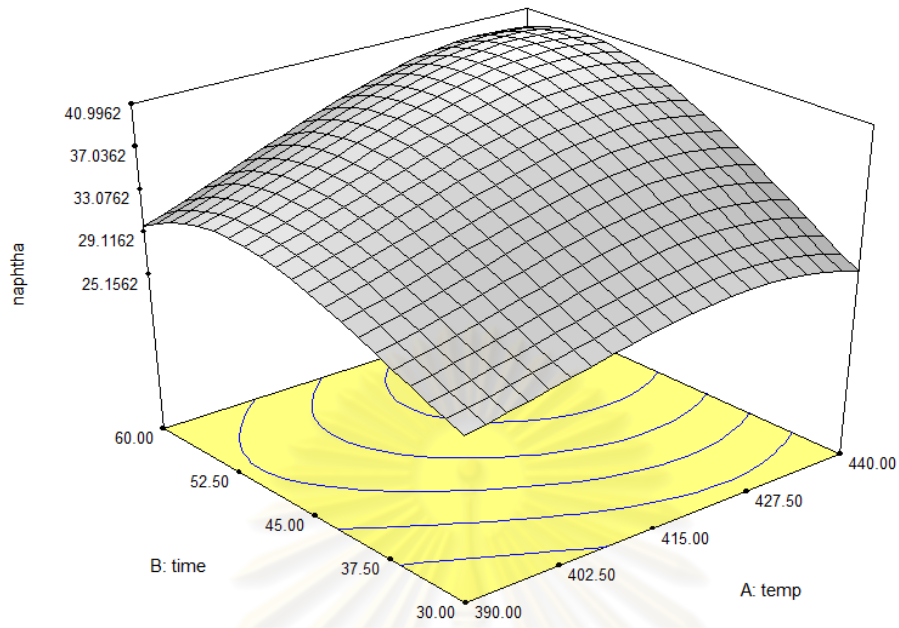
ภาคผนวก ง
 พื้นผิวตอบสนองของค่าตอบสนองชนิดต่างๆ



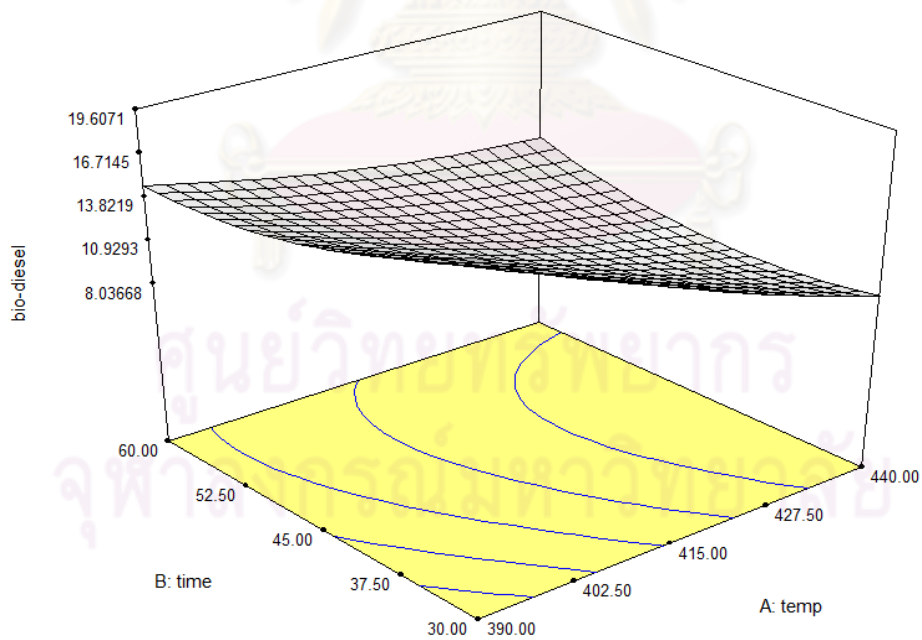
รูปที่ ง 1 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิงเหลว



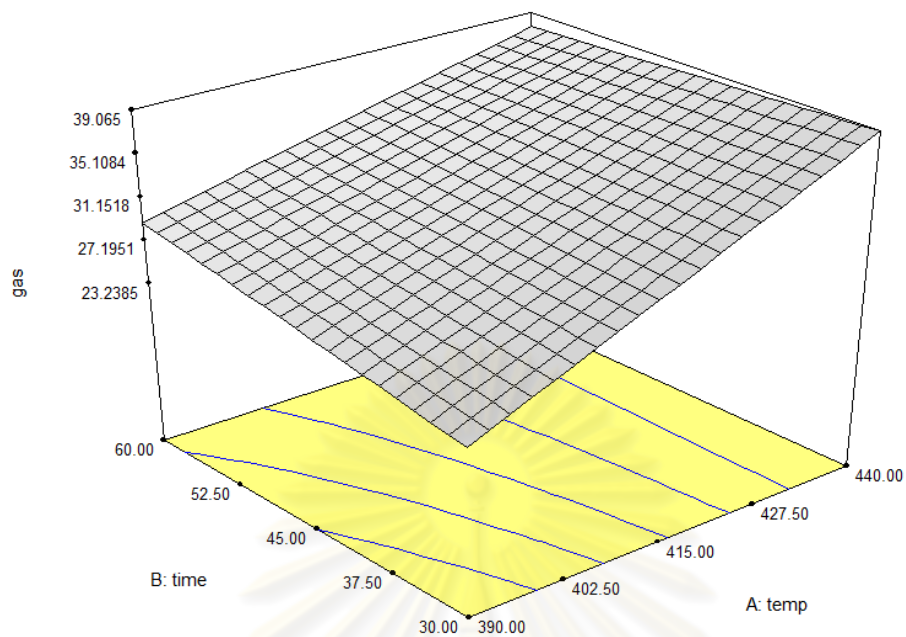
รูปที่ ง 2 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละการเปลี่ยน



รูปที่ 3 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของแนฟทา



รูปที่ 4 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของดีเซล



รูปที่ 5 พื้นผิวตอบสนองของร้อยละผลได้ของแก๊ส

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรวีวรรณ สวัสดิ์รักษา เกิดเมื่อวันที่ 30 เมษายน 2529 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย