

การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์



นางสาวสิรินทร ศรีธาดาวุฒิ
นางสาวสุรีย์พร อุตเจริญ
นายอภิชัย ชาญพานิชย์การ



ป
จ.ร.ก.
๕

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 33505
วัน, เดือน, ปี 13 ส.ค. 2542

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2541

Catalytic Cracking of High Density Polyethylene by Zeolite



A Special Project Submitted in partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

นักศึกษา

นางสาวสิรินทร ศรีธาดาวุฒิ

นางสาวสุรีย์พร อุดเจริญ

นายอภิชัย ชาญพานิชย์การ

ภาควิชา

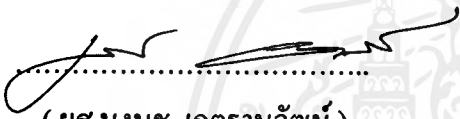
เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ตะวัน

สุชน้อย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....
(ผศ.นงนุช เกตรานูวัฒน์)

หัวหน้าภาควิชาเคมี

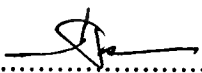
คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ


.....
(ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)

ประธานกรรมการ


.....
(ดร.ชลลดา อุตวิรุฬห์)

กรรมการ


.....
(ดร.ตะวัน สุชน้อย)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนวิจัยและดำเนินงาน	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ซีโอไลต์	3
2.2 ซีโอไลต์ชนิด Y	3
2.3 ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5	6
2.4 การแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking)	7
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 สารเคมี	12
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	12
3.3 ขั้นตอนการวิจัย	13
3.4 วิธีการวิจัย	15
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มี Si/Al เท่ากับ 2	27
4.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มี Si/Al เท่ากับ 4	30
4.3 การวิเคราะห์ซีโอไลต์ Y และ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา	31

4.4 การหาปริมาณความเป็นกรดของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด	35
4.5 ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	38
4.6 การวิเคราะห์ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการสลายตัว ทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดย ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	
4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ สลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี	44
4.8 การคำนวณค่าพลังงานการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก กระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นสูงปริมาณ 1 กรัม	51
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 การวิเคราะห์ซีโอไลต์ Y ที่มี Si/Al เท่ากับ 2 (Y-2)	55
5.2 การวิเคราะห์ซีโอไลต์ Y ที่มี Si/Al เท่ากับ 4 (Y-4)	55
5.3 การวิเคราะห์ซีโอไลต์ Y-4 และ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา	56
5.4 การหาปริมาณความเป็นกรดของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา	56
5.5 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความ หนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ด้วยเทคนิค DSC	56
5.6 การศึกษากระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	57
5.7 การคำนวณค่าพลังงานการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการ การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ปริมาณ 1 กรัม	58
เอกสารอ้างอิง	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	

หัวข้อโครงการพิเศษ

การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

นักศึกษา

นางสาวสิรินทร ศรีธาดาวุฒิ

นางสาวสุรีย์พร อุดเจริญ

นายอภิชัย ชาญพานิชย์การ

อาจารย์ที่ปรึกษา

คร. ตะวัน สุขน้อย

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2541

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการปรับปรุงและตรวจสอบสมบัติของซีโอไลต์ชนิด Y และ ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด (H-Y และ H-ZSM-5 ตามลำดับ) ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Powder Diffraction, XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยทำการทดลองแบบครั้ง (Batch operation) ที่อุณหภูมิ 430 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซฮีเลียม จากนั้นศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลต่ำ คือ ก๊าซ และของเหลว และยังเกิดสารประกอบแว็กซ์ (Wax-like compounds) และกาบคาร์บอนอีกด้วย

จากการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ซีโอไลต์ H-Y เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จะเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 3-6 อะตอม (C_3-C_6) และผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวซึ่งมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 5-12 อะตอม (C_5-C_{12}) แต่มีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 7-8 อะตอมเป็นส่วนใหญ่ ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นของเหลวมากกว่าก๊าซ และพบว่ามีสารประกอบแว็กซ์ปนอยู่ แต่เมื่อใช้ซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว โดยผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จะมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วง 3-5 อะตอม (C_3-C_5) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมีปริมาณคาร์บอนอยู่ในช่วงเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ H-Y แต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 6 อะตอม (C_6)

Special Project Title	Catalytic cracking of high density polyethylene by zeolites	
Name	Miss Sirintorn	Sritadawut
	Miss Sureeporn	Utacharoen
	Mr. Apichai	Chanpanichkarn
Special Project Advisor	Dr. Tawan	Sooknoi
Department	Chemistry	
Academic Year	1998	

Abstract

Zeolites H-Y and H-ZSM-5 were modified and characterised by X-ray Powder Diffraction (XRD) and Scanning Electron Microscopy (SEM) and used as catalysts for the catalytic cracking of high density polyethylene (HDPE) . The reaction was carried out at 430°C in a batch reactor under helium atmosphere . The products were ranged from gases , liquid hydrocarbons , wax-like compounds , and carbonaceous residues.

From Gas Chromatography (GC) study, it was found that gaseous products from reaction using zeolite H-Y were C₃ to C₆ hydrocarbons , and liquid products were in the range of C₃ to C₁₂ hydrocarbons (mostly C₇-C₈) . Compared to the products obtained from those using zeolite H-ZSM-5 , gaseous products were mainly C₃ to C₅ hydrocarbons and the liquid products were produced in the same manner as observed in reaction using zeolite H-Y. However, The liquid products using zeolite ZSM-5 were mostly C₆ hydrocarbons.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ผู้ทำโครงการพิเศษขอขอบพระคุณ

ดร.ตะวัน สุขน้อย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่เต็มเปี่ยมไปด้วยความหวังดี คอยช่วยเหลือดูแล ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และแรงกระตุ้นในการทำโครงการให้สำเร็จได้ในที่สุด
ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ที่มีความเข้าใจ และมีความกรุณาในการเป็นกรรมการ โครงการพิเศษ
ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาเป็นกรรมการ โครงการพิเศษครั้งนี้
ดร.สุภารัตน์ จำปา สำหรับความช่วยเหลือในเรื่องค่าใช้จ่าย และการเบิกอุปกรณ์ รวมไปถึงความห่วงใย และกำลังใจตลอดมา

เจ้าหน้าที่ศูนย์วิเคราะห์เครื่องมือ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค XRD

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเป่าแก้ว มหาวิทยาลัยมหิดล ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์เครื่องแก้วมากมาย
เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ที่อำนวยความสะดวกในการเบิกจ่ายเครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

พี่กัญญา สำหรับความช่วยเหลือในการใช้เครื่อง DSC
พี่เต และพี่เอ(บรรจง) สำหรับคำแนะนำที่ดี และความช่วยเหลือในทุกๆเรื่อง ตลอดการทำโครงการพิเศษนี้
เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีทุกคนที่คอยให้กำลังใจ ถามไถ่ด้วยความห่วงใย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา และคนในครอบครัวทุกคน ที่มีความเข้าใจและคอยให้กำลังใจตลอดมา .

คณะผู้จัดทำ

นางสาวสิรินทร ศรีธาดาวุฒิ

นางสาวสุรีย์พร อุดเจริญ

นายอภิชัย ชาญพานิชย์การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงสภาวะที่ใช้ในการทำกระบวนการสลายตัวทางความร้อนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	22
ตารางที่ 3.2 แสดงสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค GC	25
ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	42
ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	46
ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณอะตอมคาร์บอนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ก๊าซ	47
ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	49
ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณอะตอมคาร์บอนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของเหลว	50
ตารางที่ 4.6 แสดงจำนวน โมลของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่แตกต่างกัน	52
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพลังงานความร้อนในการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่แตกต่างกัน	52
ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณของ HDPE ที่ต้องใช้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อนจากผลิตภัณฑ์ก๊าซเพียงพอกับพลังงานความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยา	53

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีโอไลด์ Y	4
รูปที่ 2.2 ตำแหน่งของประจุบวกในซีโอไลด์ Y	5
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลด์ ZSM-5	6
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลด์ชนิด ZSM-5 ที่เกิดจากการสังเคราะห์โดยใช้สารประกอบเทมเพลตอินทรีย์ เทตระ โพรพิลแอม โมเนียม	7
รูปที่ 2.5 แสดงกลไกปฏิกิริยาของการแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด	8
รูปที่ 2.6 แสดงสมบัติในการเลือกสารที่จะเข้าทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลด์	10
รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพกระบวนการสลายตัวทางความร้อนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลด์	21
รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลด์ที่มีสูตรเจด $4.1\text{SiO}_2 \cdot 2.67\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 66.24\text{H}_2\text{O}$ โดยใช้เวลาในการบ่มกวน (aging) 6 ชั่วโมง	27
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลด์ที่มีสูตรเจด $4.1\text{SiO}_2 \cdot 2.67\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 66.24\text{H}_2\text{O}$ โดยใช้เวลาในการบ่มกวน (aging) 24 ชั่วโมง	28
รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลด์ที่มีสูตรเจด $4.1\text{SiO}_2 \cdot 2.67\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 66.24\text{H}_2\text{O}$ โดยใช้เวลาในการบ่มกวน 6 ชั่วโมง	29
รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลด์ที่มีสูตรเจด $4.1\text{SiO}_2 \cdot 2.67\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 66.24\text{H}_2\text{O}$ โดยใช้เวลาในการบ่มกวน 24 ชั่วโมง	30
รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลด์ชนิด Y-4 ที่สังเคราะห์ได้	31
รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลด์ชนิด Y-4 ที่นำมาศึกษา	32

รูปที่ 4.7	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่นำมาศึกษา	33
รูปที่ 4.8	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y-4 ที่นำมาศึกษา	34
รูปที่ 4.9	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา	34
รูปที่ 4.10	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมเตตระโบเรตและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก	35
รูปที่ 4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์	36
รูปที่ 4.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการไทเทรตหาปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด	37
รูปที่ 4.13	แสดง DSC Curve ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	39
รูปที่ 4.14	แสดง DSC Curve ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y	40
รูปที่ 4.15	แสดง DSC Curve ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5	41
รูปที่ 4.16	แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	42
รูปที่ 4.17	แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	46
รูปที่ 4.18	แสดงปริมาณคาร์บอนอะตอมที่ได้จากผลิตภัณฑ์ก๊าซ	47
รูปที่ 4.19	แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	49
รูปที่ 4.20	แสดงปริมาณคาร์บอนอะตอมที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของเหลว	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันนี้ขยะพลาสติกเป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเป็นขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ หรือใช้เวลานานมากในการย่อยสลาย จึงมีการศึกษาวิธีการที่จะนำพลาสติกเหล่านี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด กระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพลาสติกให้กลายเป็นน้ำมันก๊าดโซลีน (Gasoline) โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่า และใช้พลังงานในการย่อยสลายไม่มากนัก เมื่อมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย แต่ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกันเมื่อนำมาใช้ ก็ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบแตกต่างกันไปด้วย จึงต้องมีการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาให้เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงที่ต้องการมากที่สุด

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

U. Md Azhar, K. Kazuo, M. Katsuhide, and S. Yusaku ทำการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนแบบใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของพอลิเอทิลีนที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน โดยใช้ซิลิกา-อะลูมินา เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 430 °C ผลปรากฏว่าในแบบที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาได้แก๊สเป็นผลิตภัณฑ์จำนวนเล็กน้อย แต่ในกรณีที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่เกิดแก๊ส และก๊าดที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงจำนวนคาร์บอนเท่ากับ 2 ถึง 4 อะตอม ของเหลวที่ได้อยู่ในช่วงคาร์บอนเท่ากับ 5 ถึง 25 อะตอม^[1]

นายบรรจง เลิศโรจน์ชูสิทธิ์ นางสาววินิตา อัครชัยพงษ์ และนายเอกรินทร์ วรุตบางกูร ได้ทำการศึกษาผลของโครงสร้างทางโทปอโลยีของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ในการสลายตัวด้วยความร้อนของ HDPE โดยสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y ที่มีค่าของ Si/Al เท่ากับ 4 และซีโอไลต์ชนิด EMT จากนั้นนำไปปรับปรุงสมบัติให้มีฤทธิ์เป็นกรด เพื่อนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE พบว่าซีโอไลต์ทั้งสองชนิดที่มีสมบัติเป็นกรด สามารถเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของ HDPE ที่อุณหภูมิต่ำได้^[2]

นางสาวจันทร์ฉวี หิรัญชนะโชค และนายจตุพร ชีระกุล ทำการศึกษาการสังเคราะห์สารอินทรีย์ โดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยจะสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และศึกษารูปร่าง

พื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากนั้นนำไปปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อไปเร่งปฏิกิริยาการขจัดน้ำจากไซโคลเฮกซานอลและสเตียรอยด์ พบว่าผลิตภัณฑ์เกิดขึ้นเพียงหนึ่งชนิด คือ ไซโคลเฮกซีน^[3]

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงวิธีการปรับปรุงสมบัติและตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y และ ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด
2. เพื่อศึกษาถึงกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE ที่มีกรเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์
3. เพื่อศึกษาผลของขนาดของรูพรุนในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ที่มีต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE

1.4 ขอบเขตการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์ชนิด H-Y และ H-ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด ซึ่งมีผลต่อกระบวนการย่อยสลายทางความร้อนของ HDPE โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองจะเป็นความรู้พื้นฐานที่สำคัญในการแก้ปัญหาขยะพลาสติกที่เหลือใช้ต่อไป

1.5 ขั้นตอนวิจัยและดำเนินงาน

โครงการวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y และ ZSM-5 เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และศึกษากระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีสมบัติแตกต่างกัน จากนั้นตรวจสอบโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas chromatography)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. ทำให้ทราบถึงกระบวนการการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y และ H-ZSM-5 ในบรรยากาศของก๊าซฮีเลียม
2. ทำให้ทราบถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนของ HDPE โดยใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y และ H-ZSM-5 ในบรรยากาศของก๊าซฮีเลียม

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นของแข็งอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้าง 3 มิติ หน่วยย่อยพื้นฐานคือ ศูนย์กลางทรงสี่หน้า (Tetrahedral center) ซึ่งอาจเป็นอะตอมซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม (เรียกว่าอะตอม T) โดยอะตอม T จะสร้างพันธะกับออกซิเจน 4 อะตอม ในทางกลับกันออกซิเจนแต่ละอะตอมก็จะสร้างพันธะกับอะตอม T 2 อะตอม เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง T-O-T

ซีโอไลต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติ จากอุณหภูมิและความดันภายใต้พื้นโลก และซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์ ซีโอไลต์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิประมาณ 100-160°C ภายใต้ระบบปิด ที่มีการควบคุมสภาวะ อุณหภูมิ ความดัน เวลา ชนิด และความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีความเฉพาะเจาะจงกับซีโอไลต์แต่ละชนิด ซึ่งจัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดหนึ่งที่มีประโยชน์มากในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมปัจจุบัน

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์ 2 ชนิด คือ ซีโอไลต์ Y และซีโอไลต์ ZSM-5

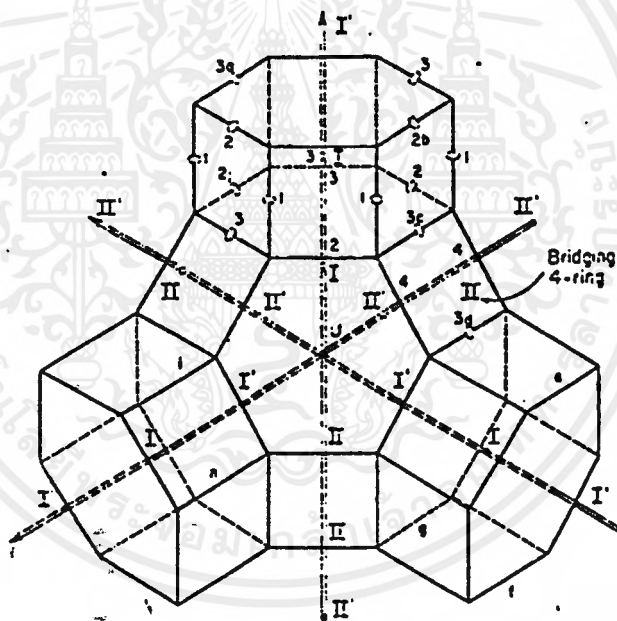
2.2 ซีโอไลต์ชนิด Y

ซีโอไลต์ชนิด Y เป็นซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามากที่สุด เนื่องจากมีหน้าตางขนาดประมาณ 0.74 นาโนเมตร (มีออกซิเจน 12 อะตอมในวง) และมีโครงสร้างของรูพรุนเป็น 3 มิติ (Three-dimensional pore structure) ดังรูปที่ 2.1 ที่สามารถให้โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนที่มีขนาดใหญ่เข้าไปในรูพรุนได้ ดังนั้นจึงนิยมใช้ในกระบวนการแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) ของปิโตรเลียม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดโมเลกุลลดลง

โครงสร้างทางโทปอโลยีของ Y มีลักษณะที่คล้ายกับซีโอไลต์ Y ในธรรมชาติ แต่มีความแตกต่างกันตามแต่อัตราส่วนของ Si/Al ชนิดของไอออนบวก ตำแหน่งและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ความเสถียรทางความร้อนและความสามารถในการดูด

โมเลกุลของสารที่มีขนาดใหญ่ เช่น แนฟทาลีน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีฟลูออรีน ผ่านภายในรูพรุนได้

รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของประจุบวกในโครงของซีโอไลต์ Y ตำแหน่ง I (Type I site) อยู่ที่กึ่งกลางของปริซึมทรง 6 เหลี่ยม (Hexagonal prism) ตำแหน่ง I' (Type I' site) อยู่ในโครง โซคาไลต์ตรงข้ามกับผิวทรงหกเหลี่ยม (Hexagonal face) จากตำแหน่ง I ส่วนตำแหน่งที่ II (Type II site) อยู่ในโครงขนาดใหญ่ใกล้กับผิวทรง 6 เหลี่ยมที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับหน่วยเซลล์อื่นๆ และตำแหน่ง II' (Type II' site) อยู่ในโครงขนาดใหญ่ซึ่งห่างจากผิวทรง 6 เหลี่ยมมากกว่าตำแหน่ง II

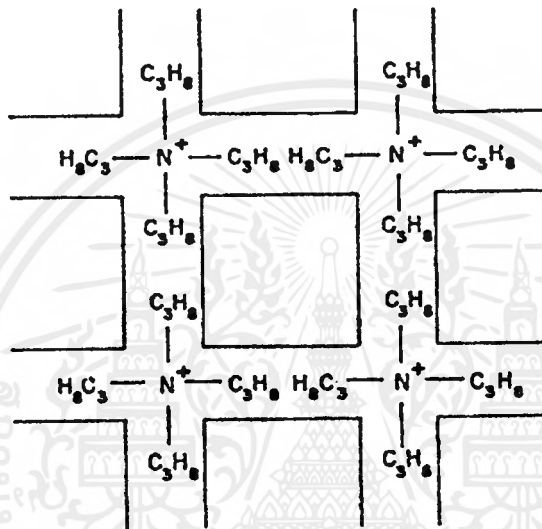


รูปที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของประจุบวกในซีโอไลต์ Y^[4]

ซีโอไลต์สามารถสังเคราะห์ได้ในรูปไอออนโซเดียม โดยใช้สารเริ่มต้นเป็นโซเดียม อะลูมิเนต (Sodium aluminate) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และคอลลอยด์ของซิลิกา (Silica sol, a colloidal silica suspension) แต่การเตรียม Y ให้อยู่ในรูปของไฮโดรเจน เพื่อให้มีสมบัติเป็นกรดทำได้ยาก เนื่องจากโครงร่างของของ Y จะเกิดการแตกสลาย (Collapse) เมื่ออยู่ในสารละลายกรดแก่ จึงทำการแลกเปลี่ยนไอออนโซเดียมด้วยไอออนแอมโมเนียม ดังปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ภายใต้เงื่อนไขของระเบียบการคุ้มครองสิทธิบัตร ไม่สามารถนำออกจำหน่าย หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้ถือสิทธิบัตร

การเร่งปฏิกิริยาต่างๆมากมาย โดยเฉพาะปฏิกิริยาการเติมหมู่เมทิล (Methylation) ของโทลูอิน เกิดเป็นสารประกอบพาราไซลีน (p-xylene) เนื่องจากมีสมบัติเฉพาะเจาะจงกับรูปร่าง (Shape selectivity) นอกจากนั้นยังมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ในรูปของอนุสมบัติที่เป็นกรด (H-ZSM-5) ไปใช้ในการทำปฏิกิริยาการสลายตัวของน้ำมันปิโตรเลียมอีกด้วย



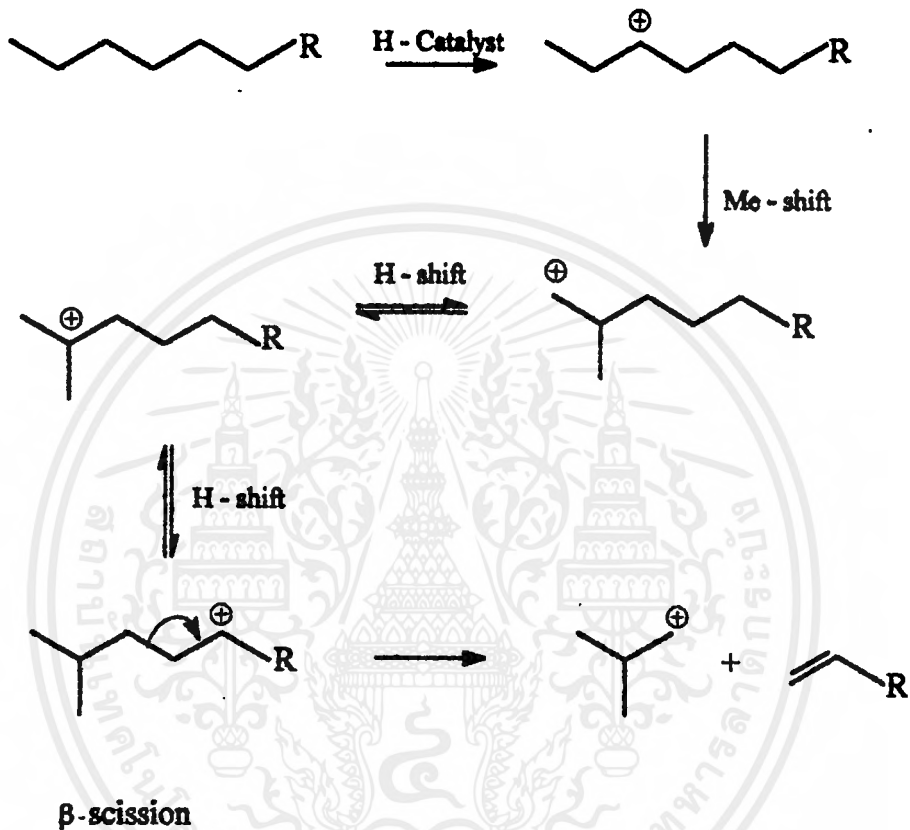
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่เกิดจากการสังเคราะห์ โดยใช้สารประกอบเททราโพรพิลแอมโมเนียม (Tetrapropyl Ammonium)^[6]

2.4 การแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Cracking)

การแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาคือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกสลายพันธะระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลง ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ปรับปรุงและควบคุมให้เกิดการแตกสลายไปในแนวทางที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมขนาดโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ได้โดยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของ ตัวเร่งปฏิกิริยา ในอุตสาหกรรมน้ำมันปัจจุบันนิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมัน

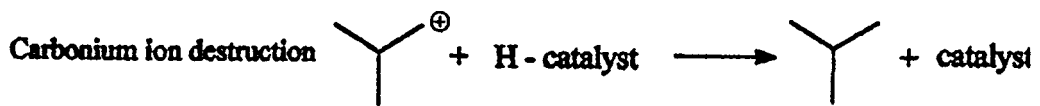
กระบวนการแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด จะเกิดขึ้นผ่านปฏิกิริยาของคาร์โบเนียมไอออน (Carbonium ion) ซึ่งตรงกันข้ามกับกระบวนการแตกสลายด้วยความร้อน

(Thermal cracking) ที่เกิดขึ้นผ่านอนุมูลอิสระ (Free radical) กลไกปฏิกิริยาของการแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด สามารถอธิบายดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงกลไกปฏิกิริยาของการแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด

เริ่มแรกโปรตอนจากตัวเร่งปฏิกิริยา จะเข้าทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เกิดเป็นคาร์โบเนียมไอออน จากนั้นมีการเปลี่ยนที่ระหว่างประจุบวกกับกลุ่มเมทิล (Me-shift) และระหว่างประจุบวกกับไฮโดรเจน (H-shift) เพื่อให้ได้คาร์โบเนียมไอออนที่เสถียรกว่า หลังจากนั้นเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบตา (β -scission) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบโอเลฟินและคาร์โบเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง ปฏิกิริยาจะหยุด เมื่อคาร์โบเนียมไอออนทำปฏิกิริยากับตัวเร่งปฏิกิริยา และอาจจะเกิดการแตกตัวต่อไปได้อีก ถ้าตัวเร่งปฏิกิริยานั้นยังคงมีความว่องไวอยู่



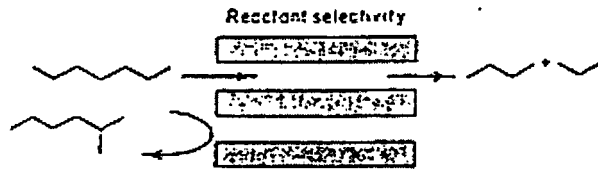
ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการแตกสลายนี้ นิยมใช้สารประกอบซิลิกา-อะลูมินารวมทั้ง ซีโอไลต์สังเคราะห์

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous catalysts) เช่น ซีโอไลต์ ถูกนำมาใช้ในกระบวนการสลายตัวทางความร้อน เนื่องจากมีความแตกต่างจากตัวเร่งปฏิกิริยาอสัณฐานทั่วไปในเรื่องของการดูดซับสารที่ความดันต่ำและลักษณะของการเป็นตัวเร่งที่มีความเฉพาะเจาะจงกับรูปร่าง (Shape selectivity) ซึ่งเพิ่มขึ้นตาม active sites ที่อยู่ในรูพรุนนั้น และยังสามารถจำกัดการเกิดสารมัธยันต์ระหว่างการเกิดปฏิกิริยา หรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลภายในรูพรุนได้ อีกด้วย

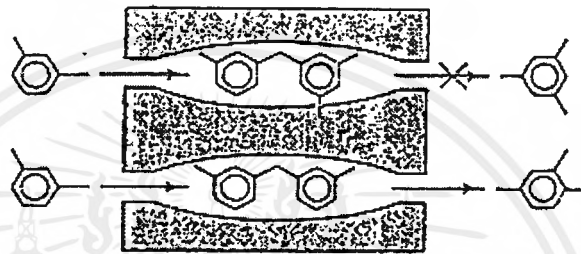
ความเฉพาะเจาะจงกับสารตั้งต้น (Reactant selectivity) เป็นการจำกัดขนาดของโมเลกุลของสารตั้งต้นที่อยู่ในสารป้อน (Feed) ที่ผ่านเข้าไปในรูพรุนของตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ปฏิกิริยาการแตกสลายโมเลกุลของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Pt-Erionite ที่สามารถดูดซับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนแบบโซ่ตรงได้ แต่ไม่ดูดซับพวกสารประกอบที่มีโซ่กิ่ง ดังรูปที่ 2.6a)

ความเฉพาะเจาะจงกับสารผลิตภัณฑ์ (Product selectivity) สามารถพบได้ในการทำปฏิกิริยาการเติมหมู่เมทิลในโทลูอีน (Methylation of toluene) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ที่มีขนาดของรูพรุนขนาดกลาง (Medium pore) จะมีความเฉพาะเจาะจงกับการเกิดพาราไซลีนมากกว่าไอโซเมอร์ของไซลีนตัวอื่นๆ เนื่องจากพาราไซลีนมีขนาดเล็กกว่าจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์ออกมาได้ ส่วนไอโซเมอร์ตัวอื่นๆจะเกิดปฏิกิริยาไอโซเมโรไซเซชัน (Isomerisation) จนกลายเป็นพาราไซลีนก่อน จึงสามารถแพร่ผ่านรูพรุนออกมาได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นพาราไซลีน ปฏิกิริยาเกิดดังรูปที่ 2.6b)

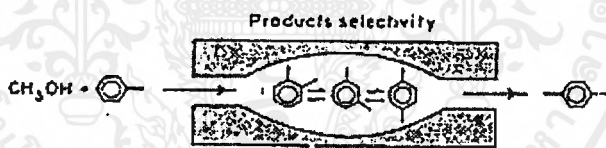
ลักษณะของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์อีกแบบหนึ่ง คือ ความเฉพาะเจาะจงกับการเกิดสารมัธยันต์ (Intermediate selectivity) ในระหว่างการทำปฏิกิริยา ที่เป็นการจำกัดการเกิดปฏิกิริยาผ่านสารมัธยันต์นั้นเนื่องจากขนาดของรูพรุนภายในตัวเร่งปฏิกิริยา จึงไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการขึ้นในปฏิกิริยา ดังรูปที่ 2.6 c)



a)



b)



c)

รูปที่ 2.6 แสดงสมบัติในการเลือกสารที่จะเข้าทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

- a) ความเฉพาะเจาะจงกับสารตั้งต้น (Reactant selectivity)
- b) ความเฉพาะเจาะจงกับสารผลิตภัณฑ์ (Product selectivity)
- c) ความเฉพาะเจาะจงกับการเกิดสารมัธยันต์ (Intermediate selectivity)

จากคุณสมบัติต่างๆของซีโอไลต์นี้ ทำให้ซีโอไลต์ถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะปฏิกิริยาการแตกสลายพันธะด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking) ที่นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มีหน้าตาขนาด 12-T-ring และอาจเติมซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ลงไปด้วยเพื่อเพิ่มปริมาณสารอะโรมาติกในส่วนของน้ำมันก๊าสโซลีน (gasoline) อีกด้วย

ในกระบวนการสลายตัวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากเกิดปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerisation) และไซโคลเซชัน (Cyclisation) แล้วยังอาจเกิดพอลิเมอไรเซชัน (Polymerisation) ได้อีกด้วย เพราะเมื่อโมเลกุลของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการสูญเสียไฮโดรเจน (Dehydrogenation) ทำให้เกิดสารประกอบไม่อิ่มตัวมากขึ้น สารประกอบไม่อิ่มตัวเหล่านี้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าถ่านโค้ก (Coke) ที่มีลักษณะเหนียวเคลือบตัวเร่งปฏิกิริยาไว้ ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ (Deactivated) ในบางกรณีอาจนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพมาปรับปรุงคุณภาพใหม่ (Regeneration) ได้ โดยการเผาเอาโค้กออกที่อุณหภูมิประมาณ $540-680^{\circ}\text{C}$ ในอากาศแห้ง แต่ต้องทำการควบคุมไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไป

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. สารแขวนลอยซิลิกา (Ludox-AS40) 40 % โดยน้ำหนัก
2. โซเดียมอะลูมิเนต ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
4. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
5. โซเดียมเตตระโบเรต ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$)
6. 15-Crown-5 ($\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}_6$)
7. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
8. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
9. แอมโมเนียมไนเตรด (NH_4NO_3)
10. แอมโมเนียมคลอไรด์
11. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH Solution)
12. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl)
13. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N_2)
14. ใยแก้ว
15. อะลูมินา

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ภาชนะตั้งเคราะห์ความดันสูง (Autoclave)
2. ตู้อบ ($50\text{-}200^\circ\text{C}$)
3. บริภัณฑ์เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
4. บริภัณฑ์พลาสติกในห้องปฏิบัติการ
5. ซ้อนตักสาร
6. แท่งแม่เหล็กและเครื่องปั่นกวน
7. กระจกทรงเบอร์ 42 ชนิดไร้ฝ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ชุดกรองลดความดัน
9. ครอบอกใส่ไนโตรเจนเหลว (Dewar)
10. เตาเผาแบบท่อ (Furnace)
11. เครื่องชั่ง
12. ขวดใส่สาร (Vial)
13. ชุดให้ความเย็น (Cooling)
14. คอลัมน์
15. ชุดรีฟลักซ์ (Reflux)
16. ขาค้าง
17. วงแหวน
18. ที่จับ (Clamp)
19. เครื่องให้ความร้อน (Heating mantle)
20. เครื่องโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน (Potentiometer)
21. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography) : Varian GC38000
22. เครื่องวัดความแตกต่างของอุณหภูมิ (Differential Scanning Calorimeter) : Shimadzu C-R4A Chromatopac
23. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Powder Diffraction) : X-ray Diffractometer Model JDK-8030 , Joel
24. เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

3.3.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ (Zeolite Catalyst)

- ◆ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y ที่มี Si / Al เท่ากับ 2
- ◆ การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y ที่มี Si / Al เท่ากับ 4

3.3.2 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีฤทธิ์กรด

- ◆ การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ให้มีฤทธิ์เป็นกรด (H-ZSM-5)

3.3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่เตรียมขึ้น

- ◆ Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อตรวจสอบรูปร่างผลึกของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ◆ X-ray powder Diffraction (XRD) เพื่อตรวจสอบ โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น
- ◆ การไทเทรตหาค่าปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด ที่เตรียมได้

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

- ◆ การเตรียมตัวอย่างพอลิเอทิลีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y
- ◆ การเตรียมตัวอย่างพอลิเอทิลีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y
- ◆ การเตรียมตัวอย่างพอลิเอทิลีน ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5
- ◆ การเตรียมตัวอย่างพอลิเอทิลีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-ZSM-5

3.3.5 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ด้วยเครื่อง DSC

- ◆ การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา
- ◆ การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ชนิด H-Y ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน
- ◆ การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

3.3.6 การศึกษากระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

- ◆ การทำกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y
- ◆ การทำกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y
- ◆ การทำกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5
- ◆ การทำกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-ZSM-5

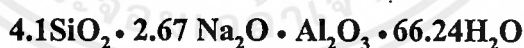
3.3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของ พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ด้วยเครื่อง GC

- ◆ การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y ที่มีฤทธิ์เป็นกรด (H-Y)
- ◆ การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RegH-Y)
- ◆ การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด (H-ZSM-5)
- ◆ การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ที่นำกลับมาใช้ใหม่ (RegH-ZSM-5)

3.4 วิธีกรวิจัย

3.4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

3.4.1.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y (Na-Y) ที่มี Si /Al เท่ากับ 2 ซึ่งมีสูตรเจดดังนี้



- ◆ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้ำหนัก 2.4866 กรัม ในน้ำปราศจากไอออนน้ำหนัก 23.5808 กรัม
- ◆ เติมโซเดียมอะลูมิเนตน้ำหนัก 5.9704 กรัม กวนให้ละลายโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก
- ◆ ค่อยๆเติมสารแขวนลอยซิลิกาน้ำหนัก 18.0300 กรัมลงไป โดยใช้กรวยแยกพลาสติก
- ◆ ปั่นกวนสารละลายที่เตรียมได้ตลอดเวลา เป็นเวลานาน 6 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง
- ◆ นำสารที่ได้ใส่ลงในถ้วยเทฟลอน แล้วนำถ้วยเทฟลอนใส่ภาชนะสังเคราะห์ความดันสูง ใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- ◆ เมื่อครบกำหนดเวลา นำภาชนะความดันสูงออกจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็น

- ◆ กรองซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนเป็นกลาง (pH ~ 7-8)
- ◆ อบซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 60-80 °C เพื่อระเหยน้ำออก
- ◆ นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้บรรจุลงในคอลัมน์ แล้วนำเข้าเตาเผาแบบท่อ ทำการเผาที่อุณหภูมิ 550 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 °C/นาที เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศที่มีอากาศแห้งไหลผ่าน

3.4.1.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Y (Na-Y) ที่มี Si / Al เท่ากับ 4 ซึ่งมีสูตรเจลดังนี้



- ◆ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำหนัก 1.5120 กรัม ในน้ำปราศจากไอออนน้ำหนัก 21.7430 กรัม
- ◆ เติมโซเดียมอะลูมิเนต น้ำหนัก 2.3716 กรัม กวนให้ละลายโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก
- ◆ เติม 15-Crown-5 น้ำหนัก 2.1391 กรัม กวนให้ผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกับสารละลาย
- ◆ ค่อยๆเติม Ludox น้ำหนัก 20.835 กรัม โดยใช้กรวยแยก
- ◆ ปั่นกวนสารละลายที่เตรียมได้ตลอดเวลา 24 ชั่วโมง โดยควบคุมอุณหภูมิของสารละลายที่ 20 °C ตลอดเวลา
- ◆ นำสารใส่ด้วยเพฟลอน แล้วนำด้วยเพฟลอนใส่ภาชนะสังเคราะห์ที่ความดันสูง
- ◆ นำภาชนะสังเคราะห์ที่ความดันสูงใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 115 °C เป็นเวลา 7 วัน
- ◆ เมื่อครบกำหนดเวลา นำภาชนะสังเคราะห์ความดันสูงออกจากตู้อบ แล้วนำด้วยเพฟลอนออกจากภาชนะสังเคราะห์ความดันสูง
- ◆ กรองสารที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนเป็นกลาง
- ◆ นำสารใส่ตู้อบที่อุณหภูมิ 60-80 °C เพื่อระเหยน้ำออก
- ◆ นำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ บรรจุลงในคอลัมน์ แล้วนำเข้าเตาเผาแบบท่อ ทำการเผาใส่เทมเพลทอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 550 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2 °C / นาที เป็นเวลา 6-8 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

3.4.2 .การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ให้มีฤทธิ์เป็นกรด

3.4.2.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่มี Si/Al เท่ากับ 38.9 ให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นกรด (H-ZSM-5)

- ◆ นำซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 น้ำหนัก 1.275 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
- ◆ ทำการแลกเปลี่ยนไอออนโดยเติมสารละลายแอมโมเนียมไนเตรด (NH_4NO_3) เข้มข้น 1.0 M จำนวน 150 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม
- ◆ นำขวดก้นกลมต่อเข้ากับชุดรีฟลักซ์ (reflux) ให้ความร้อนจนสารละลายมีอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยทำการควบคุมเวลาด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก
- ◆ กรองสารละลายที่ได้ด้วยชุดกรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42 ทำการล้างด้วยน้ำร้อนอุณหภูมิ 80°C
- ◆ ทำการแลกเปลี่ยนไอออนซ้ำอีก 2 ครั้ง
- ◆ นำซีโอไลต์ที่กรองได้อบที่อุณหภูมิ $60-80^\circ\text{C}$
- ◆ นำซีโอไลต์บรรจุลงในคอลัมน์ แล้วนำเข้าเตาเผาแบบท่อ ทำการเผาไล่แอมโมเนียที่อุณหภูมิ 550°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{นาท}$ ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นทำการลดอุณหภูมิให้มีค่าต่ำกว่า 100°C
- ◆ ให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์อีกครั้งด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{นาท}$ จนมีอุณหภูมิ 500°C ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง
- ◆ ทำการเผาไล่แอมโมเนีย ที่อุณหภูมิ 500°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{นาท}$ ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3.4.3. การทดสอบสมบัติต่างๆ ของซีโอไลต์ที่เตรียมขึ้น

3.4.3.1 การศึกษารูปร่างพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 700-10000 เท่า

- ◆ นำแท่นทองเหลือง (stub) มาติดเทปกาวสองหน้า
- ◆ โรยตัวอย่างซีโอไลต์ลงบนเทปกาวให้บางที่สุด
- ◆ นำแท่นทองเหลืองที่มีตัวอย่างซีโอไลต์ติดอยู่ เข้าเครื่องเคลือบทอง ภายใต้สภาวะสุญญากาศ เป็นเวลา 10 นาที
- ◆ นำเข้าเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 700-10000 เท่า

3.4.3.2 การตรวจสอบโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้องศา 2 θ ในช่วง 5-50 แหล่งกำเนิดแสง คือ CuK α

3.4.3.3 การไทเทรตเพื่อหาค่าปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด (H-ZSM-5) โดยใช้เทคนิคโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน

- การเตรียมสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมเตตระโบเรตความเข้มข้น 0.18 M
 - ชั่งสารมาตรฐานปฐมภูมิ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ น้ำหนัก 3.81 กรัม
 - ละลายด้วยน้ำและทำการปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- การเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นประมาณ 0.10 M
 - บีเปิดกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 2.20 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นอยู่
 - ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 250 มิลลิลิตร
- การเตรียมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นประมาณ 0.05 M
 - บีเปิดสารละลายแอมโมเนีย 28 % ปริมาตร 0.80 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตร
 - ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเท่ากับ 250 มิลลิลิตร
- การไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก
 - บีเปิดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นประมาณ 0.14 M จำนวน 25 มิลลิลิตร ใส่แท่งคนแม่เหล็กและจัดขั้วแก้ว (Glass Electrode) ให้จุ่มลงในสารละลาย
 - ทำการวัดค่าความต่างศักย์ก่อนหยดสารละลายโซเดียมเตตระโบเรต
 - หยดสารละลายโซเดียมเตตระโบเรตครั้งละ 0.5 มิลลิลิตร พร้อมวัดค่าความต่างศักย์ทุกครั้งที่ยกสารละลาย จนกระทั่งค่าความต่างศักย์คงที่
 - เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ กับปริมาณของไทเทรนต์
 - ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง แต่เปลี่ยนปริมาตรสารละลายโซเดียมเตตระโบเรตจาก 0.5 มิลลิลิตรเป็น 0.2 มิลลิลิตร บริเวณที่ค่าศักย์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ซึ่งทราบได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับปริมาณของไทเทรนต์จากการไทเทรตครั้งแรก
 - คำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

- การไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 - ปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.04 M จำนวน 25 มิลลิลิตร
 - ใส่แท่งคนแม่เหล็กและจัดขั้วแก้ว (Glass Electrode) ให้จุ่มลงในสารละลาย
 - ทำการวัดค่าความต่างศักย์ ก่อนหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.14 M
 - หยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกครั้งละ 0.5 มิลลิลิตรพร้อมวัดค่าความต่างศักย์ทุกครั้งที่ยกสารละลาย จนกระทั่งค่าความต่างศักย์คงที่
 - เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับปริมาตรของไทเทรนต์
 - ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง แต่เปลี่ยนปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจาก 0.5 มิลลิลิตรเป็น 0.2 มิลลิลิตร บริเวณที่ค่าศักย์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ทราบได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับปริมาตรของไทเทรนต์จากการไทเทรตครั้งแรก
 - ทำการคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
- การไทเทรตหาปริมาณความเป็นกรดของซีโอไลต์ ด้วยเทคนิคการไทเทรตแบบย้อนกลับ
 - ชั่งซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่ทำให้อยู่ในรูปกรดแล้ว น้ำหนัก 0.0752 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
 - ปิเปตสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.04 M จำนวน 25 มิลลิลิตร
 - เติมแอมโมเนียมคลอไรด์ประมาณ 0.1 กรัม
 - นำสารละลายที่ได้ไปให้ความร้อนในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 5 นาที
 - ใส่แท่งคนแม่เหล็กและจัดขั้วแก้ว (Glass Electrode) ให้จุ่มลงในสารละลาย
 - ทำการวัดค่าความต่างศักย์ก่อนหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 0.14 M
 - หยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกครั้งละ 0.5 มิลลิลิตร พร้อมวัดค่าความต่างศักย์ทุกครั้งที่ยกสารละลาย จนกระทั่งค่าความต่างศักย์คงที่

- เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับปริมาณของไทเทรนต์
- ทำการทดลองซ้ำอีกครั้ง แต่เปลี่ยนปริมาตรสารละลายกรดไฮโดรคลอริกจาก 0.5 มิลลิลิตรเป็น 0.2 มิลลิลิตร บริเวณที่ค่าศักย์ไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมากที่สุด ทราบได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับปริมาณของไทเทรนต์จากการไทเทรตครั้งแรก
- ทำการคำนวณหาปริมาณแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่เหลืออยู่ ทำให้ทราบความเป็นกรดในซีโอไลต์

3.4.4. การเตรียมตัวอย่างพอลิเอทิลีน

◆ การเตรียมตัวอย่างพอลิเอทิลีนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

- ชั่งเม็ดพลาสติกพอลิเอทิลีนหนัก 1.0 กรัม ใส่ลงในจานเพาะเชื้อ
- นำจานเพาะเชื้อวางบนเครื่องให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120 °C
- เมื่อเม็ดพลาสติกเริ่มหลอม ค่อยๆเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ประมาณ 0.2 กรัม
- ผสมให้เข้ากัน จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

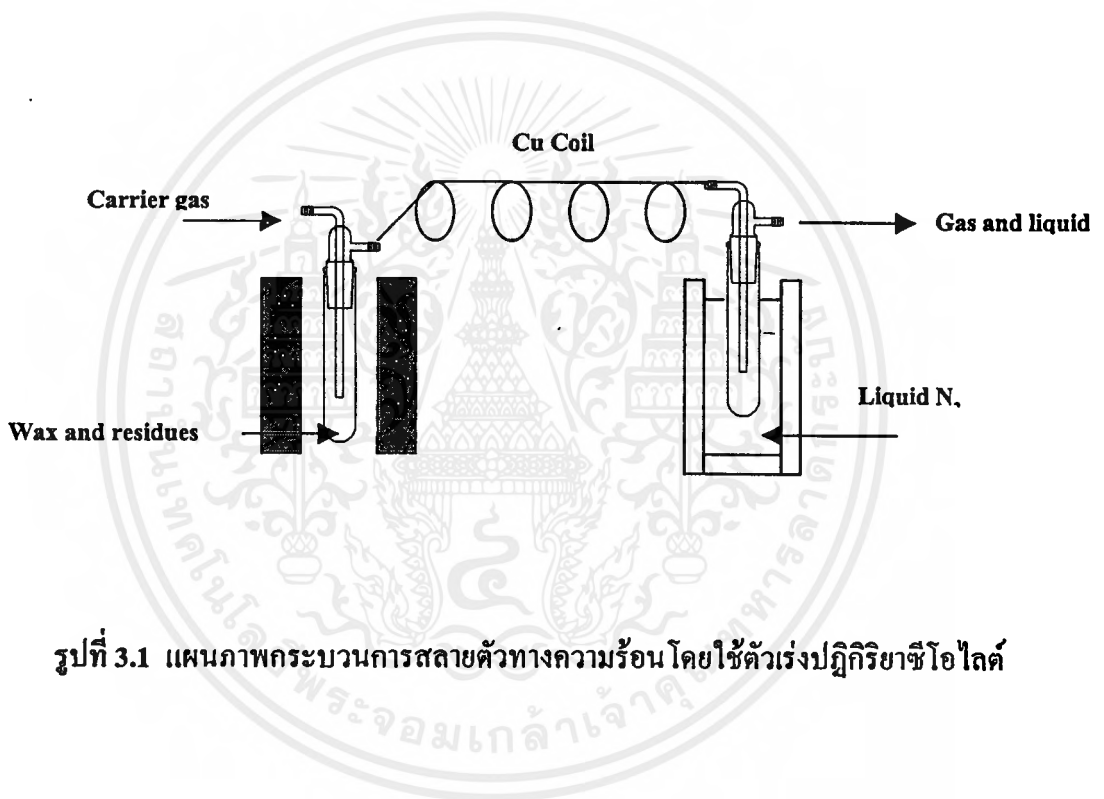
3.4.5 การศึกษาการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ด้วยเทคนิค DSC

- ◆ ชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างประมาณ 6.0-7.0 มิลลิกรัม อัดให้เป็นเม็ด
- ◆ วางสารตัวอย่างลงทางด้านขวา และสารอ้างอิงลงทางด้านซ้ายของเตาเผา
- ◆ ใช้สภาวะในการศึกษาที่มีอัตราการให้ความร้อนที่ 10°C/นาที อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนที่ 10 มิลลิลิตร/ นาที
- ◆ ใช้อุณหภูมิของการศึกษาตั้งแต่ 30-300°C

3.4.6 การทำกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

- ◆ ชั่งน้ำหนักสารตัวอย่าง 1.0 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ (ดังรูปที่ 3.1) ให้ความร้อนแก่สารตัวอย่างจนถึง 140°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 2°C / นาที ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหลของก๊าซ 200 มิลลิลิตร/ นาที

- ◆ คงไว้ที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อกำจัดน้ำออกจากพอลิเอทิลีน และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์
- ◆ ให้ความร้อนจนกระทั่งสารตัวอย่างมีอุณหภูมิ 430 °C ด้วยอัตราการให้ความร้อนสูงสุดในบรรยากาศของก๊าซฮีเลียม ที่มีอัตราการไหล 200 มิลลิลิตร/ นาที
- ◆ คงไว้ที่อุณหภูมิ 430 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ◆ เก็บผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวไปตรวจสอบโครงสร้างที่ได้



รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการสลายตัวทางความร้อนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

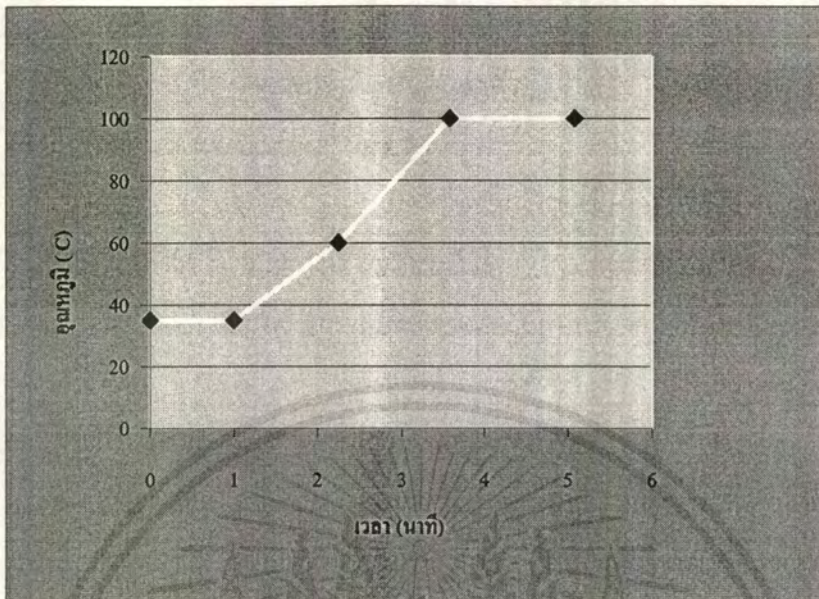
ตารางที่ 3.1 แสดงสถานะที่ใช้ในการทำกระบวนการสลายตัวทางความร้อน
โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

	Catalysts	Sample (g)	Temp (°C)	Heating rate (°C/min)	Holding time (min)	Carrier gas	Flow gas (ml/min)
Run 1	H-Y	0.411	140	2	30	N ₂	200
			430	off	30	He	200
Run 2	RegH-Y	1.107	140	2	30	N ₂	200
			430	off	30	He	200
Run 3	H-ZSM-5	1.066	140	2	30	N ₂	200
			430	off	30	He	200
Run 4	RegH-ZSM-5	1.024	140	2	30	N ₂	200
			430	off	30	He	200

3.4.7 การตรวจสอบโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเครื่อง GC

3.4.7.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ก๊าซ

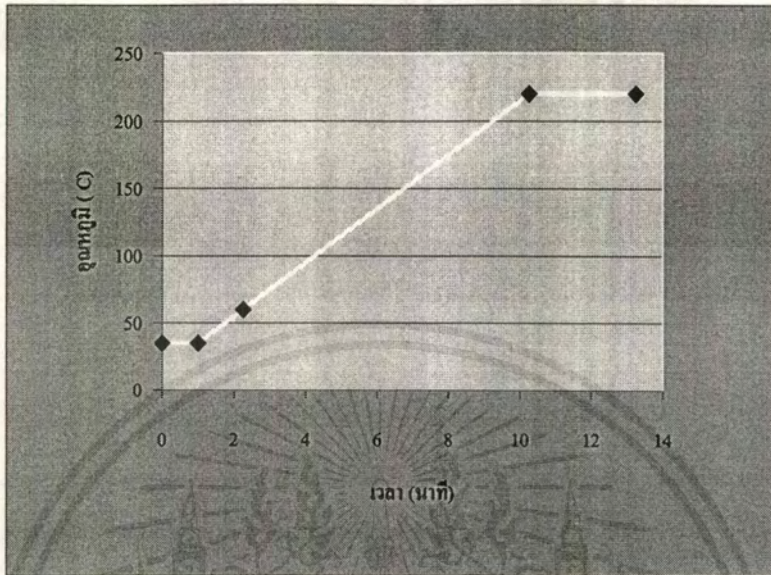
นำผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซฮีเลียม โดยใช้คอลัมน์ชนิด VA-1 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 35°C คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20°C / นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 30°C / นาที คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1.5 นาที สถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงใน Temp-time program



- ◆ นำโครมาโทแกรมที่ได้ไปศึกษาเปรียบเทียบกับ โครมาโทแกรมของสารมาตรฐาน ที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน
- ◆ ทำการศึกษาตั้งขึ้นตอนข้างต้น แต่เปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y ชนิด H-ZSM-5 และชนิด RegH-ZSM-5 ตามลำดับ

3.4.7.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ของเหลว

นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซฮีเลียม โดยใช้คอลัมน์ชนิด VA-1 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร ทำที่อุณหภูมิเริ่มต้น 35°C คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 1 นาที แล้วเพิ่มอุณหภูมิเป็น 60°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20°C / นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 220°C ด้วยอัตราการให้ความร้อน 20°C / นาที คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 3 นาที สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงใน Temp-time program



- ◆ นำโครมาโทแกรมที่ได้ไปศึกษาเปรียบเทียบกับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นแน่นอน
- ◆ ทำการศึกษาดังขั้นตอนข้างต้น แต่เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y ชนิด H-ZSM-5 และชนิด RegH-ZSM-5 ตามลำดับ

สถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค GC

ชนิดของสาร	ปริมาณที่ฉีด (μD)	Column oven				TCD detector			FID detector ($^{\circ}\text{C}$)	Injector ($^{\circ}\text{C}$)
		Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Rate ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Holding time (min)	Total (min)	Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Filament temp ($^{\circ}\text{C}$)	Carrier gas		
ผลิตภัณฑ์ก๊าซ	150	35	0.0	1.00	1.00	140	170	He	250	180
		60	20.0	0.00	2.25					
		100	30.0	1.50	5.08					
ผลิตภัณฑ์ของเหลว	0.01	35	0.0	1.00	1.00	180	210	He	250	200
		60	20.0	0.00	2.25					
		220	20.0	3.00	13.25					

3.4.8 การนำตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ใช้งานแล้วมาผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration)

- ◆ นำตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y ที่ใช้งานแล้ว ใสลงในถ้วยครุชเบิล
- ◆ นำถ้วยครุชเบิลเข้าเตาเผา อบที่อุณหภูมิ 500°C ทิ้งไว้ข้ามคืน ภายในบรรยากาศ
- ◆ ทำการทดลองดั่งข้างต้น แต่เปลี่ยนซีโอไลต์เป็นชนิด RegH-Y ชนิด H-ZSM-5 และชนิด RegH-ZSM-5 ที่ใช้งานแล้ว ตามลำดับ



บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มี Si/Al เท่ากับ 2 (Y-2)

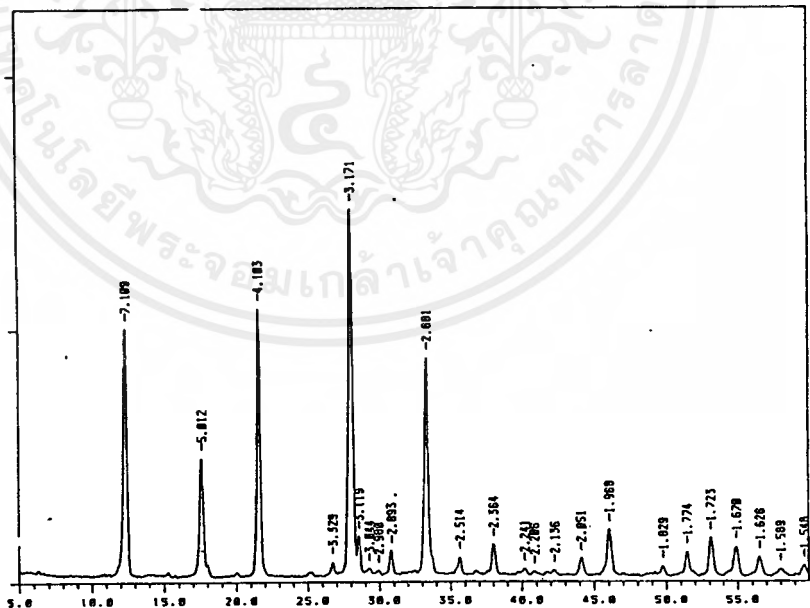
จากการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y-2 ซึ่งมีสูตรเจด ดังนี้



เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ามีลักษณะคล้ายกับซีโอไลต์ชนิด Na-P1 (GIS) ผลการทดลองมีดังนี้

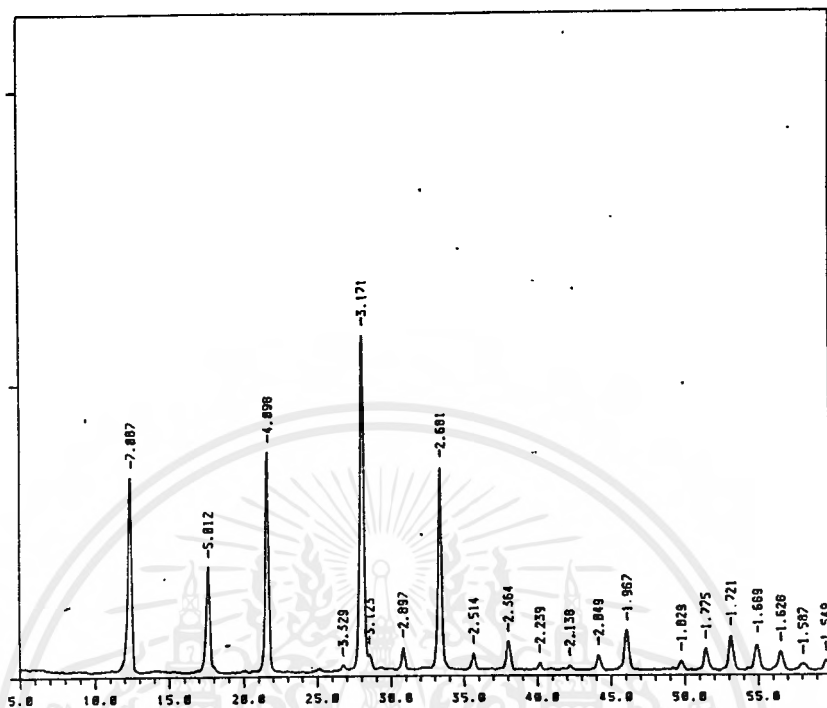
□ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

การวิเคราะห์ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้แหล่งของรังสีเอกซ์ (X-ray) คือ $\text{CuK}\alpha$ ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer Model JDK-8030, Joel, Japan รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction pattern) แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และ รูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ที่มีสูตรเจด

$4.1 \text{ SiO}_2 \bullet 2.67 \text{ Na}_2\text{O} \bullet \text{Al}_2\text{O}_3 \bullet 66.24 \text{ H}_2\text{O}$ โดยใช้เวลาในการ
บ่มกวน (aging) 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ที่มีสูตรเจล
 $4.1 \text{ SiO}_2 \cdot 2.67 \text{ Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 66.24 \text{ H}_2\text{O}$ โดยใช้เวลาในการ
 ปั่นกวน (aging) 24 ชั่วโมง

จากการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction Pattern) ของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการปั่นกวน 6 และ 24 ชั่วโมง แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ จะเห็นว่า สารผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของแข็งที่เป็นผลึก เพราะพีกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นยอดแหลม ซึ่งเป็นลักษณะของสารที่เป็นสัณฐาน รูปที่ 4.1 พีกมีลักษณะเป็นยอดแหลมที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.109, 5.012, 4.103, 3.171 และ 2.681 เมื่อนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ได้นี้ไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ชนิด Na-P (GIS) (รูปที่ ข1 ภาคผนวก ข) ปรากฏว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีรูปแบบเดียวกันกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ชนิด Na-P (GIS)

และเมื่อพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการปั่นกวน 24 ชั่วโมง จะเห็นว่า พีกมีลักษณะเป็นยอดแหลมที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 7.087, 5.012, 4.096, 3.171 และ 2.681 ซึ่งตำแหน่งมี

ค่าใกล้เคียงกันกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในรูปที่ 4.1 มาก ดังนั้นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการบ่มกวน 24 ชั่วโมงมีรูปแบบเดียวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ชนิด Na-P (GIS) เช่นเดียวกัน

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ทั้งสองสถานะมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการบ่มกวน 6 ชั่วโมง (รูปที่ 4.1) จะมีลักษณะที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ใช้เวลาในการบ่มกวน 24 ชั่วโมง (รูปที่ 4.2) สังเกตได้จากฐานพีกของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ในรูปที่ 4.2 จะมีลักษณะเรียบมากกว่าฐานพีกในรูปที่ 4.1 นั่นเป็นเพราะว่าเมื่อใช้เวลาในการบ่มกวนสารมาก จะทำให้สารประกอบสามารถเข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโครงร่าง (Framework) ผลึกของซีโอไลต์ได้มากขึ้น โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์จึงมีความสมบูรณ์และมีลักษณะเป็นสัณฐานมากกว่า

□ การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ซึ่งใช้เวลาในการบ่มกวน 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะของผลึกของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการบ่มกวน 6 ชั่วโมง พบว่า ผลึกมีลักษณะเป็นเหลี่ยมลูกบาศก์ จับตัวกันเป็นก้อนและขนาดของผลึกค่อนข้างเล็ก

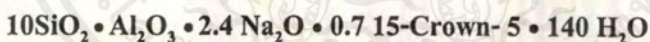


รูปที่ 4.4 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่ใช้เวลาในการปั่นกวน 24 ชั่วโมง

รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการปั่นกวน 24 ชั่วโมง พบว่าผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมลูกบาศก์ การกระจายตัวค่อนข้างดี ขนาดของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างเล็ก

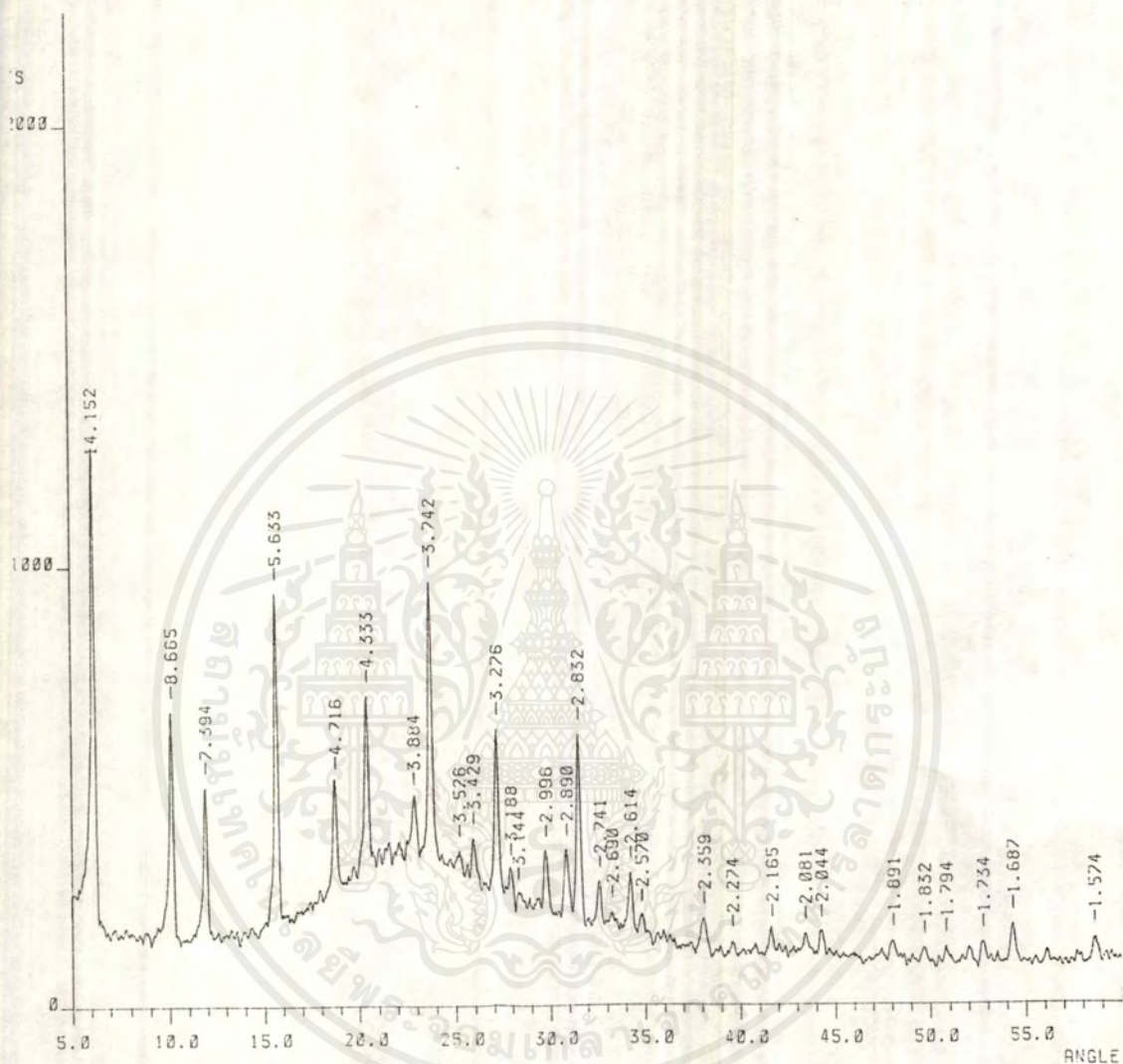
4.2 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่มี Si/Al เท่ากับ 4 (Y-4)

จากการศึกษาวิธีการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y-4 ซึ่งมีสูตรเจดดังนี้



และเมื่อนำสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) พบว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ชนิด Y-4 (ดังแสดงในรูปที่ ข2 ภาคผนวก ข) แต่สารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะของอสังฐานปนอยู่ดูได้จาก ฐานพิคของรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ไม่เรียบ นั่นเป็นเพราะว่าสารแขวนลอยซิลิกาบางส่วนจับตัวกันเป็นก้อน ไม่เข้าไปทำปฏิกิริยาเพื่อสร้างพันธะอะตอมอื่นๆในส่วนประกอบ จึงทำให้สารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นอสังฐานปนอยู่

□ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y-4 ที่สังเคราะห์ขึ้น

4.3 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y-4 ที่ได้จากโครงการงานพิเศษเรื่องผลของโครงสร้างทางโทปอโลยีของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ในการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE ปีการศึกษา 2540^[2] และ ZSM-5 ที่ได้จากโครงการงานพิเศษเรื่องการสังเคราะห์สารอินทรีย์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ปีการศึกษา 2542^[3]

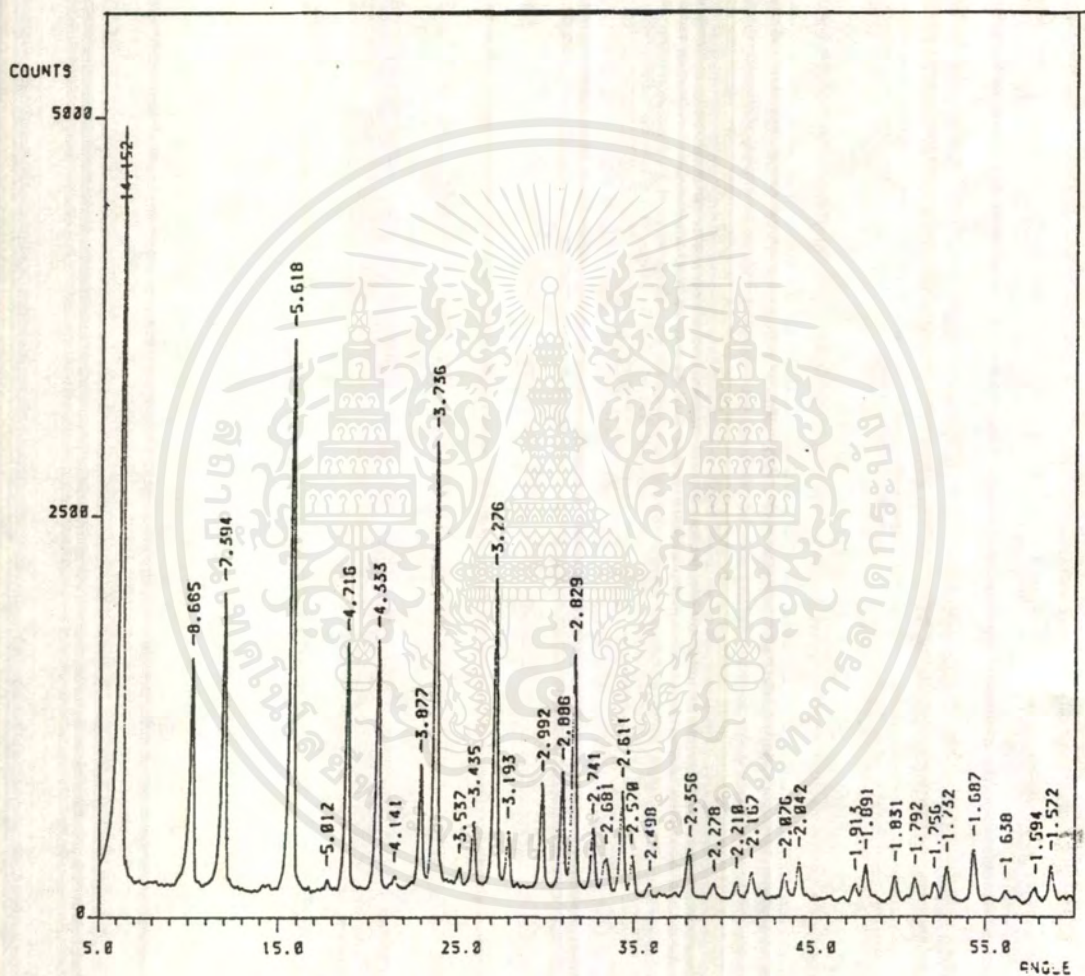
เมื่อนำซีโอไลต์ชนิด Y-4 และ ZSM-5 ที่ผ่านการเผาไล่เทมเพิลอินทรีย์แล้ว มา

วิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) และเทคนิคการวิเคราะห์เอกซสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

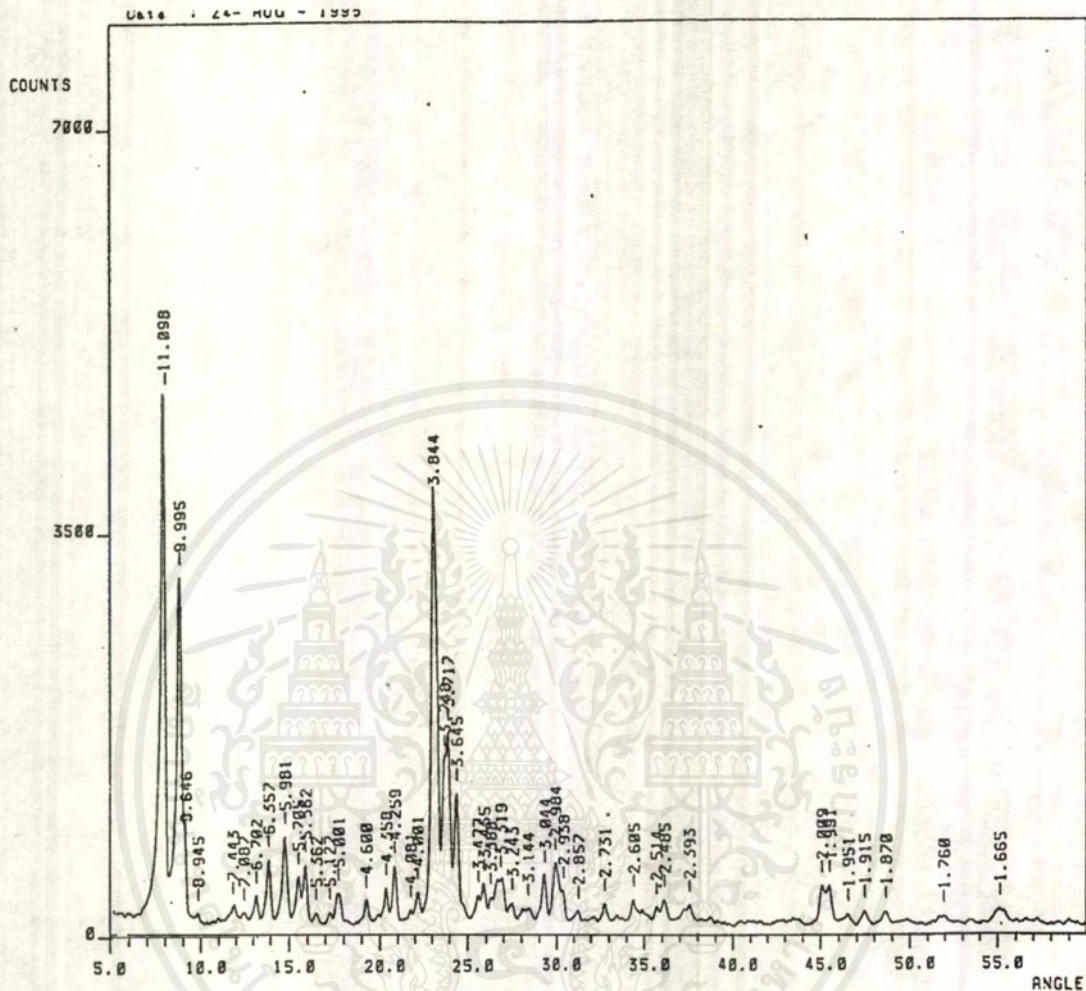
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่ารูปแบบที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ชนิด Y-4 ดังแสดงในภาคผนวก ข ได้ผลการทดลองดังนี้

□ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์(XRD)

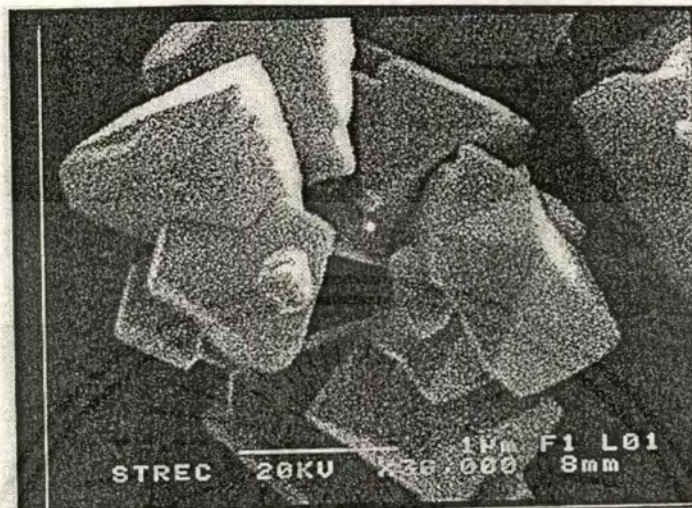


รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y-4 ที่นำมาศึกษา^[2]

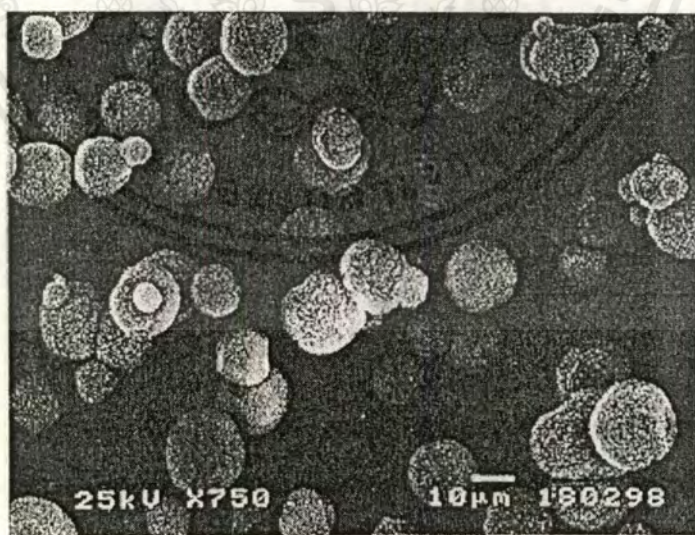


รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่นำมาศึกษา^[3]

□ การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 4.8 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยา ซีโอไลต์ชนิด Y-4 ที่นำมาศึกษา^[2]

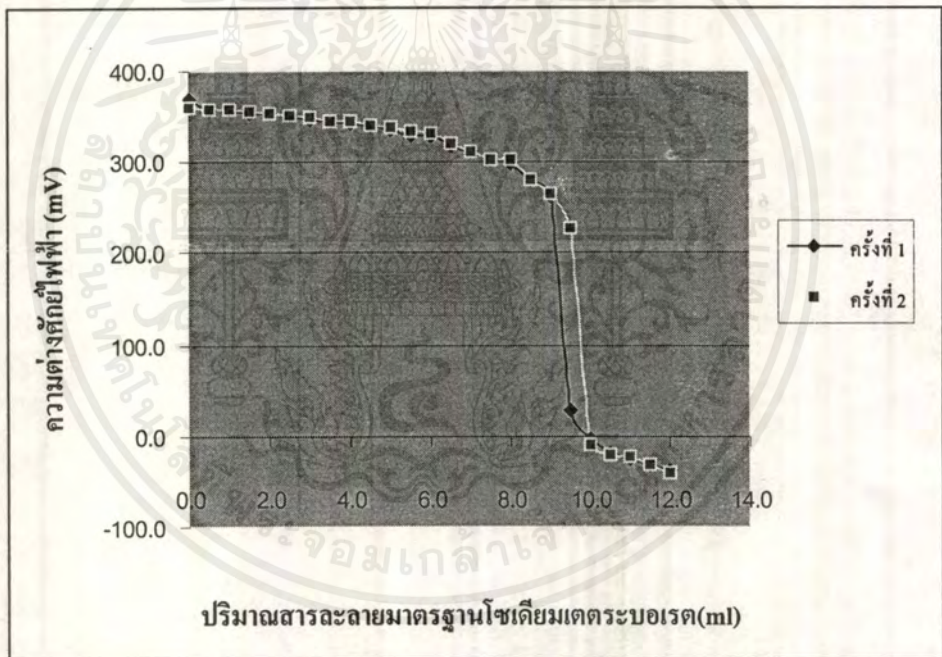


รูปที่ 4.9 แสดงภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ที่นำมาศึกษา^[3]

4.4 การหาปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด (H-ZSM-5) โดยอาศัยเทคนิคโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน

ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา ยังไม่ได้เตรียมให้มีฤทธิ์เป็นกรดจึงต้องทำให้ฤทธิ์เป็นกรดด้วยวิธีดังนี้ เตรียมได้จากการแลกเปลี่ยนไอออนโซเดียม (Na^+) ด้วยไอออนแอมโมเนียม (NH_4^+) และทำการเผาไล่แอมโมเนียออก

ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก หาได้จากการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมเตตระโบเรต ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.19 โมลาร์ แล้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าสามารถหาค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกได้เท่ากับ 0.04 โมลาร์ ผลการไทเทรตแสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายมาตรฐาน โซเดียมเตตระโบเรตและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

การคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ HCL

น้ำหนักโมเลกุลของ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 202 g/mol

น้ำหนักของ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 3.81 กรัม ละลายในน้ำ 100 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมเตตระโบเรต 0.19 M

จากกราฟหาจุดยุติได้ปริมาณของ สารละลายมาตรฐาน โซเดียมเตตระโบเรต 9.30 ml

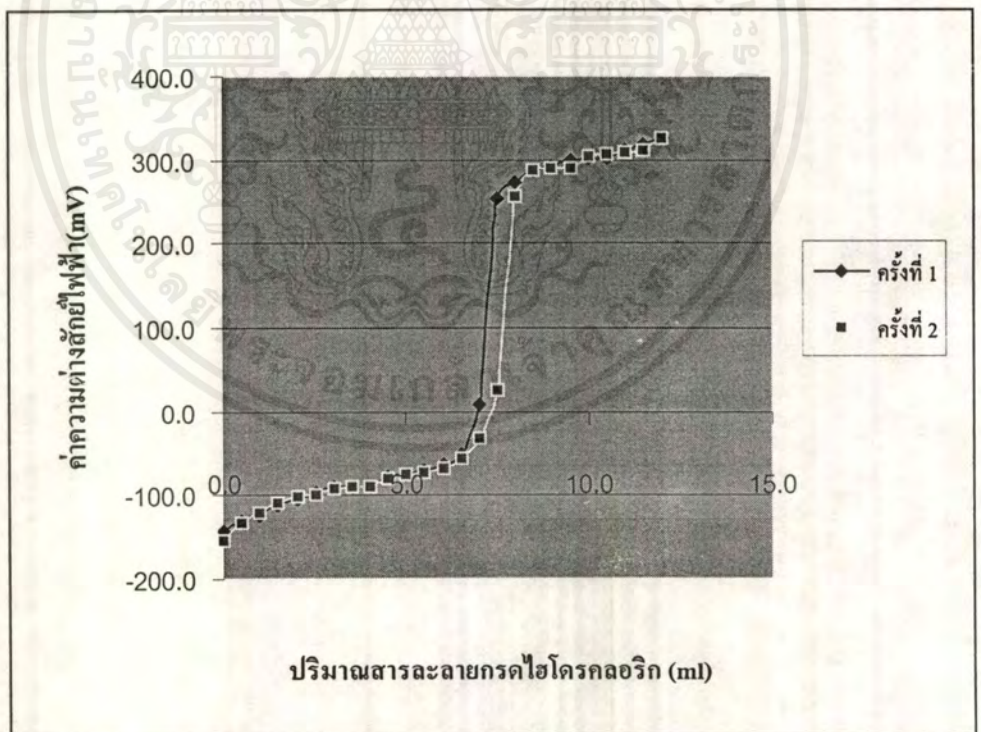
$$\begin{aligned} \text{mol Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 &= 1 \\ \text{mol HCl} &= 2 \end{aligned}$$

$$0.19 \times 9.3 = 0.5 \times C \times 25$$

$$\therefore C = 0.14 \text{ M}$$

ดังนั้น ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 0.14 M

จากนั้นนำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกนี้ไปหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ผลจากการไทเทรตพบว่า หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ได้เท่ากับ 0.04 โมลาร์ ผลจากการไทเทรตแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



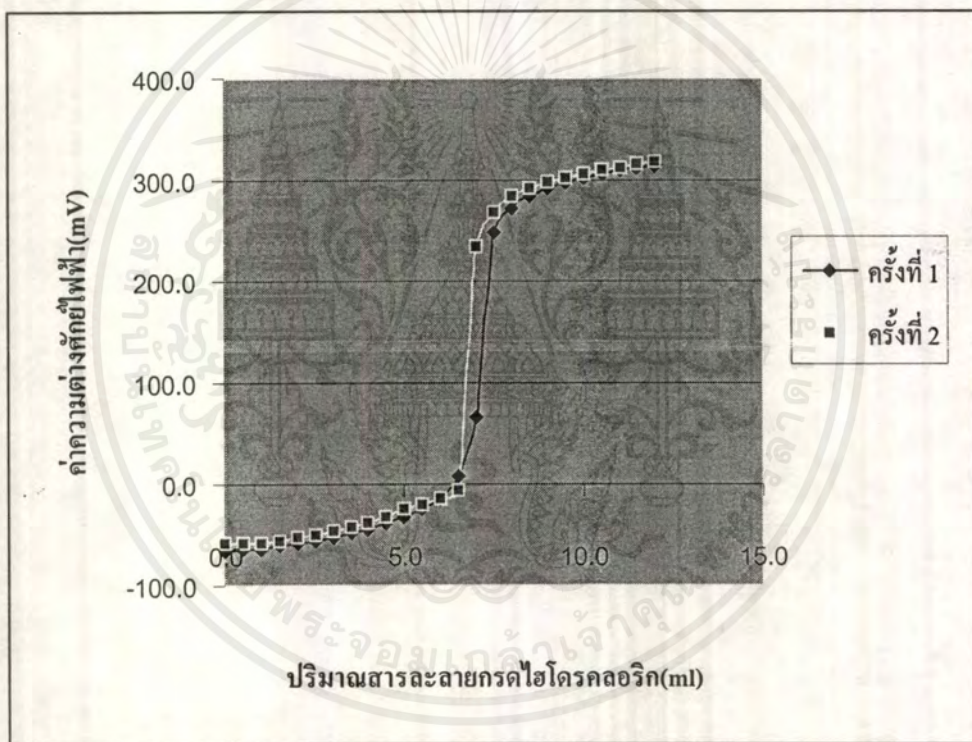
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการไทเทรตหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟ สามารถหาจุดยุติได้ ปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 7.70 ml
 ดังนั้น ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 0.04 M

เมื่อทราบความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์แล้ว นำไป
 หาค่าปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ด้วยการไทเทรตแบบ
 ย้อนกลับ โดยอาศัยเทคนิคโพเทนซิโอเมตริกไทเทรชัน หาจุดยุติจากกราฟ เพื่อนำมาคำนวณหา
 ปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ผลแสดงดังรูปที่ 4.12

น้ำหนักซีโอไลต์ ครั้งที่ 1 75.20 mg
 ครั้งที่ 2 75.50 mg



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริกและค่า
 ความต่าง ศักย์ไฟฟ้าในการไทเทรตหาปริมาณความเป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอ
 ไลต์ชนิด ZSM-5 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด (H-ZSM-5) ที่มี Si/Al เท่ากับ 38.9

จากกราฟสามารถหาจุดยุติได้ปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 7.20 ml

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\ C_1 &= \text{ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_2 &= \text{ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์} \\
 V_1 &= \text{ปริมาตรของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก} \\
 V_2 &= \text{ปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือ}
 \end{aligned}$$

$$0.14 \times 7.2 = 0.04 \times V_2$$

$$V_2 = 23.40 \text{ ml}$$

ดังนั้น ปริมาตรสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับซีโอไลต์ = 1.61 ml

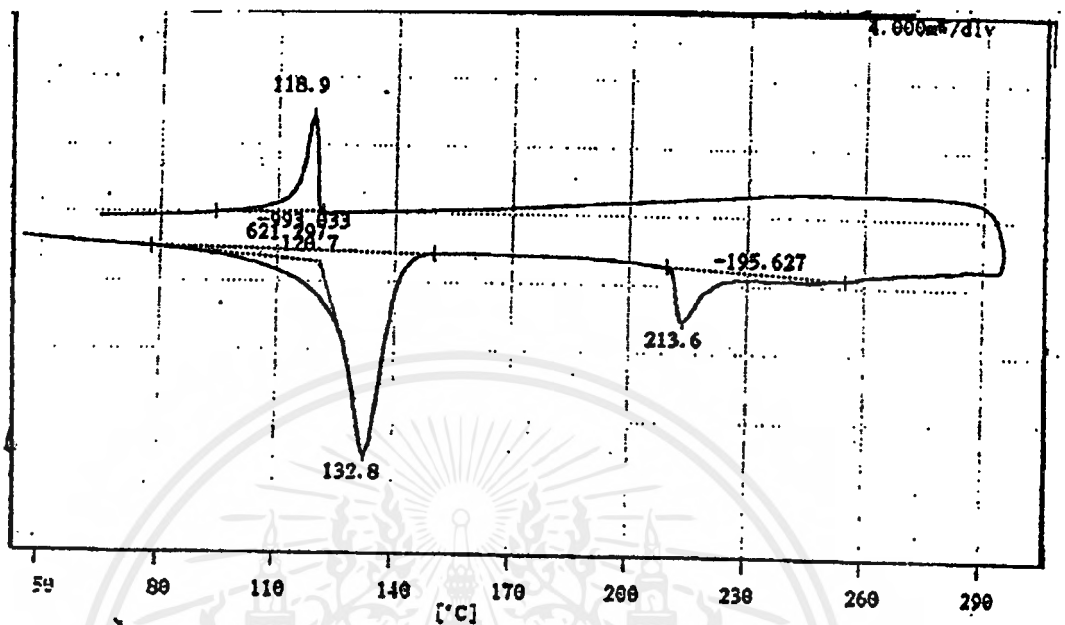
$$\text{mol HCl} = \frac{0.04 \times 1.61}{1000} = 6.98 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

1000

ดังนั้นปริมาณกรดในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM 5 = 9.25×10^{-4} โมล/ กรัมของซีโอไลต์

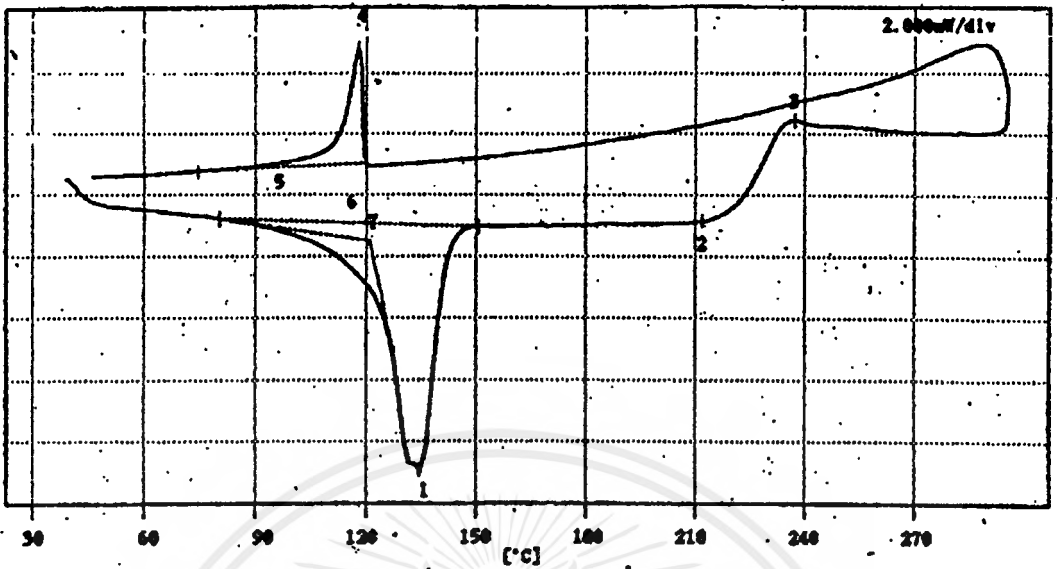
4.5 ผลของการศึกษาการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเครื่อง DSC

จากการศึกษาการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิค DSC ที่อุณหภูมิในช่วง 30-300°C โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 10°C/นาที ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ทั้งที่เติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ จะไม่มีพีคของการสลายตัวทางความร้อนอันเนื่องมาจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิ 210-230°C ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.14 แสดง DSC Curve ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ชนิด H-Y

สำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 พบว่าเกิดฟีกของการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิประมาณ 210°C ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์เช่นกัน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15 ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y จะเห็นว่าสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al สูง มีประจุลบที่เกิดจากอะลูมิเนียมในโครงสร้างน้อย โปรตอนที่ต้องการใช้ดุลประจุในซีโอไลต์จึงมีน้อย ทำให้ซีโอไลต์ชนิดนี้มีความเป็นกรดต่ำ (Acidity) แต่มีความแรงของกรด (Acid strength) ที่สูง เปรียบเทียบกับ ซีโอไลต์ชนิด H-Y ที่มีค่า Si/Al ต่ำ มีปริมาณของอะลูมิเนียมในโครงสร้างมาก โปรตอนที่ดุลประจุบนอะลูมิเนียมจึงมีมาก ทำให้ความเป็นกรดสูง แต่มีความแรงของกรดต่ำ ซีโอไลต์ H-ZSM-5 จึงสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดไอออนคาร์บีนีเนียมภายในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ได้ดีกว่า ทำให้เกิดการสลายตัวได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าด้วย



รูปที่ 4.15 แสดง DSC Curve ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
ที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ชนิด H-ZSM-5

ส่วนพิกที่ เกิดจากการหลอมเหลวเนื่องมาจากความร้อนอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 130°C โดยมีจุดที่เริ่มเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 120°C และเกิดพิกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์อยู่ที่อุณหภูมิประมาณ $118-119^{\circ}\text{C}$ เป็นพิกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่พอลิเมอร์ หลังการหลอมเหลว

4.6 การวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

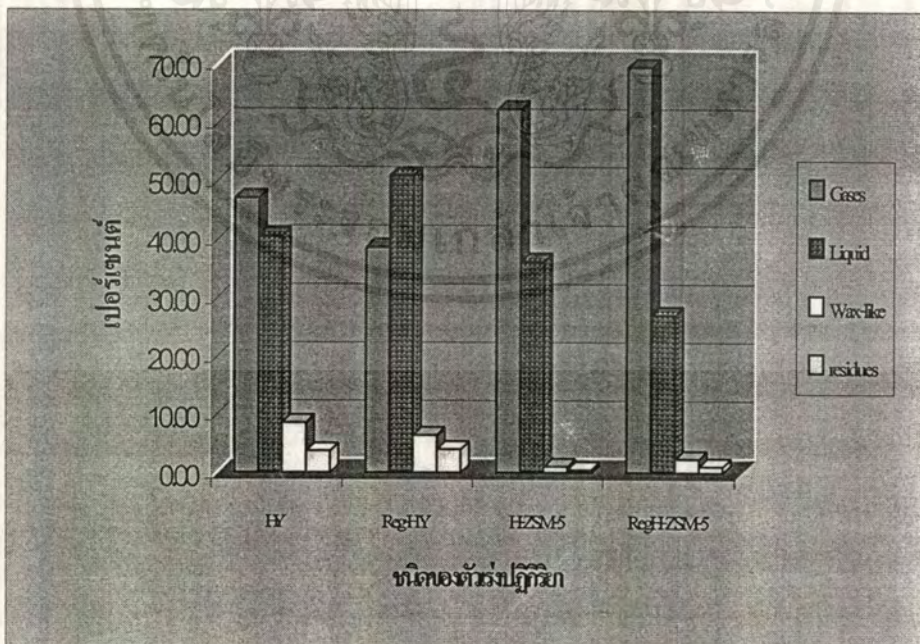
จากการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ โดยผ่านกระบวนการแบบครั้ง ที่อุณหภูมิ 430°C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซฮีเลียม พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง สามารถเกิดการสลายตัวทางความร้อน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนทั้งหมด 4 ประเภท คือ ก๊าซ ของเหลว สารประกอบแวกซ์ และกากรคาร์บอน ซึ่งปริมาณของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นกับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์แสดงให้เห็นถึงผลของโครงสร้างรูพรุนของซีโอไลต์ที่มีต่อการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มี

ปริมาณแตกต่างกัน ดังตารางที่ 4.1 จากตารางที่ได้ สามารถแสดงผลในรูปของกราฟได้ดัง รูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.1 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

Product Yield (wt %)	Catalysts			
	H-Y	RegH-Y	H-ZSM-5	RegH-ZSM-5
Gases (G)	47.06	38.69	62.31	69.53
Liquid (L)	40.66	50.88	36.25	27.13
Waxy Compound (W)	8.59	6.43	0.98	2.29
Residues (R)	3.68	4.00	0.46	1.04

$$G = 100 - (L + W + R)$$



รูปที่ 4.16 แสดงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวในช่วงอะตอมคาร์บอน 5-12 อะตอม มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ ซึ่งอยู่ในช่วงอะตอมคาร์บอน 3-6 อะตอม ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซมากกว่าของเหลว เนื่องจากซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 มีความแรงของตำแหน่งที่เป็นกรดสูง สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดไอออนคาร์โบเนียมขึ้นบนสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่แพร่ผ่านเข้าไปในซีโอไลต์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวได้พาราฟินและไอออนคาร์โบเนียมขึ้นจากนั้นจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ (Rearrangement) ของสภาวะทรานซิชันของไอออนคาร์โบเนียมก่อนเกิดการแตกตัว ทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์เป็นพาราฟินที่มีกิ่ง และเกิดการถ่ายโอนไฮไดรด์ (Hydride transfer) ระหว่างไอออนคาร์โบเนียมที่ถูกดูดซับอยู่ภายในโพรงกับสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งทำให้เกิดการแตกตัวของสายโซ่แบบ β -scission ได้ไอออนคาร์โบเนียมที่สามารถเกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ต่อไป นอกจากนี้รูพรุนขนาดเล็กของซีโอไลต์ H-ZSM-5 ที่มีขนาดเพียง 0.55 นาโนเมตร ยังเป็นตัวจำกัดขนาดของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นให้ได้เป็นพาราฟินที่มีโมเลกุลต่ำ จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซมากกว่าของเหลว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ H-Y ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ประมาณ 1.2 นาโนเมตร และมีความแรงของตำแหน่งกรดที่น้อยกว่าซีโอไลต์ H-ZSM-5 จึงเหนี่ยวนำให้เกิดไอออนคาร์โบเนียมบนสายโซ่พอลิเมอร์ได้น้อยกว่า เมื่อเกิดการสลายตัวจึงเกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูงได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลวมากกว่าก๊าซ

นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ซีโอไลต์ชนิด RegH-Y และ RegH-ZSM-5 เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการเร่งปฏิกิริยากับซีโอไลต์ชนิด H-Y และ H-ZSM-5 ที่สังเคราะห์ใหม่ดังรูปที่ 4.16 โดยพบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่ได้มี 4 ประเภทเช่นเดียวกัน แต่มีปริมาณของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดแตกต่างกันไป คือ ทั้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซและของเหลวคล้ายกับที่ได้จากซีโอไลต์ชนิด H-Y และ H-ZSM-5 ที่สังเคราะห์ใหม่ คือ อยู่ในช่วงของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนในช่วงเดียวกัน โดยก๊าซที่ได้จากซีโอไลต์ชนิด RegH-Y จะมีปริมาณลดลง ซึ่งอนุมานได้ว่าเป็นผลจากการผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) ที่ทำให้ตำแหน่งของกรดภายในรูพรุนซีโอไลต์ถูกทำลายไปบางส่วน ความสามารถในการเหนี่ยวนำ ให้เกิดไอออนคาร์โบเนียมบนสายโซ่ของพอลิเมอร์จึงลดลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเป็นก๊าซน้อย

ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวพบว่า มีปริมาณมากในช่วงอะตอมคาร์บอน C_{10} ขึ้นไป เนื่องจากมีสารประกอบแวกซ์ปนอยู่บางส่วน ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดถ่านโค้กภายในซีโอไลต์ ทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง จึงเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่

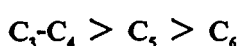
ได้มากขึ้น เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซและของเหลวที่ได้จากซีโอไลต์ RegH-ZSM-5 จะพบว่า แนวมืดที่เกิดขึ้น ไม่แตกต่างจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา H-ZSM-5 ที่สังเคราะห์ใหม่ ซึ่งสามารถอธิบายได้จากกลไกการเกิดสารประกอบ Polynuclear aromatics ที่เป็นสาเหตุของการเกิดถ่านโค้ก โดยเมื่อเกิดการสลายตัวของไอออนคาร์บอนเนียมในสายโซ่ของพอลิเอทีลิน เป็นพาราฟินและโอเลฟินแล้ว ผลิตภัณฑ์เริ่มต้นยังสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องจากการรวมตัวของโมเลกุลโอเลฟินที่ได้จากการแตกตัว เกิดเป็นถ่านโค้กที่เป็นสารประกอบระหว่างพาราฟินกับอะโรมาติก โดยพาราฟินกับอะโรมาติก จะสามารถเกิดปฏิกิริยาการเติมหมู่อัลคิล (Alkylation) การปิดวง(Ring closure) และการกำจัดไฮโดรเจน ได้สารประกอบ Polynuclear aromatics ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเคลือบอยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพได้ แต่ซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 มีรูพรุนขนาดเล็กจึงทำให้สาร Polynuclear aromatics เกิดขึ้นได้น้อย ซีโอไลต์ชนิด RegH-ZSM-5 มีสมบัติไม่แตกต่างจากซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5

นอกจากนั้น ค่าของ Si/Al ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความเสถียรต่อความร้อนของซีโอไลต์คือ โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ที่ Si/Al สูง มีความเสถียรต่อความร้อนได้สูงมากกว่า 600 °C ในขณะที่ซีโอไลต์ชนิด H-Y ซึ่งมีค่าของ Si/Al ต่ำ สามารถทนความร้อนได้ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 400-600 °C เท่านั้น ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ ซีโอไลต์ชนิด RegH-ZSM-5 จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างมากเท่ากับซีโอไลต์ชนิด RegH-Y

4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทีลินชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

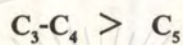
4.7.1 ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อน ของพอลิเอทีลินชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) ภายใต้บรรยากาศของก๊าซฮีเลียม พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y จะเกิดสารผลิตภัณฑ์เป็นพวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากับ 3-6 อะตอม โดยมีปริมาณตามลำดับ ดังนี้



สามารถอธิบายได้จากความแรงของกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y ที่สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดไอออนคาร์โบเนียมบนสายโซ่พอลิเมอร์ แล้วสลายตัวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลต่ำได้ดี

แต่จากการศึกษาสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 จะพบว่าสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ได้มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากับ 3-5 อะตอม ปริมาณที่ได้ เรียงตามลำดับดังนี้คือ

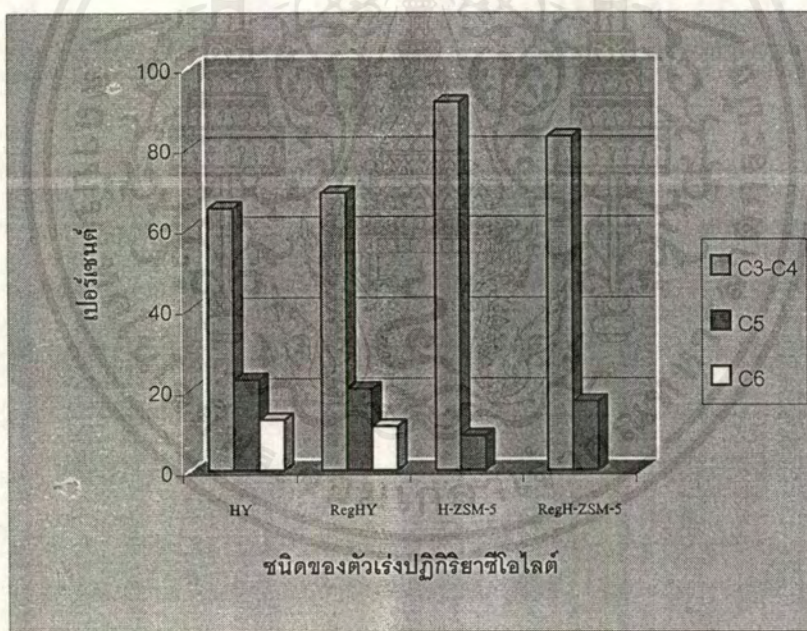


ซึ่งเป็นผลมาจากความแรงของกรดใน H-ZSM-5 ที่มีมากกว่าซีโอไลต์ H-Y ทำให้โปรตอนใน H-ZSM-5 สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดไอออนคาร์โบเนียมได้ดีกว่า ทำให้เกิดการสลายตัวของพอลิเมอร์ได้สารพาราฟินและไอออนคาร์โบเนียมที่มีโมเลกุลเล็กๆได้ และรูพรุนที่มีขนาดเพียง 0.55 นาโนเมตร ก็เป็นตัวจำกัดขนาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จึงพบว่าเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากับ 3-5 อะตอมเท่านั้น แต่ไม่เกิด C_6 เหมือนในซีโอไลต์ H-Y

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y และ RegH-ZSM-5 พบว่า ก๊าซที่ได้มีช่วงของอะตอมคาร์บอนเช่นเดียวกับที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y และ H-ZSM-5 ที่สังเคราะห์ใหม่ แต่ในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y มีปริมาณของก๊าซที่ได้ลดน้อยลง ส่วนปริมาณของก๊าซที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-ZSM-5 ได้ปริมาณของก๊าซไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก ปริมาณของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการ แสดงผลดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจากตารางที่ได้สามารถแสดงได้เป็นรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

Gas Product Yield (wt %)	Catalysts			
	H-Y	RegH-Y	H-ZSM-5	RegH-ZSM-5
C ₃ -C ₄	64.88	68.74	91.38	82.90
C ₅	22.54	20.32	8.62	17.10
C ₆	12.58	10.94	-	-

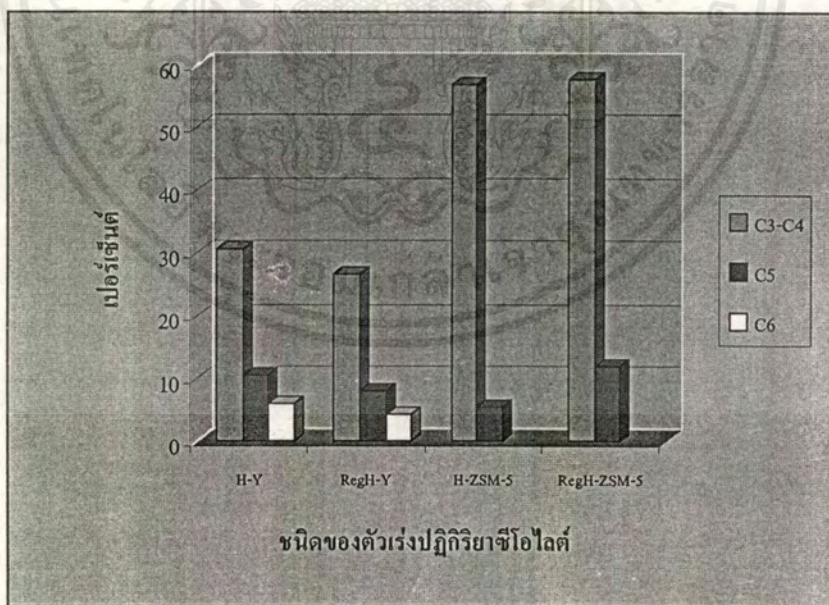


รูปที่ 4.17 แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

เมื่อนำปริมาณของอะตอมคาร์บอนจากผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จาก GC (คิดเทียบเป็น 100%) มาคำนวณหาปริมาณของอะตอมคาร์บอนจริงในผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (คิดเทียบจาก % ของผลิตภัณฑ์ของก๊าซที่เกิดขึ้น) จะได้ผลดังตารางที่ 4.3 และจากตารางที่ได้ สามารถแสดงผลได้เป็นรูปที่ 4.18

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณของอะตอมคาร์บอนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ก๊าซ

Gas Product Yield (wt %)	Catalysts			
	H-Y	RegH-Y	H-ZSM-5	RegH-ZSM-5
C ₃ -C ₄	30.53	26.59	56.94	57.64
C ₅	10.61	7.86	5.37	11.89
C ₆	5.92	4.24	-	-



รูปที่ 4.18 แสดงปริมาณของอะตอมคาร์บอนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ก๊าซ

4.7.2 ผลผลิตของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

จากการวิเคราะห์ผลผลิตของเหลวที่ได้จากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี ภายใต้บรรยากาศของก๊าซฮีเลียม พบว่าเกิดสารผลิตภัณฑ์พวกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลต่ำที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนตั้งแต่ 5-12 อะตอม ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี และระเหยได้ง่าย

ของเหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอน 7-8 อะตอม เมื่อศึกษาเปรียบเทียบกับของเหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y พบว่าของเหลวที่เกิดขึ้นเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนที่มีลักษณะเช่นเดียวกันกับของเหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y ที่สังเคราะห์ใหม่ แต่มีลักษณะเป็นของเหลวสีเหลืองอ่อน เนื่องจากมีสารประกอบแวกซ์ปนอยู่ อันเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดถ่านโค้กภายในรูพรุนของซีโอไลต์ ทำให้ความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาลดลง

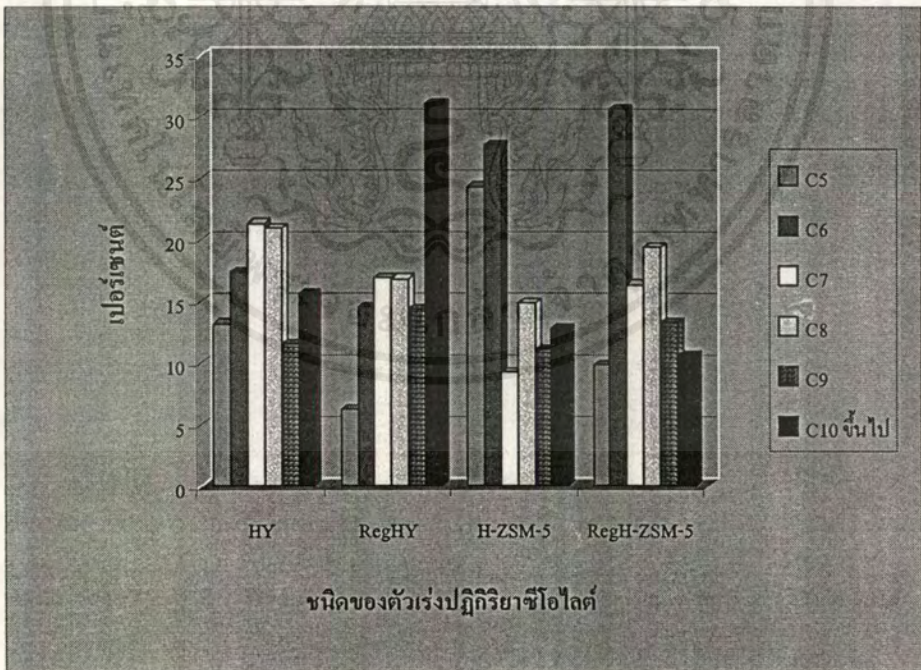
ส่วนของเหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 จะมีจำนวนอะตอมคาร์บอนของของเหลวเท่ากับ 6 อะตอมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแตกต่างจากซีโอไลต์ชนิด H-Y ที่มีผลผลิตหลักอยู่ในช่วง 7-8 อะตอม โดยสามารถอธิบายได้จากความแรงของกรด และขนาดของรูพรุนที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาของเหลวที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-ZSM-5 จะมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี เช่นเดียวกับที่ได้จากซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ที่สังเคราะห์ใหม่ เนื่องจากซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 มีขนาดของรูพรุนขนาดเล็ก ทำให้เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวของพาราฟินกับสารอะโรมาติก เกิดเป็น Polynuclear aromatics ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดถ่านโค้กในซีโอไลต์ได้น้อย ลักษณะของของเหลวที่ได้จึงไม่เปลี่ยนแปลง

ปริมาณของผลผลิตของเหลวที่ได้จากกระบวนการ แสดงผลดังตารางที่ 4.4 ซึ่งจากตาราง สามารถแสดงผลเป็นดังรูปที่ 4.19

ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

Liquid Product Yield (wt %)	Catalysts			
	H-Y	RegH-Y	H-ZSM-5	RegH-ZSM-5
C ₅	13.18	6.25	24.33	9.86
C ₆	17.39	14.48	27.69	30.69
C ₇	21.33	16.88	9.19	16.31
C ₈	20.94	16.81	14.88	19.37
C ₉	11.50	14.38	11.08	13.26
C ₁₀ ขึ้นไป	15.66	31.19	12.83	10.51

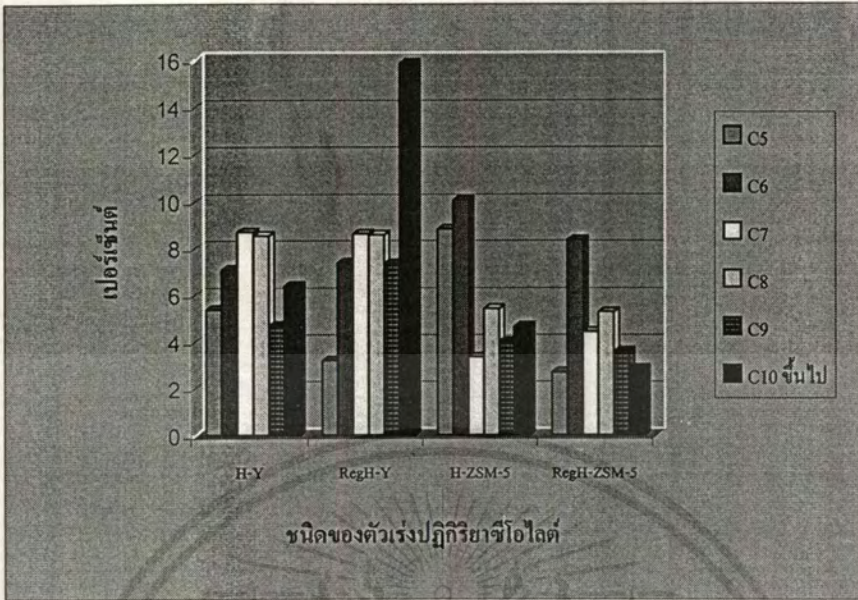


รูปที่ 4.19 แสดงปริมาณของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

เมื่อนำปริมาณของอะตอมคาร์บอนจากผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จาก GC (คิดเทียบเป็น 100%) มาคำนวณหาปริมาณของอะตอมคาร์บอนจริงในผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อน (คิดเทียบจาก % ของผลิตภัณฑ์ของของเหลวที่เกิดขึ้น) จะได้ผลดังตารางที่ 4.9 และจากตาราง สามารถแสดงผลดังรูปที่ 4.20

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณของอะตอมคาร์บอนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของเหลว

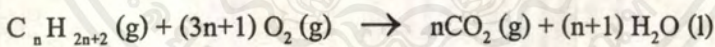
Liquid Product Yield (wt %)	Catalysts			
	H-Y	RegH-Y	H-ZSM-5	RegH-ZSM-5
C ₅	5.36	3.18	8.82	2.68
C ₆	7.07	7.37	10.04	8.33
C ₇	8.67	8.59	3.33	4.42
C ₈	8.51	8.55	5.39	5.26
C ₉	4.68	7.32	4.02	3.59
C ₁₀ ขึ้นไป	6.37	15.87	4.65	2.85



รูปที่ 4.20 แสดงปริมาณของอะตอมคาร์บอนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของเหลว

4.8 การคำนวณค่าพลังงานการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE ปริมาณ 1 กรัม

ค่าพลังงานการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE สามารถคำนวณจากสมการ



$$\Delta H_{total} = n \Delta H_f^\circ, CO_2 + (n+1) \Delta H_f^\circ, H_2O - \Delta H_f^\circ, C_n H_{2n+2}$$

เมื่อ n = จำนวนโมล

ΔH_f°	$H_2O (l)$	=	-68.317	kcal / mol
	$CO_2 (g)$	=	-94.051	kcal / mol
	$O_2 (g)$	=	0.000	kcal / mol
	$C_3H_8 (g)$	=	-24.82	kcal / mol
	$C_4H_{10} (g)$	=	-31.150	kcal / mol
	$C_5H_{12} (g)$	=	-35.960	kcal / mol
	$C_6H_{14} (g)$	=	-40.810	kcal / mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงจำนวนโมลของสารผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ต่างกัน

Catalyst	จำนวนโมล (n)		
	C ₃ -C ₄	C ₅	C ₆
H-Y	0.028 x 10 ⁻¹	0.069 x 10 ⁻²	0.032 x 10 ⁻²
RegH-Y	0.020 x 10 ⁻¹	0.042 x 10 ⁻²	0.019 x 10 ⁻²
H-ZSM-5	0.069 x 10 ⁻¹	0.046 x 10 ⁻²	-
RegH-ZSM-5	0.078 x 10 ⁻¹	0.114 x 10 ⁻²	-

เมื่อแทนค่า n และ ΔH° ลงในสมการข้างต้น ค่าพลังงานการเผาไหม้คำนวณออกมาได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพลังงานความร้อนในการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ก๊าซจากกระบวนการสลายตัวของ HDPE ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ต่างกัน

Catalyst	ค่าพลังงานความร้อน	
	kcal	Btu
H-Y	2.60	10.34
RegH-Y	1.76	6.98
H-ZSM-5	4.59	18.20
RegH-ZSM-5	5.71	22.64

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE

พลังงานที่ใช้จากเตาเผา (furnace) Max Temperature 1200 °C

Max Power 0.7 kW

อุณหภูมิคงที่ 140 °C เป็นเวลา ครึ่งชั่วโมง ใช้พลังงาน

ตารางที่ 4.6 แสดงจำนวน โมลของสารผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลาย
ตัวทางความร้อนของ HDPE ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ต่างกัน

Catalyst	จำนวนโมล (n)		
	C ₃ -C ₄	C ₅	C ₆
H-Y	0.028 x 10 ⁻¹	0.069 x 10 ⁻²	0.032 x 10 ⁻²
RegH-Y	0.020 x 10 ⁻¹	0.042 x 10 ⁻²	0.019 x 10 ⁻²
H-ZSM-5	0.069 x 10 ⁻¹	0.046 x 10 ⁻²	-
RegH-ZSM-5	0.078 x 10 ⁻¹	0.114 x 10 ⁻²	-

เมื่อแทนค่า n และ ΔH°_f ลงในสมการข้างต้น ค่าพลังงานการเผาไหม้คำนวณออกมา
ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพลังงานความร้อนในการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ก๊าซจาก
กระบวนการสลายตัวของ HDPE ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ต่างกัน

Catalyst	ค่าพลังงานความร้อน	
	kcal	Btu
H-Y	2.60	10.34
RegH-Y	1.76	6.98
H-ZSM-5	4.59	18.20
RegH-ZSM-5	5.71	22.64

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE

พลังงานที่ใช้จากเตาเผา (furnace) Max Temperature 1200 °C

Max Power 0.7 kW

อุณหภูมิคงที่ 140 °C เป็นเวลา ครึ่งชั่วโมง ใช้พลังงาน

$$\frac{140 \times 0.7 \times 30}{1200 \times 60} = 0.0408 \text{ kWh}$$

$$= 139.35 \text{ Btu} \quad (1 \text{ kWh} = 3.4128 \times 10^3 \text{ Btu})$$

อุณหภูมิของปฏิกิริยาเพิ่มจาก 140 °C – 430 °C ใช้เวลา 5 นาที ใช้พลังงาน

$$\frac{285 \times 0.7 \times 5}{1200 \times 60} = 0.0139 \text{ kWh}$$

$$= 47.438 \text{ Btu}$$

อุณหภูมิคงที่ 430 °C เป็นเวลา ครึ่งชั่วโมง ใช้พลังงาน

$$\frac{430 \times 0.7 \times 30}{1200 \times 60} = 0.1255 \text{ kWh}$$

$$= 428.31 \text{ Btu}$$

เพราะฉะนั้น รวมพลังงานที่ใช้ในปฏิกิริยาทั้งหมด เท่ากับ

$$139.35 + 428.31 + 47.438 = 615.104 \text{ Btu}$$

เมื่อกำหนดปริมาณของ HDPE เพื่อให้ได้พลังงานความร้อนจากผลิตภัณฑ์ก๊าซให้เพียงพอ กับพลังงานความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยา ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณของ HDPE ที่ต้องใช้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อนจากผลิตภัณฑ์ก๊าซเพียงพอ กับพลังงานความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยา

Catalyst	ปริมาณ HDPE (g)
H-Y	59.49
RegH-Y	88.04
H-ZSM5	33.80
RegH-ZSM-5	27.18

จากการคำนวณค่าพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซ พบว่าในส่วนของ กระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE ที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y ต้องใช้ ถึง 59.49 กรัม จึงจะได้พลังงานความร้อนที่เพียงพอ กับค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในปฏิกิริยา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าใช้ RegH-Y ต้องใช้ HDPE ในปริมาณ 88.04 กรัม แต่ในส่วนของ H-ZSM-5 และ RegH-ZSM-5 ใช้ HDPE ในปริมาณ 33.80 และ 27.18 กรัม ตามลำดับ เพราะว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก H-ZSM-5 และ RegH-ZSM-5 ส่วนใหญ่เป็นก๊าซ

๕ ๑๒



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 การวิเคราะห์ซีโอไลต์ Y ที่มี Si/Al เท่ากับ 2 (Y-2)

จากการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้แหล่งของรังสีเอกซ์ (X-ray) คือ $\text{CuK}\alpha$ พบว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาดำเนินการ (aging) 6 และ 24 ชั่วโมง (ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ) มีรูปแบบเดียวกันกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ Na-P (GIS) (ดังรูปที่ ข1 ภาคผนวก ข)

ดังนั้น จึงสรุปว่าสารผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้นี้ เป็นซีโอไลต์ Na-P ไม่ใช่ซีโอไลต์ Y-2 ที่ต้องการ เนื่องจากในการสังเคราะห์ใช้เวลาในการอบสารนานเกินไป (48 ชั่วโมง) ซึ่งเป็นสถานะที่เหมาะสมกับการเกิดผลึกในโครงสร้างผลึกชนิดนี้ และเมื่อตรวจสอบรูปร่างลักษณะของผลึกของสารผลิตภัณฑ์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ปรากฏว่ารูปร่างของผลึกมีลักษณะเป็นเหลี่ยม เนื่องจาก Secondary building unit (sbu) โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ Na-P เป็นแบบ Single four ring (S4R)

ผลึกของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการบ่ม 6 และ 24 ชั่วโมง มีลักษณะต่างกัน โดยผลึกของสารผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการบ่ม 24 ชั่วโมง จะมีขนาดใหญ่กว่า การกระจายตัวของผลึกก็ดีกว่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เวลาที่ใช้ในการบ่มมีผลต่อรูปร่างลักษณะของผลึก เมื่อใช้เวลาในการบ่มนานจะทำให้โครงสร้างของผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น

5.2 การวิเคราะห์ซีโอไลต์ Y ที่มี Si/Al เท่ากับ 4 (Y-4)

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้ ดังรูปที่ 4.5 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ Y (ดังรูปที่ ข2 ภาคผนวก ข) พบว่าพิกซ์ที่ตำแหน่ง 2 θ เท่ากัน แต่รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสารผลิตภัณฑ์ มีฐานพิกซ์ไม่เรียบ ซึ่งเป็นลักษณะของสารที่เป็นอสัณฐาน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สารผลิตภัณฑ์นี้เป็นซีโอไลต์ Y-4 แต่มีอสัณฐานปนอยู่

5.3 การวิเคราะห์ซีโอไลต์ Y-4 และ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา

เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ Y-4 ที่นำมาศึกษา (ดังรูปที่ 4.6) กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ Y (ดังรูปที่ ข2 ภาคผนวก ข) พบว่ามีรูปแบบเดียวกัน ดังนั้นจึงสรุปว่าซีโอไลต์ Y-4 ที่นำมาศึกษา เป็นซีโอไลต์ Y-4 จริง และรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 (ดังรูปที่ 4.7) เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ ZSM-5 (ดังรูปที่ ข3 ภาคผนวก ข) พบว่า มีรูปแบบเดียวกัน ดังนั้นซีโอไลต์ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา เป็นซีโอไลต์ ZSM-5 จริง

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซีโอไลต์ Y-4 ดังรูปที่ 4.8 แสดงรูปร่างลักษณะของผลึกเป็นแบบเหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดของผลึกค่อนข้างใหญ่ มีการกระจายตัวของผลึกดี

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซีโอไลต์ ZSM-5 ดังรูปที่ 4.9 ลักษณะของผลึก มีรูปร่างกลม

5.4 การหาปริมาณความเป็นกรดของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา

การหาปริมาณความเป็นกรดของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่นำมาศึกษา โดยการไทเทรตแบบย้อนกลับ อาศัยเทคนิคโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน สามารถหาปริมาณความเป็นกรดของซีโอไลต์ ZSM-5 ได้เท่ากับ 9.25×10^{-4} โมล / กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ Y-4 ที่มีฤทธิ์เป็นกรด ซึ่งนำมาศึกษา มีปริมาณความเป็นกรด เท่ากับ 2.50×10^{-3} โมล / กรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด Y

5.5 การศึกษาการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ด้วยเทคนิค DSC

จากการศึกษาการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงด้วยเทคนิค DSC ทั้งที่มีการเติมและไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ จะไม่มีพีคของการสลายตัวของความร้อนเนื่องมาจากตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิค่าประมาณ $210-230^{\circ}\text{C}$ เกิดขึ้นเลย แสดงว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงไม่สามารถเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิค่าได้ เมื่อไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

ส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y และ H-ZSM-5 พบว่าเกิดฟีกของการสลายตัวที่อุณหภูมิค่าประมาณ 213.6°C และ 210°C ตามลำดับ แสดงว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y และซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 สามารถใช้เร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงได้

5.6 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y และชนิด H-ZSM-5 สามารถแบ่งได้ทั้งหมด 4 ประเภท คือ ก๊าซ ของเหลว สารประกอบแว็กซ์ และ กากคาร์บอน ซึ่งปริมาณของผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ใช้ แสดงให้เห็นถึงผลจากขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ และความแรงของตำแหน่งกรด (acid sites) ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ที่แตกต่างกันด้วย โดยซีโอไลต์ H-Y ซึ่งเป็นซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ประมาณ 1.2 นาโนเมตร และมีความแรงของกรดต่ำกว่า ซีโอไลต์ H-ZSM-5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากซีโอไลต์ชนิด H-Y จึงเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูงกว่า ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5 ซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็ก จะเกิดสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนต่ำ และมีโมเลกุลขนาดเล็ก ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากปริมาณของก๊าซและของเหลวที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ซีโอไลต์ชนิด RegH-Y และ Reg.H-ZSM-5 ทำให้สามารถสรุปได้ว่าขนาดของรูพรุนเป็นปัจจัยหนึ่งของการเกิดถ่านโค้กภายในซีโอไลต์ ซึ่งทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดการเสื่อมสภาพ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ซีโอไลต์ชนิด RegH-Y จะมีปริมาณของสารประกอบแว็กซ์ และ กากคาร์บอนที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์ H-Y มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่เพียงพอในการเกิดปฏิกิริยาได้เป็นถ่านโค้ก ในขณะที่ H-ZSM-5 ที่มีรูพรุนขนาดเล็กจนไม่สามารถเกิดถ่านโค้กได้นั้น ปริมาณของสารประกอบแว็กซ์และกากคาร์บอนที่เกิดขึ้นมีน้อยมาก และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจาก Reg.H-ZSM-5 ก็ไม่แตกต่างจากซีโอไลต์เดิมมากนัก

นอกจากนี้ความเสถียรต่อความร้อนที่มีผลมาจากค่าของ Si/Al ก็มีผลต่อสมบัติของซีโอไลต์เช่นกัน โดยซีโอไลต์ H-Y ที่มีค่าของ Si/Al ต่ำ จะมีสมบัติเสถียรต่อความร้อนต่ำ เมื่อผ่านกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่แล้ว โครงสร้างของรูพรุนภายในซีโอไลต์จึงเกิดการเสีย

เสียบางส่วน ในขณะที่ซีโอไลต์ H-ZSM-5 ที่มีค่าของ Si/Al สูง จึงมีความเสถียรต่อความร้อนมากกว่า สมบัติจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

5.7 การคำนวณค่าพลังงานการเผาไหม้ของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE ปริมาณ 1 กรัม

จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า การนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมาผ่านกระบวนการสลายตัวทางความร้อน โดยเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่า และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น ไม่เหมาะสมทางการค้า เนื่องจากถ้าคำนวณปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่จะต้องใช้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อนจากก๊าซเพียงพอกับพลังงานที่เตาเผาแบบท่อจะใช้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง 1 กรัม (615 Btu) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแวกซ์ มีปริมาณไม่มากพอที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จากการคำนวณพบว่าปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในปริมาณดังกล่าวในตารางนั้น พลังงานของเตาเผาแบบท่อที่ใช้ในตอนแรกไม่น่าจะเพียงพอที่จะสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงได้ทั้งหมด รวมทั้งค่าใช้จ่ายที่สูงที่ต้องใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในปริมาณมาก เมื่อนำเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแวกซ์ปริมาณน้อย ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น จะพบว่า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่จะต้องใช้ในการกระบวนการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนั้น มีค่ามากกว่าประโยชน์ที่จะได้จากผลิตภัณฑ์ที่เหลือ จึงควรจะมีการศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อลดค่าใช้จ่ายและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. Azhar,U.;Kazuo,K.;Kalsubhide,M.;Yusaka,S.,*Polymer degradation and stability*, 56,1997,37-44.

2. บรรจง เลิศโรจน์ชูสิทธิ์,วินิดา อัสวชัยพงษ์ และเอกรินทร์ วรุตบางกูร “ผลของโครงสร้างทางโทปอโลยีของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ในการสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูง” โครงการงานพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2540.

3. ชันธรัตน์ หิรัญชนะโชค และจตุพร ชีระกุล “การสังเคราะห์สารอินทรีย์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์” โครงการงานพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541.

4. Knouw,C.B. and Davis, M.E. in *Shape-Selective Catalysis with Zeolites and Molecular Sieves*, ACS Symposium Series (Davis,M.E. and Suib,S.L.), No 517, pp.206-221, American Chemical Society, Washington, DC ,U.S.A.,1993.

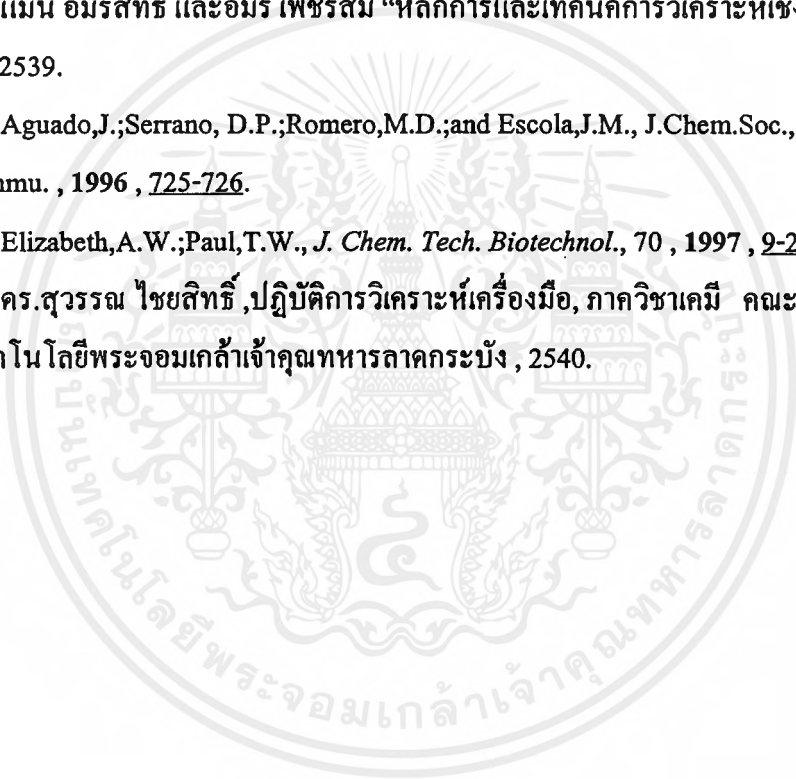
5. <http://www.iza.co.th>

6. Dyer,A.,*An Introduction to Zeolite Molecular Sieves*, John Wiley&Sons , 1988 , 109

7.โรจน์ฤทธิ์ โรจนธเนศ, “การสังเคราะห์และตรวจสอบลักษณะเฉพาะของสารประกอบโลหะชนิดวงขนาดใหญ่ในโพรงซีโอไลต์” โครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ , ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2541.

บรรณานุกรม

1. Gate, K.S., *Chemistry of Catalytic Processes*, McGraw-Hill Chemical Engineering Series, 1979, 10-18, 52-78.
2. Yoshio, U.; Akimi, A.; Yasunori, K.; and Hisao, K., *J. of Chromatography*, 259, 1983, 69-77.
3. Nigel, P.R.; Robert, R., *J. Chem. Soc. Faraday Trans.*, 89, 1993, 2551-2557.
4. แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม “หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ” กรุงเทพฯ, 2539.
5. Aguado, J.; Serrano, D.P.; Romero, M.D.; and Escola, J.M., *J. Chem. Soc., Chem. Comm.*, 1996, 725-726.
6. Elizabeth, A.W.; Paul, T.W., *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 70, 1997, 9-20.
7. ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์, ปฏิบัติการวิเคราะห์เครื่องมือ, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2540.



ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ขั้นตอนคำนวณการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

1.1 การสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU ที่มี Si / Al เท่ากับ 2

จากสูตรเจล $4.1023 \text{ SiO}_2 \cdot 2.6713 \text{ Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 66.2376 \text{ H}_2\text{O}$

ใช้น้ำในการสังเคราะห์ 35 กรัม คิดเป็น 1.944 โมล

ต้องใช้ Al_2O_3 $\frac{1.944}{66.2376}$ = 0.02936 โมล

$\frac{1.944}{66.2376}$

คิดเป็น = 2.9943 กรัม

Na_2O $\frac{2.6713 \times 1.944}{66.2376}$ = 7.8416×10^{-2} โมล

$\frac{2.6713 \times 1.944}{66.2376}$

คิดเป็น = 4.8618 กรัม

จากสาร $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ ประกอบด้วย Na_2O 49.1537 %
 Al_2O_3 50.1520 %
 H_2O 0.6943 % โดยน้ำหนัก

ฉะนั้น Al_2O_3 50.1520 กรัมได้จาก $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ 100 กรัม

Al_2O_3 2.9943 กรัมได้จาก $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ $\frac{100 \times 2.9943}{50.1520}$ = 5.9704 กรัม

$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ 100 กรัมมี Na_2O 49.1537 กรัม

ฉะนั้น $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ 5.9704 กรัมมี Na_2O $\frac{49.1537 \times 5.9704}{100}$ = 2.9347 กรัม

และ เกิดน้ำ $\frac{0.6943 \times 5.9704}{100}$ = 0.0414 กรัม

ในการสังเคราะห์ต้องการ Na_2O 4.8618 กรัม เพราะฉะนั้นต้องเพิ่ม Na_2O

ปริมาณ Na_2O ที่ต้องเพิ่ม = 4.8618 - 2.9347

= 1.9271 กรัม

คิดเป็น Na_2O = 3.1082×10^{-2} โมล

จากสมการ $2 \text{ NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$

ดังนั้นต้องใช้ NaOH = $2 \times 3.1082 \times 10^{-2}$ โมล

คิดเป็น NaOH = 2.4866 กรัม

NaOH 2.4866 กรัม เกิดน้ำ 0.5598 กรัม

ในส่วนของ SiO₂ ที่ต้องใช้ในการสังเคราะห์ $\frac{1.94 \times 4.1023}{66.2376} = 0.1202$ โมล

คิดเป็น SiO₂ = 7.2120 กรัม

จากสารแขวนลอยซิลิกา 40% โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย SiO₂ 40% น้ำ 60%

SiO₂ 40 กรัมได้จากสารแขวนลอยซิลิกา 100 กรัม

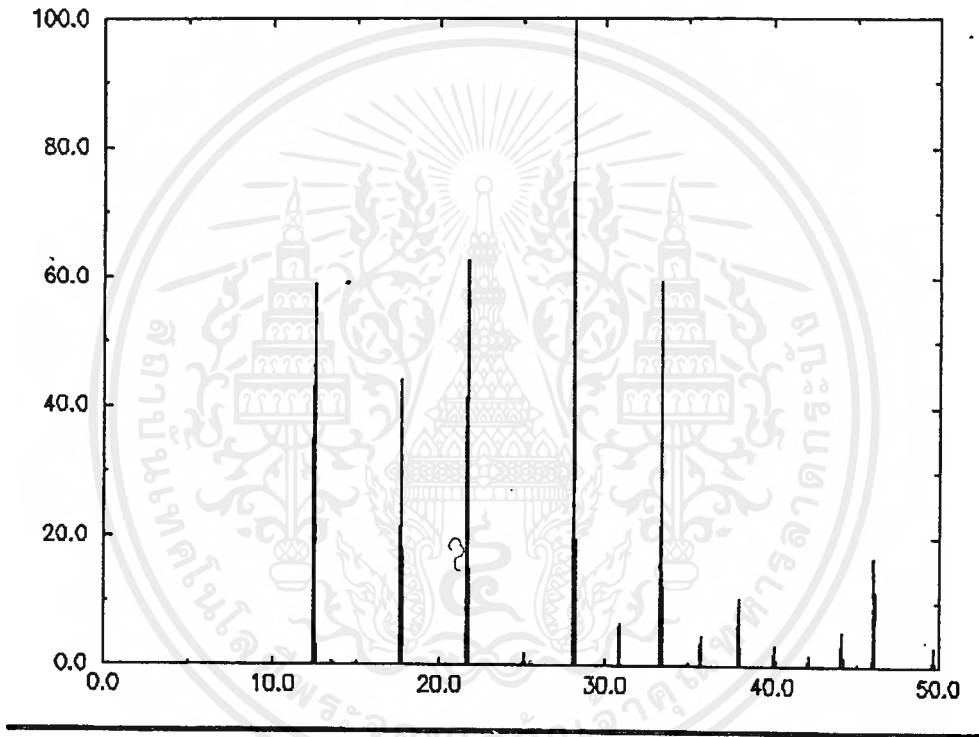
SiO₂ 7.2120 กรัมได้จากสารแขวนลอยซิลิกา $\frac{100 \times 7.2120}{40} = 18.0300$ กรัม

สารแขวนลอยซิลิกา 18.0300 กรัมมีน้ำ $\frac{18.0300 \times 60}{100} = 10.818$ กรัม

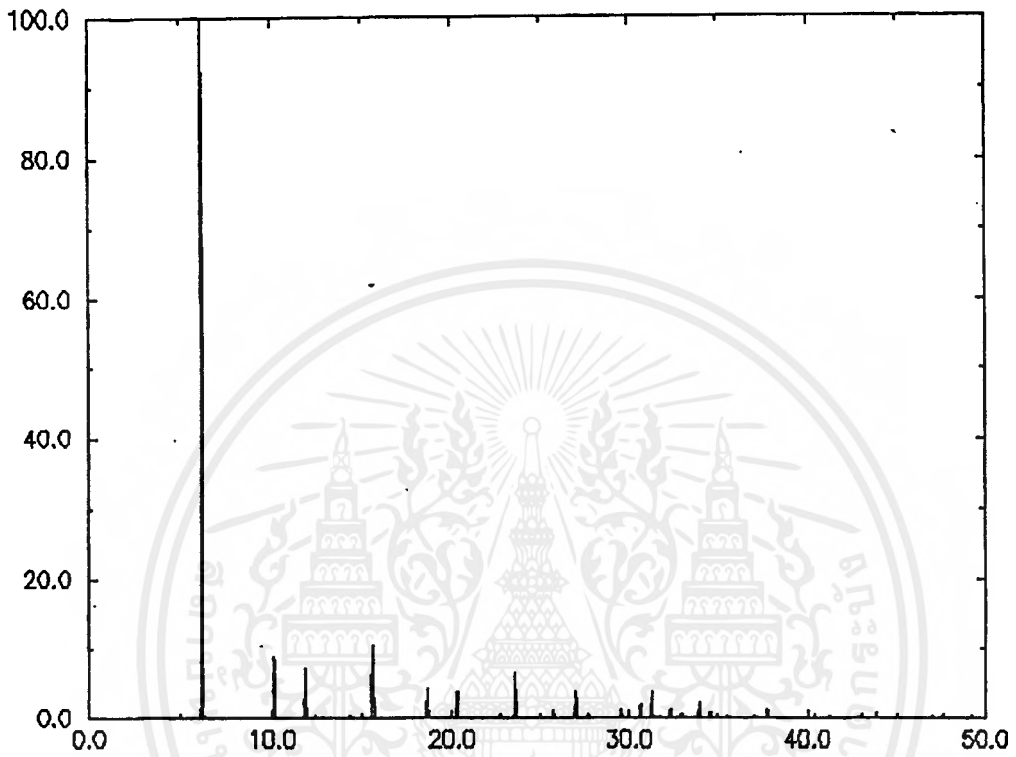
ปริมาณน้ำที่ต้องเติม = 35 - น้ำจากสารแขวนลอยซิลิกา - น้ำจาก NaOH - น้ำจาก Na₂Al₂O₄
= 35 - 10.8180 - 0.5598 - 0.4140
= 23.5808 กรัม

ภาคผนวก ข

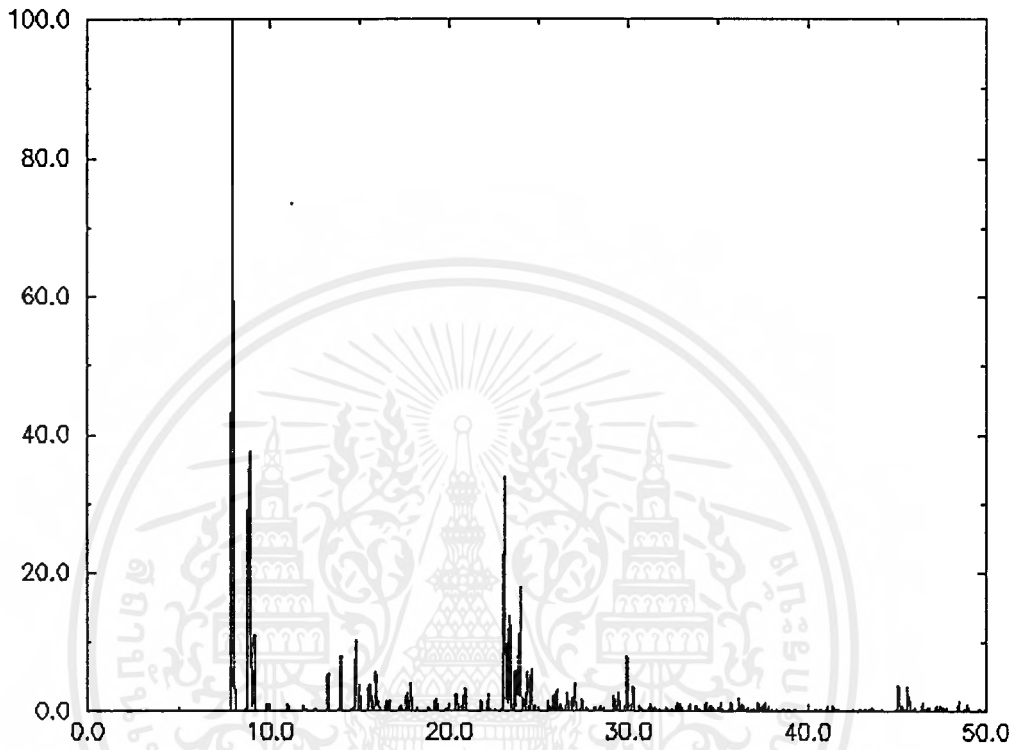
แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของซีโอไลต์มาตรฐาน



รูปที่ ข1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ชนิด Na-P มาตรฐาน



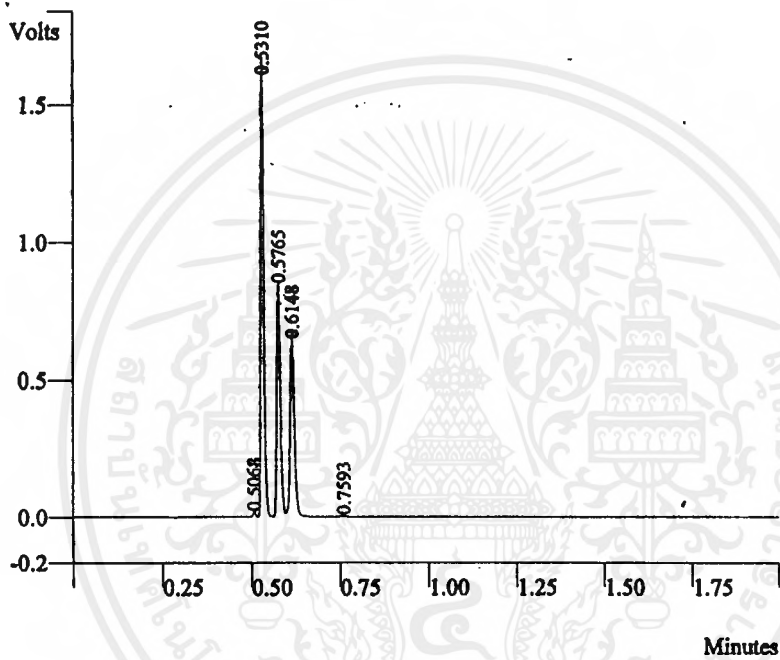
รูปที่ ข2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโพลีอิมิด Y มาตรฐาน



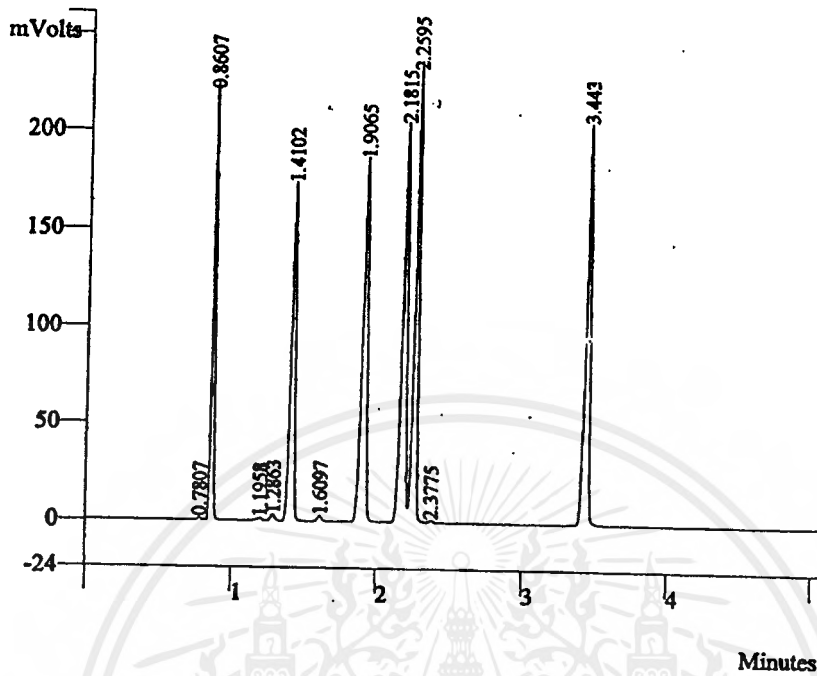
รูปที่ ข3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 มาตรฐาน

ภาคผนวก ค

แสดงโครมาโทแกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่วิเคราะห์วิเคราะห์
ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)



รูปที่ ค1 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของก๊าซหุงต้มมาตรฐาน (LPG)



รูปที่ ค2 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมาตรฐาน (C₅-C₉)

ที่ค่า Retention time 0.8607 คือ Pentane (C₅)

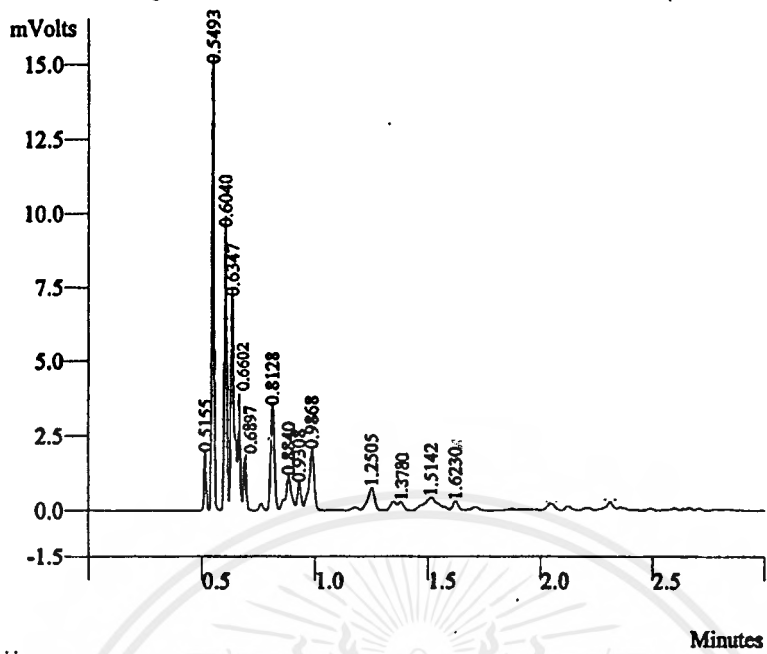
1.4102 คือ Hexane (C₆)

1.9065 คือ Cyclohexane (C₆)

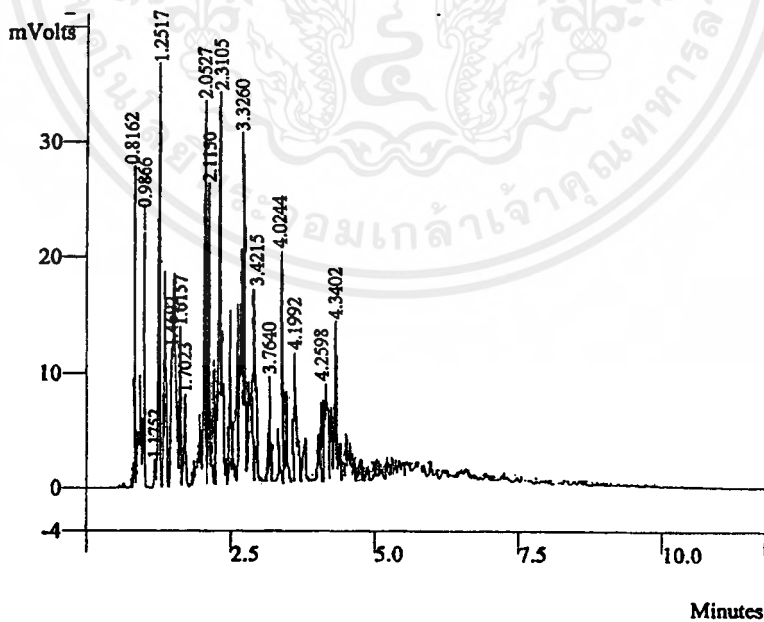
2.1815 คือ Isooctane (i-C₈)

2.2595 คือ Heptane (C₇)

3.4430 คือ Nonane (C₉)

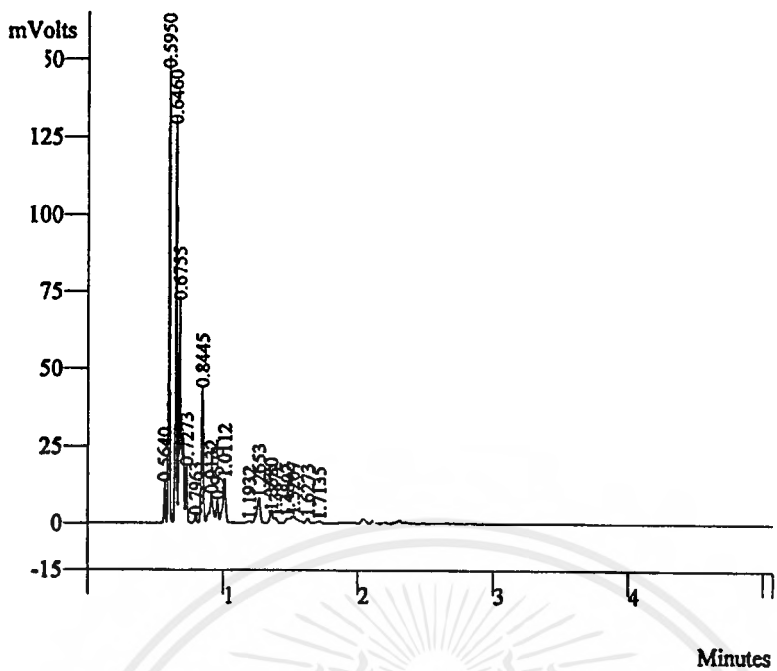


รูปที่ ค3 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y

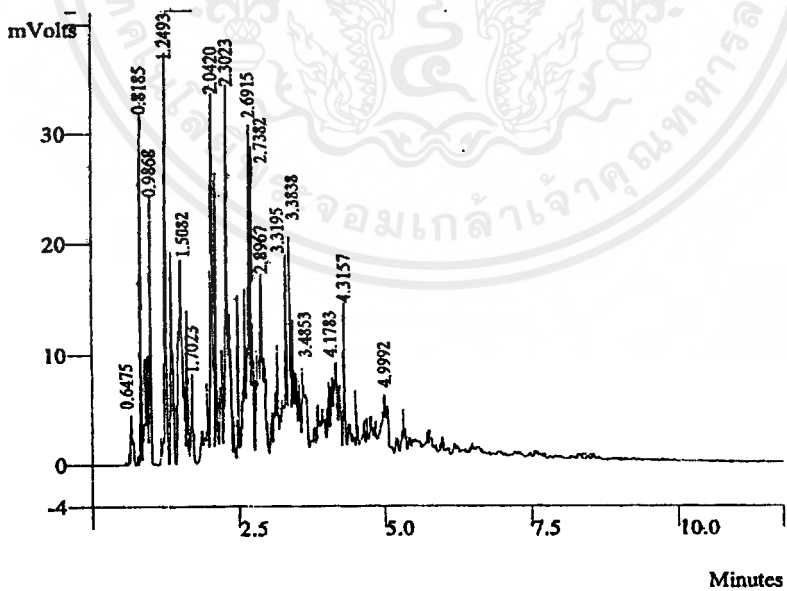


รูปที่ ค4 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

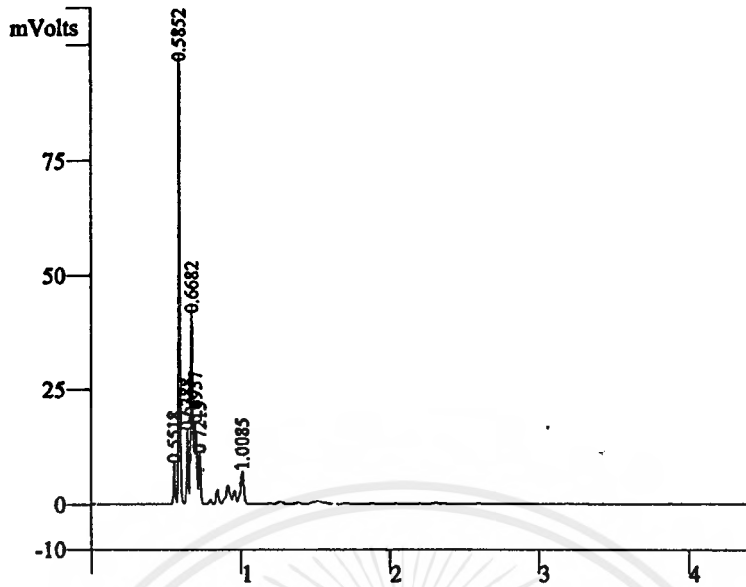


รูปที่ ค5 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y

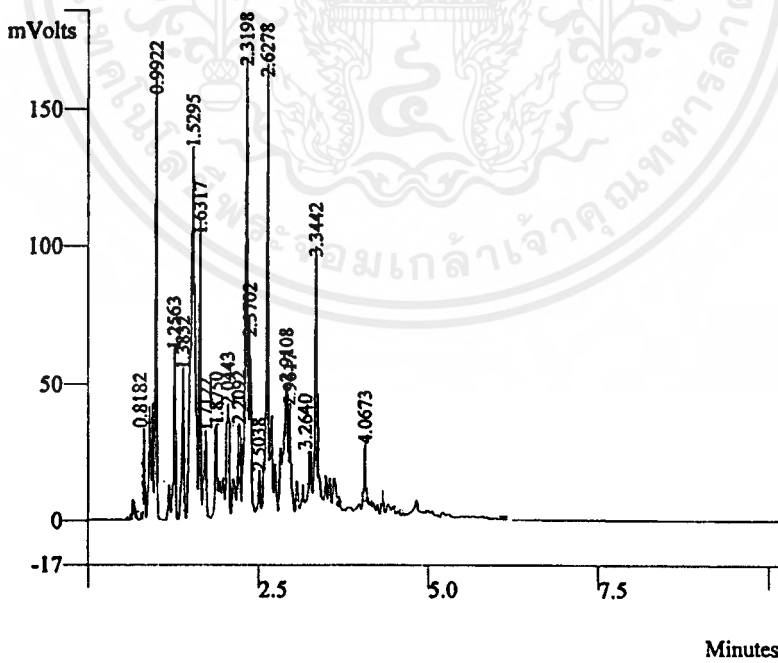


รูปที่ ค6 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

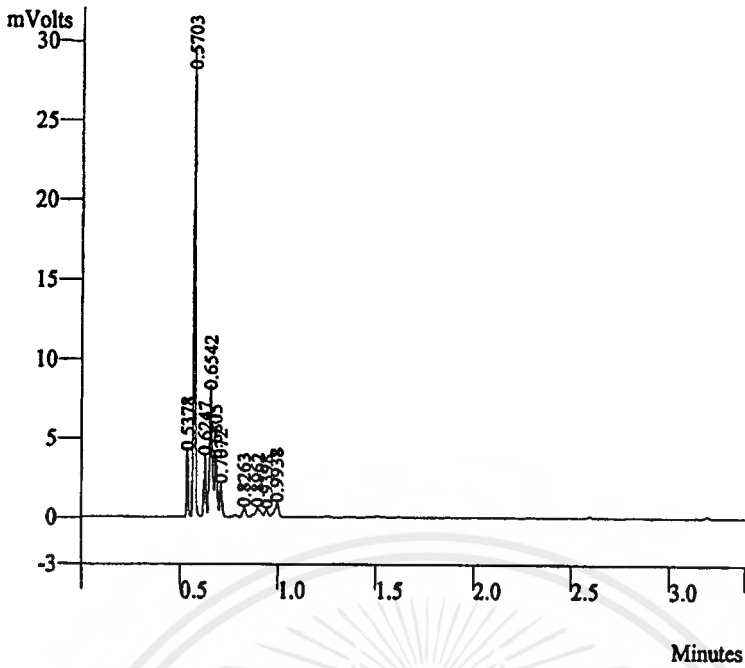


รูปที่ ก7 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5

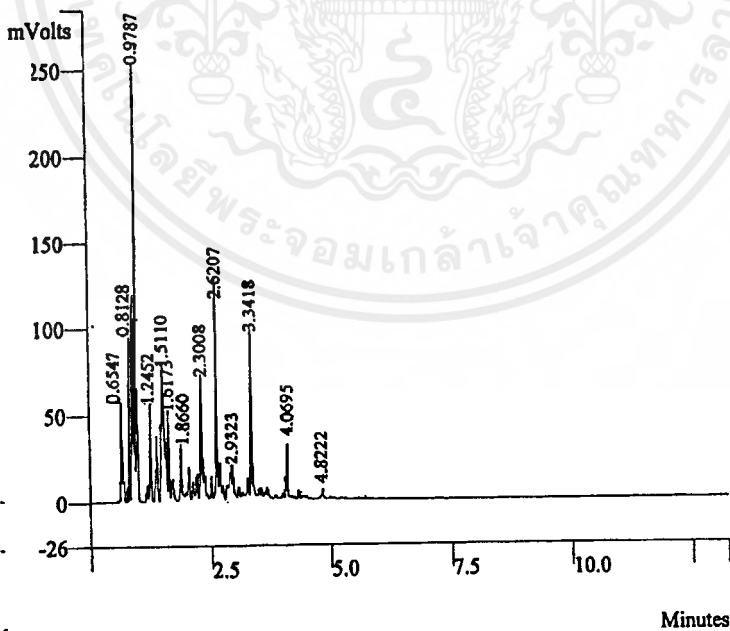


รูปที่ ก8 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด H-ZSM-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค9 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-ZSM-5



รูปที่ ค10 แสดงตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการใช้
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด RegH-ZSM-5

ภาคผนวก ง

การคำนวณพลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE

□ การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ก๊าซ

1.หาจำนวนโมลของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้

Basis : HDPE 1 กรัม

ผลิตภัณฑ์ก๊าซ (g)	H-Y	RegH-Y	H-ZSM-5	RegH-ZSM-5
C ₃ -C ₄	1.43 × 10 ⁻¹	1.0 × 10 ⁻¹	3.54 × 10 ⁻¹	4.00 × 10 ⁻¹
C ₅	4.99 × 10 ⁻²	3.04 × 10 ⁻²	3.34 × 10 ⁻²	8.26 × 10 ⁻²
C ₆	2.78 × 10 ⁻²	1.64 × 10 ⁻²	-	-

แปลงหน่วยกรัมให้เป็น โมล

ผลิตภัณฑ์ก๊าซ (mol)	H-Y	RegH-Y	H-ZSM-5	RegH-ZSM-5
C ₃ -C ₄	0.028 × 10 ⁻¹	0.020 × 10 ⁻¹	0.069 × 10 ⁻¹	0.078 × 10 ⁻¹
C ₅	0.069 × 10 ⁻²	0.042 × 10 ⁻²	0.046 × 10 ⁻²	0.114 × 10 ⁻²
C ₆	0.032 × 10 ⁻²	0.019 × 10 ⁻²	-	-

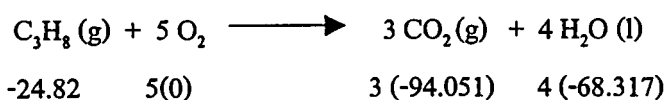
2.การคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากสมการสันดาปของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้

$$\Delta H_f; \text{H}_2\text{O (l)} = -68.317 \text{ kCal /mol}$$

$$\text{CO}_2 \text{ (g)} = -94.051 \text{ kCal /mol}$$

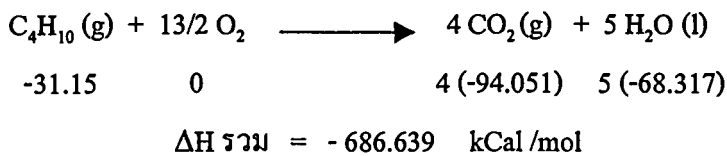
$$\text{O}_2 \text{ (g)} = 0.00 \text{ kCal /mol}$$

- ตัวอย่างการคำนวณพลังงานความร้อนของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE 1 กรัม



$$\Delta H \text{ รวม} = -530.601 \text{ kCal /mol}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



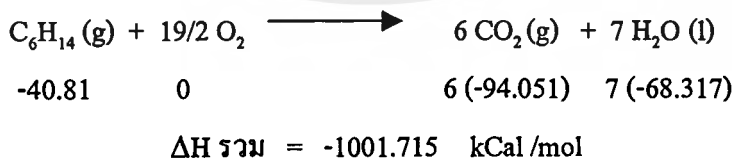
$$\Delta H_{\text{เฉลี่ย}} \text{ ของ } \text{C}_3\text{-C}_4 = \frac{-686.639 + (-530.601)}{2} = -608.62 \text{ kCal/mol}$$

2

1 mol ให้พลังงาน $608.62 \times 10^3 \text{ Cal}$
 $0.028 \times 10^{-1} \text{ mol}$ ให้พลังงาน $0.028 \times 10^{-1} \times 608.62 \times 10^3 = 1704.136 \text{ Cal}$
 จาก 1 Btu = 252.16 Cal;
 $\therefore 1704.136 \text{ Cal} = 6.76 \text{ Btu}$



1 mol ให้พลังงาน $844.197 \times 10^3 \text{ Cal}$
 $0.069 \times 10^{-2} \text{ mol}$ ให้พลังงาน $0.069 \times 10^{-2} \times 844.197 \times 10^3 = 582.496 \text{ Cal}$
 จาก 1 Btu = 252.16 Cal;
 $\therefore 582.496 \text{ Cal} = 2.31 \text{ Btu}$



1 mol ให้พลังงาน $1001.715 \times 10^3 \text{ Cal}$
 $0.032 \times 10^{-2} \text{ mol}$ ให้พลังงาน $0.032 \times 10^{-2} \times 1001.715 \times 10^3 = 320.548 \text{ Cal}$
 จาก 1 Btu = 252.16 Cal;
 $\therefore 320.548 \text{ Cal} = 1.27 \text{ Btu}$

\therefore พลังงานความร้อนทั้งหมดที่ได้จากผลิตภัณฑ์ก๊าซ เมื่อทำการสลาย HDPE 1 กรัม โดยใช้ตัวเร่ง

$$\text{ปฏิกิริยาซีโอล์คซ์ชนิด H-Y} = 6.76 + 2.31 + 1.27 = 10.34 \text{ Btu}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ก๊าซ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ แสดงผลดังตาราง

ตารางที่ 1 แสดงค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากผลิตภัณฑ์ก๊าซ เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	ค่าพลังงานความร้อน (Btu)
H-Y	10.34
RegH-Y	6.987
H-ZSM-5	18.201
RegH-ZSM-5	22.630

□ การคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของ HDPE จากเตาเผาแบบท่อ

คำนวณพลังงานในหน่วย Btu ของเตาเผาแบบท่อ model 12/25/250 จาก

ที่อุณหภูมิสูงสุด 1200°C ใช้พลังงานสูงสุด 0.7 kW

- ไล่น้ำที่ 140°C เป็นเวลา $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ;

จาก 1200°C ใช้พลังงานสูงสุด 0.7 kW

ที่ 140°C ใช้พลังงาน $\frac{140 \times 0.7}{1200} = 0.816 \text{ kW}$

1200

\therefore ใช้พลังงาน = $\frac{30 \times 0.816}{60} = 0.408 \text{ kW}$

60

จาก $1 \text{ kW} = 3.4128 \times 10^3 \text{ Btu}$;

\therefore ใช้พลังงาน = 139.356 Btu

- เริ่มปฏิกิริยาที่ $140-430^{\circ}\text{C}$ โดยใช้อัตราการให้ความร้อนสูงสุด เป็นเวลา 5 นาที

เฉลี่ยช่วงอุณหภูมิ = $\frac{140+430}{2} = 285^{\circ}\text{C}$

2

จาก $1200^{\circ}\text{C} = 0.7 \text{ kW}$

$$285^{\circ}\text{C} = \frac{285 \times 0.7}{1200} = 0.166 \text{ kW}$$

1200

$$\therefore \text{ใช้พลังงาน} = \frac{5 \times 0.166}{60} = 0.0139 \text{ kW}$$

60

$$\therefore \text{ใช้พลังงาน } 0.0139 \text{ kW} = 47.438 \text{ Btu}$$

- เมื่ออุณหภูมิถึง 430°C คงไว้เป็นเวลา $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง

$$\text{จาก } 1200^{\circ}\text{C} = 0.7 \text{ kW}$$

$$430^{\circ}\text{C} = 0.251 \text{ kW}$$

$$\therefore \text{ใช้พลังงาน} = \frac{30 \times 0.251}{60} = 0.1255 \text{ kW} = 428.31 \text{ Btu}$$

60

$$\therefore \text{ใช้พลังงานรวมทั้งหมด} = 139.356 + 428.31 + 47.438 = 615.104 \text{ Btu}$$

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณของ HDPE ที่ใช้ เพื่อให้ได้พลังงานความร้อนจากผลิตภัณฑ์ก๊าซเพียงพอ
กับพลังงานความร้อนที่ใช้ในเตาเผาแบบท่อ

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	น้ำหนักของ HDPE (g)
H-Y	54.49
RegH-Y	88.04
H-ZSM-5	33.80
RegH-ZSM-5	27.18