

การแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



นางสาวพัชรกัญญ์ สุขามาลางษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CRACKING OF POLYETHYLENE AND POLYPROPYLENE ON SPENT FCC CATALYST



Miss Pucharakan Suchamalawong

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

การแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนบนตัวเร่ง
ปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

โดย

นางสาวพัชรกัญญ์ สุขามาลาวงษ์

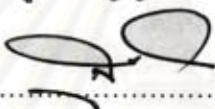
สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

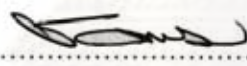
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

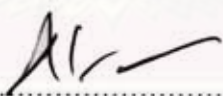
รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

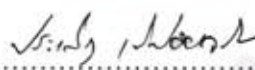
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต



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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)


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


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

พัชรกันย์ สุขามาลาวงษ์ : การแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา
เอฟซีซีใช้แล้ว (CRACKING OF POLYETHYLENE AND POLYPROPYLENE ON
SPENT FCC CATALYST) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์,
149 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี
ใช้แล้ว ทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ขนาด 70 มิลลิลิตร ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย
อุณหภูมิ 400-460 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30-75 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น
1-5 บาร์ และปริมาณของตัวเร่ง ปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วร้อยละ 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้การ
ทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับศึกษา อิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์
น้ำมัน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ดีที่สุด โดยนำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มาวิเคราะห์ปริมาณของน้ำมันที่
เกิดขึ้นด้วยเครื่อง Simulate Distillation Gas Chromatography (DGC)จากการคำนวณด้วย
โปรแกรม design-expert 6.0.10 พบว่า ภาวะที่เหมาะสม ในการแตกตัวของพอลิเอทิลีน คือ
อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 75 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซี
ใช้แล้ว 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ให้ ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดการ
แตกตัว 86.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณสัดส่วนของแนฟทาและดีเซล 31.73 และ 23.09
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิโพรพิลีน คือ อุณหภูมิ
400 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว 1
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ภาวะการทดลองนี้ให้ผลิตภัณฑ์น้ำ
มันที่เกิด การแตกตัว 78.73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีปริมาณสัดส่วนของแนฟทาและดีเซล 51.26
และ 17.39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5172380823 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS : CATALYTIC CRACKING / POLYETHYLENE / POLYPROPYLENE / SPENT FCC CATALYST

PUTCHARAKAN SUCHAMALAWONG : CRACKING OF POLYETHYLENE AND POLYPROPYLENE ON SPENT FCC CATALYST. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.THARAPONG VITIDSANT, Ph.D., 123 pp.

This research work is to study the catalytic cracking of polyethylene and polypropylene with spent FCC catalyst in a batch microreactor of 70 ml. The experiment was carried out under various condition by the following variables : reaction temperature of 400-460 °C, reaction time of 30-75 min, initial hydrogen pressure of 1-5 bars, amount of spent FCC catalyst ranging from 1-5 % by weight. The two level factorial experimental design was performed to investigate the effect of variables of oil yield to determine the optimum condition. The product oil was analyzed by Simulated Distillation Gas Chromatography (DGC). From design-expert program, it was found that reaction of polyethylene is temperature of 420°C, reaction time of 75 min by using 1 percent by weight of spent FCC and initial pressure of hydrogen 5 bar gave the highest yield. The oil yield was 86.75 percent by weight, the naphtha yield was 31.73 percent by weight, the diesel yield was 23.09 percent by weight. In the reaction of polypropylene show that temperature of 400°C, reaction time 30 min by using 1 percent by weight of spent FCC and initial pressure of hydrogen 5 bar gave the highest yield. The oil yield was 78.73 percent by weight, the naphtha yield was 51.26 percent by weight, the diesel yield was 17.39 percent by weight.

Department : ..Chemical Technology.....

Student's Signature S. Putcharakan

Field of Study : ..Chemical Technology.....

Advisor's Signature T. Vitidsant

Academic Year : ..2009.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิค

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

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเงินทุนจากศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติ ด้านปิโตรเลียมปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ซึ่งต้องขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณบุคลากรในภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่อบรมเลี้ยงดู สั่งสอน ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย _____	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ _____	จ
กิตติกรรมประกาศ _____	ฉ
สารบัญ _____	ช
สารบัญตาราง _____	ญ
สารบัญรูปภาพ _____	ฐ
บทที่ 1 บทนำ _____	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย _____	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย _____	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ _____	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง _____	3
2.1 พอลิเมอร์ _____	3
2.2 พลาสติก _____	5
2.2.1 สมบัติของพลาสติก _____	6
2.3 พอลิเอทิลีน _____	6
2.3.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง _____	8
2.3.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง _____	10
2.3.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ _____	11
2.3.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น _____	11
2.3.5 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก _____	13
2.3.6 พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง _____	13
2.4 พอลิโพรพิลีน _____	13
2.4.2 สมบัติทางเคมีของพอลิโพรพิลีน _____	14
2.4.3 ประเภทของพอลิโพรพิลีน _____	14
2.4.4 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากพอลิโพรพิลีน _____	16
2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา _____	17
2.5.1 ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยา _____	17
2.5.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา _____	17

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.3 ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยา	17
2.5.4 ประเภทของปฏิกิริยาคะตะไลซิส	18
2.6 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	19
2.6.1 ทฤษฎีการชน	19
2.6.2 ทฤษฎีทรานซิชันสเตต	20
2.7 ปฏิกิริยาคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์	21
2.8 ซีโอไลต์	22
2.9 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา	24
2.10 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา	25
2.11 ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน	29
2.11.1 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน	29
2.11.2 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	30
2.11.3 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนการแตกตัวโดย ใช้ไฮโดรเจนร่วม	33
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง	39
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	39
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี	43
3.3 การดำเนินงานวิจัย	43
3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	48
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	49
4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น	49
4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทิสีซีใช้แล้ว ด้วยเทคนิค XRE	49
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทิสีซีใช้แล้ว ด้วยเทคนิค XRD	50
4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรุกรุนทั้งหมด (Surface Area) ของตัวเร่ง ปฏิกิริยาเอพทิสีซีใช้แล้ว	51

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2 การกำหนดภาวะที่ใช้ในการแตกตัวของพอลิเอทิลีนและ พอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	52
4.3 ผลการทดลองที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิเอทิลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	53
4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน	53
4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา	61
4.3.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล	70
4.4 ผลการทดลองที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิโพรพิลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	76
4.4.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน	76
4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา	85
4.4.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล	94
4.5 คำแนะนำภาวะเหมาะสมของการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10	101
4.6 คำแนะนำภาวะเหมาะสมของการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10	104
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	108
5.1 สรุปผลการทดลอง	108
5.2 ข้อเสนอแนะ	110
รายการอ้างอิง	111
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก	115
ภาคผนวก ข	119
ภาคผนวก ค	126
ภาคผนวก ง	127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	129

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของพอลิไพโรฟิลีน	14
2.2 ประเภทของปฏิกิริยาอะตะไลซิสแบบวิวิธพันธุ์	18
2.3 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาอะตะไลซิส แบบเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์	19
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของพอลิเอทิลีน บนตัวเร่งปฏิกิริยา spent FCC	44
3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล สองระดับของพอลิเอทิลีน	44
3.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของพอลิไพโรฟิลีน บนตัวเร่งปฏิกิริยา spent FCC	46
3.4 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียล สองระดับของพอลิไพโรฟิลีน	46
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและ calcine ที่ อุณหภูมิ 500 °C	49
4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา เอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	51
4.3 ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยา แตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	54
4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	56
4.5 ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยา แตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	62
4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเนฟทา จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	64
4.7 ค่าร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยา แตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	70

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยา แตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	73
4.9 ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยา แตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	77
4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	79
4.11 ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัว ของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	86
4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเนฟทา จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	88
4.13 ค่าร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแตกตัว ของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	95
4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของดีเซล จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	97
4.15 ตารางแสดงขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมของพอลิเอทิลีนจาก โปรแกรม Design – Expert 6.0.10	101
4.16 ภาวะที่เหมาะสมของพอลิเอทิลีนที่ได้จากโปรแกรม design-expert 6.0.10	102
4.17 ค่าภาวะที่เหมาะสมของพอลิเอทิลีนจากโปรแกรม design-expert 6.0.10 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง	102
4.18 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของพอลิเอทิลีน	103
4.19 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มี ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นของพอลิเอทิลีน	104
4.20 ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design – Expert 6.0.10 ของพอลิโพรพิลีน	104
4.21 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม design-expert 6.0.10 ของพอลิโพรพิลีน	105

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.22	ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design-expert 6.0.10 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงของพอลิไพรีน _____ 105
4.23	เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของพอลิไพรีน __ 106
4.24	เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นของพอลิไพรีน _____ 107
4.25	เปรียบเทียบภาวะเหมาะสมของพอลิเอทีลีนและพอลิไพรีน _____ 107
5.1	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของพอลิเอทีลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว _____ 108
5.2	ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของพอลิไพรีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว _____ 109

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 พอลิเมอร์แบบเส้น _____	4
2.2 พอลิเมอร์แบบกิ่ง _____	4
2.3 พอลิเมอร์แบบร่างแห _____	4
2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิไพโรฟิลีน _____	14
2.5 ไอโซแทกติกพอลิไพโรฟิลีน _____	15
2.6 อะแทกติกพอลิไพโรฟิลีน _____	15
2.7 ซินดีโอแทกติกพอลิไพโรฟิลีน _____	16
2.8 การเกิด Activated complex และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา _____	20
2.9 การดำเนินไปของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา _____	20
2.10 โครงสร้างหน่วยย่อยของซีโอไลต์ _____	22
2.11 โครงร่างผลึกของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง _____	22
2.12 โครงสร้างตำแหน่งกรดบราวน์สเตท (Bronsted acid site) _____	23
2.13 การแปลงสภาพของตำแหน่งกรดบราวน์สเตทเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส _____	23
2.14 Adsorption Isotherm ที่เป็นไปได้ 5 รูปแบบ ซึ่งเสนอโดย Brunauer _____	26
2.15 Adsorption Isotherm แบบที่ II _____	27
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (micro-reactor) _____	39
3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และเครื่องเขย่า _____	40
3.3 ชุดกรองสุญญากาศ _____	40
3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น _____	41
3.5 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) _____	42
3.6 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) _____	42
3.7 เครื่องหาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด(BET surface area) _____	43
4.1 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว _____	50
4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วเผาที่ 500 องศาเซลเซียส _____	50
4.3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated _____	51

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.4 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	55
4.5 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	57
4.6 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของ พอลิเอทิลีน	57
4.7 ผลของผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	58
4.8 ผลของอัตราการกระจายระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	59
4.9 ผลของอัตราการกระจายระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	60
4.10 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของแนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัว ของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	63
4.11 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	65
4.12 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	65

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.13 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	66
4.14 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ของแนฟทาใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	67
4.15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	68
4.16 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีน	69
4.17 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	72
4.18 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	74
4.19 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	74
4.20 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ของดีเซลที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน	75
4.21 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิไพโรฟิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	78

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.22 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	80
4.23 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	80
4.24 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	81
4.25 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	82
4.26 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	83
4.27 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	84
4.28 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อ ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน	85
4.29 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัว ของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	88

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.30 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	89
4.31 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	90
4.32 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	90
4.33 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	91
4.34 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	92
4.35 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน	93
4.36 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	96
4.37 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำ ปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	98
4.38 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	98

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
4.39 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ของดีเซล ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	99
4.40 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อ ร้อยละผลได้ของดีเซล ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	100
4.41 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน	101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

พลาสติกเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายในเกือบจะทุกกิจกรรมในชีวิตประจำวัน ส่งผลให้อัตราการผลิตพลาสติกเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่ง พลาสติกได้สร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมขึ้นอย่างมากเนื่องจากพลาสติกย่อยสลายได้ยากมาก หากจะปล่อยให้ย่อยสลายไปเองก็ใช้เวลานานหลายสิบปีหรือบางชนิดก็ไม่ย่อยสลายเลย จากรายงานพบว่าประเทศไทยมีปริมาณขยะทั่วประเทศ 14 ล้านตัน หรือวันละ 40,000 ตัน โดยเป็นขยะพลาสติกมากถึงร้อยละ 17 ประมาณ 2.4 ล้านตันต่อปี หรือ 6,000 ตันต่อวัน (1) การกำจัดขยะพลาสติกสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การนำไปฝัง (Burial) หรือนำไปถมดิน (Landfill) การนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิง (Incineration) และการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ปัญหาที่เกิดจากการกำจัดด้วยการฝังคือ ใช้ต้นทุนสูง เนื่องจากขาดแคลนพื้นที่ ที่ดินมีราคาแพง และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยเกิดการปนเปื้อนในดินและน้ำใต้ดิน ดังนั้นการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่จึงถูกพิจารณาว่าเป็นทางเลือกที่ให้ประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุดทางหนึ่ง นอกจากจะลดปริมาณขยะพลาสติกที่กำจัดยากเพราะต้องใช้เวลาย่อยสลายนานนับร้อยปี ยังช่วยลดความยุ่งยากในการหาหลุมทิ้งขยะแห่งใหม่ และสอดคล้องกับชุมชนที่อยู่ใกล้บริเวณหลุมฝังกลบ วิธีการนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ มีวิธีหลักอยู่ 2 วิธี คือวิธีทางกายภาพ โดยการนำพลาสติกมาหลอมเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ และ วิธีทางเคมี ที่จะเป็นการเปลี่ยนพลาสติกเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่า ซึ่งวิธีทางเคมีนั้นจะใช้กระบวนการแตกตัว (Cracking) ซึ่งเป็นการแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักโมเลกุลสูงจนมีขนาดที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิง กระบวนการแตกตัว (Cracking) แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการหลัก คือ การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal Cracking) และการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking) การแตกตัวด้วยความร้อนอย่างเดียวต้องทำที่อุณหภูมิสูงและให้ความเลือกเกิดจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์ต่ำ ส่วนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถทำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าและให้ความเลือกเกิดจำเพาะต่อผลิตภัณฑ์สูง ดังนั้นการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาจึงนิยมใช้กันมากกว่าที่จะการแตกตัวด้วยความร้อนอย่างเดียว และในปัจจุบันความต้องการพลังงานมีอัตราสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดปัญหาวิกฤตการณ์พลังงาน ประกอบกับประเทศไทยยังคงต้องพึ่งพาการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศ ทำให้การแสวงหาแหล่งพลังงาน

ทดแทนเป็นสิ่งจำเป็น ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการนำเอาขยะพลาสติกมาแปรรูปเป็นพลังงานเชื้อเพลิง

งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาการแตกตัวของพลาสติกพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอฟซีซีใช้แล้ว เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในอุตสาหกรรมเพื่อผลิตแก๊สโอเลฟินจากน้ำมัน เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วมาทำปฏิกิริยาการแตกตัวของพลาสติก คาดว่าจะทำให้การเกิดแก๊สน้อยลง ได้ผลผลิตของเหลวสูงขึ้น ในงานวิจัยจะทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการแตกตัว ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ เวลา ความดัน และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยา

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนซึ่งประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก(microreactor)

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวเชิงเร่งของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนเป็นเชื้อเพลิงเหลว
2. ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปิโตรเลียม

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ [1,2]

การจัดแบ่งประเภทของพอลิเมอร์นั้นจัดได้หลายแบบอย่าง ขึ้นอยู่กับว่าจะพิจารณาอะไรเป็นหลัก เช่น จะพิจารณาโครงสร้าง ก็ดูความแตกต่างภายในโครงสร้างว่าจะจัดแบ่งได้ที่ประเภท อาจจะเป็นสายโซ่ตรง หรือสายโซ่ที่มีกิ่งก้านสาขา เป็นต้น ซึ่งเกณฑ์ดังกล่าวนี้อาจพิจารณารายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

2.1.1 ส่วนประกอบของอะตอมในสายโซ่พอลิเมอร์ จะได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1. พอลิเมอร์อนินทรีย์ (inorganic polymers) หมายถึงกลุ่มพอลิเมอร์ที่เกิดจากสารอนินทรีย์ ทั้งที่เกิดในธรรมชาติและที่สังเคราะห์ได้ พวกที่เกิดในธรรมชาติก็มีเช่น ททราย ดิน แล้วไปผ่านกระบวนการต่อไปจะได้ แก้ว อิฐ ซีเมนต์ เป็นต้น พวกที่สังเคราะห์ได้ก็มีเส้นใย เช่น เส้นใยคาร์บอน (carbon fiber) เส้นใยซิลิคอน คาร์ไบด์ เป็นต้น

2. พอลิเมอร์อินทรีย์ (organic polymers) หมายถึงกลุ่มพอลิเมอร์ที่เกิดจากสารอินทรีย์ในธรรมชาติ มีพวกพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) โปรตีน กาวธรรมชาติ เส้นใยธรรมชาติ ยางธรรมชาติ เป็นต้น ส่วนพอลิเมอร์อินทรีย์ที่สังเคราะห์ก็มีมากมาย เช่น ยางสังเคราะห์ พลาสติกต่างๆ กาวเส้นใย เป็นต้น

2.1.2 ลักษณะการจัดตัวของโมโนเมอร์ ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. โฮโมพอลิเมอร์ (homopolymers) พวกนี้ในสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์ชนิดเดียว เช่น ถ้ามอนอเมอร์เป็น A สายโซ่โมเลกุลจะเป็น -A-A-A-A- ตัวอย่าง เช่น พอลิเอทิลีนในสายโซ่โมเลกุลจะประกอบด้วยเอทิลีนชนิดเดียว หรือพอลิสไตรีน ประกอบด้วยมอนอเมอร์สไตรีนชนิดเดียว

2. โคพอลิเมอร์ (copolymers) ในสายโซ่โมเลกุลประกอบด้วยมอนอเมอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป เช่น โคพอลิเมอร์ อะคริโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน โคโพลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ 3 ชนิดก็มีเช่น ABS (acrylonitrile-butadiene-styrene)

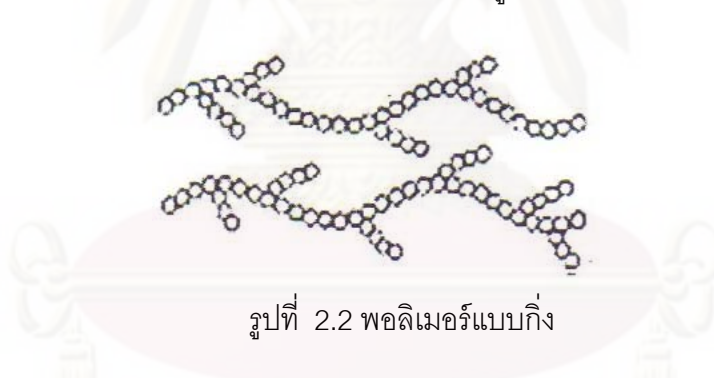
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 โครงสร้างของพอลิเมอร์ แบ่งออกตามลักษณะโครงสร้างได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

1. พอลิเมอร์แบบเส้น เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์สร้างพันธะต่อกันเป็นสายยาวโซ่พอลิเมอร์เรียงชิดกันมากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ จึงมีความหนาแน่น และจุดหลอมเหลวสูงมีลักษณะแข็ง ชุ่มเหนียวกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ ตัวอย่าง พีวีซี พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน แสดงในรูปที่ 2.1



2. พอลิเมอร์แบบกิ่ง เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ยึดกันแตกกิ่งก้านสาขา มีทั้งโซ่สั้นและโซ่ยาว กิ่งที่แตกจาก พอลิเมอร์ของโซ่หลัก ทำให้ไม่สามารถจัดเรียงโซ่พอลิเมอร์ให้ชิดกันได้มาก จึงมีความหนาแน่นและจุดหลอมเหลวต่ำ ยืดหยุ่นได้ ความเหนียวต่ำโครงสร้างเปลี่ยนรูปได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ตัวอย่าง พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



3. พอลิเมอร์แบบร่างแห เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากมอนอเมอร์ต่อเชื่อมกันเป็นร่างแห พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความแข็งแรง และเปราะหักง่าย ตัวอย่าง เบกาไลต์ เมลามีนใช้ทำถ้วยชาม แสดงในรูปที่ 2.3



2.2 พลาสติก [1,3,4,5,6]

ปัจจุบันพลาสติกได้กลายเป็นผลิตภัณฑ์สำคัญอย่างหนึ่ง และมีแนวโน้มที่จะเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้น โดยการนำมาใช้แทนทรัพยากรธรรมชาติได้หลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นไม้ เหล็ก เนื่องจากพลาสติกมีราคาถูก มีน้ำหนักเบา และมีขอบข่ายการใช้งานได้กว้าง สามารถผลิตพลาสติกให้มีคุณสมบัติต่าง ๆ ตามที่ต้องการได้โดยขึ้นกับการเลือกใช้วัตถุดิบปฏิกิริยาเคมี กระบวนการผลิต และกระบวนการขึ้นรูปทรงต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย และยังสามารถปรุงแต่งคุณสมบัติได้ง่าย โดยการเติมสารเติมแต่ง (additives) เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (modifier) สารเสริม (filler) สารคงสภาพ (stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (inhibitor) สารหล่อลื่น (lubricant) และผงสี (pigment) เป็นต้น

พลาสติก คือ พอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.เทอร์โมพลาสติก (thermoplastic polymers) เป็นพอลิเมอร์ที่ละลายได้ดีในตัวทำละลายบางชนิด เมื่อถูกความร้อนสามารถหลอมตัวได้และเมื่อเย็นตัวลงก็จะแข็งตัว สามารถทำให้หลอมและแข็งตัวได้หลายครั้งโดยไม่ทำให้สมบัติทางเคมีเปลี่ยนไป อาจแยกเป็น 2 กลุ่มย่อยๆ ได้อีก คือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกอสัณฐานหรือไม่เป็นผลึก (amorphous thermoplastics) กลุ่มนี้มีสมบัติแข็ง และเปราะ เช่น พอลิสไตรีน (polystyrene) พอลิเมทิลเมทาคริเลต (polymethyl methacrylate) โคพอลิเมอร์อะคริโลไนไตรล์-บิวทาดิเอน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer) อีกกลุ่มหนึ่งคือ กลุ่มเทอร์โมพลาสติกที่มีผลึกบางส่วน (partial crystalline thermoplastics) กลุ่มนี้จะมีโครงสร้างของโซ่โมเลกุลเป็นระเบียบ ทำให้เรียงตัวได้ดี จึงมีความทนผลึกปนอยู่ ประกอบกับการที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, T_g) ถ้าอยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องจะทำให้พอลิเมอร์ตัวนั้นมีลักษณะยืดหยุ่น และเหนียวพอสมควร เช่น พอลิเอทิลีน (polyethylene) พอลิโพรพิลีน (polypropylene) พอลิเอไมด์ (polyamide)

2.เทอร์โมเซต (thermosetting polymers) พอลิเมอร์กลุ่มนี้จะมีรูปทรงถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีการผลิตโดยใช้ความร้อน หรือความดัน ผลผลิตที่ได้นำไปหลอมละลายอีกไม่ได้ ไม่ละลายในตัวทำละลาย หรือเกิดขบวนการไม่ย้อนกลับ โดยเมื่อเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว ถ้าจะเปลี่ยนรูปร่างใหม่ไม่สามารถกระทำได้อีก เนื่องจาก ก่อนผ่านขบวนการเตรียมโครงสร้างของพอลิเมอร์ยังไม่เป็นร่างแห เมื่อผ่านขบวนการโดยให้ความร้อนหรือความดัน จะมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในโครงสร้างเกิดการเชื่อมโยงระหว่างสายโซ่โมเลกุล มีลักษณะเป็นระบบสามมิติ (three-dimensional systems) มีการสร้างพันธะโคเวเลนต์ระหว่างโซ่โมเลกุล ทำให้ผลผลิตที่ได้มีความคงทนไม่หลอม ไม่ละลายถ้าให้ความร้อนมากๆ จะไหม้เกรียมและสมบัติเปลี่ยนไปจากเดิม ตัวอย่างที่เห็นชัดเจน คือ ยางธรรมชาติที่ผ่านขบวนการวัลคาไนเซชัน ซึ่งมีการเชื่อมโยงสายโซ่โมเลกุลด้วยกำมะถัน ทำให้แข็งแกร่ง ทนทานมากขึ้น ตัวอย่างอื่น ๆ มีพวกอีพอกซี (epoxy)

พอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (unsaturated polyester) เมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน พอลิยูรีเทน ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์เรซิน

2.2.1 สมบัติของพลาสติก [3]

พลาสติกมีโครงสร้างพิเศษเรียกว่า high molecular weight คือ โมเลกุลที่เชื่อมต่อกันยาวกว่าสารชนิดอื่นมากมายนับเป็นพันเท่า จึงทำให้พลาสติกมีสมบัติหลายๆอย่างไปพร้อมกัน คือ

1. สมบัติทางกล (mechanical) มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น ทนแรงกระแทกได้ดี มีความทนทานสูง
2. สมบัติทางไฟฟ้า (electrical) เป็นฉนวนไฟฟ้า
3. สมบัติทางเคมี (chemical) มีน้ำหนักโมเลกุลสูง มีจุดหลอมเหลวสูงตั้งแต่ 80-150 องศาเซลเซียสที่อุณหภูมิห้องจะแข็ง ส่วนใหญ่มีความถ่วงเฉพาะต่ำ จึงมีน้ำหนักเบาทนกรด ต่าง และสารเคมีอื่นๆโดยมากไม่ทำปฏิกิริยากับกับสารอินทรีย์

2.3 พอลิเอทิลีน (Polyethylene) [7,8,9,10]

พอลิเอทิลีนมีชื่อย่อในวงการพลาสติกว่า “PE” เป็นพลาสติกที่มีการใช้งานมากที่สุดคือ ประมาณ 32% ของพลาสติกทั้งหมด โดยจะได้ออกมาจากการพอลิเมอไรส์แก๊สเอทิลีนจนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่มีโครงสร้างโมเลกุลได้ต่างๆ กัน คือ

- โครงสร้างแบบเชิงเส้น (linear)
- โครงสร้างแบบกิ่งก้านสาขา (branched)

การมีกิ่งก้านสาขาจะลดความสามารถในการเกิดผลึก ซึ่งมีผลไปถึงความหนาแน่นและสมบัติอื่นๆ ดังนั้น PE ที่ได้จึงมีสมบัติแตกต่างกัน โดย PE ที่มีกิ่งก้านสาขามาก จะมีความหนาแน่น จุดหลอมเหลว ความแข็งตึง (stiffness) ความแข็งของพื้นผิว (surface hardness) และจุดอ่อนตัว (softening point) ต่ำกว่า แต่จะยอมให้แก๊สหรือไอน้ำซึมผ่านได้มากกว่า ซึ่งสมบัติเหล่านี้ขึ้นกับการมีกิ่งก้านสาขาของโมเลกุล แต่สมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ยังต้องคำนึงถึงน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย และการกระจายน้ำหนักโมเลกุลอีกด้วย หากแบ่งประเภทของ PE ตามความหนาแน่น จะสามารถแบ่งได้เป็น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Middle Density Polyethylene : MDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene : LLDPE) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (Very Low Density Polyethylene : VLDPE) เป็นต้น โดยที่ high Medium และ low density PE เป็นไฮโมพอลิเมอร์ ส่วน LLDPE และ VLDPE เป็นโคพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับประมาณ 8% บิวเทน -1, เฮกเซน -1 หรือ ออกเทน -1

LDPE ถูกค้นพบโดยบริษัทไอซีไอ ประเทศอังกฤษ และถูกผลิตขึ้นในปี ค.ศ. 1939 ส่วน HDPE ถูกพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1954 โดย Karl Ziegler ประเทศเยอรมัน และโดยบริษัท Standard Oil และ Phillips Petroleum ประเทศสหรัฐอเมริกา การผลิตเริ่มขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1957 ในประเทศเยอรมัน อิตาลี และสหรัฐอเมริกา

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึก โดยความหนาแน่น ความเป็นผลึกและจุดหลอมเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อกิ่งก้านสาขาลดลง LDPE และ LLDPE มีจุดหลอมเหลว 115 องศาเซลเซียส ส่วน HDPE จุดหลอมเหลว 135 องศาเซลเซียส

โมเลกุลของ HDPE มีความเป็นระเบียบถึง 90% ขณะที่ LDPE มีความเป็นระเบียบประมาณ 50% เมื่อความเป็นผลึก (ความหนาแน่น) เพิ่มขึ้น จะเพิ่มความแข็งดึง (มอดูลัส), ความทนแรงดึง, ความแข็ง, ความทนความร้อนและสารเคมี ความขุ่น (opacity) อุณหภูมิการเบี่ยงเบนทางความร้อน (heat distortion temperature: HDT), จุดอ่อนตัว (vicat softening point) และสมบัติการสกัดกั้น (barrier properties) แต่จะลดความทนแรงกระแทกและความใส

ความสามารถในการยืดตัวของ LDPE 100 – 700%, MDPE 50 – 60% และ HDPE 10 – 650%

ชนิดของ PE สามารถจำแนกตามความหนาแน่นได้ดังนี้ :

HDPE มีความหนาแน่น 0.941 – 0.965 g/cm³

MDPE มีความหนาแน่น 0.926 – 0.940 g/cm³

LDPE มีความหนาแน่น 0.910 – 0.925 g/cm³

LLDPE มีความหนาแน่น 0.925 – 0.940 g/cm³

VLDPE มีความหนาแน่น < 0.910 g/cm³

สภาพยืดหยุ่นของพันธะ C-C ทำให้ PE มี T_g ค่อนข้างต่ำ ขึ้นกับปริมาณของผลึก โดยมี T_g ตั้งแต่ -130 ถึง 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีทั้งต่ำกว่าและสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ดังนั้น PE จึงมีทั้งสภาพยืดหยุ่นและแข็งที่สภาวะปกติและแต่ประเภทของ PE

PE เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม (excellent) เพราะเป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว สมบัติต่างๆ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) และเฟาเวอร์แฟกเตอร์ (power factor) จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและความถี่ของไฟฟ้าและกระแสสลับ (แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อความหนาแน่นเพิ่มขึ้น)

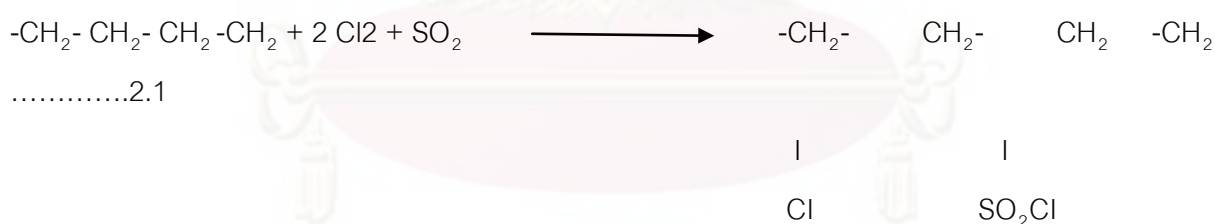
ในทางเคมีอาจจัด PE ว่าเป็นพาราฟิน (paraffin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง จึงเป็นวัสดุที่จัดว่าเฉื่อย เพราะไม่มีแรงดึงดูดพิเศษ เช่น พันธะไฮโดรเจนกับตัวทำละลาย และเนื่องจากพอลิเมอร์มีความเป็นผลึก

จึงทำให้ PE ไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 70 องศาเซลเซียส PE จะเริ่มบวมพองและละลายในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอนหรือฮาโลเจนไฮโดรคาร์บอน เช่น โทลูอีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีน และไดคลอโรเอทิลีน เป็นต้น อุณหภูมิที่ใช้ละลาย PE จะสูงขึ้นเมื่อความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งอยู่ในช่วง 60-80 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ของเหลวบางชนิด เช่น แอลกอฮอล์ เอสเตอร์ และคีโตน อาจทำให้ PE เกิดการแตกหักของพลาสติกเนื่องจากความเค้นจากสิ่งแวดล้อม (environmental stress cracking : ESC) ถ้าได้รับความเค้นขณะที่แช่อยู่ในของเหลวเหล่านั้น ทำให้เกิดการแตกหักได้ที่ความเค้นต่ำกว่าเมื่อไม่มีของเหลว

PE จะทนกรด ต่าง และสารละลายที่ใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย ใช้ทำภาชนะบรรจุกรดและด่าง ส่วนสารออกซิไดซ์แรง ๆ เช่น กรดไนตริกเข้มข้น สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น หรือโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะสามารถออกซิไดซ์พอลิเมอร์ ทำให้ค่าพาวเวอร์แฟกเตอร์สูงขึ้น และสมบัติเชิงกลเสียไป ความทนทานสารเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นเพราะสภาพให้ซึมได้ (permeability) ลดลง

พื้นผิวของ PE จะค่อนข้างมันคล้ายมีไข จึงเป็นอุปสรรคต่อการพิมพ์ และตกแต่ง จำเป็นต้องเตรียมผิวด้วยการลนด้วยเปลวไฟออกซิ-อะเซทิลีน หรือเปลวไฟแก๊สหุงต้ม เพื่อให้เกิดออกไซด์บนพื้นผิวอีกชั้นหนึ่งก่อน หรืออาจกัดพื้นผิวด้วยสารเคมี

PE สามารถถูกคลอรีเนต (chlorinated) ภายใต้อุณหภูมิที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ ผลที่ได้คือ chlorosulphonated polyethylene ซึ่งได้เป็น elastomer ที่ดีชนิดหนึ่ง ดังสมการที่ 2.1



ปฏิกิริยาการเกิด Chlorosulphonated Polyethylene

2.3.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE)

HDPE มีความหนาแน่น 0.940-0.965 g/cm³ มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาว ๆ แทบไม่มีกิ่งก้านสาขา แยกออกมาเลย หรือมีประปราย ทำให้โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบและมีความเป็นผลึกมากกว่า LDPE จึงมีความแข็งตึง ความเหนียว ความทนแรงดึง ความแข็งความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีมากกว่าด้วย อีกทั้งมีสมบัติการเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี HDPE มีจุดหลอมเหลวประมาณ 135 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัวประมาณ 125 องศาเซลเซียส

การสังเคราะห์ HDPE ต่างจาก LDPE ตรงที่ใช้กระบวนการผลิตความดันต่ำกว่ามาก และอุณหภูมิต่ำกว่าด้วย ซึ่งมีอยู่ 4 วิธี โดย 3 วิธีแรกเป็นการผลิตพอลิเอทิลีนแบบสารละลาย (solution process) และแบบสารแขวนลอย (slurry process) ความแตกต่างอยู่ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาของแต่ละกระบวนการ ส่วนวิธีสุดท้ายเป็นแบบแก๊สเฟส (gas phase process)

กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler Process) กระบวนการซีเกลอร์ในทางการค้าจะทำให้ความดันสูงกว่าบรรยากาศเล็กน้อย (0.2-0.4 Mpa หรือ 2-4 บรรยากาศ) อุณหภูมิ 50-75 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์เนตตา ซึ่งได้แก่ ไททาเนียมเตตระคลอไรด์/อะลูมิเนียมอัลคิล (เช่น ไดเอทิลอะลูมิเนียมคลอไรด์, อะลูมิเนียมไตรเอทิล) ส่วนสารเจือจาง (diluent) ที่ใช้ ได้แก่ น้ำมันดีเซล (diesel oil) เฮปเทน (heptane) หรือโทลูอีน ปฏิกิริยาจะเกิดภายใต้บรรยากาศเฉื่อย (ปกติภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน) ต้องไม่มีความชื้น และออกซิเจน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง หรือแม้แต่ทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ โดย เอทิลีน ตัวเร่งปฏิกิริยา และ สารเจือจางจะถูกป้อนอย่างต่อเนื่องเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์พอลิเมอร์ที่ได้จะละลายในสารเจือจางเล็กน้อย โดยอยู่ในรูปของสารขุ่นหนืด (slurry) และถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วด้วยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล โลหะจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะถูกแยกออกด้วยกรดเกลือ ถ้าต้องการใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า ต้องทำให้บริสุทธิ์หลาย ๆ ครั้ง แล้วจึงเซนทริฟิวจ์ ทำให้แห้ง อัดรีด และตัดเป็นเม็ด HDPE ที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.945 g/cm^3

กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips Process) ใช้ความดัน 3-4 Mpa (30-40 บรรยากาศ) อุณหภูมิ 90 ถึง 160 องศาเซลเซียส และใช้โครเมียมออกไซด์ (CrO_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยเอทิลีนจะถูกผ่านเข้าไปในตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน (ไซโคลเฮกเซน) ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแขวนลอยอยู่ PE ที่ได้อาจอยู่ในรูปของสารละลายหรือสารขุ่นหนืดขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ ถ้าเป็นกระบวนการสารละลาย (solution process) จะกระทำที่อุณหภูมิ 120-160 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่พอลิเมอร์ละลายได้ใน diluents สารละลายที่ร้อนจะถูกดึงออกจากเครื่องปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่อง เอทิลีนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะถูกล้างออก พอลิเมอร์ที่ได้จะตกตะกอนออกมาเมื่อสารละลายถูกทำให้เย็นลง และถูกแยกออกด้วยการหมุนเหวี่ยง ส่วนกระบวนการสารแขวนลอย (slurry process) จะทำที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ซึ่งพอลิเมอร์ละลายใน diluents ได้น้อยที่อุณหภูมินี้ HDPE ที่ได้มีความหนาแน่นสูงที่สุด (ประมาณ 0.960 g/cm^3) โดยที่โมเลกุลเกือบเป็นเส้นตรงอย่างสมบูรณ์

กระบวนการสแตนดาร์ดออยล์ (Standard Oil Process) วิธีนี้จะคล้ายกระบวนการฟิลลิปส์ ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยโลหะออกไซด์ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์กับอะลูมินา ที่เตรียมจากการเผาอะลูมินากับแอมโมเนียมโมลิบเดต ที่อุณหภูมิประมาณ 500 – 600 องศาเซลเซียสและผสมกับสารที่เป็นตัวช่วยรีดิวส เช่น โลหะหมู่ IA, IIA หรือพวกไฮโดรคาร์บอนเป็นตัวช่วยกระตุ้นให้ว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยใช้ความดัน 4-10 MPa (40-100 บรรยากาศ) ที่อุณหภูมิ 200-300 องศาเซลเซียส และใช้ตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน

HDPE ที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.960 g/cm^3 ซึ่งเท่ากับที่ได้จากกระบวนการฟิลิปส์ อีกทั้งน้ำหนักโมเลกุลก็ใกล้เคียงกัน

กระบวนการยูเนียนคาร์ไบด์ (Union Carbide Process) กระบวนการนี้เอทิลีนจะถูกพอลิเมอไรซ์ในเฟสที่เป็นแก๊ส (gas phase) ด้วยความดัน $0.7\text{--}0.2 \text{ Mpa}$ ($7\text{--}20$ บรรยากาศ) ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยสารประกอบออร์กาโนโคโรเมียมเช่น เฟอร์โรซีน กระบวนการนี้ใช้ระบบฟลูอิดไคซ์เบด ที่มีเอทิลีนเป็นแก๊สร้อนลอยตัว (fluidizing gas) เป็นตัวทำปฏิกิริยาด้วย พอลิเมอไรท์ที่มีลักษณะเป็นเม็ด (ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ได้ถูกจำกัดออกไป) และสามารถใช้ได้โดยตรง เนื่องจากไม่มีตัวทำละลายมาเกี่ยวข้องทำให้กระบวนการแก๊สเฟส ควบคุมได้ง่าย และใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการอื่น ๆ

HDPE จะเด่นด้านงานฉีดแบบ (injection molding) ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไป เช่น ถังน้ำ กะละมัง กระติกน้ำ ถาดน้ำแข็ง และเครื่องใช้ในสำนักงาน เป็นต้น สำหรับงานฉีดขึ้นงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะที่ต้องใช้งานกลางแจ้ง ได้แก่ แท่นรองสินค้า ถังน้ำอัดลม ถังปลา และถังผลไม้ เป็นต้น และงานเป่าแบบ (blow molding) ทั่วไป ตั้งแต่ขนาดเล็กถึงขนาดใหญ่และงานที่ต้องการความทนทานต่อสารเคมีสูง เช่น ขวดน้ำยาทำความสะอาด ขวดเครื่องสำอาง ภาชนะใส่น้ำมันเครื่อง น้ำมันเบรกรวมทั้งภาชนะบรรจุอาหารและยา เช่น ขวดนม ขวดน้ำดื่ม และขวดยา เป็นต้น

นอกจากที่กล่าวมาแล้ว HDPE ยังสามารถนำไปใช้งานในงานอัดรีด (extrusion) ทำเป็นเส้นในสำหรับทักทอเป็นเชือก แห อวน ตาข่าย และเหมาะกับการอัดรีดเป็นท่อ เช่น ท่อน้ำประปา ท่อระบายน้ำ ท่อน้ำเพื่อการเกษตร ท่อในอุตสาหกรรมเคมีและท่อร้อยสายไฟสายโทรศัพท์ หรือใช้ในงานเป่าฟิล์ม (blown film) เพื่อทำเป็นถุงประเภทต่าง ๆ เช่น ถุงหิ้ว เนื่องจากมีความเหนียวและความแข็งแรงสูง กระจกร้อนซึ่งทำจาก HDPE จะมีลักษณะขุ่นมัว ถ้าทำจาก PP จะใส

2.3.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (Middle Density Polyethylene : MDPE)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางได้จากการพอลิเมอไรซ์ที่ความดันสูง (High Pressure Process) ประมาณ $1,000\text{--}3,000$ บรรยากาศ อุณหภูมิ $150\text{--}350$ องศาเซลเซียส โมเลกุลของพอลิเมอไรท์ที่ได้จะมีกิ่งก้านสาขามากทำให้โมเลกุลเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบมีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน ดังนั้นจึงมีความหนาแน่นต่ำประมาณ $0.926\text{--}0.940 \text{ g/cm}^3$ ค่อนข้างใส มีจุดหลอมเหลวที่ 124 องศาเซลเซียสและมีจุดอ่อนตัวที่ $60\text{--}70$ องศาเซลเซียส

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลางนิยมมากในงานหมุนแบบเพื่อผลิตเป็นถังบำบัด ถังพักน้ำ ถังแช่ ถังขยะและของเล่น เป็นต้น

2.3.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene : LDPE)

LDPE เป็นพอลิเอทิลีนชนิดแรกที่ถูกผลิตขึ้นในการค้า มีความหนาแน่นต่ำ ($0.910 - 0.925 \text{ g/cm}^3$) เนื่องจากมีโครงสร้างมีกิ่งก้านสาขาแยกออกมาเยอะ ให้โมเลกุลจัดตัวอย่างหลวมๆ และไม่เป็นระเบียบ LDPE มีลักษณะค่อนข้างใส มีความเหนียวพอสมควร (ไม่มากนัก) และมีผิวหน้ามันคล้ายขี้ผึ้งหรือเทียนไข

LDPE ในทางการค้าถูกผลิตด้วยกระบวนการความดันสูง (High Pressure Process) ประมาณ $150 - 350 \text{ MPa}$ ($1500 - 3000$ บรรยากาศ) และอุณหภูมิ $80 - 300$ องศาเซลเซียส ใช้ตัวริเริ่มพวกอนุมูลอิสระ เช่น azo-di-isobutyronitrile, benzoyl peroxide หรือถ้าใช้ออกซิเจน (ประมาณ $0.03 - 0.1\%$) จะใช้ความดันประมาณ 1500 บรรยากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส การพอลิเมอไรเซชันทำโดยผ่านโมโนเมอร์และตัวริเริ่มเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งปฏิกิริยาการเกิด LDPE จะคายความร้อนออกมาสูงมาก จึงต้องมีระบบทำความเย็นอย่างมีประสิทธิภาพ การใช้โมโนเมอร์ความเข้มข้นมากๆ และความดันสูงทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุล และได้พอลิเมอร์ที่มีกิ่งก้านสาขา ภายหลังจากที่ความดันลดลง พอลิเมอร์จะถูกแยกออกจากเอทิลีนที่ไม่ได้เข้าทำปฏิกิริยา (ซึ่งจะนำกลับมาใช้ใหม่) และพอลิเมอร์จะถูกอัดรีดเป็นสายรีบบิ้นและถูกตัดให้เป็นเม็ดต่อไป

LDPE มีจุดหลอมเหลวประมาณ 110 องศาเซลเซียส และจุดอ่อนตัว $40 - 50$ องศาเซลเซียส จึงไม่ควรใช้งานที่อุณหภูมิสูง จึงไม่เหมาะที่จะทำถุงใส่ถ้วยเต็มน้ำร้อนๆ หรือภาชนะบรรจุอาหารร้อนๆ เหมาะจะใช้ทำถุงใส่ไอศกรีม ขาเย็น กาแฟเย็น เป็นต้น

นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำได้ดี เช่นในตู้เย็นไม่ว่าจะเป็นช่องแช่แข็งหรือช่องธรรมดา เอาไว้ใส่พลาสติก กุ้งสด ฯลฯ โดยไม่กรอบแตก

ตลาดใหญ่ของ LDPE ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ โดยนำไปแปรรูปเป็นฟิล์ม (2 ใน 3 ของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด) ใช้ทำถุงเย็น ถุงสินค้าทั่วไป ฟิล์มหดรูป (shrink film) และฟิล์มยืด (stretch film) เป็นต้น ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการฉีดมีประมาณ 13% ได้แก่ ขวด ถ้วย ถาดบรรจุอาหารและยา ของเด็กเล่น และของใช้ภายในบ้าน เป็นต้น ประมาณ 10% ใช้ทำฉนวนหุ้มสายไฟและสายเคเบิล ประมาณ 10% ใช้ทำวัสดุเคลือบผิว และอีก 2% ใช้กับงานขึ้นรูปโดยการเป่าขวดพลาสติกอ่อนชนิดบีบได้

2.3.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (Linear Low Density Polyethylene : LLDPE)

นอกจาก LDPE และ HDPE แล้วยังมี PE อีกประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญและถูกนำไปใช้งานมากไม่แพ้กัน ได้แก่ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นหรือ LLDPE (linear low density polyethylene) LLDPE เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับ α -olefins ต่างๆ ($5 - 12\%$ โดยน้ำหนัก) เช่น บิวเทน-1, เฮกเซน-1 หรือ ออกเทน-1

LLDPE จะมีโครงสร้างอยู่ระหว่าง LDPE และ HDPE คือ มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ยาวๆ และมีกิ่งสั้นๆ แยกออกจากลำตัวตลอดความยาวของโมเลกุล แต่ไม่มีกิ่งรุงรังเหมือน LDPE ทำให้ LLDPE เป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีคุณภาพสูง (ความหนาแน่น $0.925 - 0.940 \text{ g/cm}^3$) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ทำเป็นฟิล์มเช่นเดียวกัน LDPE เพราะมีลักษณะเด่น คือความเหนียวความต้านทานแรงเจาะทะลุความทนทานต่อการฉีกขาด ความทรงรูป ความแข็งแรงของรอยตะเข็บในการเชื่อมด้วยความร้อนสูงความใส และสามารถเป่าฟิล์มได้บางเฉียบ LLDPE สามารถผลิตได้ทั้งกระบวนการสารละลายและกระบวนการสถานะแก๊ส

รายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการสารละลายที่ใช้สังเคราะห์ LLDPE ได้ถูกเปิดเผยออกมาไม่มากนัก ปฏิกริยาจะดำเนินไปภายใต้ความดัน 2.5-10 Mpa (25-100 บรรยากาศ) อุณหภูมิ 25-300 องศาเซลเซียส โดยใช้โคโบทรานซีชันเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

Gas Phase Process กระบวนการยูเนียนคาร์ไบด์ที่ใช้สังเคราะห์ HDPE และสามารถใช้สังเคราะห์ LLDPE ได้เช่นกัน

จากสมบัติเด่นดังกล่าว ทำให้เม็ดพลาสติก LLDPE เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ ดังนี้ :

- ถุงใช้งานหนัก (heavy duty bag) เช่น ถุงข้าวสาร ถุงน้ำตาล ถุงแป้ง และถุงขยะ
- ถุงแช่แข็ง (frozen bag) เช่น ถุงใส่สินค้าแช่แข็ง ถุงนม และถุงน้ำแข็ง
- ถุงชั้นใน (liner bag) สำหรับบรรจุสิ่งของที่มีน้ำหนักมาก เช่น ถุงบรรจุปุ๋ย และน้ำตาล
- ฟิล์มคลุมเรือนเพาะชำ (green house) เพื่อป้องกันพายุฝน ลูกเห็บ และลมที่อาจทำพืชได้รับความเสียหาย นอกจากนี้ ยังป้องกันแมลงที่เป็นศัตรูพืช และลดปริมาณแสงแดดที่อาจแรงเกินไปในเวลากลางวัน ฟิล์มที่ใช้คลุมเรือนเพาะชำนี้มักใช้กับพืชล้มลุก ไม้ดอก ต้นกล้าต่าง ๆ ปัจจุบันมีการใช้ในภาคเหนือ โดยฟิล์มประเภทนี้จะค่อนข้างหนา (ประมาณ 100-200 ไมครอน)
- ฟิล์มคลุมหน้าดิน (mulch film) ใช้คลุมหน้าดิน และเจาะช่องเฉพาะจุดที่ปลูกพืช โดยใช้ฟิล์มหนาประมาณ 20-30 ไมครอน ซึ่งฟิล์มด้านหนึ่งเป็นสีดำ อีกด้านเป็นสีเงิน โดยให้ฟิล์มด้านสีดำลงดินเพื่อป้องกันวัชพืช เก็บความชื้น รักษาอุณหภูมิ ส่วนด้านสีเงินให้อยู่ด้านบนสำหรับสะท้อนแสง และเพิ่มความเข้มของแสงให้พืชใช้สังเคราะห์แสง ทำให้พืชเติบโตได้ดี มีผลผลิตสูง และแมลงส่วนใหญ่ไม่ชอบความสว่างจ้าของแสง ตัวอย่างพืชที่ใช้ฟิล์มพวกนี้ ได้แก่ แคนตาลูป ซึ่งใช้มากในได้หวัน และญี่ปุ่นในบ้านเราเริ่มมีใช้ในภาคเหนือ

2.3.5 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมาก (Very Low Density Polyethylene : VLDPE)

VLDPE เป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่น 0.910 g/cm³ ซึ่งเป็นโคลิเมอร์ของเอทิลีน กับ α -olefins ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ gas phase process คล้ายกับที่ใช้สังเคราะห์ LLDPE การที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าเนื่องจาก ใช้โคโมเมอร์ในระดับที่มากกว่าและเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่น ๆ VLDPE จะมีความยืดหยุ่นมากกว่า ใช้ทำฟิล์ม หลอดพลาสติก และขวดอ่อนชนิดบีบได้ (squeeze bottles)

2.3.6 พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High Molecular Weight Polyethylene)

พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ๆ ในทางการค้า มี 2 ชนิด คือ high molecular weight high density polyethylene (HMW-HDPE) และ ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE)

HMW-HDPE : พอลิเมอร์การค้ามีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยน้ำหนัก 200,000-500,000 โดยทั่วไปการเป่าขวดจะใช้พลาสติก HDPE แต่สำหรับงานที่ต้องการสมบัติทนสารเคมีเป็นพิเศษหรือต้องการความแข็งแรงสูง จะใช้ HMW-HDPE ซึ่งเป็นเม็ด HDPE ที่ถูกปรับแต่งให้มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก ทำให้พลาสติกมีความเหนียวมากขึ้น ซึ่งความเหนียวและความทนแรงกระแทกจะสูงกว่าเดิมมาก โดยเฉพาะการทนสารเคมีภายใต้สภาวะที่มีความเค้น (ESCR) มีค่าสูงมาก ทำให้สามารถบรรจุสารเคมี เช่น กรดซัลฟูริกเข้มข้น หรืออื่น ๆ ได้

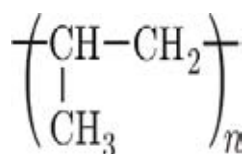
UHMWPE : เตรียมได้จากกระบวนการซีเกลอร์แบบพิเศษ (Special Ziegler process)

2.4. พอลิโพรพิลีน [1,11,12]

พอลิโพรพิลีนเป็นพลาสติกจำพวกเทอร์มอพลาสติกที่มีการใช้งานกันแพร่หลายในปัจจุบัน มีสมบัติเฉพาะตัว คือ ความถ่วงจำเพาะต่ำ ความแข็งแรงสูง อุณหภูมิบิดตัวสูง ทนทาน ต่อสารเคมีได้ดี มีสมบัติต้านไฟฟ้าได้ดี จึงมีการนำมาผลิตภัณฑ์ต่างๆหลายชนิด เช่น อุปกรณ์ในครัวเรือน ภาชนะบรรจุภัณฑ์ ของเด็กเล่น พอลิโพรพิลีนเป็นไฮโดรคาร์บอนพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงและประกอบด้วยโครงสร้างที่ไม่อิมิตัวน้อยมาก หรือไม่มีเลย การสลับที่ของหมู่เมทิลไปตามคาร์บอนอะตอมสายโซ่โมเลกุลทำให้สมบัติของพอลิเมอร์แตกต่างกันได้มากมาย โดยหมู่เมทิลเป็นตัวกำหนดโครงสร้างแทกติกซิตี (tacticity) ของพอลิเมอร์ได้ โดยแบ่งเป็นแบบต่างๆ กันดังนี้

1. แบบ Isotactic เมื่อหมู่เมทิลทั้งหมดอยู่ด้านเดียวกันของสายโซ่โมเลกุล
2. แบบ Syndiotactic เมื่อหมู่เมทิลทั้งหมดสลับอยู่กันบนสายโซ่โมเลกุล
3. แบบ Atactic เมื่อหมู่เมทิลไม่อยู่กันเป็นระเบียบบนสายโซ่โมเลกุล

โครงสร้างทางเคมีและสมบัติของพอลิโพรพิลีนแสดงดังรูป 2.4 และตาราง 2.1 ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิโพรพิลีน [1]

สมบัติทั่วไปของพอลิโพรพิลีนแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิโพรพิลีน

ลักษณะการใช้งาน	เทอร์มอพลาสติก เส้นใย เทอร์มอพลาสติกยืดหยุ่น (thermoplastic elasyomers)
มอนอเมอร์	โพรพิลีน
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	Ziegler – Natta polymerization Metallocene catalysis polymerization
โครงสร้างพื้นฐานวิทยา(Morphology) :	ความเป็นออสฐานสูง(atactic) ความเป็นผลึกสูง(isotactic)
อุณหภูมิหลอมเหลว (Melting temperature) :	270 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature) :	-17 องศาเซลเซียส

2.4.2 สมบัติทางเคมีของพอลิโพรพิลีน [12]

1. ความต้านทานต่อสารเคมีพอลิโพรพิลีนเป็นสารที่ไม่มีขั้ว (non polar) จึงแสดงสมบัติการต้านทานต่อสารเคมีได้เป็นอย่างดี โดยสามารถทนต่อกรด (ยกเว้น Oxidizing acid) เบสได้

2. ความต้านทานต่อสภาพแวดล้อม พอลิโพรพิลีนมีโครงสร้างโมเลกุลเป็นแบบ Teritary มีการเกาะตัวของโมเลกุลอย่างไม่แน่นอน ถูกย่อยสลายได้ง่าย ไม่ทนต่อสภาพแวดล้อม เช่น แสงแดด

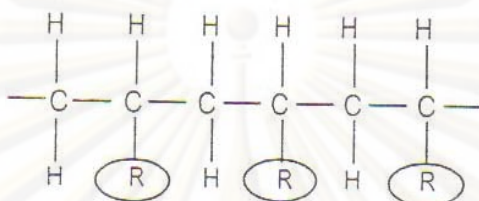
3. ความสามารถในการติดไฟ พอลิโพรพิลีนติดไฟได้เองที่อุณหภูมิ 360 องศาเซลเซียส

2.4.3 ประเภทของพอลิโพรพิลีน

การปรับปรุงการผลิต ทำให้ได้พอลิโพรพิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลแตกต่างกันไปซึ่งมีผลสมบัติแตกต่างกันออกไป เช่น ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีนที่มีความหนาแน่นสูงเหมือนพอลิเอทิลีนแต่มีจุดอ่อนตัวสูงกว่าและแข็งแรงกว่าโครงสร้างทางเคมีส่วนใหญ่ของพอลิโพรพิลีนจะมีหมู่เมทิล (Methyl group)

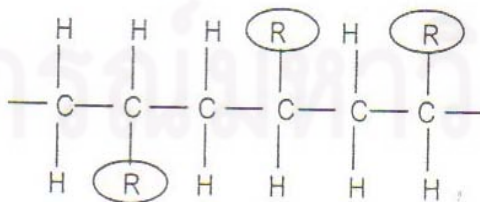
เกาะบนโซ่หลักของโมเลกุล (Main chain) พอลิโพรพิลีนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ตามลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่หลัก ได้แก่

1. ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่ด้านเดียวกันบนโซ่โมเลกุลหลัก ลักษณะเช่นนี้โครงสร้างโมเลกุลมีความเป็นระเบียบสูงส่งผลทำให้การตกผลึกที่ดีที่สุดสังเคราะห์ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธภรณ์ ของ Titanium(III) chloride กับตัวเร่งร่วมกับสารประกอบ Organoaluminium เช่น Diethylaluminium chloride ดังรูปที่ 2.5



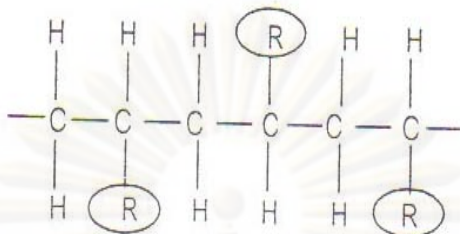
รูปที่ 2.5 ไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene)

2. อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างไม่เป็นระเบียบลักษณะเช่นนี้ทำให้มีการตกผลึกน้อยที่สุดสังเคราะห์จากกรดลิวอิส และสารประกอบออร์แกนอเมทัลลิก (Organometallic) เกิดเป็นโครงสร้างของอะแทกติกพอลิโพรพิลีน ดังรูปที่ 2.6 อะแทกติกพอลิโพรพิลีน สามารถทำการผลิตได้โดยตรง หรือเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต ตามปกติพอลิโพรพิลีนชนิดอะแทกติกอย่างสมบูรณ์ จะมีโครงสร้างอสัณฐานแต่ในทางการค้ายังมีส่วนที่เป็นผลึกหลงเหลืออยู่บ้าง น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 20,000-80,000 และมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.86 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร อะแทกติกพอลิโพรพิลีนมีลักษณะอยู่กึ่งกลางระหว่างไอโซแทกติกและอะแทกติกสามารถทำปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนได้เช่นเดียวกับไอโซแทกติกพอลิโพรพิลีน แต่อะแทกติกพอลิโพรพิลีนจะเกิดการบวมอย่างมากในสารไฮโดรคาร์บอนทั้งประเภทอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว และรวมตัวได้ดีกับตัวเติมจำพวกแรมบิโทมินัสและเรซินต่างๆ ในอดีตอะแทกติกพอลิโพรพิลีนเป็นผลพลอยได้ที่ไม่เป็นที่ปรารถนาในการผลิต แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการนำมาใช้ในยุโรปใช้ผสมกับบิพินัส เพื่อใช้ทำรอยต่อต่างๆ การผสมพลาสติกชนิดนี้จะช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.6 อะแทกติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene)

3. ซินดีโอแทกติกโพลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิล (Methyl group) สลับกันบนโซ่โมเลกุลอย่างเป็นระเบียบทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลงมีผลทำให้การตกผลึกลดลงด้วย ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ซินดีโอแทกติกโพลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene)

2.4.4 ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากโพลิโพรพิลีน [7,8]

1. ผลิตภัณฑ์ด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น ถุงพลาสติก ซึ่งจะได้ถุงพลาสติกที่มีลักษณะใสกว่าถุงที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) แสงผ่านได้ดี กันความชื้นได้ดีด้วย มีลักษณะคล้ายกระดาษแก้วแข็ง ไม่ยืดหยุ่น มีความแข็งแรงมากกว่าถุงเย็น ที่สำคัญคือ สามารถทนไขมันและความร้อนได้สูงถึงอุณหภูมิน้ำเดือด เหมาะสำหรับบรรจุอาหารร้อน หรืออาหารที่มีไขมัน มีจุดหลอมเหลวในการผลิตสูง 180 – 230 องศาเซลเซียส พลาสติกมีสมบัติไม่ทนต่อแรงกระแทก น้ำซึมผ่านได้น้อยกว่า 0.005% ในเวลา 24 ชั่วโมง พิล์มของโพลิโพรพิลีนเป็นฟิล์มที่มีสมบัติเด่นด้านความใส การทนความร้อน และเงามันเหมาะจะนำไปทำถุงที่ต้องการสมบัติด้านกรทนต่อความร้อนหรือถุงที่ต้องการแสดงสิ่งของที่บรรจุอยู่ภายใน โดยไม่เน้นความแข็งแรงมากนัก เช่น ถุงใส่อาหารร้อน, ถุงใส่เสื้อผ้า, ถุงบรรจุสินค้า เป็นต้น นอกจากนี้ ยังเปิดปากถึงและเป่าได้ง่าย บรรจุของแข็งได้ไม่ต่ำกว่า 0 องศาเซลเซียส ไม่เหมาะสำหรับบรรจุของที่มีน้ำหนักมาก ทนกรดและด่างบางชนิด การผลิตส่วนใหญ่ต้องผ่านน้ำ เพื่อให้ถุงใสและเย็นตัวเร็ว

นอกจากนี้โพลิโพรพิลีนยังใช้ผลิตเป็นแผ่นฟิล์มพลาสติกห่อหุ้มอาหาร ซองใส่ขนมขบเคี้ยว ตลอดจนซองใส่บะหมี่สำเร็จรูป ซองใส่เสื้อเชิ้ต ซึ่งบรรจุภัณฑ์เหล่านี้จะมีสมบัติในการทนทานต่อแรงกระแทก และการซึมผ่านได้ดี อีกทั้งยังมีน้ำหนักเบา และราคาถูกอีกด้วย

2. ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือน โพลิโพรพิลีนมีสมบัติที่สามารถขึ้นรูปได้ง่ายด้วยการฉีด มีการหดตัวต่ำ และยังสามารถใช้บรรจุอาหารเพื่ออุ่นในไมโครเวฟได้อีกด้วย ดังนั้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือน รวมทั้งหลอดกาแฟที่เห็นทั่วไปด้วย

3. ผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ โพลิโพรพิลีนนับว่าเป็นพลาสติกที่มีความเหมาะสมมากที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ โดยเฉพาะชิ้นส่วนต่าง ๆ ของรถยนต์ ทั้งนี้เพราะมีน้ำหนักเบา

ราคาถูก ทนแรงกระแทก นอกจากนี้พอลิโพรพิลีนยังสามารถที่จะนำมารีไซเคิลได้ ในประเทศที่พัฒนาแล้วไม่ว่าจะเป็นสหรัฐอเมริกา ยุโรป หรือญี่ปุ่น มีนโยบายที่จะใช้วัสดุที่สามารถรีไซเคิลได้มาทำเป็นชิ้นส่วนในรถยนต์ จึงทำให้พอลิโพรพิลีนในประเทศเหล่านี้สามารถเข้ามาทดแทนพลาสติกตัวอื่นได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างของพอลิโพรพิลีนที่เห็นกันง่าย ๆ ในชิ้นส่วนของรถยนต์ ได้แก่ กระจังหน้า แผงหน้าปัดกันชน และเปลือกแบตเตอรี่ เป็นต้น

4. พบพอลิโพรพิลีนในชิ้นส่วนอุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องใช้ในสำนักงาน เครื่องใช้ภายในบ้าน เข็มฉีดยาใช้แล้วทิ้งเลย ตลอดจนเชือก ตาข่าย และกระถางต้นไม้ด้วย

2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [13,14]

2.5.1 ความหมายของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ Catalyst คือ สาร (Substance) ที่เติมลงไปในปฏิกิริยา ในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับสารตั้งต้น แล้วทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate) เร็วขึ้น โดยที่สารนั้นไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหลังปฏิกิริยาเสร็จสิ้น แสงหรือความร้อนไม่ใช่สารตั้งต้นแม้จะเร่งปฏิกิริยาได้ก็ไม่จัดว่าเป็น Catalyst

2.5.2 สมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

- ต้องไม่ไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา
- ช่วยลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา
- ต้องเป็นสารเสมอ (ไม่ใช่พลังงาน)

2.5.3 ประโยชน์ของตัวเร่งปฏิกิริยา

- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีต่างๆ เช่น Catalytic cracking, Catalytic reforming เป็นต้น
- ใช้ในการควบคุมไอเสียที่ออกจากรถยนต์ (Catalytic converters)
- ใช้ในการกำจัดของเสีย (Waste) หรือสารที่เป็นพิษ (Toxic) ในกระบวนการอุตสาหกรรมทางด้านต่าง ๆ
- สามารถลดสภาวะที่รุนแรงในการเกิดปฏิกิริยาได้
- สามารถลดค่าใช้จ่ายในด้านพลังงานและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีราคาแพงได้

2.5.4 ประเภทของปฏิกิริยาอะคะตะไลซิส

ปฏิกิริยาที่มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เข้ามาช่วย เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นนั้น เรียกว่า ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิส (Catalytic reaction หรือ Catalysis) โดยปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.5.4.1 ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous catalytic Reaction) ปฏิกิริยาที่ทั้งตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน

• ประเภทของปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์

1. ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นแก๊ส ได้แก่ Nitrogen oxide ในปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Sulfur Dioxide ในกระบวนการผลิตกรด H_2SO_4
2. สภาพที่เป็นของเหลว เช่น การใช้กรดและเบสในกระบวนการไฮโดรไลซิสของพอลิเอสเตอร์

2.5.4.2 ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous catalytic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่สารตั้งต้น และตัวเร่งปฏิกิริยามีสถานะที่แตกต่างกัน

• ประเภทของปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ประเภทของปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์

ตัวเร่งปฏิกิริยา	สารตั้งต้น	ตัวอย่าง
ของเหลว	แก๊ส	Alkene polymerization โดยใช้ H_2SO_4 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ของแข็ง	ของเหลว	H_2O_2 decomposition โดยใช้ Au เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ของแข็ง	แก๊ส	การสังเคราะห์แอมโมเนีย โดยใช้ Fe เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
ของแข็ง	ของเหลว + แก๊ส	Hydrogenation ของ nitrobenzene ไปเป็น aniline โดยใช้ Pd เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.4.3 Enzymatic Catalysis ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอนไซม์ (enzyme) มีทั้งแบบเอกพันธ์ และแบบวิวิธพันธ์ ส่วนใหญ่ที่ใช้กันในปัจจุบันเป็นแบบเอกพันธ์ แต่ก็ได้มีการพัฒนาทำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์

2.5.5 ความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์และแบบวิวิธพันธ์

ลักษณะของปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสทั้งสองประเภทที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปฏิกิริยาอะตอมไฮโดรเจนแบบเอกพันธ์ และวิวิธพันธ์

ปฏิกิริยาอะตอมไฮโดรเจนแบบเอกพันธ์	ปฏิกิริยาอะตอมไฮโดรเจนแบบวิวิธพันธ์
1) ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นมีสถานะเดียวกัน	1) ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นมีสถานะแตกต่างกัน
2) ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายเป็นเนื้อเดียวกันกับระบบ และการเคลื่อนที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนกับสารประกอบตัวอื่น ๆ	2) ตัวเร่งปฏิกิริยากระจายไม่ได้เป็นเนื้อเดียวกับระบบ และการเคลื่อนที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาเหมือนกับสารประกอบตัวอื่น ๆ
3) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งโมเลกุล และอัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา	3) ตัวเร่งปฏิกิริยาจะเร่งปฏิกิริยา โดยอาศัยโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งโมเลกุล และอัตราเร็วของปฏิกิริยาแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา

โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์จะมีการเลือกจำเพาะเจาะจง และมีประสิทธิภาพสูง ผลิตรัตผลที่ได้ค่อนข้างบริสุทธิ์ รวมทั้งยังใช้งานได้ในสภาวะไม่รุนแรง แต่มีข้อเสีย คือ จะทำการแยกผลิตรัตผลและตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกันได้ยาก ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์นั้น สามารถแยกผลิตรัตผลออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย แต่มีการเลือกจำเพาะเจาะจงต่ำและต้องใช้สภาวะที่รุนแรงกว่า ซึ่งจะพบระบบตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 ระบบแตกต่างกันอย่างชัดเจน ทั้งลักษณะ ทฤษฎีและวิธีการใช้ อีกทั้งในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มักจะเลือกใช้ปฏิกิริยาอะตอมไฮโดรเจนแบบวิวิธพันธ์กันเป็นส่วนมาก

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานสำหรับปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยามีอยู่ 2 ทฤษฎีคือ

2.6.1 ทฤษฎีการชน (Collision Theory)

ตามทฤษฎีการชน ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้จะต้องประกอบด้วยสิ่งต่อไปนี้

2.6.1.1 สารตั้งต้นจะต้องมีการชนกัน

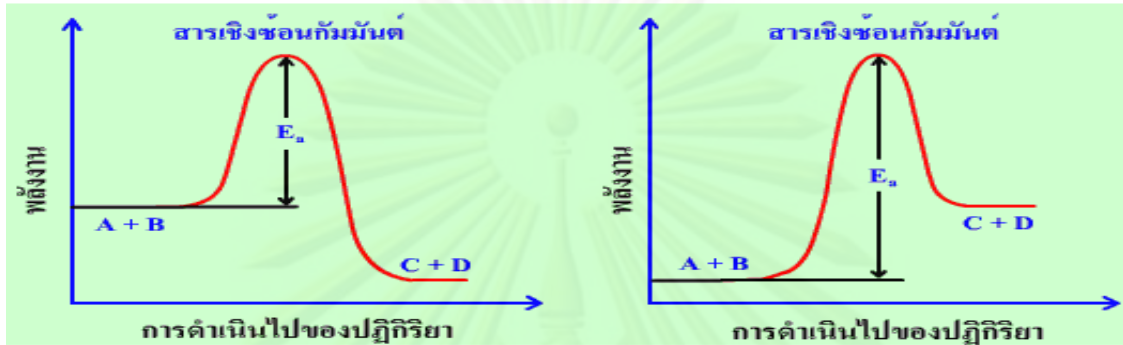
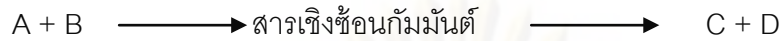
2.6.1.2 ทิศทางของการชนจะต้องเหมาะสม

2.6.1.3 การชนกันจะต้องทำให้เกิดพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานกระตุ้น

ในกรณีนี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ไปดึงเอาสารตั้งต้นมาผสมเอาไว้ที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้โอกาสที่สารตั้งต้นจะชนกันมีมากขึ้น

2.6.2 ทฤษฎีทรานซิชันสเตต (Transition state Theory)

ตามทฤษฎีนี้ กล่าวว่าในการเกิดปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนสารตั้งต้นไปเป็นผลิตภัณฑ์จะต้องเกิดผ่านสารตัวกลางตัวหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า Activated complex หลังจากนั้น Activated complex ก็จะสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิด Activated complex และค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา[15]

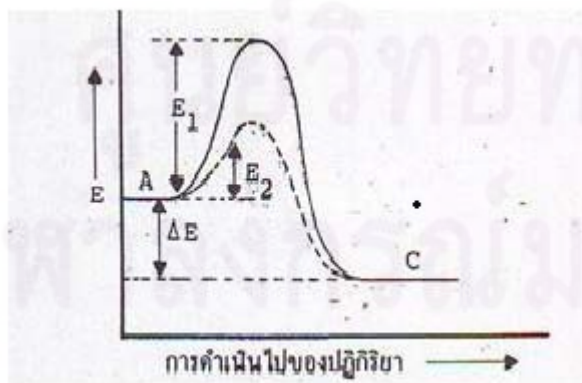
การที่จะได้ผลิตภัณฑ์ด้วยอัตราที่เร็วหรือช้าเพียงใด จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยามีค่าสูงหรือต่ำ

จากสมการของอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

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

จะพบว่าอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่อัตรา (Rate Constant, k) ส่วนค่า k จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (Activation Energy, E_a)

ตัวเร่งปฏิกิริยาจะไปช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น กล่าวคือ จะไปช่วยลดค่าพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา โดยที่ไม่ไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา (Equilibrium) แต่จะไปเปลี่ยนกลไกของปฏิกิริยาให้ไปเกิดในทิศทางใหม่ ที่มีค่าพลังงานกระตุ้นต่ำกว่าเดิมทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ดังภาพที่ 2.9



E_1 = พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา

เมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา

E_2 = พลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยาเมื่อ

มีตัวเร่งปฏิกิริยา

ΔE = พลังงานของปฏิกิริยา

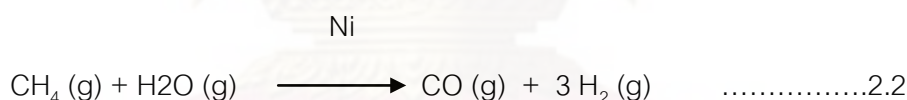
รูปที่ 2.9 การดำเนินไปของปฏิกิริยาที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา[15]

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทที่สำคัญอย่างมาก ต่อกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยจะพบว่าในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และพอลิเมอร์ต่างก็นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์กันมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์

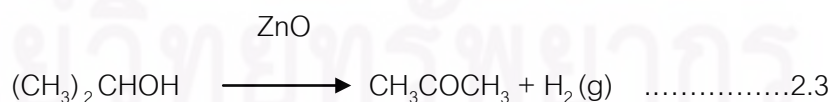
2.7 ปฏิกิริยาอะตอมเลซิสแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis)[16]

เป็นระบบที่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เป็นเนื้อเดียวกันกับสารตั้งต้น ซึ่งจะมีสถานะแตกต่างกัน โดยปกติตัวเร่งปฏิกิริยามักจะเป็นของแข็ง ส่วนสารตั้งต้นอาจเป็นของเหลว หรือแก๊ส หรือระบบผสมระหว่างของเหลวและแก๊สก็ได้ ประสิทธิภาพในการเร่งจะขึ้นกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องให้สารตั้งต้นสัมผัสกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากที่สุด เช่น นำตัวเร่งปฏิกิริยาให้มากที่สุด เช่น นำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการใช้ไปทำการบดให้ละเอียด หรือใช้ตัวรองรับ (support) เข้ามาช่วย เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้น

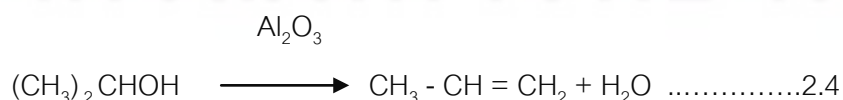
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ที่ใช้กันส่วนใหญ่ ได้แก่ โลหะทรานซิชัน (เช่น Fe, Ni, Pt, Ag) และออกไซด์ของโลหะ (NiO, ZnO, V₂O₅, Bi₂O₃, Al₂O₃, SiO₂) หรืออาจเกิดจากการผสมของโลหะกับออกไซด์ของโลหะ 2 ชนิด เพื่อให้ทำงานดีขึ้นหรือมีความเสถียรยิ่งขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์นี้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน ในกระบวนการ Hydrogenation Dehydrogenation Oxidation Reduction และ Polymerization ตัวอย่างเช่น การผลิต Synthesis gas (CO/H₂) โดยปฏิกิริยา Steam Reforming ของ CH₄ ดังสมการที่ 2.2



สารตั้งต้นตัวเดียวกันถ้าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างกัน อาจทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน เช่น ในปฏิกิริยาการสลายตัวของ Isopropanol : (CH₃)₂CHOH ถ้าใช้ ZnO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยา Dehydrogenation ได้ผลิตภัณฑ์เป็น Acetone ดังสมการที่ 2.3



ในขณะที่ถ้าใช้ Al₂O₃ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น Propylene โดยจะเกิดผ่านปฏิกิริยา Dehydrogenation ดังสมการที่ 2.4

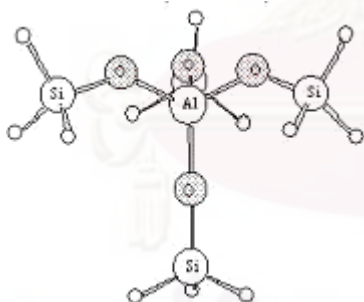


2.7.1 กระบวนการเร่งปฏิกิริยาด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous catalytic process) ขั้นตอนของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์เข้ามาช่วย เป็นดังนี้

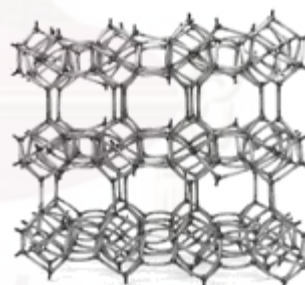
- 2.7.1.1 การแพร่กระจายของสารตั้งต้นเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2.7.1.2 การแพร่กระจายของสารตั้งต้นไปยังผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2.7.1.3 การดูดซับของสารตั้งต้นลงบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2.7.1.4 การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ขึ้น
- 2.7.1.5 การหลุดออกของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา
- 2.7.1.6 การแพร่กระจายของผลิตภัณฑ์เข้าไปใน Bulk gas phase
- 2.7.1.7 การแพร่กระจายของผลิตภัณฑ์ออกจากรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.8 ซีโอไลต์ (zeolite) [17]

ซีโอไลต์ คือสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ซึ่งมีหน่วยย่อยที่ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน หรืออะลูมิเนียมหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม (SiO_4 หรือ AlO_4^-) สร้างพันธะกันเป็นทรงสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedron) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุมโดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน (รูปที่ 2.10) ก่อให้เกิดเป็นโครงร่างผลึกที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบแบบสามมิติ ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์อยู่ในช่วง 2-10 อังสตรอม



รูปที่ 2.10 โครงสร้างหน่วยย่อยของซีโอไลต์

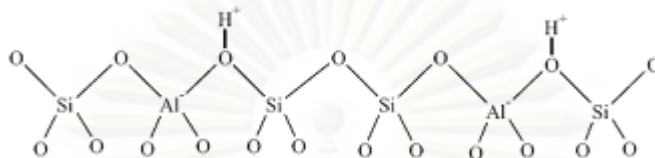


รูปที่ 2.11 โครงร่างผลึกของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง

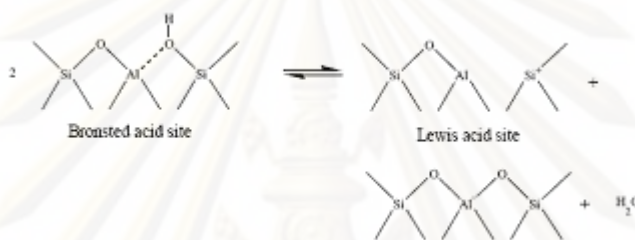
2.8.2 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ [18]

สมบัติที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์มี 2 ประการ คือ สมบัติการเลือกจำเพาะและความเป็นกรด สมบัติการเลือกจำเพาะเกิดขึ้นจากโครงสร้างของซีโอไลต์ชนิดนั้น ๆ โดยถูกกำหนดด้วยอะตอมของออกซิเจนที่ล้อมรอบรูเปิด ดังนั้นสารตั้งต้นต้องมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของซีโอไลต์ จึงจะสามารถแพร่เข้าทำปฏิกิริยาภายในรูพรุนได้ ส่วนสมบัติความเป็นกรดของซีโอไลต์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

(1) ชนิดของตำแหน่งกรด แบ่งออกเป็น 2 ชนิดหลัก ๆ คือ กรดบราวน์สเตท (Bronsted acid) มีตำแหน่งกรดเป็น $\equiv\text{Si}-\text{OH}-\text{Al}\equiv$ ซึ่งเป็นตำแหน่งกรดที่สำคัญในการเร่งปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.12 และกรดลิวอิส (Lewis acid) มีตำแหน่งกรดเป็น $\equiv\text{Al}$ ซึ่งตำแหน่งกรดบราวน์สเตท (Bronsted acid site) สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส (Lewis acid site) ได้ โดยการปรับสภาพซีโอไลต์ที่อุณหภูมิสูง เกิดการสูญเสียน้ำออกจากโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 โครงสร้างตำแหน่งกรดบราวน์สเตท (Bronsted acid site)



รูปที่ 2.13 การแปลงสภาพของตำแหน่งกรดบราวน์สเตทเป็นตำแหน่งกรดลิวอิส

(2) ปริมาณของตำแหน่งกรด กำหนดด้วยอัตราส่วน Si/Al ถ้าปริมาณของอะลูมิเนียมในเยื่อตา จะทำให้ซีโอไลต์มีตำแหน่งกรดมาก จึงเพิ่มลักษณะชอบน้ำแก่ซีโอไลต์ ทำให้เกิดการดูดซับสารตั้งต้นบนพื้นผิวซีโอไลต์มากขึ้น ซึ่งบางครั้งอาจทำให้เกิดการอุดตันรูพรุนได้

(3) ความแรงของตำแหน่งกรด กำหนดด้วยอัตราส่วน Si/Al เช่นกัน ถ้าปริมาณอะลูมิเนียมเยื่อตาให้ความแรงกรดเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่อัตราส่วน Si/Al ต่ำ ๆ จะไม่ทำให้ความแรงกรดเพิ่มขึ้น

สมบัติความเป็นกรดของซีโอไลต์ สามารถปรับแต่งได้ผ่านการบำบัดด้วยกรดหรือเบส และการกราฟ (grafting) หมู่อินทรีย์บนพื้นผิวซีโอไลต์

2.8.3 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ [18]

ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นกรด (acid properties) และการเลือกจำเพาะ (selective properties) สูง มีความเสถียรทางความร้อนและความร้อนในภาวะที่มีน้ำ (thermal and hydrothermal stability) จึงสามารถฟื้นฟูสภาพด้วยความร้อน (thermal regeneration) และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการเผา (calcination) ในบรรยากาศที่มีออกซิเจน จึงมักนำเอาซีโอไลต์มาใช้งาน 4 ประเภทหลัก ๆ ดังนี้

1. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมโรเซชัน (isomerization) เป็นต้น โดยมีการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและเคมีของซีโอไลต์ให้เหมาะสมกับปฏิกิริยามากขึ้น เช่น A. Gola et al. ทำการปรับอัตราส่วนระหว่างซิลิกอน

ต่ออะลูมิเนียมของซีโอไลต์ Y เพื่อเพิ่มความเป็นกรด (acidity) โดยการนำซีโอไลต์ Y ผ่านไอน้ำ (hydrothermal steaming) ทำให้อะตอมของอะลูมิเนียมถูกดึงออกจากโครงสร้างซีโอไลต์ (dealumination) จากนั้นแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต (ammonium nitrate: NH_4NO_3) แล้วนำไปเผา (calcination) อะตอมของซิลิกอนจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่แทนที่อะตอมของอะลูมิเนียมที่หลุดออกไป ทำให้อัตราส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมสูงขึ้น เพิ่มความเป็นกรดของซีโอไลต์ และมีโครงสร้างที่คงทนต่อความร้อนมากขึ้น เรียกว่า Ultrastable Y (USY)

ในปัจจุบัน USY นำมาใช้ในกระบวนการไอโซเมอไรเซชัน (isomerization) การแตกสลาย (cracking) และแอลคิลเลชันของไฮโดรคาร์บอนในโรงกลั่นน้ำมัน

2. ใช้เป็นสารดูดซับ (sorption agent) ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ทำให้มีสมบัติการเลือกจำเพาะ สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด จึงนำซีโอไลต์มาใช้ในการแยกสาร (separation) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการทำให้แห้ง (dehydration) โดยซีโอไลต์สามารถดูดซับและคายน้ำได้ คือเมื่อให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์ น้ำในรูพรุนจะระเหยออกไป แต่เมื่อซีโอไลต์สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้ง ก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก นอกจากนี้ยังใช้ซีโอไลต์ในการดูดซับสารอื่น เช่น ไอโอดีน ตะกั่ว และแอมโมเนีย เป็นต้น

3. สารลดความกระด้างของน้ำ (water softener) เนื่องจากซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะแอลคาไลเกาะอยู่อย่างหลวมๆ เช่น โซเดียม หรือโพแทสเซียม จึงสามารถแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน ซึ่งเป็นประจุของโลหะที่อยู่ในน้ำกระด้างได้

4. ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) ซีโอไลต์สามารถใช้ในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ รวมทั้งสามารถใช้ขจัดแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ จากไอเสียเครื่องยนต์ให้กลายเป็นแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนที่ปลอดภัย

2.9 การเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst deactivation)

Catalyst deactivation หมายถึง การที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความว่องไว (Activity) และการเลือกจำเพาะเจาะจง (Selectivity) เนื่องจากสาเหตุต่อไปนี้

2.8.1 การเป็นพิษ (Poisoning) เกิดขึ้นเนื่องจากมีสิ่งเจือปน (Impurity) อยู่ในสารที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา แล้วทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

2.8.2 การอุดตัน (Fouling) เป็นปรากฏการณ์ทางด้านกายภาพ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากฝุ่นผงหรือพวกคาร์บอนที่เกิดจากปฏิกิริยามาเกาะหรือไปอุดตันที่รูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา แล้วทำให้ความว่องไวหรือการเลือกจำเพาะเจาะจงของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลง

2.8.3 การรวมตัวเนื่องจากความร้อน (Sintering) เกิดเนื่องจากการที่โลหะเกิดการหลอมเหลวเนื่องจากมีการใช้อุณหภูมิที่สูงในกระบวนการผลิต ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้โลหะนั้นมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้ตำแหน่งที่ว่างไวของตัวเร่งปฏิกิริยาหรือ Active site ลดลง หรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงจากโครงสร้างแบบหนึ่งไปเป็นโครงสร้างอีกแบบหนึ่ง ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีความว่างไวลดต่ำลง

2.8.4 การสูญเสียสปีชีส์ที่ว่างไว (Loss of active species) ซึ่งอาจจะเกิดการสูญเสีย Active species โดยเกิดการระเหย (Valorization) ของสารประกอบออกไปจากตัวเร่งปฏิกิริยาจาก Catalyst deactivation ข้างต้น

2.10 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Characterization)[16]

การตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวเร่งปฏิกิริยา หรือ Catalyst Characterization เป็นการตรวจสอบคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งทางกายภาพ และทางเคมี โดยจะอาศัยเทคนิคต่าง ๆ เข้ามาช่วยในการตรวจสอบ การตรวจสอบคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาทางกายภาพนั้น มักเน้นไปในเรื่องของการหาพื้นที่ผิว (Surface area) ของตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีที่นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ได้แก่ วิธีการดูดซับแก๊สโดยเทคนิค BET และการตรวจสอบโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถทำได้โดยอาศัยเทคนิคทางฟิสิกส์เข้ามาช่วย ซึ่งได้แก่ X-Ray Powder Diffraction (XRD) Transmission Electron Microscopy (TEM) Scanning Electron Microscopy (SEM) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาวิธีการดูดซับแก๊สโดยเทคนิค BET และ X-Ray Powder Diffraction (XRD)

2.10.1 วิธีการดูดซับแก๊สโดยเทคนิค BET

ทฤษฎีของ BET เป็นทฤษฎีสำหรับการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) โดยนักวิจัยชื่อ Brunauer, Emmett and Teller ได้ทำการพัฒนามาจากทฤษฎีการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ของ Longmuir โดยทฤษฎีของ Longmuir นั้นตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า

1. การดูดซับโมเลกุลของแก๊ส จะเกิดขึ้นไปเรื่อย ๆ บนผิวหน้าจนกระทั่งเต็ม แต่จะมีเพียงชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น
 2. การดูดซับจะไม่เกิดการเคลื่อนย้าย (Localize)
 3. พลังงานที่ใช้ในการดูดซับลงบนพื้นผิวทุกชนิดนั้นมีค่าเท่ากันหมด ทำให้มีโอกาสเกิดการดูดซับที่เท่า ๆ กันตลอดทั่วทั้งพื้นผิว
 4. ไม่คำนึงถึงแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลข้างเคียง
- ส่วนทฤษฎีของ BET นั้นมีสมมติฐานที่เพิ่มขึ้นจากสมมติฐานของ Longmuir ดังนี้
5. จำนวนของ Active site คงที่
 6. โมเลกุลในชั้นที่ 2 จะเข้าไปเกาะบนชั้นที่ 1 ในลักษณะที่ตรงกัน

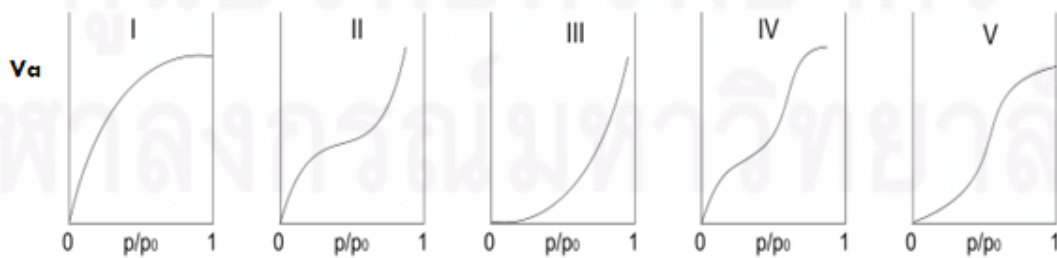
7. คุณสมบัติของเมโมกุลที่ถูกดูดซับตั้งแต่ชั้นที่สองขึ้นไป จะมีคุณสมบัติเหมือนกับแก๊สหรือของเหลว ในวิภาคของแก๊สหรือของเหลว
8. ถ้าความดันย่อยของตัวถูกดูดซับมีค่าเท่ากับความดันไออิ่มตัวแล้ว ตัวถูกดูดซับจะควบแน่นบนชั้นดูดซับ และจำนวนชั้นของการดูดซับจะเป็นแบบไม่จำกัด

จากสมมติฐานทั้งหมดข้างต้นจะสามารถเขียนเป็นสมการของ BET ได้ดังสมการที่ 2.5

$$\frac{P}{V(P_0-P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_0} \dots\dots\dots 2.5$$

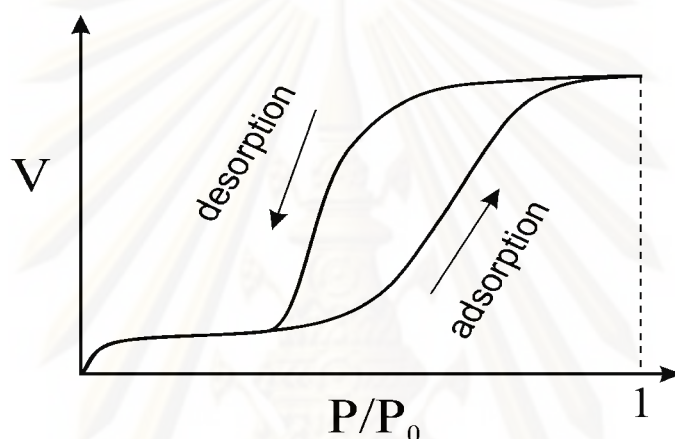
- เมื่อ P = ความดันของสารที่จะมาเกาะ (adsorbate)
- P₀ = ความดันไออิ่มตัว (saturation pressure) ของแก๊สที่อุณหภูมิทดลอง
- V = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่ความดัน P
- V_m = ปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับเพื่อเกิดเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว
- C = ค่าคงที่ โดยมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนของการดูดซับ และค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของแก๊ส
- นั่นคือ C = $C^{(q_1-q_2)} / RT$
- เมื่อ q₁ = ค่าความร้อนของการดูดซับที่ชั้นแรก
- เมื่อ q₂ = ค่าความร้อนของการกลายเป็นของเหลวของแก๊สที่มาดูดซับบนชั้นอื่น ๆ ทั้งหมด

ซึ่งวิธีการทดลองสามารถทำได้โดยหาปริมาตรของแก๊สที่ถูกดูดซับที่สภาวะความดัน (P) หรือความเข้มข้น (C) ที่แตกต่างกัน ด้วยการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ซึ่งจะได้เส้นไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) โดย Brunauer ได้เสนอรูปแบบของ Adsorption Isotherm ที่เป็นไปได้ 5 รูปแบบดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.14 Adsorption Isotherm ที่เป็นไปได้ 5 รูปแบบ ซึ่งเสนอโดย Brunauer

โดยปกติแก๊สไนโตรเจนมักจะใช้เป็นตัวถูกดูดซับ เพราะแก๊สไนโตรเจนมีราคาถูก มีความบริสุทธิ์สูง ถูกดูดซับได้ง่ายและรวดเร็วกว่าแก๊สชนิดอื่น ๆ ซึ่งปริมาณของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล ที่อุณหภูมิจุดเดือด (-195.8 °C) ซึ่งจะถูกวัดในช่วงความดันหนึ่งซึ่งต่ำกว่า 1 บรรยากาศ ภายใต้สภาวะเช่นนี้โมเลกุลของไนโตรเจนจะถูกดูดซับเป็นชั้นๆ เรียงซ้อนกัน แต่ต้องการที่จะคำนวณหาค่าปริมาณการดูดซับที่สอดคล้องกับการดูดซับเพียงชั้นเดียว ดังนั้นความดันไอย่อยของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้จึงควรอยู่ในช่วง 10 – 100 kPa ทั้งนี้ก็เพื่อให้ค่า P/P_0 อยู่ในช่วง 0.05 - 0.3 ซึ่ง Brunauer พบว่าแก๊สไนโตรเจนจะให้ลักษณะของ Adsorption Isotherm มีรูปการดูดซับเป็นแบบ II (S-Shape Isotherm) บนผิวหน้าทั้งหมด



รูปที่ 2.15 Adsorption Isotherm แบบที่ II

Adsorption Isotherm แบบที่ II บางครั้งอาจเรียกว่า Sigmoid หรือ S-Shape Isotherm โดยจะพบในวัสดุที่มีโครงสร้างแบบไม่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งที่จุดโค้ง เรียกว่า Knee เป็นจุดเปลี่ยนจากการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) ไปเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer)

ค่าพื้นที่ผิวทั้งหมดที่ต้องการหาได้โดยเทคนิคนี้ แต่พบว่าปัญหาของการหาพื้นที่ผิวโดยเทคนิค BET คือความไม่แน่นอนของผู้วัดและเครื่องมือที่ใช้ในการวัดสำหรับมาตรฐานของ ASTM กำหนดความผิดพลาดในการวัดด้วยเครื่องมือเครื่องเดียวกันจะต้องมีค่าไม่เกิน 1% และความผิดพลาดในการวัดด้วยเครื่องมือต่างเครื่องกันจะต้องมีค่าไม่เกิน 3%

2.10.2 เทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) [19]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction: XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง(Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่าง หลักการวิเคราะห์ คือ วัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มี

การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกัน ซึ่งแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึก เงื่อนไขของการเลี้ยวเบนของรังสี คือ

$$\begin{aligned} & AB + BC = n\lambda \\ \text{แต่} & AB = BC = d \sin \theta \\ \text{ดังนั้น} & d \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots 2.6 \end{aligned}$$

สมการที่ 2.6 เรียกว่า “Bragg's Equation” เป็นเงื่อนไขการเลี้ยวเบนของรังสี

เมื่อ	d	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบ, อังสตรอม (interplanar spacing, Å)
	λ	คือ	ความยาวคลื่น, อังสตรอม (wavelength, Å)
	θ	คือ	มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบ (angle between the lattice plane and X-Ray, degree)
	n	คือ	จำนวนเต็ม

เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสม หรือโครงสร้างต่างกัน จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุมที่มิต้องค่าต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างนั้น ๆ ได้

2.10.3 เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry [18]

เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry หรือ เทคนิค XRF เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอย เทคนิค XRF อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมากจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.11 ปฏิกริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน [5,21]

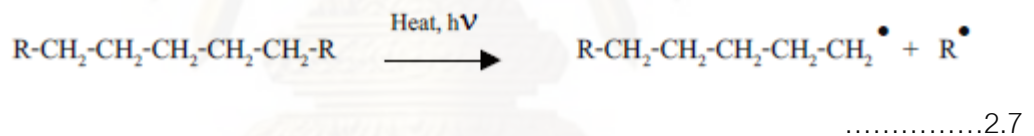
ปฏิกริยาการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

2.11.1 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยความร้อน (Thermal cracking)

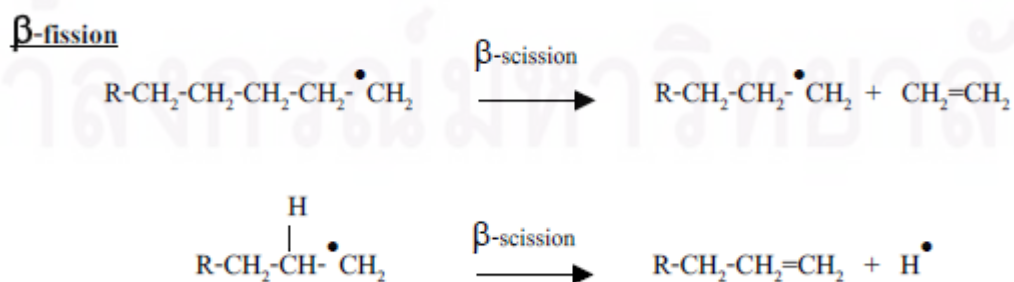
การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลที่เล็กลงโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิสูง โดยหากควบคุมให้การแตกตัวเป็นไปได้อย่างพอดี จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากการให้ความร้อนจะเกินพอดีจะทำให้การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในรูปก๊าซ C_1-C_4 ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนจะมีความว่องไวต่อปฏิกริยาโดยเฉพาะส่วนที่มีแชนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) ซึ่งจะทำปฏิกริยากันเองต่อไป

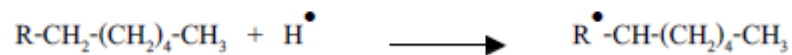
กระบวนการแตกตัวโมเลกุลด้วยความร้อนเป็นปฏิกริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบห่วงโซ่ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1. ขั้นเริ่มต้น (Initiation step) เป็นขั้นตอนในการเกิดอนุมูลอิสระ (Free radical) เกิดจากความร้อนไปทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขาดออกจากกัน เกิดเป็นอนุมูลอิสระ ซึ่งจะ去做ปฏิกริยาในขั้นต่อไป ดังสมการ 2.7



2. ขั้นการเกิดปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องเกิดการเปลี่ยนรูปของไอโซเมอร์และแตกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระนั้นอาจทำปฏิกริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตัวอื่น เกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น นอกจากนี้อนุมูลอิสระนั้นอาจทำปฏิกริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เกิดเป็นอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้น และโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กลงต่อเนื่องไปเรื่อยๆ ดังสมการ 2.8



Chain transfer

.....2.8

3. ขั้นหยุดปฏิกิริยา (Termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยจะทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใหญ่ขึ้น โดยอาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่ โมเลกุลเดี่ยว หรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล ดังสมการ 2.9



.....2.9

2.11.2 กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

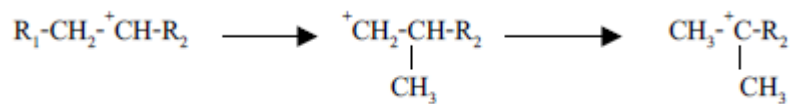
เป็นกระบวนการที่นำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีบทบาทในการช่วยการแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ได้โครงสร้างที่เหมาะสม มีคุณภาพพอเหมาะที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการได้ กลไกของการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

1. การเกิดไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (Carbonium ion) ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรดีไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออนโดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary ion และ primary ion ดังสมการ 2.10



.....2.10

2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลคาร์บอนเนียมไอออน ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของคาร์บอนเนียมไอออนมีความเสถียรแตกต่างกัน ดังสมการ 2.11



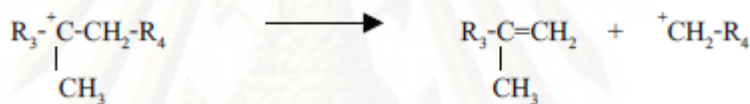
.....2.11

และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน ดังสมการ 2.12



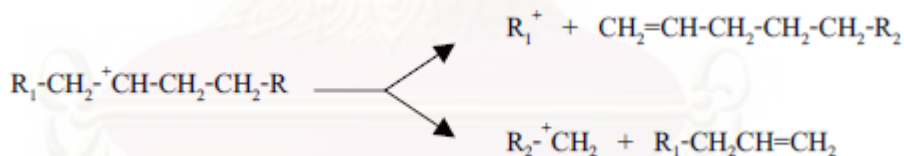
.....2.12

สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา β -scission หรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง β ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็ก โดยมักจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ 2.13



.....2.13

ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ในตัวอย่างของ secondary carbonium ion ดังสมการ 2.14



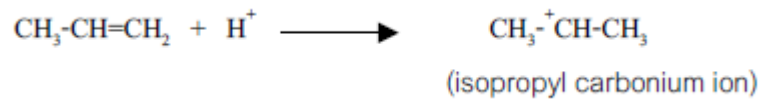
.....2.14

ถ้า $R_1 = H$ การเกิด β -scission จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสมการ 2.15



.....2.15

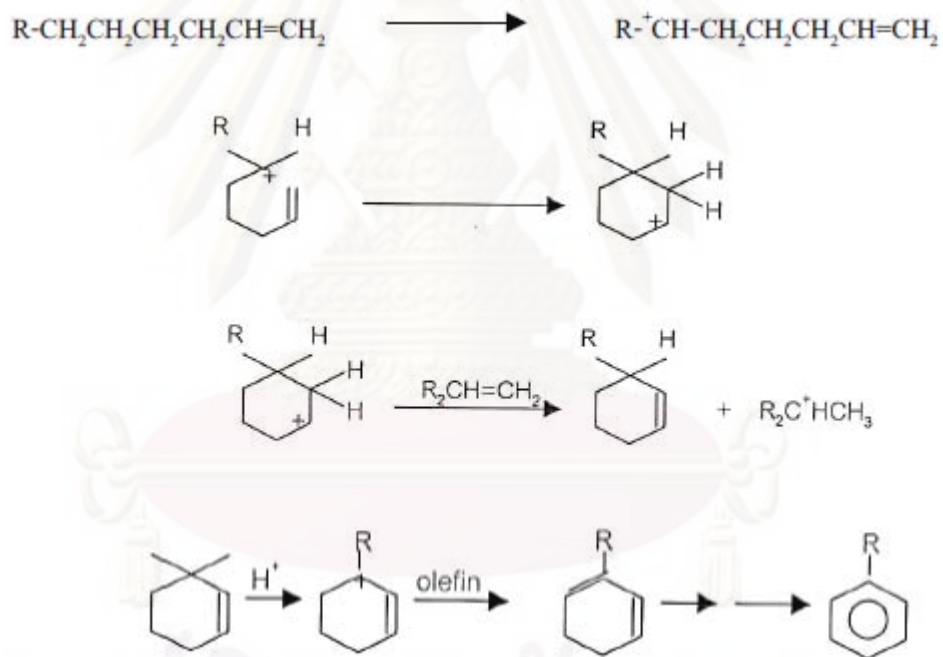
โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโพรพีนจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งจะไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้ ดังสมการ 2.16



.....2.16

Isopropyl carbonium ion จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับโมเลกุลประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน

ในการเกิดวงแหวนเอโรแมติกจากปฏิกิริยา dehydrocyclization โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยา β -scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟิน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก cyclohexadiene ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก ดังสมการ 2.17



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยแก๊สที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของเบนซีนที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกเอโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่จะเกาะติดอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.11.3. กระบวนการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking)

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา และการเติมไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆกับการเติมไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดโอเลฟินขึ้นที่บริเวณที่เป็นโลหะของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยโอเลฟินไปทำให้เกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา จากนั้นจะเกิดการแตกตัว และที่บริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยานั้นเอง จะเกิดการเติมไฮโดรเจนทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้อิ่มตัวในที่สุด นอกจากนี้การเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยทำความสะอาดให้กับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วย เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป

กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นอย่างดี เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความสามารถไปหรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

D.P. Serrano et al [22] ศึกษากระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนและด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) และเอทิลีนไวโนลอะซิเตต (EVA) ผสมกันด้วยอัตราส่วน 86/14 โดยน้ำหนักในการทดลองนี้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น HZSM-5, AI-SBA-15, AI-MCM-41 ทำการทดลองโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ อุณหภูมิที่ใช้คือ 400-420 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่สูงที่สุดคือ ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการแตกตัวด้วยความร้อนและด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า การแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าการแตกตัวด้วยความร้อน สำหรับการเกิดผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับ การแตกตัวด้วยความร้อนและด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (HZSM-5, AI-SBA-15, AI-MCM-41) พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 มีการเลือกเกิดเป็นสารผลิตภัณฑ์อยู่ในช่วง C_6-C_{12} มากที่สุด

Qian Zhou et al [23] ศึกษาถึงการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของพลาสติก 2 ชนิด คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิโพรพิลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 2 ชนิด ชนิดแรกเป็น ZSM-5 และชนิดที่สองคือนำเอา ZSM-5 มาปรับปรุงเรียกว่า DeLaZSM-5 เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง

ZSM-5 ,DeLaZSM-5 และการแตกตัวด้วยความร้อน พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงสูงกว่าการแตกตัวด้วยความร้อน และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำนั้นแสดงให้เห็นว่ามีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่สูงกว่าพอลิโพรพิลีนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น DeLaZSM-5 แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกตัวที่อุณหภูมิต่ำลง และการปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 เป็น DeLaZSM-5 นั้นทำให้คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกปรับปรุงให้ดีขึ้น จะเห็นได้จากค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่สูงขึ้น

Congxia Xie et al [24] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของพอลิโพรพิลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น MCM-41 แล้วทำการปรับปรุงด้วยการเติม Zr และ Mo ลงไป ซึ่งการเติม Zr และ Mo ส่งผลให้มีการปรับปรุงด้านความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยา ผลที่ได้จากการทดลองนี้เป็นการเปรียบเทียบกันระหว่าง HZSM-5, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, MCM-41, Zr-Mo-MCM-41 พบว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Zr-Mo-MCM-41 ในการแตกตัวเชิงเร่งของพอลิโพรพิลีนมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ทั้งหมดและค่าการเลือกเกิดจำเพาะของผลิตภัณฑ์เมื่อใช้ตัวเร่งเป็น Zr-Mo-MCM-41 พบว่ามีค่าสูงอยู่ในช่วง $\text{C}_6\text{-C}_{14}$

Lee S.Y. et al [25] ศึกษาการแปรสภาพของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา clinoptilolite zeolite ทั้งที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติและที่ได้จากการสังเคราะห์เปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, modenite, Y-zeolite และ ZSM-5 และศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดของ clinoptilolite zeolite อุณหภูมิ เวลา ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพของพอลิสไตรีน ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา clinoptilolite ทั้งที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติและที่ได้จากการสังเคราะห์ ให้ผลการเปลี่ยนแปลงสภาพของพอลิสไตรีนดีเทียบเท่ากัน โยให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบประเภทเอมาติกมากกว่าร้อยละ 99 ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็นสไตรีนมอนอเมอร์และเอทิลเบนซีน เมื่อเพิ่มความเป็นกรดของ clinoptilolite zeolite ทำให้ได้เอทิลเบนซีนเพิ่มมากขึ้นจากการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของสไตรีน และได้สไตรีนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่อทำการเพิ่มเวลาโดยลดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน จะทำให้ได้เอทิลเบนซีนเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้นถ้าต้องการผลิตภัณฑ์ชนิดใดจากการแปรสภาพพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา clinoptilolite zeolite นั้น ต้องควบคุมปัจจัยทั้ง 3 ชนิดข้างต้นให้เหมาะสม

Ali M.F. et al [26] ศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อน และการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมของพลาสติกใช้แล้วผสมพอลิไวนิลคลอไรด์(PVC) และกากปิโตรเลียม (petroleum residue) ทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน ,อุณหภูมิ 350 และ 430 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะแก๊สไฮโดรเจนใช้ความดัน 6.50 MPa จะเกิดการสลายตัวของพลาสติกใช้แล้วผสมพอลิไวนิลคลอไรด์และกากปิโตรเลียม พบว่าพลาสติกใช้แล้วพอลิโพรพิลีน เกิดผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวและแก๊สมากกว่าร้อยละ 90 ในทางตรงกันข้ามพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความ

หนาแน่นสูงได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่า ส่วนพอลิโพรพิลีน และพอลิไวนิลคลอไรด์สามารถให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ได้ปานกลาง ในปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมกากปิโตรเลียมที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และ 430 องศาเซลเซียสภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน 1 ชั่วโมงเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิไวนิลคลอไรด์ตัวอย่างและพอลิไวนิลคลอไรด์ใช้พบว่าผลไม่ต่างกัน ส่วนพอลิสไตรีนผสมกากปิโตรเลียมพบว่าพอลิสไตรีน สามารถเกิดผลิตภัณฑ์แก๊สและน้ำมันได้มากกว่าร้อยละ 90 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ต่ำ และพอลิโพรพิลีนให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ปานกลาง ดังนั้นสารผสมพอลิไวนิลคลอไรด์ ทั้งที่ใช้ผสมกับกากปิโตรเลียมและพลาสติก สามารถเพิ่มปริมาณของน้ำมันได้

Wang L.Yoo et al [27] ศึกษาการแตกตัวของพอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET) อะคริลไนโตรลิวเตอะไดอินสไตรีน (ABS) ผสมกับน้ำมันหล่อลื่น ผลที่ได้พบว่าพอลิเอทิลีนจะเกิดปฏิกิริยาได้ดีที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงถึงร้อยละ 99 สำหรับภาวะที่เหมาะสมของพอลิโพรพิลีนคือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ซึ่งใช้พลังงานในการแตกตัวต่ำกว่าพอลิเอทิลีน ภาวะที่เหมาะสมของพอลิสไตรีนคือ อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 12 นาที ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงถึงร้อยละ 95 ส่วนอะคริลไนโตรลิวเตอะไดอินสไตรีน (ABS)ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลา 12 นาที จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำกว่าพอลิสไตรีน และพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET)ทำการแตกตัวที่อุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที จะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำประมาณร้อยละ 78

Walendziewski J. et al [28] ศึกษาการนำของเสียพลาสติกพอลิเอทิลีนและพอลิสไตรีนมาทำการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิและในระบบปิด ทำการแตกตัวด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 410-430 องศาเซลเซียส เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปวิเคราะห์ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัวและดีเซลในช่วงจุดเดือดที่ไม่ต้องการ แต่เมื่อทำการเติมแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นแพททินัมพบว่าทำได้ที่สภาวะต่ำกว่าคือ 390 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา คือ 1.50 ชั่วโมง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นแก๊สและของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำกว่า 360 องศาเซลเซียสเป็นส่วนใหญ่ และมีการเปลี่ยนไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ถึงร้อยละ 90

Weibing D. et al [29] ศึกษาถึงการสังเคราะห์ของเหลวจากพลาสติกเหลือทิ้งเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับยานพาหนะ โดยได้ศึกษาถึงภาวะที่ใช้คืออุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส และ 525 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และ 10 นาที และ ศึกษาถึงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ประกอบด้วย Ni-Mo/Al₂O₃, Ni-Mo/(HZSM-5+SiO-Al₂O₃),Ni/(HZSM-5+SiO-Al₂O₃) และ KC-2600 ที่สามารถให้ร้อยละ

ละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสูง และนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ เมื่อทำการทดลองที่ภาวะอุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนที่ความดัน 300 psig ให้อายุละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันถึงร้อยละ 88.7 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนที่ความดัน 300 psig โดยเพิ่มเวลาการทดลองเป็น 10 นาที ให้อายุละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันเพียงร้อยละ 60 ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวในปริมาณน้อยกว่าการใช้เวลาทำปฏิกิริยาเพียง 5 นาทีเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของเหลวที่เป็นน้ำมันที่ได้จากระบบที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส และ 520 องศาเซลเซียส ให้ของเหลวที่มีองค์ประกอบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน C_4-C_{40} และ C_4-C_{20} ตามลำดับ โดยไม่มีองค์ประกอบที่เป็นไอโซพาราฟิน จึงไม่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับรถยนต์ได้ แต่เมื่อทำการศึกษาผลของการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ กันพบว่า ในระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวได้ดีกว่าและจะใช้ภาวะที่รุนแรงน้อยกว่านอกจากนี้เมื่อทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 20 % wt ของ NiMo/(HZSM-5+SiO-Al₂O₃) และ 20 % wt ของ Ni/(HZSM-5+SiO-Al₂O₃) ในภาวะอุณหภูมิ 375 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน 1000 Psig เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวถึงร้อยละ 47.9 และ 64.8 ตามลำดับ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวในระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาก็ให้องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงได้

Marcilla A. et al [30] ศึกษากระบวนการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ HZSM-5 จากการตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ HZSM-5 มาใช้ในกระบวนการแตกตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยจะศึกษาการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมไปกับการวิเคราะห์ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้งที่เป็นแก๊สและของเหลว จากการทดลองการแตกตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซ้ำ 4 ครั้ง พบว่าปริมาณไค้กบนตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ครั้งที่ 1 และครั้งที่ 4 ซึ่งการสะสมของปริมาณไค้กจะมีผลให้คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนไปแต่เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้งแก๊สและของเหลวพบว่ามีความใกล้เคียงกันทั้ง 4 ครั้งเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาครั้งที่ 5 นั้นพบว่าปริมาณไค้กไม่เพิ่มขึ้นแต่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ทั้งแก๊สและของเหลวมีค่าลดลง จากนั้นพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการแตกตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงพบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ HZSM-5 น้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงดังนั้นการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ HZSM-5 จึงขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเอทิลีนด้วย

Young-Hwa Seo. et al [31] ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น ZSM-5, zeolite-Y, amorphous silica-alumina ทำการศึกษาประสิทธิภาพการแตกตัวด้วยการวิเคราะห์น้ำมันที่ได้ ประกอบไปด้วย พาราฟิน โอลิฟินส์ แนฟทีน และอะ

โรมาติก โดยใช้เทคนิค gas chromatography/massspectrometry (GC/MS) พบว่าการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น zeolite-Y, amorphous silica-alumina นั้นมีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงอยู่ในช่วง 71-82 %wt ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วง C_6-C_{12} แต่การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น ZSM-5 นั้นมีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อยกว่า 35 %wt และผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในช่วง C_6-C_{12} ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ทั้งคู่และ amorphous silica-alumina เป็นตัวที่เพิ่มปริมาณโอเลฟินส์ในผลิตภัณฑ์น้ำมันและตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ZSM-5 และ zeolite-Y ช่วยเพิ่มการเกิดพวอะโรมาติก เป็นตัวช่วยในการทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดกิ่ง ตัวเร่งปฏิกิริยา ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความอ่อนไหวมากที่สุดในการแตกตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและเกิดผลิตภัณฑ์เป็น light hydrocarbons ในขณะที่ mordenite เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดปริมาณได้สูง และ amorphous silica-alumina เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความอ่อนไหวในการแตกตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเช่นกันมีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงแต่เกิดพวอะโรแมติกต่ำ

นิตา วิสุทธิรังษิโอร [32] ศึกษากระบวนการแตกตัวของพอลิสไตรีน และน้ำมันพีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ เพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ 350-600 องศาเซลเซียส, อัตราส่วนระหว่างน้ำมันพีซีใช้แล้วและพอลิสไตรีน 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 โดยน้ำหนัก และอัตราการไหลเข้า 4.14, 9.04, 15.49 กรัมต่อนาที และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น พบว่าภาวะที่ส่งผลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันพีซีใช้แล้วที่ทำให้เกิดปริมาณร้อยละเนฟตามากที่สุดคืออุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 9.04 กรัมต่อนาที ได้ปริมาณเนฟทาร์ร้อยละ 41.15 เครีซีนร้อยละ 8.72 แก๊สออกซิลเบาร์ร้อยละ 28.26 แก๊สออกซิลหนักร้อยละ 9.92 กากน้ำมันร้อยละ 11.12 และพบว่าภาวะที่ส่งผลต่อการแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนและน้ำมันพีซีใช้แล้วที่ทำให้เกิดปริมาณร้อยละของเนฟตามากที่สุด คือ อัตราส่วนของน้ำมันพีซีใช้แล้วและพอลิสไตรีน 60:40 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อัตราการไหล 9.04 กรัมต่อนาที ได้ปริมาณเนฟทาร์ร้อยละ 70.38 เครีซีนร้อยละ 6.26 แก๊สออกซิลเบาร์ร้อยละ 14.49 แก๊สออกซิลหนักร้อยละ 3.33 กากน้ำมันร้อยละ 3.43 เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันโดยเครื่อง FTIR พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันหลักเป็นแอโรแมติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับหมู่ฟังก์ชันหลักในน้ำมันเบนซินออกเทน 95 แล้วพบว่ามีหมู่แอโรแมติกไฮโดรคาร์บอนที่คล้ายคลึงกัน

ประจักษ์รัตน์ แต่ภักดี [33] ศึกษาถึงกระบวนการแตกตัวของพอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีนและน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กขนาด 70 มิลลิลิตร กระบวนการแตกตัวนี้ทำการศึกษาถึงเปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์ อัตราส่วน

พอลิโพรพิลีนต่อพอลิสไตรีน อัตราส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติก อุณหภูมิ 390-450 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 45-105 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-10 บาร์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 0.1-1.5 กรัม ปริมาณสารตั้งต้นจำนวน 15 กรัม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน และน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ดังนี้ เปอร์เซ็นต์ของเหล็กบนถ่านกัมมันต์คือ 5% อัตราส่วนพอลิโพรพิลีนต่อพอลิสไตรีนคือ 70:30 อัตรา ส่วนน้ำมันหล่อลื่นต่อพลาสติกคือ 60:40 อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 75 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.8 กรัม ซึ่งภาวะการทดลองข้างต้นจะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 75.65% ผลิตภัณฑ์แก๊ส 17.37 % และของแข็งที่ไม่ทำปฏิกิริยา 6.98% เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันมาวิเคราะห์หาการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์พบว่าปริมาณของแก๊สไฮโดรเจน 61.25% เคโรซีน 13.25% แก๊สออกยลไบ 15.84% แก๊สออกยล 3.65% และกากน้ำมันหนัก 6.01% และเมื่อเปรียบเทียบตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า เหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ผลของผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวโดยการแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว และทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้เพื่อหาภาวะของการทดลองที่ให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน และองค์ประกอบที่ดีที่สุด

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (micro-reactor) รูปทรงกระบอกปริมาตร 70 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลส มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊สและวาล์วนิรภัย สามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคาล มีเทอร์โมคัปเปิลทางด้านบนสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง ดังรูปที่ 3.1



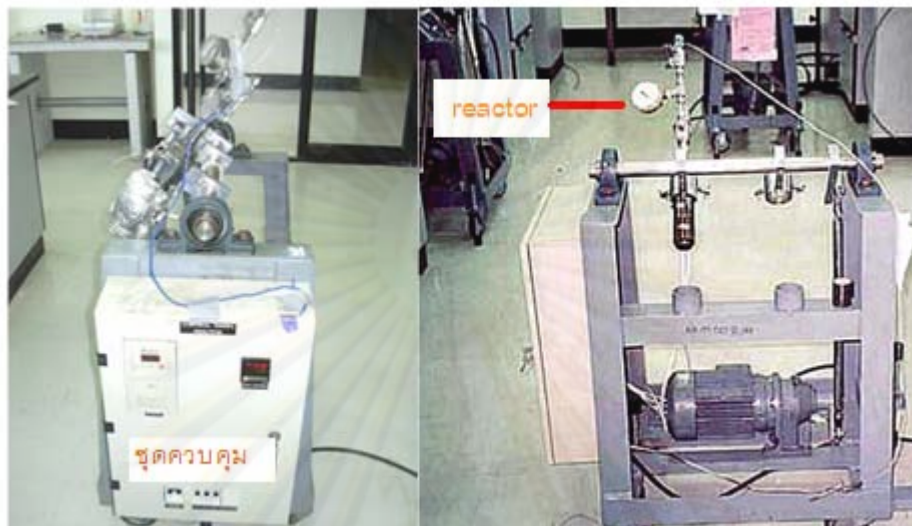
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (micro-reactor)

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 โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็วดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล และเครื่องเขย่า

3.1.6 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดกรองสุญญากาศ

3.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดทศนิยม 2 ตำแหน่ง

3.1.8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ชั่งได้ละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

3.1.9 นาฬิกาจับเวลา

3.1.10 ตู้อบ

3.1.11 ตู้ดูความชื้น

3.1.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น (Simulated Distillation Gas Chromatograph) Varian CP-3800 พร้อมเครื่องตรวจวิเคราะห์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดงดังรูปที่ 3.4



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

3.1.13 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

เทคนิค XRF อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสี X ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (fluoresced) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนเปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้ เครื่อง XRF ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

3.1.14 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

เทคนิค XRD อาศัยหลักการของการยิงรังสี X ที่ทราบความยาวคลื่น(λ)ไปกระทบชิ้นงาน ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกันโดยมีห้วงวัดเป็นตัวรับข้อมูล เนื่ององศาในการเลี้ยวเบนของรังสี X จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและโครงสร้างของสารที่มีอยู่ในตัวอย่าง ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและ สามารถนำมาใช้ใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ



รูปที่ 3.6 เครื่อง X-ray Diffractometer (XRD)

3.1.15 เครื่องหาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด(BET surface area)

การวัดพื้นที่ผิวด้วยการใช้เทคนิค BET เป็นการวัดปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับ (absorb) ลงบนผิวสาร แล้วนำมาคำนวณเป็นพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) เครื่องวัดพื้นที่ผิว BET แสดงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องหาพื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด(BET surface area)

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

- 3.2.1 เม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีน จากบริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด
- 3.2.2 เม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีน จากบริษัท ทีพีไอ โพลีน จำกัด
- 3.2.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว จากบริษัท ไทยออยล์ จำกัด(มหาชน)
- 3.2.4 แก๊สไฮโดรเจน 99.99 % จากบริษัท TIG Trading จำกัด

3.3.การดำเนินการวิจัย

3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค BET

3.3.2 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว โดยวางรูปแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา

ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 ส่วนตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 แสดงจำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนตามลำดับ และใช้การคำนวณจากโปรแกรม Design expert เวอร์ชัน 6.0.10 ในการหาภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของพอลิเอทิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

	ตัวแปร	ระดับ		หน่วย
		ระดับต่ำ(-)	ระดับสูง(+)	
A =	อุณหภูมิ	420	460	องศาเซลเซียส
B =	เวลา	45	75	นาที
C =	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1	5	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
D =	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	5	บาร์

ตารางที่ 3.2 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิเอทิลีน

การทดลอง	ตัวแปร			
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น(บาร์),D
1.1	460	75	5	5
1.2				
2.1	460	75	1	5
2.2				
3.1	460	75	5	1
3.2				
4.1	460	75	1	1
4.2				
5.1	460	45	5	5
5.2				
6.1	460	45	1	5
6.2				

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิเอทิลีน

การทดลอง	ตัวแปร			
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น(บาร์),D
7.1	460	45	5	1
7.2				
8.1	460	45	1	1
8.2				
9.1	420	75	5	5
9.2				
10.1	420	75	1	5
10.2				
11.1	420	75	5	1
11.2				
12.1	420	75	1	1
12.2				
13.1	420	45	5	5
13.2				
14.1	420	45	1	5
14.2				
15.1	420	45	5	1
15.2				
16.1	420	45	1	1
16.2				
17.1	440	60	3	3
17.2				
17.3				

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของพอลิโพรพิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตัวแปร		ระดับ		หน่วย
		ระดับต่ำ(-)	ระดับสูง(+)	
A =	อุณหภูมิ	400	430	องศาเซลเซียส
B =	เวลา	30	60	นาที
C =	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1	5	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
D =	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	5	บาร์

ตารางที่ 3.4 จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิโพรพิลีน

การทดลอง	ตัวแปร			
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D
1.1	430	60	5	5
1.2				
2.1	430	60	1	5
2.2				
3.1	430	60	5	1
3.2				
4.1	430	60	1	1
4.2				
5.1	430	30	5	5
5.2				
6.1	430	30	1	5
6.2				
7.1	430	30	5	1
7.2				
8.1	430	30	1	1
8.2				

ตารางที่3.4 (ต่อ)จำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิโพรพิลีน

การทดลอง	ตัวแปร			
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D
9.1	400	60	5	5
9.2				
10.1	400	60	1	5
10.2				
11.1	400	60	5	1
11.2				
12.1	400	60	1	1
12.2				
13.1	400	30	5	5
13.2				
14.1	400	30	1	5
14.2				
15.1	400	30	5	1
15.2				
16.1	400	30	1	1
16.2				
17.1	415	45	3	3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบและสารตั้งต้น

1. นำพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน ไปอบไล่ความชื้นในตู้อบที่มีอุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น เพื่อเตรียมไว้ใช้ในการทดลอง
2. วิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry เทคนิค X-ray Diffractometer (XRD) และวิเคราะห์หาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิค BET
3. นำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น เพื่อเตรียมไว้ใช้ในการทดลอง

3.4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ชั่งน้ำหนักพอลิเอทิลีนหรือพอลิโพรพิลีน 20 กรัมพร้อมกับเครื่องปฏิกรณ์ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยใช้เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง แล้วประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนประกอบต่างๆ แสดงดังรูป 3.1
2. นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่ต้องการ ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สด้วยน้ำสบู่ตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์
3. นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิล และอุปกรณ์ลดความร้อน จากนั้นหุ้มด้วยฉนวน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง
4. ทำการทดลองตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้วนำฉนวนและชุดลดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้องจน เปิดฝาออก จากนั้นนำเครื่องปฏิกรณ์ไปชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง
5. แยกผลิตภัณฑ์น้ำมันออกจากกากของแข็งด้วยการกรองแบบสุญญากาศเข็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษทิชชูที่ได้ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว จากนั้นนำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษทิชชูไปอบในตู้อบ Dry Oven ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
6. นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ

7. คำนวณร้อยละการเปลี่ยนของสารตั้งต้น

$$\text{ร้อยละผลได้น้ำมัน (\% oil yield)} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำมันที่เกิดขึ้น} \times 100}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}}$$

ร้อยละผลได้แกโซลินทั้งหมด (% overall gasoline yield)

$$= \text{ร้อยละผลได้น้ำมัน} \times \text{ร้อยละผลได้แกโซลิน}$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวพลาสติกพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอพซีซีใช้แล้ว โดยรศึกษากิจกรรมของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการแตกตัวซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง เวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น รวมทั้งศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการทดลองเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีสมบัติใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปิโตรเลียม

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของสารตั้งต้น

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิค XRF

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิค XRF ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

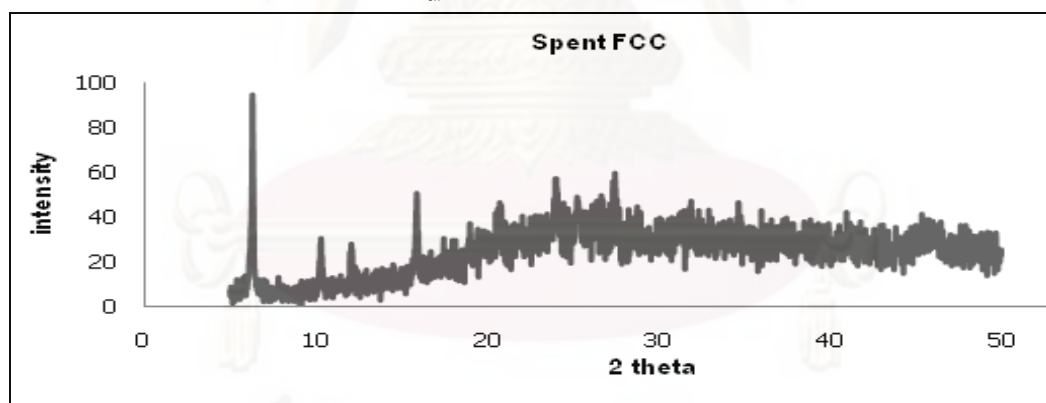
Spent FCC (element)	Concentration (% weight)	Spent FCC cal 500 °C (element)	Concentration (% weight)
Fe	3.12	Fe	2.73
Si	40.13	Si	42.86
Al	42.07	Al	41.78
Na	0.58	Na	0.54
P	0.12	P	0.13
S	0.30	S	0.28
K	0.32	K	0.29
Ca	0.40	Ca	0.35
Ti	2.67	Ti	2.42
V	0.34	V	0.30
Mn	0.20	Mn	0.18
Co	0.04	Ni	1.32
Ni	1.65	Cu	0.10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

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

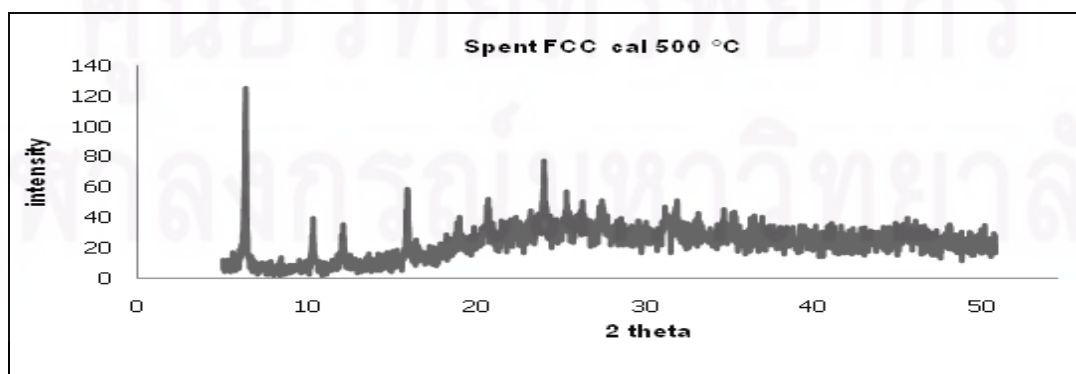
Spent FCC (element)	Concentration (% weight)	Spent FCC cal 500 °C (element)	Concentration (% weight)
Sr	0.07	Zr	0.07
Y	0.02	La	5.47
Zr	0.07	Ce	0.46
La	6.29	Nd	0.20
Ce	0.49	Gd	0.12
Nd	0.26	-	-
Sm	0.20	-	-

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมีปริมาณ Si และ Al เป็นปริมาณมาก จึงคาดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์ จึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้มาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD เพื่อตรวจสอบว่าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภทใด

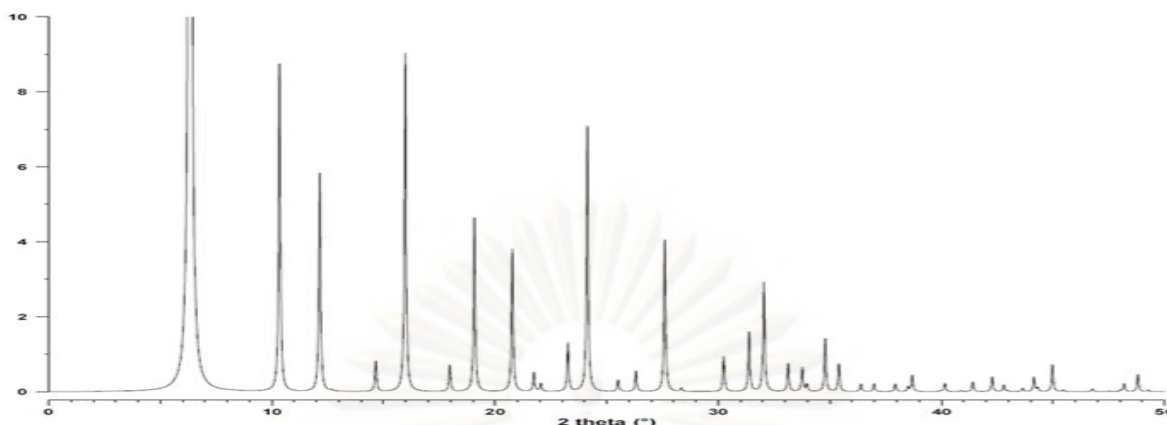
4.1.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วด้วยเทคนิค XRD



รูปที่ 4.1 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว



รูปที่ 4.2 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated [34]

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD แสดงให้เห็น XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและ XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ พบว่าลักษณะของ peak ที่ปรากฏนั้นมีความใกล้เคียงกับ XRD pattern ของตัวเร่งปฏิกิริยา Ultrastable Y, Dehydrated Dealuminated แสดงดังรูปที่ 4.3 จึงสามารถระบุได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วนั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภท USY

4.1.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	พื้นที่ผิวรูพรุนทั้งหมด (S_{BET}) ตารางเมตร/กรัม	ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (Average Pore size) นาโนเมตร	ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว	79.84	6.92	0.13
ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส °C	89.46	6.77	0.14

จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวรูปทรงทั้งหมด (Surface Area) ของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ตารางที่ 4.2 พบว่าการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวรูปทรงทั้งหมดสูงขึ้น เนื่องจากการเผาเป็นการกำจัดคาร์บอนที่ติดบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้บางส่วนทำให้พื้นที่ผิวรูปทรงทั้งหมดสูงขึ้น

4.2 การกำหนดภาวะที่ใช้ในการแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ภาวะที่เลือกใช้ในการทดลองคือ อุณหภูมิ 400-460 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30-75 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ การเลือกในช่วงอุณหภูมิที่ตั้งตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป เนื่องจากลองทำปฏิกิริยาการแตกตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์จากการแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนเป็นแวกซ์ แต่เมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป พบว่าไม่เกิดปัญหาดังกล่าว และอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 460 องศาเซลเซียส เนื่องจากเมื่อใช้อุณหภูมิสูงมากจะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สได้มากซึ่งไม่ต้องการและเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน การเลือกระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาในช่วง 30 – 75 นาที เพื่อให้เห็นความแตกต่างของผลการทดลอง ส่วนระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากกว่า 75 นาที จะทำให้เกิดแก๊สมากเกินไป การเลือกปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วง 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทในการส่งเสริมการแตกตัวทำแต่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในปริมาณมากเกินไปส่งผลให้เกิดแก๊สมากขึ้นเพราะมีตำแหน่งว่างไว้ในปริมาณมาก และสำหรับการเลือกตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอพซีซีใช้แล้ว เนื่องจาก โดยทั่วไปตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในโรงกลั่นน้ำมันสำหรับเปลี่ยนเนฟทาเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโอเลฟินส์ ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจึงสูญเสียความสามารถในการเกิดแก๊สได้เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับความต้องการในงานวิจัยที่ต้องการให้เกิดแก๊สน้อย ได้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวมาก จึงนำตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมาใช้ในงานวิจัย และการเลือกช่วงของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 - 5 บาร์ เนื่องจากถ้าเติมแก๊สไฮโดรเจนมากและเมื่อรวมกับแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระบบทำให้ภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์มีความดันแก๊สสูง ส่งผลให้แก๊สเกิดการรั่วไหล ดังนั้นจึงต้องกำหนดช่วงของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นอยู่ในขอบเขตที่จำกัด

4.3 ผลการทดลองที่ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีแล้ว

4.3.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีแล้ว

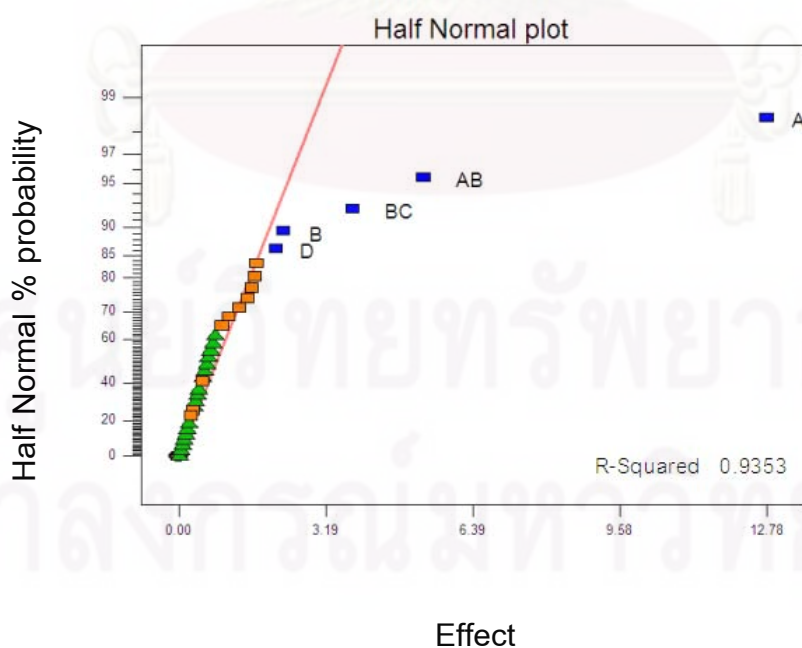
ปฏิบัติการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีแล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล ทำการทดลองซ้ำ แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 60.02 - 87.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.4 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงให้เห็นว่าตัวแปรนี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบเช่นกันว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน เมื่อคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 จะบ่งบอกว่า ปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่าอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.3 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
1.1	460	75	5	5	64.13
1.2					62.43
2.1	460	75	1	5	70.87
2.2					65.31
3.1	460	75	5	1	60.02
3.2					60.02
4.1	460	75	1	1	67.15
4.2					66.58
5.1	460	45	5	5	77.27
5.2					71.16
6.1	460	45	1	5	77.66
6.2					72.93
7.1	460	45	5	1	71.90
7.2					66.56
8.1	460	45	1	1	71.98
8.2					67.9
9.1	420	75	5	5	77.99
9.2					79.83
10.1	420	75	1	5	87.76
10.2					85.29
11.1	420	75	5	1	81.04
11.2					81.68
12.1	420	75	1	1	80.87
12.2					86.87

ตารางที่ 4.3 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
13.1	420	45	5	5	81.70
13.2					81.01
14.1	420	45	1	5	80.29
14.2					77.41
15.1	420	45	5	1	80.38
15.2					85.71
16.1	420	45	1	1	74.89
16.2					75.62
17.1	440	60	3	3	80.07
17.2					79.69
17.3					82.54



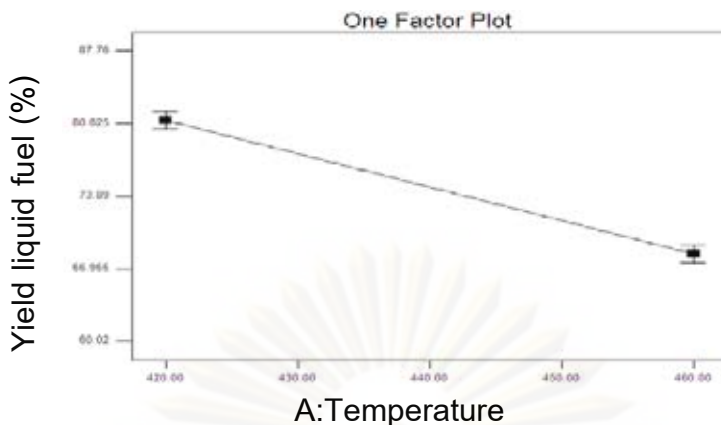
รูปที่ 4.4 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพิซีซีให้แล้ว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F Value
Model	1832.40	11	166.58	<0.0001	< 0.0001
A	1306.50	1	1306.50	226.63	< 0.0001
B	41.70	1	41.70	7.23	0.01
D	35.85	1	35.85	6.22	0.02
AB	226.69	1	226.69	39.32	< 0.0001
BC	114.65	1	114.65	19.89	0.0002
Residual	126.83	22	5.76		
Total	2058.38	34			

4.3.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิเอทิลีน

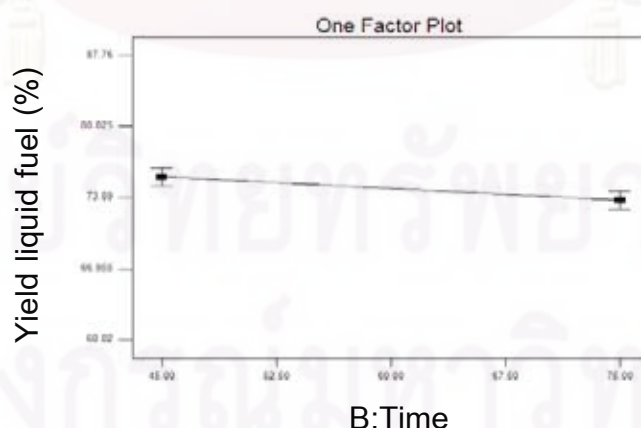
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 420 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส จะทำให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 81.14 เป็น 68.36 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน ในช่วงแรกอิทธิพลของอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่ขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก เวลาในการทำการทดลองดำเนินต่อไป และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้โมเลกุลขนาดกลาง แตกตัวไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง



รูปที่ 4.5 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.1.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิเอทิลีน

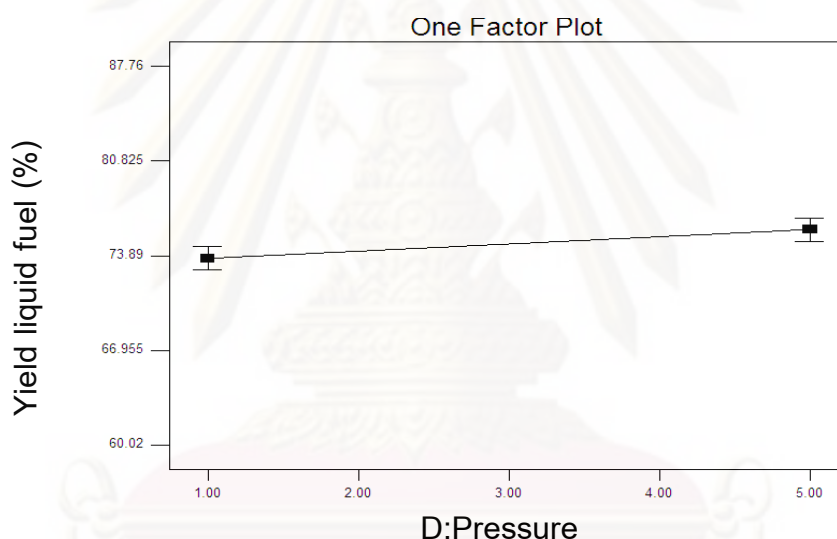
การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 45 นาที จนถึงเวลา 90 นาที ส่งผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 75.89 เป็น 73.61 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นได้รับอุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลานาน เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวอย่างทั่วถึง ทำให้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัวเป็นสายโซ่ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เมื่อระยะเวลาทำปฏิกิริยาดำเนินต่อเนื่องไปโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก เกิดการการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง



รูปที่ 4.6 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.1.3 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิเอทิลีน

การศึกษาผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นจาก 1 บาร์ไปเป็น 5 บาร์ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 73.69 เป็น 75.81 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการแตกตัว ทำให้เกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนไฮโดรเจน ดังนั้นการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นไปเป็น 5 บาร์ จึงส่งผลให้มีการแตกตัวของพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวมากขึ้นเมื่อเทียบกับการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

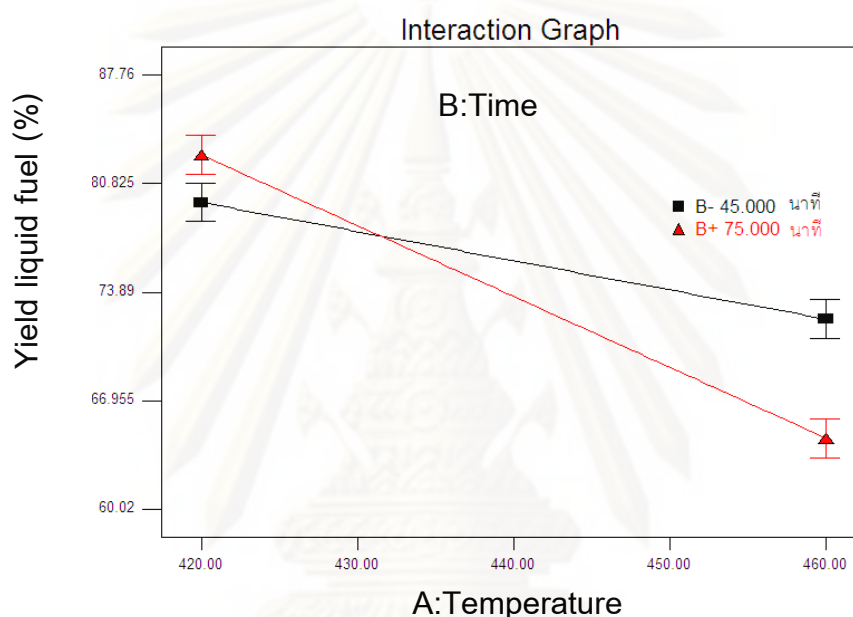


รูปที่ 4.7 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.1.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิเอทิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 420 องศาเซลเซียสถึง 460 องศาเซลเซียสและใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าลดลงจาก 79.62 เป็น

72.17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่เดียวกันการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิแบบเดียวกันคือจาก 420 องศาเซลเซียสถึง 460 องศาเซลเซียสแต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 75 นาที ส่งผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าลดลงจาก 82.66 เป็น 64.56 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินอย่างต่อเนื่องมีผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าลดลง เนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก เกิดการการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง

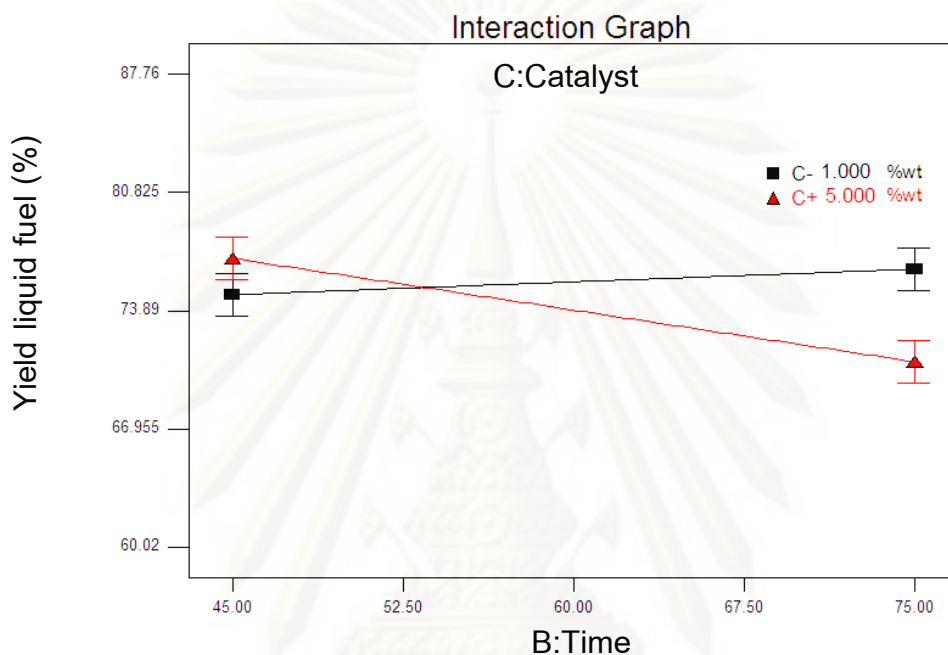


รูปที่ 4.8 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.1.5 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิเอทิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 45 นาทีถึง 75 นาทีและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 74.83 เป็น 76.33 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อใช้ตัวตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากัน พบว่าร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 76.96 เป็น 70.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

แสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีตำแหน่งว่องไว (active site) ปริมาณมาก เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ดี ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก เกิดการการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง



รูปที่ 4.9 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ของพอลิเอทีลีน

4.3.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีใช้แล้ว

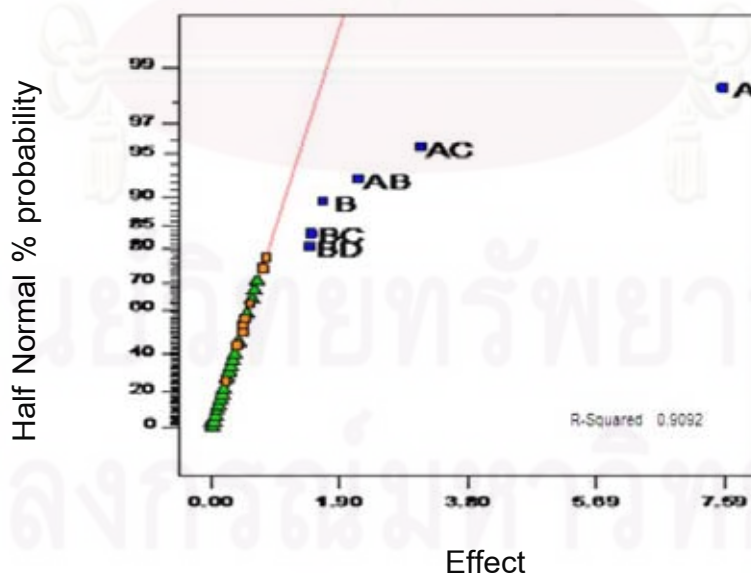
ปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล ทำการทดลองซ้ำ แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 60.02 - 87.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำผลิตภัณฑ์ น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น ซึ่งจะได้สัดส่วนของแนฟทาดังแสดงในตารางที่ 4.5 มีร้อยละผลได้ของแนฟทาอยู่ในช่วง 22.92 - 40.13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รูปที่ 4.10 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.6 แสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบเช่นกันว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.5 ร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของแนฟทา
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
1.1	460	75	5	5	34.60
1.2					33.71
2.1	460	75	1	5	40.13
2.2					36.87
3.1	460	75	5	1	30.95
3.2					31.58
4.1	460	75	1	1	35.20
4.2					38.82
5.1	460	45	5	5	30.68
5.2					36.91
6.1	460	45	1	5	36.03
6.2					34.89
7.1	460	45	5	1	36.85
7.2					32.94
8.1	460	45	1	1	38.72
8.2					39.13
9.1	420	75	5	5	28.72
9.2					30.23
10.1	420	75	1	5	32.99
10.2					30.81
11.1	420	75	5	1	30.57
11.2					30.64
12.1	420	75	1	1	25.14
12.2					29.63

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของแนฟทา
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น(บาร์),D	
13.1	420	45	5	5	26.74
13.2					28.28
14.1	420	45	1	5	24.78
14.2					24.70
15.1	420	45	5	1	27.40
15.2					29.84
16.1	420	45	1	1	23.14
16.2					22.92
17.1	440	60	3	3	34.60
17.2					35.14
17.3					35.20



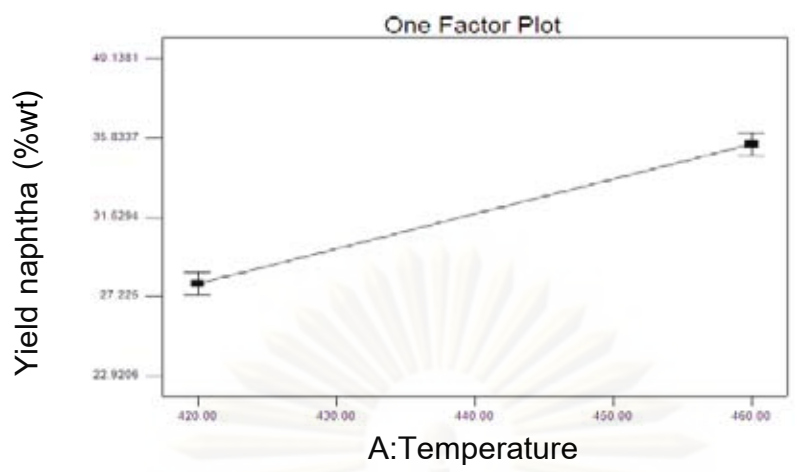
รูปที่ 4.10 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของแนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของร้อยละผลได้ของแนฟทาจาก ปฏิกริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F Value
Model	665.97	11	60.54	20.04	< 0.0001
A	461.26	1	461.26	152.65	< 0.0001
B	22.22	1	22.22	7.35	0.01
AB	38.81	1	38.81	12.84	0.001
AC	77.71	1	77.71	25.72	< 0.0001
BC	17.86	1	17.86	5.91	0.02
BD	17.18	1	17.18	5.69	0.02
Residual	66.48	22	3.02		
Total	761.84	34			

4.3.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิเอทิลีน

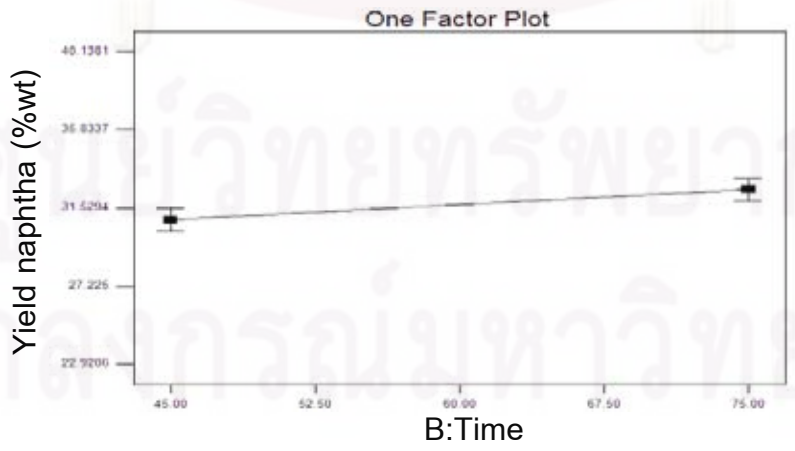
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำ ปฏิกริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 420 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส ทำให้อัตราผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 27.91 เป็น 35.50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจาก อิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน ในช่วงแรกอิทธิพลของอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของ สายโซ่ขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้โมเลกุลขนาด กลาง แตกตัวไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็ก และตัวเร่งปฏิกริยามีบทบาทในการควบคุมผลิตภัณฑ์ เลือกลงขนาด สายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม ทำให้อัตราผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.2.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิเอทิลีน

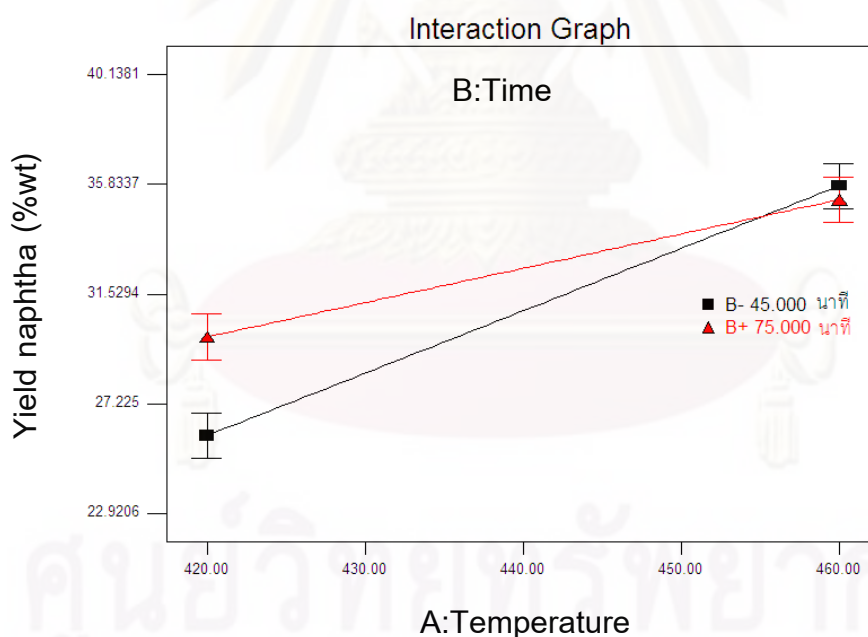
การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 45 นาทีถึง 75 นาทีทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 30.87 เป็น 32.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน เมื่อได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก และตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทในการควบคุมผลิตภัณฑ์ เลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม ทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.12 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.2.3 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิเอทิลีน

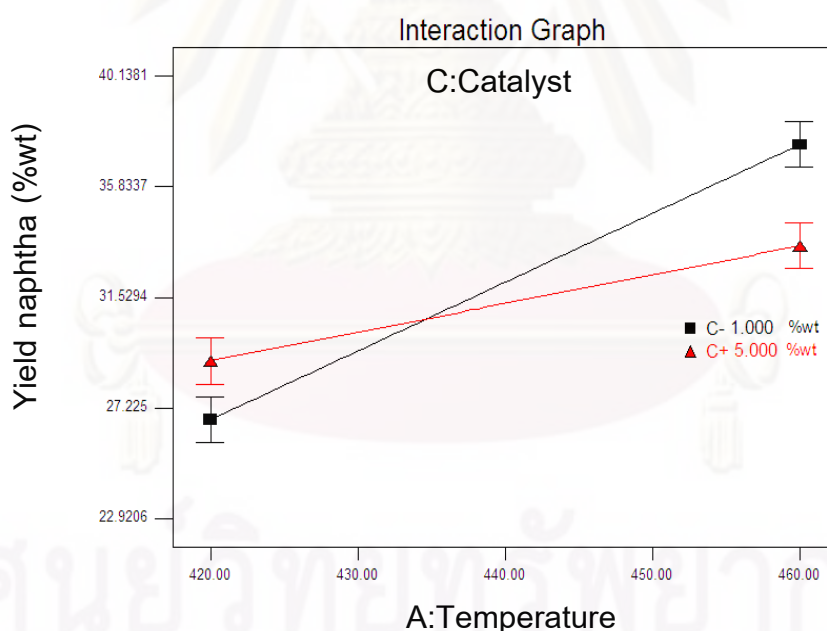
การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 420 องศาเซลเซียส ถึง 460 องศาเซลเซียสและ ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 25.97 เป็น 35.77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่เดียวกันเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 75 นาที ทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 29.84 เป็น 35.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก ประกอบกับระยะเวลาผ่านไปนานขึ้นปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก และตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทในการควบคุมผลิตภัณฑ์เลือกขนาดสายโซ่โมเลกุลที่เหมาะสม ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.13 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์

4.3.2.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิเอทิลีน

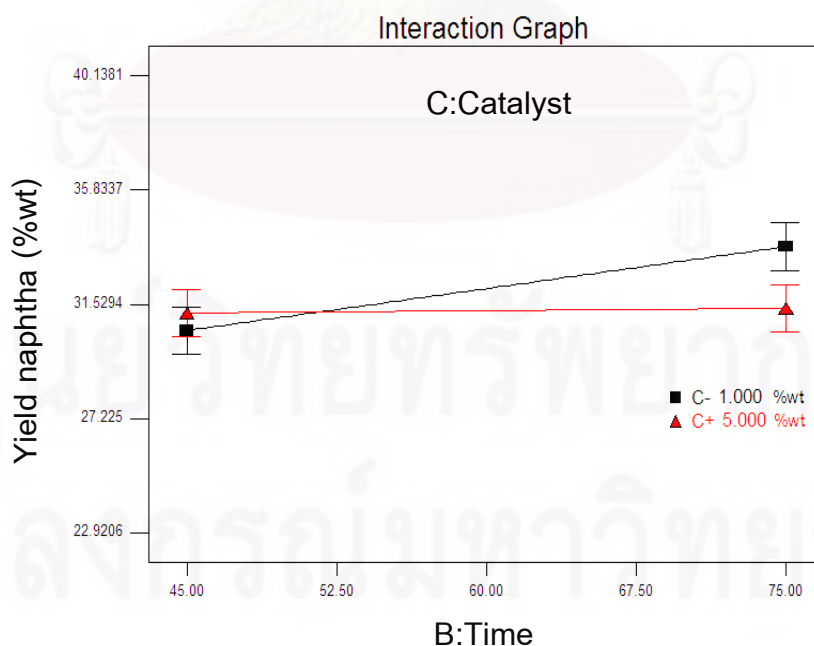
การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 420 องศาเซลเซียส ถึง 460 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 26.76 เป็น 37.47 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยเพิ่มจาก 29.05 เป็น 33.53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก ประกอบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีตำแหน่งว่างวอ (active site) ปริมาณมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดได้ดี จึงเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.2.5 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิเอทิลีน

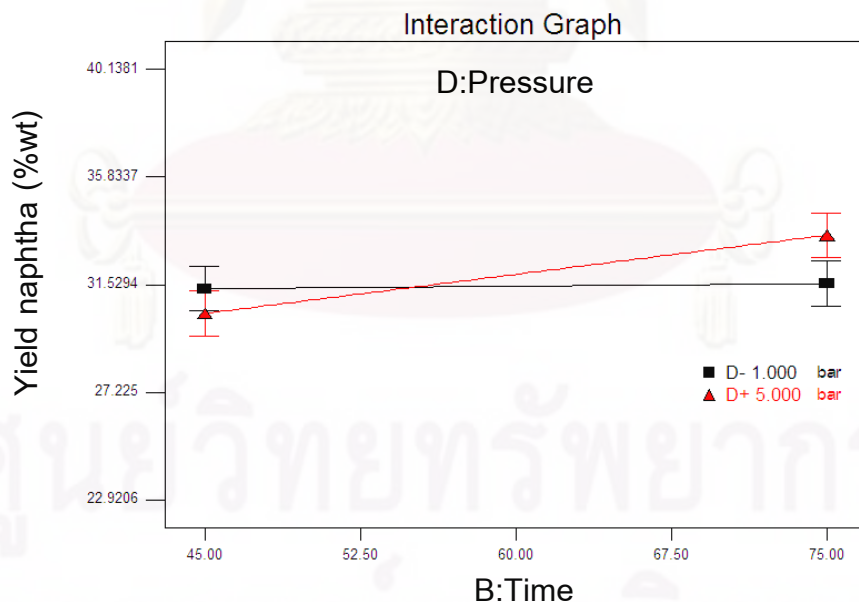
การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียสและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิริยาเพิ่มขึ้นจาก 45 นาทีถึง 75 นาที ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้อัตราผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 30.54 เป็น 33.70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิริยาจาก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 31.20 เป็น 31.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิริยาอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดปฏิริยาการแตกตัวได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางได้มากขึ้น และตัวเร่งปฏิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีตำแหน่งว่างไว (active site) ปริมาณมาก ทำให้ปฏิริยาการแตกตัวเกิดได้ดี เมื่อมีตำแหน่งว่างไว (active site) ปริมาณมากและใช้ระยะเวลาในการทำปฏิริยาอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กได้ ทำให้อัตราผลได้ของแนฟทาเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่ามากกว่าตัวเร่งปฏิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.15 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียสและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.2.6 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิเอทิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการทดลองที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 45 นาที ถึง 75 นาที ใช้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 31.37 เป็น 31.57 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อใช้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ พบว่าร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยเพิ่มขึ้นจาก 30.84 เป็น 33.51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่มีโอกาสเกิดการแตกตัวได้มากขึ้น ส่งผลให้สัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 และ 5 บาร์ พบว่าที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ มีสัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นสูงกว่า เนื่องมาจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเพื่อช่วยในปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความอิ่มตัวและเป็นแอมโรมาติกมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นไปเป็น 5 บาร์จึงส่งผลให้มีการแตกตัวของเม็ดพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์ในช่วงของแนฟทามากขึ้นเมื่อเทียบกับการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์



รูปที่ 4.16 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพอลิเอทิลีน

4.3.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิบัติการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ปฏิบัติการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล 2 เรพลิเคต ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากตารางพบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 60.02 – 87.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์ น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น ซึ่งจะได้สัดส่วนของดีเซลดังแสดงในตารางที่ 4.7 มีร้อยละผลได้ของดีเซลอยู่ในช่วง 14.11 – 25.26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.17 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.8 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบว่า อุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.7 ร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

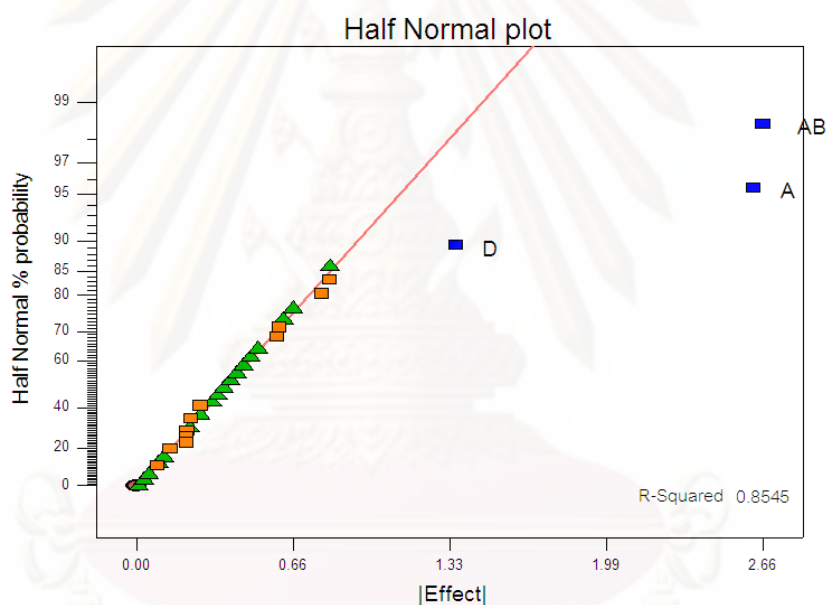
การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของดีเซล
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
1.1	460	75	5	5	15.73
1.2					14.70
2.1	460	75	1	5	16.65
2.2					15.25
3.1	460	75	5	1	15.8
3.2					16.53
4.1	460	75	1	1	17.53
4.2					14.93

ตารางที่ 4.7(ต่อ)ร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของดีเซล
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น(บาร์),D	
5.1	460	45	5	5	24.31
5.2					22.41
6.1	460	45	1	5	21.60
6.2					17.97
7.1	460	45	5	1	18.97
7.2					17.72
8.1	460	45	1	1	16.52
8.2					14.11
9.1	420	75	5	5	20.33
9.2					23.54
10.1	420	75	1	5	23.86
10.2					22.78
11.1	420	75	5	1	20.41
11.2					19.75
12.1	420	75	1	1	18.70
12.2					20.02
13.1	420	45	5	5	18.10
13.2					17.39
14.1	420	45	1	5	18.56
14.2					19.39
15.1	420	45	5	1	18.26
15.2					19.60
16.1	420	45	1	1	18.85
16.2					19.67

ตารางที่ 4.7(ต่อ) ร้อยละผลได้ของดีเซลที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของดีเซล
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาทื),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น(บาร์),D	
17.1	440	60	3	3	21.99
17.2					23.64
17.3					25.26



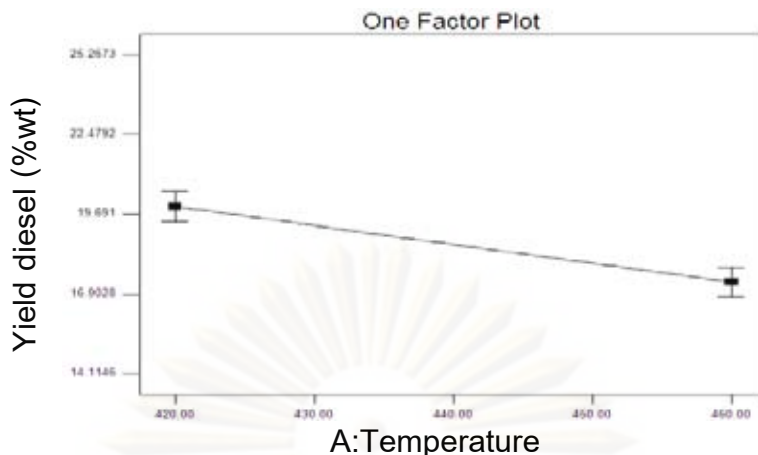
รูปที่ 4.17 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ของร้อยละผลได้ของดีเซลจาก
 ปฏิกริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob>F Value
Model	161.15	8	20.14	8.32	< 0.0001
A	54.96	1	54.96	22.69	< 0.0001
D	14.76	1	14.76	6.09	0.0207
AB	56.60	1	56.60	23.32	<0.0001
Residual	60.55	25	2.42		
Total	289.99	34			

4.3.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซลของพอลิเอทิลีน

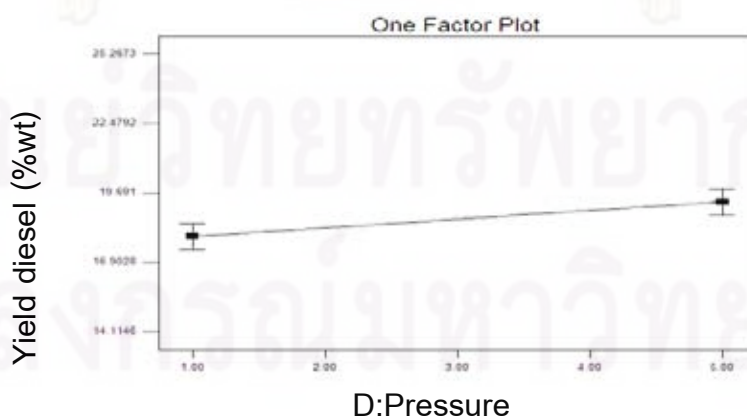
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 420 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 460 องศาเซลเซียส ทำให้สัดส่วนของดีเซลลดลงจาก 19.95 เป็น 17.33 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน อิทธิพลของอุณหภูมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่ขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก เวลาในการทำการทดลองดำเนินต่อไป และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้โมเลกุลขนาดกลาง แตกตัวไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลง



รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.3.2 ผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของดีเซลของพอลิเอทิลีน

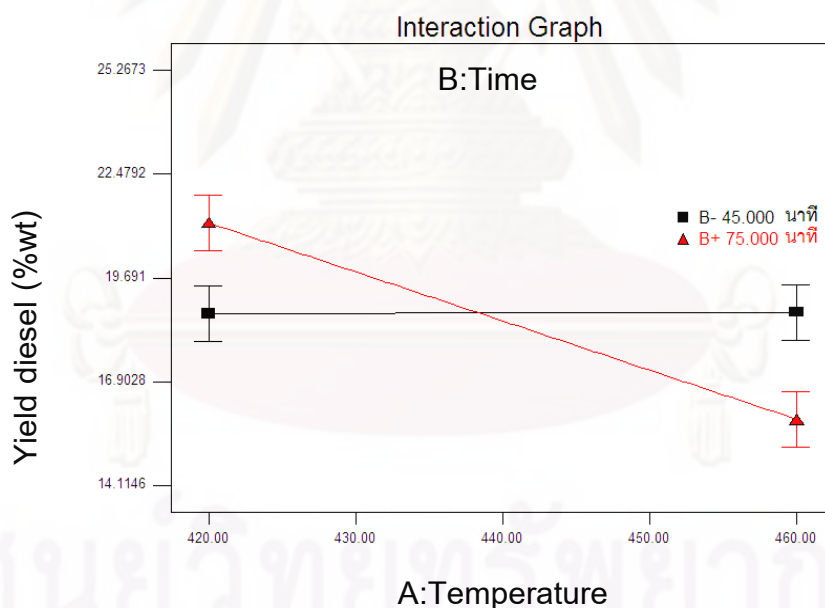
การศึกษาผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นจาก 1 บาร์ไปเป็น 5 บาร์ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 17.96 เป็น 19.32 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเพื่อช่วยปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนได้มากขึ้น ส่งเสริมให้เกิดการแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking) ในปฏิกิริยา ดังนั้นการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นไปเป็น 5 บาร์จึงส่งผลให้มีการแตกตัวของเม็ดพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์ในช่วงของดีเซลมากขึ้นเมื่อเทียบกับการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์



รูปที่ 4.19 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.3.3.3 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลของพอลิเอทิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.20 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 420 องศาเซลเซียส ถึง 460 องศาเซลเซียสและ ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ทำให้สัดส่วนของดีเซลเพิ่มขึ้นจาก 18.73 เป็น 18.77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่เดียวกันเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 75 นาที ทำให้สัดส่วนของลดลงจาก 21.77 เป็น 15.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 45 และ 75 นาที พบว่าที่ 45 นาทีสัดส่วนของดีเซลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในทางตรงข้ามที่เวลา 75 นาทีมีสัดส่วนของดีเซลลดลงมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีขนาดเล็กลงและการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นไปอย่างทั่วถึงส่งผลให้สัดส่วนของดีเซลลดลง



รูปที่ 4.20 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิเอทิลีน

4.4 ผลการทดลองที่ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีซีแล้ว

4.4.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิบัติการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีซีแล้ว

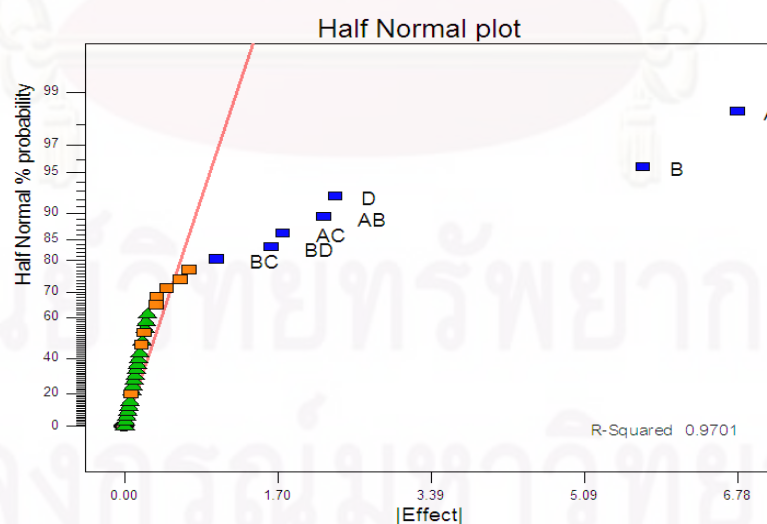
ปฏิบัติการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพทีซีซีแล้วให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียลทำการทดลองซ้ำแสดงในตารางที่ 4.9 จากตารางพบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 60.00 - 80.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.21 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรนี้เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.10 แสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบเช่นกันว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.9 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
1.1	430	60	5	5	67.71
1.2					68.16
2.1	430	60	1	5	68.60
2.2					69.52
3.1	430	60	5	1	62.00
3.2					63.21
4.1	430	60	1	1	65.15
4.2					64.52
5.1	430	30	5	5	72.80
5.2					73.85
6.1	430	30	1	5	75.43
6.2					74.70
7.1	430	30	5	1	72.07
7.2					72.93
8.1	430	30	1	1	74.41
8.2					76.24
9.1	400	60	5	5	77.97
9.2					78.31
10.1	400	60	1	5	74.60
10.2					75.80
11.1	400	60	5	1	74.88
11.2					75.77
12.1	400	60	1	1	71.06
12.2					72.39

ตารางที่ 4.9 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น(บาร์),D	
13.1	400	30	5	5	80.69
13.2					78.61
14.1	400	30	1	5	77.55
14.2					79.95
15.1	400	30	5	1	77.45
15.2					77.35
16.1	400	30	1	1	78.62
16.2					78.81
17.1	415	45	3	3	76.61
17.2					77.15
17.3					77.92



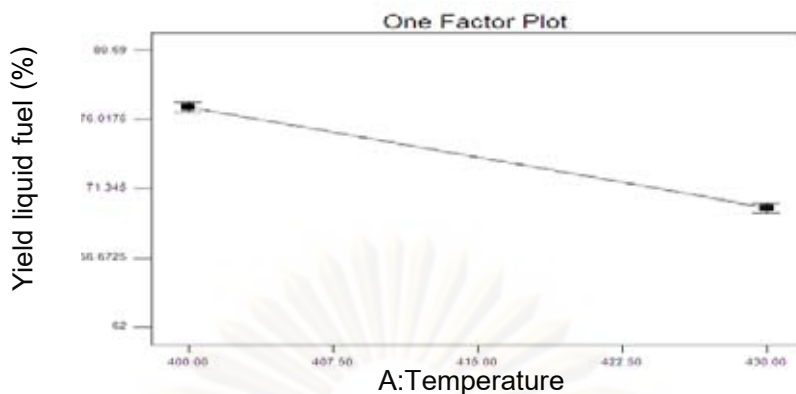
รูปที่ 4.21 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	768.61	8	96.08	101.29	< 0.0001
A	368.00	1	368.00	387.97	< 0.0001
B	263.45	1	263.45	277.75	< 0.0001
C	0.40	1	0.40	0.43	0.5204
D	43.68	1	43.68	46.05	< 0.0001
AB	38.96	1	38.96	41.07	< 0.0001
AC	24.64	1	24.64	25.98	< 0.0001
BC	8.34	1	8.34	8.79	0.0066
BD	21.12	1	21.12	22.27	< 0.0001
Curvature	38.66	1	38.66	40.76	< 0.0001
Residual	23.71	25	0.95		
Cor Total	830.99	34			

4.4.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิโพรพิลีน

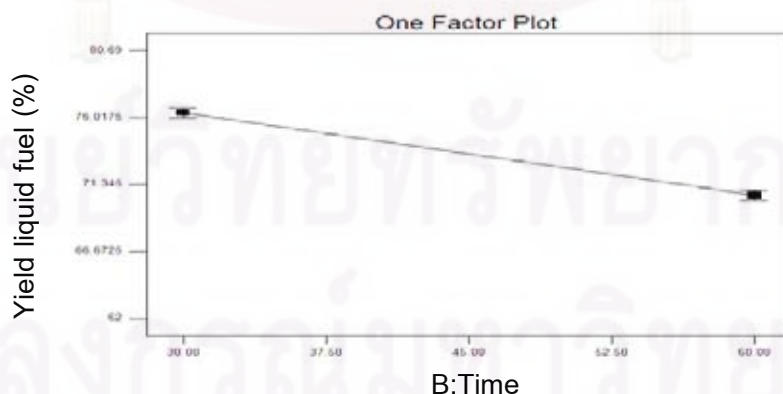
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.22 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส จะทำให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 76.86 เป็น 70.80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน ในช่วงแรกอิทธิพลของอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่ขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก เวลาในการทำทดลองดำเนินต่อไป และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้โมเลกุลขนาดกลาง แตกตัวไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กแก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง



รูปที่ 4.22 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของ พอลิไพโรลีน

4.4.1.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิไพโรลีน

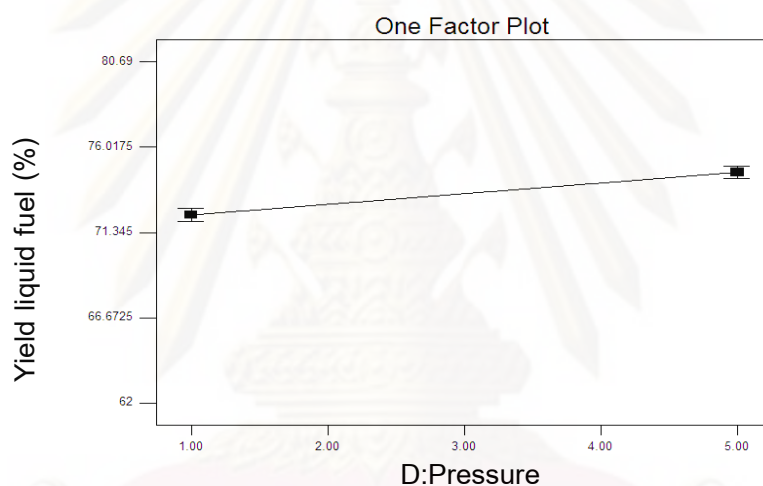
การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน การทดลองที่ อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจน เริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.23 พบว่าเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที จนถึงเวลา 60 นาที ส่งผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 76.34 เป็น 70.60 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้น ได้รับอุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลานาน เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวอย่างทั่วถึง ทำให้โมเลกุลของ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัวเป็นสายโซ่ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เมื่อระยะเวลาทำปฏิกิริยา ดำเนินต่อเนื่องไปโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก เกิดการการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊ส ไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง



รูปที่ 4.23 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของ พอลิไพโรลีน

4.4.1.3 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นจาก 1 บาร์ไปเป็น 5 บาร์ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 72.39 เป็น 74.54 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นผลมาจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจน เพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการแตกตัว ทำให้เกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนไฮโดรเจน ดังนั้นการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นจาก 1 บาร์ไปเป็น 5 บาร์จึงส่งผลให้มีการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนไปเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวมากขึ้นเมื่อเทียบกับการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์

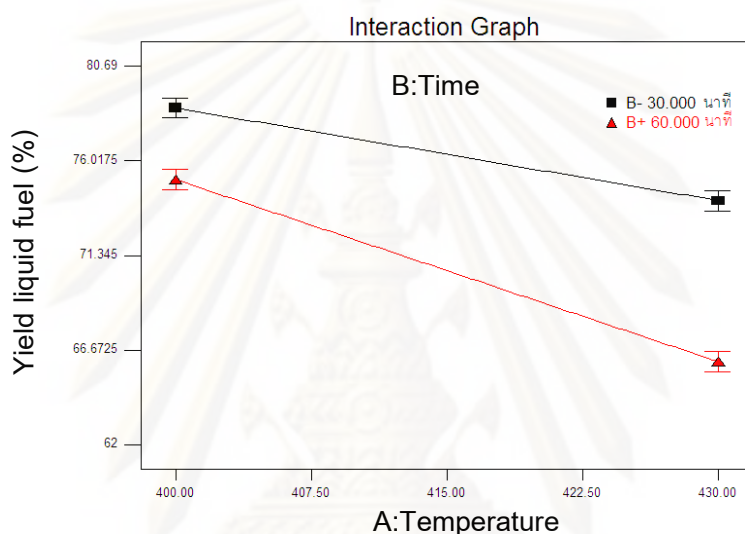


รูปที่ 4.24 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.1.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.25 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียสถึง 430 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าลดลงจาก 78.62 เป็น 74.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่เดียวกันการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิเดียวกันกันคือจาก 400 องศา

เซลเซียสถึง 430 องศาเซลเซียสแต่ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 75 นาที ส่งผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าลดลงจาก 75.09 เป็น 66.10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าการใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาดำเนินอย่างต่อเนื่องมีผลให้ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีค่าลดลง เนื่องจากอิทธิพลของปฏิกิริยาการแตกตัวด้วยความร้อนมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก เกิดการการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง

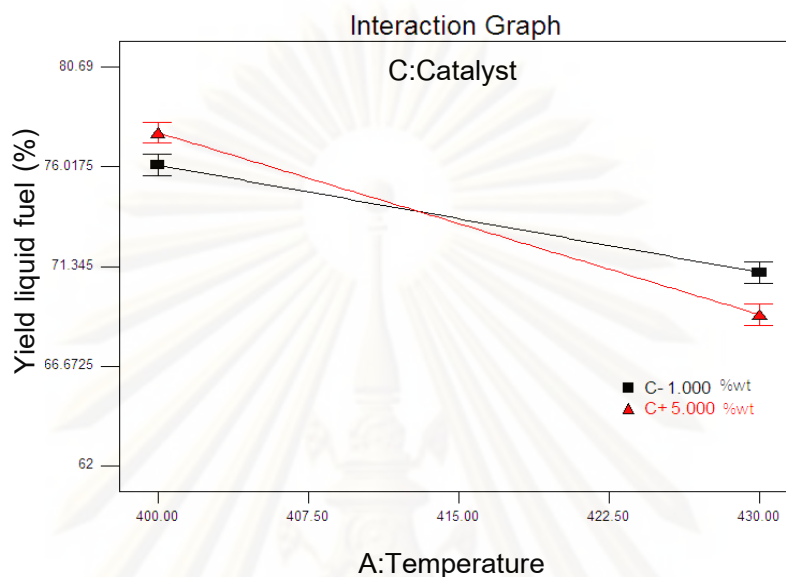


รูปที่ 4.25 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.1.5 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส ถึง 430 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้อัตราผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 76.09 เป็น 71.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้อัตราผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 77.62 เป็น 69.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้พลาสติกเกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้อัตราผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง และโดยตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีตำแหน่งว่างไว

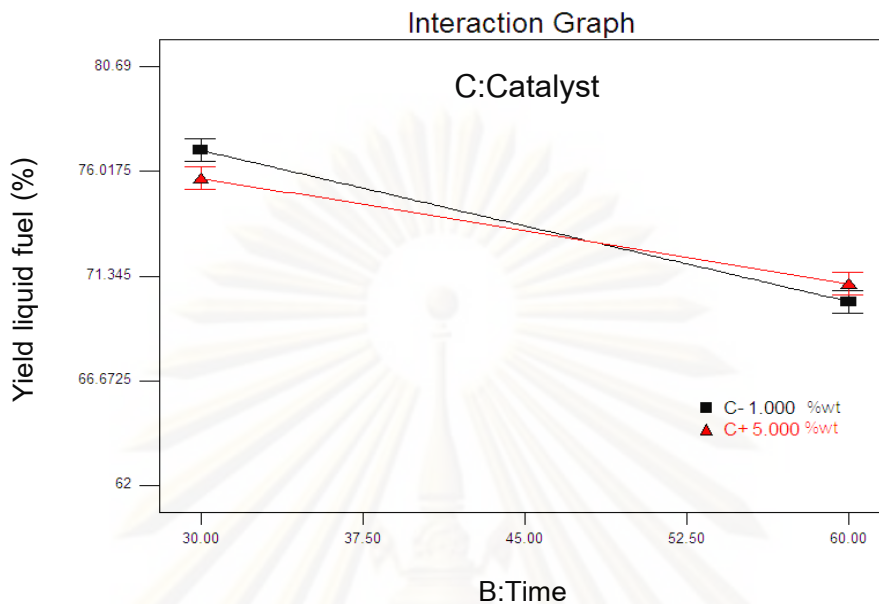
(active site) ปริมาณมาก เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ดี ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก จึงส่งผลให้เมื่อใช้อุณหภูมิสูงและใช้ปริมาณตัวเร่ง 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักมีร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงมากกว่าที่ใช้ปริมาณตัวเร่งเป็น 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.26 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.1.6 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.27 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีถึง 60 นาที ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ทำให้สัดส่วนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 76.96 เป็น 70.20 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักพบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 75.71 เป็น 71.00 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีผลต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก มีตำแหน่งว่างไว (active site) ปริมาณมาก เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้ดี ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดเล็กมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และเมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก เกิดการการแตกตัวต่อไปเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง

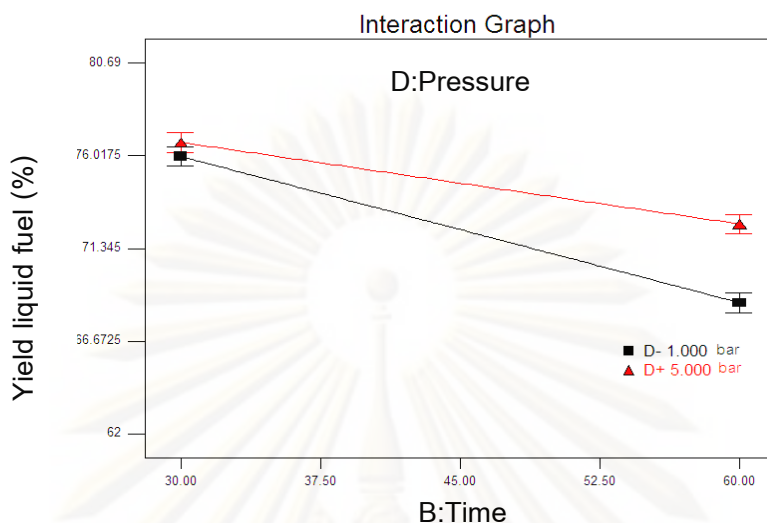


รูปที่ 4.27 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ของพอลิโพรพิลีน

4.4.1.7 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน จากการทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีถึง 60 นาที และใช้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ ทำให้อ้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงจาก 75.98 เป็น 68.62 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่เดียวกันเมื่อเปลี่ยนความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็น 5 บาร์ พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง โดยลดลงจาก 76.69 เป็น 72.58 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากอิทธิพลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา การใช้ระยะเวลานานทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวอย่างทั่วถึง เกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กได้มากขึ้น ทำให้อ้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลง สำหรับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นพบว่าที่ 1 บาร์มีการลดลงของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงมากกว่า 5 บาร์ เนื่องจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเพื่อช่วยในปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนทำให้ได้

ผลิตภัณฑ์ที่มีความอิมิตัวไม่เกิดการแตกตัวกลายเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ทำให้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ มีการลดลงของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันน้อยกว่าความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์



รูปที่ 4.28 ศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของพอลิโพรพิลีน

4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

ปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียลทำการทดลองซ้ำ แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 60.00 - 80.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น ซึ่งจะได้สัดส่วนของเนฟทาดังแสดงในตารางที่ 4.11 มีร้อยละผลได้ของเนฟทาอยู่ในช่วง 39.87 - 55.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.29 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.12 ซึ่งแสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบว่า คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับ

ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่า คือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาอย่างมีนัยสำคัญ

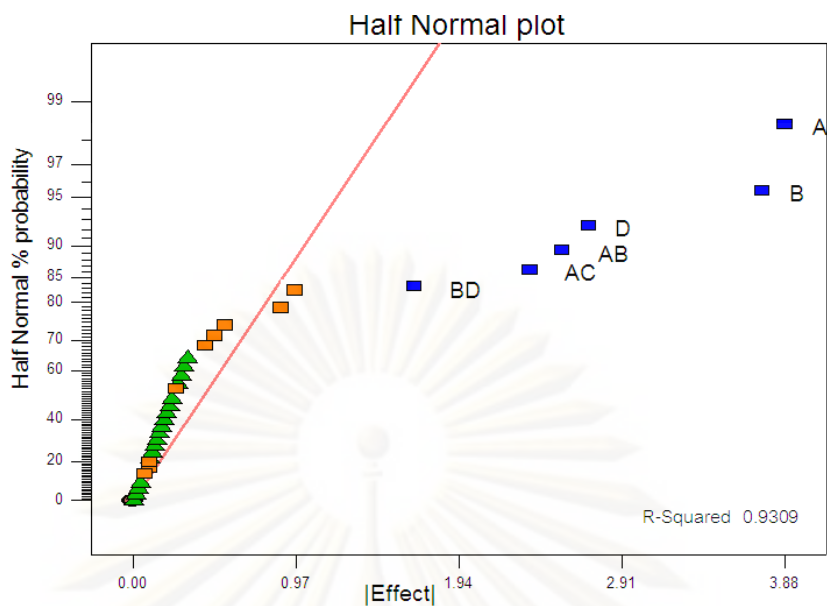
ตารางที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของแนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของแนฟทา
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
1.1	430	60	5	5	47.04
1.2					47.24
2.1	430	60	1	5	46.8
2.2					47.89
3.1	430	60	5	1	39.87
3.2					41.53
4.1	430	60	1	1	43.82
4.2					43.64
5.1	430	30	5	5	51.07
5.2					51.77
6.1	430	30	1	5	51.33
6.2					51.17
7.1	430	30	5	1	47.40
7.2					51.58
8.1	430	30	1	1	51.17
8.2					52.84
9.1	400	60	5	5	54.35
9.2					54.66

ตารางที่ 4.11 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของแนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ของแนฟทา
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาทื),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
10.1	400	60	1	5	50.83
10.2					52.35
11.1	400	60	5	1	50.09
11.2					50.77
12.1	400	60	1	1	47.42
12.2					48.95
13.1	400	30	5	5	55.92
13.2					55.05
14.1	400	30	1	5	50.67
14.2					50.81842
15.1	400	30	5	1	53.41
15.2					53.23
16.1	400	30	1	1	49.68
16.2					50.17
17.1	415	45	3	3	53.15
17.2					52.82
17.3					54.73

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



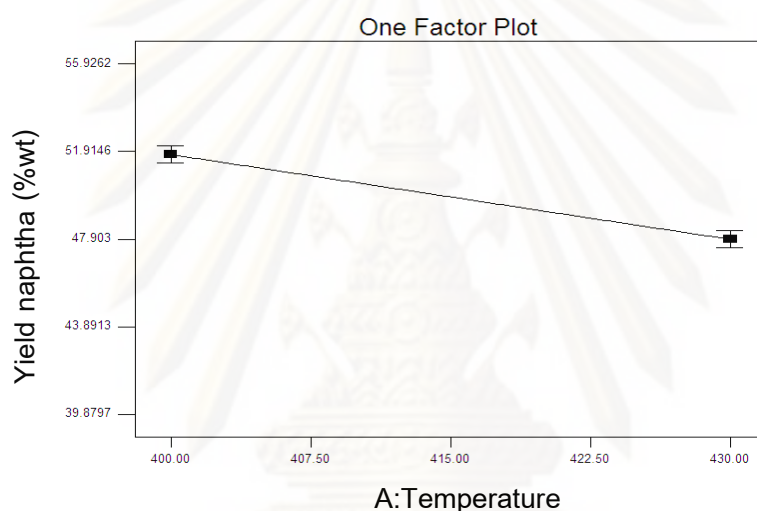
รูปที่ 4.29 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของเนฟทาจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	418.72	6	59.82	50.02	< 0.0001
A	120.62	1	120.62	100.87	< 0.0001
B	112.30	1	112.30	93.91	< 0.0001
D	58.98	1	58.98	49.32	< 0.0001
AB	52.25	1	52.25	43.69	< 0.0001
AC	44.73	1	44.73	37.40	< 0.0001
BD	22.48	1	22.48	18.80	0.0002
Curvature	38.24	1	38.24	31.98	< 0.0001
Residual	31.09	26	1.20		
Cor Total	488.05	34			

4.4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิโพรพิลีน

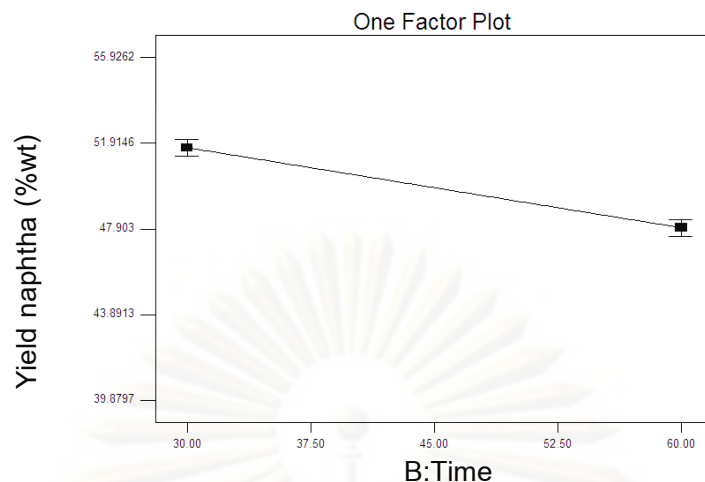
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.30 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ทำให้สัดส่วนของแนฟทาลดลงจาก 51.77 เป็น 47.89 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็นผลเนื่องมาจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแตกโมเลกุลของพอลิโพรพิลีนและด้วยโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนที่เป็นแบบกิ่งนั้นจะทำให้การแตกตัวเกิดได้ไม่ยาก การที่เพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นมากเกินไป จึงส่งผลให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางมากขึ้นจนบางส่วนกลายเป็นพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอน ทำให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาลดลง



รูปที่ 4.30 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.2.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.31 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีถึง 60 นาทีทำให้อัตราผลได้ของแนฟทาลดลงจาก 51.71 เป็น 47.96 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดขึ้นอย่างทั่วถึง ส่งผลให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางมากขึ้นจนบางส่วนกลายเป็นพวกแก๊สไฮโดรคาร์บอน ซึ่งส่งผลให้อัตราผลได้ของแนฟทาลดลง



รูปที่ 4.31 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.2.3 ผลของความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิโพรพิลีน

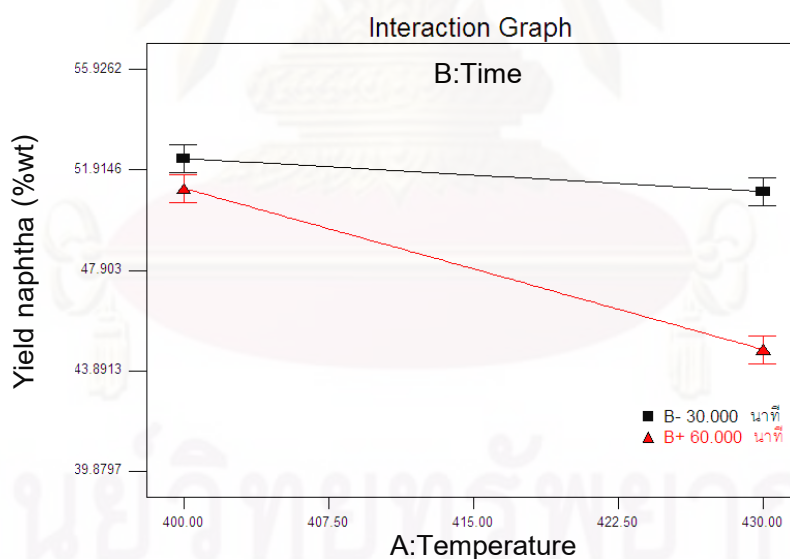
การศึกษาผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.32 พบว่าเมื่อเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นจาก 1 บาร์ไปเป็น 5 บาร์ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของแนฟทาเพิ่มขึ้นจาก 48.47 เป็น 51.19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเพื่อช่วยปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจน ทำให้เกิดการแตกตัวได้ดี ดังนั้นการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นไปเป็น 5 บาร์จึงส่งผลให้มีการแตกตัวของพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์ในช่องของแนฟทามากขึ้นเมื่อเทียบกับการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์



รูปที่ 4.32 ผลของความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของดีเซล จากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.2.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาของพอลิโพรพิลีน

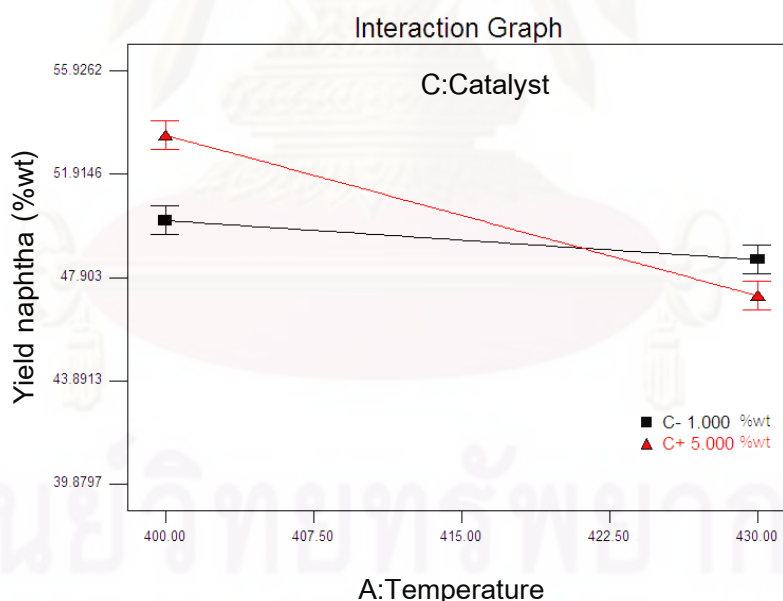
การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.33 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส ถึง 430 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาลดลงจาก 52.37 เป็น 51.04 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ในขณะที่ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่าร้อยละผลได้ของเนฟทาลดลงจาก 51.18 เป็น 44.74 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาทีและ 60 นาที พบว่าที่ 60 นาที มีร้อยละผลได้ของเนฟทาลดลงมากกว่า แสดงให้เห็นว่าการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงจะทำให้พลาสติกเกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น และระยะเวลาการทำปฏิกิริยานานทำให้เกิดการแตกตัวอย่างทั่วถึง ด้วยโครงสร้างของพอลิโพรพิลีนที่เป็นแบบกิ่งนั้นจะทำให้การแตกตัวเกิดได้ไม่ยาก การที่เพิ่มอุณหภูมิสูงและใช้เวลาทำปฏิกิริยามากเกินไป ทำให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กลง จึงส่งผลให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาลดลง



รูปที่ 4.33 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.2.5 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาของพอลิโพรพิลีน

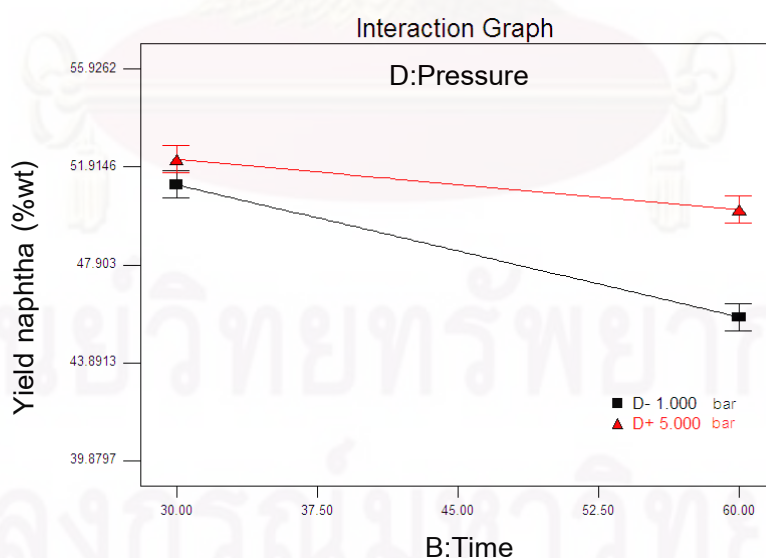
การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา จากการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ แสดงดังรูปที่ 4.34 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 400 องศาเซลเซียส ถึง 430 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาลดลงจาก 50.11 เป็น 48.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเปลี่ยนปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พบว่าให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาลดลงเช่นกัน โดยลดลงจาก 53.44 เป็น 47.19 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางและขนาดเล็ก ประกอบกับตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีตำแหน่งว่างไว (active site) ปริมาณมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดได้ดี จึงเกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ทำให้ร้อยละผลได้ของเนฟทาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้อุณหภูมิต่ำเกินไป ทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัวมากขึ้นกลายเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ส่งผลในช่วงหลังที่ใช้อุณหภูมิต่ำ มีร้อยละผลได้ของเนฟทาลดลง



รูปที่ 4.34 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของเนฟทาที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.2.6 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจน เริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อ ร้อยละผลได้ของแนฟทา จากการทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 4.35 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที ถึง 60 นาที ใช้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ ทำให้สัดส่วนของแนฟทาลดลงเพียงเล็กน้อยจาก 51.22 เป็น 50.15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อใช้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ พบว่าสัดส่วนของแนฟทา ลดลงเช่นกัน โดยลดลงจาก 51.19 เป็น 45.76 เนื่องจากเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่มีโอกาสเกิดการแตกตัวได้มากขึ้นประกอบกับโครงสร้างของ พอลิโพรพิลีนที่เป็นแบบกิ่งนั้นจะทำให้การแตกตัวเกิดได้ไม่ยาก การใช้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยานานทำให้เกิดการแตกตัวอย่างทั่วถึง ส่งผลให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก สัดส่วนของแนฟ ทาจึงลดลง และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างที่ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 และ 5 บาร์ พบว่าที่ความดัน ไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ มีสัดส่วนของแนฟทาเพิ่มขึ้นสูงกว่า เนื่องมาจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจน เริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเพื่อช่วยในปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความ อิ่มตัวและเป็นแอโรมาติกมากขึ้น ดังนั้นการเพิ่มความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นไปเป็น 5 บาร์จึงส่งผล ให้มีการแตกตัวของเม็ดพลาสติกไปเป็นผลิตภัณฑ์ในช่วงของแนฟทามากขึ้นเมื่อเทียบกับการอัดความดัน แก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์



รูปที่ 4.35 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของแนฟทาที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ พอลิโพรพิลีน

4.4.3 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

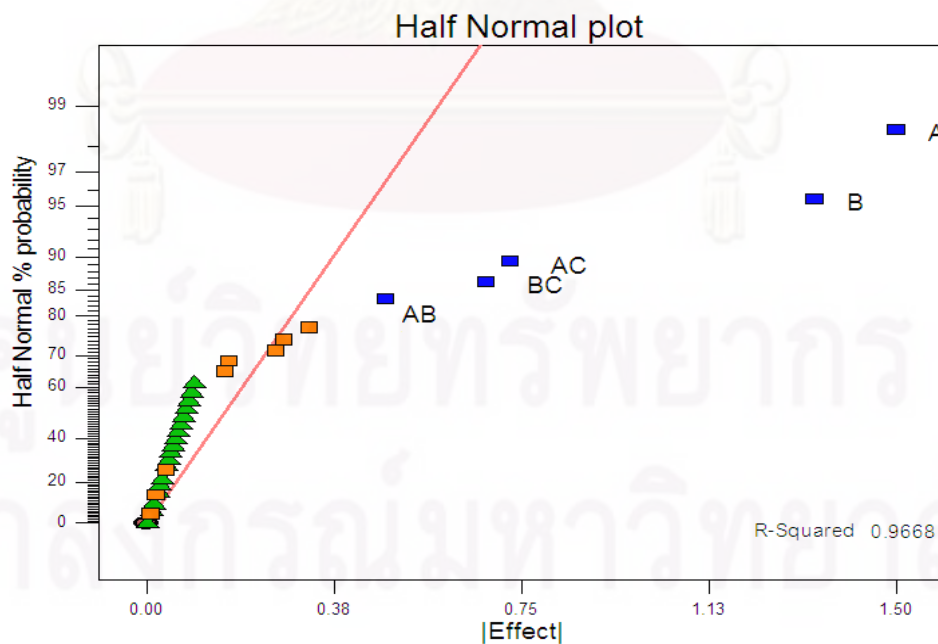
ปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลโดยออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียลทำการทดลองซ้ำ แสดงในตารางตารางที่ 4.9 จากตารางพบว่าค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันอยู่ในช่วง 60.00 - 80.69 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟแบบจำลองการกลั่น จะได้สัดส่วนของดีเซลดังแสดงในตารางที่ 4.13 มีร้อยละผลได้ของดีเซลอยู่ในช่วง 13.32 - 18.23 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.36 แสดงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ นำมาสร้างเป็น Half Normal probability plot พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.14 แสดงถึงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) พบว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของเนฟทา การคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 สามารถบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน จึงเป็นการยืนยันได้ว่า อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซลอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.13 ค่าร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ดีเซล
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
1.1	430	60	5	5	13.70
1.2					14.12
2.1	430	60	1	5	13.72
2.2					13.52
3.1	430	60	5	1	13.58
3.2					13.36
4.1	430	60	1	1	13.41
4.2					13.32
5.1	430	30	5	5	14.03
5.2					14.84
6.1	430	30	1	5	15.62
6.2					15.04
7.1	430	30	5	1	15.68
7.2					15.87
8.1	430	30	1	1	15.26
8.2					15.31
9.1	400	60	5	5	14.97
9.2					14.93
10.1	400	60	1	5	15.61
10.2					15.31
11.1	400	60	5	1	15.47
11.2					15.50
12.1	400	60	1	1	15.58
12.2					15.57

ตารางที่ 4.13 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแยกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

การทดลอง	ตัวแปร				ร้อยละผลได้ดีเซล
	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส),A	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา(นาที),B	ตัวเร่งปฏิกิริยา(เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก),C	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์),D	
13.1	400	30	5	5	15.87
13.2					15.03
14.1	400	30	1	5	16.94
14.2					17.88
15.1	400	30	5	1	14.85
15.2					14.75
16.1	400	30	1	1	18.23
16.2					17.90
17.1	415	45	3	3	15.24
17.2					15.71
17.3					15.16



รูปที่ 4.36 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแยกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

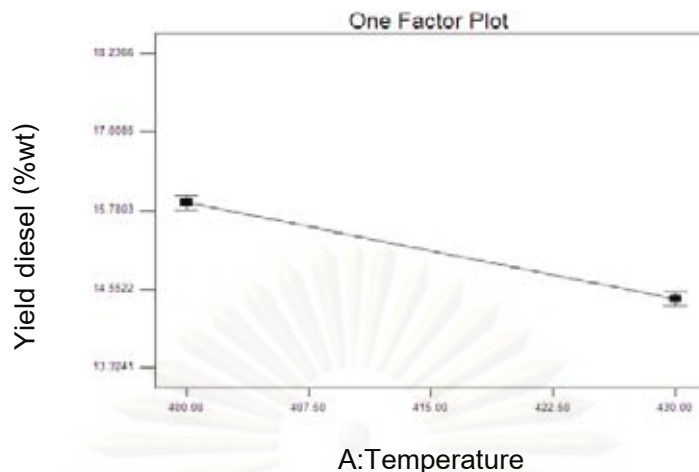
ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

Source	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F Value	Prob > F
Model	50.18	15	3.35	34.90	< 0.0001
A	18.03	1	18.03	188.07	< 0.0001
B	14.32	1	14.32	149.40	< 0.0001
C	4.25	1	4.25	44.29	< 0.0001
AB	0.61	1	0.61	6.34	0.0215
AC	4.24	1	4.24	44.26	< 0.0001
BC	3.70	1	3.70	38.65	< 0.0001
Curvature	0.13	1	0.13	1.38	0.2555
Pure Error	1.73	18	0.096		
Cor Total	52.03	34			

4.4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซลของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซล จากผลการทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.37 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ทำให้สัดส่วนของดีเซลลดลงจาก 15.90 เป็น 14.40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากอิทธิพลของการแตกตัวด้วยความร้อน อิทธิพลของอุณหภูมิมิมีผลอย่างมากต่อการแตกตัวของสายโซ่ขนาดใหญ่ไปเป็นขนาดกลางและขนาดเล็ก เวลาในการทำการทดลองดำเนินต่อไป และอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้โมเลกุลขนาดกลาง แตกตัวไปเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลง

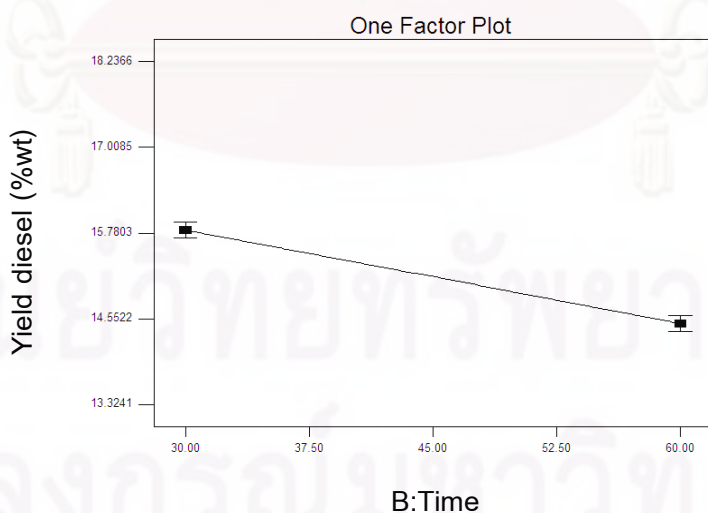
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.37 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.3.2 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลของพอลิโพรพิลีน

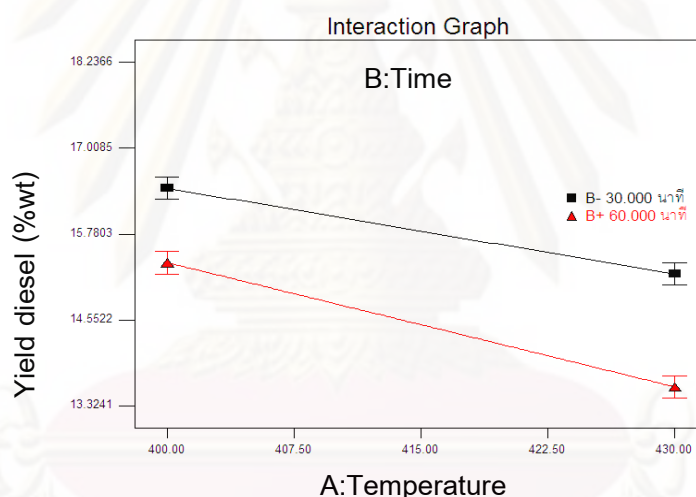
การศึกษาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล จากการทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ดังรูปที่ 4.38 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจาก 45 นาทีถึง 75 นาที ทำให้อัตราผลได้ของดีเซลลดลงจาก 15.82 เป็น 14.48 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดได้อย่างทั่วถึง มีการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้มีขนาดเล็กลง ส่งผลให้อัตราผลได้ของดีเซลลดลง



รูปที่ 4.38 ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียส ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.3.3 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล จากการทดลองที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ดังรูปที่ 4.39 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส ถึง 430 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ทำให้ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 16.43 เป็น 15.20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที พบว่าร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 15.37 เป็น 13.59 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากเมื่อใช้อุณหภูมิสูงขึ้นและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีขนาดเล็กลงและการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นไปอย่างทั่วถึง ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลง

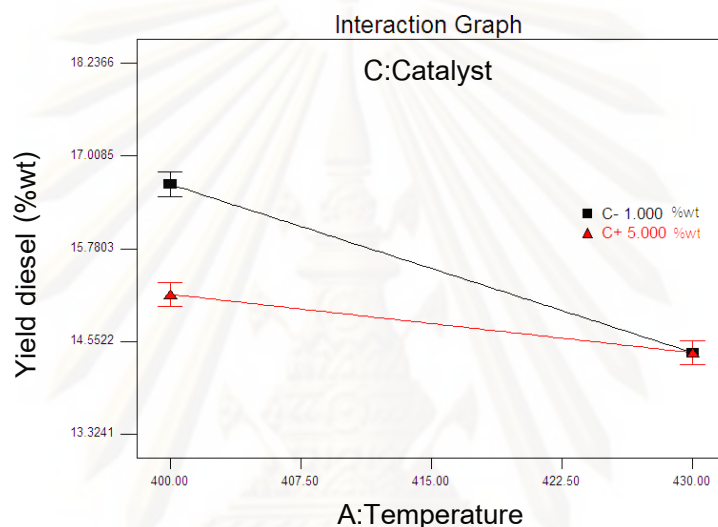


รูปที่ 4.39 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ที่ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ของพอลิโพรพิลีน

4.4.3.4 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ทดลองที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ ดังรูปที่ 4.40 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 400 องศาเซลเซียส ถึง 430 องศาเซลเซียส ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 16.63 เป็น 14.40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่ง 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงเช่นกัน โดยลดลงจาก 15.17 เป็น 14.40 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้พอลิโพรพิลีนเกิดการแตกตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ที่มีขนาดเล็กลง และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก มีตำแหน่งว่องไว (active site) ปริมาณมาก ทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดได้ดี เมื่อมีตำแหน่งว่องไว (active site) ปริมาณมากและใช้อุณหภูมิสูงในการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กได้ ทำให้ร้อยละผลได้ของดีเซลเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก

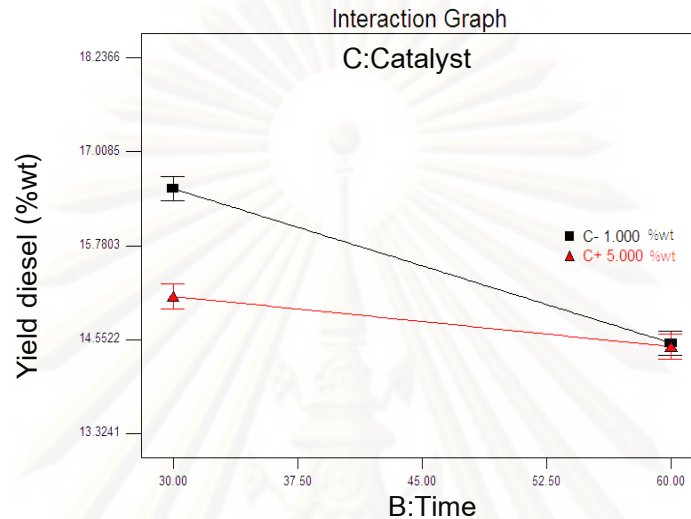


รูปที่ 4.40 ผลของอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.4.3.5 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลของพอลิโพรพิลีน

การศึกษาผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ทดลองที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ รูปที่ 4.41 พบว่าเมื่อใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 30 นาที ถึง 60 นาที ใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ทำให้ร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 16.52 เป็น 14.50 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละผลได้ของดีเซลลดลงจาก 15.11 เป็น 14.46 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก เมื่อได้รับอิทธิพลระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น ทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางได้มากขึ้น และตัวเร่งปฏิกิริยา 5

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีตำแหน่งว่องไว (active site) ปริมาณมาก ทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวเกิดได้ดี เมื่อมีตำแหน่งว่องไว (active site) ปริมาณมากและใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการแตกตัวอย่างต่อเนื่องจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ ไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กได้ ทำให้ร้อยละผลได้ของดีเซล เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.41 ผลของอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของดีเซลที่อุณหภูมิ 415 องศาเซลเซียสและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 3 บาร์ของพอลิโพรพิลีน

4.5 คำนวณหาภาวะเหมาะสมของการแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซี ใช้แล้วโดยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10

ตารางที่ 4.15 ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design – Expert 6.0.10 ของพอลิเอทิลีน

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temp	is in range	420	460	°C
Time	is in range	45	75	min
Catalyst	is in range	1	5	wt%
Pressure	is in range	1	5	bar
yield gas	minimize	3.2	35.67	%
yield liquid	maximize	60.02	87.76	%
yield naptha	maximize	22.9206	40.1381	%
yield diesel	maximize	14.1146	25.2673	%

ทำการหาภาวะที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าตอบสนองเพียง 4 ค่า คือ ค่าร้อยละผลได้ของแก๊ส ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล โดยจะพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด ส่วนค่าตอบสนองที่เหลือ ได้แก่ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล พิจารณาให้ได้ค่ามากที่สุด โดยใช้โปรแกรม design-expert 6.0.10 ในการหาภาวะที่เหมาะสม ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.15 ภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.16 คือที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 75 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และ ใช้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซลเป็น 10.14 86.75 31.73 23.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ตารางที่ 4.16 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม design-expert 6.0.10 ของพอลิเอทิลีน

Temp (°C)	Time (min)	Catalyst (wt%)	Pressure (bar)	Gas (%)	Liquid (%)	Naphtha (%)	Diesel (%)
420	75	1	5	10.14	86.75	31.73	23.09

หลังจากได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้วจะทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรม ดังนั้นจึงทำการทดลองเพิ่มขึ้นมาจากเดิมอีก 2 การทดลองแสดงในตารางที่ 4.15 ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.17 ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design-expert 6.0.10 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงของพอลิเอทิลีน

การทดลอง	สภาวะที่ใช้ทดลอง				% yield gas	% yield liquid	% yield naphtha	% yield diesel
	Temp (°C)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)				
คำนวณจากโปรแกรม	420	75	1	5	10.14	86.75	31.73	23.09
ทำการทดลอง	420	75	1	5	8.90	85.29	30.81	22.78
ทำการทดลอง	420	75	1	5	10.02	87.76	32.99	23.86

4.5.1 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของพอลิเอทิลีน

นำภาวะเหมาะสมมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราผลผลิตของแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 10.14 เป็น 19.52 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลผลิตของเนฟทา ค่าร้อยละผลผลิตของดีเซล ลดลงเป็น 75.79 26.39 19.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังตาราง 4.18 เนื่องจากการแตกตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหนักเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ซึ่งมีขนาดพอเหมาะกับขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาไปเป็นโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็ก อัตราผลผลิตของผลิตภัณฑ์น้ำมันจึงลดลงเกิดแก๊สมากขึ้น และในงานวิจัยมีสมมติฐานว่า เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจะช่วยให้ร้อยละผลผลิตของแก๊สลดลง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่คาดไว้

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของพอลิเอทิลีน

ภาวะที่ใช้ทดลอง	Yield gas (%)	Yield liquid (%)	Yield naphtha (%)	Yield diesel (%)
ภาวะเหมาะสม	10.14	86.75	31.73	23.09
ภาวะไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	19.52	75.79	26.39	19.37

4.5.2 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นของพอลิเอทิลีน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาวะเหมาะสม กับ กรณีที่ไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น พบว่าให้อัตราผลผลิตของแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 10.14 เป็น 15.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลผลิตของเนฟทา ค่าร้อยละผลผลิตของดีเซล ลดลงเป็น 77.50 25.39 17.83 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังตาราง 4.19 เนื่องจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเพื่อช่วยในปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความอิมตัว ไม่เกิดการแตกตัวต่อจนเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ทำให้ภาวะที่มีการความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น มีร้อยละผลผลิตของแก๊สน้อยกว่าภาวะที่ไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น

ตารางที่ 4.19 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นของพอลิเอทิลีน

ภาวะที่ใช้ทดลอง	Yield gas (%)	Yield liquid (%)	Yield naphtha (%)	Yield diesel (%)
ภาวะเหมาะสม	10.14	86.75	31.73	23.09
ภาวะไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	15.75	77.50	25.39	17.83

4.6 คำแนะนำภาวะเหมาะสมของการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วโดยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10

ตารางที่ 4.20 ขอบเขตของการหาภาวะเหมาะสมจากโปรแกรม Design - Expert 6.0.10 ของพอลิโพรพิลีน

Name	Goal	Lower Limit	Upper Limit	Unit
Temp	is in range	400	430	°C
Time	is in range	30	60	min
Catalyst	is in range	1	5	wt%
Pressure	is in range	1	5	bar
yield gas	minimize	14.74	32.34	%
yield liquid	maximize	62.00	80.69	%
yield naphtha	maximize	39.87	55.92	%
yield diesel	maximize	13.32	18.23	%

ทำการหาภาวะที่เหมาะสม โดยพิจารณาค่าตอบสนองเพียง 4 ค่า คือ ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล โดยจะพิจารณาให้มีค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด ส่วนค่าตอบสนองที่เหลือ ได้แก่ ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซล พิจารณาให้ได้ค่ามากที่สุด โดยจะใช้โปรแกรม design-expert 6.0.10 ในการหาภาวะที่เหมาะสม ข้อกำหนดสำหรับการหาภาวะ

ที่เหมาะสมจะแสดงดังตารางที่ 4.20 ภาวะที่เหมาะสมจะแสดงดังตารางที่ 4.21 คือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จะทำให้ได้ค่าร้อยละผลได้ของแก๊สที่เกิดขึ้น ค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลได้ของเนฟทา และค่าร้อยละผลได้ของดีเซลเป็น 17.72 78.73 51.26 17.39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ

ตารางที่ 4.21 ภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากโปรแกรม design-expert 6.0.10 ของพอลิโพรพิลีน

Temp (°C)	Time (min)	Catalyst (wt%)	Pressure (bar)	Gas (%)	Liquid (%)	Naphtha (%)	Diesel (%)
400	30	1	5	17.72	78.73	51.26	17.39

หลังจากได้ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรมแล้วจะทำการทดลองจริงเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากโปรแกรม จึงทำการทดลองเพิ่มขึ้นมาจากเดิมอีก 2 การทดลองแสดงในตารางที่ 4.22 ค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม

ตารางที่ 4.22 ภาวะที่เหมาะสมจากโปรแกรม design-expert 6.0.10 เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริงของพอลิโพรพิลีน

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ทดลอง				% yield gas	% yield liquid	% yield naphtha	% yield diesel
	Temp (°C)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)				
คำนวณจากโปรแกรม	400	30	1	5	17.72	78.73	51.26	17.39
ทำการทดลอง	400	30	1	5	16.82	77.56	50.87	17.78
ทำการทดลอง	400	30	1	5	17.96	78.55	51.10	16.89

4.6.1 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของพอลิโพรพิลีน

นำภาวะเหมาะสมมาเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาทำให้อัตราผลผลิตของแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 17.72 เป็น 23.45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลผลิตของเนฟทา ค่าร้อยละผลผลิตของดีเซล ลดลงเป็น 68.35, 43.50, 12.37 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังตารางที่ 4.23 เนื่องจากการแตกตัวด้วยความร้อนในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา ส่งผลให้โมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหนักเกิดการแตกตัวเป็นไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง หลังจากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีบทบาทในการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดกลาง ซึ่งขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นตัวช่วยในการเลือกเกิดการแตกตัวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน เมื่อไม่ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้การแตกตัวได้รับอิทธิพลจากการแตกตัวด้วยความร้อนมาก อัตราผลผลิตของผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงเกิดแก๊สมากขึ้น และในงานวิจัยมีสมมติฐานว่า เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจะช่วยให้ร้อยละผลผลิตของแก๊สลดลง ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่คาดไว้

ตารางที่ 4.23 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาของพอลิโพรพิลีน

ภาวะที่ใช้ทดลอง	Yield gas (%)	Yield liquid (%)	Yield naphtha (%)	Yield diesel (%)
ภาวะเหมาะสม	17.72	78.73	51.26	17.39
ภาวะไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยา	23.45	68.35	43.50	12.37

4.6.2 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นของพอลิโพรพิลีน

พิจารณาเปรียบเทียบภาวะเหมาะสม กับ กรณีที่ไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น พบว่าให้อัตราผลผลิตของแก๊สเพิ่มขึ้นจาก 17.72 เป็น 21.12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าร้อยละผลผลิตของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ค่าร้อยละผลผลิตของเนฟทา ค่าร้อยละผลผลิตของดีเซล ลดลงเป็น 70.50 45.39 13.76 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากการอัดความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นเป็นการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเพื่อช่วยในปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความอิมตัว ไม่เกิดการแตกตัวต่อจนเป็นแก๊สไฮโดรคาร์บอน ทำให้ภาวะที่มีการความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น มีร้อยละผลผลิตของแก๊สน้อยกว่าภาวะที่ไม่มีความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น

ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบระหว่างภาวะเหมาะสมกับกรณีที่ไม่มีความดันไฮโดรเจนเริ่มต้นของพอลิโพรพิลีน

ภาวะที่ใช้ทดลอง	Yield gas (%)	Yield liquid (%)	Yield naphtha (%)	Yield diesel (%)
ภาวะเหมาะสม	17.72	78.73	51.26	17.39
ภาวะไม่มีความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	21.12	70.50	45.39	13.76

4.7 เปรียบเทียบภาวะเหมาะสมของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน

นำภาวะเหมาะสมของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนมาเปรียบเทียบ พบว่าอุณหภูมิของภาวะเหมาะสมของพอลิเอทิลีนสูงกว่าพอลิโพรพิลีน เนื่องจากค่าพลังงานพันธะของพอลิเอทิลีน (341.1 กิโลจูลต่อโมล) มีค่าสูงกว่าของพอลิโพรพิลีน (334.4 กิโลจูลต่อโมล) ทำให้การแตกตัวเกิดได้ยากกว่า [23] จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าในการทำให้พอลิเอทิลีนเกิดการแตกตัว ดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบภาวะเหมาะสมของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีน

การทดลอง	ภาวะที่ใช้ทดลอง				Yield gas (%)	Yield liquid (%)	Yield naphtha (%)	Yield diesel (%)
	Temp (°C)	Time (min)	Catalyst (%wt)	Pressure (bar)				
ภาวะเหมาะสมของพอลิเอทิลีน	420	75	1	5	10.14	86.75	31.73	23.09
ภาวะเหมาะสมของพอลิโพรพิลีน	400	30	1	5	17.72	78.73	51.26	17.39

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาการแตกตัวพลาสติกพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอฟซีซีใช้แล้ว ในงานวิจัยจะทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อกระบวนการแตกตัว ซึ่งประกอบไปด้วย อุณหภูมิ เวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยา ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลและออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียลทำการทดลองซ้ำ ออกแบบและคำนวณโดยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 โปรแกรมนี้สามารถบ่งบอกได้ว่าตัวแปรใดมีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน ร้อยละผลได้ของแนฟทาและดีเซล

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของพอลิเอทิลีนด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 5.1 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของพอลิเอทิลีนด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอฟ ซีซีใช้แล้ว

ปัจจัยที่พิจารณา	ตัวแปรที่มีผล
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน	อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
ร้อยละผลได้ของแนฟทา	อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาปฏิกิริยา และอัตราการไหลระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น
ร้อยละผลได้ของดีเซล	อุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อัตราการไหลระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

5.1.2 ภาวะเหมาะสมของการแตกตัวของพอลิเอทิลีนด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของพอลิเอทิลีนด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจากการคำนวณด้วยโปรแกรม คือ

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	420	องศาเซลเซียส
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	75	นาที
ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	1	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	5	บาร์

ภาวะการทดลองข้างต้นให้ผลร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 86.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของแก๊ส 10.14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณ สัดส่วนของแนฟทาและดีเซล 31.73 และ 23.09 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.1.3 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตารางที่ 5.2 ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ปัจจัยที่พิจารณา	ตัวแปรที่มีผล
ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน	อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น
ร้อยละผลได้ของแนฟทา	อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น
ร้อยละผลได้ของดีเซล	อุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา และอันตรกิริยาระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยากับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

5.1.4 ภาวะเหมาะสมของการแตกตัวของพอลิโพรพิลีนด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวของโพรพิลีนด้วยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจากการคำนวณด้วยโปรแกรม คือ

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	400	องศาเซลเซียส
ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา	30	นาที
ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยา	1	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	5	บาร์

ภาวะการทดลองข้างต้นให้ผลร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 78.73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของแก๊ส 17.72 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณ สัดส่วนของแนฟทาและดีเซล 51.26 และ 17.39 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของพอลิเอทิลีนและพอลิโพรพิลีนเพื่อนำไปขยายส่วนการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวของพลาสติกตัวอื่นๆ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว
3. ศึกษาความเป็นไปได้และเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงเหลว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Available from : www.thaienergynews.com
2. ปรีชา พหลเทพ. พอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 7 กรุงเทพฯ:มหาวิทยาลัยรามคำแหง 2548
3. เกษร พะลัง. เคมีอินทรีย์เบื้องต้น. : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2546
4. กัญจนา ตระกูลคู. เทคโนโลยีโพลีเมอร์. กรุงเทพฯ: เอ็กเพรส มีเดีย 2533
5. นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุล. การแยกสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบ แบตช์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
6. Available from :
http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/plastic_recycle.html
7. อภินันทนา อุดมศักดิ์กุล. คุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงกับพอลิโพรพิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
8. สุวิชา กิตติกุลพันธ์, สุทธิรัตน์ ศรีธนาพุทธ , กัญยรัตน์ เหลืองบริบูรณ์. การศึกษาถึงคุณสมบัติการนำเศษโฟมพอลิยูรีเทนมาผสมกับพอลิโพรพิลีนเม็ดใหม่ และการใช้ coupling agent เป็นตัวเชื่อม วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
9. เสาวรส ช่วยจุลจิตร์. วิทยาศาสตร์โพลีเมอร์ 1. ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
10. เสาวรส ช่วยจุลจิตร์. วัสดุศาสตร์มูลฐาน. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ 2540
11. ธารณี กิตติเรืองทอง. กระบวนการร่วมของพอลิโพรพิลีนและลิกไนต์โดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
12. พูนสุข พึ่งธรรม. การแตกตัวพอลิโพรพิลีนด้วยไฮโดรเจนโดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม น้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
13. วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส หลักทฤษฎีและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

14. Satterfield C.N., Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. 2nd Ed., McGraw-Hill. 1991
15. Available from :
http://www.pkc.ac.th/kobori/Assets/ChemistryMahidol2/www.il.mahidol.ac.th/course/ap_chemistry2/kinetics/collision_theory.htm
16. สไบทิพย์ ตุงคะมณี. ผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมต่อโครงสร้างและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา Ru/Al₂O₃. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.
17. วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. ปฏิกิริยาเร่ง เคมีเกี่ยวกับพื้นที่ผิวและปิโตรเคมี. กรุงเทพฯ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2547
18. พิชร์ณัฐ์ เสวตรัตน์. ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
19. Available from : http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm
20. Available from : <http://www.mtec.or.th/laboratory/xrdxrf/>
21. ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : สุนทรออฟเซท, 2537.
22. D.P. Serrano , J. Aguado , J.M. Escola , J.M. Rodriguez , L. Morselli , R. Orsi., Thermal and catalytic cracking of a LDPE/EVA copolymer mixture. J. Anal. Appl. Pyrolysis 68-69 (2003) 481-494
23. Qian Zhou, Li Zheng, Yu-Zhong Wang, Guo-Ming Zhao, Bo Wang, Catalytic degradation of low-density polyethylene and polypropylene using modified ZSM-5 zeolites. Polymer Degradation and Stability 84 (2005) 493-497
24. Congxia Xie , Fusheng Liu , Shitao Yu , Fangfei Xie , Lu Li , Shufen Zhang , Jinzong Yang , Catalytic cracking of polypropylene into liquid hydrocarbons over Zr and Mo modified MCM-41 mesoporous molecular sieve. Catalysis Communications 10 (2008) 79-82
25. Lee S.Y., Yoon J.H., Kim J.R., Park D.W., Catalytic cracking of polypropylene into liquid hydrocarbons over Zr and Mo modified MCM-41 mesoporous molecular sieve Degradation of Polystyrene using clinoptilolite catalysis, J. Anal. Appl. Pyrolysis 64 (2002) 71
26. Ali, M. F., Siddiqui, M.N., Thermal and catalytic decomposition behavior of PVC mixed plastic waste with petroleum residue. J. Anal. Appl. Pyrolysis 74 (2005) 282-289

27. Wang,L., Yoo, J., Park, S.,Heon J.,Ho, T.L.,Deuk K.L. Optimum of pyrolytic coprocessing of waste plastic and waste motor oil into fuel oil using statistical pentagonal experimental design Journal of Fuel 78(1999) 809-813
28. Walendziewski, J., Steininger , M. Thermal and catalytic conversion of waste polyolefins. Journal of Catalysis 65(2001) 323-330
29. Weibing D., Jing L., and Laary L. A. Catalysis and processes for heavy oil conversion. International Symposium on Advances in Catalysis and Processes for Heavy oil Conversion. (1997) 428–432.
30. A. Marcilla, M.I. Beltra N, R. Navarro., Study of the deactivation process of HZSM5 zeolite during polyethylene pyrolysis. Applied Catalysis A: General 333 (2007) 57–66
31. Young-Hwa Seo. , Kyong-Hwan Lee. , Dae-Hyun Shin., Investigation of catalytic degradation of high-density polyethylene by hydrocarbon group type analysis. J. Anal. Appl. Pyrolysis 70 (2003) 383_ 398
32. นิสิตา วิสุทธิรังสีอุไร .การแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิโพรพิลีนและน้ำมันพีซีใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
33. ประชาวัฒน์ แต่ภักดี. การแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิพรอพิลีน พอลิโพรพิลีน และน้ำมันหล่อลื่น ใช้แล้วด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
34. Available from : <http://www.iza-structure.org/database/>



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิเอทิลีน

run	Temp.(°C)	Time (min)	cat (g)	pressure (bar)	Gas	Solid	Liq.	Naphtha	Kerosene	Diesel	Long Residue
0	440	60	0.6	3	16.36	2.24	80.07	34.60	10.70	21.99	12.76
0	440	60	0.6	3	17.80	2.49	79.69	35.14	11.90	23.64	9.00
0	440	60	0.6	3	14.90	2.60	82.54	35.20	11.62	25.26	10.44
1	460	75	1	5	32.09	3.77	64.13	34.60	9.82	15.73	3.96
1R	460	75	1	5	35.67	1.89	62.43	33.71	11.25	14.70	2.75
2	460	75	0.2	5	26.66	2.45	70.87	40.13	10.05	16.65	4.03
2R	460	75	0.2	5	30.95	3.73	65.31	36.87	9.43	15.25	3.74
3	460	75	1	1	35.20	4.15	60.02	30.95	9.64	15.81	3.60
3R	460	75	1	1	32.68	7.12	60.02	31.58	7.92	16.53	3.96
4	460	75	0.2	1	30.88	1.96	67.15	35.20	10.33	17.53	4.07
4R	460	75	0.2	1	29.09	4.32	66.58	38.82	8.95	14.93	3.86
5	460	45	1	5	20.02	2.68	77.27	30.68	12.98	24.31	9.28
5R	460	45	1	5	22.59	5.84	71.16	36.91	10.74	22.41	4.54
6	460	45	0.2	5	20.36	1.97	77.66	36.03	10.80	21.60	9.22
6R	460	45	0.2	5	24.80	2.27	72.93	34.89	9.50	17.97	10.55
7	460	45	1	1	26.80	1.28	71.90	36.85	10.75	18.97	5.30
7R	460	45	1	1	28.48	4.95	66.56	32.94	9.94	17.72	5.95

ตาราง ก1(ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิเอทิลีน

run	Temp.(°C)	Time (min)	cat (g)	pressure (bar)	Gas	Solid	Liq.	Naphtha	Kerosene	Diesel	Long Residue
8	460	45	0.2	1	26.24	1.76	71.98	38.72	9.08	16.52	7.64
8R	460	45	0.2	1	29.6	2.48	67.90	39.13	8.23	14.11	6.41
9	420	75	1	5	9.42	12.07	77.99	28.72	7.99	20.33	20.93
9R	420	75	1	5	5.62	14.55	79.83	30.23	8.370	23.54	17.68
10	420	75	0.2	5	10.02	2.21	87.76	32.99	9.78	23.86	21.11
10R	420	75	0.2	5	8.90	5.72	85.29	30.81	9.02	22.78	22.67
11	420	75	1	1	6.08	12.37	81.04	30.57	8.35	20.41	21.68
11R	420	75	1	1	4.27	14.03	81.68	30.64	11.39	19.75	19.88
12	420	75	0.2	1	10.56	8.50	80.87	25.14	7.34	18.70	29.67
12R	420	75	0.2	1	8.09	5.00	86.87	29.63	8.48	20.02	28.73
13	420	45	1	5	5.09	13.20	81.7	26.74	7.68	18.10	29.16
13R	420	45	1	5	3.20	15.96	81.01	28.28	9.81	17.39	25.50
14	420	45	0.2	5	9.8	9.83	80.29	24.78	8.16	18.56	28.77
14R	420	45	0.2	5	13.11	9.48	77.41	24.70	8.69	19.39	24.61
15	420	45	1	1	7.94	11.67	80.38	27.40	8.11	18.26	26.59
15R	420	45	1	1	4.20	10.00	85.71	29.84	9.80	19.60	26.46
16	420	45	0.2	1	8.50	16.55	74.89	23.14	7.83	18.85	25.05
16R	420	45	0.2	1	8.41	15.96	75.62	22.92	8.12	19.67	24.90

ตาราง ก2 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิโพรพิลีน

run	Temp.(°C)	Time (min)	cat (g)	pressure (bar)	Gas	Solid	Liq.	Naphtha	Kerosene	Diesel	Long Residue
0	415	45	0.6	3	20.15	3.23	76.61	53.15	5.52	15.24	2.68
0	415	45	0.6	3	19.52	3.17	77.15	52.82	5.60	15.71	3.00
0	415	45	0.6	3	18.83	3.25	77.92	54.73	4.86	15.16	3.16
1	400	30	0.2	1	20.05	1.31	78.62	49.68	5.91	18.23	4.78
1 R	400	30	0.2	1	17.97	3.20	78.81	50.17	5.40	17.90	5.32
2	400	30	1	1	16.81	5.73	77.45	53.41	5.34	14.85	3.83
2R	400	30	1	1	18.12	4.53	77.35	53.23	5.47	14.75	3.88
3	400	30	0.2	5	20.43	2.01	77.55	50.67	5.51	16.94	4.41
3R	400	30	0.2	5	16.87	3.17	79.95	50.81	5.58	17.88	5.66
4	400	30	1	5	14.74	4.55	80.69	55.92	5.65	15.87	3.24
4R	400	30	1	5	16.53	4.86	78.61	55.05	5.14	15.03	3.37
5	430	30	0.2	1	24.95	0.63	74.41	51.17	5.31	15.26	2.65
5R	430	30	0.2	1	21.41	2.30	76.24	52.84	5.36	15.31	2.72
6	430	30	1	1	23.17	4.75	72.07	47.40	5.52	15.68	3.45
6R	430	30	1	1	24.80	2.27	72.93	51.58	1.58	15.87	3.88
7	430	30	0.2	5	23.75	0.80	75.43	51.33	5.31	15.62	3.15
7R	430	30	0.2	5	23.42	1.86	74.7	51.17	5.19	15.04	3.28
8	430	30	1	5	24.18	2.99	72.80	51.07	5.22	14.03	2.46
8R	430	30	1	5	24.68	2.48	73.85	51.77	4.94	14.84	2.28

ตาราง ก2(ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของพอลิโพรพิลีน

run	Temp.(°C)	Time (min)	cat (g)	pressure (bar)	Gas	Solid	Liq.	Naphtha	Kerosene	Diesel	Long Residue
9	400	60	0.2	1	25.85	3.07	71.06	47.42	5.41	15.58	2.63
9R	400	60	0.2	1	23.43	4.16	72.39	48.95	5.24	15.57	2.62
10	400	60	1	1	21.53	3.58	74.88	50.09	5.49	15.47	3.81
10R	400	60	1	1	22.08	2	75.77	50.77	5.78	15.50	3.70
11	400	60	0.2	5	22.68	2.69	74.60	50.83	5.22	15.61	2.922
11R	400	60	0.2	5	20.78	3.43	75.80	52.35	5.07	15.31	3.04
12	400	60	1	5	19.14	2.88	77.97	54.35	5.70	14.97	2.93
12R	400	60	1	5	19.45	2.24	78.31	54.66	5.86	14.93	2.85
13	430	60	0.2	1	31.51	3.34	65.14	43.82	4.38	13.41	3.51
13R	430	60	0.2	1	32.34	3.14	64.52	43.64	4.39	13.32	3.15
14	430	60	1	1	30.84	6.67	62.00	39.87	4.42	13.58	4.10
14R	430	60	1	1	29.31	7.48	63.21	41.53	4.54	13.36	3.76
15	430	60	0.2	5	28.75	2.67	68.60	46.87	4.59	13.72	3.41
15R	430	60	0.2	5	27.33	3.15	69.52	47.89	4.57	13.52	3.52
16	430	60	1	5	29.53	2.76	67.71	47.04	3.68	13.70	3.27
16R	430	60	1	5	30.00	1.84	68.16	47.24	3.42	14.12	3.36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวิเคราะห์เชิงสถิติและตัวอย่างการคำนวณ

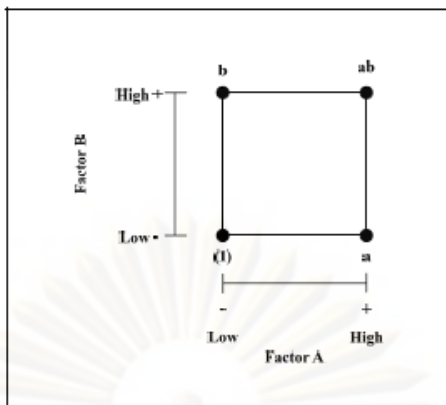
1. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้นกรณีพิเศษของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ ใน 1 เพลทเคดที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

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

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 ข1 แสดง การทดลองร่วมปัจจัยของการออกแบบ 2²

การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 สำหรับการออกแบบนี้จะแทนด้วยตัวอักษรเล็ก (รูปที่ด้านบน) จะเห็นได้ว่า สำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆ จะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น สำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆ 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

2. สูตรการคำนวณ

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

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

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

Total of Sum of Squares :

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

Mean of Square Error : $SS_E = SST - \text{Sum Squares of Main Effect}$

Mean of Square : $MS = \text{Sum of Squares} / \text{Degree of Freedom}$

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

F_0 = Mean Square of Effect/Mean Square of Error

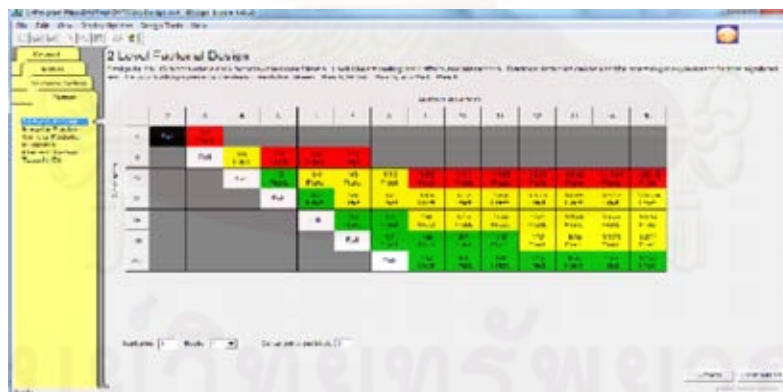
3. ตัวอย่างงานวิจัย การแตกตัวของพอลิเอทิลีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว ออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล แบบ 2 เรพลิเคต โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปรดังนี้

ตารางที่ ข1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษาของพอลิเอทิลีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

ตัวแปร	ระดับ	หน่วย		
		ระดับต่ำ(-)	ระดับสูง(+)	
A =	อุณหภูมิ	420	460	องศาเซลเซียส
B =	เวลา	45	75	นาที
C =	ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	1	5	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
D =	ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	5	บาร์

4. การใช้โปรแกรม Design-Expert ในการคำนวณ

1. เมื่อเข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file ----> New Design และจะได้ดังรูป ข2



รูป ข2 แสดงตารางของ 2 Level Factorial Design

2. เลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ยกตัวอย่างในการทดลองนี้จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งที่ใช้ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น รวมทั้งหมด 4 ตัวแปร เลือกที่ Full ของช่อง 4 จากนั้นกรอกจำนวนที่ทำซ้ำช่อง Replicates และ กรอกค่าทำซ้ำที่ค่ากลาง ช่อง Center

point per block ยกตัวอย่าง Replicates = 2, Center point per block = 3 กติที่ Continue จะปรากฏดังรูป ข3 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

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

	Name	Units	Type	Low	High
A:	Temperature	°C	Numeric	420	460
B:	Time	min	Numeric	45	75
C:	Catalyst	%wt	Numeric	1	5
D:	Pressure	bar	Numeric	1	5

รูป ข3 แสดงตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

3.เลือก Responses กรอกชื่อ Responses พร้อมกรอก Unit ของตัวแปรนั้นๆในช่องดังรูป ข4 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

Responses: 5		Name	Units
Response 1		gas	%wt
Response 2		liq	%wt
Response 3		naphtha	%wt
Response 4		kerosene	%wt
Response 5		diesel	%wt

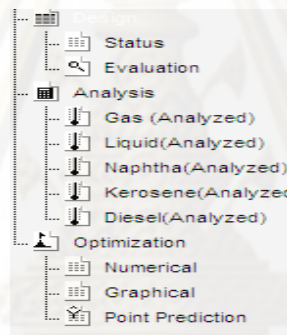
รูป ข4 แสดง Responses และ หน่วยที่ต้องการของการทดลอง

4. จากนั้นจะขึ้นตัวแปรที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ยกตัวอย่างเช่น มีทั้งหมด 16 การทดลอง ทำซ้ำ การทดลองละ 2 ครั้ง ค่ากลาง 1 การทดลอง ทำซ้ำ 3 ครั้ง รวมการทดลอง 35 การทดลอง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองกรอกในช่องดังรูป ข5

Run	Sum	Block	Factor 1 A Temp min	Factor 2 B Time min	Factor 3 C Change g	Factor 4 D Pressure bar	Response 1 Gas %	Response 2 Liq %	Response 3 Naphtha %	Response 4 Kerosene %	Response 5 Diesel %
1	1	Block 1	400.00	45.00	0.20	1.00	20.0	07.0	24.700	0.2200	14.1500
2	2	Block 1	400.00	45.00	1.00	1.00	0.00	01.04	10.870	0.1070	10.4500
3	3	Block 1	400.00	45.00	0.20	0.00	0.00	00.20	24.7000	0.1000	10.0000
4	4	Block 1	400.00	45.00	1.00	0.00	00.20	04.73	24.8200	0.0210	10.7000
5	5	Block 1	400.00	45.00	0.20	1.00	0.00	71.00	23.910	7.0000	10.0000
6	6	Block 1	400.00	45.00	1.00	0.00	14.0	03.04	10.2000	11.000	10.2000
7	7	Block 1	400.00	45.00	0.00	0.00	00.00	00.0000	14.000	10.7000	10.0000
8	8	Block 1	400.00	45.00	0.20	1.00	20.20	71.00	23.700	0.2000	10.0000
9	9	Block 1	400.00	45.00	1.00	0.00	00.20	03.70	11.10	10.9100	10.7400
10	10	Block 1	400.00	45.00	0.00	0.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
11	11	Block 1	400.00	45.00	1.00	1.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
12	12	Block 1	400.00	45.00	0.00	1.00	0.00	00.00	10.000	10.000	10.000
13	13	Block 1	400.00	45.00	0.00	0.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
14	14	Block 1	400.00	45.00	1.00	1.00	-0.20	01.00	10.000	11.000	10.000
15	15	Block 1	400.00	45.00	0.00	0.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
16	16	Block 1	400.00	45.00	0.20	0.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
17	17	Block 1	400.00	45.00	1.00	0.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
18	18	Block 1	400.00	45.00	0.00	1.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
19	19	Block 1	400.00	45.00	0.20	1.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
20	20	Block 1	400.00	45.00	1.00	0.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000
21	21	Block 1	400.00	45.00	0.00	0.00	00.00	00.00	10.000	10.000	10.000

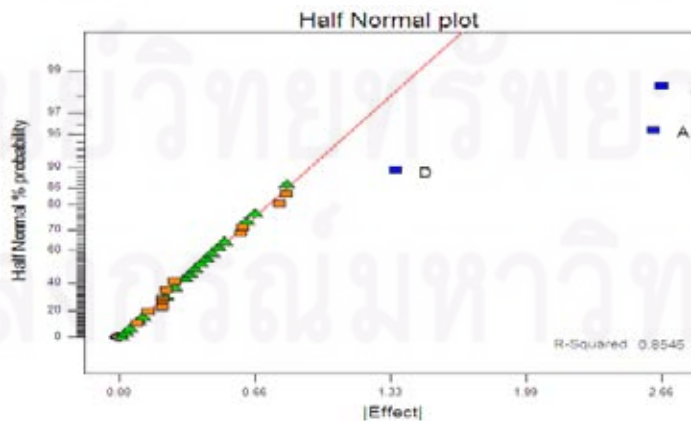
รูป ข5 แสดงตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ

- วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยโปรแกรม Desgin-Expert ยกตัวอย่างเช่น วิเคราะห์ผลของ liq โดยคลิกที่ liq ที่หัวข้อ Analysis ดังรูป ข6 จากนั้นไปคลิกที่ Effect



รูป ข6 แสดงแถบของ gas liq naphtha kesosene และ diesel

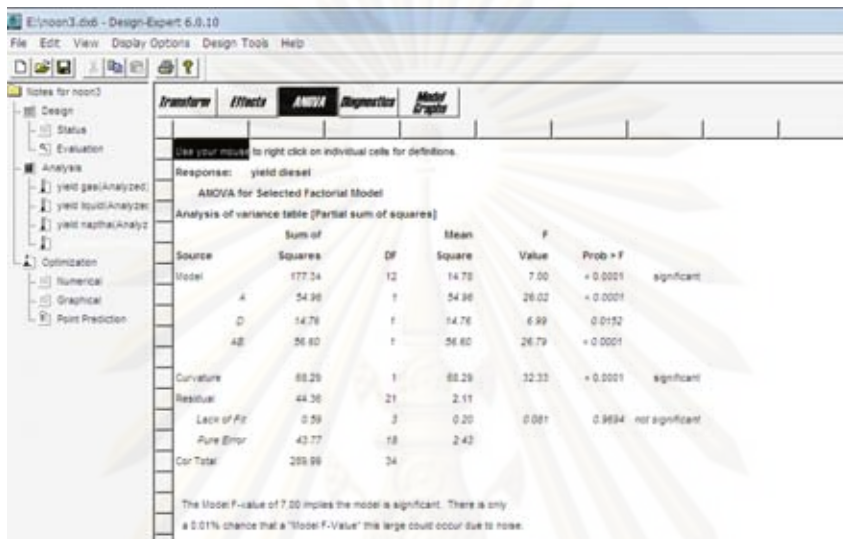
- เมื่อคลิก Effect จากนั้นทำการเลือกจุดในกราฟ Normal % Probability เพื่อให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังรูป ข6 ยกตัวอย่างเช่น



รูป ข7 Half Normal probability plot ของร้อยละผลได้ของดีเซลจากปฏิกิริยาแตกตัวของพอลิเอทิลีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว

จากสรุปบ่งบอกว่า ตัวแปรที่เบี่ยงออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล

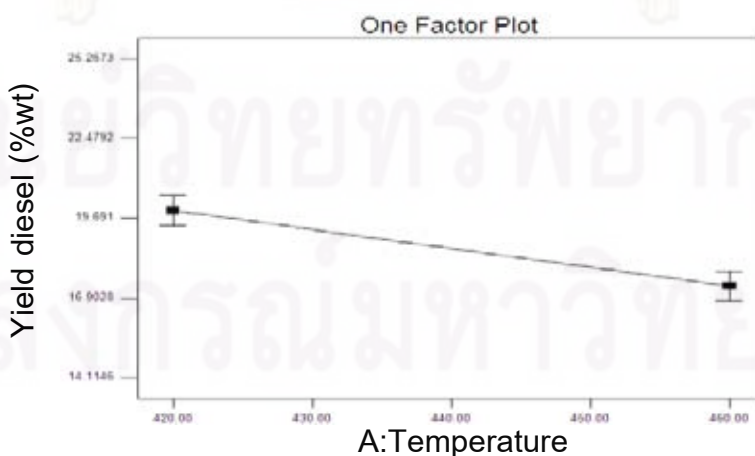
7. คลิกที่คำว่า ANOVA (ดังรูป ข8) เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณและเป็นการยืนยันผลของ Normal normal probability



รูป ข8 แสดงการคำนวณผลของ ANOVA

จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert 6.0.10 จะบ่งบอกว่าปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ปัจจัยนั้นจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล พบว่า อุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล

8. คลิก Model graphs เพื่ออธิบายผลของอุณหภูมิ ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น อันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของดีเซล ดังรูป ข9

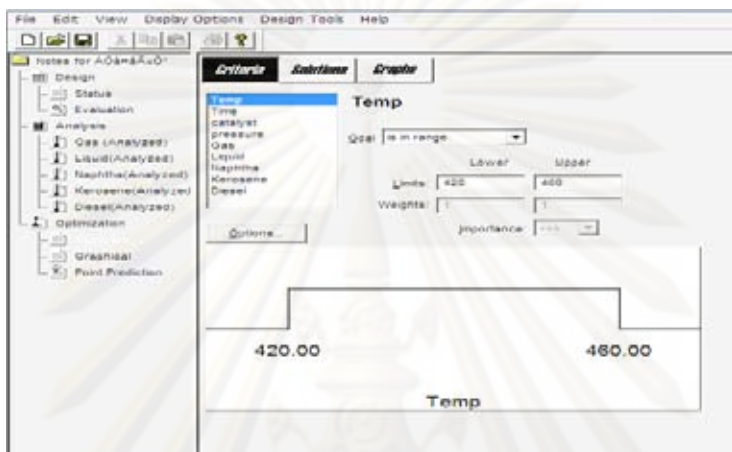


รูป ข9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของดีเซล

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการแตกโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในช่วงดีเซลมีขนาดเล็กลงบางส่วนกลายเป็นแก๊ส ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของดีเซลมีค่าลดลง ดังรูป 9ข

9. จากนั้นวิเคราะห์ตัวแปรอื่นๆตามข้อที่ 5-8

10. หาภาวะเหมาะสมของการทดลอง คลิกที่ numerical ---> Criteria พร้อมกรอกขอบเขตที่ต้องการในช่องLimits ดังรูป ข10



รูป ข10 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

11. คลิกที่ Solutions จะได้ภาวะที่เหมาะสมดังรูป ข11

Number	Temp	Time	Catalyst	Pressure	Yield Gas	Yield Liquid	Yield Light	Yield Diesel	Feasibility
1	420.00	75.00	0.20	5.00	10.161	88.737	11.733	11.033	0.750
2	420.00	70.00	0.20	4.90	10.074	88.974	11.548	11.228	0.746
3	420.00	70.00	0.20	4.80	10.014	89.041	11.588	11.872	0.741
4	420.00	74.00	0.20	5.00	10.760	88.168	11.081	11.816	0.738
5	420.00	70.00	0.20	5.00	10.074	88.989	11.626	11.732	0.736
6	420.00	70.00	0.20	5.00	10.017	89.010	11.534	11.838	0.735

รูป ข11 แสดงภาวะเหมาะสมและขอบเขตของการทดลอง

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด (Boiling Distribution)

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วย Simulated Distillation Gas Chromatography การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยวิธีนี้จะวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของสารดังต่อไปนี้

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

การวิเคราะห์เริ่มด้วยการนำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปละลายในคาร์บอนไดซัลไฟต์ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วน โดยปริมาตร วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ 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 ง

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิค XRF

ตาราง ง1องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว calcine ที่อุณหภูมิ 500 °C แบบ element

Spent FCC (element)	nZ	Concentration (% weight)	Spent FCC cal 500 °C (element)	nZ	Concentration (% weight)
Si	14	40.13	Si	14	42.86
Al	13	42.07	Al	13	41.78
Na	11	0.58	Na	11	0.54
P	15	0.12	P	15	0.12
S	16	0.29	S	16	0.28
K	19	0.32	K	19	0.28
Ca	20	0.39	Ca	20	0.34
Ti	22	2.67	Ti	22	2.41
V	23	0.33	V	23	0.30
Mn	25	0.23	Mn	25	0.18
Co	27	0.03	Ni	28	1.31
Ni	28	1.65	Cu	29	0.09
Cu	29	0.08	Zn	30	0.08
Zn	30	0.07	Ga	31	0.02
Ga	31	0.03	Sr	38	0.06
Sr	38	0.07	Zr	40	0.06
Y	39	0.02	La	57	5.47
Zr	40	0.07	Ce	58	0.46
La	57	6.29	Nd	60	0.20
Ce	58	0.49	Gd	64	0.12
Nd	60	0.26	Fe	26	2.73
Sm	62	0.20			

ตาราง ง2 องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วและองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้ว calcine ที่อุณหภูมิ 500 °C แบบ oxide

Spent FCC (oxide)	nZ	Concentration (% weight)	Spent FCC cal 500 °C (oxide)	nZ	Concentration (% weight)
Fe ₂ O ₃	26	1.46	Fe ₂ O ₃	26	1.25
SiO ₂	14	42.79	SiO ₂	14	44.71
Al ₂ O ₃	13	48.31	Al ₂ O ₃	13	47.71
Na ₂ O	11	0.58	Na ₂ O	11	0.55
P ₂ O ₅	15	0.12	P ₂ O ₅	15	0.12
SO ₃	16	0.31	SO ₃	16	0.29
K ₂ O	19	0.16	K ₂ O	19	0.14
CaO	20	0.22	CaO	20	0.18
TiO ₂	22	1.73	TiO ₂	22	1.51
V ₂ O ₅	23	0.23	V ₂ O ₅	23	0.20
MnO	25	0.08	MnO	25	0.07
CoO	27	0.02	NiO	28	0.52
NiO	28	0.67	CuO	29	0.02
CuO	29	0.01	ZnO	30	0.02
ZnO	30	0.01	Ga ₂ O ₃	31	0.01
Ga ₂ O ₃	31	0.01	SrO	38	0.02
SrO	38	0.02	ZrO ₂	40	0.02
Y ₂ O ₃	39	0.01	La ₂ O ₃	57	2.19
ZrO ₂	40	0.03	CeO ₂	58	0.19
La ₂ O ₃	57	2.58	Nd ₂ O ₃	60	0.07
CeO ₂	58	0.21	Gd ₂ O ₃	64	0.04
Nd ₂ O ₃	60	0.11	Na ₂ O	11	0.55

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วมีปริมาณ Si และ Al เป็นปริมาณมาก จึงคาดว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเอพซีซีใช้แล้วจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรกัญญ์ สุขามาลาวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 3 มีนาคม 2529 ที่จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย