

การแตกตัวพอลิไธรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด



นางสาว อรดา วงศ์สุภักดิ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-5996-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CRACKING OF USED POLYSTYRENE USING ACID CATALYSTS



Miss Arada Wongsuppaluk

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-5996-7

นางสาวอรดา วงศ์สกุลักษณ์: การแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด.
(CRACKING OF USED POLYSTYRENE USING ACID CATALYSTS) อ.ที่ปรีกษา:
ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 109 หน้า. ISBN 974-17-5996-7.

พอลิสไตรีนใช้แล้วผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยากรด 1 ใน 3 ชนิด ของ ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al₂O₃ ทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ขนาด 70 มิลลิลิตร กระบวนการแตกตัวกระทำ ณ อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 60-180 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ ปริมาณของ HZSM-5 0.1-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al₂O₃ 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันและองค์ประกอบที่ดีที่สุด โดยได้ทำการออกแบบการทดลองเป็นแบบแฟกทอเรียลสองระดับ

ภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 คือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 88.3 ประกอบด้วยแก๊สโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์ และกากน้ำมันเบา ร้อยละ 28, 3, 40, 3 และ 26 ตามลำดับ ภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ คือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 120 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 88.7 ประกอบด้วยแก๊สโซลีน เคโรซีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์ และกากน้ำมันเบา ร้อยละ 24, 1, 45, 2 และ 28 ตามลำดับ ส่วนภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ คือ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที ความดันไฮโดรเจน 1 บาร์และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันร้อยละ 91.2 ประกอบด้วยแก๊สโซลีน แก๊สออยล์เบา แก๊สออยล์ และกากน้ำมันเบา ร้อยละ 33, 40, 1 และ 26 ตามลำดับ และเมื่อนำผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบสารเคมีโดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นเอทิลเบนซีน คิวมินและโทลูอิน

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2547

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4572582323: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: CATALYTIC / CRACKING / POLYSTYRENE / HZSM-5 / Co-Mo/Al₂O₃

ARADA WONGSUPPALUK: CRACKING OF USED POLYSTYRENE USING ACID CATALYSTS. THESIS ADVISOR: PROF.SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D.109 pp. ISBN 974-17-5996-7.

The used polystyrene was mixed with one of three acid catalysts: HZSM-5, Fe/Activated carbon and Co-Mo/Al₂O₃ in the micro reactor of 70 ml. The cracking process was performed at reaction temperature 350-400 °C, reaction time 60-180 min, initial hydrogen pressure 1-5 bars and containing 0.1-1 %w of HZSM-5, 1-5 %w of Fe/Activated carbon and Co-Mo/Al₂O₃. The two level factorial experimental designed was experimented to produced the best product and components.

The optimum conditions of cracking used PS on HZSM-5 were 370 °C, 90 min, 1 bar and catalyst content 0.1 %w. The oil yield was 88.3 %w and composed of gasoline, kerosene, light gas oil, gas oil and long residue (28, 3, 40, 3 and 26 percentage, respectively). The optimum conditions of cracking used PS on Fe/activated carbon were 370 °C, 120 min, 1 bar and catalyst content 5 %w. The oil yield was 88.7 %w and composed of gasoline, kerosene, light gas oil, gas oil and long residue (24, 1, 45, 2 and 28 percentage, respectively). The optimum conditions of cracking used PS on Co-Mo/Al₂O₃ were 370 °C, 90 min, 1 bar and catalyst content 5 %w. The oil yield was 91.2 %w and composed of gasoline, light gas oil, gas oil and long residue (33, 40, 1 and 26 percentage, respectively). These oil products were analyzed from Gas Chromatography and mainly obtained ethylbenzene cumene and toluene.

Department Chemical Technology

Field of study Chemical Technology

Academic year 2004

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ คำรงค์เลิศ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็น คำแนะนำ ในการจัดทำ วิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนอุดหนุนงานวิจัย ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการและกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิस्टาไทริน.....	4
2.1.1 สมบัติของพอลิस्टาไทริน.....	4
2.1.2 การประยุกต์ใช้พอลิस्टาไทริน.....	5
2.2 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิส.....	6
2.2.1 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์.....	6
2.2.2 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิสแบบวิวิธพันธ์.....	6
2.2.3 ปฏิกริยาอะคะตะไลซิสแบบเอนไซม์.....	7
2.3 ซีโอไลต์.....	7
2.3.1 การแบ่งประเภทซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง.....	8
2.3.2 ZSM-5.....	12
2.3.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	13
2.3.4 ประโยชน์ของซีโอไลต์.....	14
2.4 ตัวเร่งปฏิกริยาโลหะ.....	15
2.4.1 การเตรียมและโครงสร้างตัวเร่งปฏิกริยา dual function.....	18
2.4.2 องค์ประกอบความเป็นโลหะบนตัวเร่งปฏิกริยา.....	18
2.4.3 องค์ประกอบความเป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกริยา.....	19
2.4.3.1 ตัวรองรับอะลูมินา.....	19
2.4.3.2 ถ่านกัมมันต์.....	20
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกสลายของพอลิเมอร์.....	21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6 การแตกตัวด้วยความร้อน.....	24
2.7 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	26
2.8 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....	28
2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
3. เครื่องมือและอุปกรณ์.....	31
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	31
3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี.....	34
3.3 การดำเนินการวิจัย.....	34
3.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	36
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	38
4.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	38
4.1.1 อิทธิพลของตัวแปรต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	38
4.1.2 อิทธิพลของตัวแปรต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีน.....	39
4.2 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุด เดือดจากการแตกตัวพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	41
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	41
4.2.2 ผลของเวลาต่อการกระจายตัวองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	43
4.2.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	44
4.2.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	46
4.3 การวิเคราะห์การกระจายผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา HZSM-5.....	48
4.4 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	52
4.4.1 อิทธิพลของตัวแปรต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	52
4.4.2 อิทธิพลของตัวแปรต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีน.....	53
4.5 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุด เดือดจากการแตกตัวพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	55

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	55
4.5.2 ผลของเวลาต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	57
4.5.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน...	59
4.5.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	61
4.6 การวิเคราะห์การกระจายผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	62
4.7 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	66
4.7.1 อิทธิพลของตัวแปรต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	66
4.7.2 อิทธิพลของตัวแปรต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีน.....	67
4.8 การศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุด เดือดจากการแตกตัวพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	69
4.8.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	69
4.8.2 ผลของเวลาต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	71
4.8.3 ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน...	72
4.8.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวของค้ำประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน.....	74
4.9 การวิเคราะห์การกระจายผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	76
4.10 การวิเคราะห์สารเคมีหลักที่เกิดจากการทดลอง.....	80
4.11 เปรียบเทียบงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	81
5. สรุปผลการทดลอง.....	82
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชันของไซโคลเฮกเซนเป็นเบนซีนบนตัวเร่งต่างๆ (อุณหภูมิ 427 องศาเซลเซียส ความดัน 7 บรรยากาศ)	18
2.2 แสดงค่าพลังงานการแตกตัวของพันธะเดี่ยว.....	21
2.3 แสดงค่าพลังงานการแตกตัวของพันธะ CH ₃ -R	22
2.4 แสดงค่าความหนืดของก๊าซและของเหลวที่ความดันบรรยากาศ.....	24
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษานตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	35
3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษานตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al ₂ O ₃	35
4.1 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	39
4.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	40
4.3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	53
4.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	54
4.5 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	67
4.6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	68
4.7 แสดงร้อยละของผลิตภัณฑ์สารเคมีหลักที่เกิดจากแตกตัวพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ.....	80
4.8 แสดงการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน.....	81
ก1 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2 ⁴ factorial design) สำหรับการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5..	88
ก2 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2 ⁴ factorial design) สำหรับการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	89

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ก3 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2 ⁴ factorial design) สำหรับการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	90
ก4 แสดงผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	91
ก5 แสดงผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	92
ก6 แสดงผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	93
ก7 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	94
ก8 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	95
ก9 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	96
ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	97
ข2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	100
ข3 แสดงภาวะของตัวแปรและร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้.....	101
ข4 แสดงผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้.....	102
ข5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Normal probability (%) กับ absolute effect estimate.....	103
ข6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	104
ง1 แสดงภาวะและคุณสมบัติของเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี.....	107
จ1 แสดงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al ₂ O ₃	108

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 แสดงร้อยละปริมาณขยะแข็งชนิดต่างๆและร้อยละพลาสติกใช้แล้วชนิดต่างๆ.....	1
2.1 แสดงปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนเป็นพอลิสไตรีน.....	4
2.2 แสดงการต่อหน่วยเตตระอีตรอนในโครงสร้างซีโอไลต์.....	7
2.3 แสดงหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์.....	9
2.4 แสดงหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์.....	9
2.5 แสดงหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์.....	9
2.6 แสดงประจุในโครงสร้างตาข่ายซีโอไลต์.....	10
2.7a) แสดงการเร่งปฏิกิริยาโดยการคัดเลือกขนาดของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาในโพรงซีโอไลต์.....	11
b) แสดงการคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในโพรงซีโอไลต์.....	11
2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างของ ZSM-5.....	12
2.9 แสดงการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้น.....	15
2.10 แสดงความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น 3 d และ work function(ϕ_0) ของโลหะทรานซิชันในช่วงที่สี่.....	16
2.11 แสดงหน้าที่ตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอนภายใน band model.....	17
2.12 แสดงปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียและอะลูมิเนียมอะตอม.....	19
2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิครึ่งชีวิต ($T_{1/2}$) กับค่าพลังงานในการแตกตัวของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	23
2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การแตกสลาย (การลดลงของความหนืด) กับความดันของพอลิสไตรีนในเบนซีน.....	24
3.1 แสดงเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 70 มิลลิลิตร (Micro-reactor).....	31
3.2 แสดงชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และเครื่องเขย่า... ..	32
3.3 แสดงชุดกรองสุญญากาศ.....	32
3.4 แสดงเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น.....	33
3.5 แสดงเครื่องมือโครแก๊สโครมาโทกราฟี.....	33
3.6 แสดงเครื่องกลั่นแยกแบบหมุน.....	34
4.1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	39

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
4.2 แสดง Normal Probability Plot ของร้อยละแก๊ส โซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการ แตกตัวพอลิไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	40
4.3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์.....	42
4.4 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์.....	42
4.5 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์.....	43
4.6 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมัน อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์.....	44
4.7 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความดัน 5 บาร์.....	45
4.8 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ น้ำมันที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความดัน 5 บาร์.....	46
4.9 แสดงผลของความดันต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก.....	47
4.10แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์.....	47
4.11แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์.....	50
4.12แสดงผลของเวลาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์.....	50
4.13แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และความดัน 5 บาร์.....	51
4.14แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-50.1 เปอร์เซ็นต์.....	51
4.15แสดง Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิ ไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	52

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
4.16แสดง Normal Probability Plot ของร้อยละแก๊ส โซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการ แตกตัวพอลิซิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์.....	54
4.17แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา เหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์.....	56
4.18แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์.....	56
4.19แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์.....	58
4.20แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์.....	58
4.21แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ต่อร้อยละผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ความดัน 5 บาร์.....	60
4.22แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ต่อการกระจายตัวของสัดส่วน ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ความดัน 5 บาร์.....	60
4.23แสดงผลของความดันต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์.....	61
4.24แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์.....	62
4.25แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์.....	64
4.26แสดงผลของเวลาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศา เซลเซียสตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์และความดัน 5 บาร์.....	64
4.27แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ต่อการกระจายตัวสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และความดัน 5 บาร์.....	65
4.28แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์.....	65
4.29Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิซิสไตรีน ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	66

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
4.30 แสดง Normal Probability Plot ของร้อยละแก๊ส โซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการ แตกตัวพอลิซิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃	68
4.31 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่เวลา 180 นาที ตัวเร่ง ปฏิกิริยา CoMo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์.....	70
4.32 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์.....	70
4.33 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์.....	71
4.34 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์....	72
4.35 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความดัน 5 บาร์.....	73
4.36 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ ต่อการกระจายตัวของสัดส่วน ผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความดัน 5 บาร์.....	74
4.37 แสดงผลของความดันต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์.....	75
4.38 แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์.....	75
4.39 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์.....	78
4.40 แสดงผลของเวลาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส อุณหภูมิ 370 องศา ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์.....	78
4.41 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และความดัน 5 บาร์.....	79
4.42 แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al ₂ O ₃ 5 เปอร์เซ็นต์.....	79
๗1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิซิสไตรีน ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5.....	104

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
ค1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี....	106
ค2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน(%off) กับจุดเดือดของสารจากโปรแกรม Simulated Distillation.....	106



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกำจัดพลาสติกที่ใช้แล้วนั้นเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทั่วโลกให้ความสำคัญมาก จากรูปที่ 1.1 พลาสติกที่ใช้แล้วทั่วโลกมีปริมาณถึง 9.9% เนื่องจากพลาสติกนั้นไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ พลาสติกสามารถสลายตัวเองได้แต่ต้องใช้เวลานานมาก อีกทั้งได้มีการเติมสารเติมแต่ง โดยเฉพาะสารที่ทำให้พลาสติกเสถียรที่ผสมระหว่างการผลิตพลาสติกก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ย่อยสลายยาก การนำขยะพลาสติกมาฝังกลบจึงไม่เหมาะสมและการฝังกลบนั้นต้องการพื้นที่ค่อนข้างมากอีกด้วย การเผาทิ้งก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ ดังนั้นการรีไซเคิลจึงนับว่าเป็นวิธีที่จะสามารถกำจัดปัญหาดังกล่าว อีกทั้งยังประหยัดค่าใช้จ่ายและลดปริมาณพลาสติกที่ใช้แล้วได้



รูปที่ 1.1 แสดงร้อยละปริมาณขยะแข็งชนิดต่างๆและร้อยละพลาสติกใช้แล้วชนิดต่างๆ^[1]

ปัจจุบันมีวิธีการรีไซเคิลพลาสติกที่ใช้แล้ว กรณีของพอลิโพรพิลีนได้มีการนำไปหลอมแล้วขึ้นรูปใหม่หรือแปรรูปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ^[2] โดยพลังงานหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปรรูปก็ยังสามารถนำมาใช้ได้ เช่น เอทิลเบนซีนและโทลูอีน ซึ่งสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงหรือวัตถุดิบในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อีกทั้งยังอาจนำมาเป็นตัวทำละลายหรือสารเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันก๊าดโซลีนได้อีกทางหนึ่ง เป็นการลดปริมาณการนำเข้าสารเคมีดังกล่าวจากต่างประเทศ สำหรับวิธีนี้พลาสติกที่ใช้แล้วจะถูกแปรรูปโดยใช้ความร้อน

(Thermal degradation) หรือใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic degradation) ให้เป็นก๊าซหรือน้ำมันซึ่งสามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงหรือสารเคมี อย่างไรก็ตามการแปรสภาพด้วยความร้อนของพอลิโอฟีนจำนวนมากจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมในช่วงกว้างมากทางตรงกันข้ามหากใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันนั่นคือการกระจายของคาร์บอนอะตอมจะแคบลง

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่นับวันประชากรนำมาใช้มากขึ้นโดยนำไปผลิตเป็นสิ่งของเครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน ดังจะเห็นได้จากบรรจุภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาชนะบรรจุอาหารจากร้านอาหารและโรงเรียน กล่องโฟม และแก้วน้ำ ดังนั้นปริมาณการผลิตพอลิสไตรีนของทั่วโลกจึงมีปริมาณมาก ผลเสียที่ตามมาของการใช้ผลิตภัณฑ์จากพอลิสไตรีนจำนวนมากนี้คือ ขาดต่อการกำจัดหรือทำลาย หากเผาทิ้งก็จะทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่การถมทิ้งก็มีข้อเสียอันเกิดจากการไม่ย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิสไตรีน และการขาดแคลนพื้นที่สำหรับถมทิ้ง การนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิลจึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการกำจัดพอลิสไตรีนที่ใช้แล้วเพื่อแปรสภาพไปเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะนำพอลิสไตรีนที่ใช้แล้วกลับมาแปรสภาพให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงหรือ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เช่น เอทิลเบนซีนและโทลูอิน เป็นต้น ซึ่งสามารถเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบที่สำคัญในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี หรือนำมาใช้เป็นตัวทำละลาย อีกทั้งยังนำมาเป็นสารเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันก๊าซโซลีนได้อีกวิธีหนึ่ง เป็นการลดการนำเข้าสารเคมีดังกล่าวจากต่างประเทศ โดยภายในงานวิจัยจะทำการหาตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการแปรสภาพพอลิสไตรีนที่ผ่านการใช้แล้ว อาทิ กล่องโฟมชนิดต่างๆ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการเปลี่ยนพอลิสไตรีนที่ใช้แล้วให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่า
2. เปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ในการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้ว
3. หาภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 ชนิด คือ เหล็กบนถ่านกัมมันต์ซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 และ Co-Mo/Al₂O₃ ต่อการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ ความดัน เวลาในการทำปฏิกิริยา และอัตราส่วนของพอลิสไตรีนต่อตัวเร่งปฏิกิริยา

จากนั้นจะนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอนต่าง ๆ ด้วยเทคนิค Gas Chromatography ต่อไป

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ภาวะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนพอลิสไตรีนใช้แล้วให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ อาทิ น้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารเคมีต่างๆ เช่น เอทิลเบนซีน โทลูอิน เป็นต้น
2. เป็นแนวทางในการขยายส่วนเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะช่วยให้ช่วยลดปริมาณขยะพลาสติกได้ในอนาคต

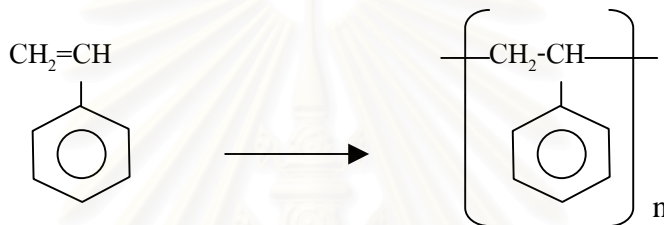
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิสไตรีน (Polystyrene)

พอลิสไตรีนเป็นเทอร์โมพลาสติก ที่มีการนำไปใช้อย่างหลากหลายเนื่องจากพอลิสไตรีนนั้น มีราคาถูก และง่ายต่อการขึ้นรูป อ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและกลับสู่สภาพเดิมเมื่อเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนเป็นพอลิสไตรีน แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนเป็นพอลิสไตรีน^[3]

2.1.1 สมบัติของพอลิสไตรีน

พอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแบบอสัณฐาน เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนโมโนเมอร์ ผลึกพอลิสไตรีนจะมีลักษณะใส ไม่มีสี มีความตึงแข็งสูง (high stiffness) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี น้ำไม่ซึมผ่าน ทนต่อกรดอ่อนแต่ไม่สามารถทนทานต่อกรดซัลฟูริกเข้มข้น และตัวออกซิไดซ์ที่แข็งแรง เช่น กรดไนตริก น้ำคลอรีน น้ำโบรมีน และสารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรต์ สามารถบวมตัวในสารละลายอินทรีย์ โดยพอลิสไตรีนมีสมบัติต่างๆ ดังนี้^[4,5]

ความหนาแน่น (Density)	0.0376-0.0387	lb/in ³
ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)	1.05	g/cm ³
ความทนแรงดึง (Tensile strength)	7000	psi
ความยืดหยุ่น (Flexural strength)	12,000	psi
ดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow index)	1.2-28	g/10 min
จุดเริ่มอ่อนตัว (Vicat softening)	110	°C
จุดเริ่มการแตกตัว (Degradation point)	> 300	°C
มวลโมเลกุลเฉลี่ย (Mw)	200,000 – 300,000	

พอลิสไตรีนเป็นสารที่โมเลกุลใหญ่ เกิดจากสไตรีนโมโนเมอร์ประมาณ 2000-3000 หน่วย มาต่อกันโดยทั่วไปพอลิสไตรีนที่ใช้ในทางการค้าแบ่งเป็น 3 แบบ คือ แบบไหลง่าย (easy-flow) แบบไหลปานกลาง (intermediate-flow) และ แบบใช้ความร้อนสูง (high heat) โดยสมบัติทางกายภาพขึ้นกับมวลโมเลกุล การแจกแจงมวลโมเลกุล (molecular weight distribution) และการเติมสารเติมแต่ง

แบบไหลง่าย (Easy-flow) เป็นเรซินที่มีมวลโมเลกุลต่ำที่สุด มีการเติมน้ำมันลงไป 3-4 % เพื่อช่วยลดความหนืด (melt viscosity) และเพิ่มดัชนีการไหล (melt flow rates > 20 g/10 min ที่ 392 °C) โดยเมื่อความหนืดลดลงจะทำให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น ส่วนใหญ่จะใช้การขึ้นรูปแบบฉีด (injection molding)

แบบไหลปานกลาง (Intermediate-flow) จะมีการเติมน้ำมันธรรมชาติลงไป 1-2 % ซึ่งจะทำให้พอลิสไตรีนประเภทนี้มีลักษณะการไหลและสมบัติทางกายภาพอยู่ระหว่างแบบไหลง่ายและแบบใช้ความร้อนสูง

แบบใช้ความร้อนสูง (High-heat) เป็นพอลิสไตรีนที่มีมวลโมเลกุลสูงมากและประกอบด้วยสารเติมแต่งน้อยที่สุด ไม่มีการเติมน้ำมัน หรือสารเพิ่มการไหล ต้องใช้ความร้อนสูงในการขึ้นรูป อาจมีการเติมสารประเภท กรดสเตียริก ช่วยในการทำให้หลุดจากแม่พิมพ์ได้ง่าย ซึ่งพอลิสไตรีนประเภทนี้จะสามารถทนต่อความร้อนได้สูงและสามารถแตกได้ง่ายกว่าพอลิสไตรีนประเภทอื่น

2.1.2 การประยุกต์ใช้พอลิสไตรีน^[4]

ผลิตภัณฑ์คริสตัลพอลิสไตรีน มีลักษณะโปร่งใสสามารถนำมาฉีดใส่แบบพิมพ์ (mold) หรือนำมาขึ้นรูป โดยพอลิสไตรีนที่นำมาฉีดใส่แบบพิมพ์จะนำไปใช้ในการทำเครื่องเสียง เทปคาสเซต กล้องใสแผ่นดิสก์ เครื่องใช้ในสำนักงาน เครื่องใช้ในบ้าน ของเล่น เป็นต้น

ผลิตภัณฑ์อิมแพคเกรดพอลิสไตรีน (impact polystyrene) มีลักษณะทึบแสงแต่มีค่าทนต่อแรงกระแทก (impact strengths) สูงกว่า เมื่อเทียบกับคริสตัลพอลิสไตรีน โดยจะมีการเติมยางเพื่อเพิ่มค่าทนแรงกระแทกและค่าการยืดตัว แต่จะทำให้ความใสและความตึง (stiffness) ลดลง อิมแพคและคริสตัลพอลิสไตรีนจะเสื่อมสลายลงอย่างรวดเร็วเมื่อโดนแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้งานกลางแจ้งถ้าไม่ได้เติมสารเติมแต่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันแสง

อิมแพคพอลิสไตรีนสามารถนำมาฉีดใส่แบบพิมพ์เพื่อทำเป็น ชั้นวางเครื่องเสียง เครื่องใช้ภายในบ้าน เทปวีดีโอ เฟอร์นิเจอร์ และสามารถนำมาขึ้นรูป เพื่อใช้ทำกระเป๋าเดินทาง ที่บรรจุประตูดูเขียน ภาชนะใส่อาหาร เป็นต้น

แผ่นพอลิสไตรีนประเภท extruded non-foam จะถูกนำมาใช้เป็นสารเคลือบเงากระจกและแผงควบคุม พอลิสไตรีนประเภทนี้อาจอยู่ในรูปฟิล์มหรือแผ่นจะนำมาใช้ในการบรรจุอาหาร เช่น ถาดคุกกี้ แผ่นฟิล์มถนอมอาหาร แผ่นกันกระแทก เป็นต้น

พอลิสไตรีนอีกชนิดที่นำมาทำเป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดนั่นคือ โฟม : PS foam เกิดจากการนำเม็ดพอลิสไตรีนเรซินผ่านการเป่าให้ขยายตัว ในโครงสร้างของโฟมนั้นจะมีสีขาวธรรมชาติ โดยพีเอสโฟมแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1. *Expandable Polystyrene* หรือ EPS ที่ใช้บรรจุสินค้ามีค่าต่างๆ เช่น โทรทัศน์ ตู้เย็น เครื่องใช้ไฟฟ้า หมวกกันน็อก โฟมกล่องน้ำแข็ง โฟมแผ่น และโฟมก้อนที่ใช้ทำถนน เป็นต้น
2. *Polystyrene Paper* หรือ PSP หรือที่เรียกว่า Polystyrene/XPS ใช้สำหรับทำถาดหรือกล่องโฟมบรรจุอาหาร เป็นต้น

2.2 ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิส (Catalysis reaction) ^[6,7]

ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่นำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้เพื่อให้ปฏิกิริยาสามารถดำเนินไปได้รวดเร็วขึ้น โดยมีกลไกที่ปลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้มีหน้าที่ปลดพลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา โดยไม่ทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้น หรือไปรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา นั่นคือตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา เมื่อพิจารณาถึงค่าคงที่ของสมดุลของปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจะต้องไม่ทำให้ค่าคงที่ของสมดุลเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้อัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาไปข้างหน้า และอัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีแล้วเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้ตัวเร่งปฏิกิริยา กลับมาเท่ากับปริมาณที่ใช้เริ่มต้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาพ แต่ในทางปฏิบัติตัวเร่งปฏิกิริยาอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือองค์ประกอบได้ เช่น การเปลี่ยนอัตราส่วนของออกซิเจนต่อโลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะออกไซด์บางชนิดที่อุณหภูมิสูง หรือการสัมผัสของสารตั้งต้นในระหว่างการทำปฏิกิริยา โดยสามารถแบ่งปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสจากเฟสของตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้นได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.2.1 ปฏิกิริยาอะคะตะไลซิสแบบเอกพันธ์ (Homogeneous Catalysis reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ในสถานะเดียวกัน หรือ รวมเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.2.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นก๊าซ เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการออกซิเดชันของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

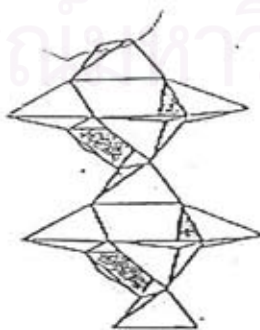
2.2.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของเหลว เช่น การใช้กรดและเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการเปลี่ยนโครงสร้างของสารละลายน้ำตาลกลูโคส เป็นต้น

2.2.2 ปฏิกิริยาอะตอมไฮโดรเจนแบบวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous Catalysis Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นอยู่ต่างสถานะ หรือไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยส่วนมากตัวเร่งปฏิกิริยาจะเป็นของแข็ง ในขณะที่สารตั้งต้นเป็นก๊าซ หรือของเหลว หรือก๊าซรวมอยู่กับของเหลว ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีสมบัติทางเคมีของผิวที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอะตอมไฮโดรเจน โดยการเกิดปฏิกิริยาจะเกิดเฉพาะที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาและมักจะเป็นปฏิกิริยาการดูดซับ และไม่เกิดปฏิกิริยาทะลุเข้าไปถึงเนื้อในของของแข็งที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวรองรับ (supporter) อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาที่สัมผัสกับสารตั้งต้นและความเข้มข้นของโมเลกุลที่ดูดซับบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.2.3 ปฏิกิริยาอะตอมไฮโดรเจนแบบเอนไซม์ (Enzyme Catalysis Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งเอนไซม์เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีโมเลกุลใหญ่ โดยมีความเกี่ยวข้องกับวิถีของการดำเนินปฏิกิริยาชีวเคมี และอยู่ก้ำกึ่งระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์

2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite) ^[8,29]

ซีโอไลต์เป็นสารที่มีความเป็นผลึก มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นระเบียบ เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตของธาตุแอลคาไลหรือแอลคาไลน์เอิร์ท โดยธาตุที่พบมากที่สุดได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเชียม (Sr) และแบเรียม (Ba) ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นตาข่าย (framework structure) 3 มิติ มีรูปร่างและขนาดโพรงแตกต่างกันตามชนิดของซีโอไลต์ โครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการต่อกันของโครงสร้างเตตระฮีดรอนของซิลิกอนเตตระออกไซด์ (SiO_4)⁴⁻ และอะลูมิเนียมเตตระออกไซด์ (AlO_4)⁵⁻ โดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแต่ละหน่วยแทนหน่วยของเตตระฮีดรอน เส้นที่เชื่อมจุดตัดไม่ใช่พันธะเคมีแต่เป็นการแสดงระยะห่างระหว่างศูนย์กลางหน่วยเตตระฮีดรอน



รูปที่ 2.2 การต่อหน่วยเตตระฮีดรอนในโครงสร้างซีโอไลต์ ^[8]

ซึ่งระยะห่างนี้ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นรูพรุน มีโพรงและช่องว่างที่มีรูปแบบที่แน่นอน โดยขนาดของช่องเปิดของโครงผลึกขึ้นอยู่กับจำนวนออกซิเจนในวงแหวน (ring) ที่ต่อกันเป็นทรงสี่หน้า ซึ่งอาจมีจำนวนอะตอมออกซิเจนเป็น 6, 8, 10 และ 12 ในวงแหวน และในบางกรณีโพรงภายในอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่ารูทางเข้าหรืออาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอจนตลอดคล้ายท่อ (tube) สำหรับซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นผลึกที่สมบูรณ์ (ideal crystal) จะมีลักษณะโครงสร้างของรูพรุนที่เป็นระเบียบและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูต่ำสุด (aperture) ประมาณ 0.3-1.0 นาโนเมตร โดยขนาดของผลึกดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์ จำนวนแคตไอออนที่มีอยู่ และวิธีการปรับสภาพ เช่น การเผาโดยใช้ความร้อน (calcination) การชะด้วยของไหล (leaching) และการปรับสภาพทางเคมีต่างๆ

สำหรับโครงสร้างของซีโอไลต์ มีลักษณะเป็นโครงผลึกที่ประกอบด้วย ออกซิเจน อะลูมิเนียม และซิลิกอนในลักษณะโครงร่างตาข่ายสามมิตินั้น สามารถแสดงได้ด้วยสูตรทางเคมีอย่างง่าย (empirical formula) คือ



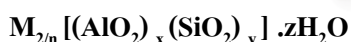
เมื่อ M คือ แคตไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน

n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้น ทั้งในขณะทำการสังเคราะห์หรือภายหลังการสังเคราะห์ซีโอไลต์

x คือ จำนวนโมลของ (SiO_2) โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างภายใน โครงสร้างซีโอไลต์

สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์ คือ



เมื่อ n คือ ประจุหรือเลขออกซิเดชันของแคตไอออน M

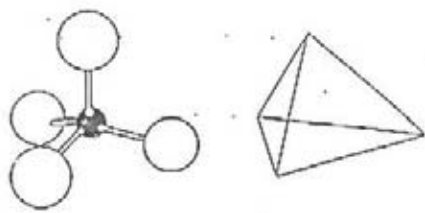
z คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างภายใน โครงสร้างซีโอไลต์

x+y คือ จำนวนรูปทรงสี่หน้าทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x มักมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง

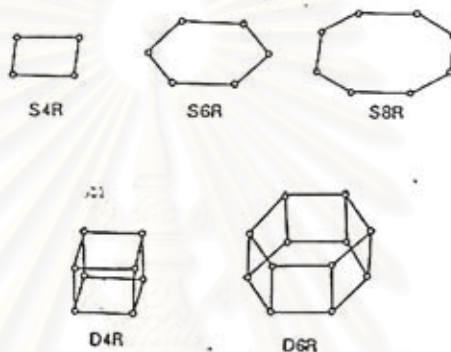
2.3.1 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง^[8,32]

1. หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (primary building units) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุด มีรูปร่างเป็นเตตระฮีดรอนของซิลิกอนเตตระออกไซด์ $(SiO_4)^4-$ หรืออะลูมิเนียมเตตระออกไซด์ $(AlO_4)^5-$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



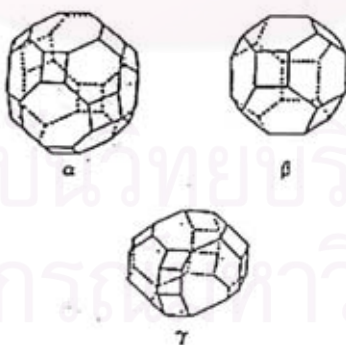
รูปที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซิลิกา^[8]

2. หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary building units) เป็นหน่วยที่เกิดจากการต่อกันของโครงสร้างปฐมภูมิให้เป็นรูปทรงที่มีเหลี่ยมต่างๆ ดังรูปที่ 2.4



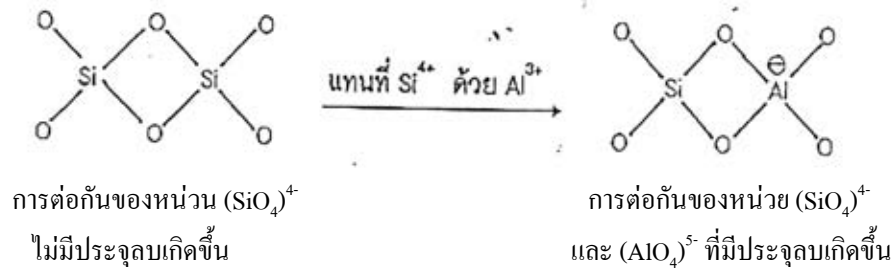
รูปที่ 2.4 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซิลิกา^[8]

3. หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (polyhedral units) เกิดจากการต่อกันของโครงสร้างปฐมภูมิให้เป็นรูปทรงสมมาตร ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงภายในโครงสร้างซิลิกา ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซิลิกา^[8]

เมื่อพิจารณาหน่วยปฐมภูมิตระฮีดรอน พบว่าถ้าทุกหน่วยเป็น $(\text{SiO}_4)^{4-}$ สูตรอย่างง่ายของสารนี้คือ SiO_2 นั่นเอง ซึ่งมีสภาพประจุเป็นกลาง แต่ถ้าแทนที่ $(\text{SiO}_4)^{4-}$ ด้วย $(\text{AlO}_4)^{5-}$ จะได้สูตรอย่างง่ายเป็น $(\text{AlO}_2)^{-}$ ดังนั้นจึงมีประจุลบสำหรับทุกหน่วยของ $(\text{AlO}_2)^{-}$ หรือ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ แสดงดังรูป 2.6



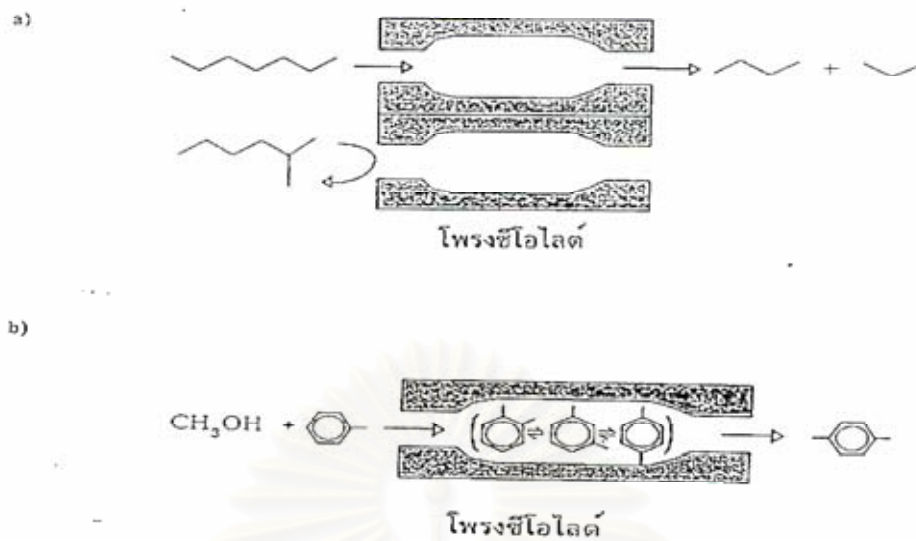
รูปที่ 2.6 ประจุในโครงสร้างตาข่ายซีโอไลต์^[8]

ตำแหน่งประจุลบที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณรอบ $(\text{AlO}_2)^-$ หรือ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ ซึ่งเป็นที่อยู่ของแคตไอออน โดยยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงคูลอมบิก (coulombic force) เพื่อให้เกิดสมดุลทางประจุ ดังนั้นจำนวนแคตไอออนที่พบในซีโอไลต์จะขึ้นกับจำนวนของหน่วย $(\text{AlO}_4)^{5-}$ ดังนั้นซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนได้

แคตไอออนและโมเลกุลของน้ำเป็นส่วนที่อยู่นอกโครงสร้างตาข่ายของซีโอไลต์ โดยปกติการแลกเปลี่ยนแคตไอออน หรือการกำจัดน้ำออกจากซีโอไลต์จะไม่ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังสามารถดูดซับโมเลกุลชนิดต่างๆ ที่มีขนาดเล็กกว่าปากโพรงนั้นๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลที่มีขั้ว (polar molecule) ภายในโครงสร้างซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงขนาดต่างๆ กัน มีทางให้โมเลกุลของสารอื่นผ่านเข้าออกได้เรียกว่า ปากโพรง (aperture) โมเลกุลที่มีรูปร่างพอเหมาะกับโพรงและปากโพรงเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าหรือออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีความเลือกจำเพาะต่อขนาดและรูปร่าง (shape and size selectivity) ของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกโพรง ดังรูปที่ 2.7 นอกเหนือจากความสามารถในการแยกโมเลกุลได้ (molecular sieve) ตามปกติของสารที่มีรูพรุนทั่วไป

นอกจากนี้ซีโอไลต์บางชนิดยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่น ซีโอไลต์ ZSM-5 และ HY ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแตกตัวของน้ำมัน ซึ่งเป็นขั้นตอนการทำให้ความยาวของสายโซ่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสั้นลง ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 a) การเร่งปฏิกิริยาโดยการคัดเลือกขนาดของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาในโพรงซีโอไลต์
b) การคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในโพรงซีโอไลต์^[8]

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งซีโอไลต์ได้ตามลักษณะ โครงสร้างแบบโครงตาข่ายได้ 9 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. Analcite group: โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring และมี 2 รูปแบบ คือ analcite และ laumontite
2. Natrolite group: โครงสร้างมีลักษณะต่อกันเป็นสายโซ่ของ 4-ring units จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกันมี 3 รูปแบบ คือ natrolite, edingtonite และ thomsonite ซึ่งถ้ามองในลักษณะสองมิติแล้วโครงสร้างทั้งสามรูปแบบจะเป็น 8-ring channel system
3. Chabazite group: โครงสร้างประกอบด้วย 6-ring ต่อขนานกัน ซึ่งการเชื่อมต่อกันมีมากมายหลายรูปแบบ เช่น offretite และ erionite
4. Phillipsite group: โครงสร้างประกอบด้วย 4-ring ที่ต่อขนานกันแบบ U (Up) และ D (Down) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ได้แก่ phillipsite และ gismindite ประกอบด้วยการเชื่อมโยงของสายโซ่ UDD ในขณะที่ Li-A (BW) และ yugawaralite จะมีการเชื่อมต่อกันด้วย single 4-ring
5. Heulandite group: โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring จำนวน 4 วง และ 4-ring จำนวน 2 วง ซึ่งเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่มเชื่อมต่อกัน โดยรูปแบบพันธะที่เชื่อมโยงกันนี้จะทำให้ได้แบบ brewsterite และการเชื่อมต่อกันของบล็อกในแนวตั้งโดยผ่าน โครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้ได้โครงสร้างซึ่งส่วนประกอบของ heulandite และ stibnite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีลักษณะเป็น 5-ring ในบางส่วน

6. Mordenite group: หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ จะประกอบด้วย 5-ring จำนวน 4 วง เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ซึ่งมีรูปแบบทั้งหมด 7 แบบ คือ mordenite, epstibite, bikitatite, dachiardite ZSM-5 และ ZSM-11

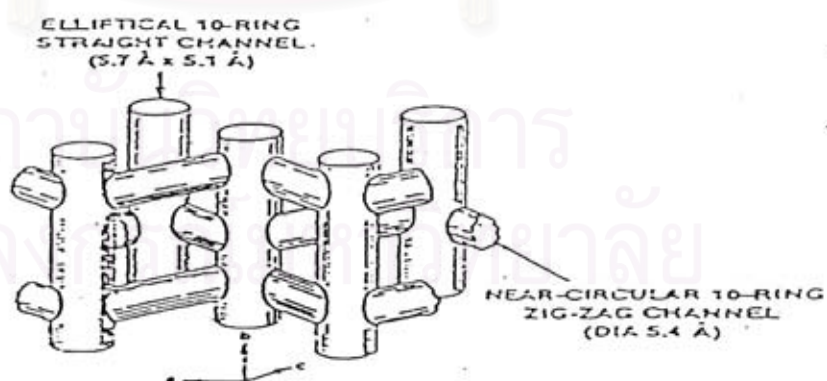
7. Faujasite group: ซีโอไลต์กลุ่มนี้ แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ sodalite, A และ ZK-5

8. Melanophlogite group: โครงข่ายประกอบด้วย interwoven layer 12 และ 14-hedron โดยโครงสร้างจะมีลักษณะหนาแน่นและมีชั้นผิวหน้าเป็น 12-hedron และช่องเปิดในโครงสร้างจะมีจำกัดเพียง 5 และ 6 ring เท่านั้น กลุ่มนี้ประกอบไปด้วย ZEM-39 และ melanophlogite

9. Lovdarite group: โครงข่ายประกอบด้วย 4-ring และ 8-ring เชื่อมผ่านมุมของ sharing 3-ring ซึ่งเป็นระบบที่ช่อง intersection 2 มิติ เชื่อมต่อกัน โดย 9-ring

2.3.2 ZSM-5

ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่นิยมใช้มากที่สุดตัวหนึ่ง มักใช้สำหรับการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่ประกอบด้วยอัตราส่วนระหว่าง silica ต่อ alumina สูง การแทนที่ของอะลูมิเนียมไอออน (charge 3+) สำหรับซิลิกอนไอออน (charge 4+) ซึ่งจำเป็นต้องรับโปรตอนเพิ่ม การเพิ่มเข้าไปของโปรตอนนั้นจะทำให้ซีโอไลต์มีระดับความเป็นกรดสูงขึ้น ZSM-5 นั้นมีความเป็นรูพรุนสูงรวมทั้งมีโครงสร้างของรูพรุนในลักษณะจุดตัดใน 2 มิติ ZSM-5 มีรูพรุน 2 ชนิด ซึ่งทั้ง 2 ชนิดจะมีรูปแบบเป็นวงแหวนที่มีออกซิเจน 10 ตัว รูพรุนชนิดแรกพื้นที่หน้าตัดมีลักษณะเป็นรูปไข่และเรียบ ในส่วนที่สองนั้นพื้นที่หน้าตัดเป็นรูวงกลม จะมีลักษณะแบบซิกแซก (zig-zag pattern) (ดังรูป 2.8)



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะโครงสร้างของ ZSM-5^[8]

2.3.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์^[8,9]

ซีโอไลต์มีทั้งที่พบได้ตามธรรมชาติ (natural zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น (synthesis zeolite) ซึ่งซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาตินั้นมีอย่างน้อย 40 ชนิด ส่วนที่สังเคราะห์พบว่ามีมากกว่า 150 ชนิด โดยแต่ละชนิดมีโครงสร้างแตกต่างกันออกไป

ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซีโอไลต์ชนิดนี้เป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของมอนอหรือไดวาเลนต์เบส (mono or divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำในผลึกบ้างบางส่วนหรือทั้งหมดโดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างซีโอไลต์จากธรรมชาติได้แก่ faujasite, erionite, offretite, chabasite, gmelinite, mordenite และ heulandite เป็นต้น เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตาม hydrological system ได้ดังนี้ คือ

- Saline, Alkaline Lakes แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ arid region และ semiarid region การตกตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ close ring และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการควบคุม lake chemistry
- Saline, Alkaline soils ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ใน Saline, Alkaline soils การก่อตัวใน arid region และ semiarid region เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวดินที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไคคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดิน แล้วจะละลายโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไคคาร์บอเนต ทำให้มีค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น และทำให้เกิดอะลูมิโนซิลิเกตในพื้นดินขึ้น
- Marine sediment ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำและค่าความเป็นกรดต่างที่เป็นกลาง
- Open Hydrologic systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับเถ้าที่มีคุณสมบัติเหมือนแก้ว (vitric ash)
- Hydrothermal systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีแอลคาไลกับสารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หินและลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ตื้นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite
- Burial diagenetic systems ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ

- Magmatic systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนีและอาจพบบ้างใน imertitial และ globules

ในด้านการใช้งานนั้นมีการใช้งานซีโอไลต์ที่สังเคราะห์มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ เนื่องจากมีองค์ประกอบสม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอนและมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง โดยซีโอไลต์สังเคราะห์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโซเดียม และแทนที่ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนกับแคตไอออน เช่น แอมโมเนียม (NH_4^+) หรือไอออนของไฮโดรเจน การสังเคราะห์โดยทั่วไปจะใช้วิธี hydrothermal treatment และวิธีสังเคราะห์ซีลิเกต สารตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ได้มาจาก 2 แหล่งด้วยกัน คือ แหล่งของอะลูมิเนียม เช่น โซเดียมอะลูมิเนต (sodiumaluminate) หรืออะลูมิเนียมซัลเฟต (aluminiumsulfate) และแหล่งซิลิกา (SiO_2) เช่น silicon sol, fumed-silica หรือ sodium waterglass เมื่อเติมสารแอลคาไลน์เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารประกอบ quaternary ammonium จะทำให้ได้เจลเกิดขึ้นในช่วง 200 องศาเซลเซียสหรืออาจสูงกว่าและความดันเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว ที่มีอยู่ขณะนั้น โดยภายใต้ภาวะดังกล่าวนี้ ซีโอไลต์ยังไม่เสถียรและมีแนวโน้มที่จะเกิดโพรงกว้าง และมีการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้น เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและการเกิดนิวเคลียส จะทำให้ได้ผลึกที่ต้องการ ภายหลังจากการสังเคราะห์ ซีโอไลต์ที่ได้จะถูกนำไปอบและให้ความร้อนเพื่อกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากผลึก จากนั้นนำไปเผาในอากาศเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ออก ซึ่งทำให้ได้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ทั้งนี้ซีโอไลต์แต่ละชนิดที่ได้จะมีลักษณะแตกต่างกัน องค์ประกอบหลักที่ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติแตกต่างกันคือ อัตราส่วนระหว่าง Si/Al ซึ่งมีผลต่อค่าความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาและเสถียรภาพของโครงสร้าง โดยทั่วไปอัตราส่วนระหว่าง Si/Al ในซีโอไลต์ที่เตรียมได้ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 1 และไม่มีพันธะ Al-O-Al เนื่องจากการใช้กรดทำให้ Al_2O_3 ถูกกำจัดออกไป เช่น mordenite ซึ่งมีอัตราส่วนของ Si/Al ประมาณ 10 โดยซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วน Si/Al สูงขึ้นจะมีผลทำให้โครงสร้างเสถียรมากขึ้นด้วย

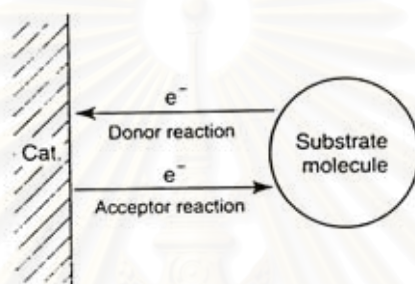
2.3.4 ประโยชน์ของซีโอไลต์

1. ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (Alkylation) และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) เป็นต้น
2. สารดูดซับ (Sorption agent) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
3. สารลดความกระด้าง (Water softener)
4. สารแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin)

5. ส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (capacity) และจลนพลศาสตร์สูง (kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วย

2.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ (Metal Catalyst) ^[7,10,11,37]

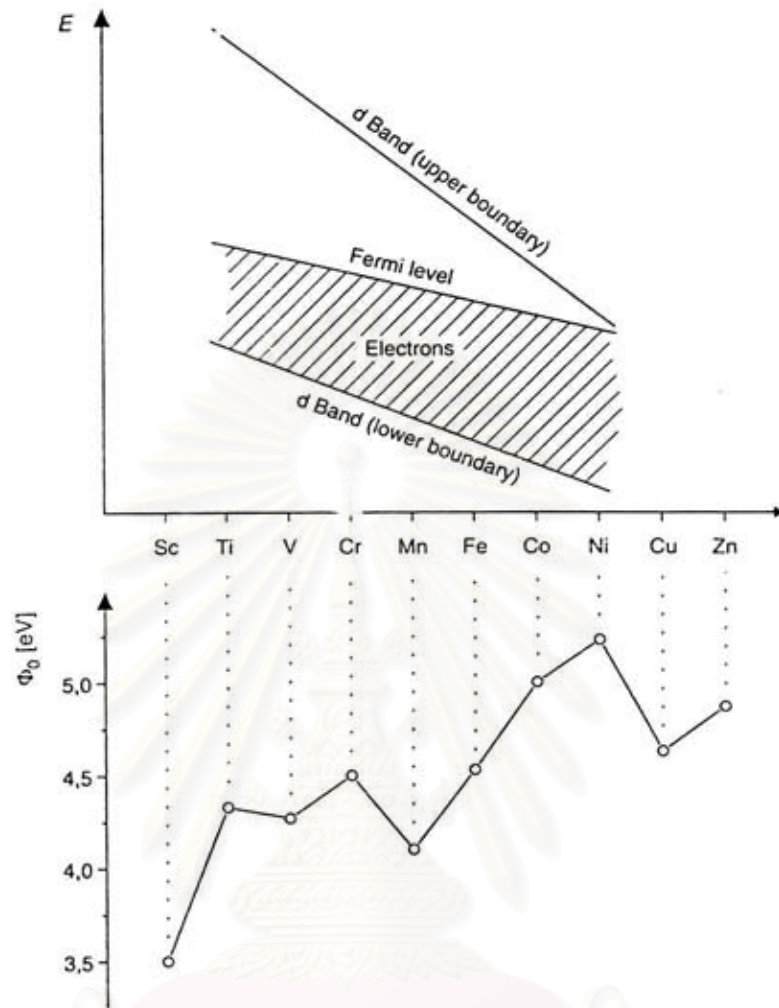
ลักษณะของโลหะและโลหะผสม สามารถวิเคราะห์ได้จากคุณสมบัติและพฤติกรรมของตัวเร่งปฏิกิริยา สภาพโลหะนั้นสามารถอธิบายโดยแบบจำลองอย่างง่ายหรือทฤษฎีโครงสร้างวาเลนซ์ของเพาลี้ง (Pauling valence structure theory)



รูปที่ 2.9 แสดงการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยากับสารตั้งต้น ^[10]

ในโลหะนั้นวาเลนซ์เชลล์ (valence shell) จะอยู่ในชั้น s หรือ d ธาตุกลุ่มหลักจะประกอบด้วยชั้น s ซึ่งเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (electron donors) และมีรูปแบบเป็น strong bonds จากตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptors) อาทิเช่น ซัลเฟอร์ หรือ ออกซิเจน โดยจะเสถียรเมื่ออยู่ในรูปของซัลไฟด์และออกไซด์ โลหะเหล่านี้จะไม่เสถียรเมื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามโลหะทรานซิชัน (transition metals) นั้นจะประกอบด้วยชั้น d ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีเยี่ยม เป็นที่น่าสังเกตว่าทั้งปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันและปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์บนธาตุที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนใน d-block

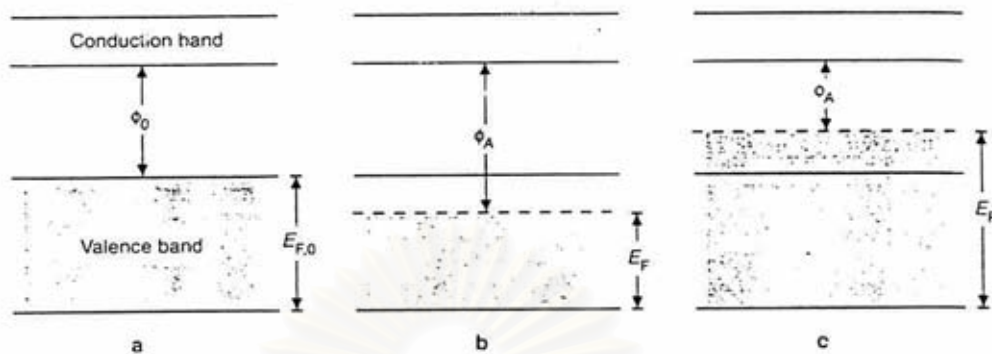
โครงสร้างอิเล็กตรอนของโลหะทรานซิชัน ดูได้จากแบบจำลองการจัดเรียงอิเล็กตรอน (band model) โดยแบบจำลองนี้แสดงแหล่งสะสมของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน (electron holes) ในรูปที่ 2.10 ในแถวของตารางธาตุ โลหะทางซ้ายจะมีอิเล็กตรอนในชั้น d น้อยกว่าทางขวา ซึ่งมีชั้นพลังงาน 2 ส่วน นั่นคือ ชั้น valence หรือชั้นนอก และชั้น conduction (d-orbitals) ซึ่งเป็นชั้นที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้หรือ position holes พลังงานศักย์ของอิเล็กตรอนสามารถแสดงได้ด้วย Fermi level ซึ่งสอดคล้องกับค่าพลังงานศักย์ไฟฟ้าเคมี (electrochemical potential) ของอิเล็กตรอนและหลุมอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.10 ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น 3 d และ work function (Φ_0) ของโลหะทรานซิชันในช่วงที่สี่^[10]

ตำแหน่งของ Fermi level แสดงถึงจำนวนความหนาแน่นของอิเล็กตรอน พลังงานสำหรับการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากชั้นนอกของ Fermi level ไปยังบริเวณสุญญากาศแสดงในรูปของ work function Φ_0 (ดังรูป 2.11 a) จากรูป 2.10 จะเห็นว่า Ni และ Co นั้น สามารถรับและถ่ายเทอิเล็กตรอนจากตัวถูกดูดซึมได้ดีเนื่องจากมีพลังงานการถ่ายเทอิเล็กตรอนค่อนข้างสูง (work function > 4.5 eV) ใน Fermi level ระดับต่ำๆ นั้นจะสามารถรับอิเล็กตรอนหรือเกิดพันธะที่แข็งแรงกับตัวถูกดูดซึมได้มากกว่าระดับสูง อธิบายได้จากการเปลี่ยนแปลงของระดับพลังงานใน Fermi level นั่นคือโลหะทรานซิชันหรือตัวรับอิเล็กตรอนนั้นจะเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากชั้น conduction ไปยังชั้น valence เป็นผลให้ Fermi level ตกลงไปถึงค่า E_F และมีค่า work function สูงขึ้น $\Phi_A > \Phi_0$ (ดังรูป 2.11 b)

จากนั้นสารถูกดูดซึมซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนไปยังชั้น conduction หรือ d orbitals ของโลหะทรานซิชัน ทำให้มีค่า work function ต่ำลงเป็น $\phi_A < \phi_0$ (ดังรูป 2.11 c)



รูปที่ 2.11 หน้าที่ตัวรับและตัวให้อิเล็กตรอนภายใน band model ^[10]

a) ไม่มีการดูดซึม b) ตัวรับอิเล็กตรอน c) ตัวให้อิเล็กตรอน

$E_{F,0}$ = Fermi level E_F = Fermi energy

โลหะทรานซิชันจะมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนในชั้น d orbitals ที่แคบ คุณสมบัติความแข็งแรงของตัวเร่งปฏิกิริยามีอิทธิพลมาจากการเข้ามาของอิเล็กตรอนภายในชั้น d นั้นเอง ความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างการเคลื่อนที่ของตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะทรานซิชันและสมบัติทางไฟฟ้าของชั้น d ที่ไม่ได้ถูกเติม แสดงได้จากแนวโน้มทั่วไปของอัตราการดูดซึมซึ่งเป็นไปในแนวเดียวกับแถวของโลหะทรานซิชัน โลหะทรานซิชันทางซ้ายมือมีการ binding ที่แข็งแรงมากกว่าขวามือ หรืออาจอธิบายได้จากทฤษฎีพันธะวาเลนซ์ของโลหะ คือ พันธะในโลหะทรานซิชันเกิดจากอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว (unpaired electron) ใน d orbitals การให้ของ d อิเล็กตรอนไปยังพันธะวาเลนซ์จะอยู่ในเทอมของเปอร์เซ็นต์ d character ของพันธะโลหะเพาลิง ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างระหว่าง d orbitals 3 ชนิดของโลหะทรานซิชัน นั่นคือ การเกิดพันธะ d orbitals เกี่ยวข้องกับพันธะโควาเลนต์ dsp hybrid ความเป็นโลหะ (อิสระ) ใน d orbital และอะตอมใน d orbitals

ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Dual function ^[12] นิยมใช้ในกระบวนการไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) ตัวเร่งปฏิกิริยานี้จะมีส่วนประกอบของส่วนที่ใช้แตกตัว (cracking sites) และส่วนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน/ดีไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation/dehydrogenation sites) ส่วนที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน/ดีไฮโดรจิเนชันนั้นมักจะเป็นโลหะทรานซิชัน อาทิเช่น โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) ทังสเตน (W) วานาเดียม (V) พาราเดียม (Pd) หรือธาตุ rare earth

2.4.1 การเตรียมและโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา dual function ^[13]

โลหะที่นิยมนำมาเป็นตัวเลือกในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา อาทิเช่น เหล็ก (Iron) โคบอลต์ (Cobalt) แพลททินัม (Platinum) นิกเกิล (Nickel) เป็นต้น เนื่องจากโลหะดังกล่าวมีคุณสมบัติเหมาะสมในการเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการ อีกทั้งมักจะไม่มีเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ อาทิเช่นปฏิกิริยาไฮโดรจิโนไลซิสของสารประกอบประเภทพาราฟิน (hydrogenolysis of parafins)

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท bifunctional มักจะใช้วิธีการนำสารละลายของเหล็กคลอไรด์ นิกเกิลคลอไรด์และโคบอลต์คลอไรด์ มาฝังตัว (impregnate) บนตัวรองรับ หลังจากนั้นนำไปอบให้แห้งแล้วนำไปเผา (calcine) ที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 450-600 °C

2.4.2 องค์ประกอบความเป็นโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยา ^[7]

องค์ประกอบความเป็นโลหะบนตัวเร่งปฏิกิริยานั้น สามารถทำให้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันหรือดีไฮโดรจิเนชันในความดันไฮโดรเจนได้ โคบอลต์และนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันและดีไฮโดรจิเนชัน จากตาราง 2.1 เปรียบเทียบ activity ของตัวเร่งปฏิกิริยาบางชนิดในปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของไซโคลเฮกเซน

ตาราง 2.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของไซโคลเฮกเซนเป็นเบนซีนบนตัวเร่งต่างๆ (อุณหภูมิ 427 องศาเซลเซียส ความดัน 7 บรรยากาศ) ^[14]

Catalyst	Dehydrogenation activity, moles benzene/g of catalyst x sec ⁻¹
34% Cr ₂ O ₃ on Al ₂ O ₃	0.5
10% Mo ₂ O ₃ on Al ₂ O ₃	3
5% Ni on Al ₂ O ₃	13
5% Co on Al ₂ O ₃	13
0.5% Fe on Al ₂ O ₃	190
1% Pd on Al ₂ O ₃	200
5% Ni on Al ₂ O ₃	320
1% Rh on Al ₂ O ₃	890
0.5% Pt on Al ₂ O ₃	1,400-4,000

2.4.3 องค์ประกอบความเป็นกรดบนตัวเร่งปฏิกิริยา

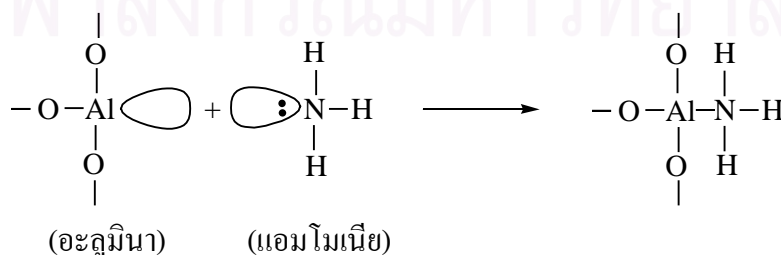
ตัวรองรับ (supporter) แสดงความเป็นกรดให้กับตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวรองรับที่นิยมใช้มีหลายชนิด อาทิเช่น อะลูมินา (alumina) ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

การเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยาคะตะไลซิส มีหลักการสำคัญที่ต้องทำให้อุณหภูมิของสารที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการทำให้พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยามากขึ้น หรือสัดส่วนของอะตอมบนผิวมีค่าได้มากที่สุด การใช้ตัวรองรับที่เหมาะสมและมีพื้นที่ผิวสูงจะช่วยให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไว ซึ่งในการเลือกใช้ตัวรองรับจะต้องคำนึงถึง^[30]

1. สมบัติเชิงกลของตัวรองรับ ที่ต้องสามารถทนต่อปฏิกิริยา แรงกด แรงเสียดสี ได้
2. มีเสถียรภาพภายใต้ภาวะของการทำปฏิกิริยา และภาวะของการนำกลับมาใช้ใหม่
3. พื้นที่ผิวสูง มีรูพรุนมาก และการกระจายของขนาดรูพรุนสม่ำเสมอ
4. เนื้อต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่ต้องการ
5. ราคาถูก

2.4.3.1 ตัวรองรับอะลูมินา (Alumina)^[15]

นิยมใช้เป็นตัวรองรับ โลหะในตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ dual-functional ซึ่งตามธรรมชาติจะแสดงลักษณะความเป็นกรด สมบัติความเป็นกรดนี้ทดสอบได้จากสมบัติการดูดซับสารที่เป็นด่าง อาทิเช่น แอมโมเนีย ไตรเมทิลลามีน และไพรีดีน โดยอะลูมิเนียมอะตอมจะเกิดพันธะร่วมไม่สมบูรณ์ อะลูมิเนียมไอออนจะเกิดพันธะกับออกซิเจนเพียง 3 อะตอมแทนที่จะเป็น 4 อะตอม อะลูมิเนียมอะตอมประกอบด้วย 6 วาเลนซ์อิเล็กตรอนซึ่งสูงสุดจะมีได้ถึง 8 วาเลนซ์อิเล็กตรอน แสดงความเป็น Lewis acid และสามารถรับคู่อิเล็กตรอนจากสารอื่น ได้สมบูรณ์และเสถียร ดังรูป 2.12 แอมโมเนียสามารถเกิดพันธะกับอะลูมิเนียมอะตอมในอะลูมินา ซึ่งภายในอะลูมินาจะมีตัวให้คู่อิเล็กตรอนกับอะลูมิเนียมอะตอมที่มีอิเล็กตรอนไม่ครบ จึงทำให้การเกิดพันธะได้สมบูรณ์และเสถียร



รูปที่ 2.12 แสดงปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียและอะลูมิเนียมอะตอม^[16]

การทรีทเม้นท์อะลูมินาด้วยฮาโลเจน เช่น คลอไรด์ หรือ ฟลูออไรด์ เพื่อเพิ่มสมบัติความเป็นกรดให้กับอะลูมินา ทำให้อะลูมินาสามารถช่วยในการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน เป็นต้น

2.4.3.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)^[17]

ถ่านกัมมันต์เป็นอีกตัวที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวรองรับ มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ อาจอยู่ในรูปผงหรือเม็ดก็ได้ มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวดูดซับสูง ทำให้มีสมบัติการดูดซับที่ดี ใช้ประโยชน์ในการกำจัดกลิ่น สี หรือแก๊ส โดยทั่วไปมักจะเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นของเหลือทิ้งหรือมีราคาถูก มีปริมาณคาร์บอนสูง สารอนินทรีย์ต่ำ ปริมาณเถ้าต่ำและมีความสะดวกในการนำมาใช้งาน เช่น ไม่สลายตัวเมื่อเก็บไว้นานๆ

วัตถุดิบส่วนใหญ่ที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์มักจะเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น กะลามะพร้าว กะลาปาล์ม ทะลายปาล์ม ฯลฯ มาผ่านกระบวนการกระตุ้น (activation) ให้มีพื้นที่ผิวสูง มีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ความจุในการดูดซับสูง และมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก เช่น กะลามะพร้าว ชานอ้อย กะลาปาล์ม หรือถ่านหินประเภทลิกไนต์ เป็นต้น

ข้อดีของถ่านกัมมันต์ เมื่อทำหน้าที่เป็นตัวรองรับในตัวเร่งปฏิกิริยา^[18]

1. ด้านทานความเป็นกรดหรือเบสได้ดี
2. โครงสร้างเสถียรที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ซีโอไลต์อาจเกิดการสลายหรือแตกตัวที่ 1000 K ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถทนทานได้มากกว่า 1700 K ซึ่งหากตัวรองรับไม่เสถียรจะส่งผลให้เกิดการหลอมรวม (sintering) ของโลหะบนตัวรองรับ
3. โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ การกระจายขนาดของรูพรุนนั้นอาจกำหนดให้ได้ขนาดความต้องการได้หากมีการเตรียมที่ถูกต้อง ซึ่งอาจเตรียมได้ทั้งในรูปผงและเม็ด ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งเตาปฏิกรณ์แบบ fixed beds และ fluidized beds
4. มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้โดยการเพิ่มเหนี่ยวนำตัวดูดซับ (precursor adsorption) และการเพิ่มการกระจายตัวของ active phase
5. ในกรณีที่รองรับ โลหะที่มีราคาสูง ถ่านกัมมันต์สามารถช่วยลดต้นทุนตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากสามารถนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แล้วมาเผาใส่สิ่งเจือปนแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้
6. ราคาถูก ซึ่งทางเศรษฐกิจแล้วสามารถช่วยลดต้นทุนมากกว่าการนำตัวรองรับประเภทออกไซด์ อาทิเช่น อะลูมินา ซิลิกาและซีโอไลต์ มาใช้

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกสลายของพอลิเมอร์

กระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์แตกเป็นโมเลกุลเล็กๆ นั้น ต้องใช้แหล่งพลังงานที่จำเป็นในการทำลายพันธะที่ต่อเชื่อมกันระหว่างอะตอมมีลักษณะคล้ายสายโซ่ให้หลุดจากกันเป็นโมเลกุลเล็กๆ พลังงานพันธะนั้นเกิดขึ้นได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอมที่เชื่อมโยงระหว่างกัน อีกทั้งยังขึ้นกับลักษณะเฉพาะทางเคมีและลักษณะทางกายภาพที่แวดล้อมพันธะนั้นด้วย โดยทั่วไปพลังงานในการแตกตัวของพันธะเคมีในพอลิเมอร์ต่างๆ ไปอยู่ระหว่าง 65-108 kcal/mol โดยพันธะระหว่างคาร์บอน-คาร์บอน อยู่ในช่วงประมาณ 75-85 kcal/mol^[19] ประเภทของพลังงานที่มีผลอย่างมากต่อการทำให้แตกสลายของสายโซ่พอลิเมอร์คือ ความร้อน พลังงานกลและการแผ่รังสี ในกรณีที่ใช้ความร้อนมีได้หลายรูปแบบ อาทิ การเผาไหม้ การถ่ายโอนความร้อน ส่วนพลังงานกลก็คือ การบิด และการแผ่รังสีได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากแสงอาทิตย์ ไม่เพียงแต่ความร้อนจะมีบทบาทสำคัญต่อการแตกตัวของพันธะเท่านั้น แต่ยังสามารถกระตุ้นกระบวนการทางเคมีและชีววิทยาได้อีกด้วย

โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์มีผลอย่างมากต่อเสถียรภาพของพอลิเมอร์ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีเป็นปัจจัยหนึ่ง โดยพลังงานพันธะระหว่างอะตอมที่เหมือนกันจะมีค่าต่างกันมาน้อยขึ้นกับกลุ่มพันธะเคมีของอะตอมนั้นๆ ดังตาราง 2.2

ตาราง 2.2 แสดงค่าพลังงานการแตกตัวของพันธะเดี่ยว^[20]

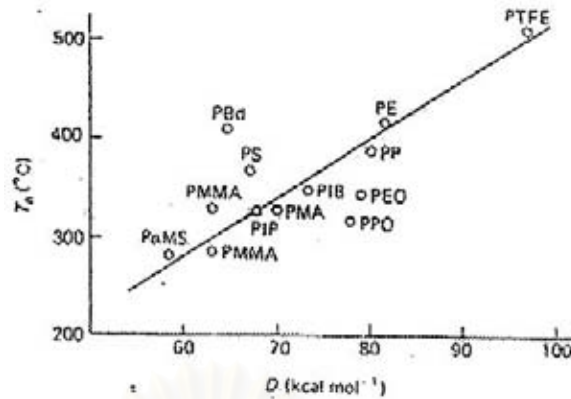
BOND BROKEN A-B	BOND DISSOCIATION ENERGIES (kcal/mole)	BOND BROKEN A-B	BOND DISSOCIATION ENERGIES (kcal/mole)
C ₂ H ₅ -H	99	C ₆ H ₅ -CH ₃	94
n-C ₃ H ₇ -H	98	C ₆ H ₅ CH ₂ -CH ₃	72
t-C ₄ H ₉ -H	91	CH ₃ -Cl	84
CH ₂ =CHCH ₂ -H	82	C ₂ H ₅ -Cl	81
C ₆ H ₅ -H	103	CH ₂ =CHCH ₂ -Cl	65
C ₆ H ₅ -CH ₂ -H	83	CH ₃ -F	108
C ₂ H ₅ -CH ₃	83	C ₂ H ₅ -F	106
n-C ₃ H ₇ -CH ₃	83	HO-OH	51
t-C ₄ H ₉ -CH ₃	81	t-C ₄ H ₉ O-OH	36

พลังงานในการแตกตัว (dissociation energies) ของพันธะต่างๆในพอลิเมอร์ สามารถบอกให้รู้ว่าการแตกสลายของพอลิเมอร์นั้นๆเกิดขึ้นเมื่อใด โดยกระบวนการเริ่มจากพันธะที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดถูกแยกออก อย่างไรก็ตามยังมีองค์ประกอบอื่นๆที่ทำให้เกิดการแตกสลายได้อีกคือ steric factor เสถียรภาพของสาร intermediate และ resonance stabilization โดยปัจจัยดังกล่าวจะมีผลต่อค่าของพลังงานในการแตกตัว ดังตาราง 2.3 ซึ่งแสดงผลของ steric factors, resonance stabilization

ตาราง 2.3 แสดงค่าพลังงานการแตกตัวของพันธะ $\text{CH}_3\text{-R}$ ^[20]

-R	BOND DISSOCIATION ENERGIES (KCAL/MOLE)
-CH ₃	88.4
-C ₂ H ₅	84.5
-n-C ₃ H ₇	84.9
-n-C ₄ H ₉	84.7
-i-C ₃ H ₇	83.8
-t-C ₄ H ₉	80.5
-CH ₂ -CH=CH ₂	73.6
-CH(CH ₃)CH=CH ₂	72.3
-CH ₂ -C ₆ H ₅	71.9
-CH(CH ₃)-C ₆ H ₅	68.7
-C(CH ₃) ₂ -C ₆ H ₅	65.7
-CH=CH ₂	93.7
-C ₆ H ₅	94
-CH ₂ -OH	82.1
-CH ₂ -C(O)-CH ₃	79
-CH ₂ -CN	77.1

ค่าของพลังงานในการแตกพันธะ $\text{CH}_3\text{-R}$ และผลของค่าพลังงานพันธะที่มีผลต่อเสถียรภาพของพอลิเมอร์แสดงดังรูป 2.13 ซึ่งแสดงถึงอุณหภูมิที่ทำให้น้ำหนักเริ่มต้นของพอลิเมอร์ลดลงร้อยละ 50 กับพลังงานในการแตกตัว โดยเวลา 30 นาที ภายใต้ภาวะสุญญากาศ



รูปที่ 2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิครึ่งชีวิต (T_g) กับค่าพลังงานในการแตกตัว (D) ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ^[20]

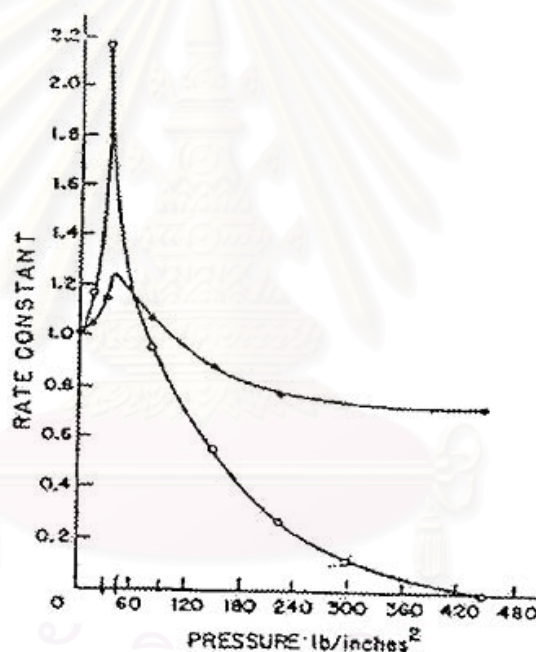
มอนอเมอร์หลายๆชนิดต่อรวมกันเป็นพอลิเมอร์ร่วมมีผลต่อเสถียรภาพของพอลิเมอร์มาก ซึ่งมอนอเมอร์ร่วมที่ใส่เข้าไปในพอลิเมอร์ก็เพื่อปรับปรุงสมบัติบางอย่างของพอลิเมอร์ เช่น การเติมสารเติมแต่ง (additives) ซึ่งไม่เกิดพันธะเคมีกับพอลิเมอร์ แต่อาจไปลดเสถียรภาพของพอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างเช่น การเติมยางในพอลิสไตรีนที่ประกอบด้วยพันธะที่ไม่อิ่มตัว โดยทำให้พอลิสไตรีนที่ได้นั้นมีสภาพไวต่อแสงและเกิดออกซิเดชันได้สูงกว่าพอลิสไตรีนที่ยังไม่ปรับปรุงคุณภาพโดยสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพพอลิเมอร์นั้นได้แก่ พลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) ซึ่งเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น และสารหล่อลื่น (lubricants) ซึ่งสารเติมแต่งเหล่านี้มีผลต่อเสถียรภาพของพอลิเมอร์ทั้งสิ้น เช่น อาจทำให้พอลิเมอร์เกิดการออกซิไดซ์ หรือถูกย่อยสลายไปจากระบบได้ ซึ่งมีผลให้องค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนไป อย่างไรก็ตามสารเติมแต่งบางชนิดอาจทำให้พอลิเมอร์มีเสถียรภาพมากขึ้นได้ เช่น สารแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) สารโฟโตสแตบิไลเซอร์ (photo-stabilizer) เป็นต้น

เวลาและอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลอย่างมากต่อกลไกการแตกสลายของพอลิเมอร์ เมื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยา การแตกตัวของพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิ เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิความหนืดของพอลิเมอร์จะลดลง ซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดการดึงอะตอมออกที่ปลายสายโซ่ เกิดการแจกแจงมวลโมเลกุลขึ้น ดังตาราง 2.4 แสดงค่าความหนืดจากการทดลองสำหรับของไหลที่ 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นก๊าซจะมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น ส่วนของเหลวจะมีค่าความหนืดลดลง

ความดัน โดยที่ความดันสูงๆ (10^3 - 10^5 psig) มีผลในการเหนี่ยวนำให้เกิดการแตกตัวของพันธะ ส่วนที่ความดันต่ำการเพิ่มขึ้นของความดันมีผลอย่างมากต่อการแตกสลาย ดังรูปที่ 2.14 แสดงค่าคงที่การแตกสลายของสารละลายพอลิสไตรีน-เบนซีน ลดลงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความดันสูงขึ้นจะไประงับการเกิดช่องว่างหรือขีดขวางไม่ให้สารเคลื่อนที่ ทำปฏิกิริยาซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการแตกตัวของพอลิเมอร์

ตาราง 2.4 แสดงค่าความหนืดของก๊าซและของเหลวที่ความดันบรรยากาศ^[20]

Substance	Temperature T (°C)	Viscosity μ (cp)	Substance	Temperature T (°C)	Viscosity μ (cp)
Gases			Liquids		
i-C ₄ H ₁₀	23	0.0076	(C ₂ H ₅)O	20	0.245
CH ₄	20	0.0109	C ₆ H ₆	20	0.647
H ₂ O	100	0.0127	Br ₂	26	0.946
CO ₂	20	0.0146	C ₂ H ₅ OH	20	1.194
N ₂	20	0.0175	Hg	20	1.547
O ₂	20	0.0203	H ₂ SO ₄	25	19.15
Hg	380	0.0654	Glycerol	20	1069



รูปที่ 2.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การแตกสลาย (การลดลงของความหนืด) กับความดันของพอลิสไตรีนในเบนซีน^[20]

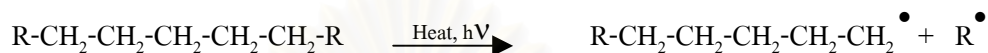
2.6 การแตกตัวด้วยความร้อน (Thermal cracking)^[7,33,34]

การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลที่เล็กลงโดยใช้ความร้อนอุณหภูมิสูง โดยหากควบคุมให้การแตกตัวเป็นไปได้อย่างพอดี จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากการให้ความร้อนจะเกินพอดีจะทำให้การแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเกินไปจนอยู่ในรูปก๊าซ C₁-C₄ ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการและไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุล

ด้วยความร้อนจะมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะส่วนที่มีแขนโอเลฟิน (olefin) และไดโอเลฟิน (diolefin) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันเองต่อไป

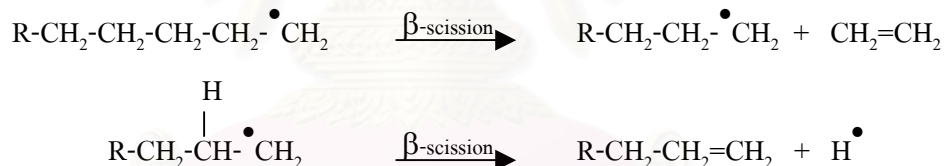
กระบวนการแตกตัวโมเลกุลด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (Free radical) แบบห่วงโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ^[13]

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



2. ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบลูกโซ่ (Propagation step) เกิดจากอนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง การแตกตัวจะเริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปยังพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง β เกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้น (β -fission) ซึ่งทำให้ภายในสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดความไม่เสถียรส่งผลให้เกิดขั้นตอนการถ่ายทอดไฮโดรเจน (chain transfer) เพื่อให้โมเลกุลเกิดความเสถียร จึงเกิดเป็นสารต่างๆ ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงจากพอลิเมอร์เดิม พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นต่อ เพื่อเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเรื่อยๆ

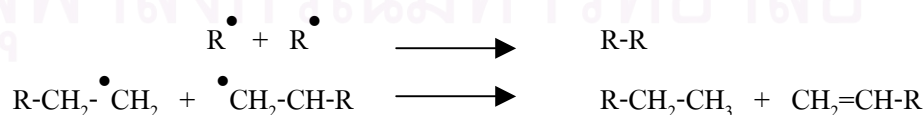
β -fission



Chain transfer



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



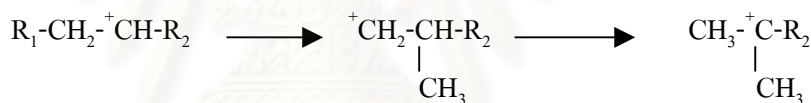
2.7 การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) ^[11,21,22]

การแตกตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นกระบวนการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามามีบทบาทในการช่วยแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้ขนาดเล็กลง ให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม คุณภาพเหมาะสมที่จะนำไปใช้ประโยชน์ตามต้องการได้ กลไกของการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย

1. การเกิดดีไฮโดรจีเนชัน (Dehydrogenation) และปฏิกิริยาการเกิดคาร์บอเนียมไอออน (Carbocation ion) ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรด์ไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน โดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary ion และ primary ion ตามลำดับ



2. การเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลของคาร์บอเนียมไอออน ซึ่งเกิดจากการที่โครงสร้างของคาร์บอเนียมไอออนมีเสถียรภาพแตกต่างกัน



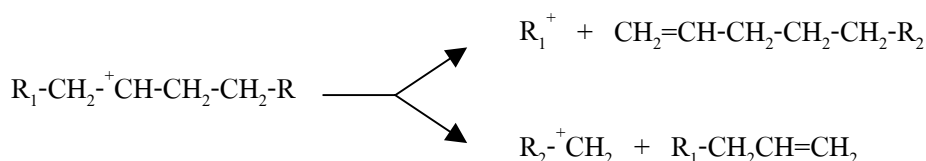
และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ (hydride transfer) โดยเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอเนียมไอออนกับโมเลกุลของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน



สำหรับคาร์บอเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา β -scission หรือการแตกตัวที่ตำแหน่ง β ที่นับจากจุดที่มีประจุบวก ซึ่งจะให้สารประกอบโอเลฟินและคาร์บอเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยมีจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ



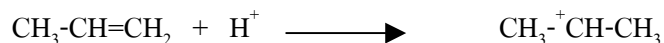
ในบางกรณีคาร์บอเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่น ในตัวอย่างของ secondary carbonium ion



ถ้า $R_1 = H$ การเกิด β -scission จะสามารถเกิดผลิตภัณฑ์ได้เพียงตัวเดียว ดังสามารถ



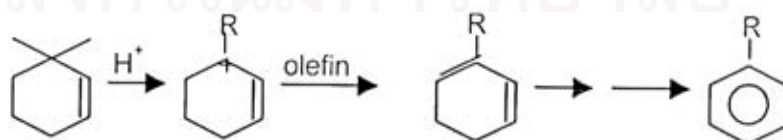
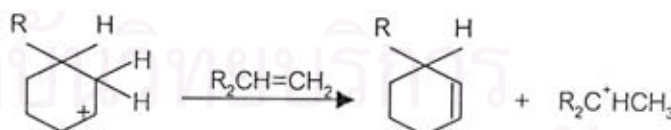
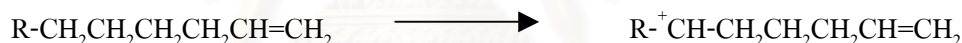
โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้คือโพรพีนจะเกิดปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอเนียมไอออนซึ่งจะไม่สามารถเกิด β -scission ต่อไปได้



(isopropyl carbonium ion)

Isopropyl carbonium ion จะเกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรคาร์บอนกับ โมเลกุลประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรือ อาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน

ในการเกิดวงแหวนอะโรมาติกจากปฏิกิริยาดีไฮโดรไซคลิกเซชัน (dehydrocyclization) โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอเนียมไอออน แล้วเกิดปฏิกิริยา β -scission ได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับ โอเลฟิน เกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรคาร์บอนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก cyclohexadiene ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะโรมาติก



ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจะประกอบด้วยก๊าซที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของเบนซินที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกอะโรมาติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และ โถก (coke) ที่จะเกาะ

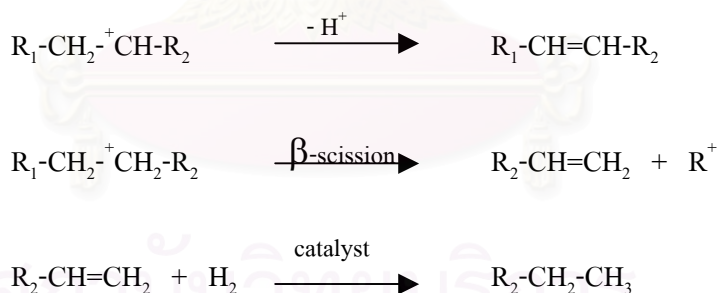
ติดอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงจนเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.8 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (Hydrocracking) ^[21,23]

การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมระหว่างการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมไฮโดรเจน ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีแขนแตกแขนงจำนวนมาก เกิดเป็นพาราฟินและแนฟทีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนและช่วยเติมไฮโดรเจน จึงมักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกา-อะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆกับการเติมไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดคาร์บอนเนียมไอออนตรงบริเวณที่เป็นกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



คาร์บอนเนียมไอออนอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยการกำจัดโปรตอนออกจากโอเลฟินหรือเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้า (β -scission) ได้ผลิตภัณฑ์เป็น โอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ จากนั้นเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนและการตั้งไฮโดรเจน โอเลฟินที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็นสารประกอบประเภทพาราฟิน



หากปฏิกิริยาเกิดในสภาวะที่อุณหภูมิ 400-480 องศาเซลเซียส ความดัน 35-170 บรรยากาศ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่อิมตัวค่อนข้างมาก ซึ่งทำให้ก๊าซโซลีนที่ได้จากกระบวนการนี้มีค่าออกเทนที่ต่ำกว่ากระบวนการแตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นมีปริมาณสารประกอบอะโรมาติกน้อย เพราะเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนมากกว่า สารที่ได้จึงมักนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องบิน (jet fuel) รวมทั้งยังได้สารประกอบประเภท LPG ซึ่งใช้เป็นสารป้อนในกระบวนการปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ใดๆ นั้นต้องอาศัยปัจจัยอื่นๆ ควบคู่กันไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ขึ้นกับเวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งชนิดของปฏิกิริยาและชนิดของพลาสติก

นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็จะช่วยทำความสะอาดให้กับผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปพร้อมๆกันด้วย เนื่องจากการเติมไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาออกไป กระบวนการแตกโมเลกุลด้วยการใช้ไฮโดรเจนร่วมนี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้เกิดการเพิ่มอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นอย่างดี เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้กและทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาสูญเสียความสามารถไป หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหาย รวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

2.9 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Audisio และคณะ ศึกษาการแตกตัวพอลิสไตรีน โดยใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา^[24] พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา silica, alumina, silica-alumina และ zeolites ภายใต้อุณหภูมิ 200-550 °C ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก พบว่า ที่อุณหภูมิ 350 °C ขึ้นไปจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากกว่าร้อยละ 80 โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ benzene รองมาคือ ethylbenzene และเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ styrene และ dimer

Uemichi และคณะ ศึกษาเปรียบเทียบการแตกตัวพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา silica-alumina, HY-type และ HZSM-5 ใน fixed-bed flow reactor^[25] พบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C ภายใต้อุณหภูมิ ความดันบรรยากาศ silica-alumina ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น benzene toluene และ naphtha

Simard Y.D.M และคณะ ศึกษาปฏิกิริยา thermolysis ของพอลิสไตรีน^[26] ที่อุณหภูมิ 368-407 °C ภายใต้อุณหภูมิใน โตรเจน 40 นาที พบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิ 401 °C จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวย้อยละ 92 โดยน้ำหนัก ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น styrene monomer, dimer และ trimer อีกทั้งยังพบว่าปฏิกิริยาที่ได้เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ค่าพลังงานกระตุ้น 39.6 กิโลจูลต่อโมล

Rong Lin และคณะ ศึกษาการแตกตัวพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา silica-alumina, HZSM-5 และ sulfated zirconia อุณหภูมิ 400 °C ใช้ cyclohexane เป็นตัวทำละลายพอลิสไตรีน^[27] พบว่า HZSM-5 มีประสิทธิภาพดีที่สุดใน โดยให้ผลิตภัณฑ์ของเหลวย้อยละ 94 ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น benzene รองลงมาเป็น alkyl benzene และ indanes

Serrano D.P. และคณะ ศึกษาการเปลี่ยน โพลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HMCM-41, HZSM-5 และ amorphous SiO₂-Al₂O₃ เปรียบเทียบกับ thermal cracking^[29] พบว่า HMCM-41 มีประสิทธิภาพดีที่สุดใน นั่นคือทำให้โพลิสไตรีนเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ ร้อยละ 82 โดยใช้ อุณหภูมิ 375 °C อัตราส่วนระหว่างโพลิสไตรีนต่อตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 9 เวลา 4 ชั่วโมง โดยผลิตภัณฑ์หลักที่

ได้คือ benzene, ethylbenzene และ cumene ซึ่ง $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ให้ผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับ HMCM-41 ส่วน HZSM-5 และ thermal cracking จะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น styrene

Kim J.S. และคณะ ศึกษาการสลายพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กชนิดต่างๆ^[30] พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-K/ Al_2O_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่ดีที่สุด ที่อุณหภูมิ 400 °C เวลา 90 นาที โดยมีร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 92.2 ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็น styrene

Arandes J.M. และคณะ ศึกษาการรีไซเคิลพอลิสไตรีนและพอลิสไตรีนบิวตะไดอินโดยละลายใน light cycle oil^[31] พบว่า ที่อุณหภูมิ 550 °C เวลา 3 วินาที ใน fluidized bed reactor พอลิสไตรีนใน light cycle oil ให้ร้อยละแก๊สโซลีน 56.4 โดยผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น styrene

ปนัดดา เมธาคณวุฒิ ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อพอลิเมอไรเซชันของพอลิสไตรีนที่ใช้แล้ว^[35] พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักของ Fe (5%)-Sn(5%)-F(2%) บนmolecular sieve สภาวะที่เหมาะสมภายใต้ความดันไฮโดรเจน คือ อุณหภูมิ 350°C ความดัน 400 lb/in² เวลา 90 นาที ส่วนสภาวะที่เหมาะสมภายใต้ความดันไนโตรเจน คือ อุณหภูมิ 350°C ความดัน 300 lb/in² เวลา 90 นาที ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ของทั้งสองสภาวะ คือ ethylbenzene, toluene, isopropyl benzene และ xylene

นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุล ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนใช้แล้ว โดยศึกษาการละลายพอลิสไตรีนในตัวทำละลาย benzene และ cyclohexane^[36] พบว่า cyclohexane เป็นตัวทำละลายที่เหมาะสม ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ cyclohexane ต่อพอลิสไตรีนเป็น 73:27 สภาวะที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยาไพโรไลซิสคือ อุณหภูมิ 350°C ความดัน 45 lb/in² เวลา 300 นาที สามารถเปลี่ยนพอลิสไตรีนเป็นผลิตภัณฑ์ได้ร้อยละ 71 ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้คือ ethylbenzene, toluene และ cumene ตามลำดับ

พูนสุข พึ่งธรรม ศึกษาการแตกตัวพอลิพรอพิลีนด้วยไฮโดรเจนโดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน^[37] พบว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยที่อุณหภูมิ 435 องศาเซลเซียส ความดันก๊าซไฮโดรเจน 30 กก./ตร.ซม. และเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณเนฟทา 40-65% เคโรซีน 12-14% ก๊าซออยล์ 10-13% และโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาว 4-5%

ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ศึกษาการแตกตัวพอลิพรอพิลีนและพอลิสไตรีนภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน^[38] พบว่าพอลิสไตรีนแตกตัวเป็นของเหลว 89.93% ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 30 กก./ตร.ซม. อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 0.45 กรัมต่อ 15 กรัมของพอลิสไตรีน องค์ประกอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี ให้ เนฟทา 23.83% เคโรซีน 1.80% แก๊สออยล์ 25.18% และโมเลกุลสายโซ่ยาว 39.12% ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น toluene ethylbenzene diphenylpropane และ cumene

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (Micro-reactor) รูปทรงกระบอก ปริมาตร 75 มิลลิลิตร ทำจากเหล็กกล้าเหนียวไร้สนิม SS 316 โดยด้านบนมีชุดฝาปิดทำจากสแตนเลส มีชุดอุปกรณ์สำหรับอัดแก๊ส และวาล์วนิรภัย สามารถทำการทดลองภายใต้ภาวะที่ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส ความดัน 10 เมกะพาสคาล มีเทอร์โมคัปเปิลทางด้านบนสำหรับตรวจวัดอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ระหว่างทำการทดลอง ดังรูป 3.1



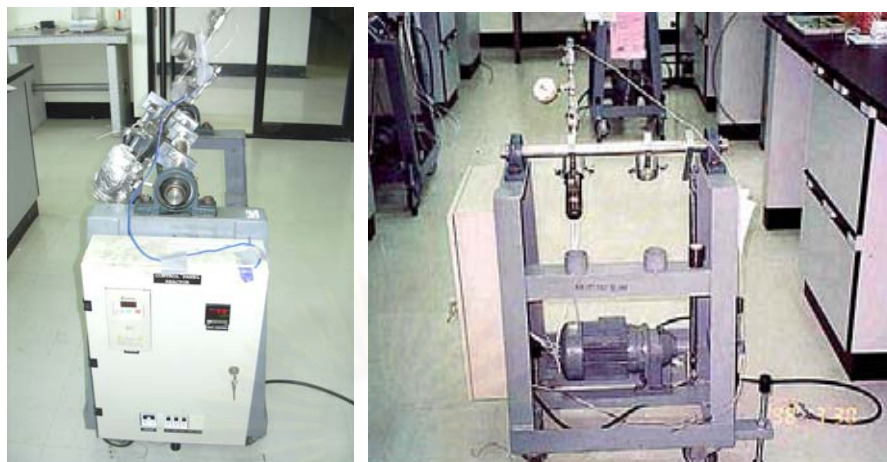
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 75 มิลลิลิตร (Micro-reactor)

3.1.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (Temperature controller) ทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายกระแสจากหม้อแปลงไฟฟ้าไปยังขดลวดความร้อนและตัวจ่ายกระแสเมื่อได้อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ มีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิได้ในระดับ ± 10 องศาเซลเซียส

3.1.3 ขดลวดความร้อนแบบ Injection แรงดัน 230 โวลต์ กำลัง 350 วัตต์

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

3.1.5 ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ โดยมีมอเตอร์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนแกนหมุนให้เครื่องปฏิกรณ์เกิดการแกว่ง สามารถปรับความเร็วรอบการเขย่าได้จากชุดควบคุมความเร็ว ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดลองประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล และเครื่องเขย่า

3.1.6 ชุดกรองสุญญากาศ ประกอบด้วยชุดเครื่องแก้วต่อกับเครื่องดูดอากาศ เพื่อทำการกรองแยกแบบสุญญากาศ สำหรับแยกส่วนของผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากส่วนที่เป็นกากของแข็ง โดยผ่านการกรองโดยใช้กระดาษกรองใยแก้ว ดังรูป 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 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)

3.1.12 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (Simulated Distillation) Varian CP-3800 พร้อมเครื่องตรวจวิเคราะห์แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 ดังรูป 3.4

3.1.13 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (3000 Micro-Gas Chromatography) สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊ส ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.4 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแบบจำลองการกลั่น

(Simulated Distillation Gas Chromatography : Varian CP-3800)



รูปที่ 3.5 เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

(3000 Micro-Gas Chromatography – SN: US10314007)

3.1.14 เครื่องกลั่นแยกแบบหมุน (Rotary evaporator) สำหรับกลั่นแยกตัวทำละลายที่ระเหยง่ายออกจากผลิตภัณฑ์น้ำมัน ดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องกลั่นแยกแบบหมุน

3.2 สารตั้งต้นและสารเคมี

3.2.1 ก่อ่งโพน

3.2.2 Cyclohexane (Lab grade) จาก Fisher Chemicals

3.2.3 Toluene (Commercial grade: ความบริสุทธิ์ 80% minimum) จากบริษัท Lab Systems

3.2.4 แก๊สไฮโดรเจน 99.99% จากบริษัท TIG Trading จำกัด

3.2.5 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ประเภท HZSM-5

3.2.6 ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ (Fe/Activated carbon)

3.2.7 ตัวเร่งปฏิกิริยาโคบอลต์-โมลิบดีนัม บนอะลูมินา (Co-Mo/Al₂O₃)

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1. ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิस्टาไดรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ Co-Mo/Al₂O₃ และ HZSM-5

โดยทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2⁴ Factorial experimental design) ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ เวลา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันแก๊สไฮโดรเจน ดังตาราง 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษานบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ตัวแปร	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	350	400
2. เวลา (นาทื), B	60	180
3. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละ โดยน้ำหนัก), C	0.1	1
4. ความดันแก๊สไฮโดรเจน (บาร์), D	1	5

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษานบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al₂O₃

ตัวแปร	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
1. อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส), A	350	400
2. เวลา (นาทื), B	60	180
3. ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก), C	1	5
4. ความดันแก๊สไฮโดรเจน (บาร์), D	1	5

3.3.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิสไตรีน

3.3.2.1 ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของพอลิสไตรีน

1. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยแปรค่าอุณหภูมิเป็น 350 370 390 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่เวลา 180 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์

2. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al₂O₃ โดยแปรค่าอุณหภูมิเป็น 350 370 390 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่เวลา 180 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์

3.3.2.2 ศึกษาเวลาที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของพอลิสไตรีน

1. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยแปรค่าเวลาเป็น 60 90 120 150 และ 180 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์

2. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al₂O₃ โดยแปรค่าเวลาเป็น 60 90 120 150 และ 180 นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์

3.3.2.3 ศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของพอลิสไตรีน

1. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยแปรค่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.1, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์

2. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยแปรค่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์

3. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ โดยแปรค่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ภายใต้ความดันไฮโดรเจน 5 บาร์

3.3.2.4 ศึกษาความดันที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของพอลิสไตรีน

1. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยแปรค่าความดันเป็น 1, 5 และ 10 บาร์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

2. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยแปรค่าความดันเป็น 1, 5 และ 10 บาร์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3. การแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ โดยแปรค่าความดันเป็น 1, 5 และ 10 บาร์ ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การเตรียมตัวอย่างพอลิสไตรีน โดยนำกล่องโฟมมาตัดเป็นชิ้นเล็กขนาดประมาณ 0.5x0.5 เซนติเมตร

3.4.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. นำโฟมที่ตัดเป็นชิ้นเล็กชั่งน้ำหนักประมาณ 5 กรัม ละลายในตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน 20 กรัม (1:4) ในเครื่องปฏิกรณ์ ประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับส่วนประกอบต่างๆ ดังรูป 3.1

2. นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจน จากนั้นอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่ต้องการ ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สด้วยน้ำสบู่ตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์

3. นำเครื่องปฏิกรณ์ต่อเข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ เทอร์โมคัปเปิลและอุปกรณ์วัดลดความร้อน จากนั้นหุ้มด้วยฉนวน เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง
4. ทำการทดลองตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด เมื่อครบกำหนดแล้วนำฉนวนและชุดลดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้อง นำเครื่องปฏิกรณ์ไปต่อเข้ากับเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี เพื่อวิเคราะห์แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น
5. แยกผลิตภัณฑ์ของเหลวออกจากกากของแข็งด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ
6. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวและกากของแข็งที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก
7. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปกลั่นแยกตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน ด้วยเครื่อง rotary evaporation ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ความดัน 100 มิลลิบาร์ ชั่งน้ำหนักผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้และน้ำหนักตัวทำละลาย
8. นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงคาบจุดเดือดที่อุณหภูมิต่างๆ และวิเคราะห์องค์ประกอบสารเคมีที่เกิดขึ้น
9. คำนวณร้อยละการเปลี่ยนของพอลิสไตรีน

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

บทที่ 4

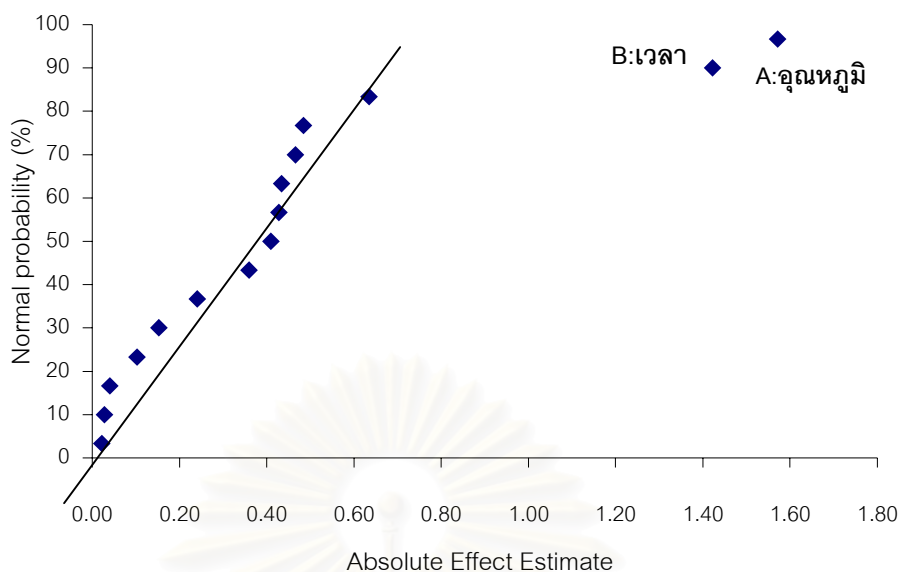
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการแตกตัวของพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประเภท HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al₂O₃ ใช้ตัวทำละลายไซโคลเฮกเซน โดยศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการแตกตัวของพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ คือ ระดับต่ำ และระดับสูง ซึ่งตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น จากนั้นศึกษาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้และผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้น

4.1 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

4.1.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

การแตกตัวของพอลิสไตรีนใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2⁴ factorial design) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยการนำผลการทดลองที่ได้มาสร้าง normal probability plot จากรูปที่ 4.1 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ อุณหภูมิ และเวลา ซึ่งแสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.1 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยมีค่า F₀ ที่ได้จากการคำนวณ คือ 23.308 และ 19.072 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า ค่า F_c คือ 9.65 ที่ความเชื่อมั่น 98% จึงเป็นการยืนยันว่า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ตารางที่ 4.1 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

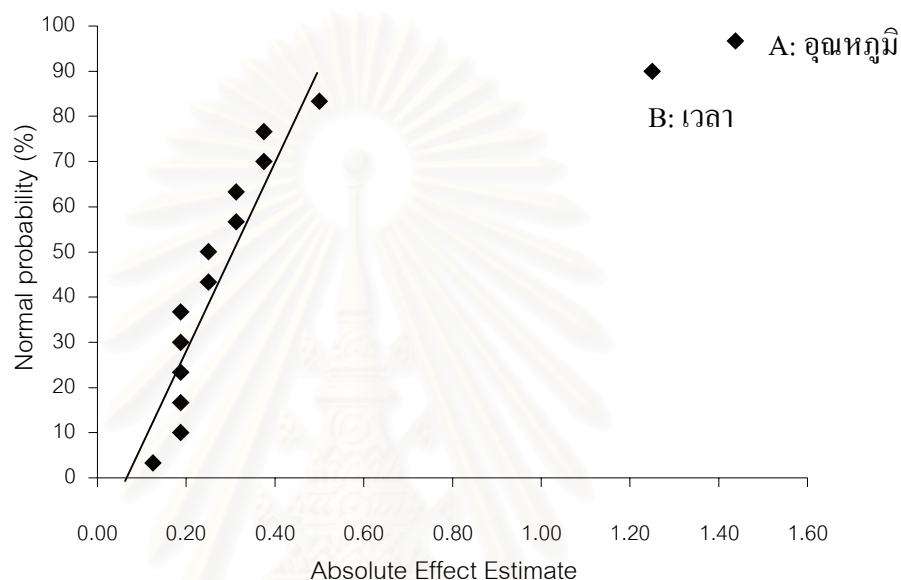
Source of variance	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	Fo
A(อุณหภูมิ)	39.533	1	39.533	23.308
B(เวลา)	32.348	1	32.348	19.072
C(ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)	3.469	1	3.469	2.045
D(ความดัน)	3.754	1	3.754	2.213
Error	18.657	11	1.696	
Total	97.760	15		

ที่ความเชื่อมั่น 98 % ใช้ค่า $\alpha = 0.02$ ได้ค่า $F_{0.01, 1, 11} = 9.65 (F_c)$

4.1.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีน (Gasoline) จากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^4 factorial design) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่เกิดขึ้น โดยการนำผลการ

ทดลองที่ได้มาสร้าง normal probability plot จากรูปที่ 4.2 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงคือ อุณหภูมิ และเวลา ซึ่งแสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อร้อยละผลิตแก๊สโซลีน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยมีค่า F_0 ที่ได้จากการคำนวณ คือ 26.212 และ 19.820 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า ค่า F_c คือ 9.65 ที่ความเชื่อมั่น 98% ซึ่งเป็นการยืนยันว่า อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดขึ้นของแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.2 แสดง Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ตารางที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

Source of Variance	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A:อุณหภูมิ	33.063	1	33.063	26.212
B:เวลา	25.000	1	25.000	19.820
C:ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	2.250	1	2.250	1.784
D:ความดัน	0.563	1	0.563	0.446
Error	13.875	11	1.261	
Total	74.750	15		

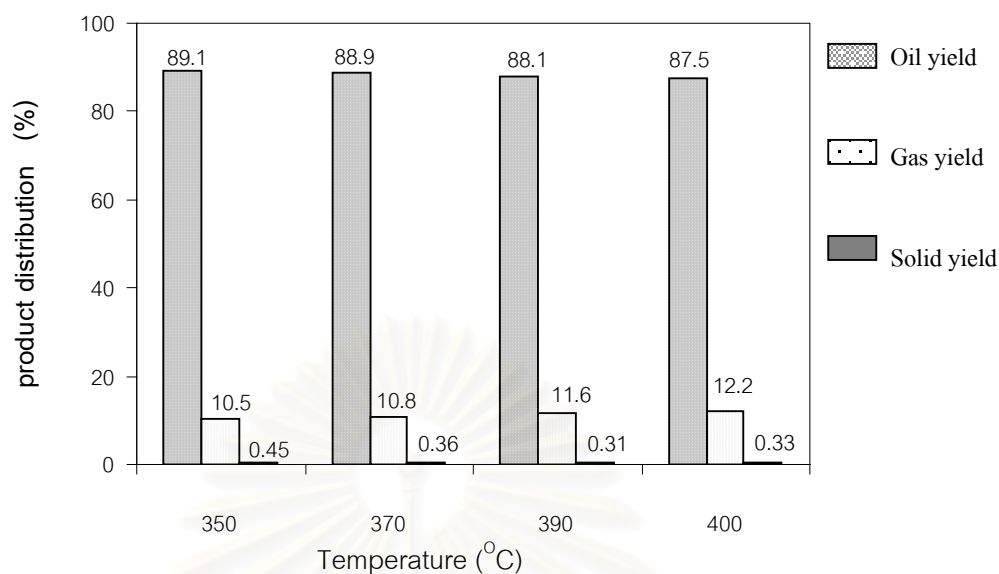
ที่ความเชื่อมั่น 98 % ใช้ค่า $\alpha = 0.02$ ได้ค่า $F_{0.01, 1, 11} = 9.65 (F_c)$

4.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ตาม ASTM D2887 เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light Gas Oil) แก๊สออยล์ (Gas Oil) และกากน้ำมันเบา (Long residue) และผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวพอลิไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

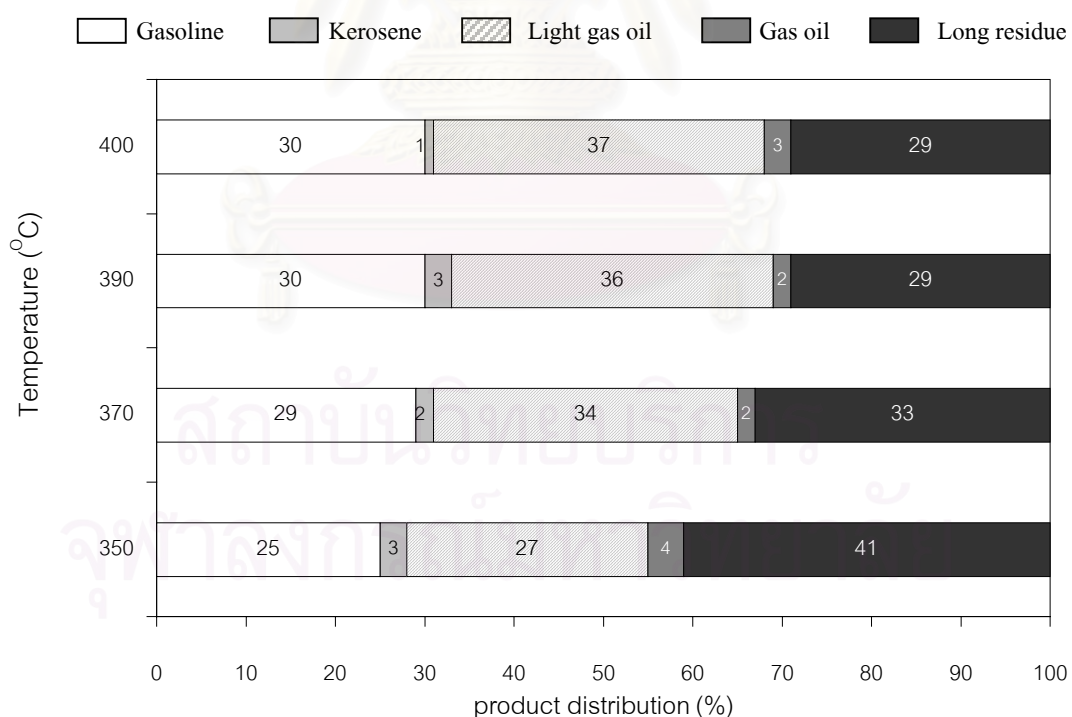
4.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

พอลิไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 350 370 390 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะลดลงเล็กน้อย ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่ม จากรูปที่ 4.4 พบว่าการสลายตัวของพอลิไตรีนจากสารโมเลกุลใหญ่ เช่น กากน้ำมันหนัก (long residue) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลเล็กลง เช่น แก๊สโซลีน จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส (25 เป็น 29 %) เนื่องจากเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้น การแตกตัวของสารตั้งต้นเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางช่วงแก๊สออยล์เบา จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มมีบทบาท โดยไปทำการแตกตัวโมเลกุลขนาดกลางให้เป็นขนาดเล็กลงได้ผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สโซลีนมากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.4 ยังพบว่าการสลายตัวเป็น โมเลกุลขนาดเล็กมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 370-400 องศาเซลเซียส (29-30%) อาจเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมาก ทำให้เกิดแก๊สมาก ความดันภายในจึงสูงขึ้นจนถึงระดับที่สามารถไปประจับหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารภายใน การแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็นโมเลกุลเล็กจึงทำได้ลำบาก

จากที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส พบว่าจากร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ 88.9 และการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาเช่น แก๊สโซลีน ที่ค่อนข้างสูง และไม่แตกต่างกับ 390 และ 400 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงน่าจะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ณ เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.3 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์

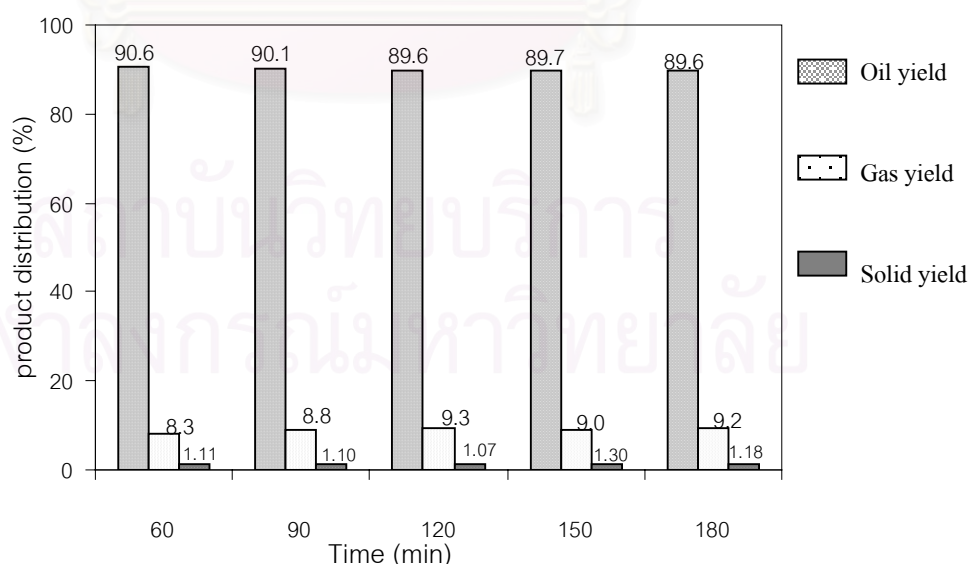


รูปที่ 4.4 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์

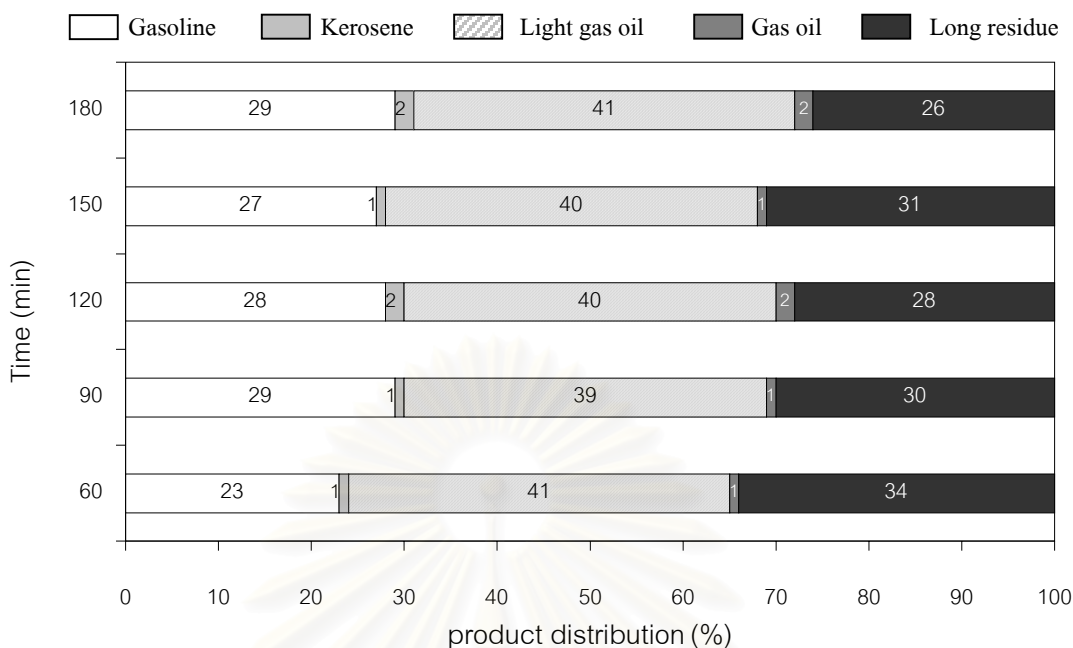
4.2.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 60 90 120 150 และ 180 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะลดลงเล็กน้อย โดยเปลี่ยนเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.6 พบว่าในช่วงเวลา 60-90 นาทีนั้น ร้อยละแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นและจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 90-180 นาที ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาเริ่มต้นนั้นปริมาณพอลิสไตรีนมีอยู่มากทำให้เห็นความแตกต่างของแก๊สโซลีนที่เกิดขึ้น หลังจาก 90 นาที การแตกตัวจะเริ่มเป็นการแตกตัวของสาร โมเลกุลใหญ่เช่นกากน้ำมันหนักกลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและเล็ก และอาจมาจากเมื่อให้สารอยู่ในระบบเป็นเวลานาน สารไฮโดรคาร์บอนแตกตัวมาก ความดันภายในจึงสูงขึ้นจนถึงระดับที่สามารถไประงับหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารภายใน การแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็น โมเลกุลขนาดเล็กลงจึงทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นร้อยละแก๊สโซลีนที่ได้จึงไม่แตกต่างกันมากนัก

จากผลการทดลอง พิจารณาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 90 นาที พบว่าให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 90.1 และการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาเช่น แก๊สโซลีน ที่ค่อนข้างสูงและไม่แตกต่างกับการใช้เวลา 120-180 นาที ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 90 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.5 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์



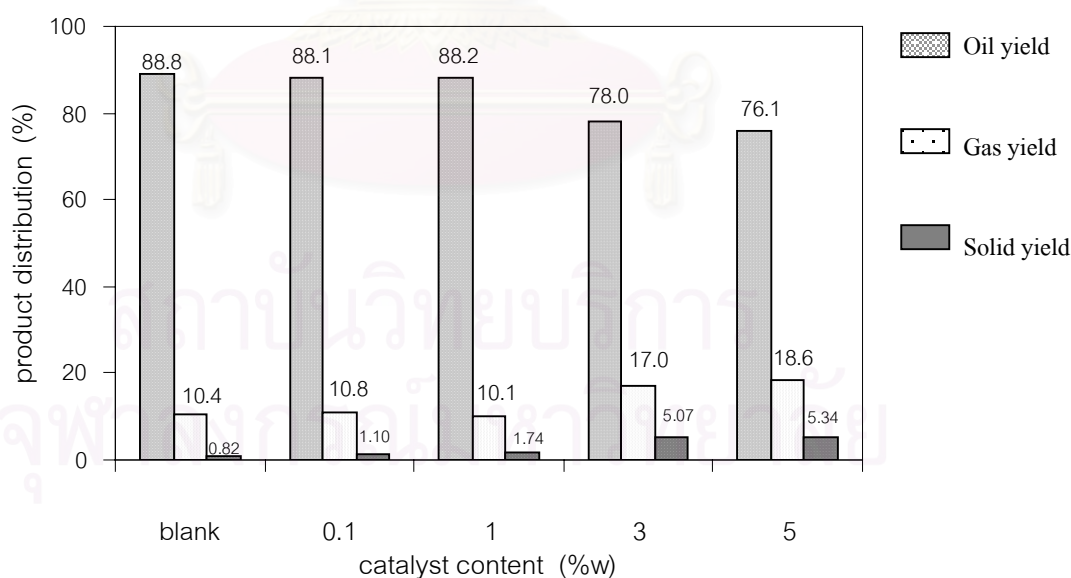
รูปที่ 4.6 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์

4.2.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

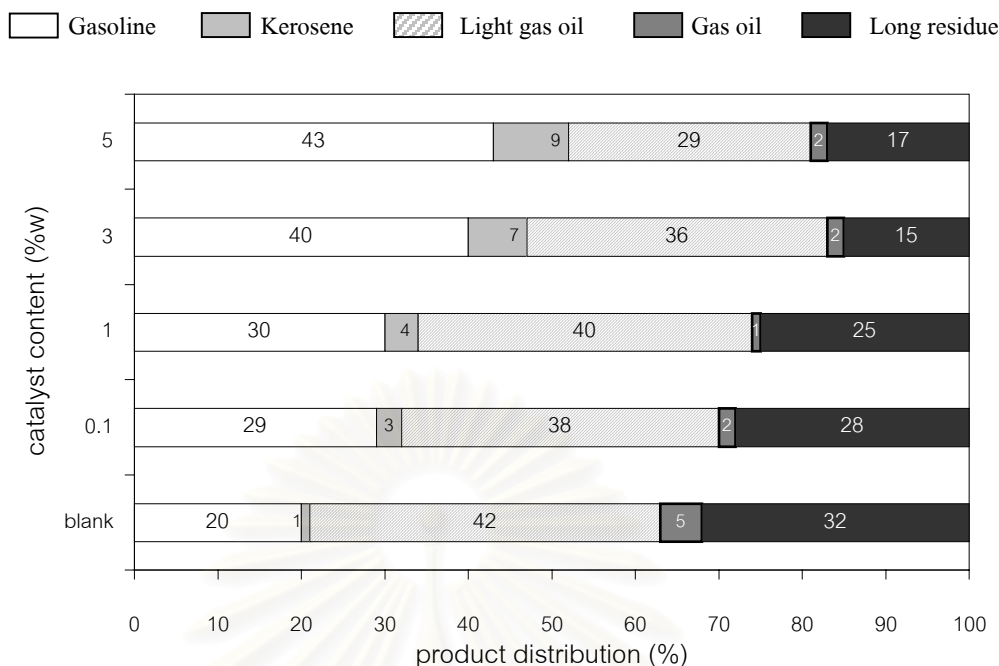
พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1, 1, 3 และ 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 90 นาที อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 พบว่า เมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 0.1 และ 1 เปอร์เซนต์นั้น ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและการกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่ได้ไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 และ 5 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันลดลงอย่างมากแต่การกระจายของร้อยละแก๊สโซลีนกลับเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 และ 1 เปอร์เซนต์นั้น พอลิสไตรีนไม่สามารถใช้ active site ของ HZSM-5 ได้อย่างเต็มที่เนื่องจากลักษณะโครงสร้างรูพรุนของ HZSM-5 ที่มีลักษณะเป็น microporous ซึ่งมีขนาดรูพรุนเล็กมาก (~0.55 nm) อีกทั้งลักษณะโครงสร้างของพอลิสไตรีนที่มีความกะกาะของวงเบนซิน ทำให้ไม่สามารถเข้าไปภายในรูพรุนได้ ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดขึ้นได้เพียง active site บนพื้นผิวภายนอกเท่านั้น^[29] ที่ 0.1 และ 1 เปอร์เซนต์ ปริมาณ active site ที่ใช้เกิดการแตกตัวของพอลิสไตรีนจึงอาจมองไม่เห็นความแตกต่าง การเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 3 และ 5 เปอร์เซนต์ นั้น เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือ active site ทำให้พอลิสไตรีนเกิดการแตกตัวมากยิ่งขึ้น ซึ่ง HZSM-5 นั้นเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท strong acid site

นั่นคือมีความแข็งแรงในการแตกตัวสารตั้งต้นให้มีขนาดเล็กได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจึงจะเห็นได้ว่าที่ตัวเร่งปฏิกิริยา 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีผลิตภัณฑ์แก๊สเกิดขึ้นมากกว่าที่ 1 เปอร์เซ็นต์ค่อนข้างสูงแต่จากคุณสมบัติเดียวกันก็ส่งผลให้สารโมเลกุลใหญ่เช่นกากน้ำมันหนักแตกตัวเป็นแก๊สโซลีนและเคโรซีนซึ่งมีขนาดโมเลกุลเล็กลงได้ค่อนข้างสูงเช่นกัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวพอลิสไตรีนเมื่อมีการเติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนในการแตกตัวพอลิสไตรีนเป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีทั้ง active site และความร้อนที่ช่วยในการแตกตัวสารตั้งต้น ขณะที่เมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีเพียงความร้อนเท่านั้น ซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นถึงจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

จากผลการทดลอง พบว่าปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 0.1 – 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นั่นคือร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและร้อยละการกระจายของแก๊สโซลีนที่ได้ไม่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์กับ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าได้ปริมาณน้ำมันที่ค่อนข้างสูงกว่า (~10 เปอร์เซ็นต์) ถึงแม้ว่าจะได้แก๊สโซลีนที่ต่ำกว่า แต่หากพิจารณาจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ ซึ่งต้องเพิ่มปริมาณมากขึ้นถึง 30 เท่า (0.1 เป็น 3 เปอร์เซ็นต์) การเพิ่มปริมาณมากขึ้นจึงอาจไม่เหมาะสมเท่าที่ควร ดังนั้นที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาทีและความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.7 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความดัน 5 บาร์



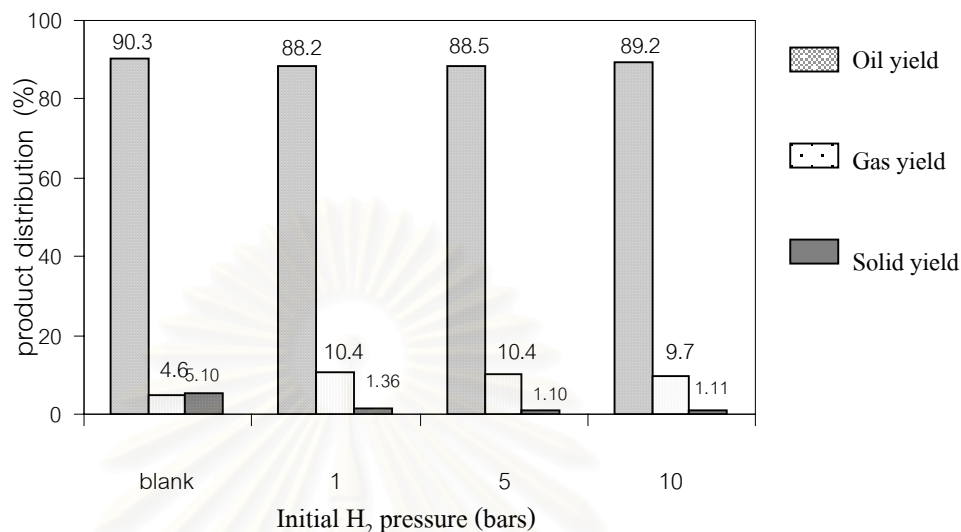
รูปที่ 4.8 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความดัน 5 บาร์

4.2.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

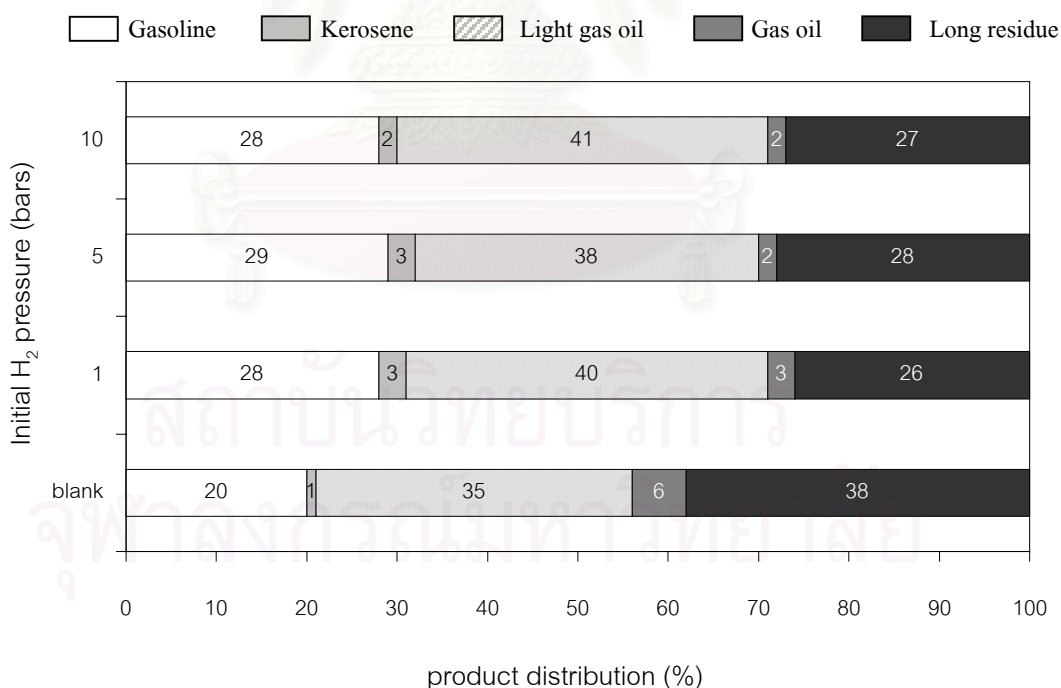
พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยอัดแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นความดัน 1, 5, 10 บาร์และไม่อัดแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส โดยเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.9 และ 4.10 พบว่า เมื่อเพิ่มความดันจาก 1 เป็น 5 บาร์ ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ที่ความดัน 5 บาร์มีการกระจายตัวของแก๊สโซลีนมากกว่าที่ 1 บาร์เล็กน้อย และเมื่อเพิ่มความดันเป็น 10 บาร์พบว่า ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อความดันสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของของเหลวภายในเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของของเหลวช้าลง การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้ได้รับพลังงานความร้อนน้อยลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือการแตกตัวของสารภายในจึงลดลง^[20] และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวของพอลิสไตรีนโดยไม่อัดแก๊สไฮโดรเจน พบว่า เมื่อไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจนนั้นให้ร้อยละผลิตภัณฑ์สูงกว่าเล็กน้อย แต่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนไม่ดีเท่าที่ควร

จากผลการทดลอง พบว่าความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1-5 บาร์ นั่นคือร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและร้อยละการกระจายของแก๊สโซลีนที่ได้ไม่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะที่ไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจน ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนให้ผลดีกว่า ดังนั้น ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ จึงเป็นความดันที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิสไตรีน

ใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.9 แสดงผลของความดันต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.10 แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.3 วิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนไธแล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนไธแล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ได้แก่ มีเทน (Methane: CH_4), อีเทน (Ethane: C_2H_6), โพรเพน (Propane: C_3H_8), บิวเทน (Butane: C_4H_{10}), เพนเทน (Pentane: C_5H_{12}), เฮกเซน (Hexane: C_6H_{14}) และเฮปเทน (Heptane: C_7H_{16})

4.3.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

พอลิไตรีนไธแล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่อุณหภูมิ 350 370 390 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 180 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.11 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ 370 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมีเทนเท่ากับ 86.40 อีเทน 2.63 โพรเพน 3.42 บิวเทน 4.04 เพนเทน 1.01 เฮกเซน 0.51 และเฮปเทน 1.99

4.3.2 ผลของเวลาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

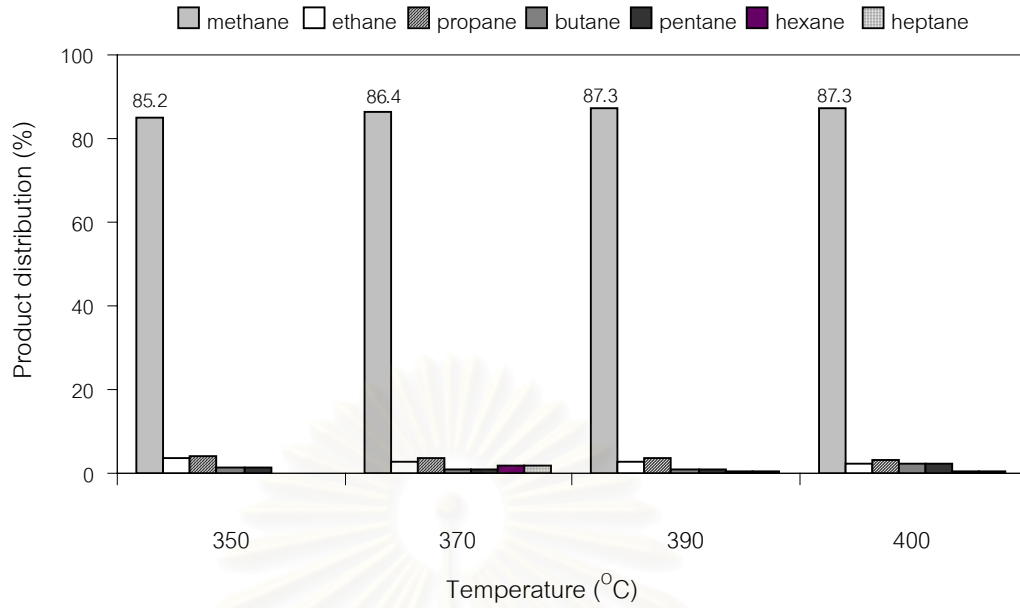
พอลิไตรีนไธแล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 90 120 150 และ 180 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยากับระบบเพิ่มขึ้น สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ 90 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมีเทนเท่ากับ 82.62 อีเทน 4.41 โพรเพน 3.03 บิวเทน 5.05 เพนเทน 3.48 เฮกเซน 1.14 และเฮปเทน 0.28

4.3.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

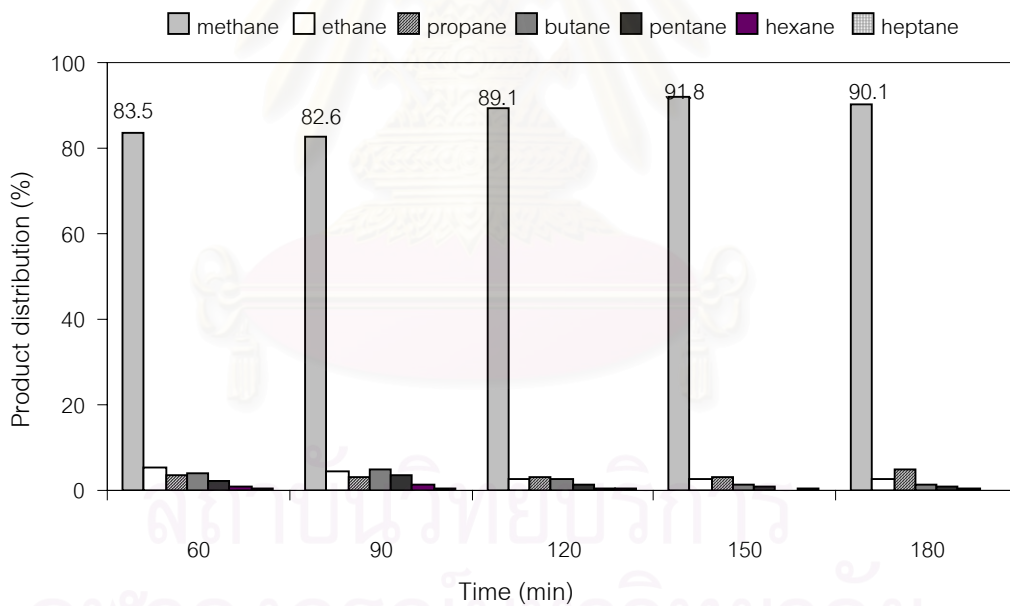
พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1, 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.13 พบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 0.1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าแก๊สมีเทนที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้มีขนาดเล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมีเทนเท่ากับ 88.18 อีเทน 4.01 โพรเพน 2.07 บิวเทน 3.01 เพนเทน 1.87 เฮกเซน 0.72 และเฮปเทน 0.14

4.3.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

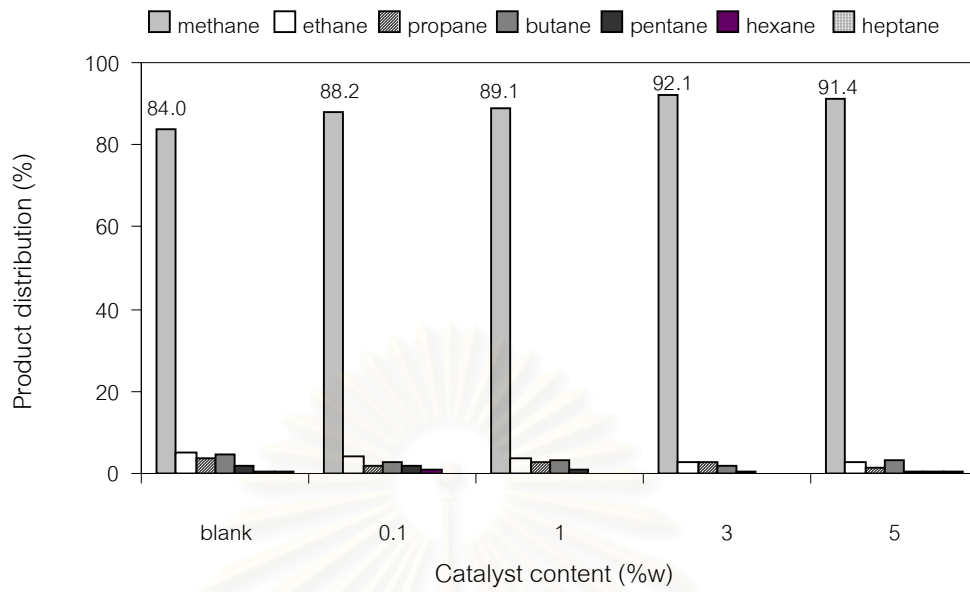
พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1, 5 และ 10 บาร์ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.14 พบว่า เมื่อไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทนที่ได้จะมีปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อมีการอัดแก๊สไฮโดรเจน อาจเนื่องมาจากแก๊สไฮโดรเจนมีส่วนช่วยในการแตกตัวแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลใหญ่ให้เล็กลง และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นถึง 10 บาร์ สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ความดัน 1 บาร์ซึ่งเป็นความดันที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมีเทนเท่ากับ 88.02 อีเทน 3.08 โพรเพน 3.82 บิวเทน 4.01 เพนเทน 0.42 เฮกเซน 0.64 และเฮปเทน 0.02



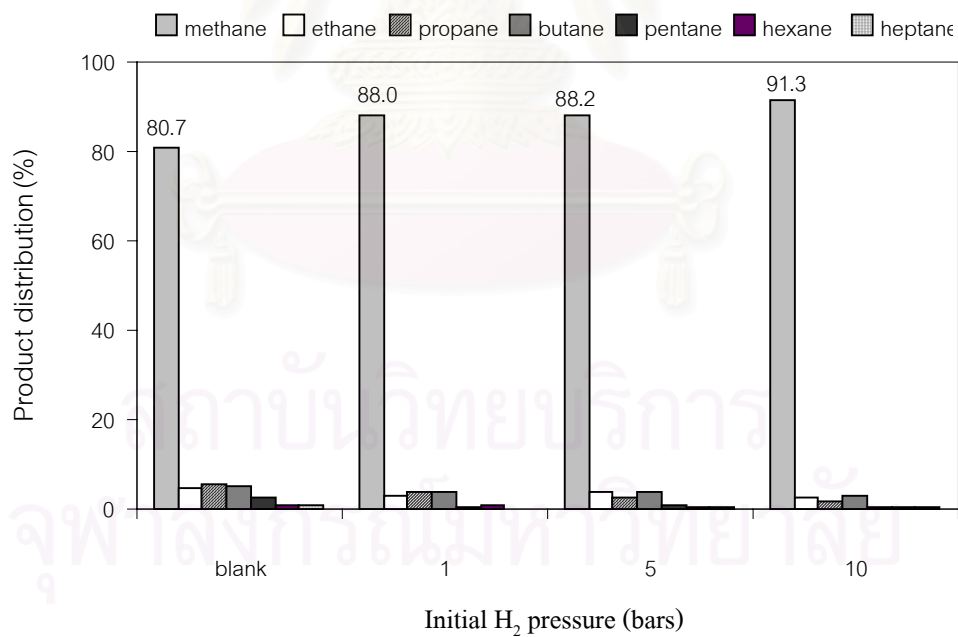
รูปที่ 4.11 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์



รูปที่ 4.12 แสดงผลของเวลาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปรอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดัน 5 บาร์



รูปที่ 4.13 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และความดัน 5 บาร์

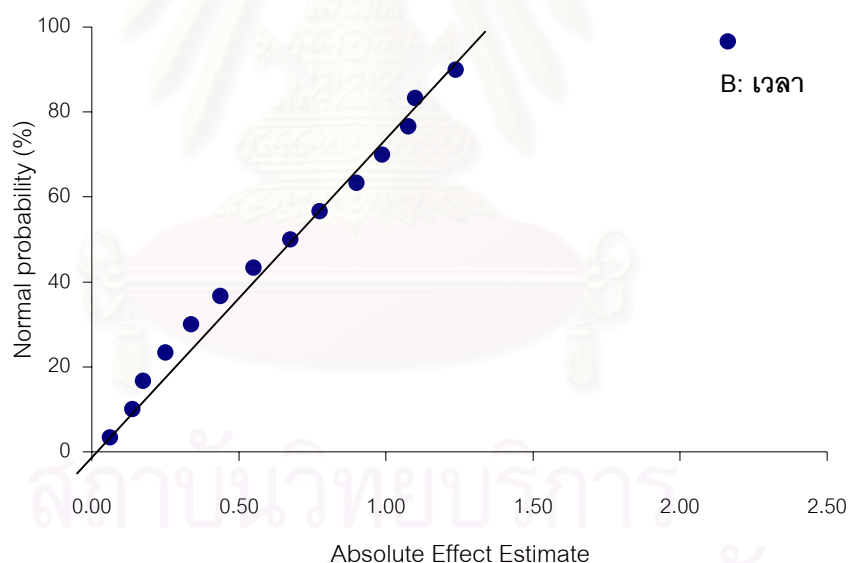


รูปที่ 4.14 แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.4 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการแตกตัวของพอลิไตรีนไฉ้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

4.4.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวของพอลิไตรีนไฉ้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

การแตกตัวของพอลิไตรีนไฉ้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^4 factorial design) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ต่อการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยการนำผลการทดลองที่ได้มาสร้าง normal probability plot จากรูปที่ 4.15 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา แสดงว่าเวลาเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยมีค่า F_0 ที่ได้จากการคำนวณ คือ 11.055 ซึ่งมากกว่า ค่า F_c คือ 9.65 ที่ความเชื่อมั่น 98% ทำให้สามารถยืนยันว่า เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.15 Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวของพอลิไตรีนไฉ้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

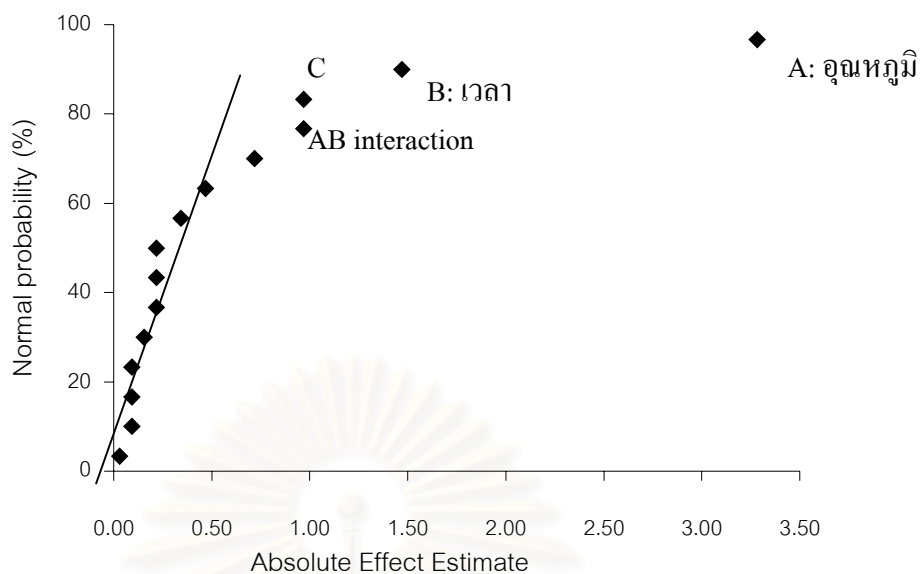
ตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

Source of Variance	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F _o
A: อุณหภูมิ	4.840	1	4.840	0.715
B: เวลา	74.823	1	74.823	11.055
C: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	15.603	1	15.603	2.305
D: ความดัน	24.503	1	24.503	3.620
Error	74.450	11	6.768	
Total	194.218	15		

ที่ความเชื่อมั่น 98 % ใช้ค่า $\alpha = 0.02$ ได้ค่า $F_{0.01, 1, 11} = 9.65$ (F_c)

4.4.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีน (Gasoline) จากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^4 factorial design) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่เกิดขึ้น โดยการนำผลการทดลองที่ได้มาสร้าง normal probability plot จากรูปที่ 4.16 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ อุณหภูมิ เวลา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.4 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยค่า F_0 ที่ได้จากการคำนวณ คือ 70.826 15.605 และ 6.637 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า ค่า F_c คือ 6.94 ที่ความเชื่อมั่น 95% เป็นการยืนยันว่า อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 4.16 และตารางที่ 4.4 ยังพบว่ามีผลของอันตรกิริยาระหว่างเวลาและอุณหภูมิซึ่งมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดขึ้นของแก๊สโซลีนเช่นกัน



รูปที่ 4.16 แสดง Normal Probability Plot ของร้อยละแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

Source of Variance	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	Fo
A:อุณหภูมิ	150.063	1	150.063	70.826
B:เวลา	33.063	1	33.063	15.605
C:ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	14.063	1	14.063	6.637
D:ความดัน	7.563	1	7.563	3.569
AB	14.0625	1	14.0625	6.637
Error	21.188	10	2.119	
Total	225.938	15		

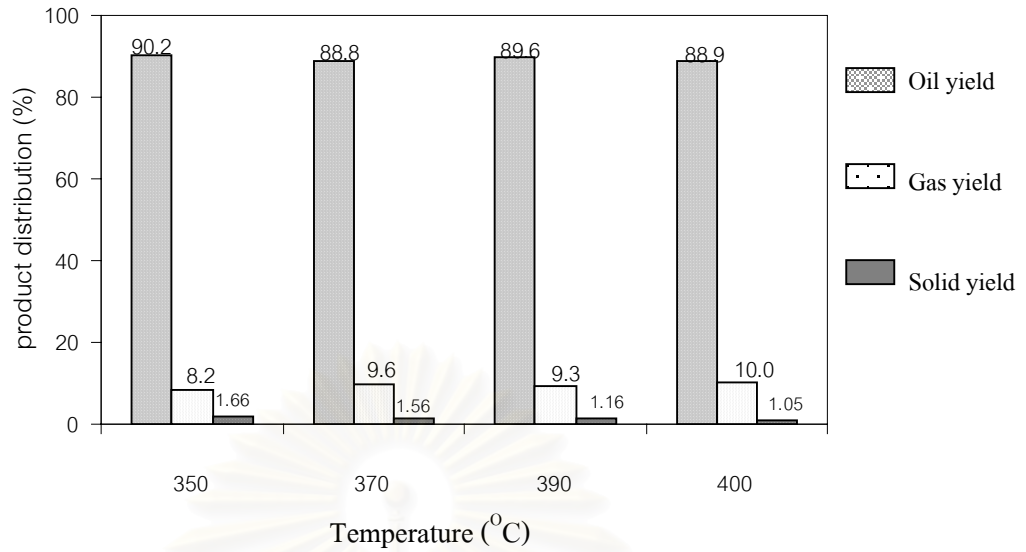
ที่ความเชื่อมั่น 95 % ใช้ค่า $\alpha = 0.05$ ได้ค่า $F_{0.025, 1, 10} = 6.94$ (F_c)

4.5 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ตาม ASTM D2887 เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light Gas Oil) แก๊สออยล์ (Gas Oil) และกากน้ำมันเบา (Long residue) และผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวพอลิไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

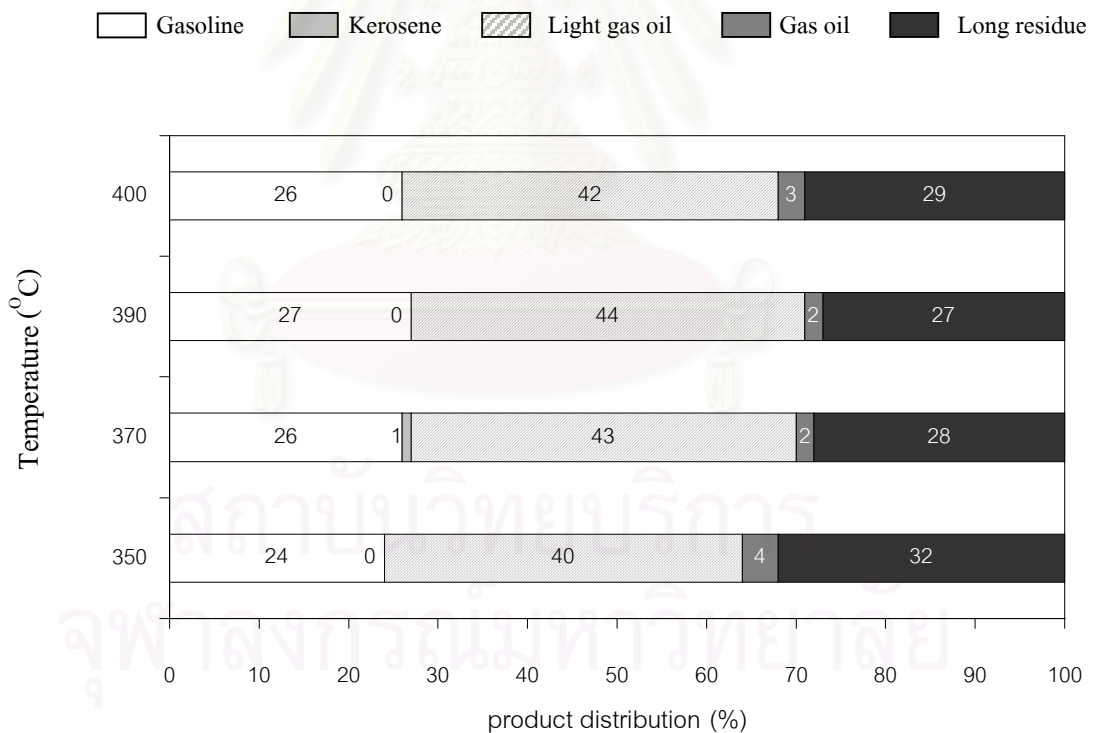
4.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

พอลิไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 350 370 390 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 180 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะลดลงเล็กน้อย ส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.18 พบว่า การสลายตัวของพอลิไตรีนจากสาร โมเลกุลใหญ่ เช่น กากน้ำมันหนัก (long residue) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลเล็กลง เช่น แก๊สโซลีน จะเพิ่มขึ้นในช่วง 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส (24 เป็น 26 %) เนื่องจากเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้น การแตกตัวของสารตั้งต้นเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางช่วงแก๊สออยล์เบา จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มมีบทบาท โดยไปทำการแตกตัวโมเลกุลขนาดกลางให้เป็นขนาดเล็กลงได้ผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สโซลีนมากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.18 ยังพบว่าการสลายตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 370-400 องศาเซลเซียส อาจเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมาก ทำให้เกิดแก๊สมาก ความดันภายในจึงสูงขึ้นจนถึงระดับที่สามารถไปประจันหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารภายใน การแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็นโมเลกุลเล็กจึงทำได้ลำบาก

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส พบว่าจากร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ 88.8 และการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาเช่น แก๊สโซลีน ที่ค่อนข้างสูงและไม่แตกต่างกับ 390 และ 400 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงน่าจะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ณ เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.17 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์

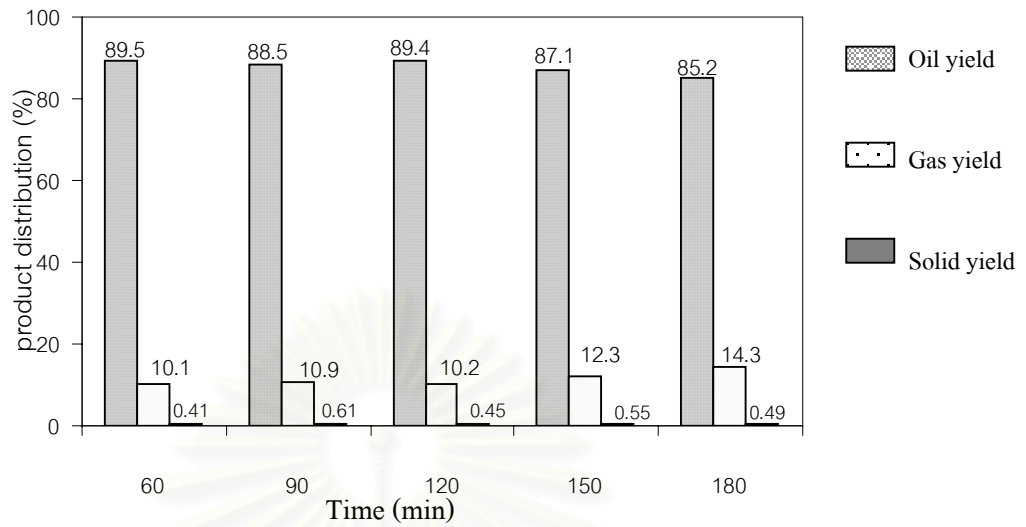


รูปที่ 4.18 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์

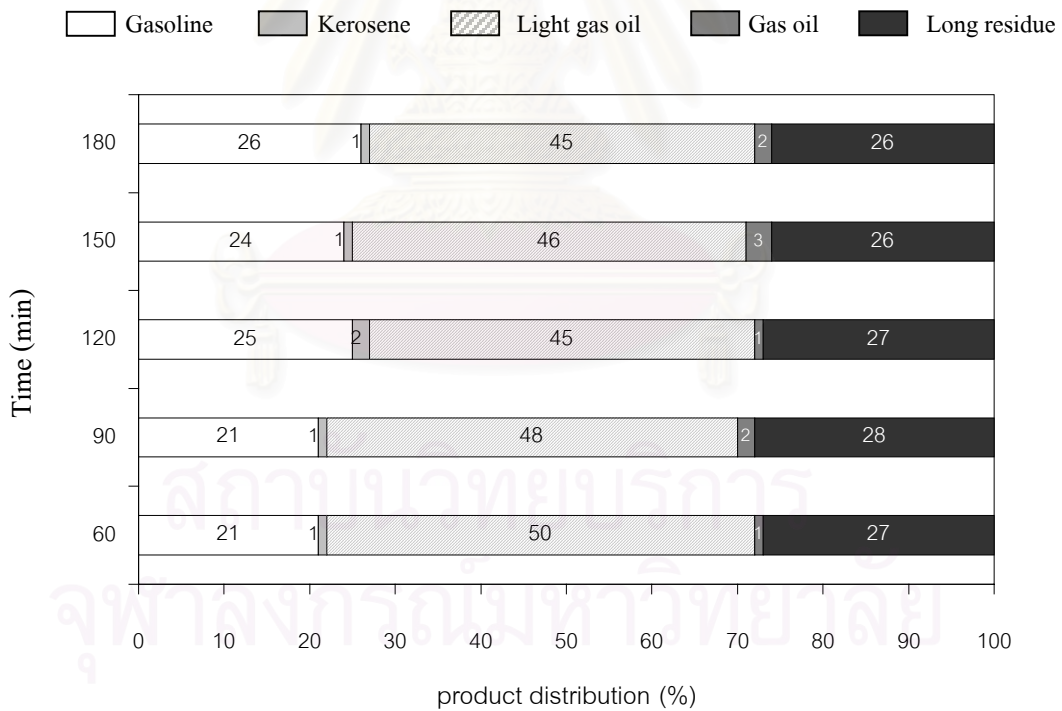
4.5.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 60 90 120 150 และ 180 นาที อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.19 พบว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะลดลง โดยเปลี่ยนเป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่ระบบเป็นเวลานาน ส่งผลให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเกิดการแตกตัวได้สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ส่วนโมเลกุลขนาดกลางและเล็กก็เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.20 พบว่าในช่วงเวลา 60-120 นาทีนั้น ร้อยละแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นและจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 120-180 นาที ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาเริ่มต้นนั้นปริมาณพอลิสไตรีนมีอยู่มากทำให้เห็นความแตกต่างของแก๊สโซลีนที่เกิดขึ้น หลังจาก 120 นาที การแตกตัวจะเริ่มเป็นการแตกตัวของสารโมเลกุลใหญ่เช่นถ่านน้ำมันหนักกลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและเล็ก และอาจมาจากเมื่อให้สารอยู่ในระบบเป็นเวลานาน สารไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นมาก ความดันภายในจึงสูงขึ้นจนถึงระดับที่สามารถไประงับหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารภายใน การแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็นโมเลกุลขนาดเล็กจึงทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นร้อยละแก๊สโซลีนที่ได้จึงไม่แตกต่างกันมากนัก

จากผลการทดลอง พิจารณาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 120 นาที พบว่าให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 89.4 และการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาเช่น แก๊สโซลีน ที่ค่อนข้างสูงและไม่แตกต่างกับการใช้เวลา 150-180 นาที ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 120 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.19 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์

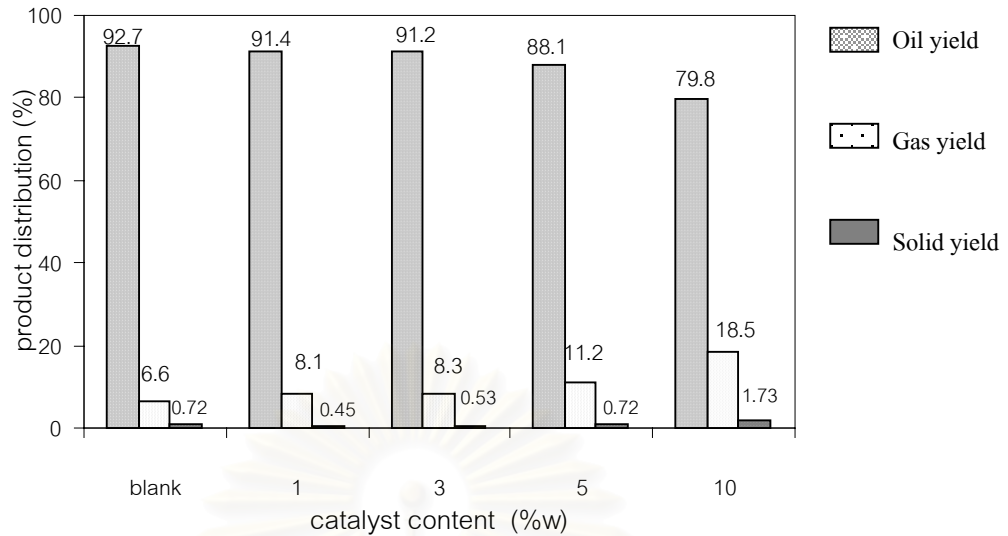


รูปที่ 4.20 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์

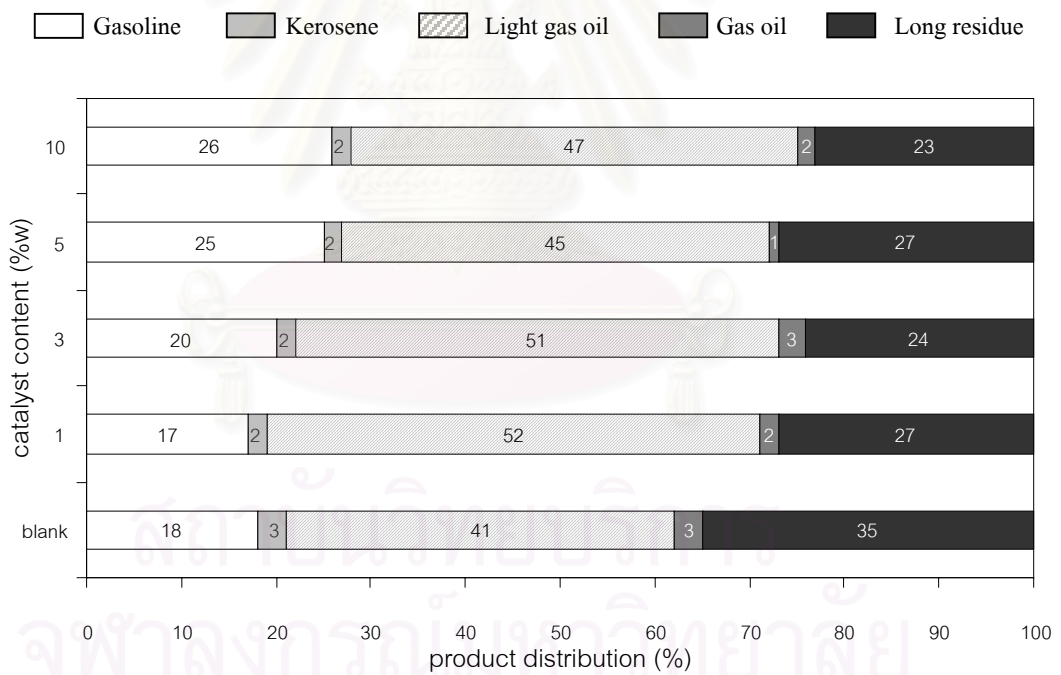
4.5.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 120 นาที อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.21 และ 4.22 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าลดลง แต่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือ active site สำหรับการแตกตัวสาร โมเลกุลใหญ่เช่นถ่านน้ำหนักให้เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงเช่นแก๊สโซลีนและแก๊สออลส์เบาเพิ่มขึ้น ในช่วง 1-5 เปอร์เซ็นต์นั้น พอลิสไตรีนมีปริมาณมากพอสำหรับแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่จะเป็นการแตกตัวสารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางเป็นขนาดเล็ก ทำให้เกิดเป็นแก๊สมากยิ่งขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวพอลิสไตรีนเมื่อมีการเติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนในการแตกตัวพอลิสไตรีนเป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีทั้ง active site และความร้อนที่ช่วยในการแตกตัวสารตั้งต้น ขณะที่เมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีเพียงความร้อนเท่านั้น ซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นถึงจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำกว่า 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ แต่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่ได้ค่อนข้างสูงกว่ามาก และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าได้ปริมาณน้ำมันที่ค่อนข้างสูงกว่า (~10 เปอร์เซ็นต์) และแก๊สโซลีนไม่แตกต่างกัน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาทีและความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.21 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ความดัน 5 บาร์

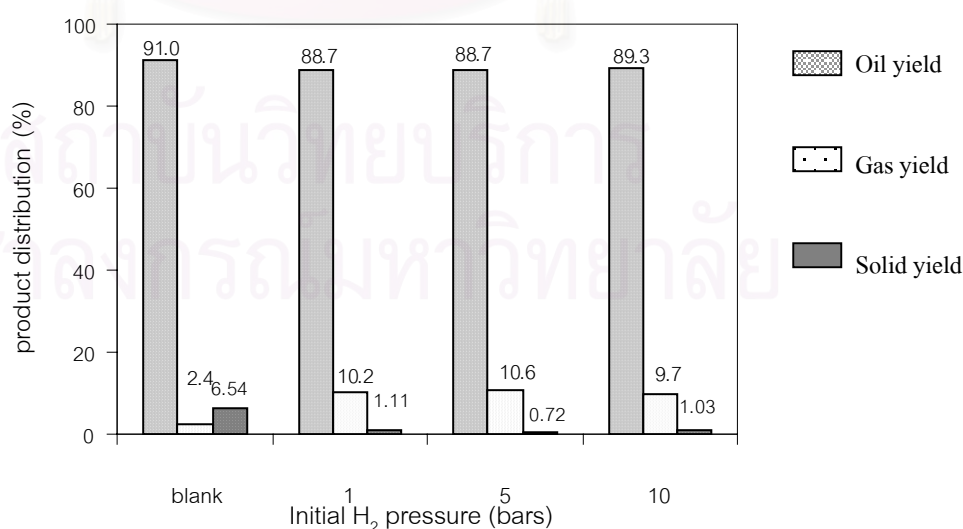


รูปที่ 4.22 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ความดัน 5 บาร์

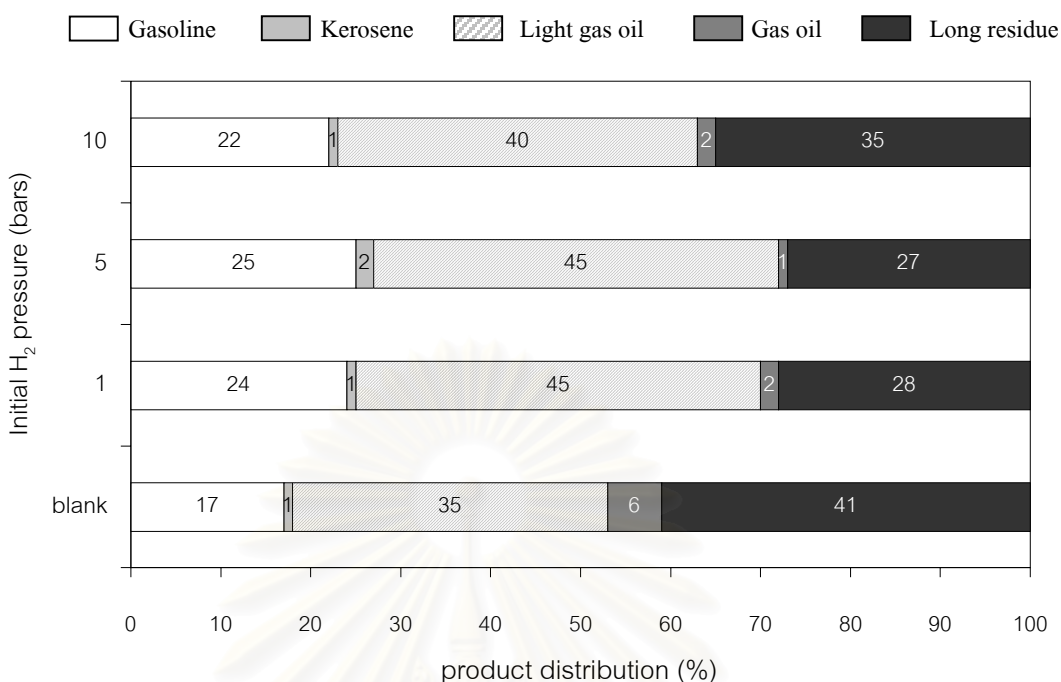
4.5.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยอัดแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นความดัน 1, 5, 10 บาร์และไม้อัดแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส โดยเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่า เมื่อเพิ่มความดันจาก 1 เป็น 5 บาร์ ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ที่ความดัน 5 บาร์มีการกระจายตัวของแก๊สโซลีนมากกว่าที่ 1 บาร์ เล็กน้อยและเมื่อเพิ่มความดันเป็น 10 บาร์ พบว่า ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อความดันสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของของเหลวภายในเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของของเหลวช้าลง การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้ได้รับพลังงานความร้อนน้อยลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือการแตกตัวของสารภายในจึงลดลง^[20] และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวของพอลิสไตรีน โดยไม้อัดแก๊สไฮโดรเจน พบว่า เมื่อไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจนนั้นให้ร้อยละผลิตภัณฑ์สูงกว่าเล็กน้อย แต่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนไม่ดีเท่าที่ควร

จากผลการทดลอง พบว่าความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 5 บาร์ นั่นคือร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและร้อยละการกระจายของแก๊สโซลีนที่ได้ไม่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะที่ไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจน ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนให้ผลดีกว่า ดังนั้น ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ จึงเป็นความดันที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.23 แสดงผลของความดันต่อร้อยละผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.24 แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.6 วิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวพอลิไทรินใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวพอลิไทรินใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ได้แก่ มีเทน (Methane: CH₄), อีเทน (Ethane: C₂H₆), โพรเพน (Propane: C₃H₈), บิวเทน (Butane: C₄H₁₀), เพนเทน (Pentane: C₅H₁₂), เฮกเซน (Hexane: C₆H₁₄) และเฮปเทน (Heptane: C₇H₁₆)

4.6.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

พอลิไทรินใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ที่อุณหภูมิ 350 370 390 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 180 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.25 พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น

มีเทน โดยที่ 370 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมิเทนเท่ากับ 87.85 อีเทน 3.20 โพรเพน 2.67 บิวเทน 3.47 เพนเทน 1.83 เฮกเซน 0.62 และเฮปเทน 0.36

4.6.2 ผลของเวลาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 90 120 150 และ 180 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.26 พบว่า เมื่อให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยากับระบบเพิ่มขึ้น สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ 120 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมิเทนเท่ากับ 88.89 อีเทน 1.93 โพรเพน 2.95 บิวเทน 3.44 เพนเทน 1.97 เฮกเซน 0.62 และเฮปเทน 0.51

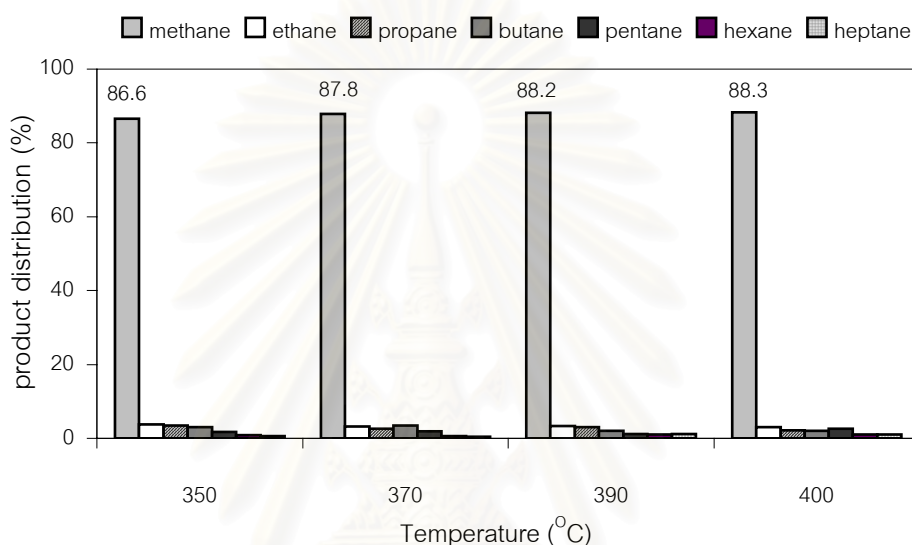
4.6.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 120 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.27 พบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าแก๊สมิเทนที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้มีขนาดเล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมิเทนเท่ากับ 92.72 อีเทน 2.25 โพรเพน 1.74 บิวเทน 2.02 เพนเทน 0.78 เฮกเซน 0.31 และเฮปเทน 0.19

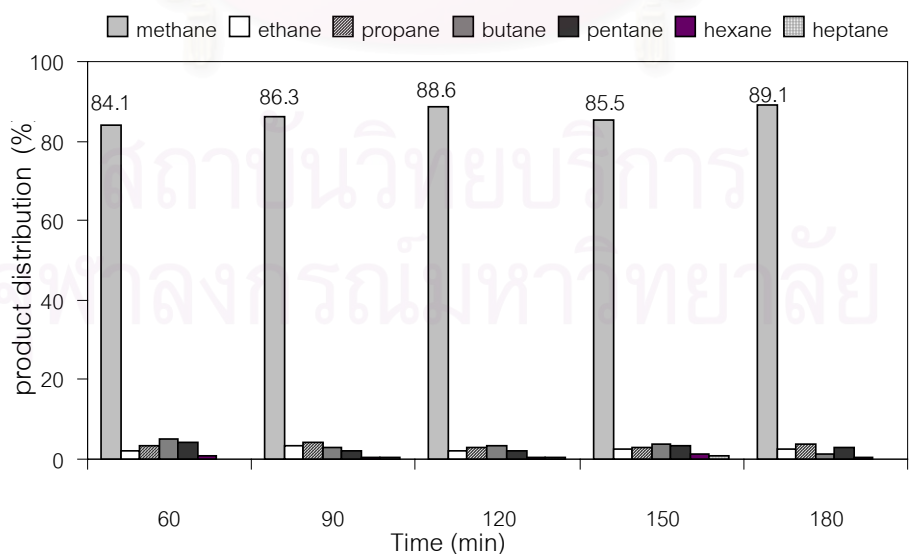
4.6.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1, 5 และ 10 บาร์ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิด

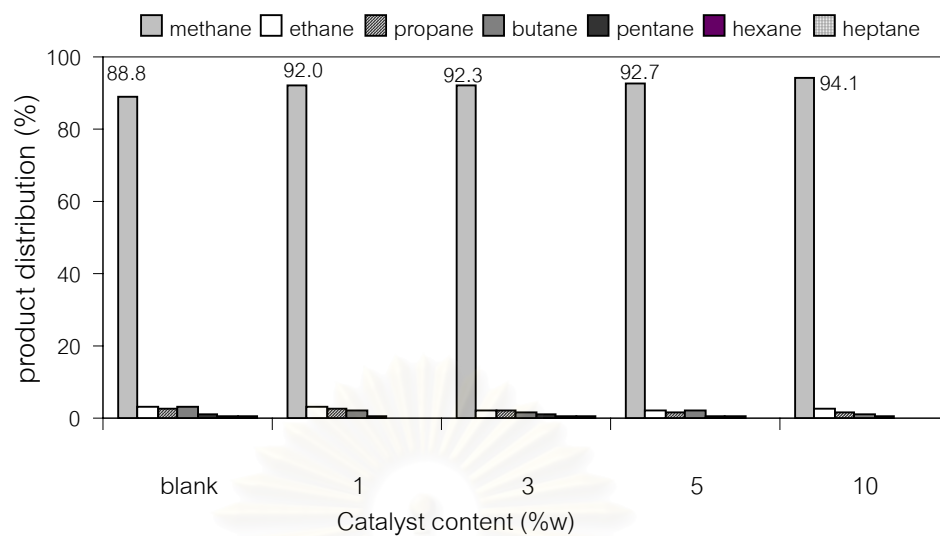
ปฏิกิริยา 120 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.28 พบว่า เมื่อไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจน แก๊สมีเทนที่ได้จะมีปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อมีการอัดแก๊สไฮโดรเจน อาจเนื่องมาจากแก๊สไฮโดรเจนมีส่วนช่วยในการแตกตัวแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลใหญ่ให้เล็กลง และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นถึง 10 บาร์ สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ความดัน 1 บาร์ ซึ่งเป็นความดันที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมีเทนเท่ากับ 90.31 อีเทน 2.89 โพรเพน 2.31 บิวเทน 2.11 เพนเทน 1.87 เฮกเซน 0.32 และเฮปเทน 0.19



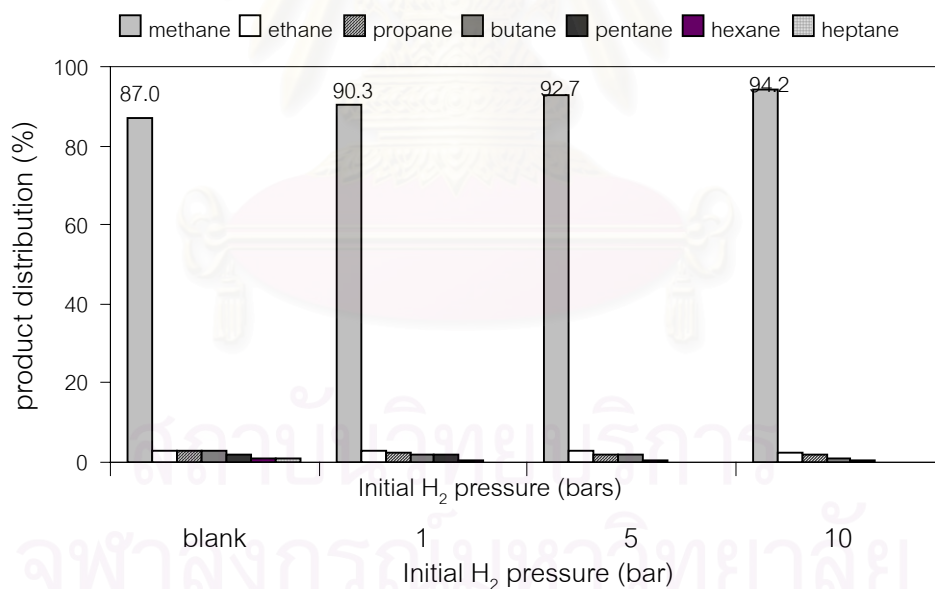
รูปที่ 4.25 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 120 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์



รูปที่ 4.26 แสดงผลของเวลาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์และความดัน 5 บาร์



รูปที่ 4.27 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที และความดัน 5 บาร์

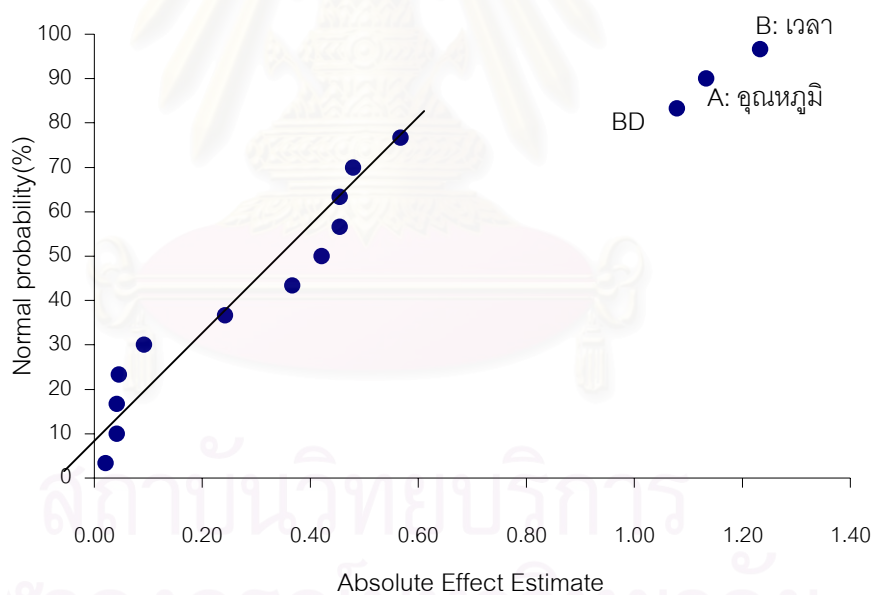


รูปที่ 4.28 แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 120 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.7 ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการแตกตัวพอลิไตรีนไซ้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{CoMo/Al}_2\text{O}_3$

4.7.1 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวพอลิไตรีนไซ้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Co-Mo/Al}_2\text{O}_3$

การแตกตัวของพอลิไตรีนไซ้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลว ได้ทำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2^4 factorial design) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยการนำผลการทดลองที่ได้มาสร้าง normal probability plot จากรูปที่ 4.29 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาและอุณหภูมิ แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.5 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยมีค่า F_0 ที่ได้จากการคำนวณ คือ 14.967 และ 12.634 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามากกว่า ค่า F_c คือ 10.04 ที่ความเชื่อมั่น 98% ทำให้สามารถยืนยันว่า เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและอุณหภูมิ เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.29 Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนไซ้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{Co-Mo/Al}_2\text{O}_3$

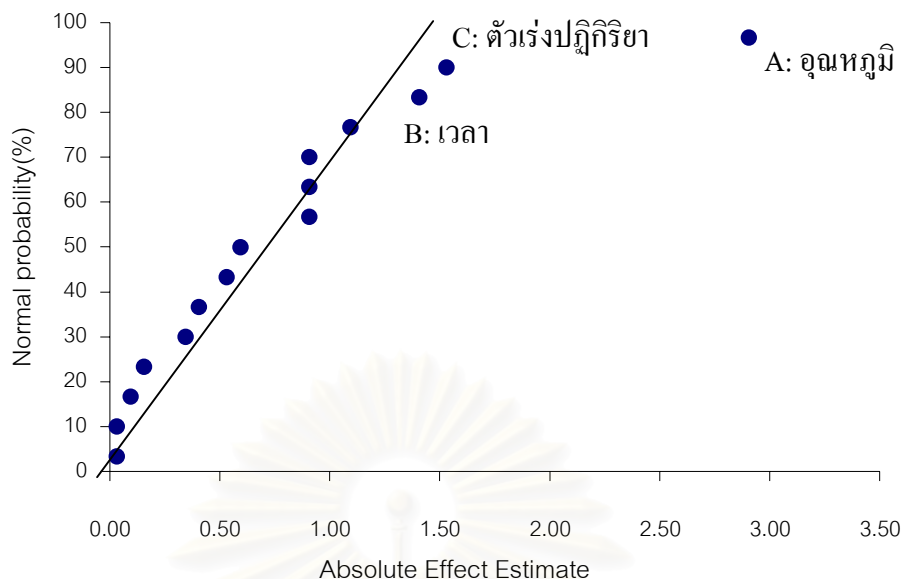
ตารางที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

Source of Variance	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	Fo
A(อุณหภูมิ)	20.476	1	20.476	12.634
B(เวลา)	24.256	1	24.256	14.967
C(ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)	3.331	1	3.331	2.055
D(ความดัน)	2.176	1	2.176	1.342
BD	18.706	1	18.706	11.542
Error	16.206	10	1.621	
Total	85.149	15		

ที่ความเชื่อมั่น 98 % ใช้ค่า $\alpha = 0.02$ ได้ค่า $F_{0.01, 1, 10} = 10.04$ (F_c)

4.7.2 การศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีน (Gasoline) จากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

จากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ (2⁴ factorial design) ทำการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่เกิดขึ้น โดยการนำผลการทดลองที่ได้มาสร้าง normal probability plot จากรูปที่ 4.30 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ อุณหภูมิ เวลา และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งแสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.6 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยค่า F_0 ที่ได้จากการคำนวณ คือ 24.501 5.737 และ 6.802 ตามลำดับ มีค่ามากกว่า ค่า F_c คือ 4.84 ที่ความเชื่อมั่น 90% และค่ากว่า ค่า F_c คือ 6.72 ที่ความเชื่อมั่น 95% ซึ่งแสดงว่า อุณหภูมิ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการกระจายตัวของแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.30 แสดง Normal Probability Plot ของร้อยละแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิซิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

ตารางที่ 4.6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละแก๊สโซลีนจากผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิซิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

Source of Variance	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	Fo
A: อุณหภูมิ	135.141	1	135.141	24.501
B: เวลา	31.641	1	31.641	5.737
C: ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	37.516	1	37.516	6.802
D: ความดัน	13.141	1	13.141	2.382
Error	60.672	11	5.516	
Total	278.109	15		

ที่ความเชื่อมั่น 95 % ใช้ค่า $\alpha = 0.05$ ได้ค่า $F_{0.025, 1, 11} = 6.72$ (F_c)

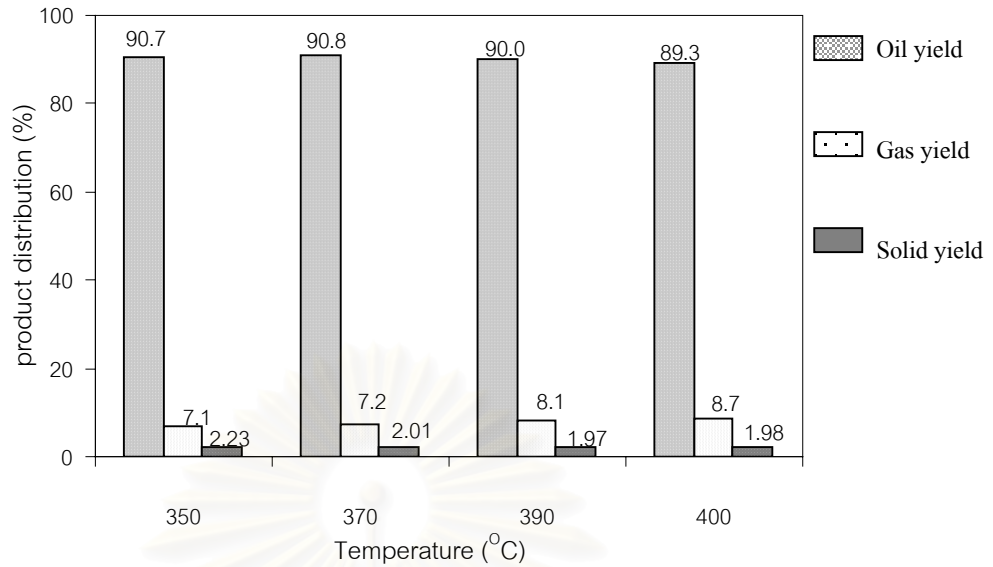
ที่ความเชื่อมั่น 90 % ใช้ค่า $\alpha = 0.10$ ได้ค่า $F_{0.05, 1, 11} = 4.84$ (F_c)

4.8 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ ตาม ASTM D2887 เป็นแก๊สโซลีน (Gasoline) เคโรซีน (Kerosene) แก๊สออยล์เบา (Light Gas Oil) แก๊สออยล์ (Gas Oil) และกากน้ำมันเบา (Long residue) และผลิตภัณฑ์แก๊สที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวพอลิไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

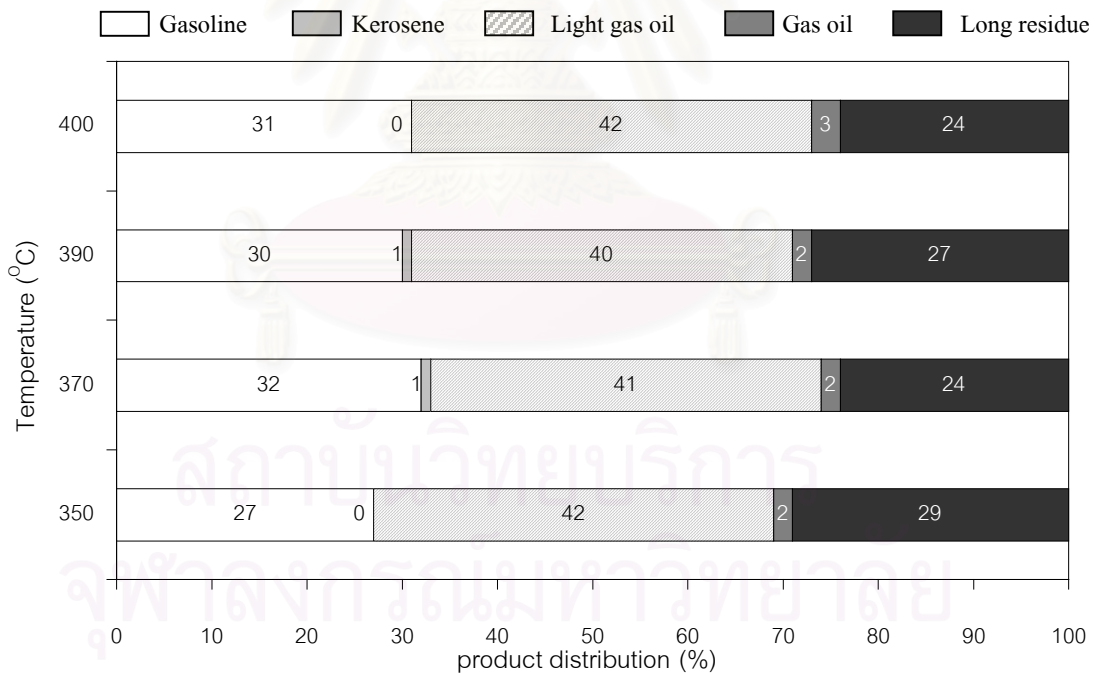
4.8.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

พอลิไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิ 350 370 390 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 180 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.31 พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จะลดลงเล็กน้อย ส่วนร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.32 พบว่า การสลายตัวของพอลิไตรีนจากสาร โมเลกุลใหญ่ เช่น กากน้ำมันหนัก (long residue) เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลเล็กลง เช่น แก๊สโซลีน จะเพิ่มขึ้นในช่วง 350 ถึง 370 องศาเซลเซียส (27 เป็น 32 %) เนื่องจากเมื่อเริ่มทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงขึ้น การแตกตัวของสารตั้งต้นเป็นสายโซ่โมเลกุลขนาดกลางช่วงแก๊สออยล์เบา จากนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเริ่มมีบทบาท โดยไปทำการแตกตัวโมเลกุลขนาดกลางให้เป็นขนาดเล็กลงได้ผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สโซลีนมากยิ่งขึ้น จากรูปที่ 4.32 ยังพบว่าการสลายตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 370-400 องศาเซลเซียส อาจเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมาก ทำให้เกิดแก๊สมาก ความดันภายในจึงสูงขึ้นจนถึงระดับที่สามารถไปประจับหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารภายใน การแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็นโมเลกุลเล็กจึงทำได้ลำบาก

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส พบว่าจากร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ 90.8 และการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาเช่น แก๊สโซลีน ที่ค่อนข้างสูง และไม่แตกต่างกับ 390 และ 400 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงน่าจะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ณ เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.31 แสดงผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์

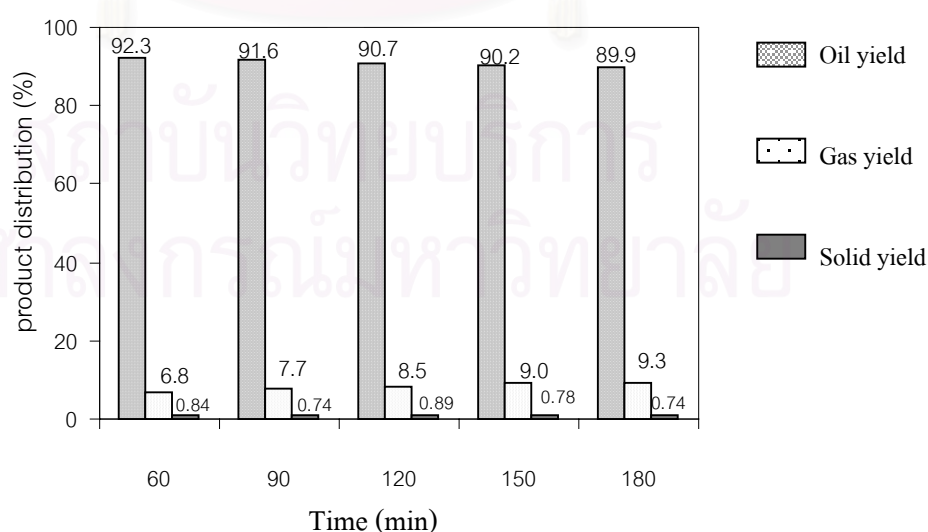


รูปที่ 4.32 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน เวลา 180 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์

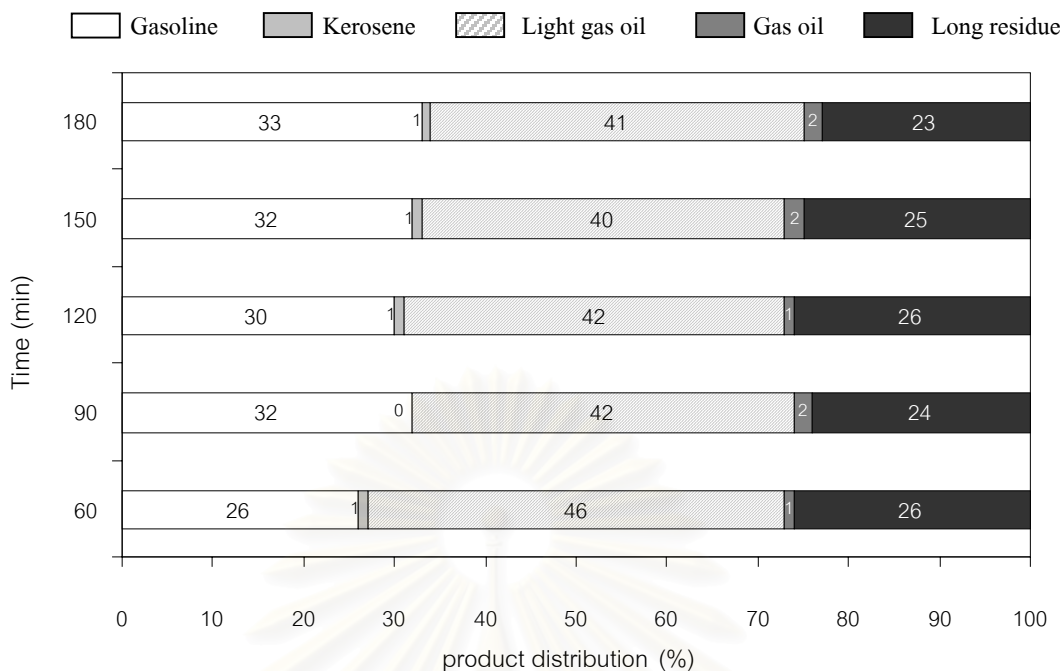
4.8.2 ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 60 90 120 150 และ 180 นาที อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.33 พบว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีแนวโน้มลดลง โดยเปลี่ยนเป็นแก๊สเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากการให้ความร้อนแก่ระบบเป็นเวลานาน ส่งผลให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวเกิดการแตกตัวได้สารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ส่วนโมเลกุลขนาดกลางและเล็กก็เกิดการแตกตัวเป็นแก๊สเพิ่มขึ้น จากรูปที่ 4.34 พบว่าในช่วงเวลา 60-90 นาทีนั้น ร้อยละแก๊สโซลีนเพิ่มขึ้นและจะเริ่มมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 90-180 นาที ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงเวลาเริ่มต้นนั้นปริมาณพอลิสไตรีนมีอยู่มากทำให้เห็นความแตกต่างของแก๊สโซลีนที่เกิดขึ้น หลังจาก 90 นาที การแตกตัวจะเริ่มเป็นการแตกตัวของสารโมเลกุลใหญ่เช่นกากน้ำมันหนักกลายเป็นโมเลกุลขนาดกลางและเล็ก และอาจมาจากเมื่อให้สารอยู่ในระบบเป็นเวลานาน สารไฮโดรคาร์บอนแตกตัวเป็นมาก ความดันภายในจึงสูงขึ้นจนถึงระดับที่สามารถไประงับหรือขัดขวางการเคลื่อนที่ของสารภายใน การแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลเป็นโมเลกุลขนาดเล็กลงจึงทำได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นร้อยละแก๊สโซลีนที่ได้จึงไม่แตกต่างกันมากนัก

จากผลการทดลอง พิจารณาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 90 นาที พบว่าให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 91.6 และการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันเบาเช่น แก๊ส โซลีน ที่ค่อนข้างสูงและไม่แตกต่างกับการใช้เวลา 120-180 นาที ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.33 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์

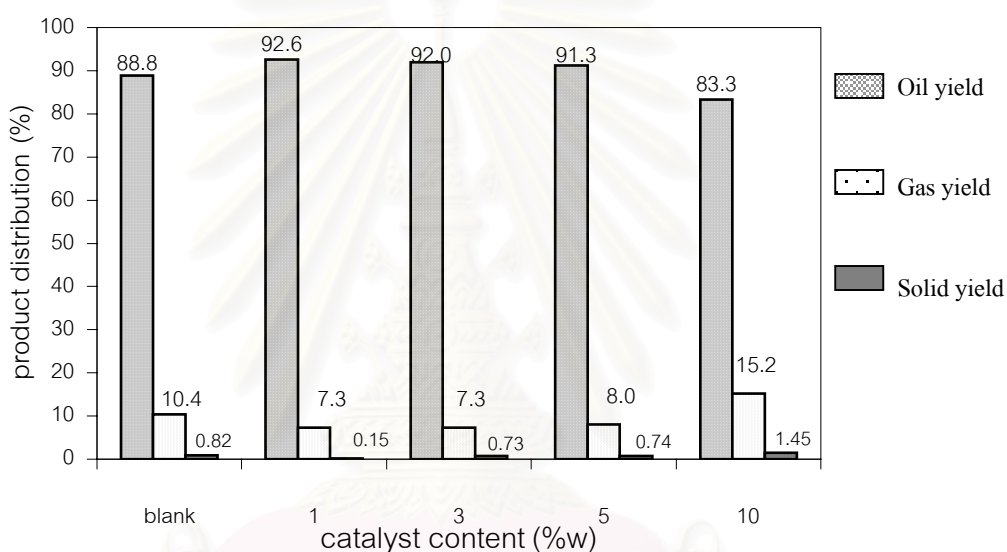


รูปที่ 4.34 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์ ความดัน 5 บาร์

4.8.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

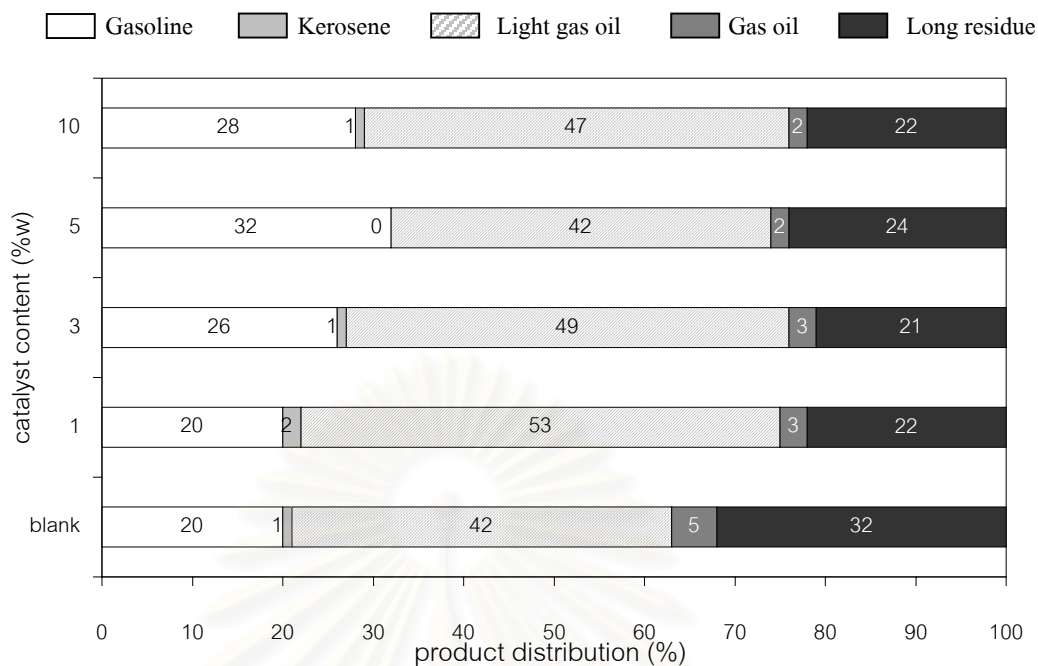
พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเป็น 90 นาที อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.35 และ 4.36 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีค่าลดลง แต่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนเพิ่มสูงขึ้น และมีแนวโน้มคงที่ในช่วง 5-10 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวหรือ active site สำหรับการแตกตัวสาร โมเลกุลใหญ่เช่นกาน้ำมันหนักให้เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงเช่นแก๊สโซลีนและแก๊สออล์เบาเพิ่มขึ้น ในช่วง 1-5 เปอร์เซ็นต์นั้น พอลิสไตรีนมีปริมาณมากพอสำหรับแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 เปอร์เซ็นต์ ส่วนใหญ่จะเป็นการแตกตัวสารไฮโดรคาร์บอนขนาดกลางเป็นขนาดเล็ก ทำให้เกิดเป็นแก๊สมากยิ่งขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวพอลิสไตรีนเมื่อมีการเติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีส่วนในการแตกตัวพอลิสไตรีนเป็นอย่างมาก เนื่องจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้นมีทั้ง active site และความร้อนที่ช่วยในการแตกตัวสารตั้งต้น ขณะที่เมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะมีเพียงความร้อนเท่านั้น ซึ่งอาจต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นถึงจะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อาจให้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันต่ำกว่า 1 และ 3 เปอร์เซ็นต์ แต่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่ได้ค่อนข้างสูงกว่ามาก และเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าได้ปริมาณน้ำมันที่ค่อนข้างสูงกว่า (11 เปอร์เซ็นต์) และแก๊สโซลีนไม่แตกต่างกัน ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา CoMo/Al₂O₃ ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาทีและความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์



รูปที่ 4.35 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความดัน 5 บาร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



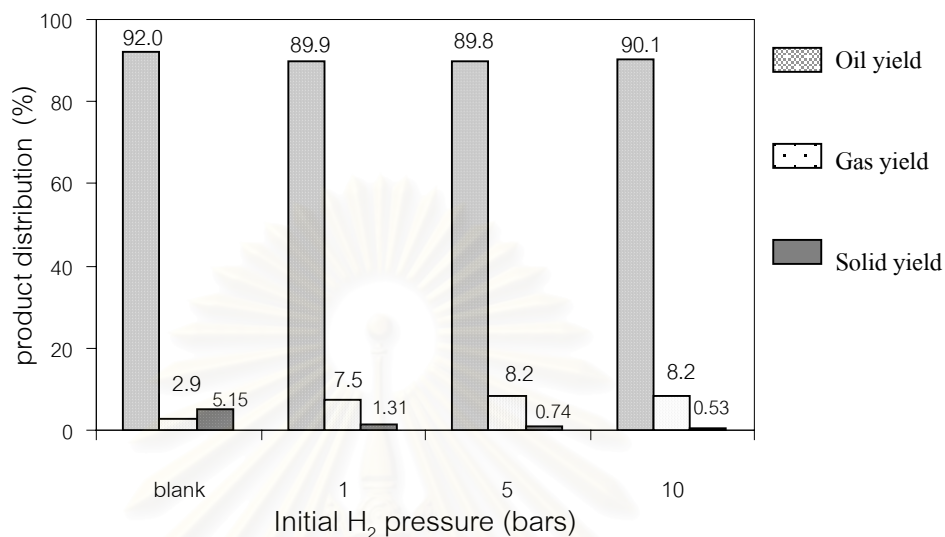
รูปที่ 4.36 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ความดัน 5 บาร์

4.8.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมัน

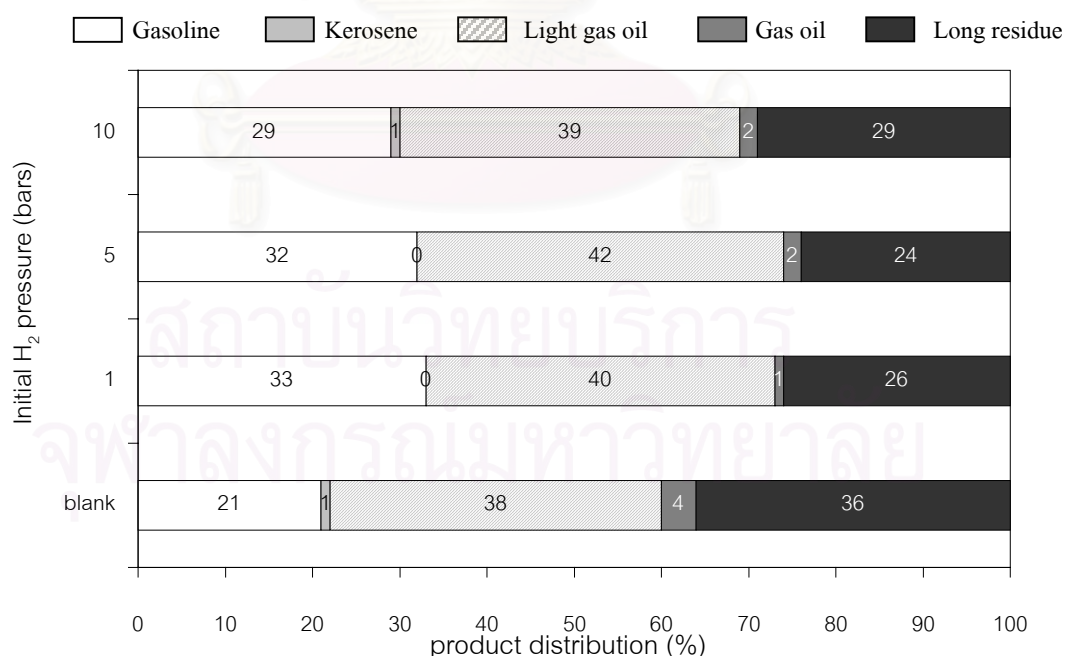
พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ โดยอัดแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้นความดัน 1, 5, 10 บาร์และไม้อัดแก๊สไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส โดยเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์ จากรูปที่ 4.37 และ 4.38 พบว่า เมื่อเพิ่มความดันจาก 1 เป็น 5 บาร์ ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก ที่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนลดลงเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มความดันเป็น 10 บาร์ พบว่า ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันเพิ่มขึ้นเล็กน้อย การกระจายตัวของแก๊สโซลีนที่ได้มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเมื่อความดันสูงขึ้น ทำให้ความหนืดของของเหลวภายในเพิ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของของเหลวช้าลง การถ่ายโอนความร้อนภายในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้ได้รับพลังงานความร้อนน้อยลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาหรือการแตกตัวของสารภายในจึงลดลง^[20] และเมื่อทำการเปรียบเทียบการแตกตัวของพอลิสไตรีน โดยไม้อัดแก๊สไฮโดรเจน พบว่า เมื่อไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจนนั้นให้ร้อยละผลิตภัณฑ์สูงกว่าเล็กน้อย แต่การกระจายตัวของแก๊สโซลีนไม่ดีเท่าที่ควร

จากผลการทดลอง พบว่าความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 1 ถึง 5 บาร์ นั่นคือร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและร้อยละการกระจายของแก๊สโซลีนที่ได้ไม่แตกต่างกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับภาวะที่ไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจน ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊สโซลีนให้ผลดีกว่า

ดังนั้น ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1 บาร์ จึงเป็นความดันที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิไธรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ณ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.37 แสดงผลของความดันต่อร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์โดยรวม ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.38 แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.9 วิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนไซ้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรีนไซ้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ได้แก่ มีเทน (Methane: CH₄), อีเทน (Ethane: C₂H₆), โพรเพน (Propane: C₃H₈), บิวเทน (Butane: C₄H₁₀), เพนเทน (Pentane: C₅H₁₂), เฮกเซน (Hexane: C₆H₁₄) และเฮปเทน (Heptane: C₇H₁₆)

4.9.1 ผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

พอลิไตรีนไซ้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิ 350 370 390 และ 400 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 180 นาที ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.39 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ 370 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมีเทนเท่ากับ 85.12 อีเทน 3.99 โพรเพน 3.62 บิวเทน 2.46 เพนเทน 2.72 เฮกเซน 1.69 และเฮปเทน 0.42

4.9.2 ผลของเวลาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

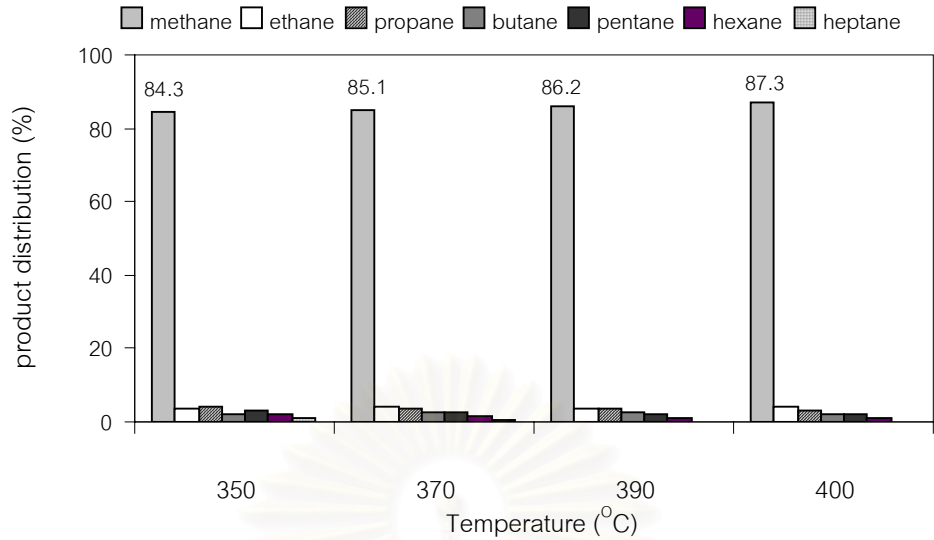
พอลิไตรีนไซ้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 90 120 150 และ 180 นาที ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.40 พบว่าเมื่อให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยากับระบบเพิ่มขึ้น สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิสูงช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้เล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ 120 นาที ซึ่งเป็นเวลาที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมีเทนเท่ากับ 81.01 อีเทน 3.93 โพรเพน 1.32 บิวเทน 4.91 เพนเทน 4.67 เฮกเซน 1.95 และเฮปเทน 2.21

4.9.3 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

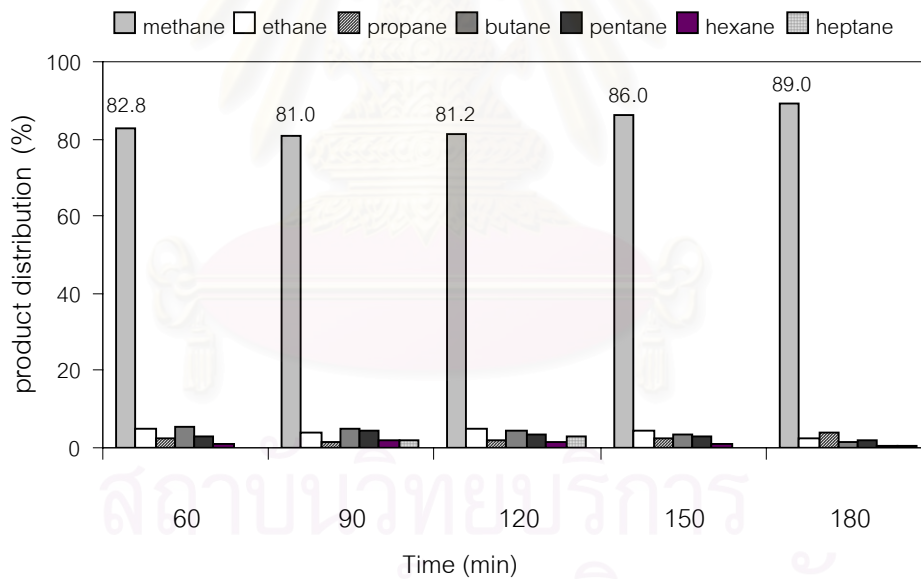
พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ โดยใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 1, 3, 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที และความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 5 บาร์ จากรูปที่ 4.41 พบว่า เมื่อเติมตัวเร่งปฏิกิริยา สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กจะเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา และเมื่อเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 1 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าแก๊สมิเทนที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกตัวโมเลกุลสารประกอบไฮโดรคาร์บอนให้มีขนาดเล็กลง แก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมิเทนเท่ากับ 85.68 อีเทน 4.14 โพรเพน 2.88 บิวเทน 3.01 เพนเทน 2.56 เฮกเซน 1.02 และเฮปเทน 0.71

4.9.4 ผลของความดันต่อการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์แก๊ส

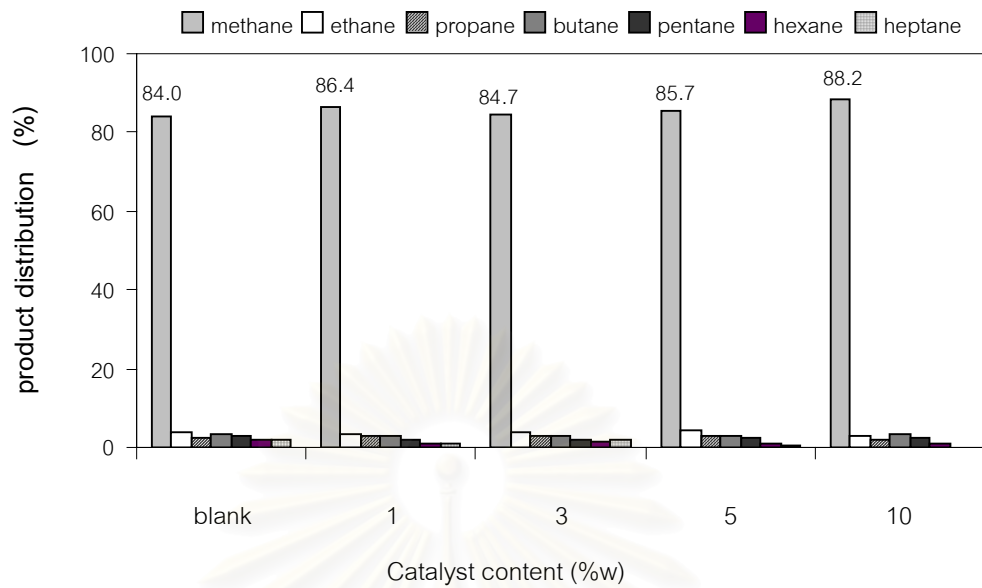
พอลิสไตรีนใช้แล้วผ่านกระบวนการแตกตัวบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 1, 5 และ 10 บาร์ อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 90 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.42 พบว่า เมื่อไม่มีการอัดแก๊สไฮโดรเจน แก๊สมิเทนที่ได้จะมีปริมาณที่น้อยกว่าเมื่อมีการอัดแก๊สไฮโดรเจน อาจเนื่องมาจากแก๊สไฮโดรเจนมีส่วนช่วยในการแตกตัวแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดโมเลกุลใหญ่ให้เล็กลง และเมื่อความดันเพิ่มขึ้นถึง 10 บาร์ สัดส่วนของแก๊สไฮโดรคาร์บอนขนาดเล็กก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่ได้เป็น มีเทน โดยที่ความดัน 1 บาร์ซึ่งเป็นความดันที่เหมาะสมต่อการกระจายผลิตภัณฑ์น้ำมัน ภายใต้ภาวะการทดลองข้างต้น ได้ร้อยละของแก๊สมิเทนเท่ากับ 84.81 อีเทน 4.83 โพรเพน 3.25 บิวเทน 3.48 เพนเทน 2.91 เฮกเซน 0.57 และเฮปเทน 0.16



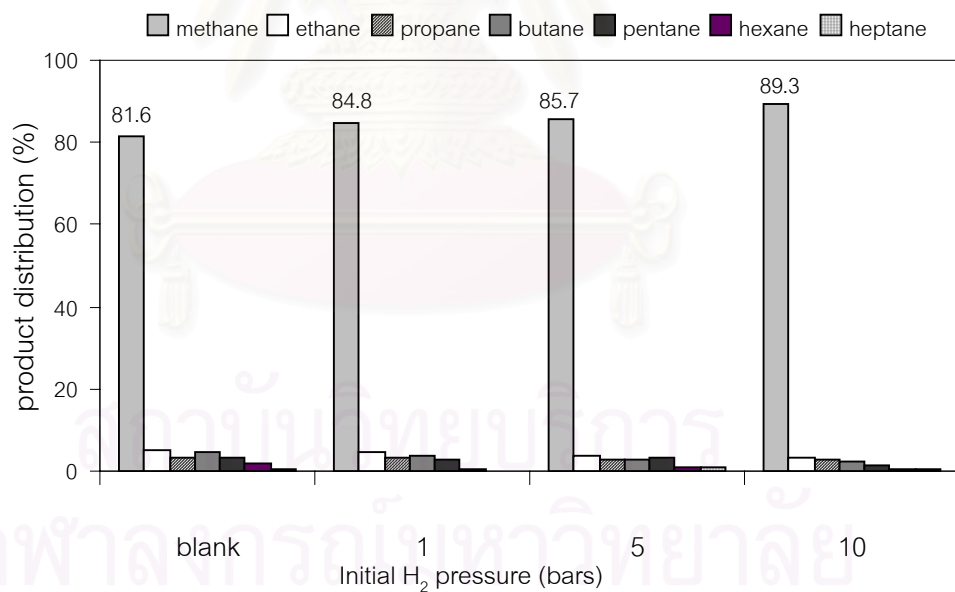
รูปที่ 4.39 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ความดัน 5 บาร์



รูปที่ 4.40 แสดงผลของเวลาต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและความดัน 5 บาร์



รูปที่ 4.41 แสดงผลของตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ ต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที และความดัน 5 บาร์



รูปที่ 4.42 แสดงผลของความดันต่อการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์แก๊ส ที่อุณหภูมิ 370 องศาเซลเซียส เวลา 90 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

4.10 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณสารเคมีหลักที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al₂O₃ ณ ภาวะที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.7 แสดงร้อยละของผลิตภัณฑ์สารเคมีหลักที่เกิดจากแตกตัวพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

	HZSM-5	เหล็กบนถ่านกัมมันต์	Co-Mo/Al ₂ O ₃
สภาวะที่เหมาะสม			
อุณหภูมิ	370 °C	370 °C	370 °C
เวลา	90 min	120 min	90 min
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	0.1 %w	5 %w	5 %w
ความดัน	1 bar	1 bar	1 bar
ผลิตภัณฑ์สารเคมีหลัก			
เอทิลเบนซีน	38.039	45.582	53.765
คิวมีน	14.417	21.664	22.727
โทลูอีน	18.597	18.576	14.537
สไตรีน	5.284	3.716	0.716
อื่นๆ	23.663	10.462	8.254

การแตกตัวพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด เมื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณสารเคมีที่สภาวะการทดลองที่เหมาะสม จากตารางที่ 4.7 พบว่า ผลิตภัณฑ์สารเคมีหลักที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนบนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิด เป็น เอทิลเบนซีน คิวมีน โทลูอีน และสไตรีน โดยการแตกตัวพอลิสไตรีนบน Co-Mo/Al₂O₃ ให้เอทิลเบนซีนและคิวมีน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่สูงกว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์และ HZSM-5 อาจเนื่องมาจาก Co-Mo/Al₂O₃ นั้นมีโลหะทรานซิชัน Co²⁺ ซึ่งมีความสามารถรับและถ่ายเทอิเล็กตรอนจากสารตั้งต้นได้ดีเนื่องจากมีพลังงานการถ่ายเทอิเล็กตรอนค่อนข้างสูง (work function > 4.5 eV)^[10] และสูงกว่า Fe³⁺ อีกทั้งยังมีตัว promotor (Mo³⁺) ที่จะช่วยในการรับอิเล็กตรอนจากสารตั้งต้นเพื่อนำมาเกิดปฏิกิริยาต่อไป ส่วนเหล็กบนถ่านกัมมันต์ให้ผลที่ดีกว่า HZSM-5 อาจเนื่องมาจากลักษณะรูพรุนของทั้ง 2 ตัวที่แตกต่างกัน นั่นคือ HZSM-5 นั้นมีรูพรุนเล็กมาก (~0.55 nm)^[29] พอลิสไตรีนไม่สามารถเข้าไปภายในได้ ส่วนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์นั้นเกิดจากการเตรียมแบบฝังตัว (impregnation) ทำให้เหล็กเกิดบนพื้นผิวภายนอกจำนวนมาก ส่งผลให้พื้นที่ผิวหรือ active site สำหรับใช้ในการเกิดปฏิกิริยาบน HZSM-5 มีน้อยกว่าเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงต่ำกว่าค่อนข้างมาก

4.11 ผลการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

การทดลอง	นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล (1999)	J.M. Arandes (2003)	งานวิจัยนี้ (2004)		
สารตั้งต้น	Used PS	PS beed + Light cycle oil	Used PS	Used PS	Used PS
ตัวเร่งปฏิกิริยา	-	Silica	HZSM-5	Fe/Activated carbon	Co-Mo/Al ₂ O ₃
สภาวะ					
อุณหภูมิ (°C)	350	550	370	370	370
เวลา (min)	300	3 sec	90	120	90
ความดัน (bar)	3	1	1	1	1
Conversion (%w)	72.1	60.6	98.7	98.9	98.7
Gases yield (%w)	-	2.52	10.4	10.2	7.5
Oil yield (%w)	-	56.4	88.3	88.7	91.2
Gasoline (%w)	-	56.4	28	24	33
Ethyl benzene (%)	36	5	38.04	45.58	53.77
Styrene (%)	-	24.8	5.28	3.72	0.72

จากตารางที่ 4.8 พบว่า ภาวะการทดลองของ นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุลนั้น ใช้เวลาในการทดลองนานมาก ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการเติมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาลงไป ทำให้เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาลดลง ผลผลิตที่ได้นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น และ active site ของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 3 ชนิดยังช่วยส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยา hydrogenation ของสไตรีน ($C_6H_6-CH=CH_2$) เปลี่ยนเป็นเอทิลเบนซีน ($C_6H_6-CH_2-CH_2$) สูงขึ้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ J.M. Arandes พบว่า ร้อยละแก๊สโซลีนที่ได้มีค่าต่ำกว่า อาจเนื่องจากการทดลองที่ J.M. Arandes ใช้มีอุณหภูมิสูงถึง 550 °C ทำให้สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลขนาดเล็กเช่นแก๊สโซลีนสูง รวมทั้งแก๊สโซลีนบางส่วนอาจมาจากการแตกตัว light cycle oil ได้อีกด้วย โดยสารหลักที่ได้ก็แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากงานวิจัยของเขาใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่สั้นมาก (3 sec) ทำให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาการแตกตัวมากกว่าการเติมไฮโดรเจน ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจึงเป็นสไตรีนมากกว่าเอทิลเบนซีน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการแตกตัวพอลิस्टาไทรินใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ Co-Mo/Al₂O₃ ในเครื่องปฏิกรณ์ขนาด 75 มิลลิลิตร โดยมีตัวแปรที่ศึกษา คือ อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 60-180 นาที ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น 1-5 บาร์ และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.1-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al₂O₃ 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ได้ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณเพื่อหาละเอียดของผลิตภัณฑ์น้ำมันและการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Simulated Distillation Gas Chromatography) สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 การแตกตัวพอลิस्टาไทรินใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

- ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อรายละเอียดผลิตภัณฑ์น้ำมันอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ และ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา
 - ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิस्टาไทรินใช้แล้วที่ให้แนวโน้มของค่าการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุด คือ
- | | | |
|--------------------------|-----|-----------------------|
| อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา | 370 | องศาเซลเซียส |
| เวลาในการทำปฏิกิริยา | 90 | นาที |
| ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา | 0.1 | เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก |
| ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น | 1 | บาร์ |

โดยที่ภาวะการทดลองข้างต้น ได้รายละเอียดผลิตภัณฑ์น้ำมัน 88.3 ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊ส 10.39 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณของแก๊ส โซลีน 28% เคโรซีน 3% แก๊สออยล์เบา 40% แก๊สออยล์ 3% และกากน้ำมันหนัก 26% โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเบนซีน คิวมีนและโทลูอิน ผลิตภัณฑ์แก๊สมีองค์ประกอบหลักเป็น มีเทน

5.2 การแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

1. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สโซลีนอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วที่ให้แนวโน้มของการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุด คือ

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	370	องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยา	120	นาที
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	5	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	บาร์

โดยที่ภาวะการทดลองข้างต้นได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 88.7 ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊ส 10.2 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณของแก๊สโซลีน 24% เกลโรซีน 1% แก๊สออยล์เบา 45% แก๊สออยล์ 2% และกากน้ำมันหนัก 28% โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเบนซีน คิวมินและโทลูอิน ผลิตภัณฑ์แก๊สมีองค์ประกอบหลักเป็น มีเทน

5.3 การแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

1. ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สโซลีนอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลาในการเกิดปฏิกิริยาและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
2. ภาวะที่เหมาะสมในการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้วที่ให้แนวโน้มของการกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันได้ดีที่สุด คือ

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	370	องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยา	90	นาที
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	5	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น	1	บาร์

โดยที่ภาวะการทดลองข้างต้นได้ร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน 91.2 ร้อยละผลิตภัณฑ์แก๊ส 7.54 การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์น้ำมันมีปริมาณของแก๊สโซลีน 33% เกลโรซีน 0% แก๊สออยล์เบา 40% แก๊สออยล์ 1% และกากน้ำมันหนัก 26% โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นเอทิลเบนซีน คิวมินและโทลูอิน ผลิตภัณฑ์แก๊สมีองค์ประกอบหลักเป็น มีเทน

ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ให้เป็นแบบต่อเนื่องและขยายส่วนการผลิตในระดับที่ใหญ่ขึ้น เพื่อกำจัดพอลิสไตรีนใช้แล้วได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ
2. ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอื่นๆที่เหมาะสม โดยเฉพาะตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถสังเคราะห์เองได้ และราคาไม่แพง รวมถึงการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่
3. ศึกษาความเป็นไปได้และเศรษฐศาสตร์ในการผลิตเชื้อเพลิงหรือสารเคมีที่ได้จากการแตกตัวพอลิสไตรีนใช้แล้ว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Pearson W. Plastics. New York: McGraw-Hill, 1993:142.
2. Ehrig R.J. Plastic Recycling. New York: Hanser Publishers, 1992:42-43.
3. Kenneth H.C. Recycling Chemistry & Industry. 14 (1989) 440-442.
4. Mackey G.A., Westphal R.C., Plastic Recycling. New York: Hanser Publisher, 1992.
5. Feldman D., Barbalata A. Synthetic polymer. London: Chapman & Hall, 1996.
6. Casumano J.C. Catalysis in Coal. New York: Academics Press, 1978
7. Setterfield C.N. Heterogeneous Catalysis in Practice. New York: McGraw-Hill Book Company, 1980:50-55.
8. Breck D.W. Zeolite Molecular Sieve: Structure, Chemistry and Use. New York: Wiley, 1974.
9. Dyer A. An Introduction to Zeolites Molecular Sieve. New York: John Wiley & Sons, 1988.
10. Hagen J. Industrial Catalysis. New York: Wiley-VCH, 1999.
11. Raseev S. Thermal and Catalytic Processes in Petroleum Refining. New York: Marcel Dekker, 2003.
12. Jame H.G., Glenn E.H. Petroleum Refining Technology and Economics. New York: Marcel Dekker, 1984:137-158.
13. Matar S., Manfred J.M., Hassan A.T. Catalysis in Petrochemical Processes. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989:46-48.
14. Petrov A.A. Catalysis Isomerization of Hydrocarbons. Jerusalem: Isarael Program for Scientific Translations, 1963:91-99.
15. Gates B.C. Catalytic Chemistry. New York: John Wiley & Sons, 1992:406-412.
16. Ryland L.B., Tamele M.W., Wilson J.N. Cracking Catalysts. 1960.
17. Bansel R.C. Active Carbon. New York: Marcel Dekler, 1988.
18. Patrick J.W. Porosity in Carbons: Characterization and Applications. London: Edward Arnold, 1990.
19. Ogawa T., Kurosi T., Ide K., Ikemura T. J.Appl.Polym.Sci. 27, 1981:857.
20. Kelen T. Polymer degradation. New York, 1983:7-151.
21. Gary J.H., Handwerk G.H. Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing. New York: Marcel Dekker, 1984:144-147.
22. Hyun K.J., Curtic C.W. Energy & Fuel. 10, 1996: 603-611.

23. Gary J.H., Handwerk G.H. Petroleum of Refining: Technology and Economics. Vol.5 New York: Marcel Dekker, 1975.
24. Audisio G., Bertini F. Polym. Degrad. Stab. 29 (1990): 91.
25. Uemichi Y. Polym. Sci. Tech. 11(1993):887.
26. Simard Y.D.M., Kamal M.R., Cooper D.G. J. Appl. Polym. Sci. 58(1995): 843.
27. Lin R., White R.L. J. Appl Polm Sci. 63(1997): 1287.
28. Zhu X. Polym. Degrad. Stab. 57(1997): 163.
29. Serrano D.P., Aguado J., Escola J.M. Appl. Catalysis B: Environmental 25(2000): 181.
30. อธิชา ฉายสุวรรณ วรินทร์ ชวศิริ และวิมลรัตน์ ตระการพฤกษ์ แคตตะลิสต์ในโพร่งซีโอไลต์ วายสำหรับการออกซิเดชันสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2541.
31. วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรจีเนียส: หลักทฤษฎีและการประยุกต์. กรุงเทพฯ. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.
32. ปราโมทย์ ไชยเวช ปิโตรเลียมเทคโนโลยี กรุงเทพฯ, ศูนย์ออปเซต, 2537.
33. ปณิตดา เมธาคณวุฒิ, ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อดีพอลิเมอไรเซชันของพอลิสไตรีนที่ใช้แล้วเป็นเอทิลเบนซีน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
34. นฤภัทร ตั้งมั่นคงวรกุล, การแยกสลายตัวด้วยความร้อนของพอลิสไตรีนใช้แล้วในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดซ์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
35. พูนสุข พึ่งธรรม, การแตกตัวพอลิโพรพิลีนด้วยไฮโดรเจนโดยใช้เหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
36. ชราพงษ์ วิทิตสานต์, การแตกตัวพอลิโพรพิลีนและพอลิสไตรีนภายใต้บรรยากาศไฮโดรเจนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มน้ำมัน, รายงานการวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช, 2544.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก1 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2⁴ factorial design) สำหรับการแตกตัวพอลิस्टาไทรินใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	solvent recovery (%w)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	pressure (bar)									
1	350	60	0.1	1	85.40	13.25	1.35	10	0	32	3	57	89.23
2	350	60	0.1	5	88.80	9.10	2.1	8	1	31	4	55	83.93
3	350	60	1	1	89.00	9.82	1.18	10	2	30	2	55	84.49
4	350	60	1	5	83.60	14.95	1.45	9	2	28	3	59	89.12
5	350	180	0.1	1	85.00	14.38	0.62	11	0	33	3	53	89.37
6	350	180	0.1	5	84.30	14.83	0.87	15	0	24	3	55	86.28
7	350	180	1	1	86.40	12.32	1.28	12	1	36	3	52	85.91
8	350	180	1	5	76.20	22.43	1.37	16	3	25	2	54	94.00
9	400	60	0.1	1	88.00	11.06	0.94	14	1	28	4	54	83.59
10	400	60	0.1	5	83.20	15.98	0.82	15	2	30	3	53	91.99
11	400	60	1	1	78.00	20.44	1.56	13	2	38	3	47	90.50
12	400	60	1	5	78.20	20.56	1.24	15	1	23	4	51	92.14
13	400	180	0.1	1	77.70	21.72	0.58	16	3	27	4	50	95.04
14	400	180	0.1	5	72.20	27.03	0.77	19	3	32	3	46	82.52
15	400	180	1	1	70.60	28.31	1.09	25	3	34	3	39	96.76
16	400	180	1	5	72.60	26.36	1.04	20	2	24	2	50	94.82

ตาราง ก2 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2⁴ factorial design) สำหรับการแตกตัวพอลิไสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	solvent recovery (%w)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	pressure (bar)									
1	350	60	1	1	85.80	13.22	0.98	6	1	37	3	53	84.12
2	350	60	1	5	93.00	5.45	1.55	8	5	29	3	55	82.11
3	350	60	5	1	84.00	14.93	1.07	11	1	30	3	56	89.51
4	350	60	5	5	84.40	14.61	0.99	10	5	23	3	57	89.37
5	350	180	1	1	78.60	20.38	1.02	13	2	26	2	57	90.11
6	350	180	1	5	82.00	16.16	1.84	19	1	33	2	45	88.41
7	350	180	5	1	78.40	19.72	1.88	17	1	35	3	44	83.56
8	350	180	5	5	91.20	6.79	2.01	24	1	23	2	50	79.29
9	400	60	1	1	91.80	7.45	0.75	22	2	33	2	41	86.05
10	400	60	1	5	92.40	7.26	0.34	23	2	29	4	42	85.16
11	400	60	5	1	79.00	20.11	0.89	25	2	27	3	43	93.15
12	400	60	5	5	92.80	6.10	1.10	29	3	28	3	37	86.84
13	400	180	1	1	78.80	20.59	0.61	25	4	33	4	34	84.76
14	400	180	1	5	82.00	17.76	0.24	26	4	34	3	33	86.95
15	400	180	5	1	72.40	26.34	1.26	27	4	35	3	31	88.11
16	400	180	5	5	70.60	28.10	1.30	29	3	34	3	31	88.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก3 แสดงผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ 4 ตัวแปร (2⁴ factorial design) สำหรับการแตกตัวพอลิस्टาไทรินใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	solvent recovery (%w)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	pressure (bar)									
1	350	60	1	1	83.00	16.13	0.87	9	1	43	3	44	84.82
2	350	60	1	5	83.60	15.33	1.07	10	2	34	3	51	84.46
3	350	60	5	1	85.60	11.85	2.55	11	1	27	2	59	89.11
4	350	60	5	5	76.40	21.64	1.96	25	2	33	3	37	91.37
5	350	180	1	1	78.20	21.11	0.69	15	1	30	3	51	90.21
6	350	180	1	5	82.20	17.09	0.71	23	1	30	3	43	88.36
7	350	180	5	1	75.40	23.25	1.35	24	1	31	4	40	84.31
8	350	180	5	5	80.80	17.60	1.60	30	2	26	2	40	81.89
9	400	60	1	1	82.40	16.58	1.02	24	3	33	2	38	88.40
10	400	60	1	5	78.40	20.36	1.24	30	2	38	4	26	88.66
11	400	60	5	1	84.00	13.77	2.23	35	2	37	3	23	91.90
12	400	60	5	5	73.40	24.61	1.99	27	3	35	4	33	91.69
13	400	180	1	1	72.00	27.44	0.56	26	4	31	3	36	86.46
14	400	180	1	5	74.60	24.79	0.61	32	5	29	3	31	88.80
15	400	180	5	1	72.40	26.41	1.19	35	6	22	3	16	88.11
16	400	180	5	5	71.80	26.99	1.21	31	5	27	3	34	88.60

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก4 แสดงผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิस्टาไทรินใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	solvent recovery (%w)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	pressure (bar)									
1	350	180	0.1	5	89.09	10.46	0.45	25	3	27	4	41	88.31
2	370	180	0.1	5	88.87	10.78	0.36	29	2	44	2	23	83.91
3	390	180	0.1	5	88.07	11.62	0.31	30	3	36	2	29	84.72
4	400	180	0.1	5	87.51	12.17	0.33	30	1	34	3	32	88.14
5	370	60	0.1	5	90.61	8.28	1.11	23	1	41	1	34	87.97
6	370	90	0.1	5	90.12	8.78	1.10	29	1	37	1	32	84.83
7	370	120	0.1	5	89.62	9.31	1.07	28	2	40	2	28	85.11
8	370	150	0.1	5	89.72	8.98	1.30	27	1	40	1	31	90.62
9	370	180	0.1	5	89.59	9.23	1.18	29	2	44	2	23	83.19
10	370	90	-	5	88.82	10.36	0.82	20	1	42	5	32	90.58
11	370	90	0.1	5	88.14	10.77	1.10	29	3	38	2	28	87.96
12	370	90	1	5	88.16	10.10	1.74	30	4	40	1	25	89.65
13	370	90	3	5	77.97	16.96	5.07	40	7	36	2	15	94.97
14	370	90	5	5	76.06	18.60	5.34	43	9	29	2	17	81.55
15	370	90	0.1	-	90.28	4.62	5.10	20	1	35	6	38	91.84
16	370	90	0.1	1	88.25	10.39	1.36	28	3	40	3	26	90.91
17	370	90	0.1	5	88.53	10.37	1.10	29	3	38	2	28	89.00
18	370	90	0.1	10	89.20	9.70	1.11	28	2	41	2	27	84.73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก5 แสดงผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิस्टาไรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา
เหล็กบนถ่านกัมมันต์

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	solvent recovery (%w)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	pressure (bar)									
1	350	180	5	5	90.17	8.17	1.66	24	0	40	4	32	88.04
2	370	180	5	5	88.84	9.59	1.56	26	1	43	2	28	83.92
3	390	180	5	5	89.56	9.27	1.16	27	0	44	2	27	84.35
4	400	180	5	5	88.95	10.01	1.05	26	0	42	3	29	87.78
5	370	60	5	5	89.46	10.13	0.41	21	1	50	1	27	88.76
6	370	90	5	5	88.51	10.89	0.61	21	1	48	2	28	88.99
7	370	120	5	5	89.39	10.16	0.45	25	2	45	1	27	87.67
8	370	150	5	5	87.13	12.32	0.55	24	1	46	3	26	87.56
9	370	180	5	5	85.19	14.32	0.49	26	1	45	2	26	84.30
10	370	120	-	5	92.67	6.61	0.72	24	3	41	3	29	89.62
11	370	120	1	5	91.41	8.13	0.45	17	2	52	2	27	87.14
12	370	120	3	5	91.16	8.31	0.53	20	2	51	3	24	88.15
13	370	120	5	5	88.12	11.16	0.72	25	2	45	1	27	92.43
14	370	120	10	5	79.77	18.50	1.73	26	2	47	2	23	80.05
15	370	120	5	-	91.04	2.42	6.54	17	1	35	6	41	91.65
16	370	120	5	1	88.68	10.20	1.11	24	1	45	2	28	85.80
17	370	120	5	5	88.72	10.56	0.72	25	2	45	1	27	88.95
18	370	120	5	10	89.32	9.65	1.03	22	1	40	2	35	84.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก6 แสดงผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการแตกตัวพอลิस्टาไทรินใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

run order	Factor				Oil yield (%w)	Gas yield (%w)	Solid yield (%w)	gasoline (%w)	kerosene (%w)	light gas oil (%w)	gas oil (%w)	long residue (%w)	solvent recovery (%w)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	pressure (bar)									
1	350	180	5	5	90.71	7.06	2.23	27	0	42	2	29	87.90
2	370	180	5	5	90.82	7.17	2.01	33	1	41	2	23	83.42
3	390	180	5	5	89.96	8.07	1.97	30	1	40	2	27	87.52
4	400	180	5	5	89.29	8.72	1.98	31	0	42	3	24	87.69
5	370	60	5	5	92.33	6.82	0.84	26	1	46	1	26	85.83
6	370	90	5	5	91.60	7.67	0.74	32	0	42	2	24	91.02
7	370	120	5	5	90.66	8.45	0.89	27	1	45	1	26	87.50
8	370	150	5	5	90.20	9.03	0.78	32	1	40	2	25	79.52
9	370	180	5	5	89.94	9.32	0.74	33	1	41	2	23	83.11
10	370	90	-	5	88.82	10.36	0.82	20	1	42	5	32	90.58
11	370	90	1	5	92.59	7.26	0.15	20	2	53	3	22	90.76
12	370	90	3	5	91.96	7.31	0.73	26	1	49	3	21	89.35
13	370	90	5	5	91.27	8.00	0.74	32	0	42	2	24	91.65
14	370	90	10	5	83.31	15.24	1.45	28	1	47	2	22	87.63
15	370	90	5	-	91.95	2.90	5.15	21	1	38	4	36	86.39
16	370	90	5	1	91.16	7.54	1.31	33	0	40	1	26	88.76
17	370	90	5	5	91.09	8.17	0.74	32	0	42	2	24	82.82
18	370	90	5	10	91.32	8.15	0.53	29	1	39	2	29	84.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก7 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวพอลิโพรพิลีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

run No.	Factor				methane (%)	ethane (%)	propane (%)	butane (%)	pentane (%)	hexane (%)	heptane (%)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	H ₂ (bar)							
1	350	180	0.1	5	85.214	3.670	4.015	5.073	1.215	0.722	0.092
2	370	180	0.1	5	86.399	2.628	3.420	4.043	1.008	0.513	1.990
3	390	180	0.1	5	87.287	2.778	3.518	4.132	0.895	0.742	0.648
4	400	180	0.1	5	87.268	2.290	3.164	4.125	2.094	0.554	0.504
5	370	60	0.1	5	83.491	5.511	3.637	4.032	2.319	0.728	0.282
6	370	90	0.1	5	82.622	4.409	3.027	5.046	3.477	1.137	0.283
7	370	120	0.1	5	89.111	2.834	3.017	2.622	1.540	0.533	0.343
8	370	150	0.1	5	91.796	2.634	3.212	1.131	0.739	0.203	0.285
9	370	180	0.1	5	90.096	2.499	4.777	1.387	0.803	0.320	0.119
10	370	90	-	5	83.959	4.919	3.538	4.687	2.015	0.471	0.411
11	370	90	0.1	5	88.175	4.014	2.071	3.008	1.874	0.717	0.141
12	370	90	1	5	89.102	3.481	2.652	3.305	1.012	0.227	0.221
13	370	90	3	5	92.113	2.682	2.578	1.862	0.412	0.214	0.139
14	370	90	5	5	91.361	2.802	1.517	3.248	0.507	0.249	0.316
15	370	90	0.1	-	80.717	4.618	5.389	4.927	2.395	1.001	0.954
16	370	90	0.1	1	88.016	3.082	3.823	4.008	0.415	0.641	0.015
17	370	90	0.1	5	88.175	3.879	2.636	3.742	0.894	0.325	0.349
18	370	90	0.1	10	91.317	2.672	1.811	3.031	0.558	0.222	0.390

ตาราง ก8 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวพอลิไสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์

run No.	Factor				methane (%)	ethane (%)	propane (%)	butane (%)	pentane (%)	hexane (%)	heptane (%)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	H ₂ (bar)							
1	350	180	5	5	86.557	3.700	3.416	3.073	1.795	0.922	0.537
2	370	180	5	5	87.847	3.199	2.668	3.470	1.832	0.621	0.363
3	390	180	5	5	88.171	3.268	3.012	2.070	1.215	1.069	1.195
4	400	180	5	5	88.319	3.015	2.114	2.019	2.538	1.001	0.995
5	370	60	5	5	84.063	2.108	3.411	5.012	4.329	0.948	0.129
6	370	90	5	5	86.252	3.306	4.124	3.144	2.146	0.568	0.459
7	370	120	5	5	88.589	1.926	2.951	3.442	1.966	0.617	0.508
8	370	150	5	5	85.490	2.572	2.874	3.857	3.175	1.375	0.657
9	370	180	5	5	89.127	2.408	3.829	1.368	2.790	0.339	0.138
10	370	120	-	5	88.842	2.974	2.417	3.348	1.015	0.735	0.669
11	370	120	1	5	91.953	2.948	2.416	2.048	0.316	0.224	0.095
12	370	120	3	5	92.267	2.106	1.880	1.596	1.004	0.741	0.406
13	370	120	5	5	92.720	2.248	1.736	2.018	0.783	0.306	0.189
14	370	120	10	5	94.079	2.403	1.800	1.060	0.531	0.094	0.033
15	370	120	5	-	86.951	3.121	2.858	3.015	2.116	1.064	0.876
16	370	120	5	1	90.309	2.894	2.311	2.106	1.872	0.317	0.191
17	370	120	5	5	92.720	3.002	1.736	1.897	0.421	0.207	0.017
18	370	120	5	10	94.187	2.457	1.802	1.036	0.476	0.038	0.004

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก9 แสดงผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สจากการแตกตัวพอลิซิสไตรีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา Co-Mo/Al₂O₃

run No.	Factor				methane (%)	ethane (%)	propane (%)	butane (%)	pentane (%)	hexane (%)	heptane (%)
	Temp. (°C)	Time (min)	catalyst (%w)	H ₂ (bar)							
1	350	180	5	5	84.270	3.548	3.960	2.058	3.058	2.084	1.022
2	370	180	5	5	85.115	3.987	3.618	2.458	2.716	1.687	0.419
3	390	180	5	5	86.169	3.781	3.772	2.813	2.158	1.058	0.249
4	400	180	5	5	87.287	4.022	3.057	2.186	2.312	1.007	0.130
5	370	60	5	5	82.756	5.018	2.655	5.470	2.915	0.958	0.228
6	370	90	5	5	81.010	3.930	1.320	4.909	4.674	1.952	2.205
7	370	120	5	5	81.228	4.711	1.922	4.465	3.577	1.292	2.805
8	370	150	5	5	85.983	4.272	2.273	3.608	2.773	0.852	0.239
9	370	180	5	5	88.991	2.702	3.902	1.409	1.915	0.385	0.696
10	370	120	-	5	83.959	4.000	2.229	3.162	2.736	2.075	1.839
11	370	120	1	5	86.427	3.561	3.021	2.812	2.145	1.196	0.838
12	370	120	3	5	84.667	4.022	2.978	3.001	2.056	1.235	2.042
13	370	120	5	5	85.678	4.144	2.884	3.011	2.563	1.015	0.705
14	370	120	10	5	88.171	3.110	2.106	3.148	2.346	1.087	0.032
15	370	120	5	-	81.623	5.016	3.193	4.561	3.279	2.004	0.325
16	370	120	5	1	84.805	4.826	3.247	3.483	2.912	0.571	0.156
17	370	120	5	5	85.678	3.837	2.860	2.817	3.016	1.073	0.719
18	370	120	5	10	89.289	3.467	2.572	2.473	1.524	0.413	0.263

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณการวิเคราะห์เชิงสถิติ

การวิเคราะห์เชิงสถิติได้วางรูปแบบการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล 2 ระดับและอยู่ภายใต้สมมติฐานว่าตัวแปรและค่าการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

1. สัญลักษณ์ของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

- 1.1 k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ทำการศึกษา
- 1.2 n หมายถึง จำนวนการทดลองที่ภาวะการทดลองเดียวกัน
- 1.3 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ (A, B, C, D) แทนปัจจัยที่ต้องการศึกษา เช่น อุณหภูมิ เวลา เป็นต้น
- 1.4 อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่เขียนติดกัน (Combination) เช่น AB, AC, ABC หมายถึงอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย (Interaction)
- 1.5 อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กเขียนติดกัน เช่น ab, ac, abc หมายถึงการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ เรียกว่า Treatment combination

การทดลองที่แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จะแทนแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยเป็น -1 ที่ระดับต่ำ และ +1 ที่ระดับสูง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมันและแก๊สโซลีนจากปฏิกิริยาการแตกตัวพอลิไซไตรีนไซ้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ซึ่งออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียล โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปร ดังนี้

ตาราง ข1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

ปัจจัย	ระดับ	
	-1 (ต่ำ)	+1 (สูง)
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) , A	350	400
เวลา (นาที) , B	60	180
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก), C	0.1	1
ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์), D	1	5

สัญลักษณ์แทนการทดลองซึ่งเกิดจากการรวมกันของอิทธิพลปัจจัยต่างๆ มีความหมายคือ การทดลองที่ปรากฏสัญลักษณ์ของปัจจัยใด แสดงว่าทำการทดลองที่ระดับ +1 ของปัจจัยนั้นและปัจจัยที่ไม่ปรากฏสัญลักษณ์ทำการทดลองที่ระดับ -1 เช่น

(-1) แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับ -1 ทุกปัจจัย

a แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ +1 และปัจจัยอื่นๆทำที่ระดับ -1 ดังนั้นภาวะการทดลองคือ อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที ตัวเร่งปฏิกิริยา 0.1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก และความดัน 1 บาร์

ab แสดงว่า ทำการทดลองที่ระดับอุณหภูมิ +1 และเวลา +1 ส่วนปัจจัยอื่นๆ ทดลองที่ระดับ -1

2. ความหมายของคำสำคัญ

อิทธิพลหลัก (Main effect) หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา

อันตรกิริยา (Interaction) หมายถึง การแสดงออกของระดับต่างๆ ในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

อิทธิพลแฟกทอเรียล (Factorial effect) หมายถึง อิทธิพลต่างๆ ทั้งอิทธิพลหลักและอันตรกิริยาทั้งหมดในการทดลองซึ่งจะมีเท่ากัน จำนวนการรวมตัว -1 หรือเท่ากับองศาความเป็นอิสระ (Degree of Freedom) ของสิ่งที่ทดลอง

3. สูตรการคำนวณ

1. Contrast = (ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment) x (สัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร)

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

3. Sum of Squares $_{AB...K}$ (SS)
 $SS_{AB...K} = \frac{2}{n^{2^k}}$ (Contrast $_{AB...K}$)²

4. Total of Sum of Squares (SS_T)

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

5. Sum of Squares Error (SS_E)

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

6. Mean of Square (MS)

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

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

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

4. ตัวอย่างการคำนวณ

รูปแบบของ Treatment combinations อิทธิพลแฟกทอเรียล และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณแสดงในตาราง ข2 โดย

เครื่องหมาย + และ - คือ +1 และ -1 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการเปรียบเทียบ หรืออิทธิพลแฟกทอเรียลต่างๆ นั่นเอง ดังนั้นอิทธิพลแฟกทอเรียล A คือ การเปรียบเทียบระหว่างระดับ +1 และ -1 ของปัจจัย A

วิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ เช่น

อิทธิพลแฟกทอเรียล A: ให้ค่า + แก่ Treatment combinations ที่มีสัญลักษณ์ a นอกนั้นให้ค่าเป็น -

อิทธิพลแฟกทอเรียล B: ให้ค่า + แก่ Treatment combinations ที่มีสัญลักษณ์ b นอกนั้นให้ค่าเป็น -

อิทธิพลอันตรกิริยา AB: ให้คูณสัมประสิทธิ์ของ A และ B เข้าด้วยกันได้เป็นสัมประสิทธิ์ของ AB

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ข2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของอิทธิพลต่างๆที่ใช้ในการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

Treatment	Factorial Effects														
Combination	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD
(1)	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
abc	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
d	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
ad	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
bd	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
abd	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
cd	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
acd	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
bcd	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
abcd	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

ตัวอย่างการวิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันจากการแตกตัวพอลิไสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ออกแบบการทดลองเป็นแฟกทอเรียล 2 ระดับ 4 ตัวแปร (2^4 factorial design) แสดงผลดังตาราง ข3 หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ออกไปคำนวณค่า Contrast, Effect Estimate และ Sum of Square แสดงดังตาราง ข4

ตาราง ข3 แสดงภาวะของตัวแปรและร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้

Run Order	Treatment Combination	Temperature (°C)	Time (min)	Catalyst content (%w)	Pressure (bar)	Liquid (%w)
1	(1)	350	60	0.1	1	85.4
2	a	400	60	0.1	1	84.4
3	b	350	180	0.1	1	85.0
4	ab	400	180	0.1	1	76.4
5	c	350	60	1	1	89.0
6	ac	400	60	1	1	80.0
7	bc	350	180	1	1	86.0
8	abc	400	180	1	1	75.6
9	d	350	60	0.1	5	88.8
10	ad	400	60	0.1	5	83.2
11	bd	350	180	0.1	5	84.3
12	abd	400	180	0.1	5	74.0
13	cd	350	60	1	5	84.5
14	acd	400	60	1	5	81.5
15	bcd	350	180	1	5	76.2
16	abcd	400	180	1	5	73.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

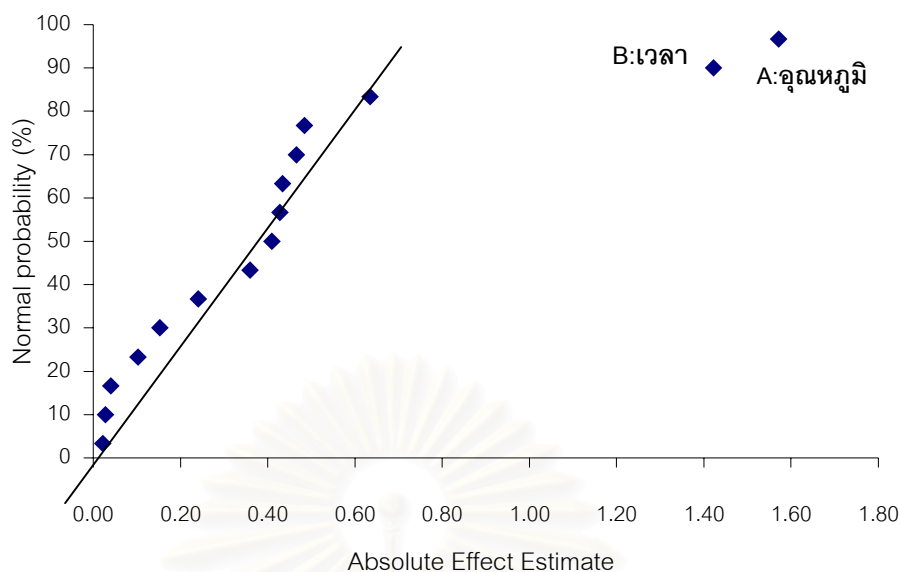
ตาราง ข4 แสดงผลการคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้

Run number	Treatment Combinat .	Liquid (%w)	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD
1	(1)	85.4	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1
2	a	84.4	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
3	b	85.0	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1
4	ab	76.4	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1
5	c	89.0	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
6	ac	80.0	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
7	bc	86.0	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1
8	abc	75.6	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
9	d	88.8	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
10	ad	83.2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
11	bd	84.3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
12	abd	74.0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
13	cd	84.5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
14	acd	81.5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
15	bcd	76.2	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1
16	abcd	73.8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Contrast			-60.30	-45.50	-13.10	-14.90	0.70	-1.30	11.50	-15.50	7.70	-13.90	4.90	-13.70	20.30	-3.30	-0.90
Effect Estimate			-1.572	-1.422	-0.409	-0.466	0.022	-0.041	0.359	-0.484	0.241	-0.434	0.153	-0.428	0.634	-0.103	-0.028
Sum of Squares			39.533	32.348	2.681	3.469	0.008	0.026	2.066	3.754	0.926	3.019	0.375	2.933	6.439	0.170	0.013

ตาราง ข5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง normal probability (%) กับ absolute effect estimate (เรียงจากน้อยไปมาก)

Cumulative	Normal probability (%)	Absolute EE(sort)
1	3	0.0219
2	10	0.0281
3	17	0.0406
4	23	0.1031
5	30	0.1531
6	37	0.2406
7	43	0.3594
8	50	0.4094
9	57	0.4281
10	63	0.4344
11	70	0.4656
12	77	0.4844
13	83	0.6344
14	90	1.4219
15	97	1.5719

นำผลการคำนวณจากตาราง ข5 มาสร้าง Normal Probability Plot ได้ดังรูป ข1 พบว่า ตัวแปรที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรง คือ A แทน อุณหภูมิ และ B แทน เวลา แสดงว่าตัวแปรเหล่านี้เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน นอกจากนี้เมื่อนำผลจากตาราง ข4 มาสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) แสดงผลดังตาราง ข6 พบว่า ให้ผลเช่นเดียวกัน โดยอุณหภูมิและเวลา ให้ค่า F_0 คือ 23.308 และ 19.072 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่า ค่า F_c คือ 9.65 ที่ความเชื่อมั่น 98% จึงเป็นการยืนยันว่า อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ ข1 Normal Probability Plot ของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรลีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

ตารางที่ ข6 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกตัวพอลิไตรลีนใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5

Source of variance	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	Fo
A(อุณหภูมิ)	39.533	1	39.533	23.308
B(เวลา)	32.348	1	32.348	19.072
C(ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา)	3.469	1	3.469	2.045
D(ความดัน)	3.754	1	3.754	2.213
Error	18.657	11	1.696	
Total	97.760	15		

ที่ความเชื่อมั่น 98 % ใช้ค่า $\alpha = 0.02$ ได้ค่า $F_{0.01, 1, 11} = 9.65 (F_c)$

ภาคผนวก ก

**การวิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันตามคาบจุดเดือด
(Boiling Distribution)**

การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatography จะวิเคราะห์ตามจุดเดือดของแต่ละสารดังต่อไปนี้

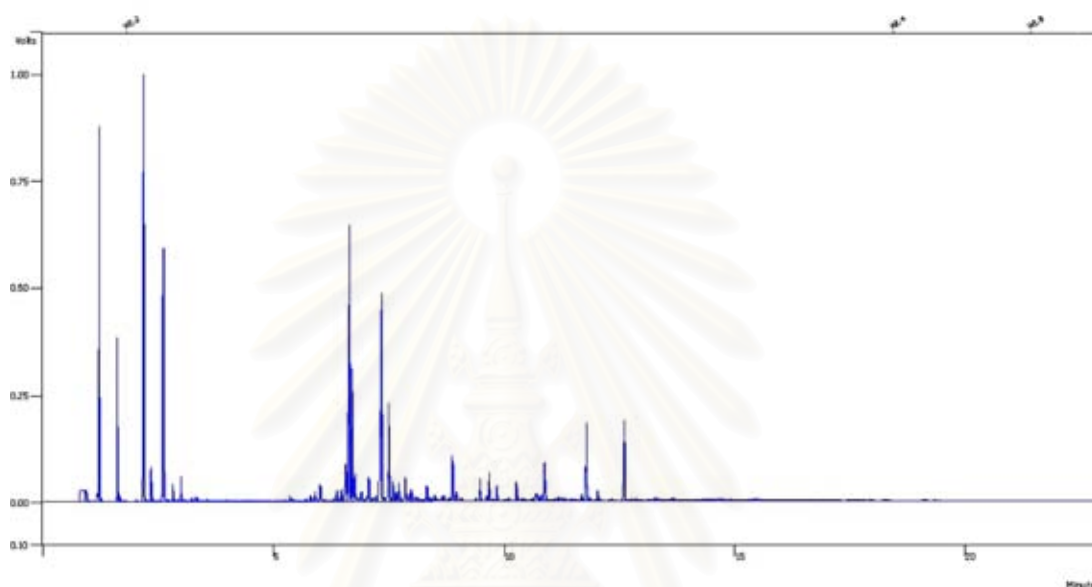
IBP – 200 °C	=	Gasoline
200°C – 250 °C	=	Kerosene
250°C – 350 °C	=	Light Gas Oil
350°C – 370 °C	=	Gas Oil
370°C – FBP	=	Long residue

การวิเคราะห์จะเริ่มจากการเตรียมสารตัวอย่าง โดยนำผลิตภัณฑ์น้ำมันไปละลายในสารละลายคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) ในอัตรา 1 ส่วนใน 100 ส่วนโดยปริมาตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น CP-3800 สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 พร้อมทั้งดีเทคเตอร์แบบ FID ใช้ซอฟต์แวร์ Simulated Distillation คอลัมน์ที่ใช้เป็น Capillary column มี stationary phase คือ CP-SIL 5CB ยาว 15 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร และความหนาของฟิล์ม 0.25 ไมครอน ภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิหัวฉีด 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ 30-320 องศาเซลเซียส อุณหภูมิดีเทคเตอร์ 320 องศาเซลเซียส โดยมี carrier gas เป็น helium gas ที่อัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วย split ratio 2

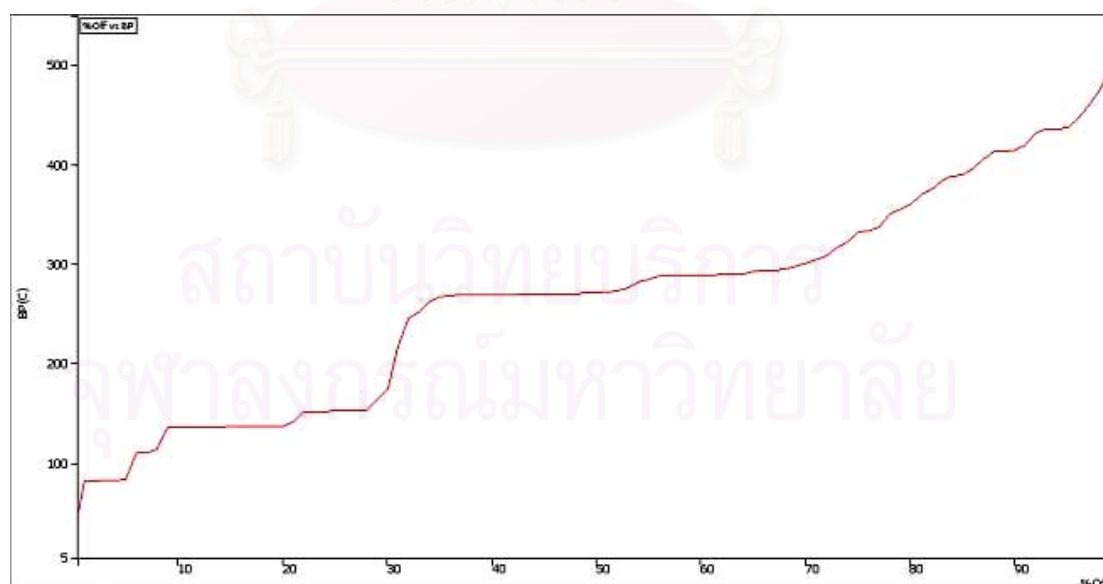
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือด

โครมาโทแกรมที่ได้จากการแยกสารด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ดังรูป ค1 จากนั้นนำไปเปลี่ยนเป็นกราฟแสดงการกลั่นตามจุดเดือดด้วยโปรแกรม Simulated Distillation โดยจะทำการเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานตาม ASTM D2887 (Standard) และโครมาโทแกรมของเครื่องเมื่อไม่มีการฉีดสารใดๆ (Blank) ดังรูป ค2



รูปที่ ค1 แสดงโครมาโทแกรมจากการแยกของผลิตภัณฑ์น้ำมันด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ ค2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลิตภัณฑ์น้ำมัน(%off) กับจุดเดือดของสารจากโปรแกรม Simulated Distillation

ภาคผนวก ง

เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (3000MicroGC)

เครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี (3000MicroGC – SN: US10314007) ใช้สำหรับ
วิเคราะห์ห้องปฏิบัติการผลิตภัณฑ์แก๊ส โดยมีภาวะและคุณสมบัติของเครื่องแสดงดังตาราง ง1

ตาราง ง1 แสดงภาวะและคุณสมบัติของเครื่องไมโครแก๊สโครมาโทกราฟี

3000 GC Setpoints	A	B	C
Sample inlet temperature (°C)	45	45	45
Injection temperature (°C)	100	55	85
Column temperature (°C)	110	60	90
Sampling time (s)	110	60	90
Inject time (ms)	10	30	30
Run time (s)	240	240	240
Post run time (s)	10	30	30
Column pressure (psi)	40	20	25
Post run pressure (psi)	40	20	33
Detector Filament	Enabled	Enabled	Enabled
Detector sensitivity	High	High	High
Detector data rate (Hz)	50	50	50
Baseline offset (mV)	50	30	10
3000 GC Configuration			
Injection type	Backflush	Timed	Timed
Carrier gas	Argon	Helium	Helium
Column type	Molecular sieve	Plot Q	OV-1
Detector type	TCD	TCD	TCD
Inlet type	Heated	Heated	Heated

ภาคผนวก จ

สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้สำหรับการแตกตัวพอลิไตรีนในงานวิจัยนี้ ทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET Surface area)

ตาราง จ1 แสดงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 เหล็กบนถ่านกัมมันต์และ Co-Mo/Al₂O₃

ตัวเร่งปฏิกิริยา	พื้นที่ผิว(m ² /g)
HZSM-5 ^[a]	374
Fe/activated carbon (เหล็กบนถ่านกัมมันต์) ^[b]	559
Co-Mo/Al ₂ O ₃ ^[c]	229

a : Si/Al=18

b : Fe 1%

c : Co 2.4%, Mo 25.3%

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอรดา วงศ์สุภักข์ เกิดเมื่อวันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัด นครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2544 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตร มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ.2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย