

การสลายตัวของพอลิस्टาไทรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส



นางสาวดารณี พิมพ์ภรณ์

นางสาวพริยา พุทธิมัย

นางสาวสุภาภัก ชูโต

โครงงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน... 37633

วัน, เดือน, ปี 19 ก.ย. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Degradation of Polystyrene by Base Catalyst

Miss Daranee Pimpaporn

Miss Piriya Putthimai

Miss Supapak Xuto

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

1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสลายตัวของพอลิस्टาไดรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส
นักศึกษา นางสาวดารณี พิมพาภรณ์
นางสาวพริยา พุทธิมัย
นางสาวสุภาภักดิ์ ชูโต
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย
ภาควิชา เคมี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นำโครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต


(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย) หัวหน้าภาควิชาเคมี
คณะกรรมการโครงการพิเศษ


(อ.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล) ประธานกรรมการ


(ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์) กรรมการ


(ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษ
นักศึกษ

การสลายตัวของพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส
นางสาวดารณี พิมพ์ภรณ์

นางสาวพริยา พุทธิมัย

นางสาวสุภาภัก ชูโต

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ตะวัน สุขน้อย

ภาควิชา

เคมี

ปีการศึกษา

2542

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการสลายของพอลิสไตรีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ ซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y รวมทั้งอิทธิพลจากการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส ซึ่งสามารถตรวจสอบเอกลักษณ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้โดยใช้เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) และเครื่องวัดความสามารถในการดูดซับของของแข็ง (Autosorb-1C) การศึกษากระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีน ทำได้โดยทำการทดลองแบบครั้ง (Batch operation) ที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซฮีเลียม พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ ก๊าซ (Gas) ของเหลว (Liquid) สารประกอบแวกซ์ (Wax-like compound) และกากคาร์บอน (Carbonaceous residues)

จากการศึกษาพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสสามารถให้ผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลว และผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ และสำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซีโอไลต์ ซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติให้มีความเป็นเบสโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (CsNaX-ion) ให้ผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลวมากที่สุด ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว (CsNaY-imp) ให้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์มากที่สุด และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการสลายตัวของพอลิสไตรีนเพื่อให้ได้สไตรีนมอนอเมอร์

Special Project	Degradation of Polystyrene by Base Catalyst
Students	Miss Daranee Pinpaporn Miss Piriya Putthimai Miss Supapak Xuto
Special Project Advisor	Assist.Prof.Tawan Sooknoi
Department	Chemistry
Academic Year	1999

Abstract

In this special project, the catalytic activity of base catalysts, namely BaO, MgO, zeolite Y and zeolite X were investigated in the degradation of polystyrene. The catalysts were characterized using X-ray powder Diffraction (XRD) and gas adsorption analysis. The reaction was carried out at 400°C in a batch reactor under helium atmosphere. The products were ranged from gases, liquid hydrocarbons, wax-like compounds and carbonaceous residues.

It was shown that the defected BaO gave high yield of gas and liquid products. In addition, it was found to be the best selective metal oxide catalyst for styrene production. For zeolites, cesium exchanged zeolite X (CsNaX-ion) showed the highest activity for gas and liquid products. Nevertheless, cesium impregnate zeolite Y (CsNaY-imp) produce more liquid product. The highest selectivity of styrene was obtained from the reaction using defected BaO as catalyst.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่ายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการนี้ ทางผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ดังรายนามต่อไปนี้

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. ตะวัน สุขน้อย ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาเป็นอย่างดียิ่งในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้มาตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์ อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล ท่านกรรมการที่ช่วยในการตรวจสอบและแก้ไขให้โครงการพิเศษนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร. ชลดา ฤทธิวิรุฬห์ ท่านกรรมการที่ช่วยในการตรวจสอบและแก้ไขให้โครงการพิเศษนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. สมศักดิ์ วรรณกมลชัย ที่ให้ความช่วยเหลือที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการให้ใช้คอมพิวเตอร์ รวมถึงความห่วงใยและความเข้าใจตลอดมา

ขอขอบคุณ ดร. สุภารัตน์ จำปา ที่ให้ความช่วยเหลือที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องการให้ใช้คอมพิวเตอร์ รวมถึงความห่วงใยและความเข้าใจตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณไพศาล เสดะวรรณ ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์โลหะออกไซด์และซีโอไซด์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD)

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเคมี ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

ขอขอบคุณ พี่เต พี่นก พี่เก พี่ชัย พี่เจ้า และพี่ไข่ สำหรับคำแนะนำที่ดี และความช่วยเหลือในทุกๆ เรื่อง ตลอดการทำโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีมาตลอด และขอขอบคุณกำลังใจจากเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกท่านที่ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นางสาวดารณี พิมพาภรณ์

นางสาวปรีญา พุทธิมัย

นางสาวสุภาภัก ชูโต

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	ณ
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
วัตถุประสงค์ในงานวิจัย	1
ขอบเขตการวิจัย	2
ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
โลหะออกไซด์	3
ซีโอไลต์	4
ขั้นตอนในการเกิดซีโอไลต์	7
การสังเคราะห์ซีโอไลต์	7
การประยุกต์ใช้	8
ซีโอไลต์ชนิด X และซีโอไลต์ชนิด Y	11
การสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่3 การดำเนินงานวิจัย	
สารเคมี	15
อุปกรณ์และเครื่องมือ	15
ขั้นตอนการวิจัย	16
ตอนที่1 การเตรียมและตรวจสอบโลหะออกไซด์	16
การเตรียมแบเรียมออกไซด์และปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส	17
การเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์และปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส	17
การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของซีโอไลต์ X และ Y	18
การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของซีโอไลต์ X	19
การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของซีโอไลต์ Y	20
การตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ของแข็ง	21
ตอนที่2 การศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีน	22
การทดลองที่1 ศึกษาผลของการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	25
การทดลองที่2 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์	25
การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส	25
การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงให้มีสมบัติความเป็นเบส	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การทดลองที่ 5 การศึกษาผลปริมาณ Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	25
การทดลองที่ 6 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และ ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์สไตรีน	25
ศึกษาการสลายตัวของความร้อนของพอลิสไตรีนด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก	25
การวิเคราะห์โครงสร้างผลิตภัณฑ์ของเหลว	26
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	28
ตอนที่ 1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง	28
ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์	28
ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์	30
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X	32
ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y	35
ตอนที่ 2 การศึกษาการสลายตัวของพอลิสไตรีน	38
ผลของการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	41
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์	44
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความ เป็นเบส	45
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความ เป็นเบส	49

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลของปริมาณ Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	52
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์สไตรีน	53
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	56
ผลของการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา	56
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์	56
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส	56
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส	57
ผลของปริมาณ Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์	57
ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์สไตรีน	57
ข้อเสนอแนะ	57
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณ	59
ภาคผนวก ข แสดงรูปการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา	63
ภาคผนวก ค แสดงผลการวิจัยจากเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก	65
ภาคผนวก ง แสดงผลการวิจัยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี	76
เอกสารอ้างอิง	83

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 3.1	แสดงสถานะในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination) ของซีโอไลต์ X และ Y	19
ตารางที่ 3.2	แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้และใช้ในการทดลองทั้งหมด	21
ตารางที่ 3.3	แสดงสถานะที่ใช้ในการไล่ความชื้น (Outgas)	22
ตารางที่ 3.4	แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวของพอลิสไตรีน	23
ตารางที่ 3.5	แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีน ด้วยเครื่อง TGA	26
ตารางที่ 3.6	แสดงสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีน ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC)	27
ตารางที่ 4.1	แสดงผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ได้จากระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีน	40

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1a	แสดง โครงผลึกของผลึกของแมกนีเซียมออกไซด์	4
รูปที่ 2.1b	แสดง โครงผลึกของผลึกของแบเรียมออกไซด์	4
รูปที่ 2.2	แสดง ทรงสี่หน้าของอะลูมินาและซิลิกอน	5
รูปที่ 2.3a	แสดง โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building unit, SBU) ของซีโอไลต์	5
รูปที่ 2.3b	แสดง โครงสร้าง Polyhedral ของซีโอไลต์	5
รูปที่ 2.4	แสดง โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ชนิด X Y และ A รวมถึงการรวมตัวเป็นโครงสร้างลักษณะต่างๆ	6
รูปที่ 2.5	แสดง ลักษณะความเฉพาะเจาะจงของสารตั้งต้น	9
รูปที่ 2.6	แสดง ลักษณะความเฉพาะเจาะจงของสารมัธยันต์ (intermediate)	9
รูปที่ 2.7	แสดง โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ โครงสร้างแบบ Faujasite (ซีโอไลต์ X และ Y)	12
รูปที่ 2.8	แสดง ตำแหน่งที่ไอออนบวก (Cation) อยู่ภายในรูเปอร์เจกของซีโอไลต์ X	12
รูปที่ 2.9	แสดง ตำแหน่งของไอออนบวก (Cation) ของซีโอไลต์ X	13
รูปที่ 3.1	แสดง การจัดตั้งชุดปฏิบัติการในการศึกษาการสลายตัวของพอลิस्टาโรนด้วยโลหะออกไซด์และซีโอไลต์	24
รูปที่ 4.1	แสดง รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแบเรียมออกไซด์ที่เตรียมได้ก่อนการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (BaO)	28
รูปที่ 4.2	แสดง รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแบเรียมออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (BaO-def)	29

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 4.3	แสดงผลของพื้นที่ผิวของแบเรียมออกไซด์ก่อน (BaO) และหลังการปรับปรุง สมบัติความเป็นเบส(BaO-def)	30
รูปที่ 4.4	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	31
รูปที่ 4.5	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแมกนีเซียมออกไซด์ หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (MgO-def)	31
รูปที่ 4.6	แสดงผลของพื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์ก่อน (MgO) และหลังการปรับปรุง สมบัติความเป็นเบส(MgO-def)	32
รูปที่ 4.7	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ X ก่อนการปรับปรุง สมบัติความเป็นเบส (NaX)	33
รูปที่ 4.8	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ X หลังการปรับปรุง สมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการฝังตัว (CsNaX-imp)	34
รูปที่ 4.9	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ X หลังการปรับปรุง สมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (CsNaX-ion)	34
รูปที่ 4.10	แสดงผลของพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ X ก่อน (NaX) และหลังการปรับปรุง สมบัติความเป็นเบส(CsNaX-imp และ CsNaX-ion)	35
รูปที่ 4.11	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ Y ก่อนการปรับปรุง สมบัติความเป็นเบส (NaY)	36

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.12	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ Y หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว (CsNaY-imp)	36
รูปที่ 4.13	แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของซีโอไลต์ Y หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (CsNaY-ion)	37
รูปที่ 4.14	แสดงผลของพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Y ก่อน (NaY) และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (CsNaY-imp และ CsNaY-ion)	38
รูปที่ 4.15	แสดงผลลักษณะที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีนที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400°C และ 500°C	41
รูปที่ 4.16	แสดงกลไกปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีนที่เกิดผ่านอนุพลีอิสระ	42
รูปที่ 4.17	แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีนที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400°C และ 500°C	43
รูปที่ 4.18	แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลว	44
รูปที่ 4.19	แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลว	45

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.20	แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ก่อน (BaO และ MgO) และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (BaO-def และ MgO-def) ต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลว	46
รูปที่ 4.21	แสดงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส	47
รูปที่ 4.22	แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ก่อน และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส ต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลว	48
รูปที่ 4.23	แสดงผลเทอร์โมกราฟิมेटริกของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อน (NaY) และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (CsNaY-imp และ CsNaY-ion)	49
รูปที่ 4.24	แสดงผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อน (NaY) และ หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (CsNaY-imp และ CsNaY-ion)	50
รูปที่ 4.25	แสดงปริมาณ โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อน (NaY) และ หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (CsNaY-imp และ CsNaY-ion)	51
รูปที่ 4.26	แสดงแนวทางการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เกิดเป็น alpha-methyl styrene	51

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.27	แสดงเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เดิม ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และ ซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติ ความเป็นเบส	52
รูปที่ 4.28	แสดงเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่ เดิมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และ ซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุง สมบัติความเป็นเบส	53
รูปที่ 4.29	แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ รวมก๊าซและของเหลว	54
รูปที่ 4.30	แสดงชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อพื้นที่ผิว	54
รูปที่ 4.31	แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ สไตรีนทั้งหมด	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันพลาสติกเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้นแต่สามารถย่อยสลายในธรรมชาติได้ยาก จึงก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม จึงได้มีการศึกษาถึงการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการสลายตัวของพลาสติกพอลิเอสไตรีนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เอสไตรีนมอนอเมอร์และโมเลกุลขนาดเล็กโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เนื่องจากเบสทำหน้าที่ดึงโปรตอนในโมเลกุลพอลิเอสไตรีนทำให้เกิดคาร์เบนไอออน (Carbanion) ขึ้น ซึ่งคาร์เบนไอออนนี้ สามารถเหนี่ยวนำให้โมเลกุลอื่นมีการแตกพันธะต่อไป โดยคาร์เบนไอออนสามารถเกิด Resonance ในวงเบนซีนทำให้เกิดความเสถียร ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดปฏิกิริยาเกิดผ่านคาร์โบแคทไอออน (Carbocation) ซึ่งไม่เสถียรต่อพันธะไม่อิ่มตัว จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันต่อไป ทำให้ได้สารโมเลกุลใหญ่เกิดเป็น Coking เป็นผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสียสภาพ ขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสช่วยให้เกิดปฏิกิริยาผ่านคาร์เบนไอออน ซึ่งสามารถควบคุมให้เกิดการแตกสลายไปในแนวทางที่เฉพาะเจาะจงกว่ากลไกที่เกิดผ่านคาร์โบแคทไอออน นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ที่มีรูพรุนขนาดจำกัดจะช่วยควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้นได้

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการสลายตัวของพอลิเอสไตรีน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส โดยจะทำการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ได้แก่ แบเรียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ได้แก่ ซีโอไลต์ X และ ซีโอไลต์ Y ทั้งนี้จะศึกษาความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมและเมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสและการตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์หมู่ 2 และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และ Y

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อให้ทราบวิธีการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสและการตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์หมู่ 2 และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และ Y

2. เพื่อให้ทราบกระบวนการสลายตัวของพอลิस्टาไทรินที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา
3. เพื่อให้ทราบผลการสลายตัวของพอลิस्टาไทริน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
4. เพื่อให้ทราบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวของพอลิस्टาไทริน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละชนิด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการปรับปรุงสมบัติให้มีความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะหมู่ 2 ได้แก่ แบริลียมออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ได้แก่ ซีโอไลต์ Y และ ซีโอไลต์ X
2. ศึกษาวิธีการตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ โดยวิธีต่างๆ
3. ศึกษาผลการสลายตัวทางความร้อนของพอลิस्टาไทรินที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่ 400 °C และ 500 °C
4. ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสที่มีต่อกระบวนการสลายตัวของพอลิस्टาไทริน
5. ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสที่มีต่อกระบวนการสลายตัวของพอลิस्टาไทริน
6. ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วน โดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) ในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีต่อกระบวนการสลายตัวของพอลิस्टาไทริน
7. ศึกษาถึงแนวทางที่ได้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์โดยเปรียบเทียบความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบทางเลือกใหม่ที่จะนำพลาสติกพวกพอลิस्टาไทรินที่ใช้แล้วกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่
2. ทำให้ทราบแนวทางการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์
3. ทำให้ทราบแนวทางเลือกใหม่ของสารประกอบอะโรมาติกและสไตรีนมอนอเมอร์เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

บทที่ 2

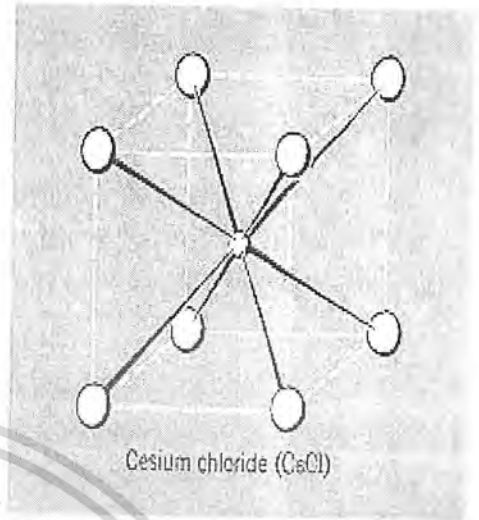
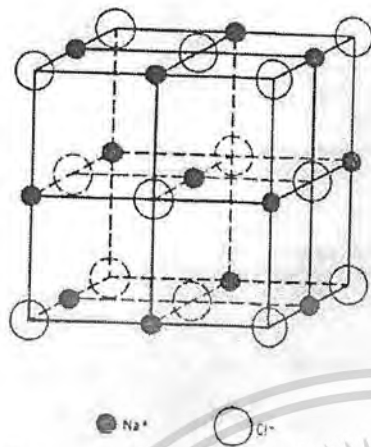
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะออกไซด์

โลหะมีสมบัตินำไฟฟ้า นำความร้อน มีเงาบนโลหะ ยึดเป็นเส้นได้ ทบรีดเป็นแผ่นบางได้ เหล่านี้เป็นสมบัติกายภาพของโลหะทั่วไป ส่วนสมบัติทางเคมีนั้น เรามองรับว่าออกไซด์ของโลหะจัดเป็นออกไซด์ที่เป็นเบส ทำปฏิกิริยากับกรดได้เกลือ และเป็นเบสเมื่อละลายน้ำ ในสารประกอบทั้งหลาย โลหะมักมีเลขออกซิเดชันเป็นบวก สมบัติโดยทั่วไปของโลหะจะเนื่องมาจากการที่โลหะมีวาเลนซ์อิเล็กตรอนจำนวนน้อย นอกจากนั้น โลหะมีค่าพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนและสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนต่ำ โลหะจึงไม่ทำปฏิกิริยากันเอง เพราะไม่อาจเกิดพันธะโคเวเลนต์แบบธรรมดา แต่โลหะมักจะรวมกับอโลหะ โดยโลหะเสียอิเล็กตรอนไปแล้วเปลี่ยนเป็นไอออนบวก แมกนีเซียมและเบเรียมเป็นธาตุหมู่ 2 ซึ่งวงเวดออร์ทำปฏิกิริยามาก จึงไม่พบเป็นธาตุเสรีตามธรรมชาติ แมกนีเซียมเป็นโลหะธาตุที่มีมากในน้ำทะเลรองจากโซเดียม และเบเรียมมีน้อยจะพบเป็นคาร์บอเนต (BaCO_3)

ในสารประกอบโลหะทั้งสองชนิดนี้มีแต่สถานะออกซิเดชัน +2 เท่านั้น ไอออน M^{2+} เสถียรมาก เพราะมีโครงสร้างอิเล็กตรอนเป็นแบบก๊าซมีสกุล ปกติแล้วแมกนีเซียมเมื่อเผาในอากาศหรือออกซิเจนให้ออกไซด์ปกติ MO ส่วนเบเรียมให้เปอร์ออกไซด์ (BaO_2) บ้าง เนื่องจากไอออนโลหะ M^{2+} และไอออนออกไซด์ O^{2-} มีขนาดเล็กและมีประจุสูง ดังนั้นออกไซด์จึงมีพลังงานแลตทิซผลึกและจุดหลอมเหลวสูงมาก

เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์ทนความร้อนได้สูงจึงมักใช้ทำอิฐทนไฟ และหุ้มเตาต้านในของเตาเผา แมกนีเซียมออกไซด์ถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าออกไซด์โลหะอื่นในหมู่เดียวกัน ซึ่งแมกนีเซียมมีแลตทิซผลึกเป็นแบบโซเดียมคลอไรด์ ส่วนเบเรียมออกไซด์จะมีแลตทิซผลึกเป็นแบบซีเซียมคลอไรด์แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



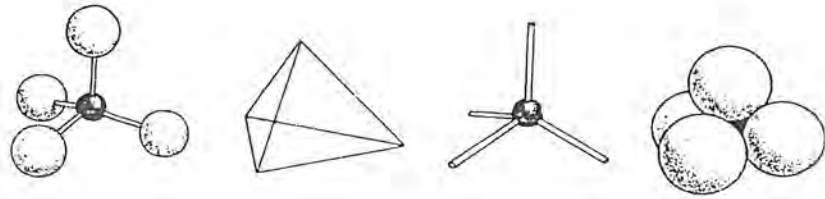
(a)

(b)

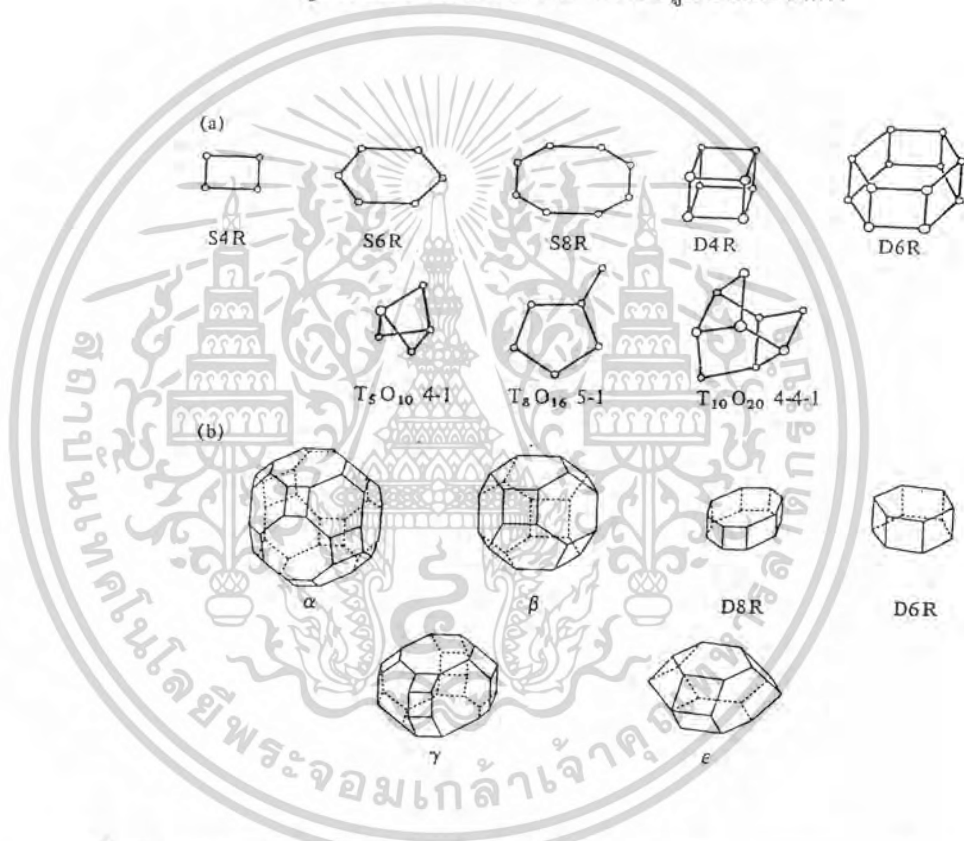
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกของแมกนีเซียมออกไซด์ (a) และแบเรียมออกไซด์ (b)

2.2 ซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous solid) ของ ซิลิกา (SiO_4) และ อะลูมินา (AlO_4) เป็นหน่วยปฐมภูมิ (Primary building unit) แต่ละทรงสี่หน้าจะเกิดการเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน โดยมีอะตอมของออกซิเจนเป็นตัวเชื่อมต่อกันได้โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ ใน Polyhedral นั้นแบ่งเป็นแบบคาง (Cage) และเป็นแบบช่อง (Channel) โดยคางจะเกิดมาจากโครงสร้างทุติยภูมิ (Second building unit) แบบสี่เหลี่ยมและหกเหลี่ยม โครงสร้างแบบคางพบมากในซีโอไลต์ที่มีอะลูมิเนียมประกอบเป็นจำนวนมาก ส่วนกรณีแบบช่องจะเกิดมาจากโครงสร้างทุติยภูมิแบบ 5-1 พบมากในซีโอไลต์ที่มีซิลิกาอยู่จำนวนมาก Polyhedral จะเกิดการเชื่อมต่อในแบบที่ต่างกันก่อให้เกิดหน่วยเซลล์ (Unit cell) ที่มีความแตกต่างกันเป็นจำนวนมากและเกิดรูพรุน (Porous) ขึ้น เนื่องจากทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียมมีความเป็นลบ จึงทำให้ภายในซีโอไลต์มีไอออนบวก (Cation) อยู่ภายใน ซึ่งจำนวนของไอออนบวกขึ้นอยู่กับปริมาณของอะลูมิเนียม



รูปที่ 2.2 แสดงทรงสี่หน้าของอะลูมินาและซิลิกา



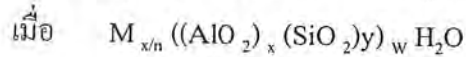
รูปที่ 2.3 a) แสดงโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary building unit, SBU) ของซิลิกา

b) แสดงโครงร่าง Polyhedral ของซิลิกา

เมื่อ	α	คือ 26-hedron หรือ truncated cuboctahedron
	β	คือ 14-hedron หรือ truncated octahedron
	δ	คือ double 8-rings
	D6R	คือ double 6-ring หรือ hexagonal prism
	γ	คือ 18-hedron
	ϵ	คือ 11-hedron

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

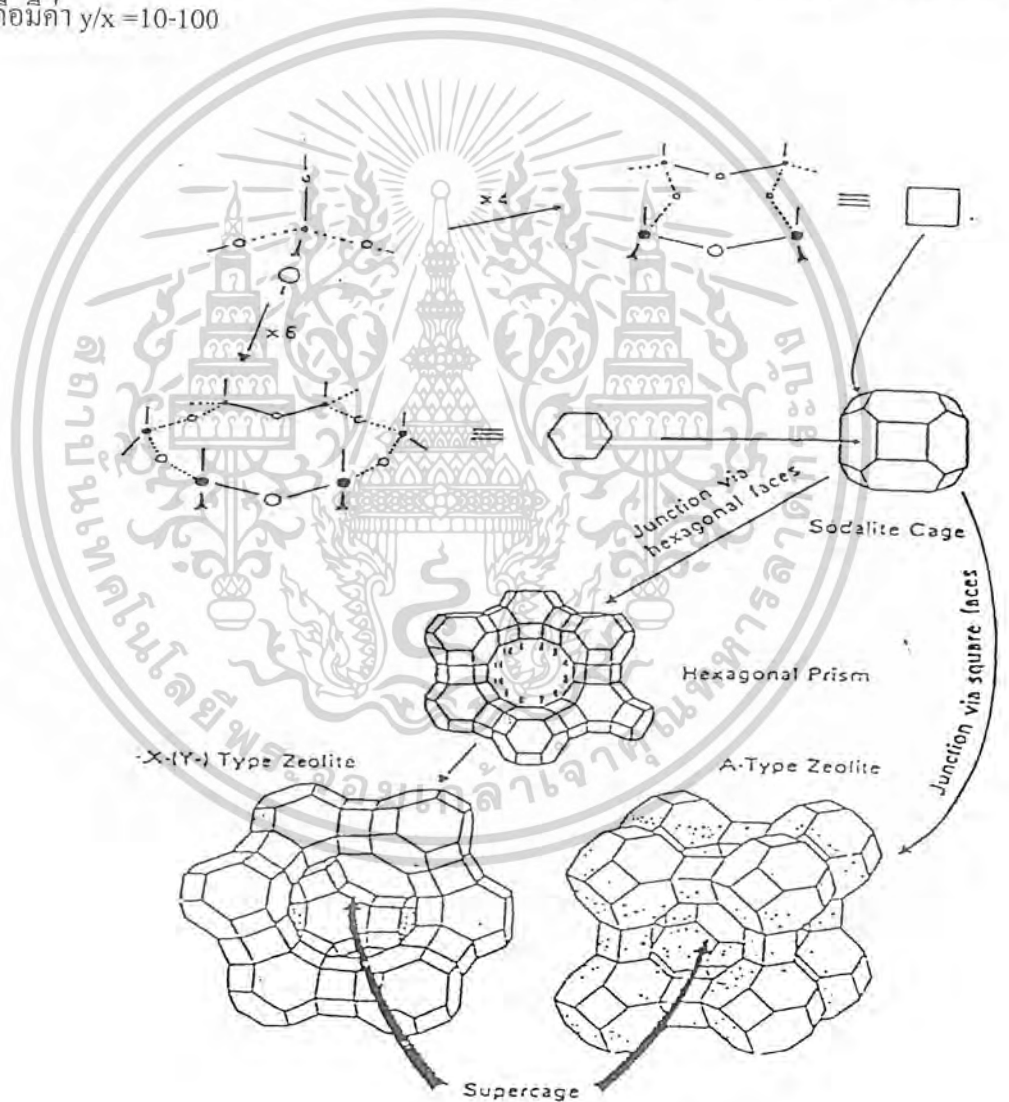
ซีโอไลต์มีทั้งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งต่างก็มีพื้นฐานคือผลึกหน่วยเซลล์ (Unit cell crystal) ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดในโครงสร้าง มีสูตรดังนี้



n คือ วาเลนซ์ของไอออนบวก M

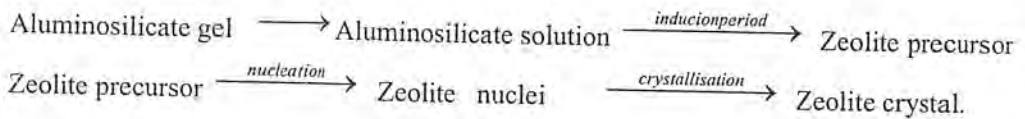
W เป็น จำนวนโมเลกุลของน้ำต่อหน่วยเซลล์

x และ y เป็น จำนวนรวมของทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ต่อหน่วยเซลล์ และซีโอไลต์ในธรรมชาติมีค่า x/y ในช่วง 1-5 อย่างไรก็ตามในปัจจุบันสามารถเตรียมซีโอไลต์ซึ่งมีปริมาณซิลิกาสูงคือมีค่า $y/x = 10-100$



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ชนิด X Y และ A รวมถึงการรวมตัวเป็น โครงสร้างลักษณะต่างๆ

ขั้นตอนในการเกิดซีโอไลต์



จากแผนภาพอธิบายได้คือ ซีโอไลต์เกิดจากอะลูมินาและซิลิกา ในสถานะที่เป็นเบสจะทำให้ซิลิกาละลายได้สารอะลูมิโนซิลิเกตในรูปของเจล ความสามารถในการละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเป็นเบส อะลูมิโนซิลิเกตจะเปลี่ยนจากลักษณะเจลเป็นสารละลาย ถ้าช่วงนี้มีปริมาณความเป็นเบสลดลงจะก่อให้เกิด precursor ของซีโอไลต์ขึ้น แต่ถ้าปริมาณเบสมากเกินไปจะไม่เกิด จากนั้น precursor จะเกิดเป็นนิวเคลียสและผลึกตามลำดับ ดังนั้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ควรให้สารละลายมีความเป็นเบสสูงในช่วงแรก และลดความเป็นเบสลงเพื่อป้องกันการละลายกลับของผลึก

การสังเคราะห์ซีโอไลต์

ซีโอไลต์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบันเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ ที่อุณหภูมิ 100 ถึง 160 C° ภายใต้ระบบปิดที่มีการควบคุมสถานะ ความดัน เวลา ชนิด และความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีความเฉพาะเจาะจงในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซีโอไลต์ส่วนใหญ่สามารถสังเคราะห์ในรูปไฮดรอกไซด์ โซเดียม ซารตั้งต้นต่างๆ ไปสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะเป็น โซเดียมอะลูมิเนต (Sodium aluminate) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และคอลลอยด์ของซิลิกา (Silica sol, a colloidal silica suspension) การสังเคราะห์จะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 450 เคลวิน ตัวแปรสำคัญที่กำหนดชนิดซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นคือ ความเข้มข้นของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เบส สารประกอบเทมเพลตอินทรีย์และเวลา

หลังจากสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้แล้ว ภายในรูพรุนของซีโอไลต์จะมีน้ำอยู่ปริมาณหนึ่ง เนื่องจากความมีขั้วในโครงสร้างซีโอไลต์ น้ำสามารถถูกขับออกมาโดยการให้ความร้อน (เป็นที่มาของชื่อซีโอไลต์ซึ่งมาจากภาษากรีกแปลว่า หินที่เดือด) ก่อนที่จะนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวดูดซับ ซีโอไลต์จะต้องถูกนำไปกำจัดน้ำและสารประกอบเทมเพลตอินทรีย์ออกก่อน โดยการให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 600-700 เคลวิน

สมบัติความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ได้ เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสม คือ

1. ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับชนิดการเกิดปฏิกิริยาได้หลายประเภท
2. ซีโอไลต์มีพื้นผิวที่ใช่ทำปฏิกิริยาได้มาก เนื่องจากมีความเป็นรูพรุน ตัวเร่งปฏิกิริยาควรมีตำแหน่งว่าง (Active site) บนพื้นผิวสูง และสารตั้งต้นที่ใช่ทำปฏิกิริยาสามารถเข้าไปถึงตำแหน่งที่ว่างได้มากที่สุด
3. ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นร่างแห 3 มิติทำให้มีความแข็งแรง
4. มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงความดันและอุณหภูมิ

การประยุกต์ใช้ (Application)

1. ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Zeolite as ion exchange)

ซึ่งความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นขึ้นกับขนาดรูพรุนซีโอไลต์ ขนาดและความหนาแน่นประจุ (Charge density) ของไอออนบวกที่ใช้ในการแลกเปลี่ยน จากสมบัตินี้จึงนิยมใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดปฏิกรณณ์นิวเคลียร์ เช่น ^{137}Cs และ ^{90}Sr ใช้ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ

2. เป็นตัวดูดซับ (Zeolite as adsorbent)

เนื่องจากซีโอไลต์มีรูพรุนและมีพื้นที่ผิวสัมผัสเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีแรงดึงดูดของพื้นผิวสูง จึงนำมาใช้ในกระบวนการแยกเพื่อแยกโมเลกุล เช่นกระบวนการดูดซับน้ำ การแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น

3. ใช้ในการคัดเลือกขนาดของโมเลกุล (Shape selective aspect)

ขนาดของรูพรุนโดยเฉลี่ยของซีโอไลต์แบ่งตามขนาดของซูปเปอร์เคจและขนาดโมเลกุลวิกฤตของไฮโดรคาร์บอน โดยซีโอไลต์จะคัดเลือกโมเลกุลที่มีขนาดวิกฤตต่ำกว่าให้ผ่านเข้าไปเท่านั้น สมบัติการคัดเลือกขนาดโมเลกุลจึงถูกประยุกต์ใช้ในการทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ในระดับอุตสาหกรรม โดยขณะบรรจุอนุภาคของซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับในคอลัมน์เมื่อของผสมของก๊าซไหลผ่าน โมเลกุลขนาดเล็กจะถูกจับไว้ในคอลัมน์ เพราะโมเลกุลขนาดเล็กนั้นสามารถเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ แต่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไหลผ่านคอลัมน์โดยไม่ถูกดูดจับไว้

จากการที่ซีโอไลต์มีการเลือกรูปร่างและขนาด (Shape and size selectivity) หลายแบบทำให้ซีโอไลต์สามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเฉพาะเจาะจงโดยการคัดเลือกขนาดและรูปร่างของสารในปฏิกิริยา ซึ่งแบ่งเป็น 3 ลักษณะคือ

3.1 ความเฉพาะเจาะจงของสารตั้งต้น (Reactant shape selectivity)

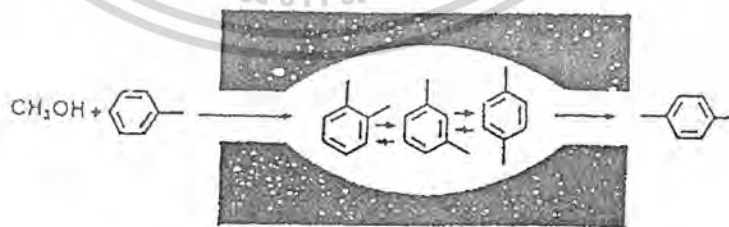
เนื่องจากซีโอไลต์มีขนาดของหน้าต่างที่สารจะผ่านเข้าสู่โพรงมีขนาดเท่ากันทุกหน้าต่าง โดยขึ้นกับชนิดของซีโอไลต์ ทำให้สารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าขนาดของหน้าต่างไม่สามารถเข้าไปในโพรงเพื่อเกิดปฏิกิริยา จึงมีเพียงสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าหน้าต่างเท่านั้นที่สามารถเข้าไปในรูพรุนเพื่อเกิดปฏิกิริยาได้ เช่น ปฏิกิริยาการแตกตัวของนอร์มัลอัลเคน [1]



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะความเฉพาะเจาะจงของสารตั้งต้น

3.2 การเลือกรูปร่างโดยสถานะทรานสิชัน (Transition-state shape selectivity)

หากสารมัธยันต์ (Intermediate) ที่เกิดขึ้นระหว่างดำเนินปฏิกิริยามีขนาดใหญ่เกินกว่าขนาดของโพรงของซีโอไลต์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะได้จากสารมัธยันต์นั้นก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เช่น Xylene disproportionation [1]



รูปที่ 2.6 แสดงความเฉพาะเจาะจงของสารมัธยันต์ (Intermediate)

3.3 การเลือกรูปร่างของสารผลิตภัณฑ์ (Product shape selectivity)

ในการเกิดปฏิกิริยาแต่ละครั้งจะได้ผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆออกมา พบว่าสารผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กจะไม่มีปัญหาในเรื่องการแพร่ออกจากโพรงของซีโอไลต์ แต่สำหรับสารผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ หากไม่สามารถออกจากโพรงได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป หรืออาจเป็นตัวกีดขวาง (Block) โพรงของซีโอไลต์ ทำให้โมเลกุลสารตั้งต้นอื่นไม่สามารถเข้ามาทำปฏิกิริยาต่อไปได้

4. ปรับเปลี่ยนบริเวณที่ว่องไวได้ (Tuneable unit)

- Acid site ปรับซีโอไลต์ให้มีหน้าที่เป็นกรดโดยนิยมใช้กับซีโอไลต์ที่มี Si/Al มาก และ แคลทไอออนที่มีความหนาแน่นของประจุสูง วิธีการปรับปรุงซีโอไลต์ให้มีฤทธิ์เป็นกรดทำได้หลายวิธี แต่วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนโซเดียมด้วยไอออนแอมโมเนียมแล้วทำการเผาไล่ก๊าซแอมโมเนียให้เกิดเป็นโปรตอนซึ่งทำหน้าที่เป็นแคลทไอออนที่ดุลประจุกับโครงร่างของซีโอไลต์เป็นวิธีที่เป็นที่นิยม เพราะไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ นอกจากนี้สามารถเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีฤทธิ์เป็นกรดด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายโดยตรง ซึ่งทำให้เกิดการกำจัดอะลูมิเนียมออกจากโครงร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ ทำให้ค่า Si/Al มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ค่าความแรงของกรด (Acid strength) ของตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยามีค่าเปลี่ยนแปลงไป

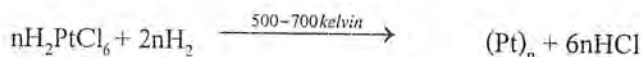
สำหรับการเพิ่มความสามารถในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดด้วยวิธีแลกเปลี่ยนในสารละลายแอมโมเนียมในกรด ไอออนโซเดียมจะถูกแลกเปลี่ยนด้วยไอออนแอมโมเนียมสามารถทำได้ โดยการปั่นกววนซีโอไลต์ในสารละลายแอมโมเนียมในกรดที่ร้อน จะได้ซีโอไลต์ในรูปไอออนแอมโมเนียม จากนั้นให้ความร้อนกับซีโอไลต์ที่อยู่ในรูปเกลือจนถึงอุณหภูมิ 700 เคลวิน เพื่อที่จะทำให้เกิดการสลายก๊าซแอมโมเนียออกไป

-Basic site นิยมใช้กับซีโอไลต์ที่มี Si/Al ต่ำและความหนาแน่นของประจุไอออนต่ำ ตัวอย่างเช่น CsX และ KA เป็นต้น

-การเพิ่มโลหะในซีโอไลต์ (Metal clusters on zeolite) จุดเริ่มต้นสำหรับการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีธาตุโลหะคือ การเตรียมสื่อ (Precursor) ชนิดที่ประกอบด้วยอะตอมของโลหะ และอยู่ในสถานะของเหลว (Liquid phase) โดยมีเป้าหมายเพื่อตกตะกอนสื่อชนิดนี้ลงบนพื้นผิวภายในของโครงร่างของซีโอไลต์ และเมื่อผ่านขั้นตอนการปรับปรุงต่างๆ แล้วจะได้ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาหลัก (Active site) เป็นโลหะหรือไอออนของโลหะที่มีสถานะออกซิเดชัน (Oxidation state) ที่ต้องการ

เมื่อใช้ซีโอไลต์ที่เป็นของแข็งที่มีรูพรุนเป็นตัวรองรับ อาจทำให้ภายในตัวรองรับนี้มีสื่ออยู่เต็ม (ฝังตัว, Impregnation) ด้วยสารละลายของสื่อที่เหมาะสม จากนั้นทำการระเหยตัวทำละลายออกและจะเหลือตัวถูกละลายกระจายอยู่บนพื้นผิวของตัวรองรับ ตัวอย่างเช่นการใช้สารละลาย

ของกรดคลอโรแพลตินิก (Chloroplatinic acid) เป็นสื่อในการกระจายโลหะแพลตทินัม (Pt) บนพื้นผิวของอะลูมินา หลังจากทำให้อะลูมินาเต็มไปด้วยสารละลายของกรดคลอโรแพลตินิก (การฝังตัว) และทำให้แห้งแล้วทำการรีดิวซ์กรดคลอโรแพลตินิกในก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

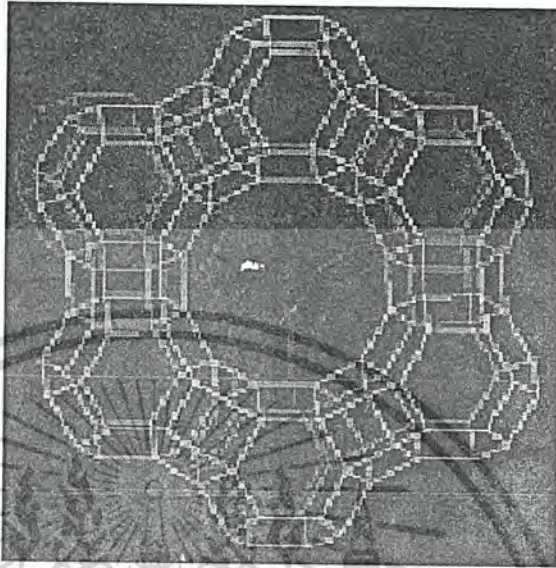


เมื่อ $(\text{Pt})_n$ แสดงถึง พื้นผิวของแพลตทินัมจำนวนมากที่รวมตัวกัน โดยทั่วไป n จะมีค่าอยู่ในช่วงหลักร้อยหรืออาจจะถึงพัน ซึ่งแสดงถึงระดับการกระจายตัวของโลหะที่ได้ถูกกำหนดด้วยแนวโน้มของการรวมตัวจากการรีดิวซ์

สิ่งแวดล้อมระดับจุลภาคในซีโอไลต์มีผลในการเพิ่มศักยภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของโลหะที่อยู่ภายในรูพรุนเทียบกับตัวรองรับจำพวกออกไซด์ฐาน สำหรับไอออนของโลหะทรานซิชัน โครงร่าง (Framework) ของซีโอไลต์จะทำหน้าที่เป็นเสมือนลิแกนด์ โดยจะเกิดการโคออดิเนชันกับออกซิเจน ตำแหน่งที่ว่างไว้ต่อการทำปฏิกิริยา (Active site) ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับไอออนของโลหะในสารประกอบเชิงซ้อนและมีความว่างไว้คล้ายกับตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ (Homogeneous catalyst)

2.2 ซีโอไลต์ชนิด X และซีโอไลต์ชนิด Y

ซีโอไลต์ชนิด X, Y และ Faujasite (FAU) มีโครงร่างอะลูมิโนซิลิเกตที่คล้ายคลึงกัน โดยโครงร่างจะเริ่มมาจากทรงสี่หน้า (Tetrahedral) ที่มีอะลูมิเนียม (Al) หรือ ซิลิกอน (Si) เป็นศูนย์กลาง (มักเรียกว่า T อะตอม) โดย T อะตอมจะสร้างพันธะกับออกซิเจน 4 อะตอม ในทางกลับกันออกซิเจนแต่ละอะตอมก็จะสร้างพันธะกับอะตอม T 2 อะตอม เกิดเป็นพันธะเชื่อมโยง T-O-T ในโครงสร้างของซีโอไลต์ X นั้นประกอบด้วยโพรงโซดาไลต์ (Sodalite cage) ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายเพชร ในแต่ละโพรงโซดาไลต์ โดยมีออกซิเจน 6 อะตอมเป็นตัวเชื่อมระหว่างโพรงโซดาไลต์เข้าด้วยกัน รูปแบบที่ออกซิเจนทำหน้าที่เชื่อมโยนนี้นี้เรียกว่า Hexagonal prism หรือ Double 6 Ring (D6R) หน่วยโซดาไลต์ที่เกิดการเชื่อมต่อกันได้รูพรุน 3 มิติที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเรียกว่า ซุปเปอร์เคจ (Supercage) เกิดจากโซดาไลต์ 10 หน่วย หรือ 12 T อะตอม



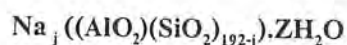
รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ โครงสร้างแบบ Faujasite (ซีโอไลต์ X และ Y)



รูปที่ 2.8 แสดงตำแหน่งที่ไอออนบวก (Cation) อยู่ภายในซูเปอร์เคจของซีโอไลต์ X

ซูเปอร์เคจ (Supercage) ในโครงสร้างของซีโอไลต์ FAU มีลักษณะทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.3 นาโนเมตร และมีขนาดของหน้าต่างรูพรุนประมาณ 0.74 นาโนเมตร โครงสร้างรูพรุน 3 มิตินี้มีขนาดใหญ่พอที่ให้โมเลกุลดัดตั้งต้น เช่น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอยู่ภายในได้ และหน้าต่างรูพรุนมีขนาดเล็กพอที่สามารถจำกัดการเคลื่อนที่เข้าและออกซูเปอร์เคจของโมเลกุลได้เช่นเดียวกัน

องค์ประกอบของ FAU มีหน่วยเซลล์ทั่วไปดังนี้คือ



เมื่อ Z มีค่าประมาณ 260 และค่า j มีค่าในช่วง 48-76 สำหรับ FAU ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction) และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (NMR) สามารถใช้หาโครงสร้างของ FAU ซึ่งขนาดของหน่วยเซลล์จะเล็กลงเล็กน้อย เมื่อ Si/Al มีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ยังช่วยหาคำแหน่งของแคทไอออนที่ทำหน้าที่ดุลประจุลบของอะลูมิเนียมเตตระฮีดรอล (AlO tetrahedral) ที่มีอยู่ได้ ตำแหน่งแคทไอออนแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 แสดงตำแหน่งของไอออนบวก (Cation) ซีไอไลต์ X [2]

โดยตำแหน่ง I (Type I site) ตั้งอยู่ที่ตรงกึ่งกลางของปริซึมทรง 6 เหลี่ยม (Hexagonal prism)

ตำแหน่ง I' (Type I' site) ตั้งอยู่ในโพรงโซคาไลต์ตรงกันข้ามกับผิวทรง 6 เหลี่ยม (Hexagonal face)

ตำแหน่ง II (Type II site) ตั้งอยู่ในซูปเปอร์เคจใกล้กับผิวทรง 6 เหลี่ยมที่ไม่ได้เชื่อมต่อกับหน่วยเซลล์อื่นๆ

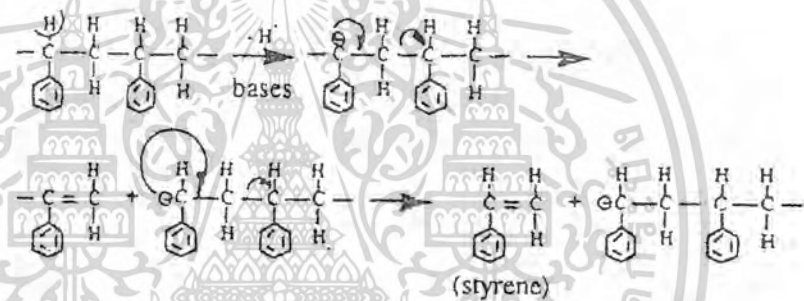
ตำแหน่ง II' (Type II') ตั้งอยู่ในซูปเปอร์เคจซึ่งห่างจากผิวทรง 6 เหลี่ยมมากกว่าตำแหน่ง II

สำหรับซีไอไลต์ชนิด FAU ที่มี H^+ เป็นแคทไอออนที่ดุลประจุบนโครงร่างโปรตอนรอนในตำแหน่ง II และตำแหน่ง II' มีส่วนในการเร่งปฏิกิริยา แต่โปรตอนรอนในตำแหน่ง I และตำแหน่ง I' มีอันตรกิริยากับสารตั้งต้นได้น้อยกว่า จึงมีความสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาน้อยกว่า

การสลายตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

การแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการแตกสลายพันธะ ทำให้เกิดตัวกลางระหว่างปฏิกิริยาที่สามารถเหนี่ยวนำให้โมเลกุลอื่นมีการแตกพันธะต่อไป โดยตัวกลางเองจะสร้างพันธะเกิดเป็นสารใหม่ ตัวเร่งปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ปรับปรุงและควบคุมให้เกิดการแตกสลายไปในแนวทางที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมขนาดโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ได้

กระบวนการแตกสลายด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีฤทธิ์เป็นเบสนั้นมีคาร์เบนไอออน (Carbanion) ซึ่งเป็นคาร์บอนที่มีประจุลบเป็นตัวกลางที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา เช่น การสลายตัวของพอลิสไตรีนโดยใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [3]



ปฏิกิริยาเริ่มมาจากเบสดึงโปรตอนของพอลิสไตรีน ทำให้เกิดคาร์เบนไอออนขึ้น ซึ่งคาร์เบนไอออนจะทำปฏิกิริยาต่อในทำนองเดียวกัน เกิดเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่อง หรือ ลูกโซ่ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้ในกระบวนการแตกสลายได้แก่ Solid base (เช่น MgO CaO และ BaO) และออกไซด์ของโลหะทรานซิชัน (เช่น TiO_2 , Cr_2O_3 และ Fe_2O_3) สารประกอบซิลิกาอะลูมินารวมทั้งซีโอไลต์สังเคราะห์ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีโครงสร้างรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous catalyst) ถูกนำมาใช้ในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงทำให้เกิดปฏิกิริยามาก นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการคัดสรรที่ความดันค่า เป็นตัวเร่งที่ให้ผลิตภัณฑ์ซึ่งมีรูปร่างเจาะจงได้ (Shape selectivity) [3]

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

1. ซีโโอลิต์ X (จาก Aldrich Chemical Company, Inc)
2. ซีโโอลิต์ Y (จากโครงการพิเศษเรื่องกระบวนการไอโซเมอร์ไรเซชันของเมทาไซลีน ปีการศึกษา 2542)
3. แบเรียมไฮดรอกไซด์ออกตะไฮเดรต ($\text{BaOH} \cdot 8\text{H}_2\text{O}$)
4. แมกนีเซียมไนเตรต ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$)
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
6. น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
7. พอลิสไตรีน (PS)
8. ซีเซียมไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรต ($\text{CsOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$)
9. ออโทไซลีน (*o*-Xylene)
10. พาราไซลีน (*p*-Xylene)
11. เมทาไซลีน (*m*-Xylene)
12. เบนซีน (Benzene)
13. อะซิโตน (Acetone)
14. ทอลูอีน (Toluene)
15. ไดเอทิลอีเทอร์ (Diethylether)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. กระจกยกรองเบอร์ 42 ชนิดไร้เงา
2. กระจกใสในโตรเจนเหลว
3. ขวดใส่สาร (Vial)
4. ขาตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ครุฑเปิด (Crucible)
6. คอลัมน์ (Column)
7. เครื่องชั่งน้ำหนัก
8. เครื่องให้ความร้อน (Heating mental)
9. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)
10. เครื่องวิเคราะห์น้ำหนักโดยความร้อน (Thermogravimetric Analysis)
11. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Powder Diffraction)
12. เครื่องวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับของแข็ง (Autosorb-1C)
13. ซ้อนตักสาร
14. ชุดกรองลดความดัน
15. ชุดให้ความเย็น (Cooling)
16. ชุดรีฟลักซ์ (Reflux)
17. บริภัณฑ์เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
18. บริภัณฑ์พลาสติกในห้องปฏิบัติการ
19. คู่มือ
20. เตาเผาแบบท่อ (Tube Furnance)
21. แม่เหล็กและเครื่องปั่นกวน
22. ที่จับ (Clamp)
23. วงแหวน

3.3 ขั้นตอนการวิจัย

ตอนที่ 1 การเตรียมและตรวจสอบโลหะออกไซด์และซีโอไลต์

1. การเตรียมแบเรียมออกไซด์ (BaO) และ ปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
2. การเตรียมแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
3. การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination) ของซีโอไลต์ X และ Y
4. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสซีโอไลต์ X
5. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสซีโอไลต์ Y
6. การตรวจสอบโลหะออกไซด์และซีโอไลต์ ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และเทคนิคการดูดซับของของแข็ง

ตอนที่ 2 การศึกษาการสลายตัวของโพลิสไตรีน

1. ศึกษาผลของการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C
2. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์
3. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
4. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
5. ศึกษาผลของปริมาณ Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์
6. ศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์สไตรีน

3.4 วิธีการวิจัย

ตอนที่ 1. การเตรียมและตรวจสอบโลหะออกไซด์และซีโอไลต์

1. การเตรียมแบเรียมออกไซด์ (BaO) และการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

1.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ (BaO) ได้จากปฏิกิริยา



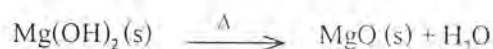
- ชั่งแบเรียมออกไซด์ออกตระไฮเดรต 5 กรัม นำมาใส่ครุชีเบล
- นำสารที่อยู่ในครุชีเบลมาเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เมื่อถึงเวลาที่กำหนดนำออกจากเตาเผาและทิ้งไว้ให้เย็น
- นำมาเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อทำการศึกษาต่อไป
- ในงานวิจัยนี้จะเรียกสารที่ได้ว่า BaO

1.2. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ (BaO)

- ชั่งแบเรียมออกไซด์จากข้อ 1.1 น้ำหนัก 2 กรัม นำมาใส่ในครุชีเบล
- ทำการเผาสารที่เตรียมเอาไว้ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- ทิ้งสารไว้จนเย็น
- นำมาเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อทำการศึกษาต่อไป
- ในงานวิจัยนี้จะเรียกสารที่ได้ว่า BaO-def 2.

2. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

2.1. การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ได้จากปฏิกิริยา



- ผสมสารละลายแมกนีเซียมไนเตรทเข้มข้น 2.68 mol/l ปริมาณ 25 มิลลิลิตร กับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 % โดยน้ำหนัก ปริมาณ 53.6 มิลลิลิตร
- ทำการกวนด้วยแท่งแก้วทิ้งไว้สักครู่ให้ตกตะกอน
- นำสารละลายที่มีตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์อยู่มากกรองด้วยชุดกรองลดความดัน
- นำตะกอนแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้ใส่ crucible เตาเผาที่อุณหภูมิ 350 °C ในเตาเผา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เมื่อถึงเวลาที่กำหนดนำออกจากเตาเผาและทิ้งไว้ให้เย็น
- และนำมาเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อทำการศึกษาคต่อไป
- ในงานวิจัยนี้จะเรียกสารที่ได้ว่า MgO

2.2. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

- ชั่งแมกนีเซียมออกไซด์จากข้อ 2.1 น้ำหนัก 2 กรัม นำมาใส่ใน crucible เตาเผา
- ทำการเผาสารที่เตรียมเอาไว้ในเตาเผาที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- ทิ้งสารไว้จนเย็น
- และนำมาเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อทำการศึกษาคต่อไป
- ในงานวิจัยนี้จะเรียกสารที่ได้ว่า MgO-def

3. การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination) ของซีโอไลต์ X และ Y

- นำซีโอไลต์ (X หรือ Y) ใส่ในภาชนะเซรามิก (ประมาณ 2 กรัม) แล้วนำไปใส่ใน คอลัมน์ขนาดใหญ่
- นำคอลัมน์ไปใส่เตาเผาแบบท่อ (Tube Furnace)
- ตั้งสถานะตามที่กำหนดไว้สำหรับซีโอไลต์แต่ละตัวดังตารางที่ 3.1
- เมื่อครบเวลาที่กำหนด หยุดให้ความร้อนและทิ้งให้คอลัมน์เย็น โดยมีก๊าซ ไนโตรเจนไหลผ่านตลอดเวลาดำวยอัตราการไหล 20 ml/min
- นำซีโอไลต์ที่ได้เก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปศึกษาคต่อไป

ตารางที่ 3.1 แสดงสถานะในการปรับปรุงสมบัติทางความร้อน (Calcination) ของซีโอไลต์ X และ Y

Zeolite	X และ Y
อุณหภูมิที่ใช้ (องศาเซลเซียส)	500
เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	1
อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	2
ก๊าซที่ใช้ (อัตราการไหล 20 ml/min)	อากาศแห้ง/ไนโตรเจน

หมายเหตุ การปรับปรุงสมบัติทางความร้อนของซีโอไลต์ X และ Y เพื่อให้มีความเสถียรทางความร้อนสูงขึ้น

4. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X

4.1. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยวิธีการฝัง

- ซิงซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนให้มีน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์
- อบซีเซียมไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรต ($\text{CsOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่น้ำ จากนั้นชั่งน้ำหนักของซีเซียมไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรตจำนวน 0.6667 กรัม
- ทำการผสมซีโอไลต์ X และ ซีเซียมไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรต โดยใช้ปริมาณ 1 มิลลิลิตร ในการผสม
- อบซีโอไลต์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำ
- ในงานวิจัยนี้จะเรียกสารที่ได้ว่า CsNaX-imp และนำมาเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อทำการศึกษาต่อไป

4.2. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

- นำซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
- ทำการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการเติมสารละลายซีเซียมไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรต ($\text{CsOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.5 mol/l จำนวน 200 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม

- นำขวดก้นกลมต่อเข้ากับชุดรีฟลักซ์ให้ความร้อนจนสารละลายมีอุณหภูมิ 80°C ที่ทิ้งไว้ข้ามคืน โดยทำการปั่นกวสารละลายตลอดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
 - กรองด้วยชุดกรองลดความดัน
 - อบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำ
 - นำมาเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อทำการศึกษาคต่อไป
 - ในงานวิจัยจะเรียกสารที่ได้ว่า CsNaX-ion
5. การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสตัวแรงปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y
- 5.1 การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสตัวแรงปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y โดยวิธีการฝัง
- ซังซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์
 - อบซีซีเอ็มไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรต ($\text{CsOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อทำการไล่น้ำ จากนั้นชั่งน้ำหนักของซีซีเอ็มไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรต จำนวน 0.5023 กรัม
 - ทำการผสมซีโอไลต์ Y และซีซีเอ็มไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรต โดยใช้น้ำปริมาณ 1 มิลลิลิตร ในการผสม
 - อบซีโอไลต์ที่ได้ ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำออก
 - นำมาเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อทำการศึกษาคต่อไป
 - ในงานวิจัยนี้จะเรียกสารที่ได้ว่า CsNaY-imp
- 5.2 การปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสตัวแรงปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน
- นำซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติทางความร้อนน้ำหนัก 1 กรัม ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 250 มิลลิลิตร
 - ทำการแลกเปลี่ยนไอออนโดยการเติมสารละลายซีซีเอ็มไฮดรอกไซด์โมโนไฮเดรต ($\text{CsOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) เข้มข้น 0.5 mol/l จำนวน 200 มิลลิลิตร ลงในขวดก้นกลม
 - นำขวดก้นกลมต่อเข้ากับชุดรีฟลักซ์ให้ความร้อนจนสารละลายมีอุณหภูมิ 80°C ที่ทิ้งไว้ข้ามคืน โดยทำการปั่นกวสารละลายตลอดด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
 - กรองด้วยชุดกรองลดความดัน
 - อบที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดน้ำ
 - นำมาเก็บใส่ขวดพลาสติกเพื่อทำการศึกษาคต่อไป

- ในงานวิจัยนี้จะเรียกสารที่ได้ว่า CsNaY-ion

หมายเหตุ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้และใช้ในการทดลองทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้และใช้ในการทดลองทั้งหมด

สัญลักษณ์	ตัวเร่งปฏิกิริยา
BaO	แบเรียมออกไซด์
MgO	แมกนีเซียมออกไซด์
BaO-def	แบเรียมออกไซด์เมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
MgO-def	แมกนีเซียมออกไซด์เมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
NaX	ซีโอไลต์ X
NaY	ซีโอไลต์ Y
CsNaX-imp	ซีโอไลต์ X เมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการฝังตัว
CsNaY-imp	ซีโอไลต์ Y เมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการฝังตัว
CsNaX-ion	ซีโอไลต์ X เมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน
CsNaY-ion	ซีโอไลต์ Y เมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน

6. การตรวจสอบตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ของแข็ง

6.1 การศึกษาลักษณะ โครงสร้างของผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction)

- ส่งไปตรวจที่ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ

6.2 การศึกษาหาพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และซีโอไลต์ โดยใช้เครื่องวัดความสามารถในการดูดซับของของแข็ง (Autosorb-1C)

วิธีการเตรียมตัวอย่าง

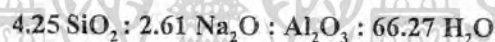
- อบซีโอไลต์หรือโลหะออกไซด์ที่จะทำการวิเคราะห์ให้แห้ง
- ชั่งซีโอไลต์หรือโลหะออกไซด์ให้ได้น้ำหนักประมาณ 10 มิลลิกรัม แล้วใส่ในหลอดตัวอย่าง (Sample cell)
- นำไปไล่ความชื้น (Outgas) ตามสถานะที่แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงสภาวะที่ใช้ในการไล่ความชื้น

ตัวเร่ง ปฏิกิริยา	NaX	CsNaX -imp	CsNaX -ion	NaY	CsNaY -imp	CsNaY -ion	BaO	BaO- def	MgO	MgO -def
อุณหภูมิ (°C)	300	300	300	300	300	300	150	150	150	150
เวลา (ชม.)	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	2.7	2.7	2.7	2.7

- นำไปตรวจสอบโดยใช้เครื่องวัดความสามารถในการดูดซับของแข็ง โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวดูดซับ

หมายเหตุ ซีโอไลต์ Y ที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 2 สังเคราะห์ในโรงงานพิเศษเรื่องกระบวนการไฮโซเมอร์ไรซ์เซชันของเมทาไซลีนปีการศึกษา 2542 [4] โดยมีสูตรเจลที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นดังนี้



- แหล่งอะลูมิเนียมที่ใช้ในการสังเคราะห์คือ โซเดียมอะลูมิเนต (Na_2O 37.57%, Al_2O_3 59.54%) และอะลูมิเนียมไนเตรต ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)
- แหล่งซิลิกาที่ใช้สารละลายแขวนลอยซิลิกา (Ludox) (SiO_2 40%w/w)
- เวลาที่ใช้ในการตกผลึก 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

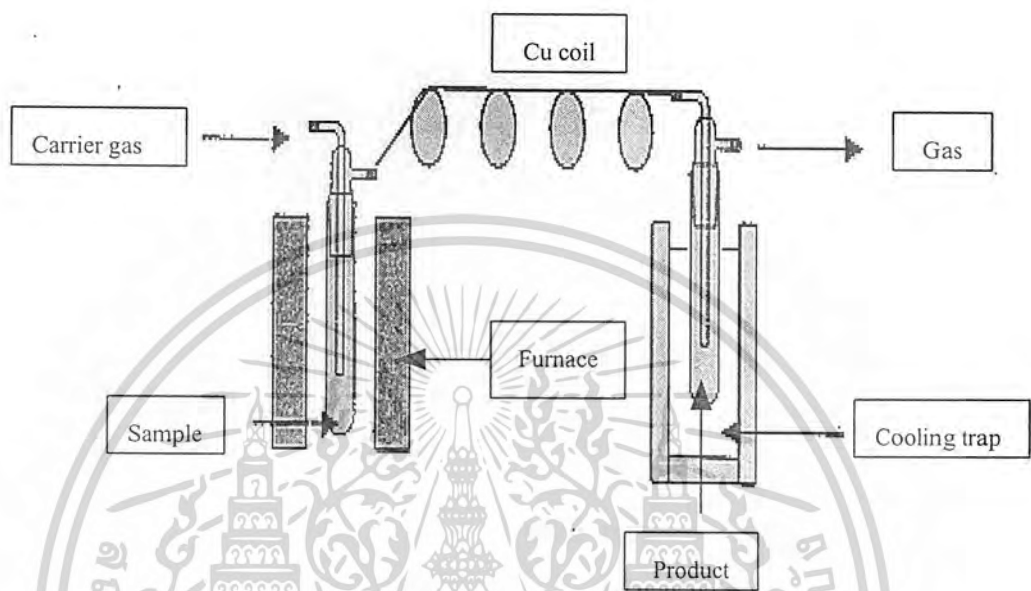
ตอนที่ 2. การศึกษาการสลายตัวของพอลิสไตรีน

- ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นได้น้ำหนักตามตารางที่ 3.4
- นำสารตั้งต้นที่เตรียมไว้ใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วทำการละลายด้วยโทลูอิน
- ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นทำการระเหยโทลูอิน
- ทิ้งไว้จนแห้ง แล้วนำตัวอย่างใส่ลงในชุดปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ดังรูปที่ 3.1
- ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดไว้ตามตารางที่ 3.4
- ทำการเก็บตัวอย่างของเหลวใส่ขวด vial นำไปตรวจสอบด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี

สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวของพอลิสไตรีนแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงสถานะที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวของพอลิस्टาไดรีน

Batch	Sample (g)	Catalysts		Temp (°C)	Heating rate (°C/min)	Holding time (min)	Carrier gas	Flow gas (ml/min)
		Type	(%)					
1	1.0078	-	0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
2	1.0110	-	0	120	2	30	N ₂	50
				500	2	60	He	50
3	1.0065	BaO	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
4	1.0058	BaO-def	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
5	1.0105	MgO	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
6	1.0118	MgO-def	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
7	1.0098	NaX	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
8	1.0035	CsNaX-imp	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
9	1.0017	CsNaX-ion	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
10	1.0021	NaY	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
11	1.0037	CaNaY-imp	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50
12	1.0089	CsNaY-ion	20.0	120	2	30	N ₂	50
				400	2	60	He	50



รูปที่ 3.1 แสดงการจัดตั้งชุดปฏิกิริยาในการศึกษาการสลายตัวของพอลิเอทิลีนด้วย โลหะออกไซด์ และซีโอไลต์

การศึกษาการสลายตัวของพอลิสไตรีน สามารถแบ่งได้เป็น 6 การทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1. การศึกษาผลของการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400°C และ 500°C

โดยอาศัยผลจากการทดลอง Batch 1 และ 2

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

โดยอาศัยผลจากการทดลอง Batch 3 และ 5

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงให้มีสมบัติ
ความเป็นเบส

โดยอาศัยผลจากการทดลอง Batch 3, 4, 5 และ 6

การทดลองที่ 4 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงให้มีสมบัติ

ความเป็นเบส

โดยอาศัยผลจากการทดลอง Batch 10, 11 และ 12

การทดลองที่ 5 การศึกษาผลปริมาณ Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

โดยอาศัยผลจากการทดลอง Batch 7, 8, 9, 10, 11 และ 12

การทดลองที่ 6 การศึกษาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มี
ผลต่อผลิตภัณฑ์สไตรีน

โดยอาศัยผลจากการทดลอง Batch 4, 8 และ 11

การศึกษากายการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง TGA

- ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นได้น้ำหนักตามตารางที่ 3.5
- นำสารตั้งต้นที่เตรียมไว้ใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วละลายด้วยโทลูอีน
- แล้วใส่ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นระเหยโทลูอีนออก
- ทิ้งไว้ให้แห้ง แล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง TGA.

สถานะที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีนด้วยเครื่อง TGA แสดงดังตาราง
ที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงสภาวะที่ใช้ในการศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิไธสไตรีนด้วยเครื่อง TGA

Batch	Sample (mg)	Catalysts		Temp (°C)	Heating rate (°C/min)	Carrier gas	Flow gas (ml/min)
		Type	%				
1	9.70	-	-	80-900	20	N ₂	10
2	9.50	-	-	80-900	20	N ₂	10
3	10.80	BaO	20.0	80-900	20	N ₂	10
4	9.80	BaO-def	20.0	80-900	20	N ₂	10
5	10.50	MgO	20.0	80-900	20	N ₂	10
6	10.10	MgO-def	20.0	80-900	20	N ₂	10
7	9.80	NaX	20.0	80-900	20	N ₂	10
8	10.20	CsNaY-imp	20.0	80-900	20	N ₂	10
9	10.40	CsNaX-ion	20.0	80-900	20	N ₂	10
10	10.70	NaY	20.0	80-900	20	N ₂	10
11	9.90	CsNaY-imp	20.0	80-900	20	N ₂	10
12	10.10	CsNaY-ion	20.0	80-900	20	N ₂	10

การวิเคราะห์โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ของเหลว

นำผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC) โดยใช้คอลัมน์ชนิด EC-WAX ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.32 มิลลิเมตร ความยาว 30 เมตร ใช้สภาวะดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงสถานะที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการการสลายตัวของพอลิไทรีน ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (GC)

ชนิดสาร	ปริมาณที่ฉีด (μl)	Injector (°C)	Carrier gas	Column oven				TCD detector		FID detector (°C)
				Temp (°C)	Rate (°C/min)	Hold time	Total (min)	Temp (°C)	Filament Temp (°C)	
ผลิตภัณฑ์ของเหลว	0.02	200	He	40	-	2.0	2.0	200	240	250
				150	5.0	1.0	25			



บทที่ 4

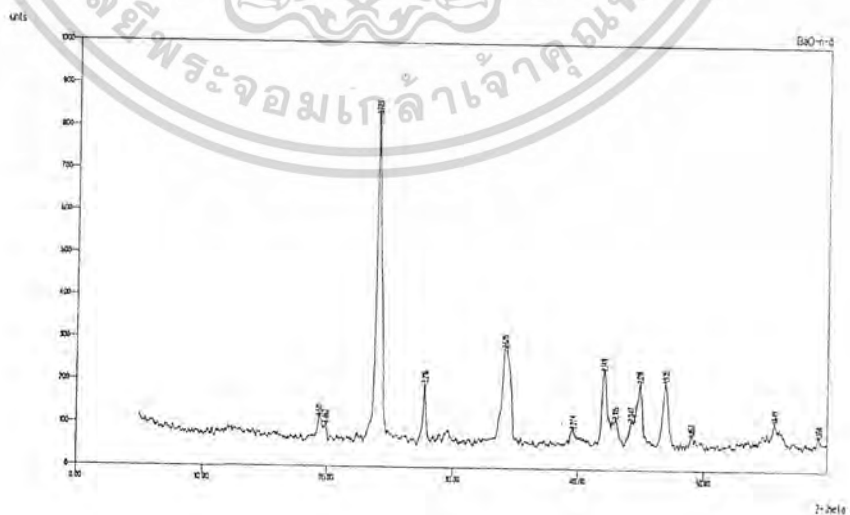
ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่างๆ

การวิเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสทำได้โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray power diffraction, XRD) ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer Model JDX-8030, Joel, Japan โดยใช้ รังสีเอ็กซ์ (X-ray) จาก $\text{CuK}\alpha$ เป็นแหล่งแสง และการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับของแข็ง (Autosorp-1C) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์โดยอาศัยความสามารถในการดูดซับก๊าซ ซึ่งก๊าซที่ใช้คือก๊าซไนโตรเจน โดยค่าที่วัดได้ คือ ค่าไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) ซึ่งสามารถใช้สมการ BET ประเมินค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของของแข็ง ซึ่งผลการทดลองเป็นดังนี้

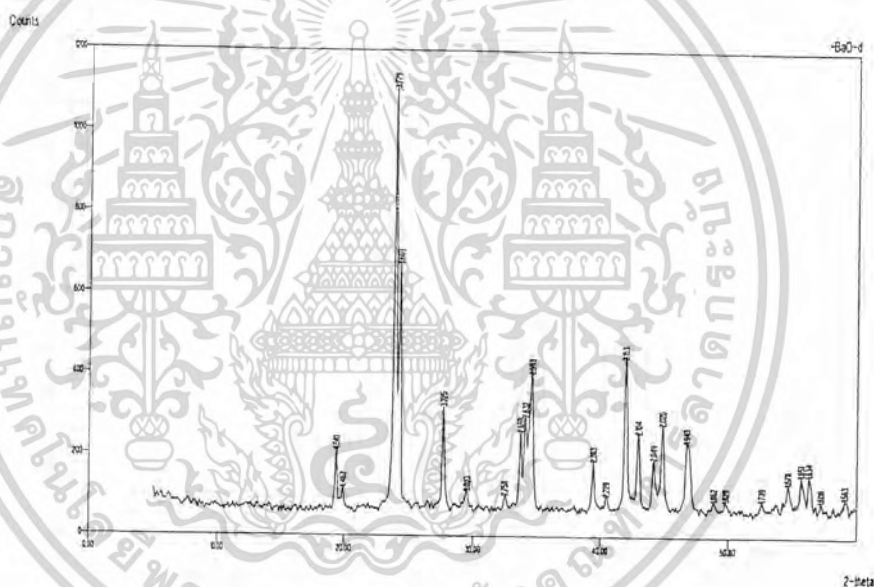
4.1.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์

แบเรียมออกไซด์ที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นของแข็งที่เป็นผลึกเพราะเมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าพีกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นยอดแหลมที่ตำแหน่ง 2-theta ที่ 19.4, 23.9, 27.7, 34.1 และ 42.0 ดังรูปที่ 4.1



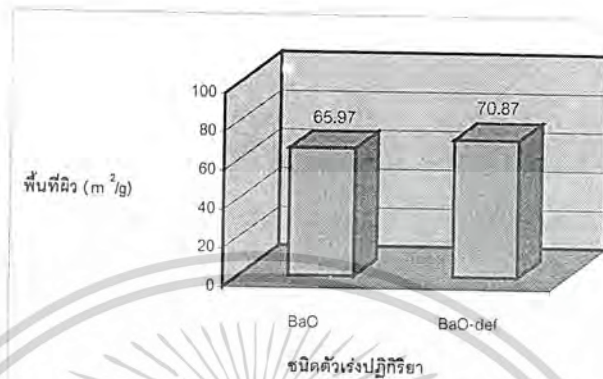
รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของแบเรียมออกไซด์ที่เตรียมได้ก่อนการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (BaO)

และเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของแบเรียมออกไซด์โดยวิธีการให้ความร้อนแล้วนำไปทดสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.2 พบว่าพิกจะมีตำแหน่ง 2-theta ใกล้เคียงกับแบเรียมออกไซด์ก่อนให้ความร้อน (BaO) โดยพิกจะขึ้นที่ตำแหน่ง 19.4, 23.80, 34.60 และ 41.90 แต่โครงสร้างแบเรียมออกไซด์หลังให้ความร้อน (BaO-def) จะมีความสูงของพิกมากกว่าแบเรียมออกไซด์ก่อนให้ความร้อน (BaO) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่โลหะออกไซด์จะทำให้แบเรียมมีความเป็นผลึกมากขึ้นและมีตำแหน่งว่างไวเพิ่มขึ้น แต่จะไม่มีการจัดเรียงตัวโครงสร้างใหม่



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแบเรียมออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (BaO-def)

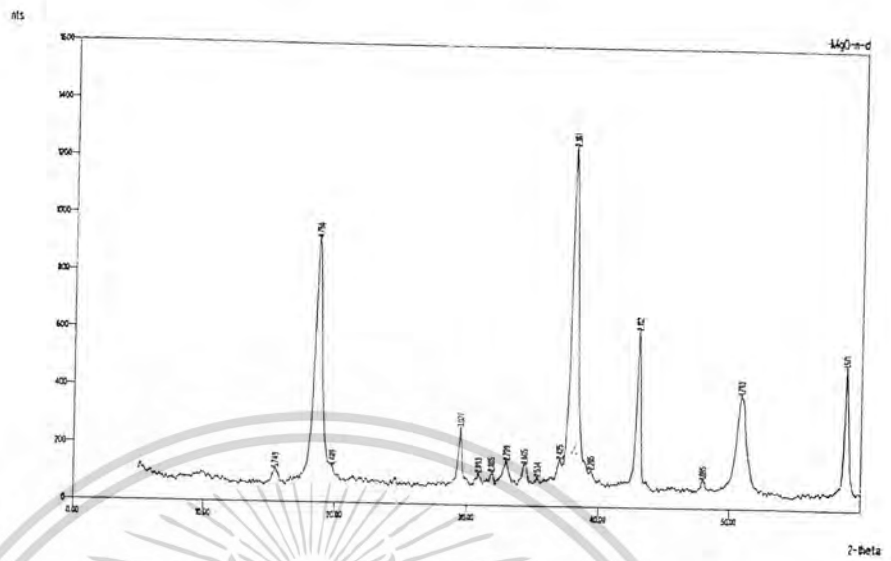
จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของแบเรียมออกไซด์ก่อนและหลังการให้ความร้อนพบว่าพื้นที่ผิวมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เพราะเมื่อให้ความร้อนจะทำให้มีโครงสร้างที่เป็นผลึกมากขึ้น ดังนั้นแบเรียมออกไซด์หลังการให้ความร้อนน่าจะมีตำแหน่งที่ว่างไวในการเกิดปฏิกิริยาได้มากกว่าแบเรียมออกไซด์ก่อนการให้ความร้อน เนื่องมาจากการมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 แสดงผลของพื้นที่ผิวของแบเรียมออกไซด์ก่อน (BaO) และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (BaO-def)

4.1.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของแมกนีเซียมออกไซด์พบว่าพีกมีลักษณะเป็นยอดแหลมขึ้นที่ตำแหน่ง 18.60, 29.50, 38.10, 43.0, 50.90 และ 58.7 แสดงดังรูปที่ 4.4 และเมื่อปรับปรุงให้มีสมบัติเป็นเบสโดยวิธีการให้ความร้อน พบว่าลักษณะของพีกจะมีลักษณะเปลี่ยนไปจากเดิม แสดงดังรูปที่ 4.5 โดยพีกที่ตำแหน่ง 2-theta เท่ากับ 2.102 ความสูงของพีกเพิ่มขึ้น ส่วนตำแหน่งอื่นๆ จะมีความสูงของพีกลดลง จากรูปจึงพอสันนิษฐานได้ว่าเมื่อให้ความร้อนแก่แมกนีเซียมออกไซด์ จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่ลักษณะแตกต่างไปจากโครงสร้างเดิม แมกนีเซียมออกไซด์มีผลึกเปลี่ยนแปลงไป คือ มีความสูงของพีกเพิ่มขึ้นมีความเป็นผลึกสูงโดยมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น

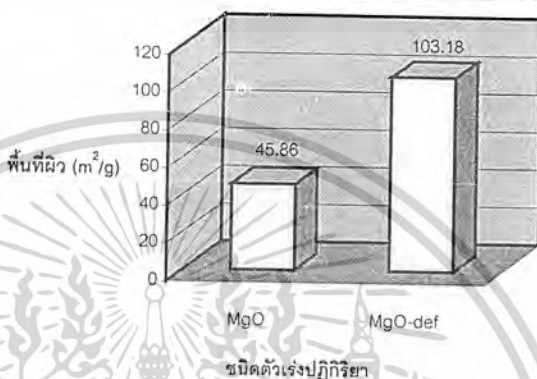


รูปที่ 4.4 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)



รูปที่ 4.5 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแมกนีเซียมออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (MgO-de¹)

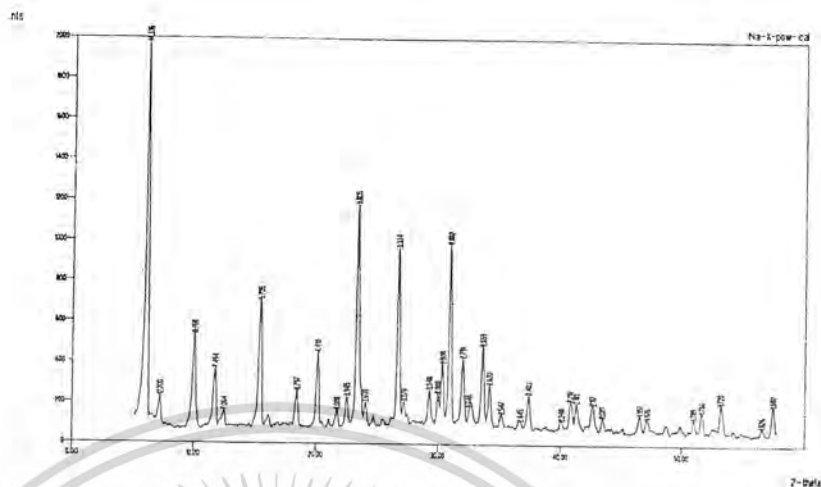
จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นจากเดิมมาก แสดงดังรูปที่ 4.6 สันนิษฐานได้ว่าแมกนีเซียมออกไซด์หลังการให้ความร้อนจะมีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่โดยมีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น



รูปที่ 4.6 แสดงผลของพื้นที่ผิวของแมกนีเซียมออกไซด์ก่อน (MgO) และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (MgO-def)

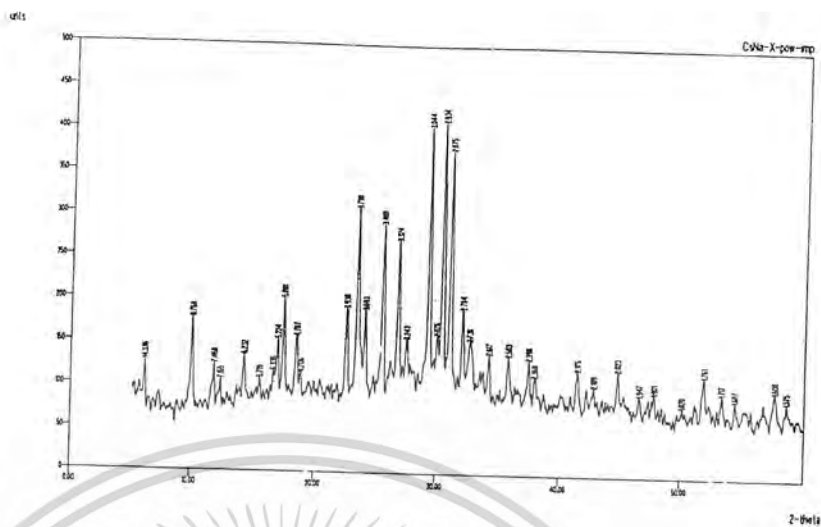
4.1.3 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าพีกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นยอดแหลม ซึ่งเป็นลักษณะของสารที่เป็นผลึก และเมื่อนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไปเปรียบเทียบกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ในภาคผนวก พบว่าตำแหน่งของพีกที่เกิดขึ้นมีตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน โดยพีกขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta เท่ากับ 6.20, 10.10, 15.50, 23.40, 26.70 และ 31.0 แสดงดังรูปที่ 4.7

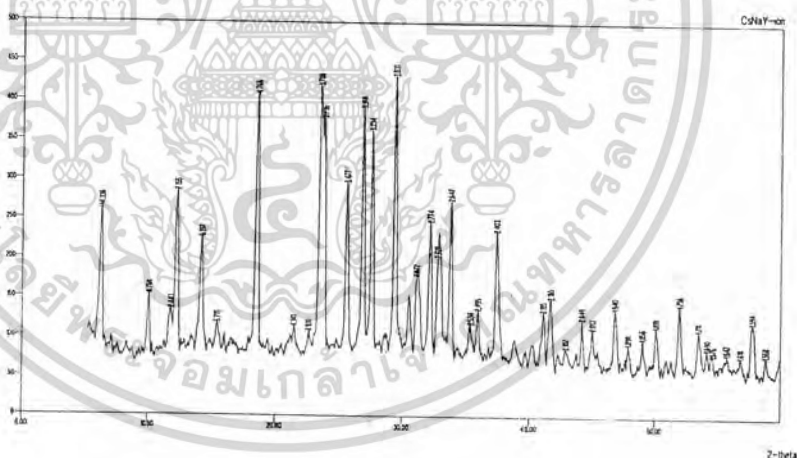


รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X (NaX)

และเมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่ผ่านการปรับปรุงให้มีสมบัติเป็นเบส โดยวิธีการฝังตัวและวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนของซีเอ็มมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 พบว่าซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงให้มีสมบัติเป็นเบสทั้ง โดยวิธีการฝังตัวและแลกเปลี่ยนไอออนจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันไปสังเกตได้จากความสูงของพีคในช่วง 2-theta น้อยกว่า 30 จะมีความสูงของพีคลดลง ทั้งนี้เนื่องจากซีเอ็มไอออนเป็นแคทไอออนขนาดใหญ่สามารถดูดซับรังสีเอกซ์ได้ทำให้ความสูงของพีคลดลง แต่ซีเอ็มไม่สามารถเข้าไปในรูซีโอไลต์ที่มีขนาดเล็ก เป็นผลให้ความสูงของพีคในช่วง 2-theta มากกว่า 30 มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตาม พบว่าซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสยังมีโครงสร้างเดิม เพราะไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



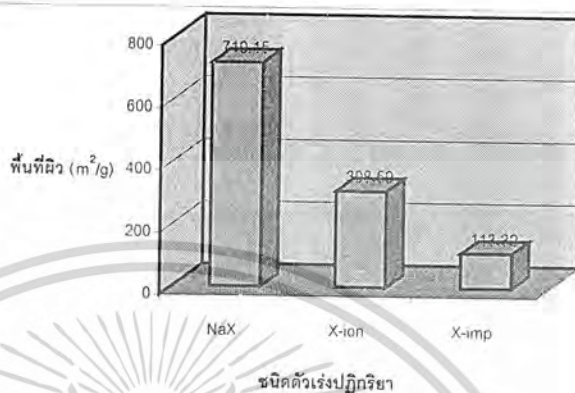
รูปที่ 4.8 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว (CsNaX-imp)



รูปที่ 4.9 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (CsNaX-ion)

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ X เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการแลกเปลี่ยนซีเซียมไอออน และวิธีการฝังตัวซีเซียมไอออน พบว่าพื้นที่ผิวมีค่าลดลง เนื่องมาจากซีเซียมไอออน ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคทไอออนเข้าไปอยู่ในรูพรุนซีโอไลต์และพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธี

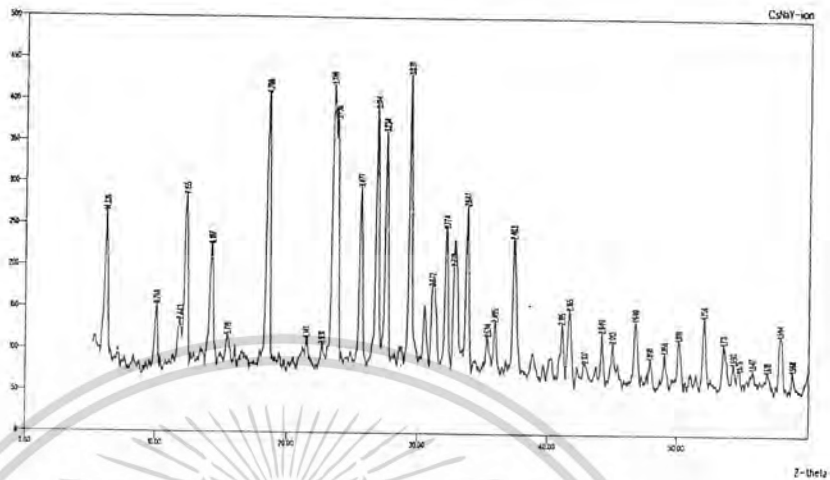
การฝังตัวจะมีพื้นที่ผิวน้อย สามารถสันนิษฐานได้ว่าวิธีการฝังตัวมีปริมาณซีเซียมมาก ซึ่งวิธีการนี้ ซีเซียมสามารถอยู่ที่ภายนอกและภายในรูพรุนของซีโอไลต์โดยผลของพื้นที่ผิว แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ X ก่อน (NaX) และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (CsNaX-imp และ CsNaX-ion)

4.1.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

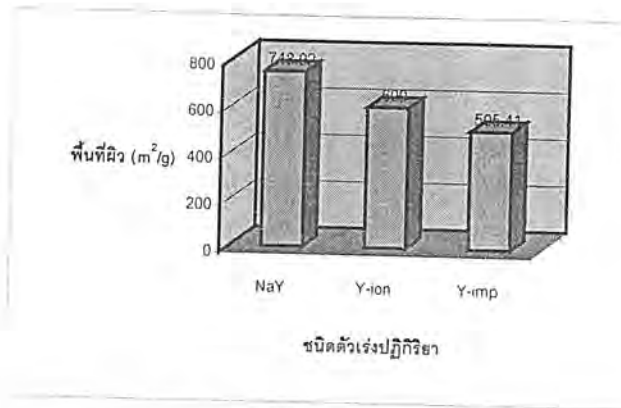
จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่าพีคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นยอดแหลมซึ่งเป็นลักษณะของผลึกและนำรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ไปเปรียบเทียบกับการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y รูปที่ 12ข ในภาคผนวกพบว่าตำแหน่งของพีคที่ขึ้นมีตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน โดยพีคขึ้นที่ตำแหน่ง 2-theta เท่ากับ 20.141, 8.698, 5.661, 3.773 และ 2.857 ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.13 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (CsNaY-ion)

พบว่าซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการฝังตัวและการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งมีเหตุผลเดียวกับตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยพบว่าความสูงของพีคในซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงโดยวิธีการฝังตัวจะมีค่ามากกว่าซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงโดยวิธีการฝังตัวซีเชียมสามารถเข้าไปอยู่ทั้งภายในและภายนอกรูพรุน จึงทำให้ซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงโดยวิธีการฝังตัวมีปริมาณซีเชียมมากกว่าซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

เมื่อทำการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส พบว่าพื้นที่ผิวมีค่าลดลงโดยซีโอไลต์ Y ที่เตรียมจากวิธีการฝังตัวจะมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.14 ซึ่งมีเหตุผลเช่นเดียวกับซีโอไลต์ X แต่พื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสมีแนวโน้มลดลงน้อยกว่าซีโอไลต์ X เนื่องจากซีโอไลต์ Y มีค่า Si/Al มากกว่าซีโอไลต์ X จึงมีตำแหน่งว่องไวน้อย ปริมาณซีเชียมไอออนที่เข้าไปอยู่ก็น้อย ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของซีโอไลต์ Y มีค่ามากกว่าซีโอไลต์ X หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส



รูปที่ 4.14 แสดงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อน(NaY) และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการแลกเปลี่ยน ไอออนและวิธีการฝังตัว (CsNaY-ion และ CsNaY-imp)

จากการวิเคราะห์ที่ตัวเร่งปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้น พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้

4.2 การศึกษาการสลายตัวของพอลิสไตรีน

โดยในส่วนนี้ทำการศึกษาการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาและเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดยผ่านกระบวนการแบบครั้ง (Batch operation) ที่อุณหภูมิ 400 °C ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนและก๊าซฮีเลียม โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีนดังต่อไปนี้

1. ผลของการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C
2. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์
3. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
4. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส
5. ผลของอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกะ ผต้ออะลูมิเนียม (Si/Al) ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์
6. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์สไตรีน

โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือ ก๊าซ (Gases) ของเหลว (Liquid hydrocarbons) สารประกอบแว็กซ์ (Wax-like compound) กากคาร์บอน (Carbonaceous residues) ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

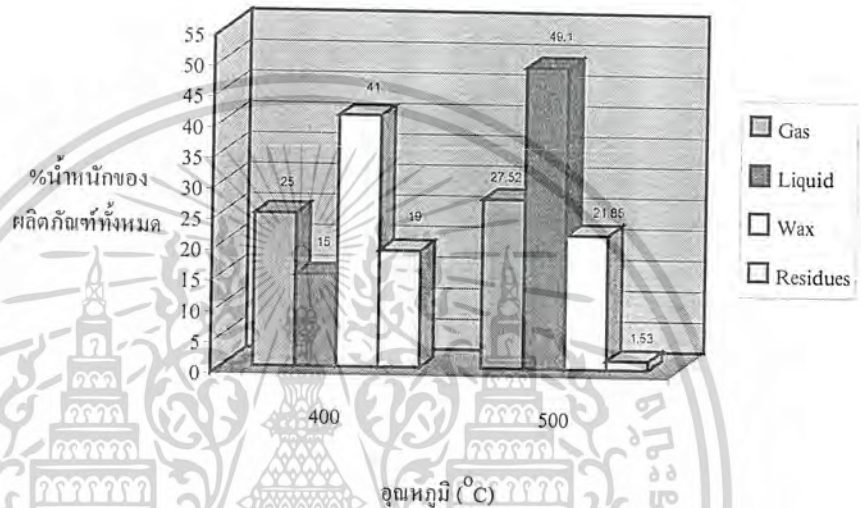


ตารางที่ 4.1 แสดงผลิตภัณฑ์ทั้งหมดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิซิสไตรีน

% wt	PS /thermal		PS+	PS+	PS+	PS+	PS+	PS+	PS+	PS+	PS+	PS+
	400	500	NaX (powder)	CsNaX (pow/imp)	CsNaX (pow/ion)	NaY	CsNaY (imp)	CsNaY (ion)	BaO	BaO (deffect)	MgO	MgO (deffect)
Oil	15	49.1	31.05	38.53	29.53	66.67	57.47	43.02	66.81	62.46	39.81	44.36
Wax	41	21.85	31.35	29.53	2.81	26.54	27.36	36.19	23.53	22.70	24.83	20.17
Coke	19	1.53	0.43	0.54	0.69	0.94	1.03	1.42	0.32	0.48	10.30	11.20
Gas	25	27.52	37.16	26.43	59.83	6.36	14.64	20.10	9.34	14.39	25.06	24.27
Selectivity in liquid products (% wt)												
Benzene	-	0.666	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Toluene	4.86	0.68	-	0.88	0.95	0.59	0.74	-	0.82	0.52	0.53	1.75
o- methyl styrene	3.35	0.53	5.05	1.03	1.42	0.98	0.54	8.49	0.52	1.79	1.1	7.3
Xylene	3.45	-	1.59	0.50	0.99	-	0.07	1.12	-	-	-	-
Styrene	87.17	98.78	88.85	96.48	95.05	96.76	96.75	89.54	97.40	97.69	97.21	85.28
High M.W.	-	-	4.91	1.10	1.59	10	1.96	0.85	1.25	-	1.15	5.66
TGA (°C) (Temp on set)	410.7	433.9	436.36	407.7	425	420.46	415.4	415.3	416.3	422.73	419.2	421.4

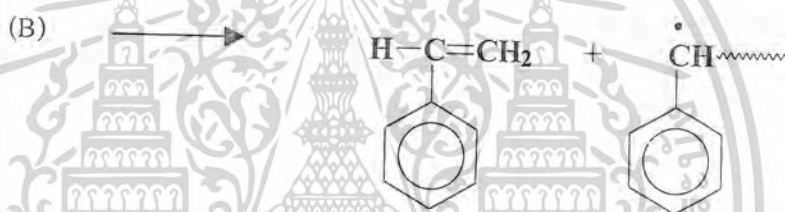
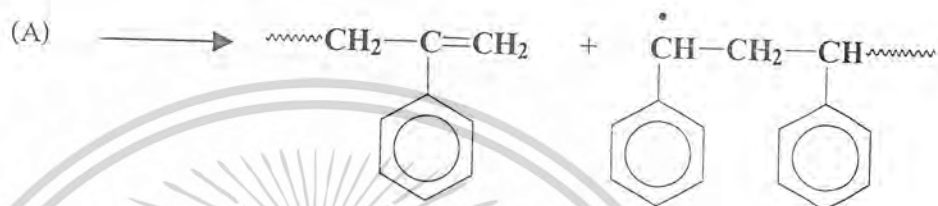
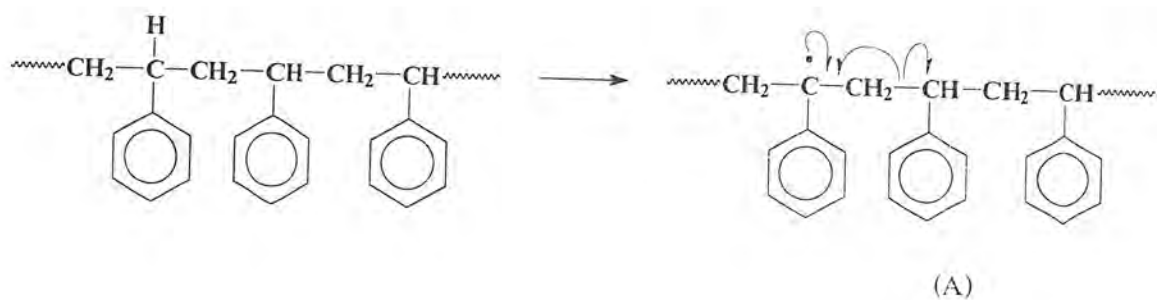
1. ผลของการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C

ผลการสลายตัวทางความร้อนของพอลิस्टาไร์นที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C แสดงได้ดังรูปที่ 4.15



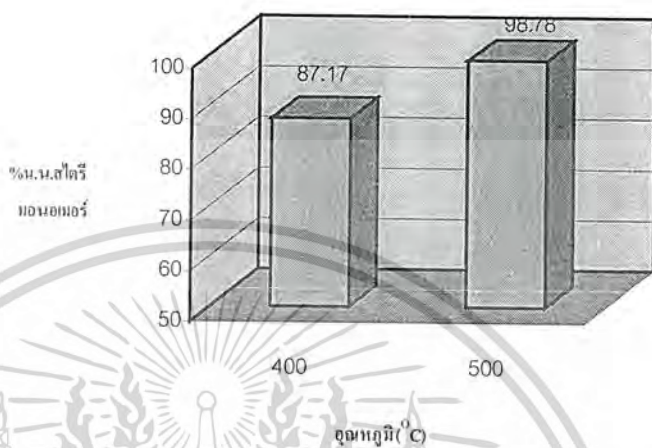
รูปที่ 4.15 แสดงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิस्टาไร์นที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าการสลายตัวของพอลิस्टาไร์นที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 °C ให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวมากกว่าที่อุณหภูมิ 400 °C เนื่องจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงๆ จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกสลายได้ดี โดยปฏิกิริยาเกิดผ่านอนุมูลอิสระซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาสามารถ แสดงดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 แสดงกลไกปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนของพอลิस्टาไทรินที่เกิดผ่านอนุมูลอิสระ

เมื่อพิจารณาผลของผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.17

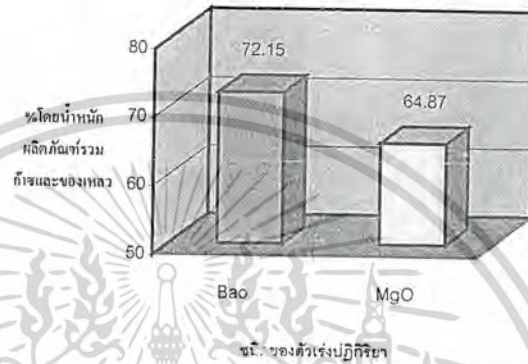


รูปที่ 4.17 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีนที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C

จากรูปที่ 4.17 พบว่าการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 °C ให้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวมากกว่าที่ 400 °C เพราะที่อุณหภูมิ 500°C การสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีน จะเกิดการแตกตัวได้สมบูรณ์ดังผลของเทอร์โมกราวิเมตริกของพอลิสไตรีน แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวเริ่มที่ 410.7 °C และสลายตัวเสร็จสมบูรณ์ที่ 450°C ดังนั้นการสลายตัวที่ 500°C ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนของพอลิสไตรีนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเฉพาะเจาะจงเป็นสไตรีนมอนอเมอร์ ตามกลไกการสลายตัวทางความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.16 ในขณะที่อุณหภูมิ 400°C การสลายตัวทางความร้อนจะเกิดไม่สมบูรณ์ ทำให้ระหว่างการแตกตัวของโมเลกุลเกิดการถ่ายโอนของสายโซ่ได้ผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นรวมทั้งพวกไดเมอร์และไตรเมอร์ของสไตรีนผสมอยู่ในผลิตภัณฑ์ของเหลว จึงได้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวปริมาณน้อย ดังนั้นจึงทำการศึกษาการสลายตัวของพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิที่ 400°C เพื่อศึกษาผลการช่วยเร่งปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิสไตรีน

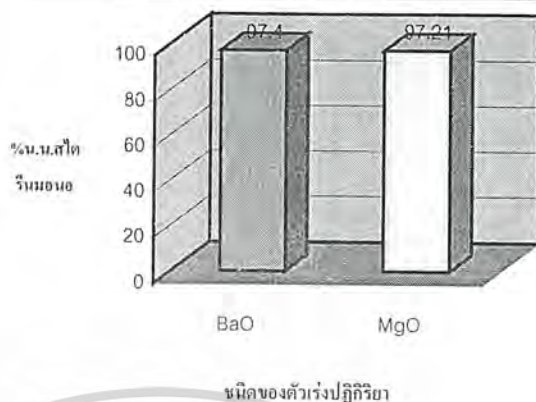
2. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

ศึกษาผลของแคโทดไอออนในตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ ในที่นี้เลือกทำการศึกษา Ba^{2+} และ Mg^{2+} โดยผลการสลายตัวของพอลิสไตรีนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลว

จากรูปจะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเบเรียมออกไซด์ให้ผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ เนื่องจากความสามารถในการสลายตัวของพอลิสไตรีนขึ้นอยู่กับความเป็นเบสของตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่ง Ba^{2+} มีความหนาแน่นของประจุ (Charge density) น้อยกว่า Mg^{2+} เพราะ Ba^{2+} มีอะตอมขนาดใหญ่และมีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่า Mg^{2+} ทำให้โครงผลึกออกซิเจนของเบเรียมออกไซด์มีความเป็นเบสมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ และผลของเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่ได้จากตัวเร่งปฏิกิริยาเบเรียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 4.19

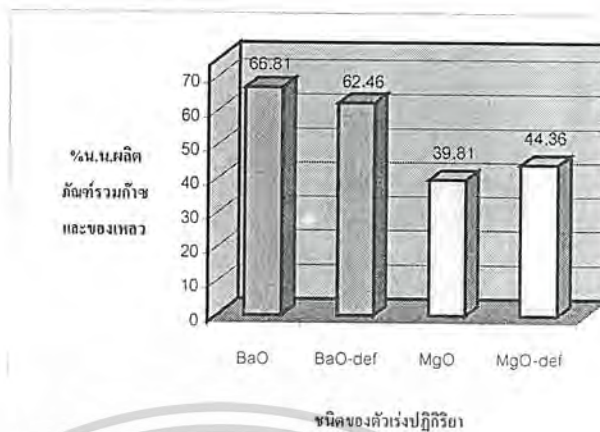


รูปที่ 4.19 แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา โลหะออกไซด์ที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลว

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ให้ผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ เนื่องจากแบเรียมออกไซด์มีความแรงของเบสมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนโดยใช้แบเรียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาคงจะมีแนวโน้มลดลง แต่จากผลการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวจากกระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีนโดยตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์มีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์มีกลไกการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่พื้นที่ผิวภายนอก (External surface) เหมือนกัน และความสามารถในการสลายตัวของพอลิสไตรีนเพิ่มขึ้นมา ก็ไม่ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์มีความเฉพาะเจาะจงในการเกิดเป็นสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวเปลี่ยนไป

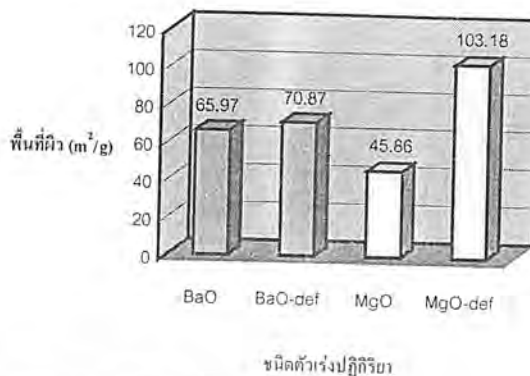
3. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

เมื่อนำตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์มาทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 350 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้โครงสร้างเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งผลของปริมาณผลิตภัณฑ์รวมเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส แสดงได้ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์ก่อน (BaO และ MgO) และหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส (BaO-def และ MgO-def) ต่อปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลว

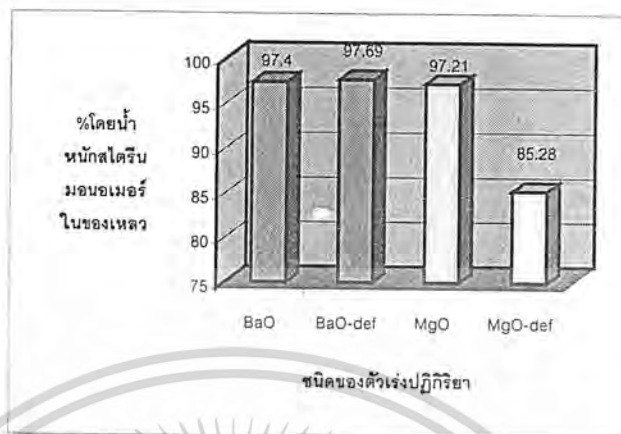
จากรูปที่ 4.20 พบว่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลวที่ได้จากการสลายตัวของพอลิไธรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสมีค่าไม่แตกต่างกัน เนื่องจากความแรงของเบสไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะโครงสร้างตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสไม่เปลี่ยนแปลงจากตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ก่อนการปรับปรุง ซึ่งแสดงได้จากผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส ตำแหน่งของพีคมีลักษณะใกล้เคียงกัน นอกจากนี้พบว่า พื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสมีค่าไม่แตกต่างกันนัก แสดงดังรูปที่ 4.21 ทำให้โอกาสที่สารจะเข้าทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งว่างไว้มีจำนวนไม่แตกต่างกัน ดังนั้นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวมของก๊าซและของเหลวที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.21 แสดงพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสให้ผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลวที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนมีค่ามากกว่าการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาก่อนการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส ดังรูปที่ 4.20 เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์เมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณรูพรุนที่มีขนาดเล็กมากขึ้น นั่นคือเมื่อปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนแปลง อะตอมของโลหะและอะตอมของออกซิเจนของตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ และทำให้อะตอมอิสระของออกซิเจนมีจำนวนมากขึ้นซึ่งแสดงถึงตำแหน่ง basic site มีจำนวนมากขึ้น ส่งผลให้มีความเป็นเบสมากขึ้น ปฏิกิริยาการสลายตัวจึงเกิดได้ดี นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ก่อนการปรับปรุงซึ่งแสดงให้เห็นถึงตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์มีโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไป แสดงได้ดังรูปที่ 4.21 อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์จะให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์รวมของก๊าซและของเหลวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ จึงกล่าวได้ว่าในการสลายพอลิสไตรีนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้แปรผันตามชนิดและพื้นที่ผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

เมื่อพิจารณาผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสที่มีต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลว แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสตรอนเชียมที่ละลายในของเหลว

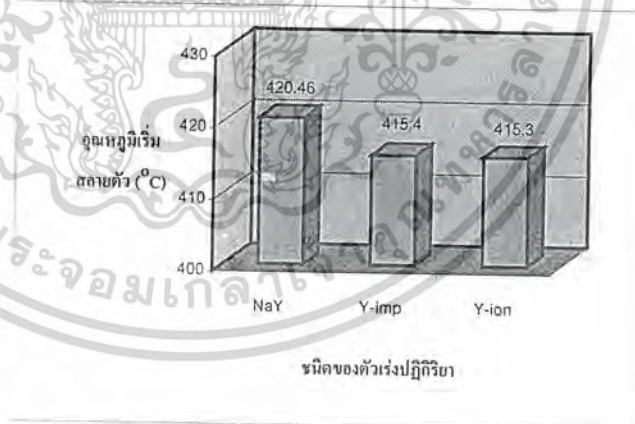
จากรูปที่ 4.22 พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรียบออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสและแมกนีเซียมออกไซด์ก่อนการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสตรอนเชียมที่ละลายในของเหลวมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากมีกลไกการสลายตัวของพอลิซิลิโคนที่พื้นผิวภายนอก (Extrenal Surface) ที่เหมือนกัน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรียบออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส จะให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์สตรอนเชียมที่ละลายในของเหลวมีค่าต่ำกว่า เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์เมื่อได้รับความร้อนโครงสร้างจะมีการจัดเรียงตัวใหม่ คือมีปริมาณรูพรุนขนาดเล็กมากขึ้น จึงอาจสันนิษฐานได้ว่ามีแนวทางการเกิดกลไกการสลายตัวของพอลิซิลิโคนแบบอื่นร่วมด้วย จึงได้ผลิตภัณฑ์อื่นๆเกิดร่วมด้วย

นอกจากนี้การที่ค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสตรอนเชียมที่ละลายในของเหลวจากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรียบออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสไม่ลดลงไปจากเดิมเหมือนตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรียบออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่แบบเรียบออกไซด์จะทำให้แบบเรียบออกไซด์มีตำแหน่งว่างไว้มากขึ้น แต่ไม่มีการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ ดังรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเรียบออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสมีความสูงของพีกเพิ่มขึ้นและตำแหน่งพีกไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิม (รูปที่ 4.1 และ 4.2) ทำให้กลไกการสลายตัวของพอลิซิลิโคนไม่เปลี่ยนแปลง

4. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

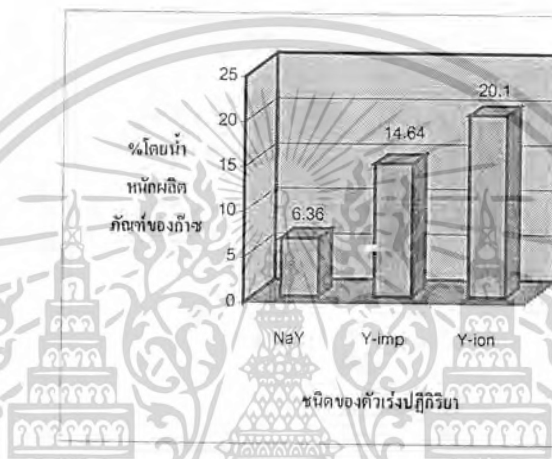
เมื่อทำการปรับปรุงซีโอไลต์ให้มีความเป็นเบสโดยใช้ซีเซียมไอออน จะทำให้ซีโอไลต์มีความแรงของเบสเพิ่มขึ้น เนื่องจากซีเซียมไอออนมีขนาดใหญ่และมีอิเล็กตรอนจำนวนมากสามารถให้อิเล็กตรอนแก่ Framework ออกซิเจนได้มากกว่าแคทไอออนขนาดเล็ก ทำให้ framework ออกซิเจนมีอิเล็กตรอนอยู่หนาแน่น ซีโอไลต์จึงมีความเป็นลิวอิสเบส (Lewis base) [6] โดยพบว่าซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสจากวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีความแรงของเบสมากกว่าซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสจากวิธีการฝังตัว เพราะวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีปริมาณซีเซียมไอออนภายในรูพรุนซีโอไลต์มากกว่าวิธีการฝังตัว ซึ่งตำแหน่งภายในรูพรุนจะเป็นตำแหน่งที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา ส่วนในกรณีวิธีฝังซีเซียมไอออนส่วนมากจะอยู่นอกรูพรุนจึงทำให้มีความแรงของเบสต่ำ นอกจากนี้ถ้าความแรงของเบสมากกว่าเบน ไอออนก็มีความเสถียรมาก พลังงานก่อกัมมันต์ (E_a) ในการเกิดปฏิกิริยาก็ต่ำลง ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวของพอลิสไตรีนลดลง

สำหรับผลการทดสอบเทอร์โมกราวิเมตริกของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสแสดงดังรูปที่ 4.23



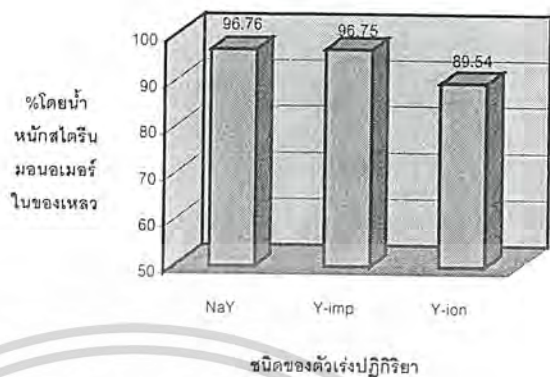
รูปที่ 4.23 แสดงผลเทอร์โมกราวิเมตริกของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

จากรูปที่ 4.23 พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมซีไอไลต์ Y ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการฝังตัวและวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากความแรงของเบสมีค่าเพิ่มขึ้นและเป็นที่มาของความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นด้วย ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจำพวกก๊าซเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนยังแสดงถึงความแรงของเบสที่เพิ่มขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แสดงผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีไอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

จากรูปที่ 4.24 พบว่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากกระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาจะมีปริมาณขึ้นอยู่กับความแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาเบส กล่าวคือเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยามีความแรงของเบสมาก ($\text{CsNaY-ion} > \text{CsNaY-imp} > \text{NaY}$) จะทำให้สามารถสลายพอลิสไตรีนให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซจะเพิ่มขึ้นเมื่อความแรงของเบสเพิ่มขึ้น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นพบว่าจะมีความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ลดลง เมื่อความแรงของตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แสดงปริมาณ โดยน้ำหนักสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

จากรูปที่ 4.25 พบว่า ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว จะมีความเฉพาะเจาะจงของสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวมากที่สุด เนื่องจากมีความแรงของเบสไม่มากนักและวิธีการฝังตัวจะได้ซีโอไลต์ที่มีซีเซียมไอออนอยู่ทั้งภายในและภายนอกของรูพรุน จึงมีโอกาสเกิดสไตรีนได้มาก

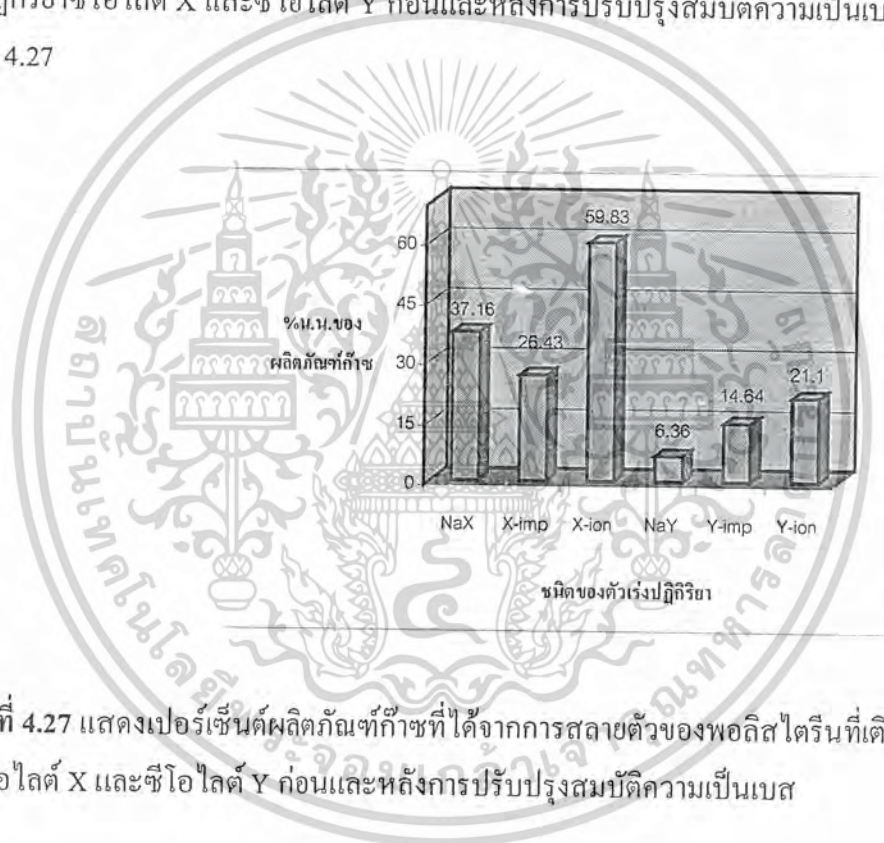
กรณีผลิตภัณฑ์สไตรีนในของเหลวที่ได้จากกระบวนการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจะได้สไตรีนปริมาณต่ำ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยามีความแรงของเบสและมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีความเฉพาะเจาะจงต่ำ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ α -methyl styrene ขึ้นเพราะตัวเร่งปฏิกิริยามีความแรงของเบสมาก จึงทำให้เกิดคาร์เบนไอออนที่ตำแหน่งที่เสถียรน้อยกว่าตำแหน่ง Benzylic ได้ ดังแสดงในรูป 4.26



รูปที่ 4.26 แสดงแนวทางการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เกิดเป็น α -methyl styrene

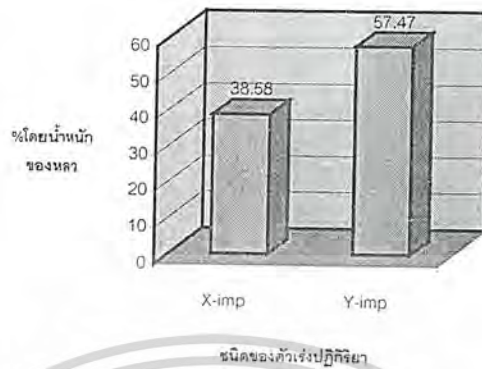
5. ผลของปริมาณ Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

ค่า Si/ Al ของซีโอไลต์มีผลต่อความแรงของเบสและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาโดยซีโอไลต์ที่มี Si/Al ต่ำจะมีความแรงของเบสและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามาก เนื่องจากอะลูมิเนียมมีความสามารถในการดึงอิเล็กตรอน (Electronegativity) ต่ำกว่าซิลิกอน จึงทำให้ framework ออกซิเจนมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมาก ซีโอไลต์ที่มีค่า Si/Al ต่ำจึงแสดงความเป็นเบสมากกว่าซีโอไลต์ที่มี Si/Al สูง ในการทดลองได้ทำการศึกษาซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y จากผลการทดลองแสดงเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

จากรูปพบว่าซีโอไลต์ X จะให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซมากกว่าซีโอไลต์ Y เนื่องจากมีค่า Si/ Al ต่ำ และมีความแรงของเบสมากกว่าซีโอไลต์ Y เป็นเหตุให้สามารถสลายพอลิสไตรีนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก แต่ซีโอไลต์ Y จะให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ของเหลวมากกว่าซีโอไลต์ X เนื่องจากมีค่า Si/Al สูงกว่าซีโอไลต์ X เล็กน้อยและความแรงของเบสไม่สูงนักทำให้สามารถสลายพอลิสไตรีนได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากกว่าก๊าซ ดังแสดงในรูปที่ 4.28

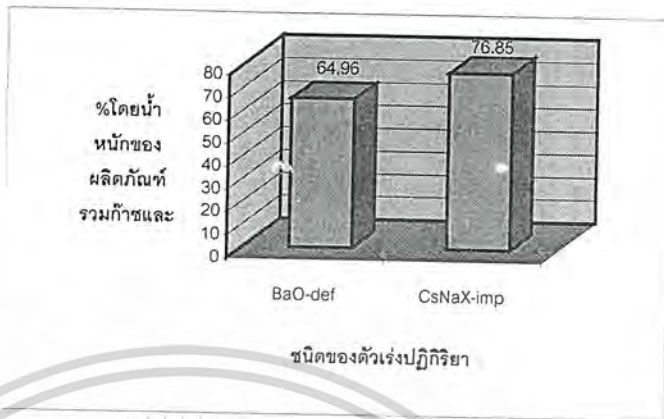


รูปที่ 4.28 แสดงเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว

เนื่องจากความเฉพาะเจาะจง (Selectivity) ของซีโอไลต์ X และ Y ใกล้เคียงกัน (ดังตารางที่ 4.1) จากรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว จะให้เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์โดยรวมน้อยกว่าในซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว เนื่องจากซีโอไลต์มีค่า Si/Al ต่ำ และเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสแล้วทำให้ซีโอไลต์ X มีความแรงของเบสมาก จึงมีความสามารถในการสลายตัวของพอลิสไตรีนดีเกินไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กๆ

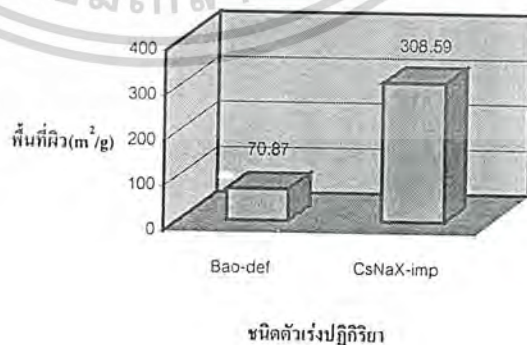
6. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์สไตรีน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด ในประเภทโลหะออกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุด ในประเภทตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ จึงนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพเพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของพอลิสไตรีนซึ่งผลแสดงได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์รวมของก๊าซและของเหลว

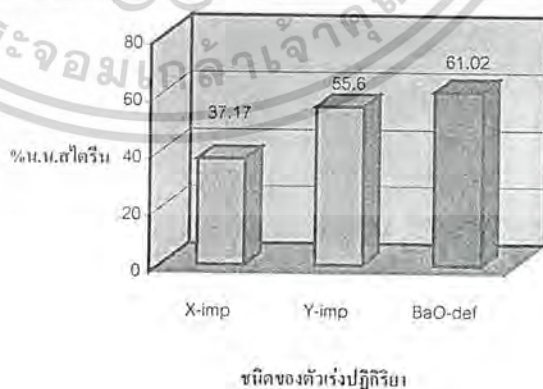
จากผลการทดลองจะเห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัวจะให้ปริมาณผลิตภัณฑ์รวมของก๊าซและของเหลวจากการสลายตัวของพอลิस्टาไดรีนมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส เนื่องจากซีโอไลต์ X มี Si/Al ต่ำ จึงมีปริมาณ basic site มาก เมื่อทำการฝังซีเชียมไอออน ลงไปในตำแหน่ง basic site มีผลให้ซีโอไลต์ X มีความแรงของเบสมากขึ้นและการมีรูพรุนมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.30 ดังนั้น โอกาสที่สารจะเข้าทำปฏิกิริยาตรงตำแหน่ง basic site จะมีมาก ทำให้สามารถเกิดการสลายตัวของพอลิस्टาไดรีนให้เป็นโมเลกุลเล็กๆได้ดี



รูปที่ 4.30 แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อพื้นที่ผิว

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัวไปเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส แสดงได้ดังรูปที่ 4.31 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวที่ได้จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่ทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X มีค่าน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ เนื่องจากซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการฝังตัวจะมีซีเซียมไอออนอยู่ทั้งภายในและภายนอกรูพรุน และมีขนาดรูพรุนจำกัด ความสามารถในการสลายตัวของพอลิสไตรีนได้ดีขึ้น จึงได้ผลิตภัณฑ์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก ดังนั้นควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดจำกัดและความแรงของเบสน้อยกว่าซีโอไลต์ X จะทำให้ความสามารถในการสลายตัวของพอลิสไตรีนดีขึ้น ดังจะเห็นได้จากการใช้ซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว ในรูปที่ 4.31 เนื่องจาก Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝังตัว มีความสามารถในการสลายตัวของพอลิสไตรีนพอเหมาะทำให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลว และมีความเฉพาะเจาะจงได้สไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวมาก

ถึงแม้ว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์จะมีความสามารถในการสลายพอลิสไตรีนน้อยกว่าซีโอไลต์ (X และ Y) ดังรูปที่ 4.29 แต่จะมีความสามารถในการเกิดสไตรีนมอนอเมอร์ได้มากกว่า แสดงดังรูปที่ 4.31 โดยเกิดผ่านกลไกการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิวภายนอก (External surface) นอกจากนี้ ยังสามารถนำแก๊สที่เกิดจากการสลายตัวของพอลิสไตรีนกลับมาสลายตัวด้วยแบเรียมออกไซด์เพื่อให้ได้สไตรีนมอนอเมอร์ใหม่ได้อีกด้วย



รูปที่ 4.31 แสดงชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์สไตรีนทั้งหมดที่ได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสลายตัวของพอลิเอสไตรีน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีสมบัติความเป็นเบส โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของพอลิเอสไตรีน ดังนี้

1. ผลของการไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C

พบว่า การสลายตัวของพอลิเอสไตรีนที่อุณหภูมิ 500 °C ให้ผลิตภัณฑ์รวม ก๊าซและของเหลว และผลิตภัณฑ์เอสไตรีนมอนอเมอร์ได้มากกว่าการสลายตัวของพอลิเอสไตรีนที่ 400 °C เพราะที่อุณหภูมิสูงปฏิกิริยาเกิดการแตกสลายได้ดี และเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ จึงทำให้มีความเฉพาะเจาะจงในผลิตภัณฑ์เอสไตรีนมอนอเมอร์

2. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ เพราะแบเรียมไอออนเป็นแคทไอออนที่มีความหนาแน่นของประจุ (Charge density) น้อยกว่าแมกนีเซียมไอออน และยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาจึงมีความเป็นเบสมากกว่า และแบเรียมออกไซด์ยังมีพื้นที่ผิวมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ และยังพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ให้ผลิตภัณฑ์เอสไตรีนมอนอเมอร์ใกล้เคียงกับแมกนีเซียมออกไซด์ เพราะมีกลไกการสลายตัวของพอลิเอสไตรีนที่พื้นที่ผิวภายนอก (External surface) เหมือนกัน

3. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

พบว่าแบเรียมออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสให้ผลิตภัณฑ์เอสไตรีนมอนอเมอร์มีค่ามากขึ้นเล็กน้อยหรือใกล้เคียงกัน เพราะเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสของแบเรียมออกไซด์ โครงสร้างไม่มีการเปลี่ยนแปลงซึ่งดูได้จากผลจากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ทำให้พื้นที่ผิวของแบเรียมออกไซด์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่แมกนีเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสให้ผลิตภัณฑ์รวมก๊าซและของเหลวมากกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ แต่ให้ผลิตภัณฑ์เอสไตรีนมอนอเมอร์น้อยกว่าแมกนีเซียมออกไซด์ เพราะเมื่อให้ความร้อนแก่แมกนีเซียมออกไซด์โครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และพบว่าพื้นที่ผิวของแมกนีเซียม

ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์ที่เหมาะสมแก่การสลายตัวของพอลิสไตรีนคือแบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

4. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ก่อนและหลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ก๊าซมากเรียงตามลำดับดังนี้ $CsNaY-ion > CsNaY-imp$ เพราะตัวเร่งปฏิกิริยา $CsNaY-ion$ มีความแรงของเบสมากที่สุด และตัวเร่งปฏิกิริยา NaY และ $CsNaY-imp$ ให้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมากพอๆกัน แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา $CsNaY-ion$ ให้ผลิตภัณฑ์สไตรีนน้อยที่สุด เพราะมีความแรงของเบสมากเกินไป

5. ผลของปริมาณ Si/Al ของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ให้พอลิสไตรีนก๊าซมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y แต่ให้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์ในของเหลวน้อยกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y เพราะตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ซึ่งมีปริมาณ Si/Al ต่ำ จะมีความแรงของเบสมาก ทำให้สามารถสลายพอลิสไตรีนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์ ควรเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y

6. ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะออกไซด์และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์สไตรีน

พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสให้ผลิตภัณฑ์สไตรีนมอนอเมอร์มากที่สุด โดยกลไกปฏิกิริยาเกิดผ่านพื้นที่ผิวภายนอก (External surface) และตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์สามารถสลายพอลิสไตรีนได้โมเลกุลขนาดเล็ก ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสจึงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการสลายตัวพอลิสไตรีน เพื่อให้ได้สไตรีนมอนอเมอร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อการสลายตัวของพอลิสไตรีน
2. ควรทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสลายตัวของพอลิสไตรีน
3. ควรทำการศึกษาปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต่อการสลายตัวของพอลิสไตรีน



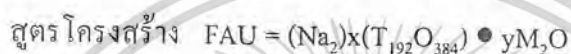
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การคำนวณ

- วิธีการคำนวณปริมาณซีเซียม (Cs^+) ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน

- ซีโอไลต์ X (จาก Aldrich Chemical Company, inc : Si/Al = 1)



โดย $T = Si/Al$

หาปริมาณ Al

จากความสัมพันธ์ $Si + Al = 192$ สมการ(1)

$Si/Al = 1$ สมการ(2)

สมการ(2) แทนในสมการ (1)

$$Al + Al = 192$$

$$Al = 96 \text{ อะตอม}$$

ดังนั้น FAU มีสูตรทั่วไปคือ $96Na \cdot 96Si \cdot 96Al \cdot 384O$

หาปริมาณ Cs^+

$$CsX \text{ 1 mol} = \text{น้ำหนัก Si} + \text{น้ำหนัก Al} + \text{น้ำหนัก Cs} + \text{น้ำหนัก O}$$

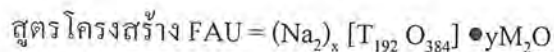
$$= (96 \times 28) + (96 \times 27) + (96 \times 133) + (384 \times 16)$$

$$= 28192 \text{ กรัม}$$

$$CsX \quad 28192 \text{ กรัม} \quad \text{ใช้ } Cs^+ \quad 96 \times 133 \text{ กรัม}$$

$$CsX \quad 1 \text{ กรัม} \quad \text{ใช้ } Cs^+ \quad \frac{(96 \times 133 \times 1)}{28192} = 0.5287 \text{ กรัม}$$

- ซีโอไลต์ Y (จากโครงการพิเศษเรื่องกระบวนการไอโซเมอร์ไรเซชันของเมทาไซลีน
ปีการศึกษา 2542 ซึ่งมี Si/Al เท่ากับ 2.4)



โดย $T = \text{Si} + \text{Al}$

หาปริมาณ Al

จากความสัมพันธ์

$\text{Si} + \text{Al} = 192$ สมการ (3)

$\text{Si}/\text{Al} = 2.4$ สมการ (4)

แทนสมการ (4) ในสมการ (3)

$2.4 \text{Al} + \text{Al} = 192$

$\text{Al} = \frac{192}{3.4} = 57 \text{ อะตอม}$

ดังนั้น FAU มีสูตรทั่วไปคือ $57 \text{Na} \cdot 135 \text{Si} \cdot 57 \text{Al} \cdot 384 \text{O}$

หาปริมาณ Cs

$\text{CsY} \quad 1 \text{ mol} = \text{น้ำหนัก Si} + \text{น้ำหนัก Al} + \text{น้ำหนัก Cs} + \text{น้ำหนัก O}$

$= (135 \times 28) + (57 \times 27) + (57 \times 133) + (384 \times 16)$

$= 19,044 \text{ กรัม}$

$\text{CsY} \quad 19,044 \text{ กรัม} \quad \text{ใช้ Cs}^+ \quad 57 \times 133 \text{ กรัม}$

$\text{CsY} \quad 1 \text{ กรัม} \quad \text{ใช้ Cs}^+ \quad \frac{57 \times 133 \times 1}{19,044} = 0.3980 \text{ กรัม}$

19,044

• ตัวอย่างการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ โดยใช้ NaX เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

น้ำหนักก่อนทำปฏิกิริยา (Reaction)

Reactor แก้ว (1) (ใส่สารตั้งต้น)	83.0800 กรัม
Reactor แก้ว (2) (สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์)	84.9527 กรัม
ชุก Reactor แก้ว (ของ Reactor แก้ว (1))	31.2096 กรัม
ขวดขวดทองแดง	79.1621 กรัม
พอลิสไตรีน + NaX (PS 0.8079 กรัม, NaX 0.2019 กรัม)	1.0098 กรัม
ขวดรูปชมพู่	66.4633 กรัม
กระดาษกรอง	0.3381 กรัม
น้ำหนักหลังทำปฏิกิริยา (Reaction)	
Reactor แก้ว (ใส่สารตั้งต้น)	83.3214 กรัม
Reactor แก้ว (สำหรับเก็บผลิตภัณฑ์)	85.2036 กรัม
ชุก Reactor แก้ว (ของ Reactor แก้ว (1))	31.2943 กรัม
ขวดขวดทองแดง	79.2997 กรัม
ขวดรูปชมพู่ + แวกซ์ (Wax)	66.4943 กรัม
กระดาษกรอง + NaX + โถก (Coke)	0.5435 กรัม

วิธีคำนวณหาน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้

1) น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลว = $85.2036 - 84.9527 = 0.2509$ กรัม

2) น้ำหนัก แวกซ์

- น้ำหนัก แวกซ์บนขวดลวด = $79.997 - 79.1621 = 0.1376$ กรัม

- น้ำหนักแวกซ์บน Reactor แก้ว (ใส่สารตั้งต้น) = $66.4943 - 66.4633 = 0.0310$ กรัม

- น้ำหนัก แวกซ์บนจุก Reactor แก้ว (ของ Reactor แก้ว (1)) = $31.2943 - 31.2096 = 0.0847$ กรัม

รวมน้ำหนัก แวกซ์ ทั้งหมด = $0.1376 + 0.0310 + 0.0847 = 0.2533$ กรัม

3) น้ำหนักโค้ก = $0.5435 - 0.2019 - 0.3381 = 0.0035$ กรัม

4) น้ำหนักก๊าซ (Gas) = $0.8079 - 0.2509 - 0.2533 - 0.0035 = 0.3002$ กรัม

คำนวณเปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้

$$\% \text{ น้ำหนักผลิตภัณฑ์} = \frac{\text{ชนิดของผลิตภัณฑ์}}{\text{นน.สารตัวอย่าง}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณ % น้ำหนักผลิตภัณฑ์ของเหลว = $\frac{0.2509}{0.8079} \times 100 = 31.06 \%$

● การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ Selectivity

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่าง} \times \% \text{นน.ของสารมาตรฐาน}}{\text{พื้นที่ใต้พีคของสารมาตรฐาน}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ %Selectivity ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ CsNaX-ion เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

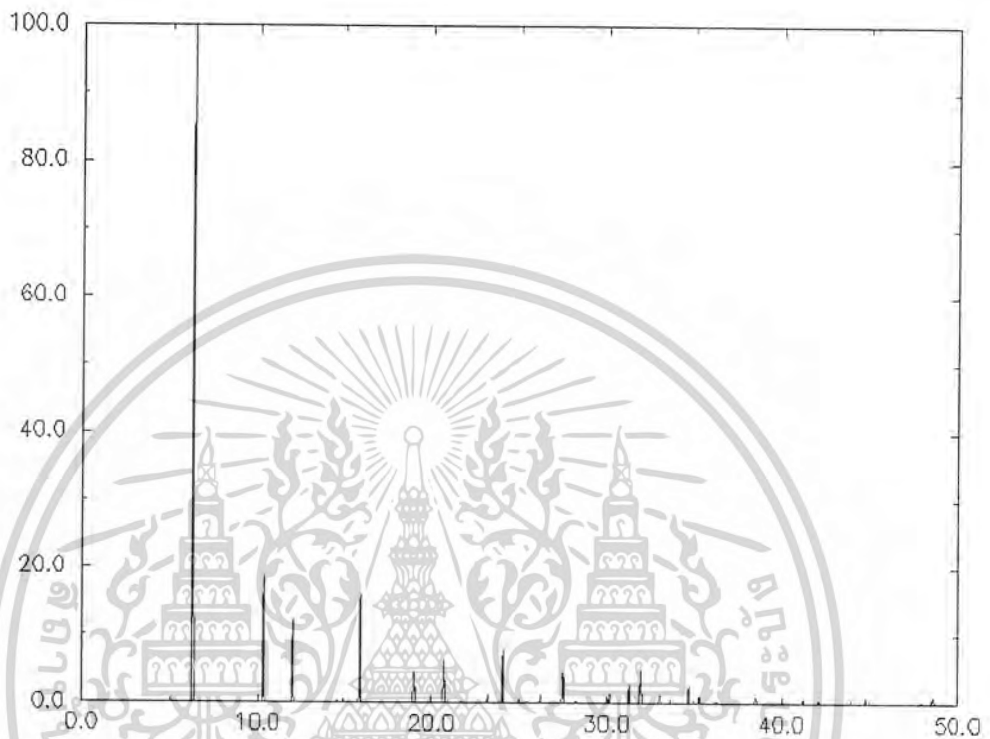
$$\% \text{Selectivity ของ Styrene} = \frac{87.31 \times 89.4763}{89.62} = 87.17 \%$$

ภาคผนวก ข

แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนมาตรฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา



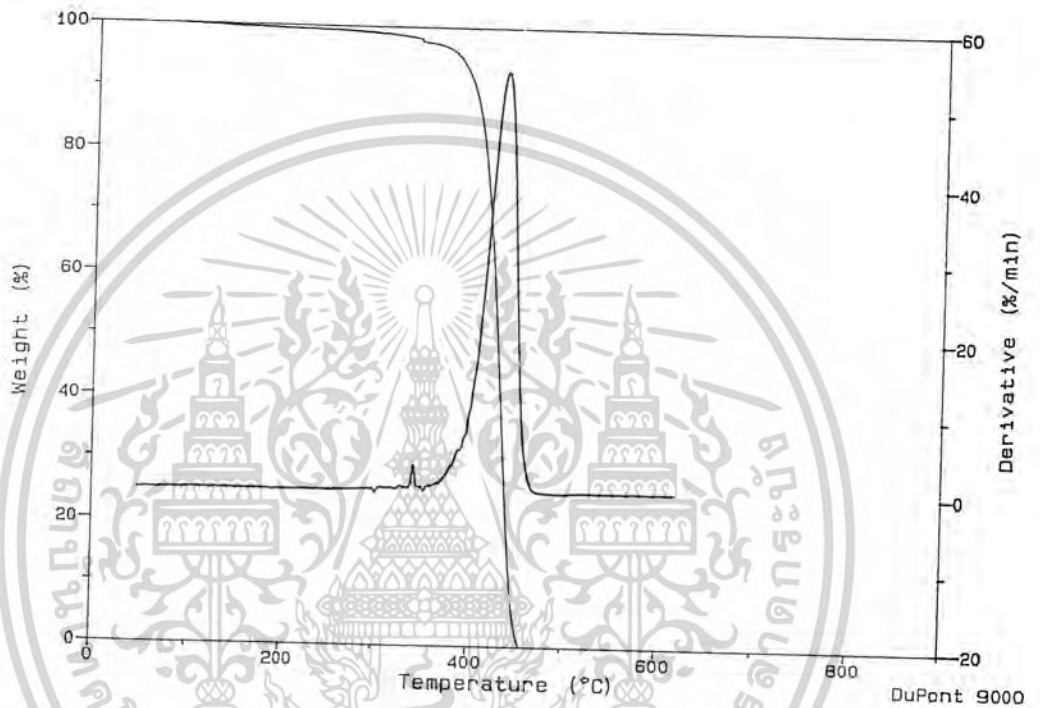
รูปที่ 1ข แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ X



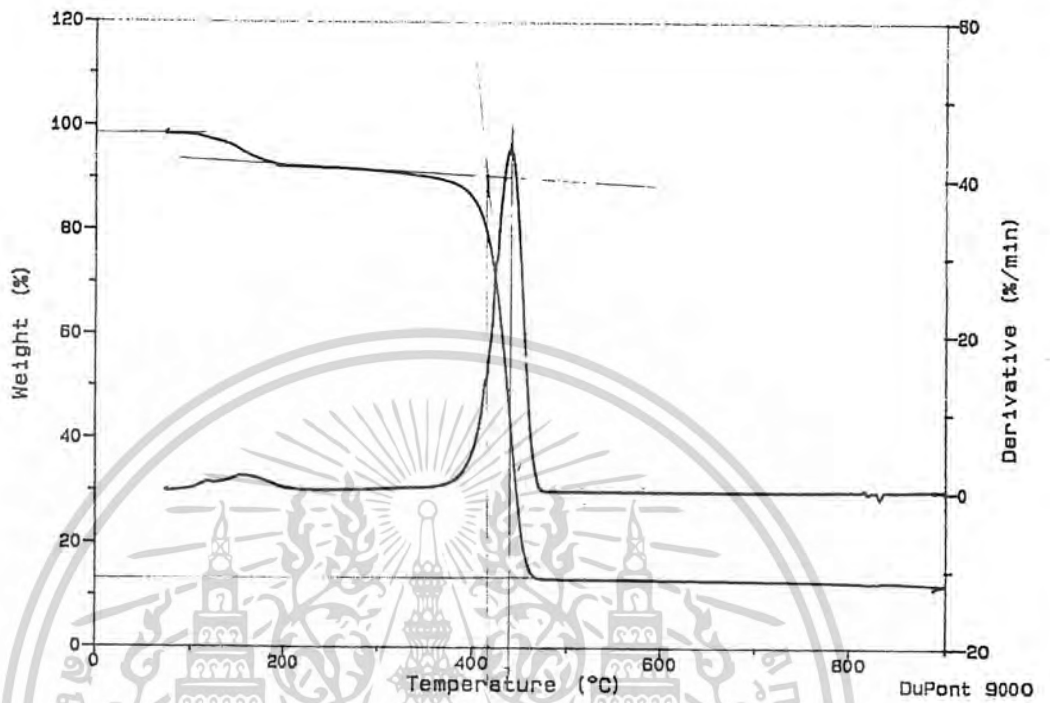
รูปที่ 2 ข แสดงรูปแบบการเกี่ยวเบนรังสีเอ็กซ์มาตรฐานของซีโอไลต์ Y

ภาคผนวก ค

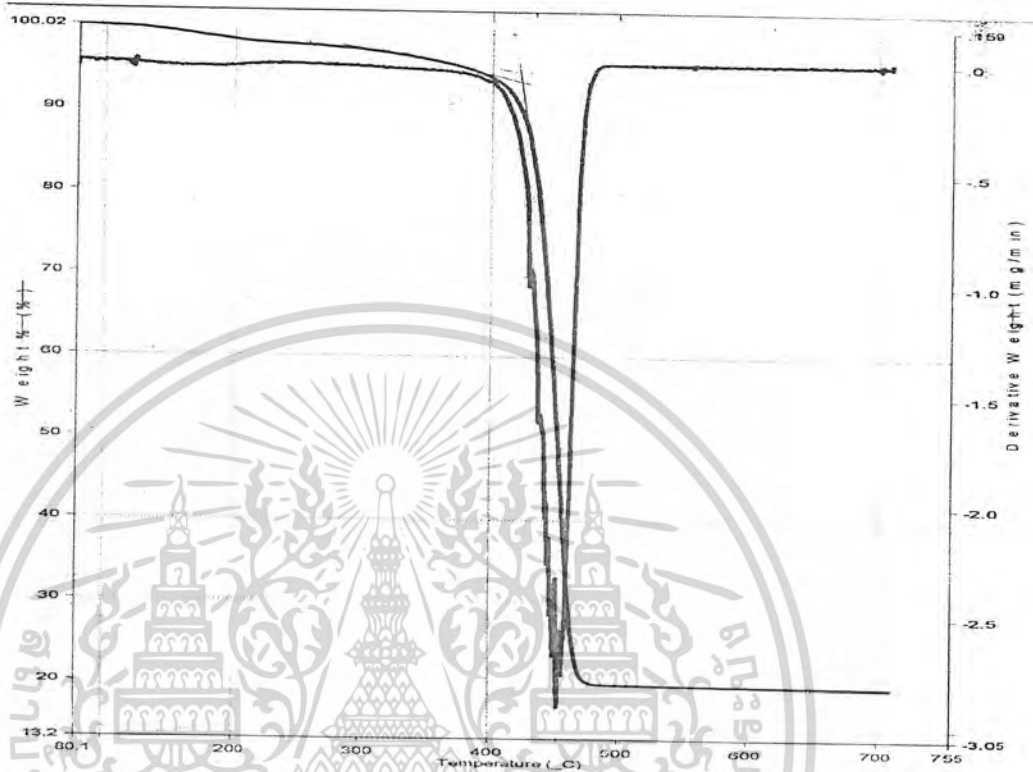
แสดงเทอร์โมแกรมจากเครื่อง Thermogravimetric Analyzer



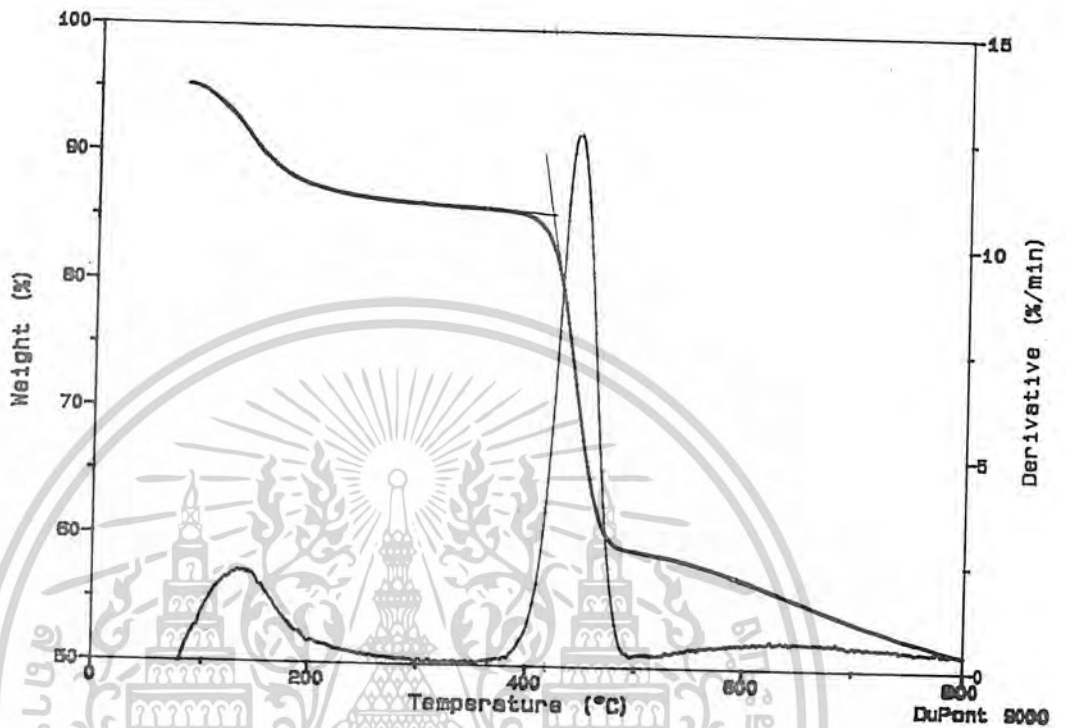
รูปที่ 1ค แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิสไตรีนที่ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา



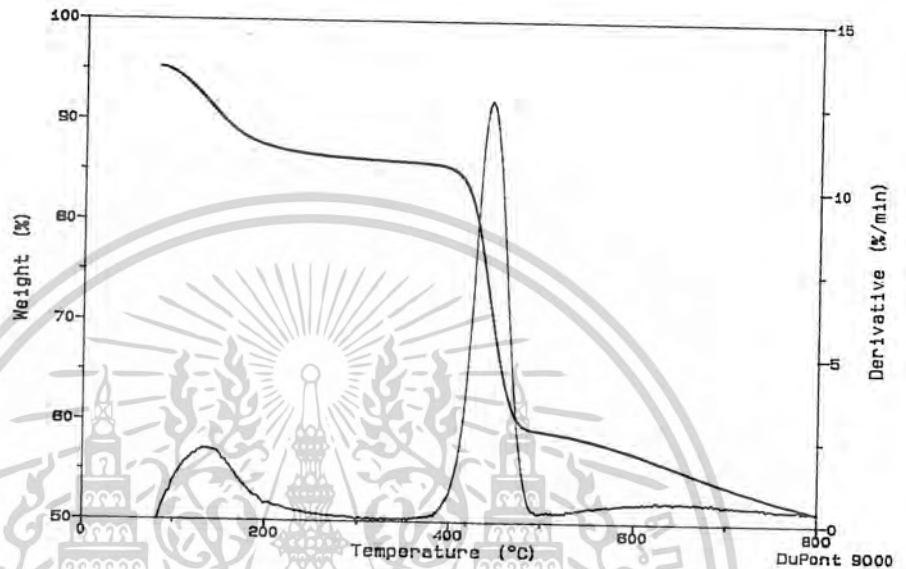
รูปที่ 2 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิस्टาไร์นที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์



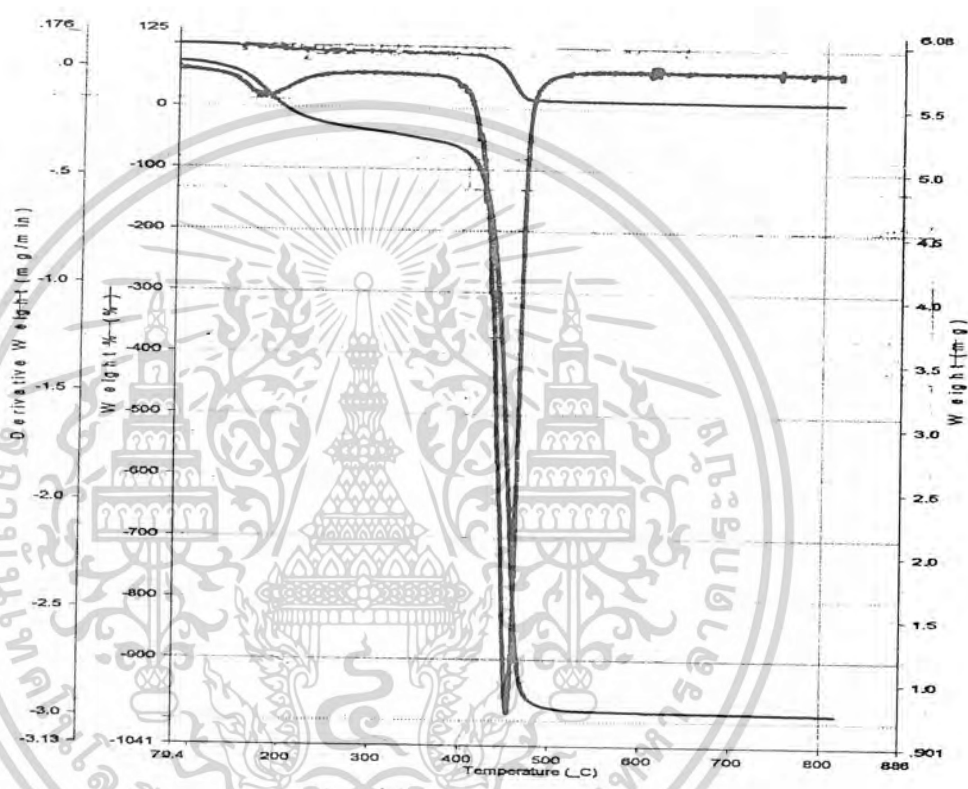
รูปที่ 3 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิस्टาไดรีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเบเรียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติให้มีความเป็นเบส



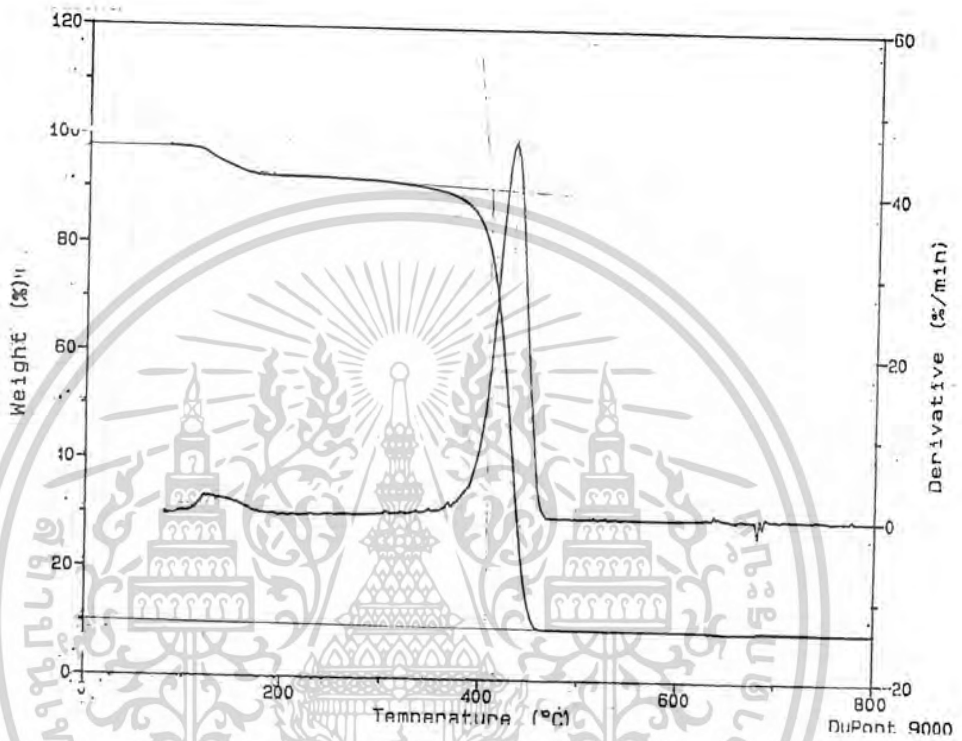
รูปที่ 4ค แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างโพลิสไตรีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์



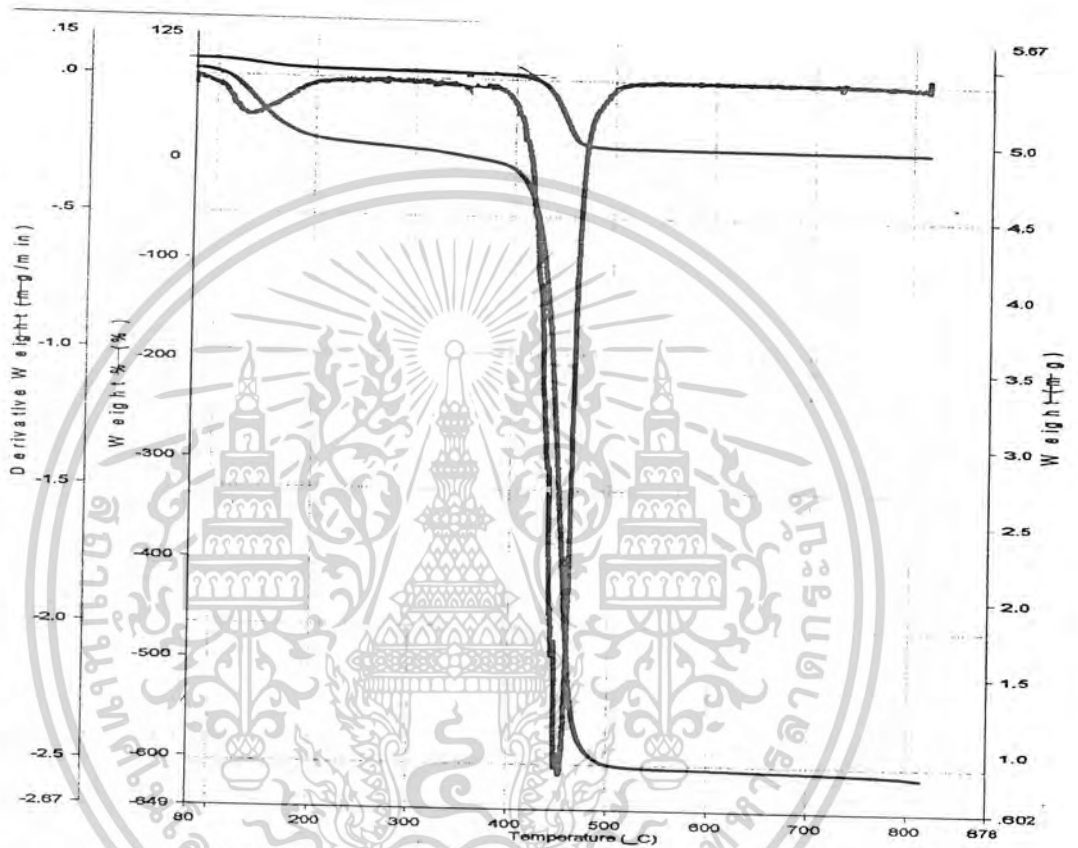
รูปที่ 5 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิस्टาไดรีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส



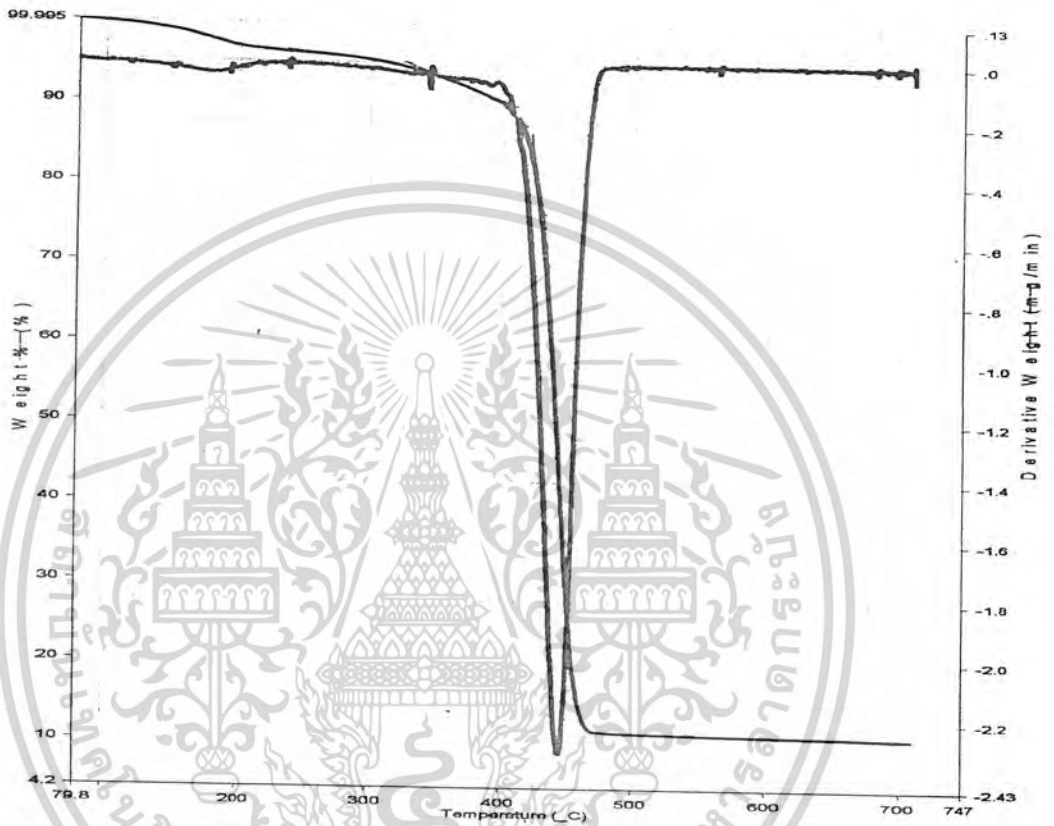
รูปที่ ๓ แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิเอทิลีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X



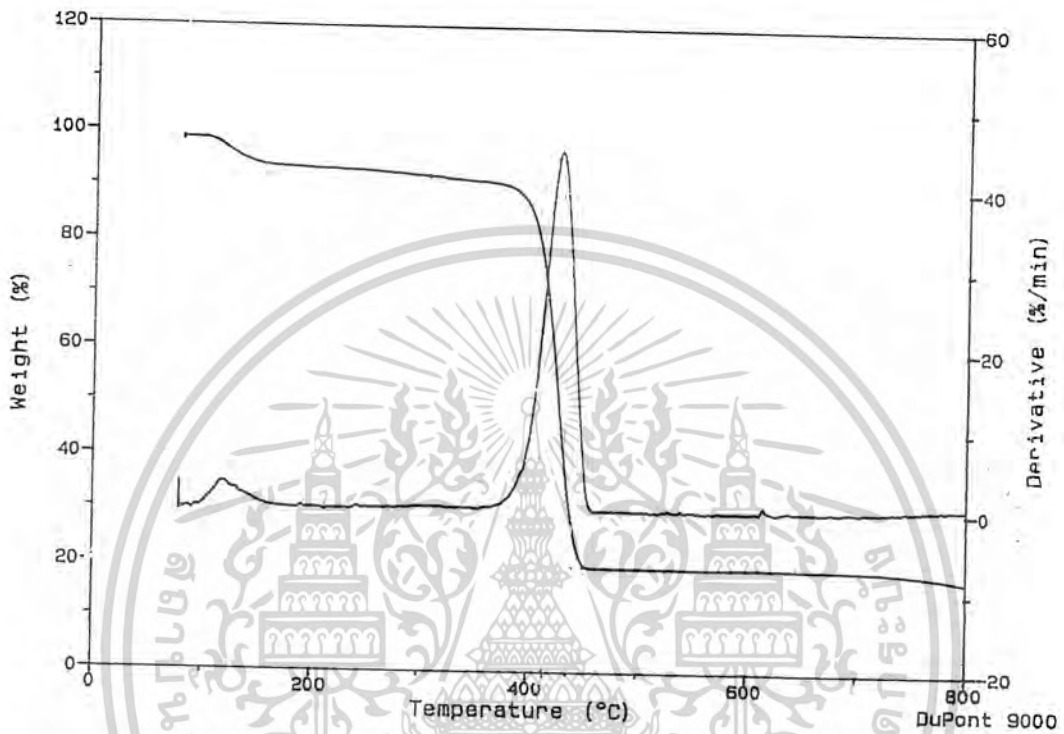
รูปที่ 7ค แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิस्टาไดรีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝัง (Impregnation)



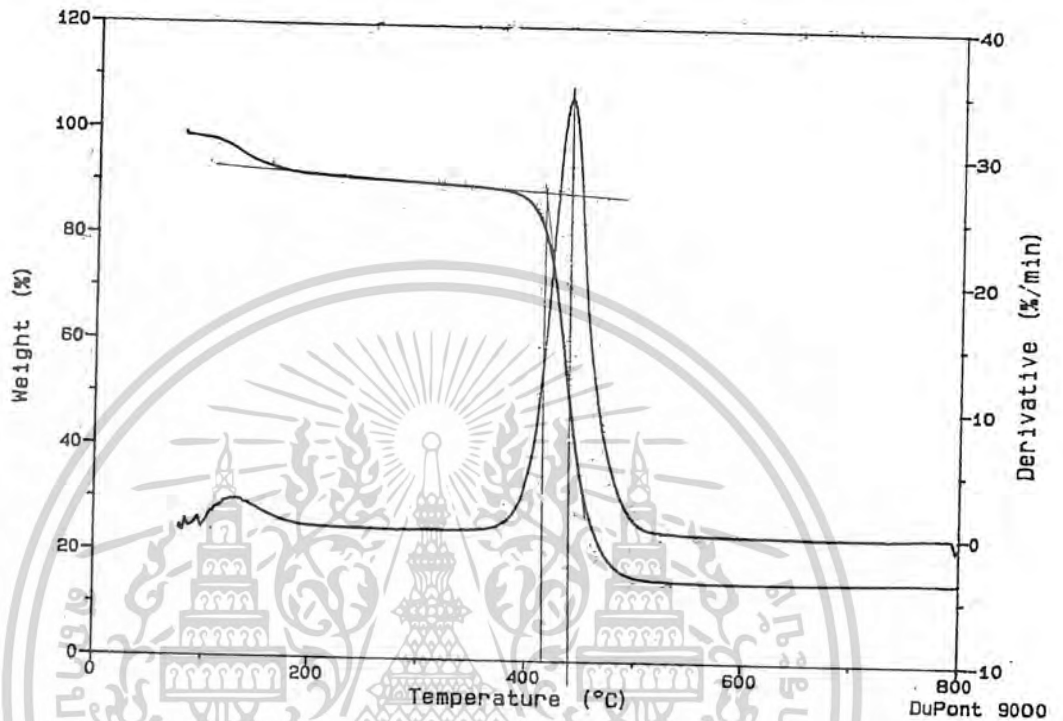
รูปที่ 8ค แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิเอทิลีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X ชนิดผง ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ionexchange)



รูปที่ 9ค แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิस्टาไครินที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y



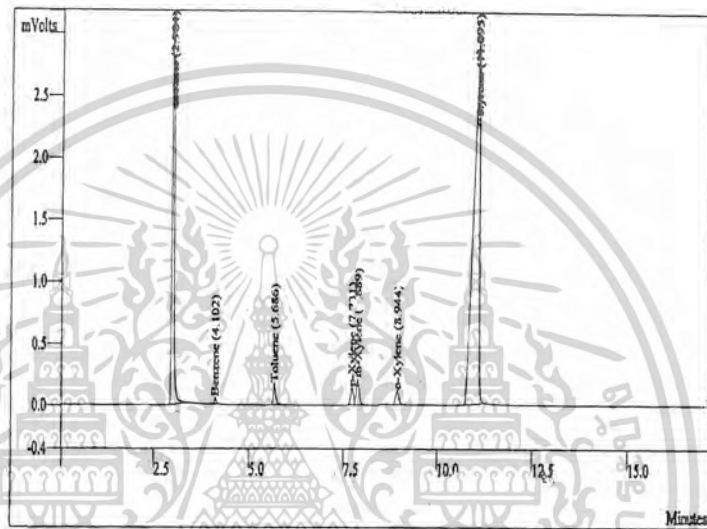
รูปที่ 10ค แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิเอทิลีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสโดยวิธีการฝัง (Impregnation)



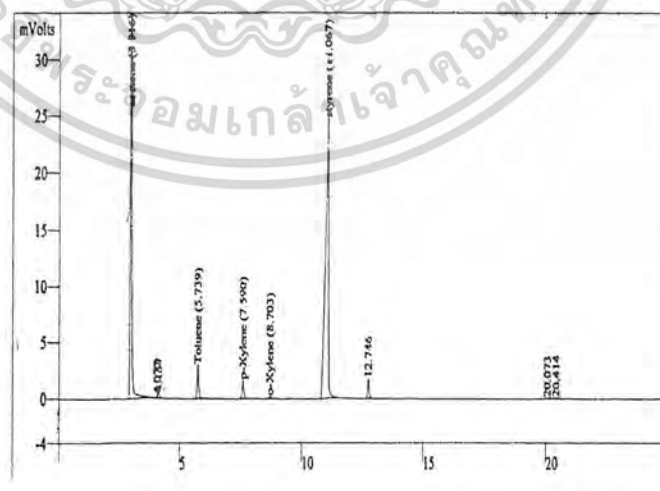
รูปที่ 11 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่างพอลิस्टาไดรีนที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y ที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ionexchange)

ภาคผนวก ง

ผลการวิจัยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatographer)

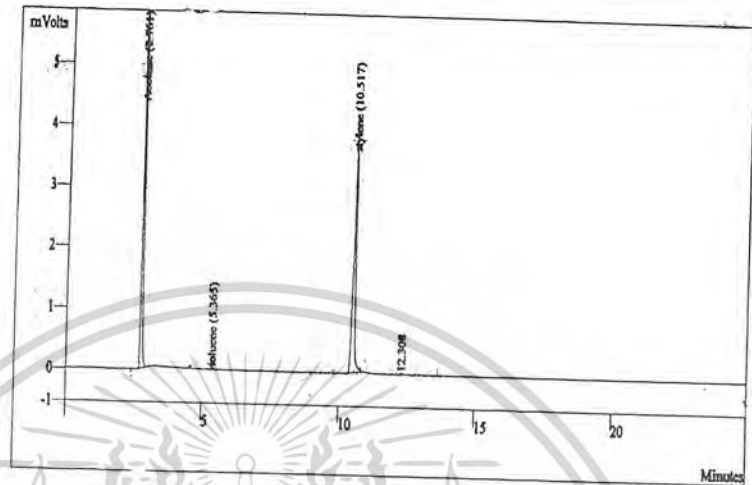


รูปที่ 1ง แสดง โครมาโทแกรมสารมาตรฐานของเหลว

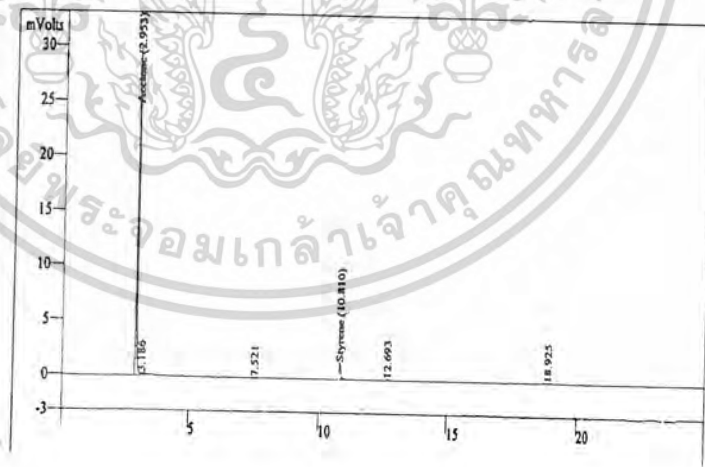


รูปที่ 2ง แสดง โครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิสไตรีน ที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 400 °C

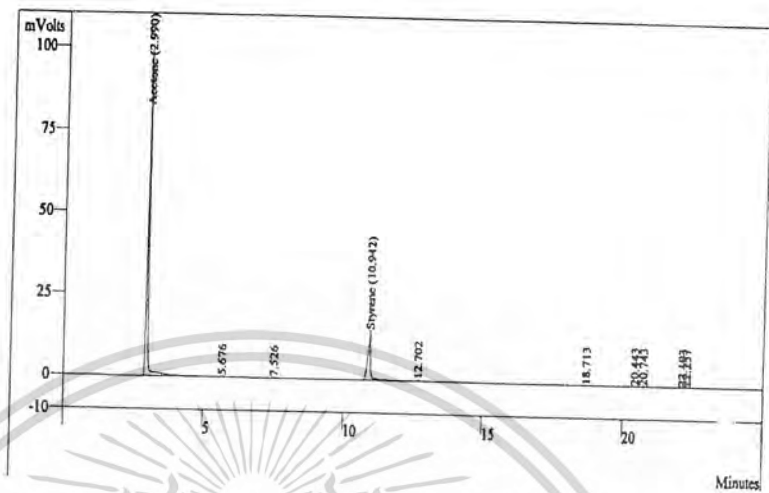
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



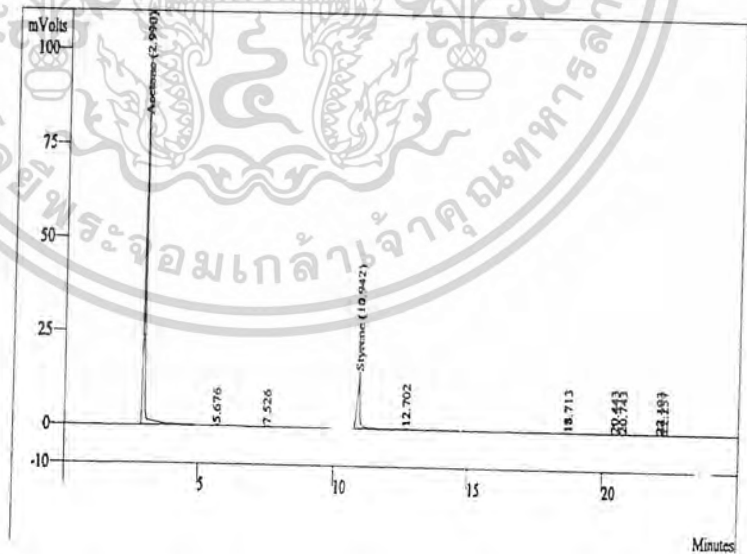
รูปที่ 3 แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่ไม่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 500 °C



รูปที่ 4 แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X



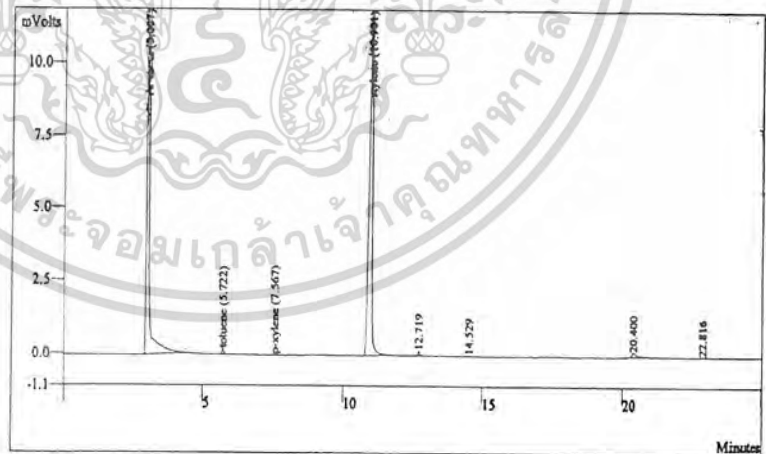
รูปที่ 5ง แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิไธไดรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสด้วยวิธีการฝังตัว



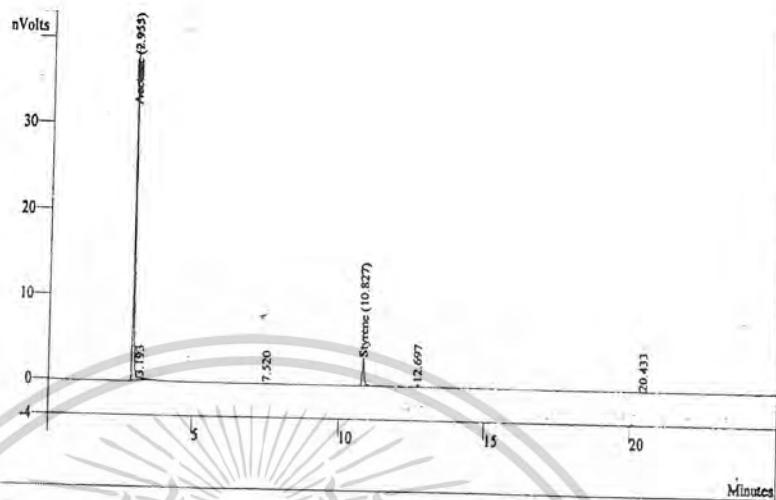
รูปที่ 6ง แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิไธไดรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ X โดยผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน



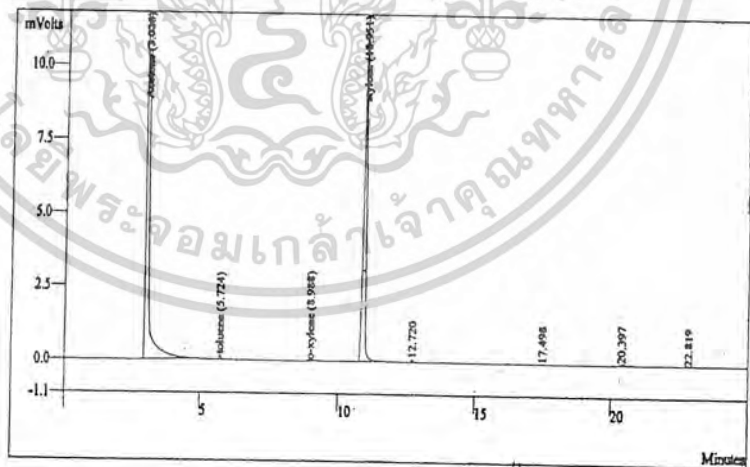
รูปที่ 7ง แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิस्टไทรินที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y



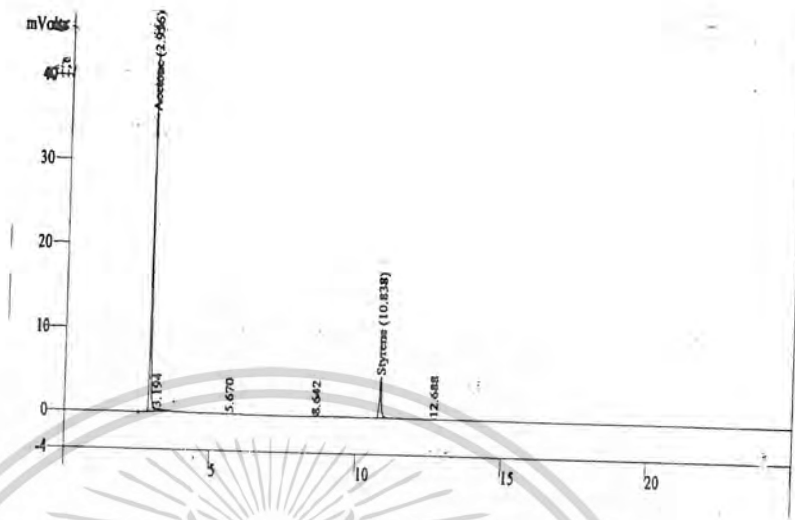
รูปที่ 8ง แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิस्टไทรินที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y โดยผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสด้วยวิธีการฝังตัว



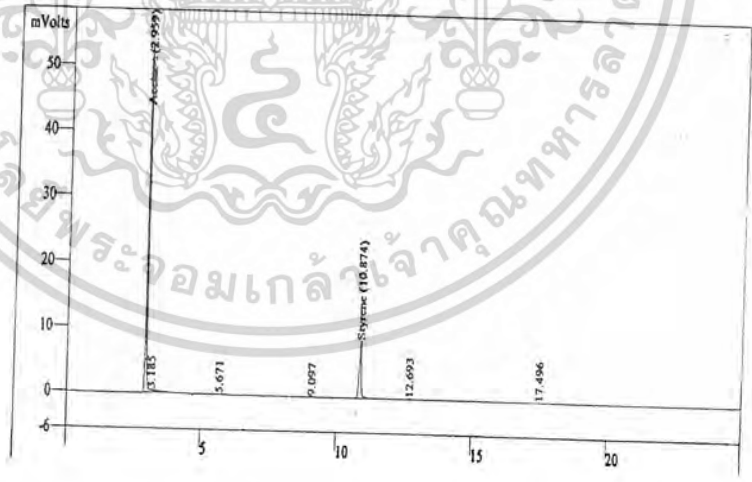
รูปที่ 9 แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ Y โดยผ่านการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบสด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน



รูปที่ 10 แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์



รูปที่ 11ง แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิस्टาโรนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาแบเรียมออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส



รูปที่ 12ง แสดงโครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิस्टาโรนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์



รูปที่ 13 แสดง โครมาโทแกรมของสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของพอลิสไตรีนที่เติมตัวเร่งปฏิกิริยาแมกนีเซียมออกไซด์หลังการปรับปรุงสมบัติความเป็นเบส

เอกสารอ้างอิง

1. Dyer, A., *An Introductoion to Zeolite Molecular Sieves*, Wiley, New York, 1998
2. สิริินทร์ ศรีสุดาวัธ, สุริย์พร อุตเจริญ และอภิชัย ชาญพานิชย์การ, การสลายตัวทางความร้อนของพอลิเอทีลีนชนิดความหนาแน่นสูงโดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา, โครงการงานพิเศษ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541
3. Lin, R. and White, L.R., Acid-Catalyzed Cracking of Polystyrene, *Acid-Catalyzed Cracking of Pol (styrene)*, 1996, 1287-1298
4. Zhang, Z.; Ohkita, H. and Okada, M., Chemical Recycling of Polystyrene into Styrene over Solid Acides and Bases, *Industial Engineer Chemical Research*, 34, 1995, 4514-4519
5. Woo, O.,H.; Ayala, N. and Broadbelt, L., J., Mechanistic Interpretation of Base-Catalyzed Depolymerization of Polystyrene, *Catalysis Today*, 55, 2000, 161-171