สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมซีโอไลต์ที่มีสมบัติพาราแมกเนติก เพื่อใช้สำหรับการแยกอากาศ

กนกวรรณ ทิพย์อรัญ
วิชญวรรต รณวิชญ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43885
วัน, เดือน, ปี 17 ต.ค. 2545

.b.....
.i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีอุตสาหกรรม
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation of Paramagnetic Zeolites for Gas Separation

Kanokwan Tip-a-run
Witchayawat Ronnawit

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 2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การเตรียมซีโอไลต์ที่มีสมบัติความเป็นพาราแมกเนติก เพื่อใช้สำหรับการแยกอากาศ
โดย	นางสาวกนกวรรณ ทิพย์อรัญ
	นายวิชญวรรต รณวิชญ
ภาควิชา	เคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงงานพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

(ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย) หัวหน้าภาค

คณะกรรมการโครงงานพิเศษ

(ดร. วันฉัตร ชื่นชม) ประธานกรรมการ

(อ.นพพร สงค์อิ่ม) กรรมการ

(ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย) กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การเตรียมซีโอไลต์ที่มีสมบัติพาราแมกเนติก เพื่อใช้สำหรับการแยกอากาศ
นักศึกษา	นางสาวกนกวรรณ ทิพย์อรัญ นายวิชญวรรต รณวิชญ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2544

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X โดยบรรจุโลหะทรานซิชันชนิดต่างๆ ได้แก่ Fe^{3+} Cr^{3+} Co^{2+} และ Mn^{2+} ด้วยวิธีการฝังตัว (Impregnation) และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) พบว่า การปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการฝังตัว โลหะไอออนเกิดเป็นโลหะออกไซด์บนผิวหรือในรูพรุนของซีโอไลต์ ในขณะที่การปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โลหะไอออนอาจอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ในรูป Exchangeable Cation

ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย Fe^{3+}และ Cr^{3+} โดยวิธีการฝังตัว ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย Co^{2+} และ Mn^{2+} และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย Mn^{2+} โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีขึ้น และพบว่า ซีโอไลต์ที่แคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจนจะสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้มากกว่าซีโอไลต์ที่แคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง โดยการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ทำให้โลหะทรานซิชันมีเลขออกซิเดชันสูงขึ้น เป็นผลให้ Active Site เกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดี ดังนั้นการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ที่ปรับปรุงสมบัติ โดยไม่ทำการแคลไซน์ จึงเป็นการดูดซับแบบเคมี (Chemisorption) ส่วนการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ที่แคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้งเป็นการดูดซับแบบกายภาพ (Physisorption) เมื่อทำการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ที่ปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน ด้วยชุดทดสอบการดูดซับ พบว่าความสามารถในการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจน โดยซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย Co^{2+} และ Mn^{2+} สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 30 Bed Volume ซึ่งดีกว่า ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ก่อนการปรับปรุงสมบัติซึ่งสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 6 และ 10 Bed Volume ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Preparation of Paramagnetic Zeolite for Gas Separation
Student	Ms. Kanokwan Tip-a-run
	Mr. Witchayawat Ronnawit
Special Project Advisor	Assist.Prof.Dr. Tawan Sooknoi
Department	Chemistry
Academic Year	2001

Abstract

The paramagnetic properties of zeolite A and zeolite X were improved by incorporating transition metals e.g. Fe^{3+}, Cr^{3+}, Co^{2+} and Mn^{2+} for separation of oxygen from air. Impregnation and ion exchange were employed for this purpose. It was believed that the metal oxided were formed at the surface or in the pore of the zeolites when impregnation was used for modification. However, the incorporated metal ions were presumably present in the framework as exchangeable cations when the ion exchange was carried out.

Fe^{3+} and Cr^{3+} impregnated zeolite X, Co^{2+} and Mn^{2+} exchanged zeolite A and Mn^{2+} exchanged zeolite X showed an improved oxygen adsorption. Furthermore, the effect of calcination was investigated. Modified zeolites, calcined under nitrogen, provided a better oxygen absorption, as compared to those calcined under air. It was assumed that modified zeolites can adsorb oxygen and the loaded metal can be oxidized. Therefore the adsorption of oxygen on as-modified zeolites can be regarded as chemisorption, whilst physisorption can be observed on the zeolites, previously calcined in air. In addition, it was found from the adsorption testing on a packed column that Co^{2+}, Mn^{2+} exchanged zeolite A can provide about 30 bed volume of oxygen adsorption. This is better than the original zeolite A and zeolite X which give only 6 and 10 bed volume of oxygen adsorption, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย เป็นอย่างสูง สำหรับการเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในโครงงานนี้ ขอขอบพระคุณสำหรับคำแนะนำต่างๆ ที่อาจารย์มีให้เสมอมา และขอบพระคุณสำหรับการสนับสนุนต่างๆที่ส่งผลให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

ขอขอบพระคุณ ดร.วันฉัตร ชื่นชม และ อาจารย์นพพร สงค์อิ่ม คณะกรรมการที่ช่วยตรวจทานแก้ไข โครงงานฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสำหรับอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านสำหรับคำแนะนำและความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่คอยสนับสนุนการเรียน จนสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆปริญญาโท (พี่เต พี่เก๋ พี่นก พี่กุ๊ก พี่สิ่ว) ที่ให้คำแนะนำในทุกๆเรื่อง รวมทั้งช่วยเหลือในทุกๆด้าน

และสุดท้ายขอขอบคุณ เพื่อนๆ รุ่นพี่ และ รุ่นน้องที่คอยช่วยเหลือ ให้กำลังใจและคอยถามไถ่จนทำให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสาวกนกวรรณ ทิพย์อรัญ

นายวิชญวรรต รณวิชญ

มีนาคม 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ง
สารบัญรูป	จ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ความเป็นมาของซีโอไลต์	4
2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์	4
2.3 ช่องว่างภายในโครงสร้างของซีโอไลต์	6
2.4 สมบัติของซีโอไลต์	6
2.5 ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานซีโอไลต์	9
2.6 ซีโอไลต์ที่ใช้ในงานวิจัย	10
2.7 สมบัติพาราแมกเนติก	12
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้	15
3.2 สารเคมี	16
3.3 วิธีทดลอง	16
3.3.1 การเตรียมซีโอไลต์ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติก	16
3.3.2 การปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยโลหะทรานซิชัน	17
3.3.2.1 วิธีการฝังตัว(Impregnation)	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.3.2.2 วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน(Ion Exchange) 17

3.3.3 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์ 18

3.3.3.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของซีโอไลต์โดยเทคนิคการเลี้ยว เบนรังสีเอกซ์(X-Ray Diffraction) 18

3.3.3.2 การตรวจสอบหาปริมาณโลหะบนซีโอไลต์โดยเทคนิคเอกซ์เรย์ ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy) 19

3.3.3.3 การตรวจสอบหาพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ด้วยเครื่องทดสอบการดูดซับก๊าซ ของของแข็ง 19

3.3.3.4 การตรวจสอบหาไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน 20

3.4 การทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศโดยการใช้ เทคนิคก๊าซโครมาโทรกราฟฟี(Gas Chromatography) 21

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์

4.1 ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ใช้ในการทดลอง 25

4.2 อิทธิพลของโลหะที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

4.2.1 เหล็กไอออน 28

4.2.2 โครเมียมไอออน 33

4.2.3 โคบอลต์ไอออน 38

4.2.4 แมงกานีสไอออน 44

4.3 อิทธิพลของวิธีการในการปรับปรุงสมบัติที่มีต่อความสามารถในการดูดซับ ก๊าซออกซิเจน

4.3.1 อิทธิพลของวิธีการปรับปรุงสมบัติที่มีต่อโครงสร้างของซีโอไลต์ 50

4.3.2 อิทธิพลของวิธีการปรับปรุงสมบัติที่มีต่อ Active Site ของซีโอไลต์ 51

4.4 อิทธิพลของการแคลไซน์ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน 53

4.5 การทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 75

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม 80

การคำนวณหา Bed Volume 81

ภาคผนวก ข

ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิว สีที่สังเกตุเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมและปริมาณโลหะของกลุ่มตัวอย่างซีโอไลต์ A 82

ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิว สีที่สังเกตุเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมและปริมาณโลหะของกลุ่มตัวอย่างซีโอไลต์ A 83

ตารางแสดงปริมาตรของซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดสอบการแยกอากาศของซีโอไลต์ A 84

ตารางแสดงปริมาตรของซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดสอบการแยกอากาศของซีโอไลต์ X 84

ภาคผนวก ค

ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงด้วยโลหะไอออนโดยวิธีการฝังตัวและวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน 85

ภาคผนวก ง

รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงด้วยโลหะไอออนโดยวิธีการฝังตัวและวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน 105

ภาคผนวก จ

รูปแสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงด้วยโลหะไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน 127

เอกสารอ้างอิง 132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบหาพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ 20

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบหาไอโซเทอมของการดูดซับของซีโอไลต์ 21

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออน 31

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออน 32

ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออน 37

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน 39

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงสีของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออนโดยวิธีการฝังตัว 53

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ไนโตรเจนและไม่แคลไซน์ 56

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ไนโตรเจนและไม่แคลไซน์ 58

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ไนโตรเจนและไม่แคลไซน์ 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปแสดงโครงสร้างปฐมภูมิ(Primary building unit) ของ[SiO_4^{-4}] และ [$Al_2O_3^{-5}$] 5

รูปที่ 2.2 รูปแสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ เมื่อมีการเชื่อมโยงของ Primary building unit 5

รูปที่ 2.3 รูปแสดงลักษณะความเฉพาะเจาะจงของสารตั้งต้น 6

รูปที่ 2.4 รูปแสดงลักษณะความเฉพาะเจาะจงของสารมัธยันต์(Intermediate) 7

รูปที่ 2.5 รูปแสดงการเกิดตำแหน่งกรด 7

รูปที่ 2.6 รูปแสดงการเกิดตำแหน่งเบส 8

รูปที่ 2.7 รูปแสดงการเกิดตำแหน่งโลหะ 8

รูปที่ 2.8 รูปแสดงการใช้ซีโอไลต์ชนิด Theta-1 ในการดูดซับโมเลกุลของเบนซีน 9

รูปที่ 2.9 รูปแสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ A 11

รูปที่ 2.10 รูปแสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ X 11

รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการจัดเรียงอิเลคตรอนในออร์บิทัลเชิงโมเลกุลของออกซิเจนและไนโตรเจน 12

รูปที่ 3.1 รูปแสดงชุดทดสอบการดูดซับสำหรับการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ 22

รูปที่ 3.2 รูปแสดงตัวอย่างของโครมาโทรแกรมที่ได้จากการทดสอบการดูดซับ 23

รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A 25

รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X 25

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ก่อนการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติก 27

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ FeX IMP n/C และซีโอไลต์ FeX IE n/C 28

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ FeA IMP n/C และซีโอไลต์ FeA IE n/C 29

รูปที่ 4.6 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ FeA IE n/C 30

รูปที่ 4.7 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X n/C และซีโอไลต์ FeX IE n/C 30

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ CrX IMP n/C และซีโอไลต์ CrX IE n/C 33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ CrA IMP n/C 34

รูปที่ 4.10 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X n/C และซีโอไลต์ CrX IE n/C 35

รูปที่ 4.11 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ CrA IE n/C 36

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ CoA IMP n/C และซีโอไลต์ CoA IE n/C 38

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ CoX IMP n/C และซีโอไลต์ CoX IE n/C 38

รูปที่ 4.14 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ CoA IE n/C 40

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C และซีโอไลต์ CoX IE n/C 41

รูปที่ 4.16 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X n/C และซีโอไลต์ CoX IE n/C 42

รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ MnA IMP n/C และซีโอไลต์ MnA IE n/C 44

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ MnX IMP n/C และซีโอไลต์ MnX IE n/C 44

รูปที่ 4.19 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ MnA IE n/C 45

รูปที่ 4.20 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X n/C และซีโอไลต์ MnX IE n/C 46

รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX n/C ซีโอไลต์ MnA IE n/C ซีโอไลต์ CoX IE n/C และซีโอไลต์ CoA IE n/C 47

รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ MnA IE n/C #1 และซีโอไลต์ MnA IE n/C #2 48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ MnX IE n/C #1 และซีโอไลต์ MnX IE n/C #2 48

รูปที่ 4.24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeA IMP n/C และซีโอไลต์ A n/C 50

รูปที่ 4.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeA IE n/C และซีโอไลต์ A n/C 51

รูปที่ 4.26 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ FeX IE n/C และซีโอไลต์ FeX IE C/N 54

รูปที่ 4.27 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ ซีโอไลต์ CoA IE n/Cซีโอไลต์ CoA IE C/Nและซีโอไลต์ CoA IE C/O 55

รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ CoA IE n/C ซีโอไลต์ CoA IE C/N และซีโอไลต์ CoA IE C/O 57

รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ CoX IE n/C ซีโอไลต์ CoX IE C/N และซีโอไลต์ CoX IE C/O 59

รูปที่ 4.30 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoX IE n/C ซีโอไลต์ CoX IE C/N และซีโอไลต์ CoX IE C/O 60

รูปที่ 4.31 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnA IE n/C ซีโอไลต์ MnA IE C/N และซีโอไลต์ MnA IE C/O 61

รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของ ซีโอไลต์ MnA IE n/C ซีโอไลต์ MnA IE C/N และซีโอไลต์ MnA IE C/O 61

รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของ ซีโอไลต์ MnA IE C/O #1 และซีโอไลต์ MnA IE C/O #2 62

รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของ ซีโอไลต์ MnA IE C/N #1 และซีโอไลต์ MnA IE C/N #2 63

รูปที่ 4.35 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnX IE n/C ซีโอไลต์ MnX IE C/N และซีโอไลต์ MnX IE C/O 64

รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของ ซีโอไลต์ MnA IE n/C ซีโอไลต์ MnA IE C/N #1 และซีโอไลต์ MnA IE C/N #2 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.37 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnA IE n/C ซีโอไลต์ MnA IE C/O #1 และซีโอไลต์ MnA IE C/O #2 66

รูปที่ 4.38 รูปแสดงโครมาโทรแกรมการแยกก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนจากอากาศโดยใช้สภาวะตามตารางที่ 3.3 67

รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอากาศแห้งกับพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) 68

รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอากาศแห้งกับพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ A 69

รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ A กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) 70

รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ CoA IE C/Nกับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) 71

รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ MnA IE C/N กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) 71

รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ X กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) 72

รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ MnX IE C/N กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) 73

รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ CoX IE C/N กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead) 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	ซีโอไลต์ A
FeA	ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออน
CrA	ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออน
CoA	ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออน
MnA	ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออน
X	ซีโอไลต์ X
FeX	ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออน
CrX	ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออน
CoX	ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออน
MnX	ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออน
IMP	การปรับปรุงสมบัติซีโอไลต์โดยวิธีการฝังตัว(Impregnation)
IE	การปรับปรุงสมบัติซีโอไลต์โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)
แคลไซน์	การปรับปรุงสมบัติทางความร้อน
n/C	ไม่แคลไซน์
C/N	แคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน
C/O	แคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

ปัจจุบัน ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ มีความต้องการใช้ในปริมาณที่สูง โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม จึงได้มีการคิดค้นวิธีการผลิตก๊าซทั้งสองชนิดนี้ โดยใช้วัตถุดิบคืออากาศ เนื่องจากอากาศ มีก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบหลัก และเป็นวัตถุดิบที่หาได้ง่ายโดยทั่วไป

ในระยะแรก วิธีการที่ใช้ในการแยกก๊าซทั้งสองชนิดนี้จากอากาศ ทำได้โดยอาศัยสมบัติความแตกต่างของจุดเดือด โดยที่ก๊าซออกซิเจนมีจุดเดือดอยู่ที่ –182.97 องศาเซลเซียส และก๊าซไนโตรเจนมีจุดเดือดอยู่ที่ –195.8 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากวิธีนี้ จะต้องทำการควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำมาก เพื่อให้ก๊าซทั้งสองชนิดนี้อยู่ในสภาวะที่เป็นของเหลวก่อน จากนั้นจึงทำการแยกก๊าซทั้งสองโดยอาศัยสมบัติความแตกต่างกันของจุดเดือด ทำให้มีการสิ้นเปลืองพลังงาน อีกทั้งกระบวนการผลิตมีความยุ่งยากซับซ้อน ทำให้วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยม[1] จึงได้มีการคิดค้นวิธีการในการแยกก๊าซทั้งสองชนิดนี้ใหม่โดยการใช้ตัวดูดซับ ตัวดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ ซีโอไลต์ที่มีขนาดของรูพรุน 5 และ 13 อังสตรอม(Å) ซึ่งวิธีการแยกโดยการใช้ตัวดูดซับนี้ สามารถทำการแยกได้ที่อุณหภูมิและความดันปกติ อีกทั้งวิธีการแยกโดยการใช้ตัวดูดซับนี้ มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าวิธีการแยกโดยการอาศัยสมบัติความแตกต่างของจุดเดือดมาก เพราะซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับนั้น จัดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่หาได้ง่าย และมีราคาถูก

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับในการแยกก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนจากอากาศ โดยที่ซีโอไลต์ที่ใช้นั้นมีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจน แต่เนื่องจากอากาศจะมีอัตราส่วนของปริมาณของก๊าซไนโตรเจนต่อปริมาณก๊าซออกซิเจน เท่ากับ 79% ต่อ 21% โดยประมาณ มีผลให้หน่วยปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแยกก๊าซทั้งสองชนิดนี้ ต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อที่จะสามารถดูดซับก๊าซไนโตรเจนจากอากาศไว้ได้หมด และเนื่องจากลักษณะของการแยกเป็นการแยกของผสมส่วนมากออกจากส่วนน้อย จึงทำให้ประสิทธิภาพในการแยกทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร[2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน พบว่า มีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอน เรียงเดี่ยวในออร์บิทัลเชิงโมเลกุล (Molecular Orbital) ซึ่งโมเลกุลหรืออะตอม ที่มีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนเรียงเดี่ยวในออร์บิทัลนี้ จะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมนั้น มีสมบัติพาราแมกเนติก (Paramagnetic) ดังนั้น เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้น จึงได้มีการใช้โลหะบางชนิด ที่มีสมบัติพาราแมกเนติกมาทำการปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์เพื่อให้ซีโอไลต์นั้นมีสมบัติพาราแมกเนติก ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ดีขึ้น และเมื่อซีโอไลต์เลือกที่จะทำการดูดซับก๊าซออกซิเจนแทนที่จะเป็นก๊าซไนโตรเจนแล้ว จึงทำให้การแยกนี้ เป็นการแยกของผสมส่วนน้อย ออกจากส่วนมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกก๊าซทั้งสองชนิดนี้ดีขึ้น[3]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลของโลหะทรานซิชันชนิดต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ โดยที่ซีโอไลต์ที่เลือกทำการศึกษาได้แก่ ซีโอไลต์ A กับ ซีโอไลต์ X และโลหะทรานซิชันที่มีสมบัติความเป็นพาราแมกเนติก ที่เลือกทำการศึกษา ได้แก่ Fe^{3+} Cr^{3+} Co^{2+} Mn^{2+}

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการแยกก๊าซออกซิเจนออกจากอากาศโดยใช้ซีโอไลต์ A และ ซีโอไลต์ X ที่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยโลหะทรานซิชัน ได้แก่ Fe^{3+} Cr^{3+} Co^{2+} Mn^{2+}
2. เพื่อทราบถึงวิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ด้วยโลหะทรานซิชันได้แก่ Fe^{3+} Cr^{3+} Co^{2+} Mn^{2+}
2. ตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์ ที่ทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกแล้ว ได้แก่
   - ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์
   - ปริมาณโลหะทรานซิชันบนซีโอไลต์
   - อัตราส่วนของ Si/Al ของซีโอไลต์
   - พื้นที่ผิวของซีโอไลต์
3. ตรวจสอบหา ไอโซเทอร์ม (Isotherm)ของการดูดซับก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน
4. ทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ ด้วยชุดทดสอบการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อไอโซเทอมของการดูดซับ ได้แก่
   - ชนิดของโลหะ ได้แก่ Fe^{3+} Cr^{3+} Co^{2+} Mn^{2+}
   - วิธีการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ ได้แก่ วิธีการฝังตัว (Impregnation) และ วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)
   - ผลของการเผาในบรรยากาศของไนโตรเจน และ บรรยากาศของอากาศแห้ง

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทราบถึงทฤษฎีและหลักการ ของการแยกก๊าซ
2. ทราบถึงวิธีการวิเคราะห์และวิธีตรวจสอบ ด้วยเทคนิคต่างๆ ได้แก่
   2.1 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer)
   2.2 เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ (X-Ray Fluorescence Spectrometer)
   2.3 เครื่องทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซของของแข็ง
   2.4 เครื่องก๊าซ โครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph)
3. ทราบถึงองค์ประกอบ และสมบัติต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์
4. ทราบถึงวิธีการต่ออุปกรณ์ท่อและวาล์วชนิดต่างๆ อย่างถูกวิธี
5. ผลการทดลองที่ได้ สามารถนำไปเป็นพื้นฐาน ในการประยุกต์ใช้วิธีการในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ได้

1.5 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนที่ 1. การศึกษาข้อมูล และการเตรียมซีโอไลต์ ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติ พาราแมกเนติก

ขั้นตอนที่ 2. การปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ด้วยโลหะทรานซิชัน Fe^{3+} Cr^{3+} Co^{2+} Mn^{2+} ด้วยวิธีดังนี้

- วิธีการฝังตัว (Impregnation)
- วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

ขั้นตอนที่ 3. การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์ ได้แก่

- ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์
- ปริมาณโลหะทรานซิชันบนซีโอไลต์
- อัตราส่วนของ Si/Al ของซีโอไลต์
- พื้นที่ผิวของซีโอไลต์

ขั้นตอนที่ 4. การตรวจสอบไอโซเทอร์มของการดูดซับก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนของซีโอไลต์

ขั้นตอนที่ 5. การทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนจากอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเป็นมาของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ จัดเป็นสารประกอบประเภท อะลูมิโนซิลิเกต มีความหมายว่า หินที่เดือดได้ เป็นชื่อที่ตั้งขึ้นโดยนักวิทยาแร่ ชาวสวีเดน หลังจากพบว่า เมื่อได้รับความร้อนแล้วจะเกิดมีฟองอากาศขึ้นมา ซึ่งมีลักษณะคล้ายการเดือดของน้ำ ในปีค.ศ. 1845 เวย์ (Way) ได้ทำการศึกษาพบว่ามีดินบางชนิดสามารถดูดซับแอมโมเนียได้ ซึ่ง เบรค (Brack) ได้อธิบายว่าเพราะมีองค์ประกอบของซิลิเกต ที่มีน้ำอยู่ในโครงสร้างดิน ทำให้สามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้ นับว่าเป็นการทดลองครั้งแรกในการทดสอบสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์

ต่อมาในปี ค.ศ. 1925 ไวล์เกล และ สไตน์โฮฟ (Weigel and Steinhoff) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับสมบัติในการเลือกจับโมเลกุลของสารอินทรีย์ ของซีโอไลต์ชนิด ชาบาไซต์ (Chabazite) ในช่วง 2 ทศวรรษต่อมา ในปี ค.ศ. 1940-1960 บาเรอร์ (Barrer) ได้ทำการศึกษาชนิดของซีโอไลต์และสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งเบรคได้ยืนยันผลการสังเคราะห์ อะแนลซิม (Analcime) ของบาเรอร์ โดยการใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Powder Diffraction) ในช่วงแรกนั้นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ สามารถทำได้ที่อุณหภูมิและความดันปกติ และตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 เป็นต้นมา พบว่ามีซีโอไลต์ที่ปรากฏในธรรมชาติและรูปแบบใหม่มากมาย

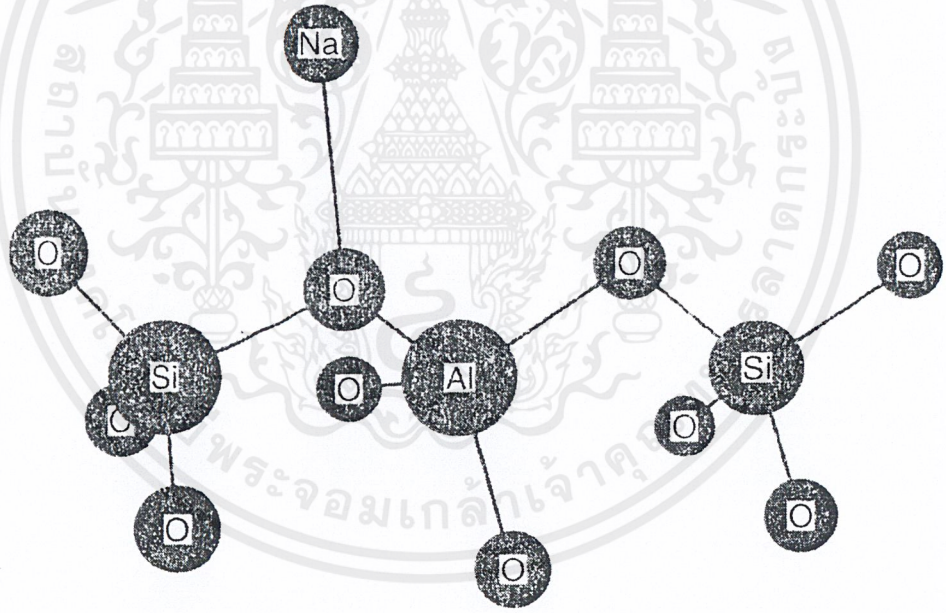
2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์

การจัดเรียงตัวของโครงสร้างซีโอไลต์ เริ่มจากโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Building Unit) ซึ่งจะมีรูปร่างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้า (Tetrahedral) ที่มีอะตอมของออกซิเจน 4 อะตอม ล้อมรอบอะตอมของซิลิกอน หรืออะตอมของอะลูมิเนียม 1 อะตอม โครงสร้างปฐมภูมิจะมีการเชื่อมต่อกันโดยผ่านมุมของออกซิเจนทั้ง 4 อะตอม เพื่อจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Unit)

โครงสร้างทุติยภูมิ สามารถสร้างพันธะในการเชื่อมโยงต่อกันระหว่างโครงสร้างทุติยภูมิด้วยกันเอง เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า โครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary Building Unit หรือ Polyhedra) และโครงสร้างตติยภูมินี้ สามารถเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ที่แตกต่างกันในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 รูปแสดงโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary building unit) ของ [SiO_4^{-4}] และ [AlO_4^{-5}] [4]



รูปที่ 2.2 รูปแสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ เมื่อมีการเชื่อมโยงของ Primary building unit [4]

สูตรโครงสร้างของซีโอไลต์ แสดงในรูปหน่วยเซลล์ของผลึกดังนี้

$$M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y] \cdot wH_2O$$

เมื่อ M เป็นไอออนบวกที่มีประจุ n

w เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราวส่วน y/x มีค่าระหว่าง 1 - ∞ ขึ้นกับโครงสร้างของผลึก และผลรวม (x+y) จะมีค่าเท่ากับจำนวนรูปทรงสี่หน้า (Tetrehedral) ทั้งหมดในหน่วยเซลล์ ในบางกรณี ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์อาจไม่มีอะลูมิเนียมอยู่ภายในเลยก็ได้ เช่น พวกซิลิกาไลต์ (silicalite)

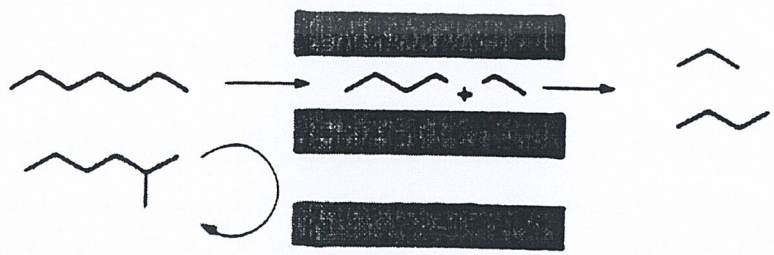
2.3 ช่องว่างภายในโครงสร้างของซีโอไลต์

ช่องว่างหรือรูพรุนภายในโครงสร้างของซีโอไลต์เกิดจากการเชื่อมต่อกันของอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นจะมี 2 แบบ คือ แบบโพรง (Cages) และแบบท่อ (Channels) โดยที่ช่องว่างที่มีลักษณะแบบโพรง มักเกิดกับซีโอไลต์ชนิดที่มีจำนวนอะลูมิเนียมมาก และช่องว่างที่มีลักษณะแบบท่อ มักเกิดกับซีโอไลต์ชนิดที่มีจำนวนอะลูมิเนียมน้อย

2.4 สมบัติของซีโอไลต์

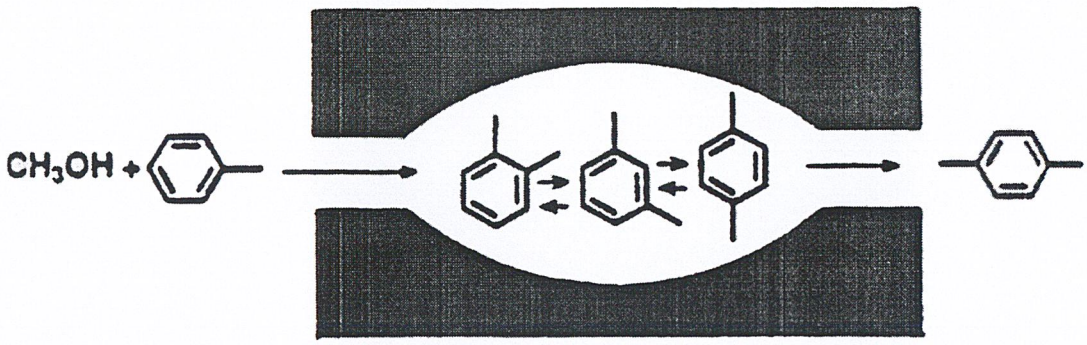
1. การที่ซีโอไลต์ มีโครงสร้างที่เป็นผลึก และมีรูพรุนอยู่ภายใน ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารจำนวนมาก นอกจากนั้นโพรงขนาดเล็กยังทำหน้าที่คล้ายถังปฏิกรณ์ระดับโมเลกุล ซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำที่รุนแรงกับโมเลกุลของสาร

2. เนื่องจากซีโอไลต์มีขนาดของช่องว่างหรือรูพรุนที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีสมบัติในการเลือกสารเข้าออก เพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมี ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนขนาดหนึ่ง จะสามารถเลือกทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารที่มีขนาดเหมาะสมเท่านั้น โมเลกุลที่มีขนาดไม่เหมาะสม จะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ การเลือกโมเลกุลดังกล่าว สามารถเลือกได้ทั้งสารตั้งต้น สารมัธยันต์ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.3 รูปแสดงลักษณะความเฉพาะเจาะจงของสารตั้งต้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปแสดงลักษณะความเฉพาะเจาะจงของสารมัธยันต์ (Intermediate)[4]

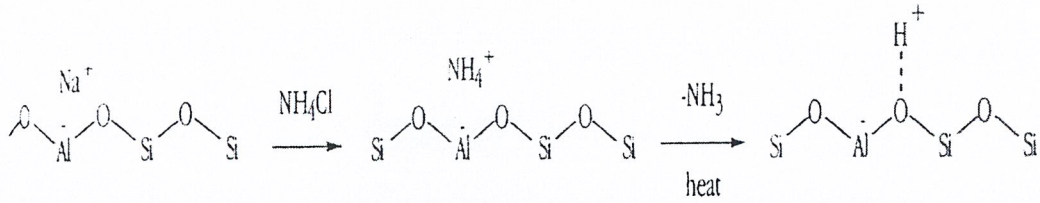
3. ช่วยทำให้การเกิดปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เพราะซีโอไลต์ช่วยทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปในทิศทางที่มีพลังงานก่อกัมมันต์ลดลง

4. ซีโอไลต์ มีความคงทนต่อความร้อน และการเปลี่ยนแปลงความดัน เนื่องจากซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโครงข่ายสามมิติ และมีโครงสร้างรูพรุนที่หนาแน่น ทำให้สามารถคงทนต่อความร้อน โดยเฉพาะซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาสูงจะมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำ

5. ซีโอไลต์สามารถทำการเปลี่ยนแปลงสมบัติในการทำปฏิกิริยาได้ เช่น

ตำแหน่งกรด (Acid Zeolite)

การทำให้เกิดตำแหน่งกรด สามารถทำได้หลายวิธี เช่น วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนกับแอมโมเนียมไอออน (Ammonium ion exchange) และให้ความร้อนเพื่อสลาย NH_3 จะได้ตำแหน่งที่อยู่ในรูปกรดของบรอนสเตรต (Bronsted Acid)



รูปที่ 2.5 รูปแสดงการเกิดตำแหน่งกรดในโครงสร้างของซีโอไลไลต์[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

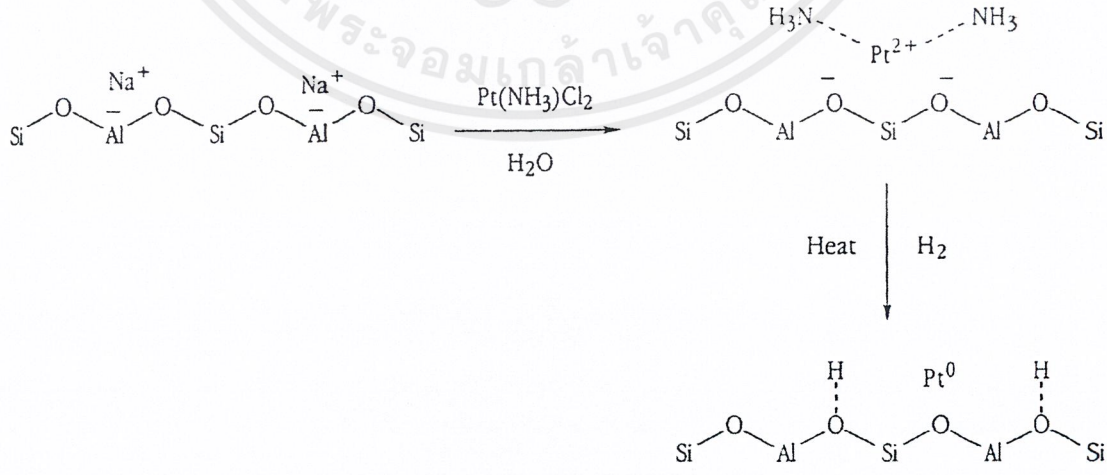
ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเป็นเบส (Basic Zeolite)

เกิดขึ้นในซีโอไลต์ที่มีปริมาณของอะลูมิเนียมอยู่มาก หรือ มีอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่ำ การที่มีปริมาณของอะลูมิเนียมอยู่มากจะทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์มีความเป็นลบมาก เมื่อทำการสังเคราะห์ หรือทำการแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่มีความเป็น Soft Acid จะได้ซีโอไลต์ที่มีตำแหน่งที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาเป็นลิวอิสเบส (Lewis Base)

รูปที่ 2.6 รูปแสดงการเกิดตำแหน่งเบสในโครงสร้างของซีโอไลต์[4]

ซีโอไลต์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชันอยู่ภายใน (Metal Site)

เป็นการบรรจุโลหะไม่ว่าจะเป็นโลหะหมู่ที่ 1,2A และโลหะทรานซิชัน ซึ่งสามารถบรรจุโลหะเข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ได้ 2 วิธี คือ วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) และวิธีการฝังตัว (Impregnation) วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เป็นวิธีที่นิยมใช้กับซีโอไลต์ที่มีปริมาณของอะลูมิเนียมอยู่ในโครงสร้างมาก เพราะโลหะที่บรรจุเข้าไปจะเข้าไปดุลประจุได้มาก สำหรับวิธีการฝังตัว สามารถทำได้หลายวิธี และสามารถควบคุมปริมาณโลหะได้ แต่โลหะที่ถูกบรรจุเข้าไปจะมีอันตรกิริยา (Interaction) น้อยกว่าวิธีแลกเปลี่ยนไอออนและการกระจายตัวของโลหะไม่ดีนัก



รูปที่ 2.7 รูปแสดงการเกิดตำแหน่งโลหะในโครงสร้างของซีโอไลต์[4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

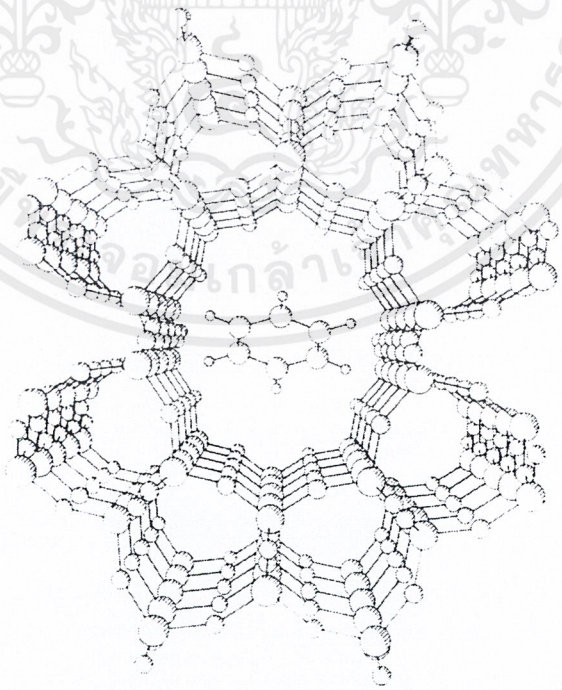
2.5 ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานซีโอไลต์

1. การใช้ซีโอไลต์ในลักษณะตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchanger)

ไอออนบวกภายในซีโอไลต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนบวกอื่นได้ จึงสามารถนำมาใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายชนิด เช่น ในอุตสาหกรรมผงซักฟอก ไอออนบวกในซีโอไลต์ที่ผสมอยู่ในผงซักฟอกจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ได้ เมื่อไอออนของแคลเซียม หรือแมกนีเซียมเข้าไปอยู่ในโพรงของซีโอไลต์จะเป็นการลดแรงตึงผิวของน้ำ นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือสามารถใช้ในการกำจัดโลหะต่างๆในน้ำได้

2. การใช้ซีโอไลต์ในลักษณะตะแกรงโมเลกุล (Molecular Sieve)

เมื่อทำการไล่น้ำออกจากโพรงของซีโอไลต์จะทำให้เกิดช่องว่างในโพรงของซีโอไลต์มากขึ้น ซึ่งโพรงนี้จะมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลได้มากขึ้น จึงทำให้โมเลกุลต่างๆ สามารถเข้าสู่ภายในโพรงได้แต่ขนาดของโมเลกุลที่เข้าสู่โพรงจะถูกกำหนดโดยขนาดของหน้าต่างของโพรง ด้วยเหตุนี้ ซีโอไลต์จึงได้ชื่อว่า "ตะแกรงโมเลกุล" (Molecular Sieve) จากสมบัตินี้จึงนำเอา ซีโอไลต์มาใช้เป็นสารดูดซับน้ำ (Drying Agent) และใช้ในการทำให้ก๊าซมีความบริสุทธิ์ (Gas Purification) เป็นต้น



รูปที่ 2.8 รูปแสดงการดูดซับโมเลกุลของเบนซีนในโพรงของซีโอไลต์ชนิดTheta-1 [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การใช้ซีโอไลต์ในลักษณะตัวเร่งปฏิกิริยา (Zeolite Catalyst)

เนื่องจากซีโอไลต์เป็นสารประกอบอนินทรีย์ จึงสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ และจากการที่ซีโอไลต์มีคุณสมบัติการคัดเลือกรูปร่างและขนาดโมเลกุล (Shape and Size Selectivity) รวมถึงความสามารถในการปรับเปลี่ยนโครงสร้าง (Tunable) จึงเป็นผลให้ซีโอไลต์สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาต่างๆได้ เช่น

- Hydrocracking
- Alkylation
- Isomerization

2.6 ซีโอไลต์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซีโอไลต์สองชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์ A และ ซีโอไลต์ X ซึ่งมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

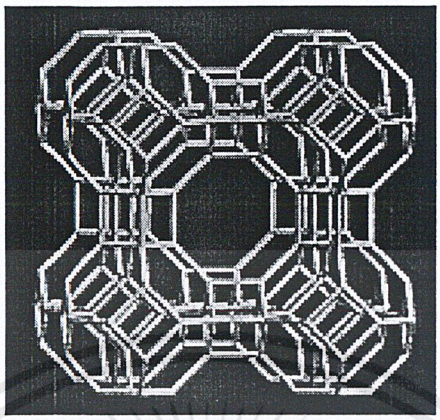
ซีโอไลต์ A (Linde Type A)

ซีโอไลต์ A มีโครงสร้างรูพรุนแบบโพรง (Cage) โครงสร้างซีโอไลต์ A เกิดขึ้นจากการต่อกันของโซดาไลต์เคจ (Sodalite Cage) ซึ่งทำให้ซีโอไลต์ชนิดนี้ มีรูพรุนขนาดเล็ก มีขนาดหน้าต่างของรูพรุนประมาณ 4.2 อังสตรอม อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมมีค่าต่ำ อยู่ในช่วง 1-1.5 จึงทำให้ซีโอไลต์ชนิดนี้มีอันตรกิริยากับโมเลกุลที่มีขั้วสูงที่ผ่านเข้าไปในโพรง ดังนั้นจึงนิยมนำเอาซีโอไลต์ A มาทำเป็นสารดูดความชื้น เช่น ดูดซับน้ำ ดูดซับก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์ A มีหน่วยเซลล์ดังนี้

$$[Na_{12}(Al_{12}Si_{12}O_{48}).27H_2O]_8$$



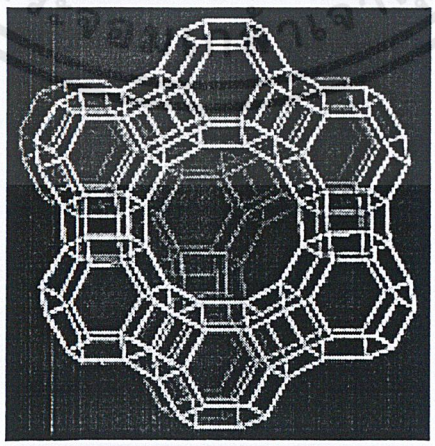
รูปที่ 2.9 รูปแสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ A[5]

ซีโอไลต์ X (Faujasite)

ซีโอไลต์ X มีรูพรุนเป็นแบบโพรง จัดเป็นซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (Super Cage) โครงสร้างของซีโอไลต์ X เกิดขึ้นจากการต่อกันของโซดาไลต์เคจ แบบ D6R (Double 6 Ring) มีค่าอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1 และมีขนาดของหน้าต่างรูพรุนประมาณ 7-8 อังสตรอม

ซีโอไลต์ X หน่วยเซลล์เป็นดังนี้

$$(Na_2\ Ca\ Mg)[Al_{58}Si_{134}O_{384}].240H_2O$$



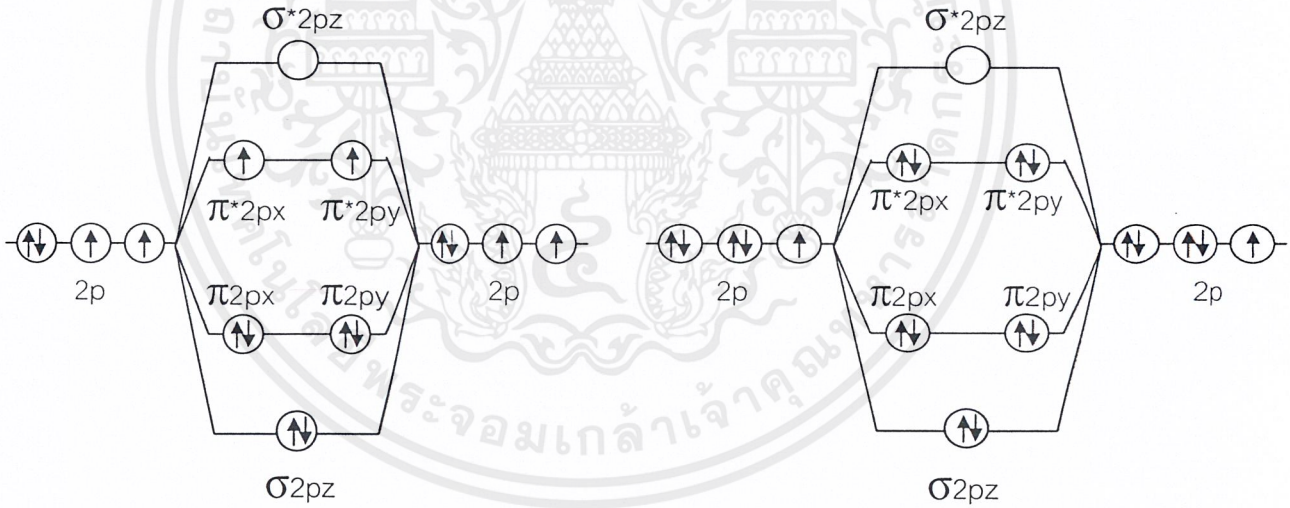
รูปที่ 2.10 รูปแสดงโครงสร้างของซีโอไลต์ X[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สมบัติพาราแมกเนติก

ทฤษฎีออร์บิทัลเชิงโมเลกุล (Molecular Orbital) ได้กล่าวว่า การที่โมเลกุลจะแสดงสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้นั้น จะต้องมีอิเลคตรอนเดี่ยว ตั้งแต่ 1 ตัวขึ้นไปอยู่ในออร์บิทัลเชิงโมเลกุล จึงจะทำให้โมเลกุลนั้นถูกดูดเข้าสู่สนามแม่เหล็กได้ และเรียกโมเลกุลที่มีสมบัติดังกล่าวว่า พาราแมกเนติก (Paramagnetic) ในขณะที่โมเลกุลที่ไม่มีอิเลคตรอนเดี่ยวในออร์บิทัลเชิงโมเลกุล จะถูกผลักออกจากสนามแม่เหล็ก และเรียกโมเลกุลนั้นว่า ไดอะแมกเนติก (Diamagnetic)

จากรูปที่ 2.11 กรณีของโมเลกุลของก๊าซออกซิเจน จะมีการจัดเรียงอิเลคตรอน โดยที่มี 2 อิเล็กตรอนเดี่ยวใน ออร์บิทัล π^{*}_{2px} และ π^{*}_{2py} ดังนั้นโมเลกุลของออกซิเจนจึงจัดเป็นโมเลกุลที่มีสมบัติพาราแมกเนติก ในขณะที่โมเลกุลของไนโตรเจนนั้น ไม่มีอิเลคตรอนจัดเรียงเดี่ยวในออร์บิทัลเชิงโมเลกุลเลย โมเลกุลของไนโตรเจนจึงจัดเป็นโมเลกุลประเภท ไดอะแมกเนติก [6]



(a) O_2 (b) N_2

รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในออร์บิทัลเชิงโมเลกุล (a) การจัดเรียงอิเลคตรอนของโมเลกุล ออกซิเจน (b) การจัดเรียงอิเลคตรอนของโมเลกุล ไนโตรเจน[6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากทฤษฎีดังกล่าว จึงได้มีการประยุกต์นำสมบัติความเป็นพาราแมกเนติกของออกซิเจนไปใช้ในการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ โดยอาศัยสมบัติพาราแมกเนติกของโมเลกุลออกซิเจนร่วมกับการใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับ เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติเด่น คือ มีรูพรุนในโครงสร้าง และสามารถทำการแลกเปลี่ยนไอออนได้ ทำให้สามารถเพิ่มโลหะไอออนหรือโมเลกุลที่มีสมบัติพาราแมกเนติก เช่นเดียวกับออกซิเจน เข้าไปในโครงสร้างของซีโอไลต์และทำให้ซีโอไลต์นั้น มีสมบัติพาราแมกเนติกเกิดขึ้น เป็นผลให้เมื่อทำการผ่านอากาศไปยังซีโอไลต์ที่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกแล้ว จะทำให้ซีโอไลต์สามารถทำการดูดซับก๊าซออกซิเจนไว้ได้ และจะทำการส่งผ่านก๊าซไนโตรเจนออกมา

โลหะทรานซิชันที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ Fe^{3+} Cr^{3+} Co^{2+} Mn^{2+} เนื่องจากมีอิเล็กตรอนเรียงเดี่ยวใน d ออร์บิทัล โลหะทรานซิชันเหล่านี้ จึงเป็นโลหะทรานซิชันที่มีสมบัติพาราแมกเนติก

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Izumi และคณะ[3] ทดลองนำซีโอไลต์ A มาปรับปรุงสมบัติความเป็นพาราแมกเนติกด้วย Fe^{3+} ด้วยวิธีการฝังตัว โดยนำสารละลายของ Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} มาหยดลงในของผสมระหว่างน้ำกลั่นกับซีโอไลต์ A ทำการควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วง 8.5-9 โดยมีปริมาณโลหะคิดเป็น 0.5 และ 1 % ของน้ำหนักซีโอไลต์ที่ใช้ แล้วทำการศึกษาถึงผลของปริมาณโลหะ ผลของอุณหภูมิในการดูดซับก๊าซออกซิเจน และผลของปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมไอออนของซีโอไลต์ A ซึ่งพบว่า ปริมาณโลหะ และปริมาณโพแทสเซียมไอออนที่มากขึ้น จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนมากขึ้นด้วย และถ้าใช้อุณหภูมิในการดูดซับก๊าซผสมระหว่างก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนต่ำเกินไปคือ ประมาณ –30 องศาเซลเซียส การดูดซับก๊าซออกซิเจนจะลดลง เนื่องจากซีโอไลต์จะสามารถดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้มากขึ้น

Choudary และ Jasra[7] ได้ศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y ที่ปรับปรุงสมบัติด้วย Ce^{3+} ด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยนำซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ Y ที่ปั่นกวนในสารละลายของ Cerium (III) chloride เข้มข้น 2 %wt มาดูดซับก๊าซออกซิเจนจากก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอน ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน พบว่าซีโอไลต์ที่ยังไม่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วย Ce^{3+} สามารถดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซอาร์กอนได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจน เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนและก๊าซอาร์กอนมีจุดเดือดต่ำกว่าก๊าซออกซิเจน โดยมีค่าเท่ากับ –195.8, -185.9 และ –182.97 องศาเซลเซียสตามลำดับ เมื่อนำซีโอไลต์ X มาปรับปรุงสมบัติด้วย Ce^{3+} แล้ว พบว่าซีโอไลต์สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้ จะทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ด้วยโลหะทรานซิชันได้แก่ Fe^{3+} Cr^{3+} Co^{2-} และ Mn^{2+} โดยวิธีการฝังตัว(Impregnation) และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน(Ion Exchange)

สำหรับวิธีการฝังตัวจะใช้ปริมาณโลหะบนซีโอไลต์ประมาณ 1% ของน้ำหนักซีโอไลต์ที่ใช้ และควบคุมค่า pH ในช่วง 8.5-9 ซึ่งงานวิจัยข้างต้น[3] ได้ศึกษาแล้วว่าปริมาณของโลหะบนซีโอไลต์ยิ่งมาก ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนก็จะมากขึ้นด้วย

สำหรับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ในงานวิจัยนี้จะนำซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X มาปั่นกวนในสารละลายของโลหะชนิดที่ต้องการศึกษา พร้อมกับควบคุมค่า pH ของของผสมด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5 เพื่อควบคุมไม่ให้โลหะเกิดการตกตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

1. บริภัณฑ์เครื่องแก้วพื้นฐานในห้องปฏิบัติการ
2. ขวดก้นกลมสามคอ
3. แท่นให้ความร้อน (Heating Mental)
4. แท่งแม่เหล็กและเครื่องปั่นกวน
5. เครื่องชั่งสาร 4 ตำแหน่ง
6. ขวดน้ำกลั่น
7. ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตร
8. กระบอกใส่ไนโตรเจนเหลว
9. ตะแกรงร่อน ขนาดอนุภาค 180 ไมโครเมตร และ 260 ไมโครเมตร
10. ตู้อบ
11. เตาเผา
12. เตาเผาแบบท่อ
13. กระดาษกรอง เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร
14. กระดาษลิตมัส : Whatman ช่วง pH 1-14
15. มาตรวัดความเป็นกรด-เบส (pH Meter)
16. เครื่องหมุนเหวี่ยง
17. เครื่องบดผสมตัวอย่าง : LOCKLAB
18. เครื่องอัดตัวอย่าง : HERZOG
19. เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph) : Varion รุ่น 3800
20. คอลัมน์ มาตรฐานในการแยกก๊าซ (MoleSieve 13X 45/60)
21. เครื่องทดสอบการดูดซับก๊าซของของแข็ง (Autosorb-1) : Quantachrome
22. เครื่องเอกซ์เรย์ ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer)
23. เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนต์ สเปกโทรมิเตอร์ (X-Ray Fluorescent Spectrometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมี

1. ซีโอไลต์ A (LTA) : PQ Chemical
2. ซีโอไลต์ X (FAU) : Aldrich
3. กรดโบริก (H_3BO_3) : CARLO ERBA : Analytical Grade
4. กรดแอซีติกล้วน (CH_3COOH) : BAKER ANALYZED : Analytical Grade
5. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) : MERCK : Analytical Grade
6. อะซีโตน (CH_3COCH_3) : CARLO ERBA : Commercial Grade
7. โครเมียม(III)ไนเตรท ($Cr(NO_3)_3.9H_2O$) : FLUKA : Analytical Grade
8. โคบอลต์(II)ไนเตรท ($Co(NO_3)_2.6H_2O$) : CARLO ERBA : Analytical Grade
9. แมงกานีส(II)ซัลเฟต ($MnSO_4.H_2O$) : CARLO ERBA : Analytical Grade
10. เฟอร์ริกไนเตรท ($Fe(NO_3)_3.9H_2O$) : อิตัสมาร์ : Analytical Grade
11. ใยแก้วชนิดผืนทอละเอียด
12. น้ำกลั่น
13. ไนโตรเจนเหลว
14. อากาศแห้ง (Air Zero Grade) : บริษัท ไทย อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
15. ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ (High Purity Nitrogen) : บริษัท ไทย อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
16. ก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ (High Purity Grade) : บริษัท ไทย อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)
17. ก๊าซฮีเลียมบริสุทธิ์ (High Purity Helium) : บริษัท ไทย อินดัสเตรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)

วิธีทดลอง

ตอนที่ 1 การเตรียมซีโอไลต์ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติก

1. ทำการถ่ายซีโอไลต์ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 1 โมลาร์ แล้วทำการรีฟลักซ์ของผสม ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยง แล้วล้างซีโอไลต์ด้วยน้ำกลั่น จนของผสมระหว่างซีโอไลต์กับน้ำมีค่าpH ต่ำกว่า 9
3. อบซีโอไลต์ให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ในตู้อบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตอนที่ 2 การปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติก ด้วยโลหะทรานซิชัน

ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์นั้น จะมีวิธีการทดลอง 2 วิธี คือ

1. วิธีการฝังตัว (Impregnation)
2. วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

วิธีการฝังตัว (Impregnation)

1. ละลาย $Fe(NO_3)_3.9H_2O$ $Cr(NO_3)_3.9H_2O$ $Co(NO_3)_2.6H_2O$ และ $MnSO_4.H_2O$ เตรียมเป็นสารละลายความเข้มข้น 1 โมลาร์
2. ชั่งซีโอไลต์จำนวน 5 กรัม เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร แล้วถ่ายลงขวดก้นกลม 3 คอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
3. ปรับค่า pH ของของผสมให้อยู่ในช่วง 8.5-9 โดยใช้สารละลายกรดแอซีติก หรือสารละลายแอมโมเนีย วัดค่า pH ด้วยมาตรวัดความเป็นกรด-เบส
4. ทำการพ่นก๊าซไนโตรเจนลงในขวดก้นกลมประมาณ 5 นาที พร้อมกับปั่นกวนโดยการใช้แท่งแม่เหล็ก
5. ใช้ปิเปตขนาด 1 มิลลิลิตรในการตวงสารละลายโลหะไอออน จากนั้นทำการหยดสารละลายโลหะไอออนลงในของผสม โดยที่ต้องควบคุมค่า pH ของซีโอไลต์ ให้อยู่ในช่วง 8.5-9 ด้วยสารละลายแอมโมเนีย ทำการหยดสารละลายโลหะจนได้ปริมาณโลหะคิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ของซีโอไลต์
6. ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
7. นำซีโอไลต์ไปกรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น
8. อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส
9. แบ่งซีโอไลต์ส่วนหนึ่งไปแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเตาเผาแบบท่อ โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียสต่อนาที และปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศของไนโตรเจน อีกส่วนหนึ่งไม่แคลไซน์

วิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

1. เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5 ระหว่างสารละลายกรดแอซีติก ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

43885

2. เตรียมสารละลายโลหะไอออนจาก $Fe(NO_3)_3.9H_2O$ $Cr(NO_3)_3.9H_2O$ $Co(NO_3)_2.6H_2O$ และ$MnSO_4.H_2O$ ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5 ให้มีความเข้มข้นของโลหะไอออน 2 โมลาร์
3. ชั่งซีโอไลต์จำนวน 6 กรัม นำซีโอไลต์มาล้างด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5 จนของผสมมี pH อยู่ในช่วง 5-6 ซึ่งวัดด้วยมาตรวัดความเป็นกรด-เบส
4. นำของผสมระหว่างซีโอไลต์และสารละลายบัฟเฟอร์ pH 5 ถ่ายใส่ขวดก้นกลม ขนาด 500 มิลลิลิตร
5. ทำการพ่นก๊าซไนโตรเจนลงในขวดก้นกลมเป็นเวลา 5 นาที และ ทำการปั่นกวนโดยการใช้แท่งแม่เหล็ก
6. สำหรับสารละลายที่เตรียมจาก $Co(NO_3)_2.6H_2O$ และ $MnSO_4.H_2O$ จะทำการเติมสารละลายโลหะไอออนความเข้มข้น 2 โมลาร์ ลงไปในขวดก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร โดยให้มีความเข้มข้นของสารละลายโลหะสุดท้ายในของผสม 1 โมลาร์
7. ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จำนวน 2 ครั้ง
8. สำหรับสารละลายที่เตรียมจาก $Cr(NO_3)_3.9H_2O$ และ $Fe(NO_3)_3.9H_2O$ จะกำหนดให้ความเข้มข้นสุดท้ายในขวดก้นกลมเท่ากับ 0.05 โมลาร์ และปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 ชั่วโมง 1 ครั้ง
9. นำซีโอไลต์ไปกรองแล้วล้างด้วยน้ำกลั่น
10. อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส
11. แบ่งซีโอไลต์เป็น 3 ส่วน นำซีโอไลต์ส่วนหนึ่งไปแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจนอีกส่วนหนึ่งไปเผาในบรรยากาศของอากาศแห้ง ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเตาเผาแบบท่อ โดยใช้อัตราการให้ความร้อน 2 องศาเซลเซียส ต่อนาที และปล่อยให้เย็นตัวในบรรยากาศของไนโตรเจน และอีกส่วนหนึ่งไม่แคลไซน์

ตอนที่ 3 การตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์

3.1 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะตัวของซีโอไลต์ โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction)

1. เตรียมตัวอย่างในภาชนะสำหรับการตรวจสอบ
2. เข้าสู่เมนู Diffrac Plus 5>JOB Measurement เพื่อทำการระบุข้อมูลของสารตัวอย่างและสภาวะที่ใช้ทำการตรวจสอบ ซึ่งสภาวะที่ใช้สำหรับทำการตรวจสอบมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Parameter	Zeolite_Fix0.5.dlg
Scan Type	Locked Couplet
Scan Mode	Continuous
2 Theta Start	5.0
2 Theta Stop	60.0
Step Size	0.04
Time Step	1.0
Def. Generator	40 KV
	40 MA

3.2 การตรวจสอบหาปริมาณโลหะบนซีโอไลต์ โดยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี (X-Ray Fluorescence Spectroscopy)

1. ชั่งสารตัวอย่างหนัก 0.3 กรัม และชั่งกรดโบริกหนัก 4.7 กรัม
2. บดผสมสารตัวอย่างและกรดโบริก ด้วยเครื่องบดผสม
3. ทำการถ่ายสารตัวอย่างที่ทำการผสมกับกรดโบริกแล้วลงในภาชนะสำหรับอัดตัวอย่าง
4. ทำการอัดตัวอย่างที่ความดัน 150 กิโลนิวตัน (kN) เป็นเวลา 10 นาที
5. ทำการตรวจสอบด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ สเปกโทรสโกปี

3.3 การตรวจสอบหาพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ ด้วยเครื่องทดสอบการดูดซับก๊าซของของแข็ง

1. เปิดเครื่องทดสอบการดูดซับก๊าซของของแข็ง และเปิดโปรแกรม Autosorb 1 จากเครื่องคอมพิวเตอร์
2. ชั่งน้ำหนักสารตัวอย่างจำนวน 0.03 กรัม ใส่ในเซลล์สำหรับตรวจวัด
3. จากโปรแกรม Autosorb 1 เข้าสู่เมนู Operations>Outgasser และทำการ Outgas สารตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ช.ม.
4. ทดสอบการดูดซับก๊าซ เพื่อตรวจสอบหาพื้นที่ผิวของสารตัวอย่างโดยเข้าเมนูAnalysis Menu>Physisorption Analysis Parameters และเลือกสภาวะการทดลองดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สำหรับซีโอไลต์ A และ ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน จะทำการทดสอบการดูดซับก๊าซออกซิเจนติดต่อกัน 2 ครั้ง

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบหาพื้นที่ผิวของซีโอไลต์

สารตัวอย่าง	กลุ่มของซีโอไลต์ A	กลุ่มของซีโอไลต์ X
Adsorbate Gas	CO_2	N_2
Analysis Points Selection	BET 21 Point	BET 11 Point
Batch Temp	273 K	77 K
P_0 Parameters	User Entered P_0 (760 mm Hg)	P_0 Station

3.4 การตรวจสอบหาไอโซเทอร์มของการดูดซับก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจน

การตรวจสอบหาไอโซเทอร์มของการดูดซับก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนมีขั้นตอนการทดลองเหมือนกับการตรวจสอบหาพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ แต่จะมีการใช้สภาวะในการทดลองแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ในการตรวจสอบหาไอโซเทอร์มของการดูดซับของซีโอไลต์

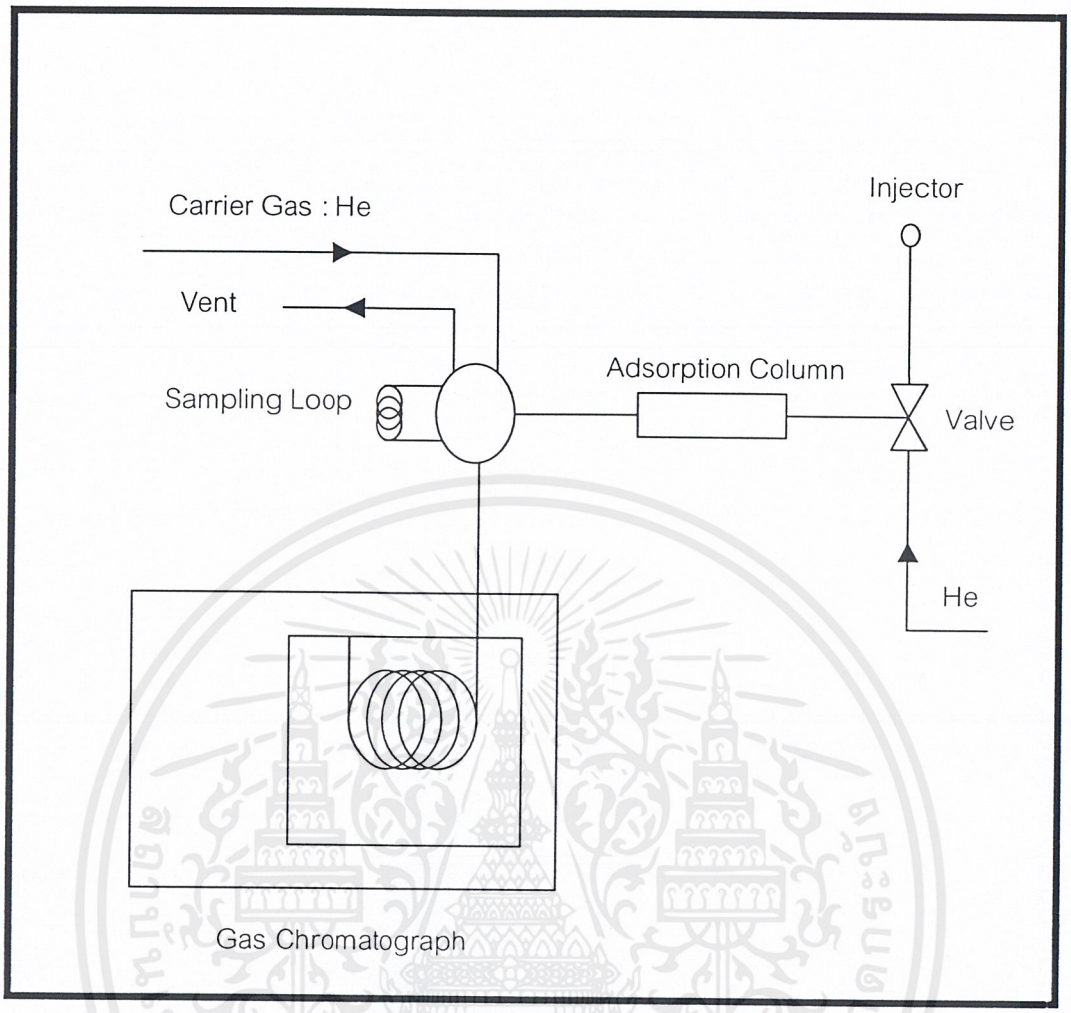
สารตัวอย่าง	กลุ่มของซีโอไลต์ A และ ซีโอไลต์ X
Adsorbate Gas	N_2 และ O_2
Analysis Points Selection	Absorption 10 Points
Batch Temp	273 K
P_0 Parameters	User Entered P_0
User P_0/Ambient	760 (mm Hg)

ตอนที่ 4. การทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ โดยการใช้เทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

ชุดทดสอบการดูดซับ

ชุดทดสอบการดูดซับได้ถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้นเพื่อทำการทดสอบการดูดซับก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ที่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติความเป็นแม่เหล็ก โดยประยุกต์ใช้เทคนิคก๊าซ โครมาโทกราฟี ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 รูปแสดงชุดทดสอบการดูดซับ สำหรับการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ

ชุดทดสอบการดูดซับ ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆดังนี้ คือ

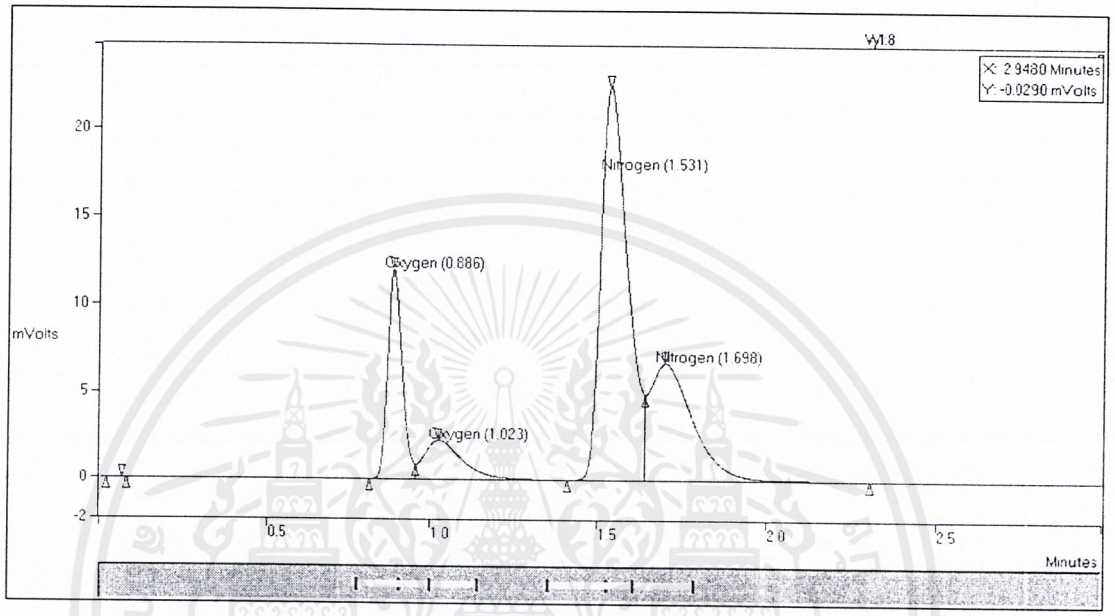
1. *Injector* เป็นส่วนที่ใช้ทำการฉีดอากาศแห้งเข้าสู่ท่อปฏิกรณ์ โดยในส่วนของ Injector นี้จะมีสวิตช์วาล์ว 3 ทิศทาง สำหรับทำการเลือกให้ก๊าซฮีเลียมไหลผ่านเข้าสู่ท่อปฏิกรณ์ได้

2. *คอลัมน์ดูดซับ (Adsorption Column)* ทำจากท่อเหล็กไร้สนิม(Stainless Steel) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภาย 1/4นิ้ว ยาว 15 เซนติเมตร เป็นส่วนที่ใช้ทำการดูดซับก๊าซออกซิเจนจากอากาศ ซึ่งภายในท่อปฏิกรณ์จะบรรจุซีโอไลต์เอาไว้ โดยที่ซีโอไลต์ที่จะบรรจุภายในท่อปฏิกรณ์ จะต้องผ่านการร่อนตะแกรงขนาดอนุภาค ให้อยู่ระหว่าง 180 ไมโครเมตร ถึง 260 ไมโครเมตร ท่อปฏิกรณ์นี้ ได้ออกแบบให้สามารถควบคุมอุณหภูมิในการทดสอบการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส และสามารถให้ความร้อนแก่ท่อปฏิกรณ์ได้ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์ ก่อนที่จะทำการทดสอบการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. *เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ* ประกอบด้วยส่วนประกอบต่างๆ คือ

- Sampling Loop ขนาดปริมาตร 250 ไมโครลิตร (μL)
- คอลัมน์มาตรฐานสำหรับการแยกอากาศ ได้แก่คอลัมน์ Molecular Sieve 13 X
- Detector ที่ใช้ได้แก่ Thermal Conductive Detector (TCD)



รูปที่ 3.2 รูปแสดงตัวอย่างของโครมาโทแกรมที่ได้จากการทดสอบการดูดซับโดยใช้สภาวะตามตารางที่ 3.3

.ขั้นการทดสอบมีดังนี้

1. นำตัวอย่างซีโอไลต์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโลหะทรานซิชันโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน มาคัดขนาดอนุภาค ให้มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 180 ไมโครเมตร ถึง 260 ไมโครเมตร
2. นำซีโอไลต์ที่มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 180 ไมโครเมตร ถึง 260 ไมโครเมตร ไปทำการบรรจุภายในคอลัมน์ดูดซับ โดยการใช้เส้นใยแก้วชนิดผืนทอละเอียด ปิดปลายคอลัมน์ทั้งสองด้าน ก่อนการนำไปต่อเข้ากับชุดทดสอบการดูดซับ
3. ให้ความร้อนแก่คอลัมน์ดูดซับ ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส และปรับทิศทางการไหลของก๊าซฮีเลียมบริสุทธิ์ให้ไหลผ่านสู่คอลัมน์ดูดซับ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงหยุดการให้ความร้อน ทั้งนี้เพื่อเป็นการกำจัดโมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ออก ก่อนทำการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ควบคุมอุณหภูมิของท่อปฏิกรณ์ที่ 0 องศาเซลเซียส สำหรับการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ
5. ตั้งสภาวะของเครื่องก๊าซ โครมาโทกราฟ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงสภาวะที่ใช้ในเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ เพื่อทำการทดสอบความสามารถในการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ

Injector Temp	120 ^{o}C
Carrier Gas	Helium
Flow	30 ml/min
Column Oven - Temp - Hold	 23 ^{o}C 3 min
Detector	TCD 140 ^{o}C

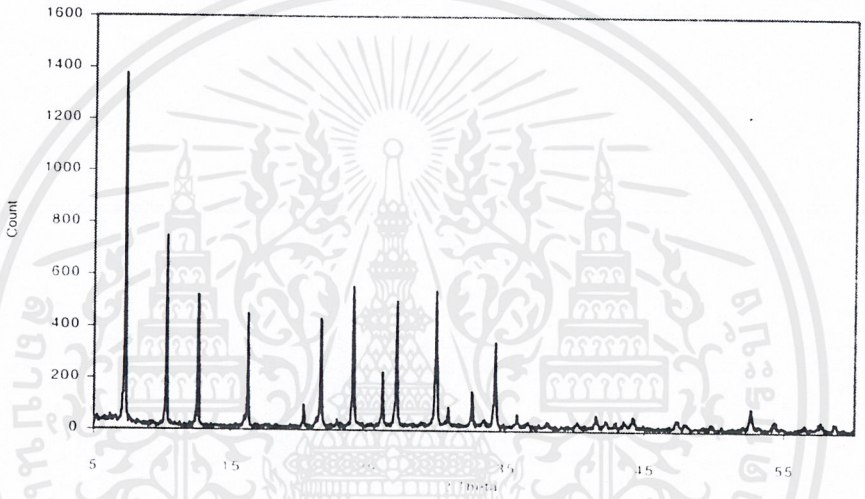
6. ในการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ จะทำการฉีดอากาศแห้งเข้าไปที่ตำแหน่งของ Injector ครั้งละ 1 มิลลิลิตร จนโครมาโทแกรมที่ได้มีค่าพื้นที่ใต้กราฟคงที่ จึงหยุดการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

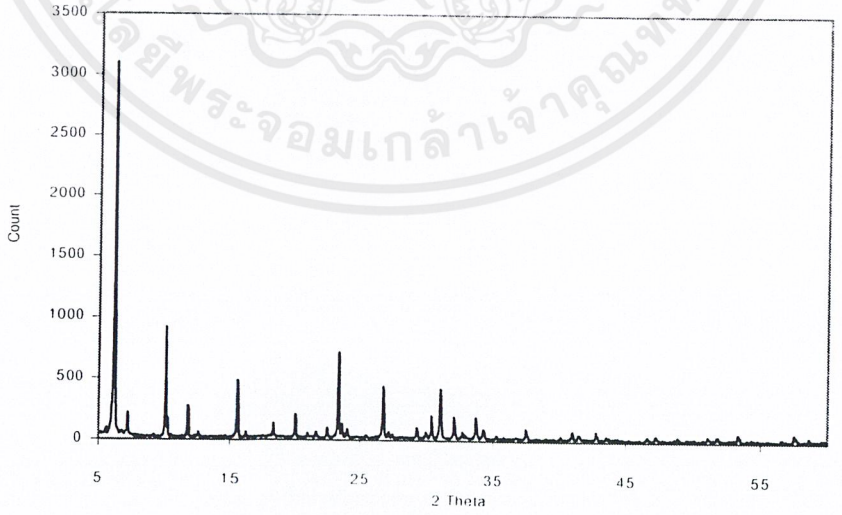
บทที่ 4
ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

4.1 ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อนำซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติก ไปทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จะได้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A



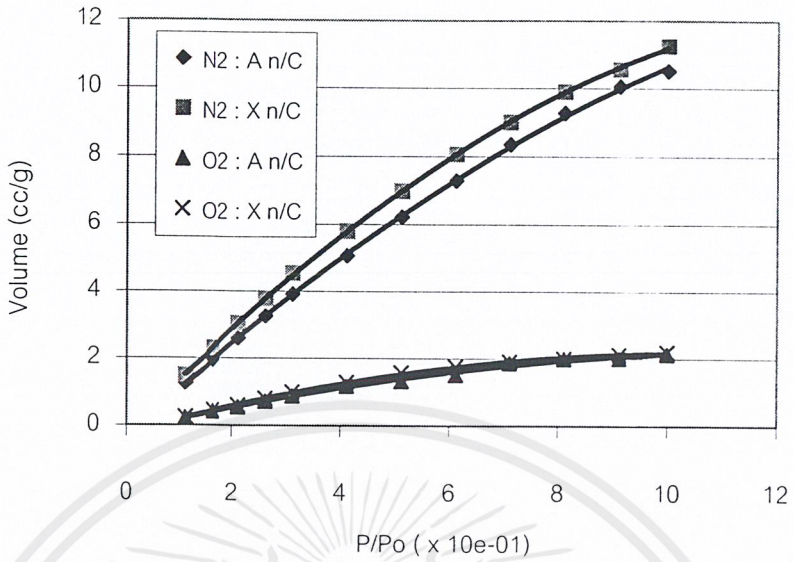
รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่าซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้มีความเป็นผลึกสูง โดยซีโอไลต์ X มีความเป็นผลึกสูงกว่าซีโอไลต์ A นอกจากนี้ยังพบ ว่าขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ทั้งสอง มีขนาดที่แตกต่างกันคือ ซีโอไลต์ X จะมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่กว่าซีโอไลต์ A ซึ่งสังเกตได้จาก ค่าของ d-Spacing ค่าแรก ของซีโอไลต์ X ขึ้นที่ตำแหน่งของมุม 2Theta ที่ตำแหน่ง 6.239 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าของซีโอไลต์ A ซึ่งมีค่าของค่า d-Spacing ค่าแรกขึ้นที่ตำแหน่งของมุม 2Theta ที่ตำแหน่ง 7.195

ความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X เป็นดังรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นรูปแสดงไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซไนโตรเจนแและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X จะพบว่าซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจน เนื่องจากการดูดซับนี้เป็นการดูดซับทางกายภาพ(Physisorption) ซึ่งเกิดจากแรง van der Waals ดังนั้นความสามารถในการดูดซับขึ้นกับ ความแตกต่างกันของขนาดโมเลกุล ความดันไอ (Vapor Pressure) และค่า Kinetic Diameter โดยซีโอไลต์จะสามารถดูดซับโมเลกุลที่มีความดันไอสูงกว่าและมีค่า Kinetic Diameter ที่ต่ำกว่า[3] ดังนั้น ก๊าซไนโตรเจนจึงถูกซีโอไลต์ดูดซับได้มากกว่าก๊าซออกซิเจน และจากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่า ซีโอไลต์ X มีความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้มากกว่าซีโอไลต์ A เล็กน้อยเนื่องจากขนาดของโมเลกุลของไนโตรเจนที่เล็กกว่าทำให้เกิดการแพร่เข้าสู่รูพรุนของซีโอไลต์ X ที่มีขนาดใหญ่ได้ดีกว่า ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนนั้นใกล้เคียงกัน ดังนั้น ลักษณะทางโครงสร้างของซีโอไลต์ A และ ซีโอไลต์ X ที่แตกต่างกัน ไม่เป็นปัจจัยสำคัญต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



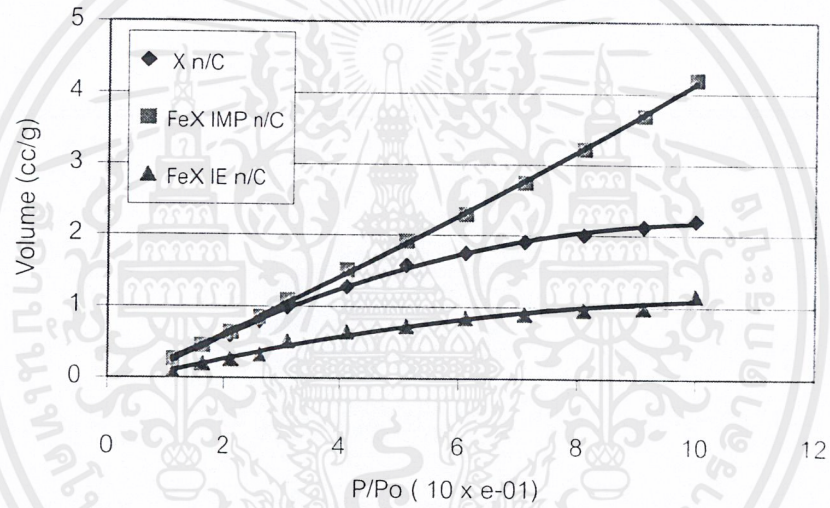
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 อิทธิพลของโลหะที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

4.2.1 เหล็กไอออน (Fe^{3+})

เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ด้วยเหล็กไอออนโดยวิธีการฝังตัว และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน แล้วนำไปทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน พบว่าได้ไอโซเทอร์ม การดูดซับก๊าซออกซิเจน ดังรูป 4.4 และ 4.5

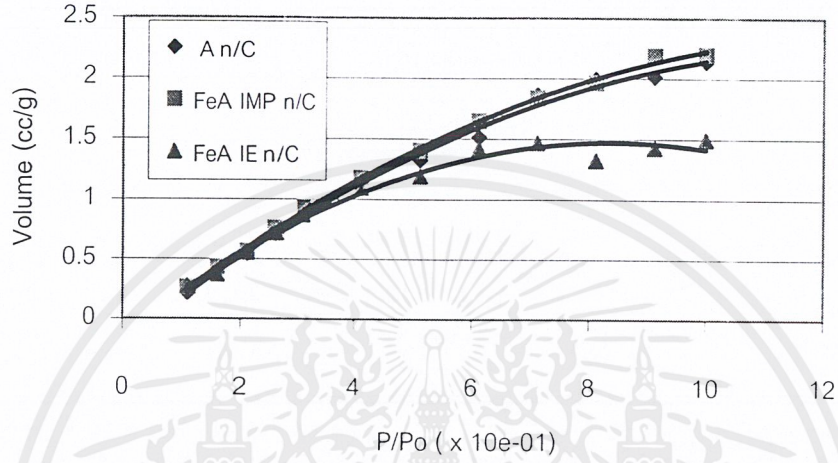


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ FeX IMP n/C และซีโอไลต์ FeX IE n/C

จากรูปที่ 4.4 จะพบว่าเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ X ด้วยเหล็กไอออนโดยวิธีการฝังตัว พบว่า ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ X ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติ ในขณะที่ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A ที่ทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยเหล็กไอออนโดยวิธีเดียวกัน (ในรูปที่ 4.5) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้สันนิษฐานได้ว่าเหล็กไอออนที่ใช้ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกในซีโอไลต์ X โดยวิธีการฝังตัว สามารถเกิดเป็นเหล็กออกไซด์เกิดขึ้น และฝังตัวอยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ X ทำให้สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีกับโมเลกุลของออกซิเจนได้ดีกว่าในกรณีของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

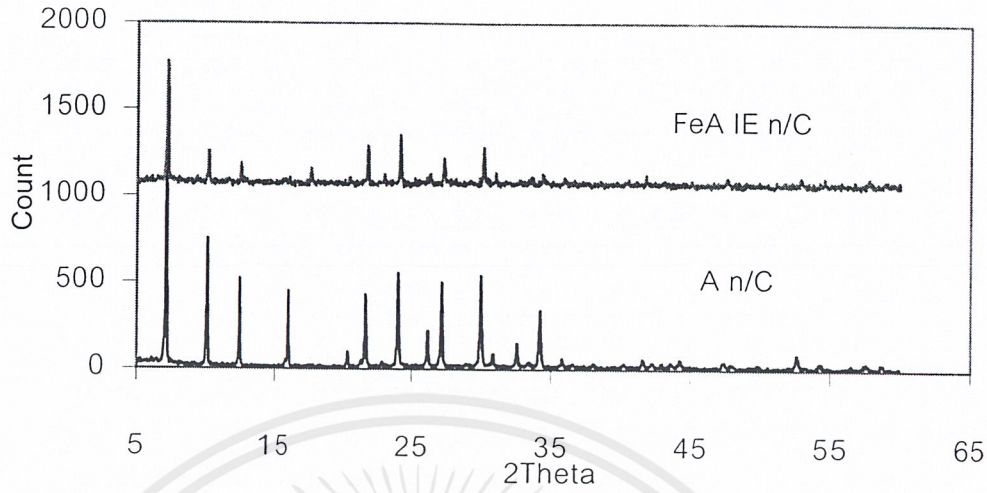
สมบัติด้วยเหล็กไอออนโดยวิธีการฝังตัว สันนิษฐานว่า เหล็กไม่สามารถเกิดเป็นเหล็กออกไซด์ขึ้นภายในรูพรุนของซีโอไลต์ A ได้ เนื่องจากขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ A มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของซีโอไลต์ X ทำให้เหล็กออกไซด์ที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ภายนอกรูพรุน ไม่สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ A การดูดซับก๊าซออกซิเจน จึงเกิดขึ้นได้ไม่ดี



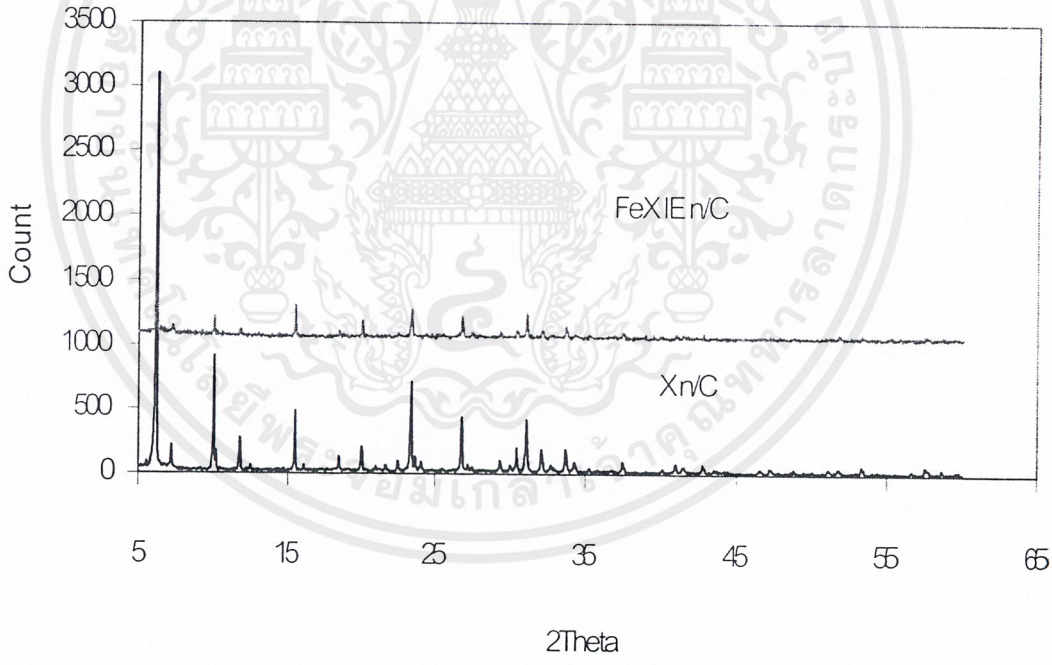
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ FeA IMP n/C และซีโอไลต์ FeA IE n/C

แต่ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ทั้งสองชนิดโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า การดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ และความสมบูรณ์ของโครงสร้างซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้ลดลงอย่างมาก ซึ่งสามารถสังเกตได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ FeA IE n/C



รูปที่ 4.7 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ของซีโอไลต์ X n/C และซีโอไลต์ FeX IE n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากในขั้นตอนของการแลกเปลี่ยนไอออน สารละลายเหล็กที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนค่อนข้างมีความเป็นกรด โดยเหล็ก จัดเป็น Hard Cation และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม พบว่าซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้ เป็นซีโอไลต์ประเภทที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูง ส่งผลให้ความสามารถในการทนต่อสภาวะที่เป็นกรดและความร้อนต่ำ โดยอะลูมิเนียมอาจเกิดการหลุดออกจากโครงสร้าง (Dislodgment) จึงทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X มีโอกาสที่จะเสียสภาพได้ โดยพิจรณาจากการตรวจสอบพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ (ตารางที่ 4.1 และ 4.2) พบว่าเมื่อปรับปรุงซีโอไลต์โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนแล้ว ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวลดลง และโครงสร้างของซีโอไลต์นั้นมีความเป็นผลึกลดลง ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออน

	สารตัวอย่าง		
	A n/c	FeA IMP n/C	FeA IE n/C
พื้นที่ผิว(m^2/g)	532.2	496.2	457.2
สีที่สังเกตเห็น	ขาว	ส้ม	ส้ม
Si/Al Ratio	0.9	0.9	1.0
ปริมาณโลหะ(%wt)	-	0.4	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

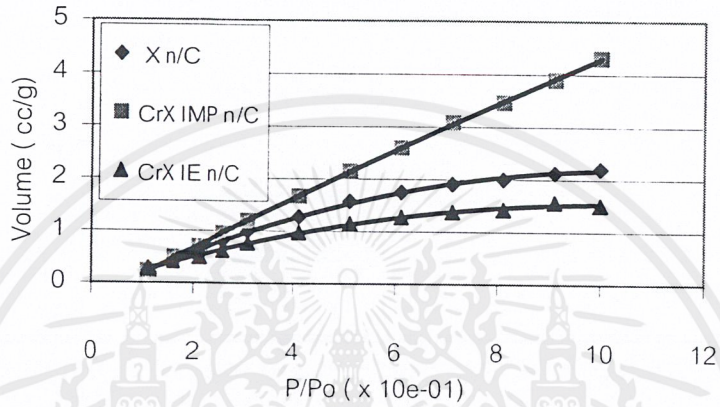
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออน

	สารตัวอย่าง		
	X n/c	FeX IMP n/C	FeX IE n/C
พื้นที่ผิว(m^2/g)	511.6	432.5	484.5
สีที่สังเกตเห็น	ขาว	ส้ม	ส้ม
Si/Al Ratio	1.1	1.1	1.1
ปริมาณโลหะ(%wt)	-	0.38	9.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 โครเมียมไอออน (Cr^{3+})

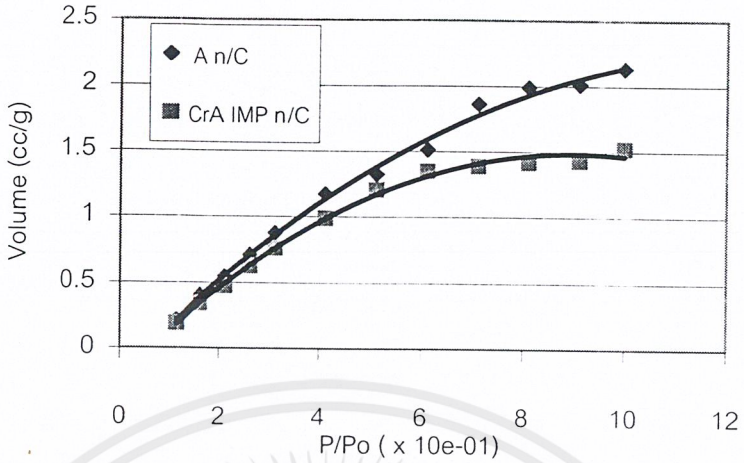
เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ด้วยโครเมียมไอออน โดยวิธีการฝังตัว และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน แล้วนำไปทำการทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน พบว่าได้ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจน ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจน ของซีโอไลต์ X n/C ซีโอลต์ CrX IMP n/C และซีโอไลต์ CrX IE n/C

จากรูปที่ 4.8 ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X ที่ทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยโครเมียมไอออนโดยวิธีการฝังตัว พบว่ามีแนวโน้มดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ เช่นเดียวกับการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยเหล็กไอออน สันนิษฐานได้ว่าโครเมียมไอออนสามารถเกิดเป็นโครเมียมออกไซด์ ขึ้นภายในรูพรุนของซีโอไลต์ X ในขณะที่ไม่เกิดในซีโอไลต์ A ซึ่งมีขนาดของรูพรุนที่เล็กกว่า ทำให้โครเมียมออกไซด์ที่เกิดขึ้น เกิดอยู่ภายนอกรูพรุนในลักษณะเดียวกับซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออนโดยวิธีการฝังตัว(หัวข้อ 4.2.1) การดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนจึงลดลง เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติก ดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจน ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ CrA IMP n/C

และจากการดูดซับก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นในซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออน และโครเมียมไอออนโดยวิธีการฝังตัว อนุมานได้ว่าเป็นการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบ คือ เกิดการดูดซับบนผิวของโลหะออกไซด์ในซีโอไลต์ และ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ของโลหะออกไซด์ ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$M^{+n}O_x + O_2 \longrightarrow O_2 \cdots\cdots MO \qquad (4.1)$$

$$M^{+n}O_x + O_2 \longrightarrow M^{+m}O_y \qquad (4.2)$$

โดย $m > n$ และ $y > x$

สมการที่ 4.1 สมการแสดงการดูดซับก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นบนผิวของโลหะออกไซด์

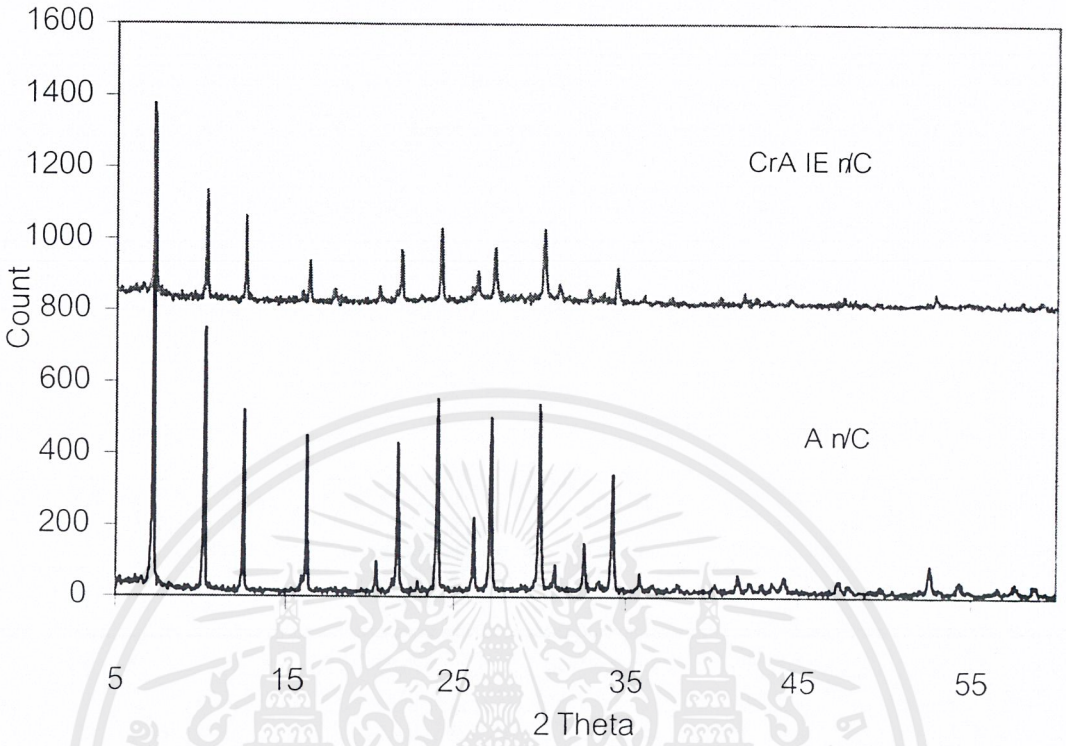
สมการที่ 4.2 สมการแสดงการดูดซับก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการปรับปรุง สมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A ด้วยโครเมียมไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า ในขั้นตอนการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น สารละลายโครเมียมที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนมีความเป็นกรดสูง เนื่องจากโครเมียมจัดเป็น Hard Cation เช่นเดียวกับ เหล็กไอออน ซีโอไลต์ A และ ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน จึงเสียสภาพตั้งแต่ในขั้นตอนของการแลกเปลี่ยนไอออน สังเกตุได้จากซีโอไลต์มีความเป็นผลึกลดลงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 และไม่สามารถหาค่าพื้นที่ผิวได้ดังตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ซีโอไลต์ A ที่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน มี Thermal Stability ที่ต่ำและเกิดการเสียสภาพขณะให้ความร้อน (350 °C) เมื่อทำการแคลไซน์

รูปที่ 4.10 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ของซีโอไลต์ X และซีโอไลต์ CrX IE n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ CrA IE n/C

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ สันนิษฐานได้ว่าโครงสร้างของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เกิดการเสียสภาพขึ้น ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความสมบูรณ์ของผลึกลดลง และจากตารางที่ 4.3 พบว่าค่าพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ไม่สามารถหาได้ และไม่สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน มีการเสียสภาพเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

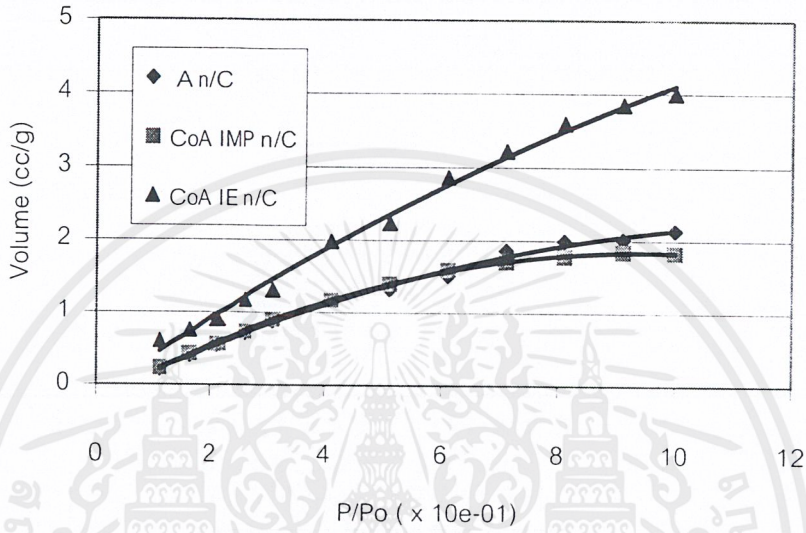
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโครเมียมไอออน

	สารตัวอย่าง		
	A n/C	CrA IMP n/C	CrA IE n/C
พื้นที่ผิว (m^2/g)	532.2	562.6	-
สีที่สังเกตเห็น	ขาว	เขียวอ่อน	เขียว
Si/Al Ratio	0.9	0.9	0.9
ปริมาณโลหะ (%wt)	-	0.3	0.79

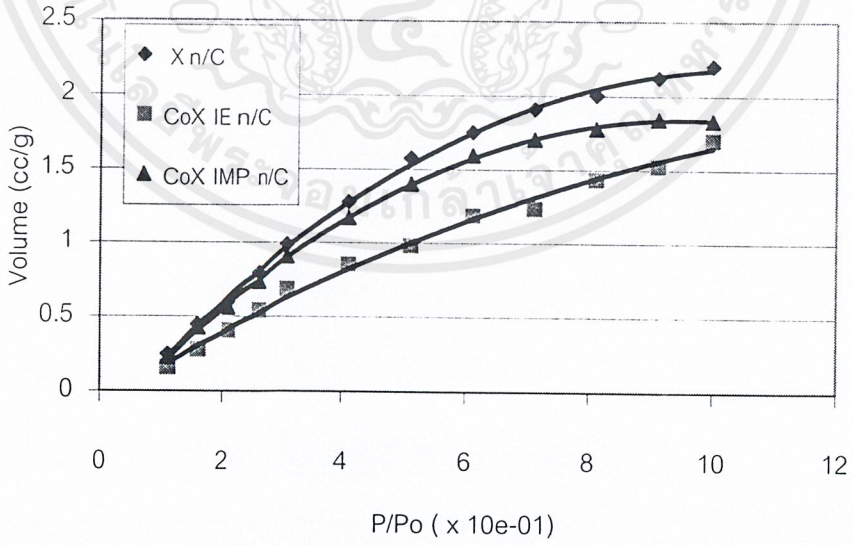
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 โคบอลต์ไอออน (Co^{2+})

เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการฝังตัว และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน แล้วนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน พบว่าได้ไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจน ดังรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ CoA IMP n/C และซีโอไลต์ CoA IE n/C



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ CoX IMP n/C และซีโอไลต์ CoX IE n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการฝังตัว พบว่า ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ ดังรูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13 สันนิษฐานได้ว่า โคบอลต์ไอออนเกิดเป็นโคบอลต์ออกไซด์ขึ้น โดยโคบอลต์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น ไม่เกิดอันตรกิริยาที่ดีกับก๊าซออกซิเจน ดังนั้น การดูดซับก๊าซออกซิเจนจึงลดลง

เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A ด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนปรับปรุงสมบัติ ดังรูปที่ 4.12 อนุมานได้ว่าโคบอลต์ไอออน สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนกับโซเดียมไอออน (Na^+) ในซีโอไลต์ A โดยเข้าไปอยู่ในรูพรุนในรูปแบบของ Exchangeable Cation ได้ หรือเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่ Silanol สังเกตได้จากพื้นที่ผิวที่ลดลง ดังตารางที่ 4.4

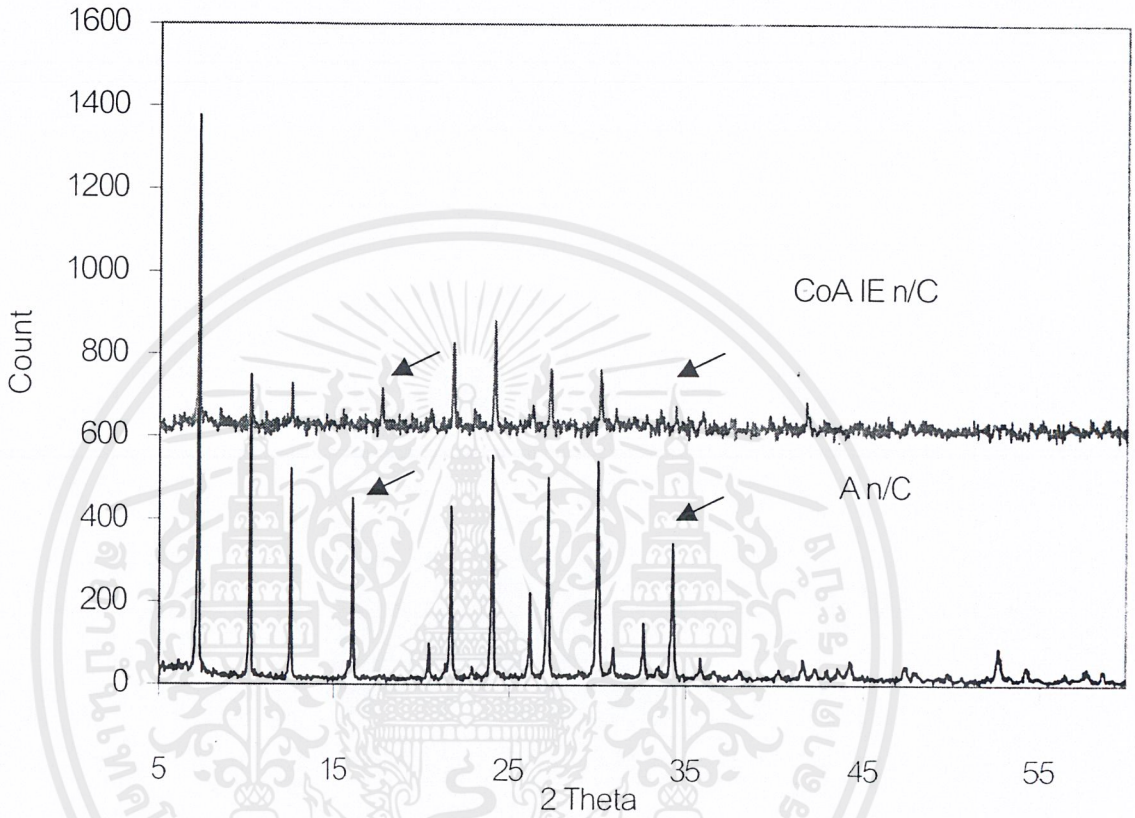
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

	สารตัวอย่าง	
	A n/C	CoA IE n/C
พื้นที่ผิว (m^2/g)	532.2	425.8
สีที่สังเกตเห็น	ขาว	ชมพู
Si/Al Ratio	0.9	0.9
ปริมาณโลหะ (% wt)	-	11.8

นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของโคบอลต์ไอออนที่ได้ทำการแลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมไอออนที่อยู่ในซีโอไลต์ A จะพบว่าโครงสร้างของซีโอไลต์ยังมีความสมบูรณ์อยู่ นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า ค่าของ d-Spacing ที่ตำแหน่งของ 2Theta ประมาณ 15 ของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน มีการเลื่อนตำแหน่งเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้น ทำให้อนุมานได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง (รูปที่ 4.14) โดยโคบอลต์ไอออนอาจอยู่ในตำแหน่งซึ่งทำให้โคบอลต์สามารถเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ดี การดูดซับก๊าซออกซิเจนจึงมากขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติ (รูปที่ 4.12)

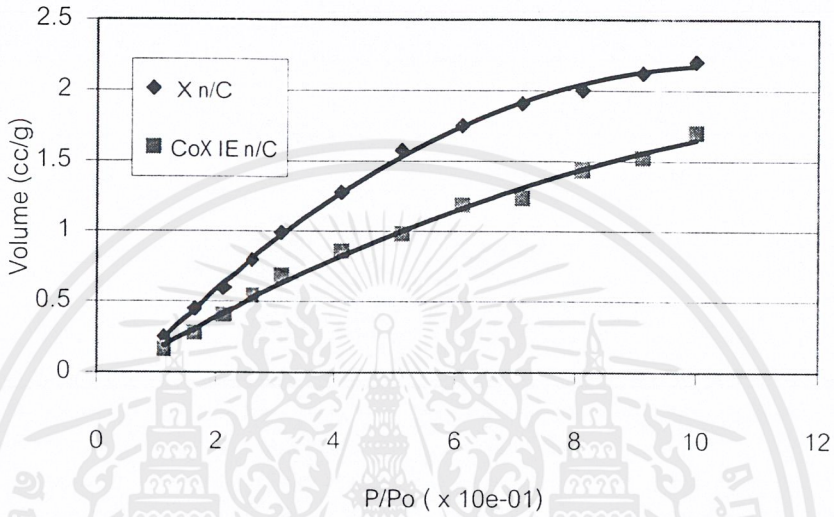


รูปที่ 4.14 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ CoA IE n/C

จากรูปที่ 4.14 จะสังเกตได้ว่า Noise มีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการดูดซับและกระเจิงแสงรังสีเอกซ์โดยโคบอลต์ ซึ่งเป็นโลหะทรานซิชันที่มีหมู่ใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ในเครื่องเอกซ์เรย์ ดิฟแฟรกโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer) ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้ CuKα เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ทำให้ค่าพลังงานของอิเลคตรอนในระดับชั้น Kα มีพลังงานที่ใกล้เคียงกัน โคบอลต์จึงมีโอกาสดูดกลืนและกระเจิงรังสีเอกซ์ได้ ค่า Noise จึงมีค่าที่สูงขึ้นกว่าปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลง เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ที่ไม่ปรับปรุงสมบัติ ดังรูปที่ 4.15



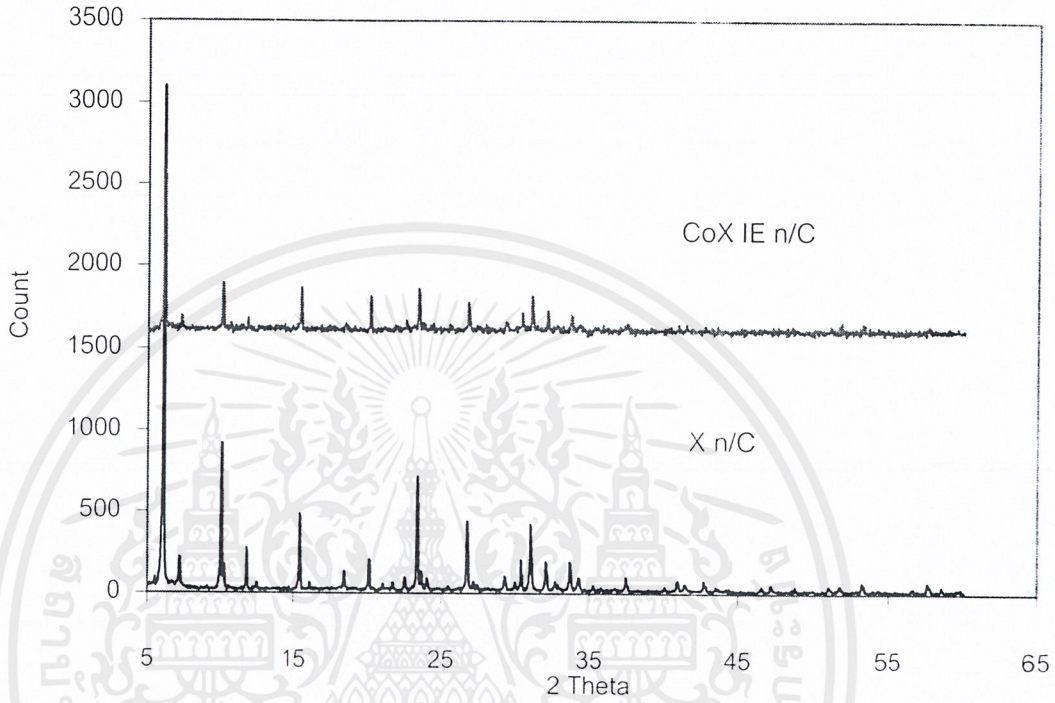
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจน ของ ซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ CoX IE n/C

จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ในรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจากไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนในรูปที่ 4.15 พบว่าซีโอไลต์ดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ลดลง ทำให้สันนิษฐานว่าโคบอลต์ไอออนที่อยู่ในรูปของ Exchangeable Cation สามารถเข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ X ซึ่งตำแหน่งที่โคบอลต์ไอออนเข้าไปอยู่นี้ทำให้โคบอลต์ไอออนเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดี

ตำแหน่งของโคบอลต์ไอออนที่อยู่ในซีโอไลต์ X นี้ แตกต่างจากตำแหน่งของโคบอลต์ไอออนที่อยู่ในซีโอไลต์ A โดยจะเห็นได้จากค่า d-Spacing ของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนไม่เกิดการเลื่อนตำแหน่งไปจากค่า d-Spacing ของซีโอไลต์ X ก่อนการปรับปรุงสมบัติ แต่รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนมีการเลื่อนตำแหน่งเกิดขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนปรับปรุงสมบัติ ดังนั้นการที่โคบอลต์ไอออนเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่แตกต่างกันในซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X จึงทำให้ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนการปรับปรุงสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนการปรับปรุงสมบัติ (รูปที่ 4.12)



รูปที่ 4.16 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ของซีโอไลต์ X n/C และซีโอไลต์ CoX IE n/C

สรุปได้ว่า เมื่อโคบอลต์ไอออนเกิดเป็นโคบอลต์ออกไซด์ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X จะทำให้อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์และก๊าซออกซิเจนลดลง ดังนั้นการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A และ ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการฝังตัว จึงลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ก่อนปรับปรุงสมบัติ แต่เมื่อโคบอลต์ไอออนยังคงอยู่ในรูปของ Exchangeable Cation ในซีโอไลต์ A จะทำให้อันตรกิริยาระหว่างซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และก๊าซออกซิเจนเกิดได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนปรับปรุงสมบัติ การดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์จึงมากขึ้น ส่วนโคบอลต์ไอออนในรูปของ Exchangeable Cation ในซีโอไลต์ X สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ สันนิษฐานได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 4.16 โดยโคบอลต์ไอออน อาจเข้าไปอยู่ใน

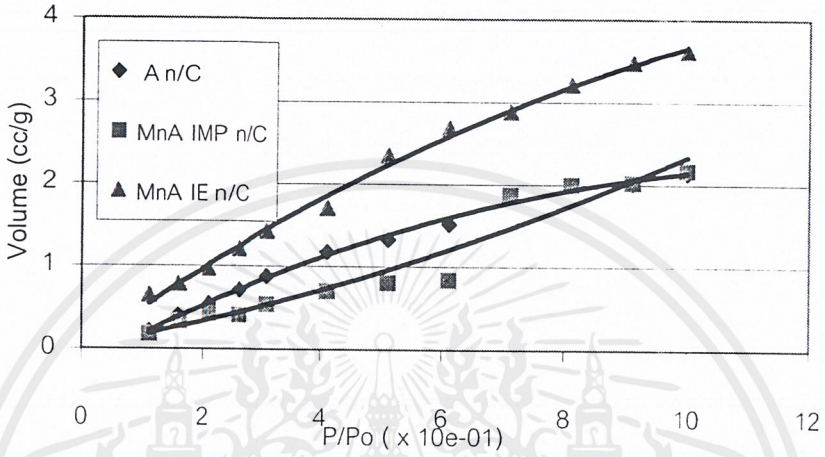
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งที่ทำให้โคบอลต์ไอออน ไม่สามารถเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนที่เหมาะสมได้ เช่น อยู่ใน ตำแหน่งของ Hexagonal Prism ในซีโอไลต์ X

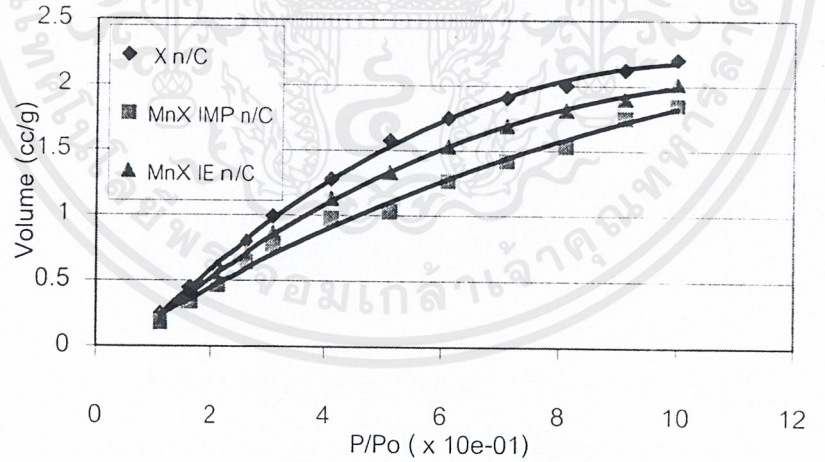
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 แมงกานีสไอออน (Mn^{2+})

เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ด้วยแมงกานีสไอออน โดยวิธีการฝังตัว และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน พบว่าได้ไอโซเทอร์มดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ MnA IMP n/C ซีโอไลต์ MnA IE n/C



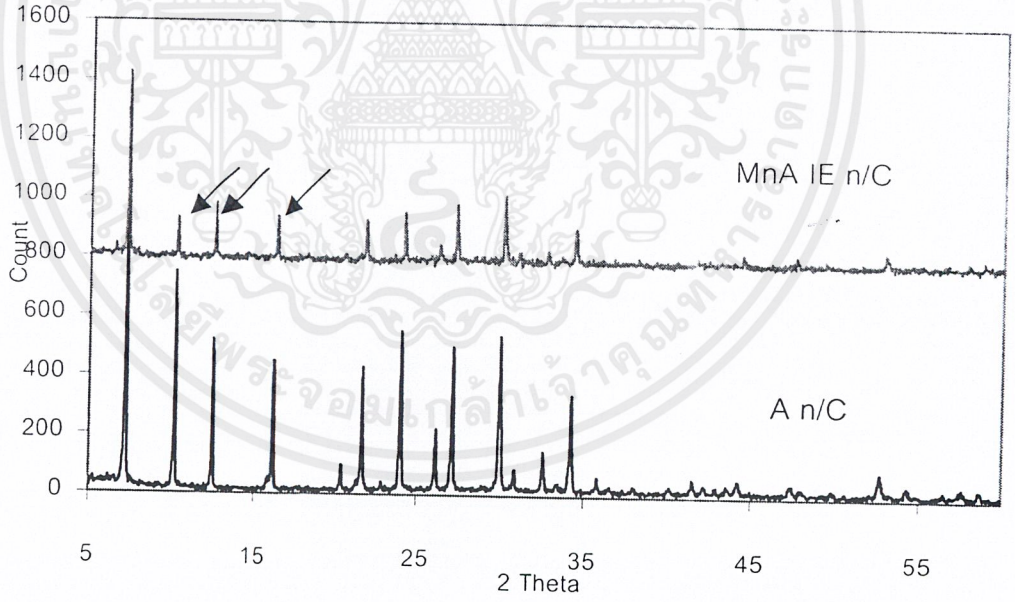
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ MnX IMP n/C ซีโอไลต์ MnX IE n/C

จากรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 พบว่าความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน ของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการฝังตัว มีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้สันนิษฐานได้ว่า แมงกานีสเกิดเป็นแมงกานีสออกไซด์ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ทั้งสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด ทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน เกิดขึ้นได้ไม่ดี เช่นเดียวกับกรณีของโคบอลต์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นในซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการฝังตัว ที่ดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ก่อนการปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างโลหะออกไซด์ของแมงกานีสและโคบอลต์กับก๊าซออกซิเจนเกิดได้ไม่ดี

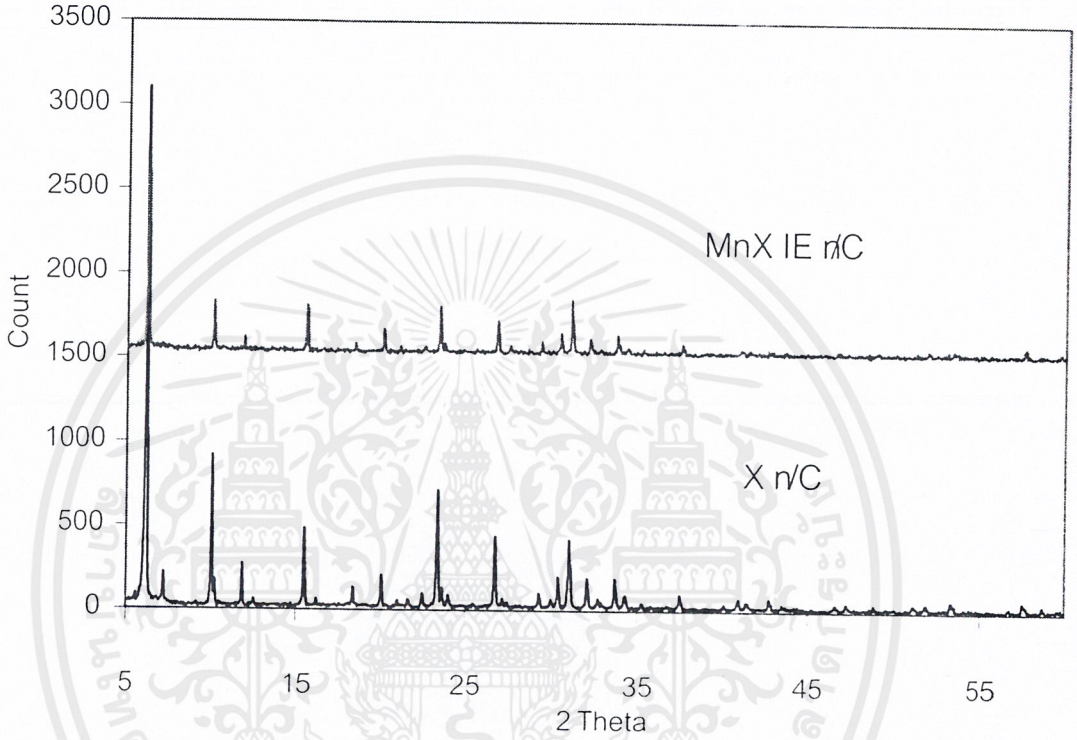
ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดี (รูปที่ 4.17) เช่นเดียวกับซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน แมงกานีสไอออนสามารถอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ A ในรูปของ Exchangeable Cation โดยแมงกานีสเข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ A ที่ทำให้แมงกานีสสามารถเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนการปรับปรุงและพบว่าโครงสร้างของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออน ดังรูปที่ 4.19 พบว่าความเป็นผลึกของซีโอไลต์ลดลง และมี Relative Intensity ของบางพีคเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสไอออนเข้าไปอยู่ในรูพรุนตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของซีโอไลต์ และตำแหน่งที่แมงกานีสเข้าไปอยู่นี้ ทำให้แมงกานีสไอออนเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ดี



รูปที่ 4.19 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ของซีโอไลต์ A n/C และซีโอไลต์ MnA IE n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

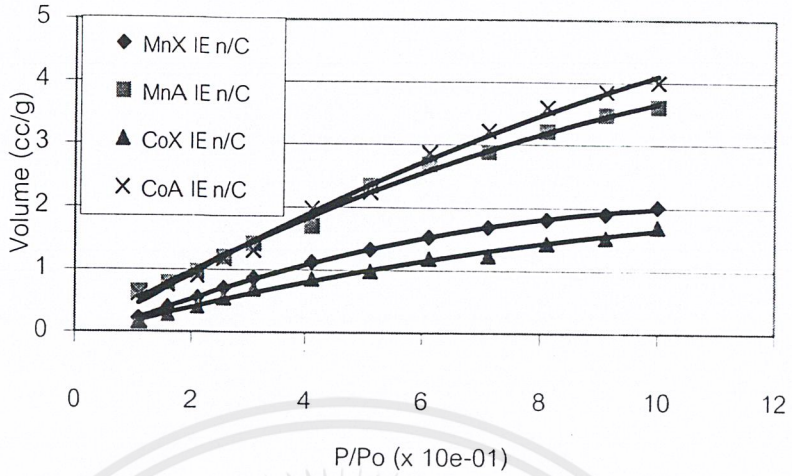
ในกรณีของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกโดยวิธีแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าแมงกานีส เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมไอออนได้ดี โดยเข้าไปอยู่ในรูพรุนในรูปของ Exchangeable Cation ได้ และโครงสร้างของซีโอไลต์ X ไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากความเป็นผลึกที่ลดลง ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X n/C และซีโอไลต์ MnX IE n/C

ตำแหน่งของแมงกานีสภายในรูพรุนของซีโอไลต์ X มีผลทำให้แมงกานีสไอออนดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ เหมือนกับกรณีของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ดังรูปที่ 4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

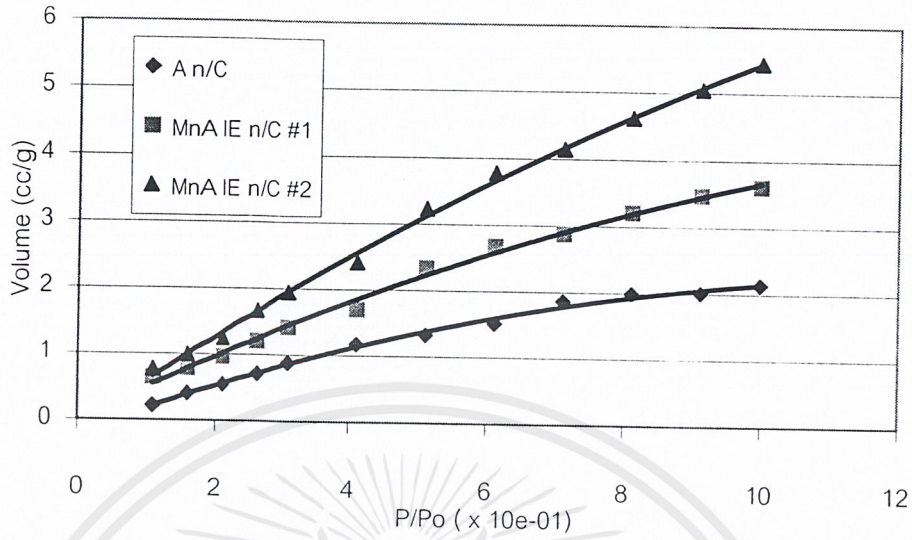


รูปที่ 4.21 รูปแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX IE n/C ซีโอไลต์ MnA IE n/C ซีโอไลต์ CoX IE n/C และซีโอไลต์ CoA IE n/C

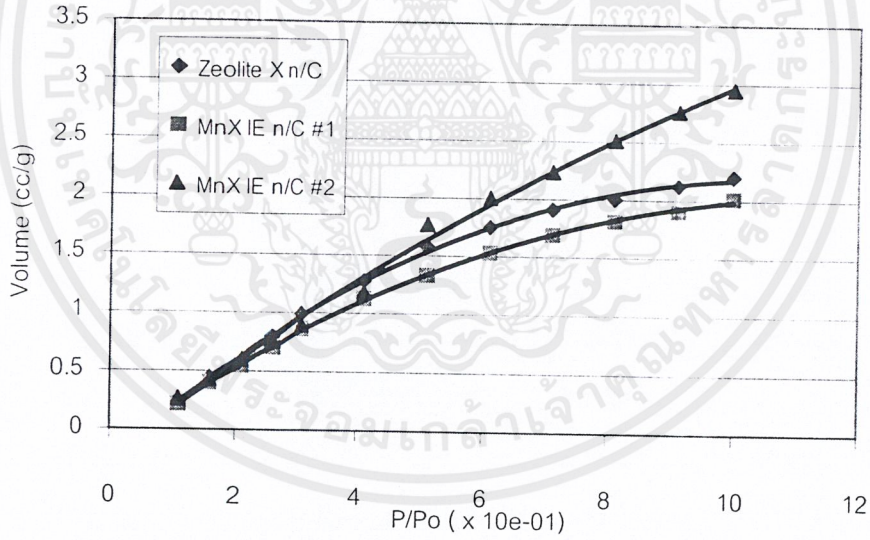
นอกจากนี้ พบว่า ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ทำให้อนุมานได้ว่าแมงกานีสไอออนที่อยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X มีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนที่ดีกว่าโคบอลต์ไอออน ดังรูปที่ 4.21

จากการทดลองการดูดซับก๊าซออกซิเจนติดต่อกัน 2 ครั้ง ของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า ทั้งซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X มีการดูดซับก๊าซออกซิเจนเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 สันนิษฐานว่า เมื่อซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เกิดการดูดซับก๊าซออกซิเจนไปแล้ว 1 ครั้ง ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแมงกานีสภายในรูพรุนของซีโอไลต์ ซึ่งโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงนี้ ทำให้แมงกานีส สามารถเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ดีขึ้น การดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 2 ของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน จึงมากขึ้น เมื่อเทียบกับการดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์ MnA IE n/C #1 และ ซีโอไลต์ MnA IE n/C #2



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ MnX IE n/C #1 และ ซีโอไลต์ MnX IE n/C #2

จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่า ชนิดของโลหะทรานซิชันมีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนโดยเหล็กไอออน และโครเมียมไอออน ซึ่งจัดเป็น Hard Cation สามารถช่วยให้ซีโอไลต์ มีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีขึ้น เมื่ออยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ ซึ่งจะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

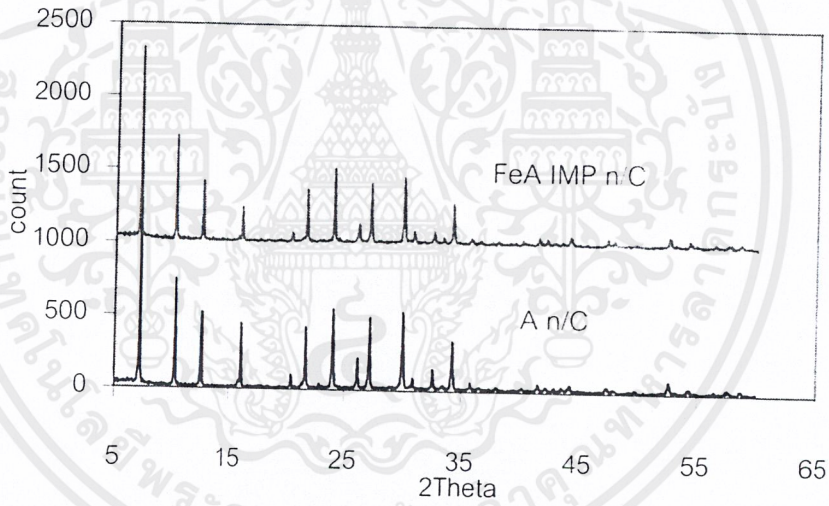
โลหะออกไซด์สามารถเกิดขึ้นในซีโอไลต์ X ที่มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ ได้ดีกว่าในซีโอไลต์ A ที่มีขนาดของรูพรุนที่เล็กกว่า ในขณะที่โคบอลต์ไอออน และแมงกานีสไอออน จะสามารถทำการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีเมื่ออยู่ในรูปของ Exchangeable Cation ซึ่งพบว่า โคบอลต์ไอออน สามารถเกิดขึ้นได้ดีในซีโอไลต์ A ส่วนแมงกานีสไอออนนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 อิทธิพลของวิธีการในการปรับปรุงสมบัติที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

4.3.1 อิทธิพลของวิธีการปรับปรุงสมบัติที่มีต่อโครงสร้างของซีโอไลต์

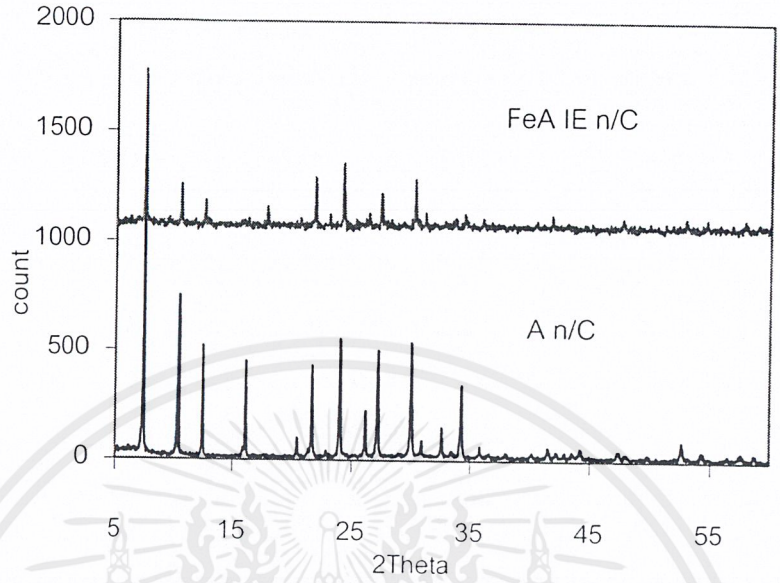
สำหรับวิธีการฝังตัว โลหะที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ อาจเกิดการตกตะกอนเป็นโลหะออกไซด์อยู่บริเวณผิวนอกหรือภายในรูพรุนของซีโอไลต์ เนื่องจากบริเวณผิวของซีโอไลต์มีความเป็นเบสสูง และในขณะทำการเตรียมซีโอไลต์ให้มีสมบัติความเป็นพาราแมกเนติก มีการควบคุมค่า pH ของของผสมระหว่างสารละลายโลหะและซีโอไลต์ให้อยู่ในช่วง 8.5-9 หรือโลหะบางส่วนอาจเข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ในรูปแบบของ Exchangeable Cation การปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ด้วยวิธีการฝังตัวนี้ พบว่าโครงสร้างของซีโอไลต์ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่4.24 ซึ่งเป็นตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงด้วยเหล็กไอออนโดยวิธีการฝังตัว



รูปที่ 4.24 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeA IMP n/C และซีโอไลต์ A n/C

ในการปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่า เมื่อปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ด้วยโลหะที่จัดเป็น Hard Cation ได้แก่ Fe^{3+} และ Cr^{3+} มีผลทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์ เกิดการเสียสภาพ ดังตัวอย่างรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนในรูปที่ 4.25 ซึ่งการเสียสภาพที่เกิดขึ้นมีผลให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลง ดังไอโซเทอร์มในรูปที่ 4.6 และ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ของซีโอไลต์ FeA IE n/C และซีโอไลต์ A n/C

4.3.2 อิทธิพลของวิธีการปรับปรุงสมบัติที่มีต่อ Active Site ของซีโอไลต์

จากวิธีการปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ X ด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออนโดยวิธีการฝังตัว พบว่า โลหะไอออนสามารถเกิดเป็นโลหะออกไซด์ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ X ได้ ซึ่งเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ สามารถเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ดี จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออนโดยวิธีการฝังตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ ดังรูปที่ 4.4 และ 4.8 แต่ในซีโอไลต์ A เหล็กไอออนและโครเมียมไอออนไม่สามารถเกิดเป็นโลหะออกไซด์ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ A ได้ ทำให้ซีโอไลต์เกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดี การดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออนโดยวิธีการฝังตัว จึงลดลง ดังรูปที่ 4.5 และ 4.9 อย่างไรก็ตาม เมื่อปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ด้วยโคบอลต์และแมงกานีสไอออนโดยวิธีการฝังตัว พบว่า การดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลงดังรูปที่ 4.13 และ 4.18 อนุมานได้ว่าเมื่อโคบอลต์และแมงกานีสไอออนเกิดเป็นโคบอลต์ออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งมีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนลดลง แต่เมื่อปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ A ด้วยโคบอลต์ไอออนและแมงกานีสไอออน โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าซีโอไลต์สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังรูปที่ 4.12 และ 4.17 ทำให้สันนิษฐานได้ว่าโคบอลต์ไอออนและแมงกานีสไอออน เมื่ออยู่ในรูปของ Exchangeable Cation ในรูพรุนของ ซีโอไลต์ A จะทำให้โคบอลต์ไอออนและแมงกานีสไอออน มีอันตรกิริยาที่ดีกับก๊าซออกซิเจน อย่างไรก็ตาม เมื่อปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ X ด้วยโคบอลต์ไอออนและแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ใกล้เคียงกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ ดังรูปที่ 4.13 และ 4.18 สันนิษฐานว่า โคบอลต์ไอออนและแมงกานีสไอออนอยู่ภายในรูพรุน ของซีโอไลต์ X ในรูปของ Exchangeable Cation แต่อาจอยู่ในรูพรุนที่เกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดี การดูดซับก๊าซออกซิเจนจึงไม่เปลี่ยนแปลง ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้ออิทธิพลของโลหะที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน (หัวข้อที่ 4.2)

จากผลการทดลองทำให้สรุปได้ว่าวิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์โดยแต่ละวิธีจะมีความเหมาะสมในการเตรียมโลหะทรานซิชันให้อยู่ในรูปที่มีการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ โดยวิธีการฝังตัว มีความเหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ X ด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออน ซึ่งจัดเป็น Hard Cation ให้เกิดเป็นโลหะออกไซด์เกิดขึ้นในรูพรุน ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนดีขึ้น สำหรับวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น มีความเหมาะสมในการปรับปรุงสมบัติของ ซีโอไลต์ A ด้วยโคบอลต์ไอออน และ ในการปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ A และ X ด้วยแมงกานีสไอออน เพื่อให้โลหะทั้งสองชนิดนี้อยู่ในซีโอไลต์ ในรูปของ Exchangeable Cation ภายในรูพรุนของ ซีโอไลต์ได้ ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 อิทธิพลของการแคลไซน์ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

การให้ความร้อนในขั้นตอนของการแคลไซน์ มีจุดประสงค์เพื่อ ทำการกำจัดโมเลกุลของออร์แกนิกเทมเพลต (Organic Template) และน้ำ ออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์ แต่เนื่องจากซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดลองจัดเป็นซีโอไลต์ประเภทที่มีปริมาณของอะลูมิเนียมที่สูง ดังนั้นความเสถียรต่อความร้อนจึงต่ำ และนอกจากนี้ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ยังมีโลหะทรานซิชันอยู่ในรูปแบบต่างๆ เช่น Exchangeable Cation หรือ Metal Cluster โดยที่โลหะทรานซิชันบางตัว เมื่อได้รับความร้อนอาจมีการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเกิดขึ้น ซึ่งเป็นทั้งผลดี และผลเสียต่อโครงสร้างของซีโอไลต์

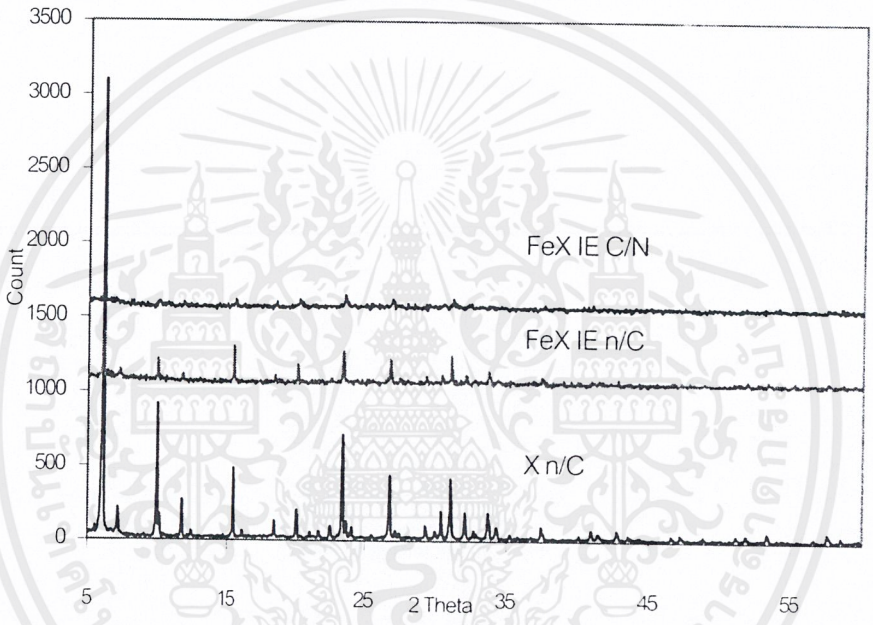
ในกรณีของซีโอไลต์ที่ทำการปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการฝังตัวนั้น เมื่อนำไปทำการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง พบว่ามีเพียงความเป็นผลึกของซีโอไลต์เท่านั้นที่ลดลง และความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากการดูดซับก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นนั้น เป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งเมื่อทำการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้งซึ่งมีก๊าซออกซิเจนอยู่ ทำให้โลหะออกไซด์มีการดูดซับก๊าซออกซิเจนขึ้นแล้วในขั้นตอน จะสังเกตได้จากสีที่เปลี่ยนไปจากเดิม ดังตารางที่ 4.5 เมื่อนำไปทำการดูดซับก๊าซออกซิเจนอีกครั้งการดูดซับจึงไม่เกิดขึ้น เนื่องจาก Active Site เปลี่ยนรูปเป็น Oxidizing form หลังจากการแคลไซน์ ดังนั้นการดูดซับก๊าซออกซิเจนหลังการเผาในบรรยากาศของอากาศแห้งจึงเป็นการดูดซับทางกายภาพ(Physisorption)

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงสีของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออน และโครเมียมไอออน โดยวิธีการฝังตัว

ชนิดซีโอไลต์	FeA IMP n/C	FeA IMP C/O	CrA IMP n/C	CrA IMP C/O
สีที่สังเกตเห็น	ส้ม	ส้ม	เขียวอ่อน	เหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

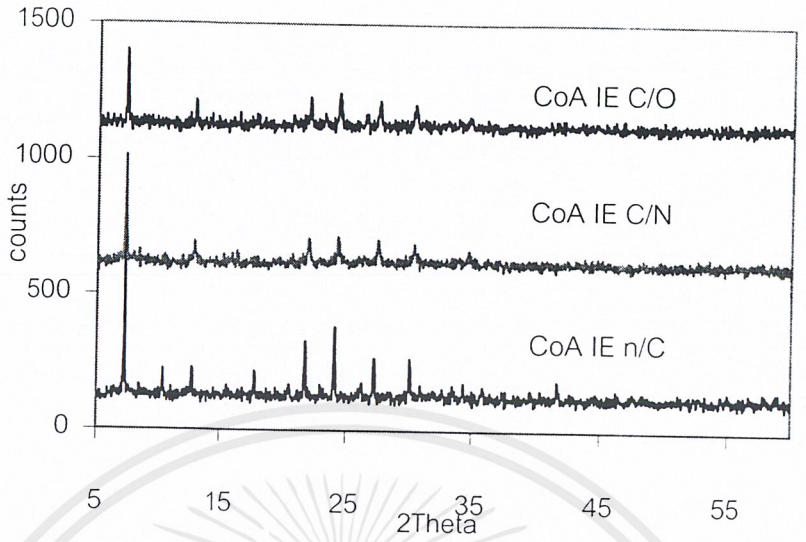
แต่ในกรณีของวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น พบว่าการแคลไซน์และบรรยากาศที่ใช้ในการแคลไซน์ มีผลต่อโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ คือ ซีโอไลต์ที่ทำการปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนกับเหล็กไอออนและโครเมียมไอออน ซึ่งจัดเป็น Hard Cation พบว่าหลังจากการแคลไซน์แล้วโครงสร้างของซีโอไลต์มีความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากโลหะไอออนเกิดการออกซิไดซ์กลายเป็นโลหะออกไซด์เกิดขึ้นซึ่งทำให้โครงสร้างมีการเสียสภาพ ดังตัวอย่างของซีโอไลต์ X ที่ทำการปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งจะพบว่าเมื่อทำการแคลไซน์แล้ว โครงสร้างมีการเสียสภาพเกิดขึ้น



รูปที่ 4.26 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X n/C ซีโอไลต์ FeX IE n/C และซีโอไลต์ FeX IE C/N

ในกรณีของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อทำการแคลไซน์ซีโอไลต์ ในบรรยากาศของอากาศแห้ง พบว่า ความเป็นผลึกของซีโอไลต์ลดลง ดังรูปที่ 4.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ ซีโอไลต์ CoA IE n/C ซีโอไลต์ CoA IE C/N และซีโอไลต์ CoA IE C/O

เนื่องจากโคบอลต์ไอออนที่อยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ A เกิดการออกซิไดซ์กลายเป็นโคบอลต์ออกไซด์ ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์ A มีการเสียสภาพเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้จากสีที่เปลี่ยนแปลงและค่าของพื้นที่ผิวที่ลดลง ดังตารางที่ 4.6 เป็นผลให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้นได้ไม่ดีดังรูปที่ 4.28

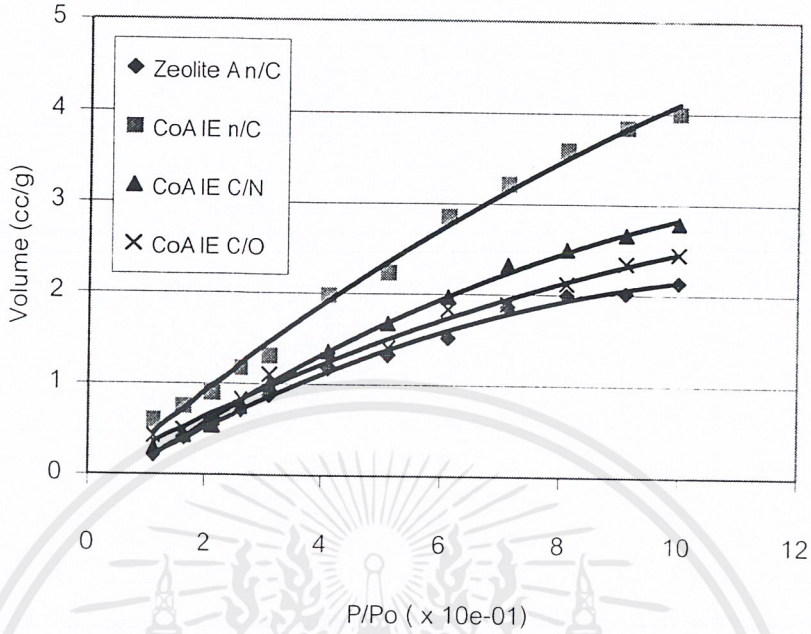
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ไนโตรเจนและไม่แคลไซน์

	สารตัวอย่าง			
	A n/C	CoA IE n/C	CoA IE C/N	CoA IE C/O
พื้นที่ผิว (m^2/g)	532.2	425.8	460.9	350
สีที่สังเกตเห็น	ขาว	ชมพู	ครีม	เทา
Si/Al Ratio	0.9	0.9	0.9	0.9
ปริมาณโลหะ(%wt)	-	11.8	11.8	11.8

ทำให้สันนิษฐานได้ว่า เมื่อโคบอลต์ผ่านกระบวนการทางความร้อนในบรรยากาศของอากาศแห้งแล้ว โคบอลต์ในซีโอไลต์ A เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เกิดเป็นโคบอลต์ออกไซด์ โดยสังเกตได้จากสีที่เปลี่ยนไป ดังตารางที่ 4.6 ทำให้โคบอลต์มีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดี ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนจึงลดลง เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและไม่แคลไซน์ ดังรูปที่ 4.28 แต่เมื่อนำซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ไปแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน พบว่าสีของซีโอไลต์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและไม่แคลไซน์ เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำภายในรูพรุนของซีโอไลต์ โคบอลต์ไอออนจึงเกิดการเปลี่ยนสีจากสีชมพูเป็นสีครีม ทำให้สันนิษฐานได้ว่า เมื่อโคบอลต์ผ่านกระบวนการทางความร้อนในบรรยากาศของไนโตรเจน โคบอลต์ในซีโอไลต์ A ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เนื่องจากโคบอลต์ออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะทำให้ซีโอไลต์มีสีเทา ดังตารางที่ 4.6 และความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลง เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและไม่แคลไซน์ ดังรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าความร้อนที่ใช้ในการแคลไซน์มีผลทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เกิดการเปลี่ยนแปลง และบรรยากาศที่ใช้ในการแคลไซน์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C ซีโอไลต์CoA IE n/C ซีโอไลต์ CoA IE C/N และซีโอไลต์ CoA IE C/O

ในกรณีซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออน เมื่อผ่านการแคลไซน์ทั้งในบรรยากาศของไนโตรเจนและในบรรยากาศของอากาศแห้ง พบว่าสีของซีโอไลต์มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและไม่แคลไซน์ เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำภายในรูพรุนของซีโอไลต์ โคบอลต์ไอออนจึงเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีคราม แสดงให้เห็นว่าโคบอลต์ไอออนไม่เกิดเป็นโคบอลต์ออกไซด์ โดยโคบอลต์ออกไซด์จะทำให้ซีโอไลต์กลายเป็นสีเทา ดังตารางที่ 4.7

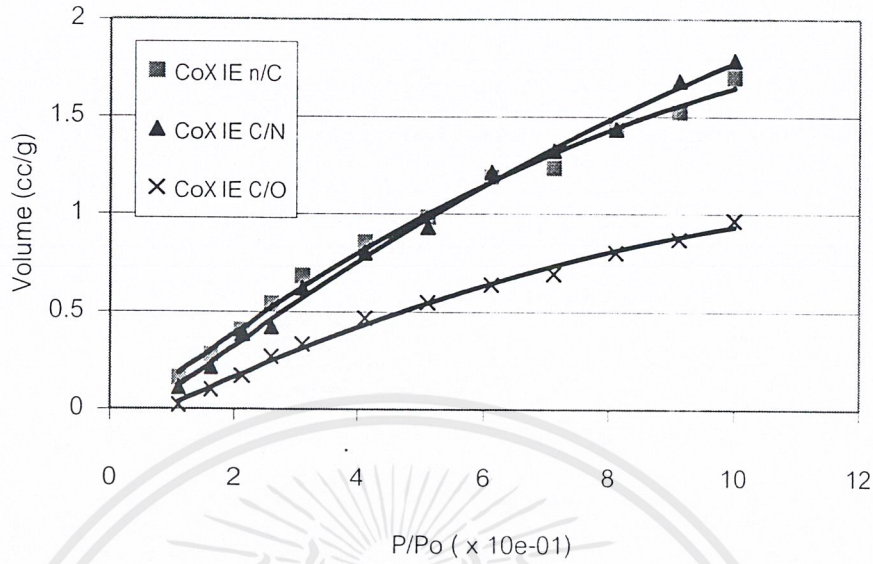
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออน โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ไนโตรเจนและไม่แคลไซน์

	สารตัวอย่าง			
	X n/C	CoX IE n/C	CoX IE C/N	CoX IE C/O
พื้นที่ผิว (m^2/g)	511.6	709.3	616.2	442.1
สีที่สังเกตเห็น	ขาว	ชมพู	คราม	คราม
Si/Al Ratio	1.1	1.1	1.1	1.1
ปริมาณโลหะ(%wt)	-	11.64	11.64	11.64

และจากรูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นว่าการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนที่แคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ใกล้เคียงกับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ไม่แคลไซน์ แต่ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีเดียวกันนี้ เมื่อผ่านการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้งแล้วพบว่าความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนที่ไม่แคลไซน์

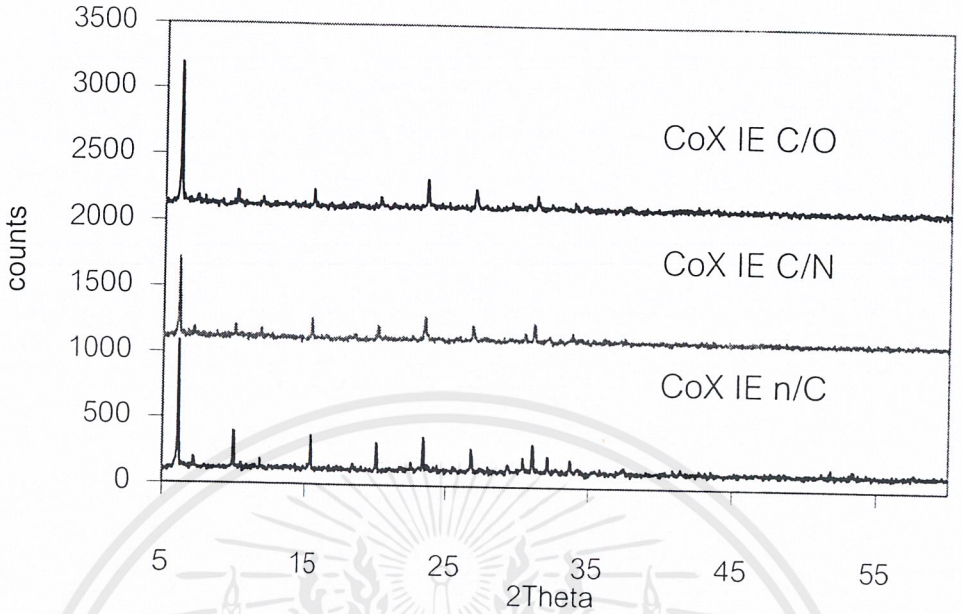
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ ซีโอไลต์ CoX IE n/C ซีโอไลต์ CoX IE C/N และซีโอไลต์ CoX IE C/O

ทำให้สันนิษฐานได้ว่าความร้อนไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนแต่บรรยากาศในการแคลไซน์ มีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้งทำให้โครงสร้างมีการเสียสภาพเกิดขึ้น ซึ่งสังเกตจากพื้นที่ผิวที่ลดลงอย่างมาก ดังตารางที่ 4.7

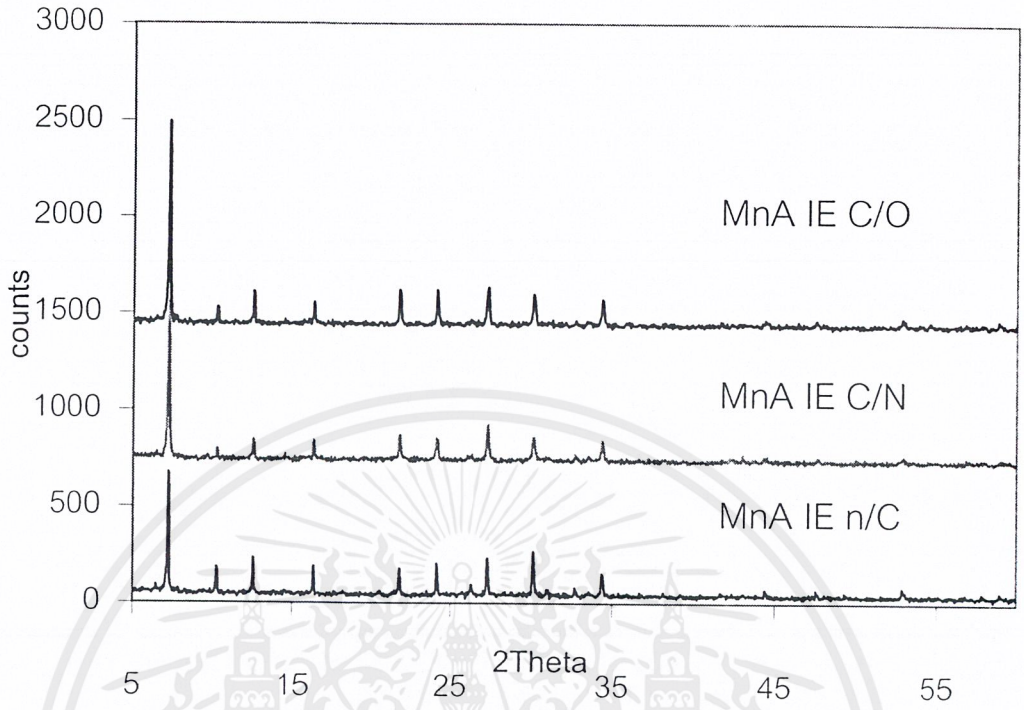
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



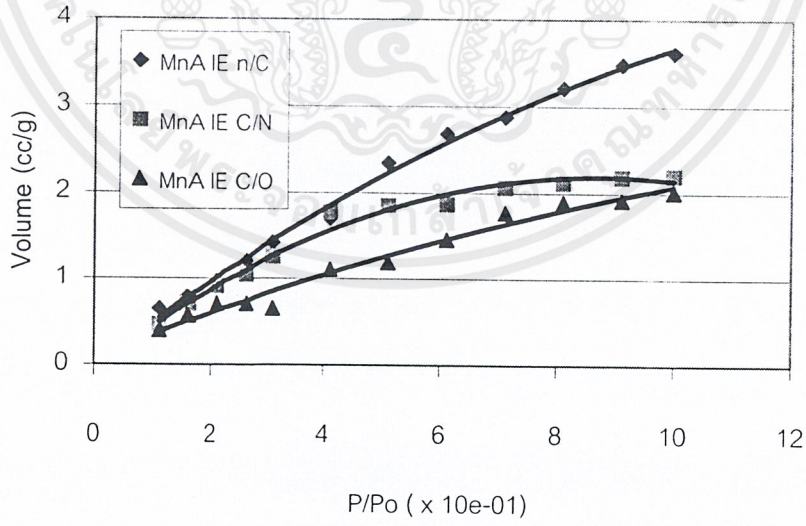
รูปที่ 4.30 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ของ ซีโอไลต์ CoX IE n/C ซีโอไลต์ CoX IE C/N และซีโอไลต์ CoX IE C/O

สำหรับซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออน โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าผลจากการให้ความร้อนในขั้นตอนการแคลไซน์ไม่มีผลต่อการดูดซับก๊าซออกซิเจนในซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน สังเกตุจากโครงสร้างของซีโอไลต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.31 แต่บรรยากาศที่ใช้ในการแคลไซน์มีผลต่อการดูดซับ คือ เมื่อทำการแคลไซน์ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ในบรรยากาศของอากาศแห้ง พบว่าความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและไม่แคลไซน์ ทำให้สันนิษฐานว่าซีโอไลต์ได้ทำการดูดซับก๊าซออกซิเจนไปแล้วในขณะทำการแคลไซน์ และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ดังนั้นแมงกานีสออกไซด์ที่เกิดขึ้น จะมีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดี การดูดซับก๊าซออกซิเจนจึงลดลง เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและไม่แคลไซน์ ดังรูปที่ 4.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



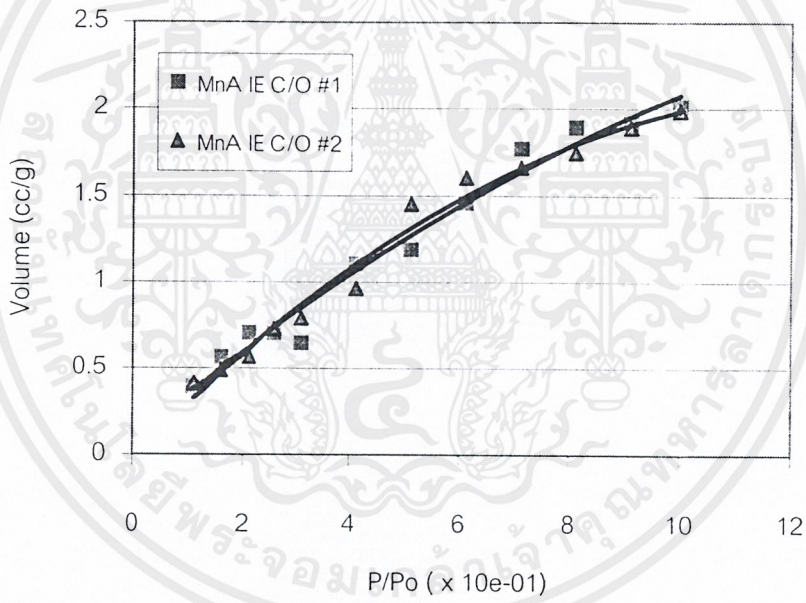
รูปที่ 4.31 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
ของ ซีโอไลต์ MnA IE n/C ซีโอไลต์ MnA IE C/N และซีโอไลต์ MnA IE C/O



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของ
ซีโอไลต์ MnA IE n/C ซีโอไลต์ MnA IE C/N และซีโอไลต์ MnA IE C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

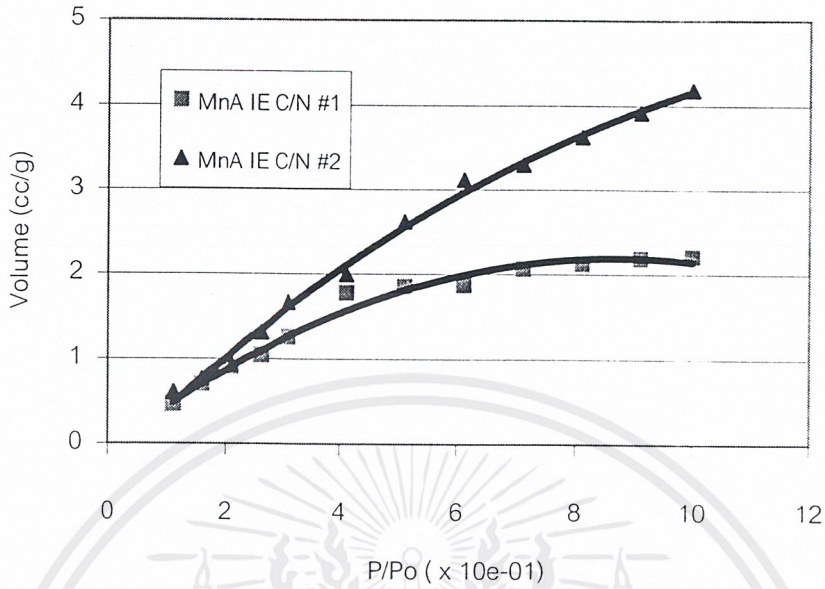
เมื่อนำซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง มาทดสอบการดูดซับก๊าซออกซิเจน 2 ครั้ง พบว่าการดูดซับของซีโอไลต์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในการดูดซับครั้งที่ 2 เมื่อเทียบกับการดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 1 ดังรูปที่ 4.33 และการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) สันนิษฐานว่าซีโอไลต์ได้ดูดซับก๊าซออกซิเจนในขณะทำการแคลไซน์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น แมงกานีสไอออนภายในรูพรุนของซีโอไลต์ จึงเปลี่ยนรูปเป็นแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งแมงกานีสออกไซด์ สามารถเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดี ดังนั้นการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้งในครั้งที่2 จึงไม่แตกต่างจากการดูดซับครั้งที่ 1



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจน
ของ ซีโอไลต์ MnA IE C/O # 1 และซีโอไลต์ MnA IE C/O # 2

สำหรับการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออน โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน พบว่าการดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 2 ดีกว่าการดูดซับในครั้งที่ 1 ดังรูปที่ 4.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

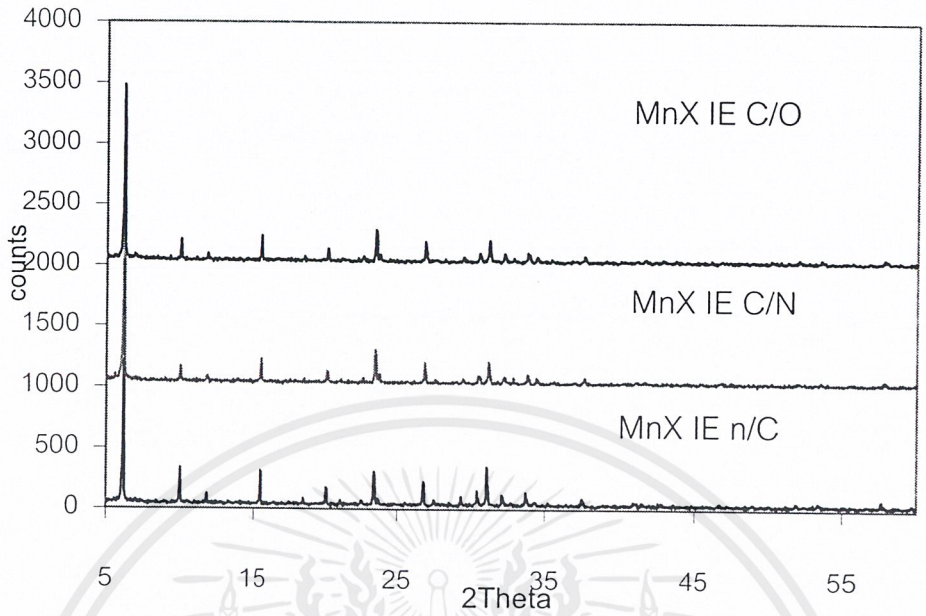


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจน ของ ซีโอไลต์ MnA IE C/N # 1 และซีโอไลต์ MnA IE C/N # 2

เมื่อซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน ดูดซับก๊าซออกซิเจนไปแล้ว 1 ครั้ง แล้วสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 2 ได้มากขึ้น ทำให้อนุมานได้ว่าโครงสร้างของแมงกานีสมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น โดยเกิดเป็นโครงสร้างที่สามารถเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ดี แต่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเหมือนการแคลไซด์ด้วยออกซิเจน การดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 2 จึงมากขึ้น เมื่อเทียบกับการดูดซับครั้งที่ 1

สำหรับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อทำการแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจนแล้ว พบว่าความสมบูรณ์ของผลึกเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.35 และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นด้วยดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



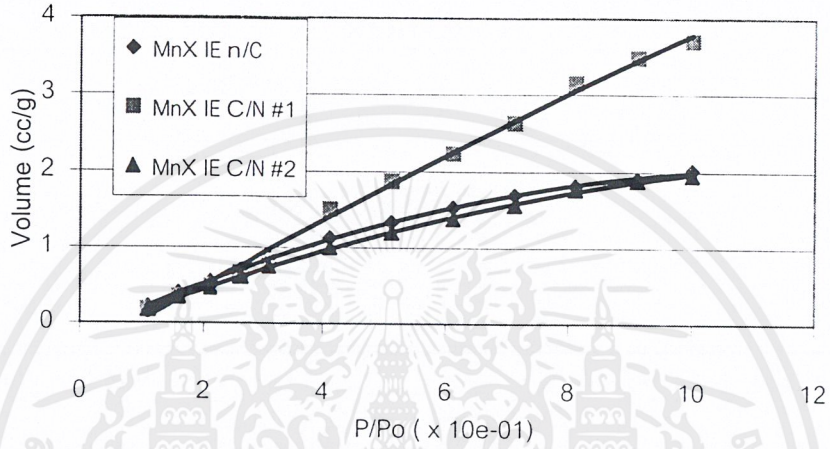
รูปที่ 4.35 รูปแสดงการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnX IE n/C ซีโอไลต์ MnX IE C/N และซีโอไลต์ MnX IE C/O

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออน โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ไนโตรเจนและไม่แคลไซน์

	สารตัวอย่าง			
	X n/C	MnX IE n/C	MnX IE C/N	MnX IE C/O
พื้นที่ผิว (m^2/g)	511.6	411.1	456	451
สีที่สังเกตเห็น	ขาว	ขาว	ขาว	ขาว
Si/Al Ratio	1.1	1.1	1.1	1.1
ปริมาณโลหะ(%wt)	-	9.06	9.06	9.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.35 จะเห็นได้ว่าความเป็นผลึกของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน เพิ่มขึ้น ทำให้สันนิษฐานได้ว่าเกิด Solid State Exchange ขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนดีขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.36



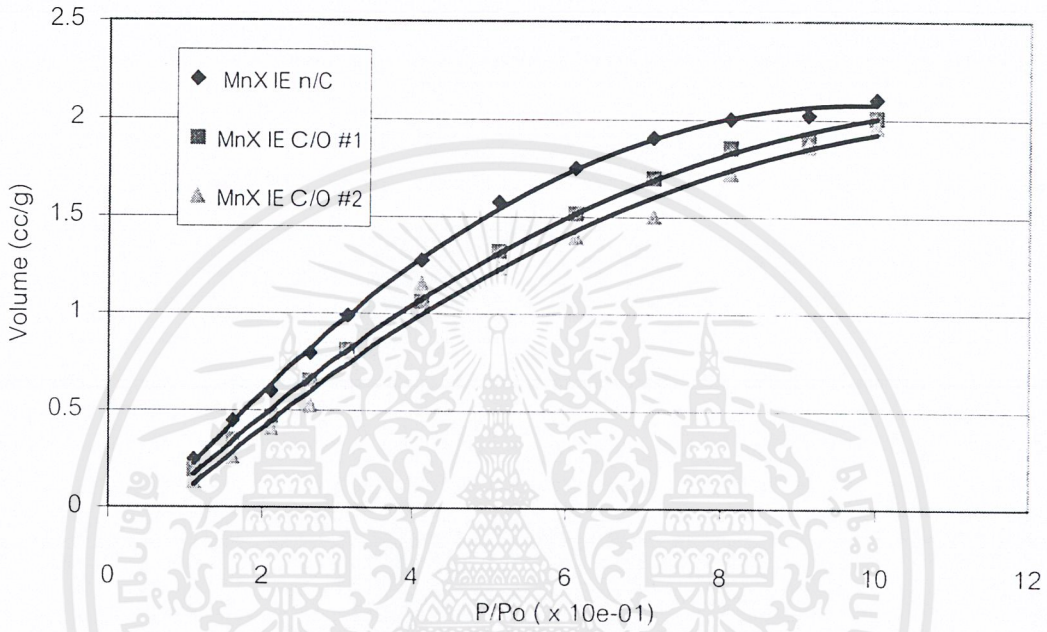
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX IE C/N # 1 และซีโอไลต์ MnX IE C/N # 2

แมงกานีสที่อยู่ในรูปของ Exchangeable Cation นั้น เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อนแล้วจะเกิด Solid State Exchange เกิดขึ้น คือ แมงกานีส ที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับโซเดียมไอออนจะเข้าไปอยู่ใน Supercage ของซีโอไลต์ X เมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน แมงกานีสไอออน อาจเกิดการเคลื่อนย้ายเข้าไปอยู่ใน Sodalite Cage หรือ Hexagonal Prism ของซีโอไลต์ X ซึ่งเมื่อเกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้น ซีโอไลต์ จะมีความสมบูรณ์ของผลึกดีขึ้น ความหนาแน่นและพื้นที่ผิวจึงเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.35 จึงเป็นผลให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจนในครั้งที่ 1 มีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและไม่แคลไซน์ ดังรูปที่ 4.36

อย่างไรก็ตามเมื่อซีโอไลต์ ดูดซับก๊าซออกซิเจนไปแล้ว 1 ครั้ง อาจทำให้ แมงกานีสเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นแมงกานีสออกไซด์ ดังนั้นแมงกานีสจะเกิดอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ไม่ดี การดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 2 จึงลดลงเมื่อเทียบกับการดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในกรณีเดียวกันนี้ ถ้าทำการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง สันนิษฐานว่าแมงกานีสไอออน กลายเป็นแมงกานีสออกไซด์ ทำให้การทดสอบการดูดซับก๊าซออกซิเจนทั้ง 2 ครั้ง ลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและไม่แคลไซน์ ดังรูปที่ 4.37



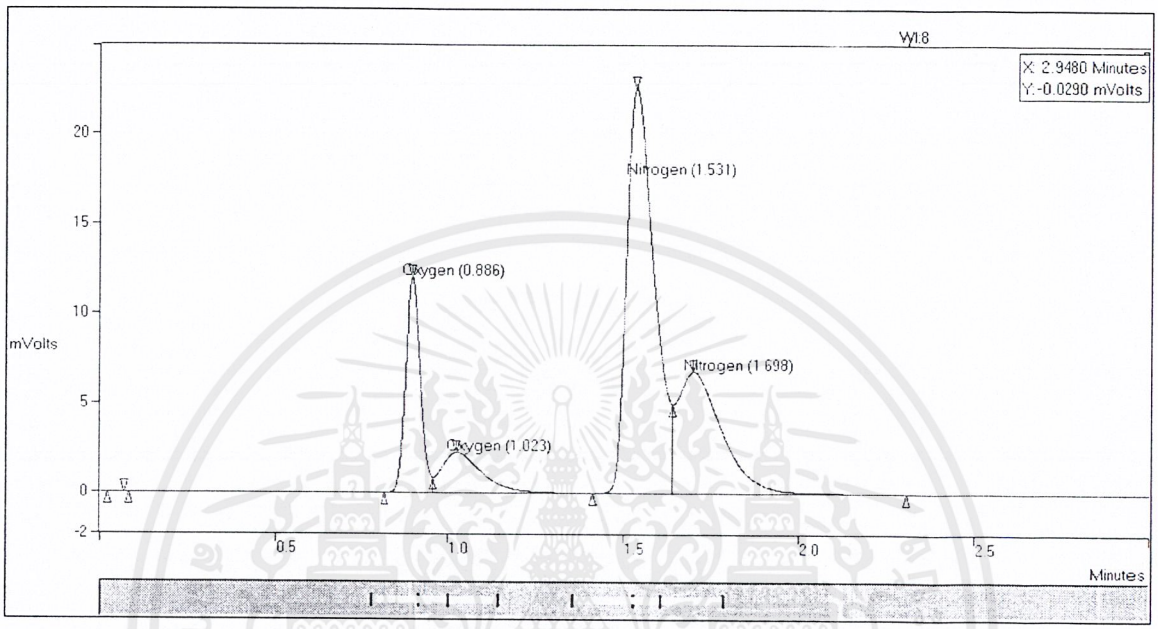
รูปที่ 4.37 กราฟแสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX IE n/C ซีโอไลต์ MnX IE C/O # 1 และซีโอไลต์ MnX IE C/O # 2

ดังนั้นการแคลไซน์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ โดยในกรณีของซีโอไลต์ที่ปรับปรุงสมบัติโดยวิธีการฝังตัวพบว่าเมื่อทำการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้งแล้วความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนจะลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ที่ไม่ได้ทำการแคลไซน์ เนื่องจากการดูดซับก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมี แต่ในกรณีของซีโอไลต์ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นการแคลไซน์ มีอิทธิพลต่อโลหะไอออนอย่างมาก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ และเป็นได้ทั้งผลดีและผลเสียที่มีต่อโครงสร้างของซีโอไลต์และความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้ออิทธิพลของโลหะที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ

จากการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ ด้วยชุดทดสอบการดูดซับ ซึ่งแสดงผลได้ดังโครมาโทแกรมดังรูปที่ 4.38

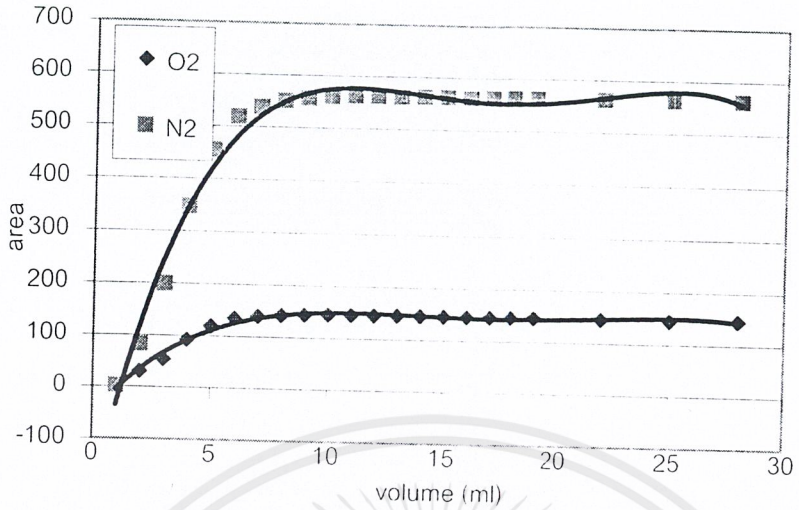


รูปที่ 4.38 รูปแสดงโครมาโทแกรมการแยกก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนจากอากาศโดยใช้สภาวะตามตารางที่ 3.3

จากโครมาโทแกรมที่ได้จะพบว่าทั้งพีคของออกซิเจนและพีคของไนโตรเจนเกิดการ Split เนื่องจาก Injector Port มีขนาดปริมาตรที่ใหญ่ ทำให้อากาศแห้งที่ฉีดเกิดการแยกไม่พร้อมกัน พีคที่ได้จึงเกิดการ Split ดังรูป

เมื่อทำการอินทิเกรท พื้นที่ใต้กราฟ แล้วเขียนกราฟ แสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง พื้นที่ใต้กราฟกับปริมาตรรวมที่ทำการฉีด จะได้กราฟดังรูปที่ 4.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

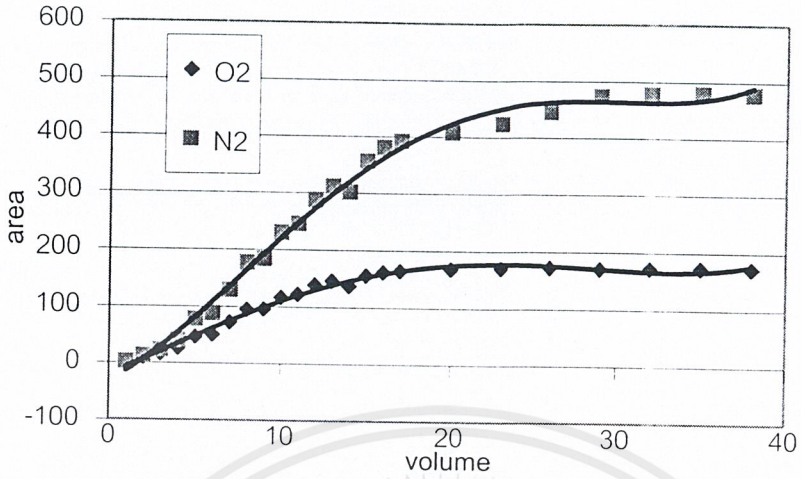


รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอากาศแห้งกับพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead)

จากรูปที่ 4.39 จะพบว่า ในระยะแรกเส้นกราฟที่ได้จะมีพื้นที่น้อย จากนั้นเมื่อทำการฉีดอากาศแห้งต่อไปเรื่อยๆ จะพบว่า เส้นกราฟจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นและจะมีค่าคงที่ในที่สุด ทั้งนี้เนื่องจาก ในช่วงแรกที่ทำการฉีดนั้น คอลัมน์ที่ใช้จะมีปริมาตรซึ่งสามารถเก็บกักก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนไว้ส่วนหนึ่งกราฟของคอลัมน์เปล่าในช่วงแรกจึงมีค่าน้อยเนื่องจากปริมาตรของอากาศที่ฉีดไปมีน้อย เมื่อทำการฉีดไปเรื่อยๆจนปริมาณก๊าซมากกว่าปริมาตรของคอลัมน์ที่ใช้ดูดซับ เส้นกราฟจะมีลักษณะชันขึ้นอย่างรวดเร็ว จนมีค่าคงที่เนื่องจากในคอลัมน์เปล่านี้ไม่มีการดูดซับก๊าซเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.39

เมื่อทำการเปรียบเทียบเส้นกราฟของคอลัมน์เปล่าและคอลัมน์ที่ทำการบรรจุซีโอไลต์แล้ว จะพบว่าเส้นกราฟทั้งสอง มีความชันที่ต่างกัน เนื่องจากในคอลัมน์ที่บรรจุซีโอไลต์ A ไว้นั้น จะมีการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้น ทำให้ปริมาณของอากาศแห้งที่เข้าสู่เครื่องตรวจวัดมีปริมาณที่น้อย สัญญาณที่ได้จึงมีน้อยลง (รูปที่ 4.39 และรูปที่ 4.40)

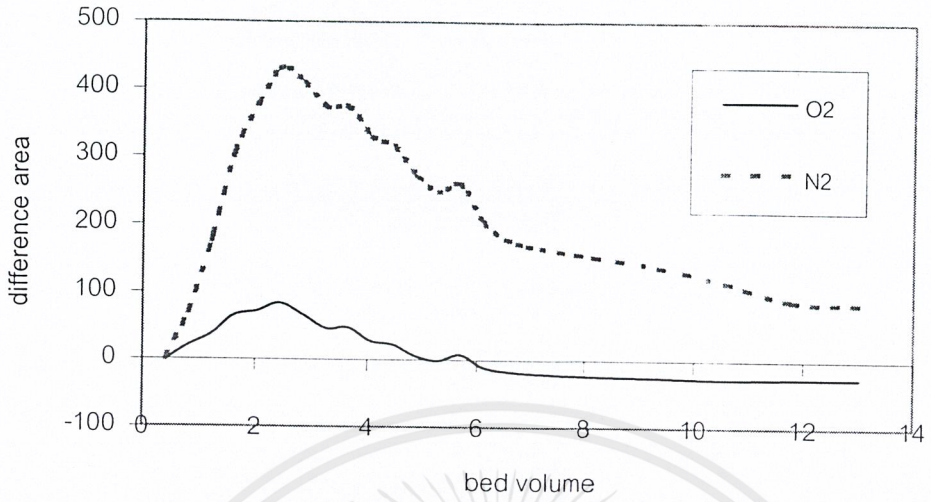
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรอากาศแห้งและพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ A

ในการเปรียบเทียบความสามารถในการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศนั้น สามารถทำการเปรียบเทียบด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟของก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ถูกดูดซับ กับ Bed Volume ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟที่นำมาเขียนกราฟนี้ ได้มาจากการนำผลต่างของพื้นที่ใต้กราฟของคอลัมน์ที่บรรจุซีโอไลต์และพื้นที่ใต้กราฟของคอลัมน์ที่บรรจุเม็ดแก้ว(glass bead) มาพลอตกราฟ ดังรูปที่ 4.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

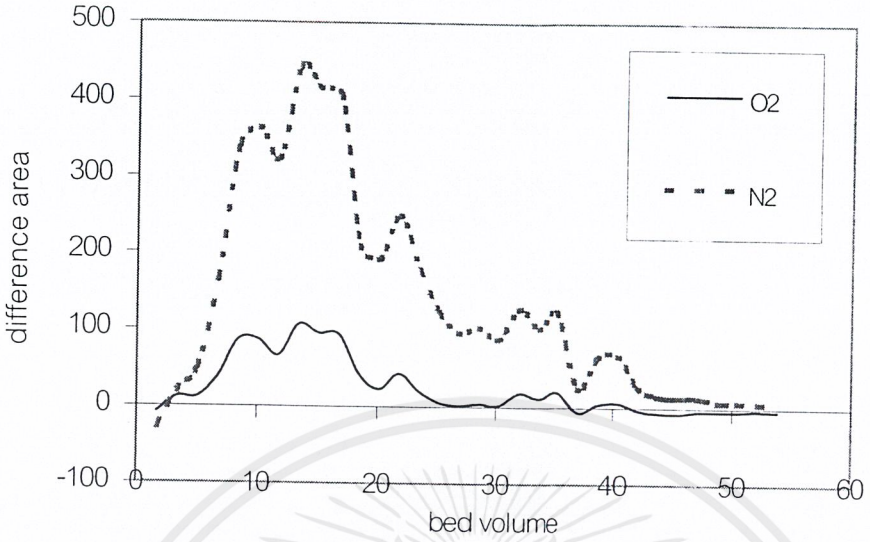


รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ A กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead)

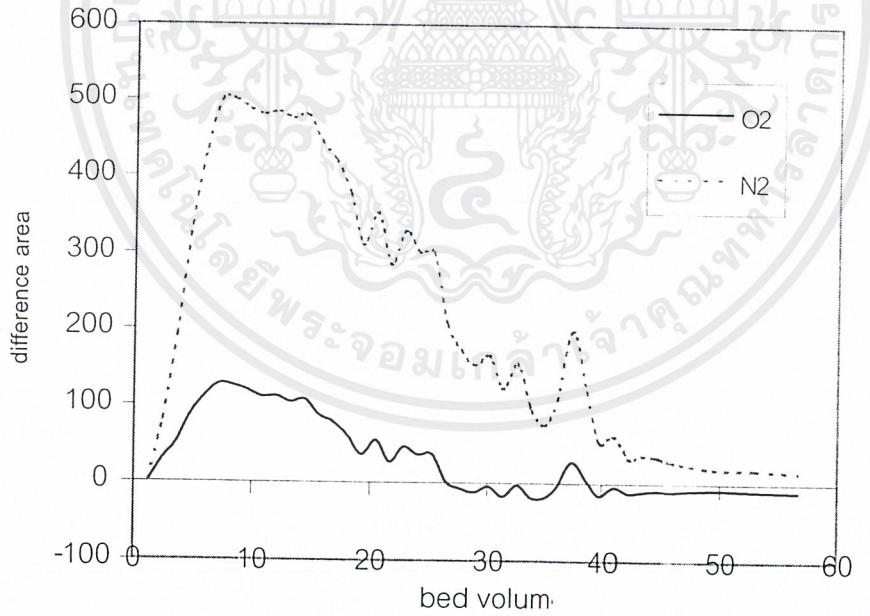
จากรูปที่ 4.41 จะพบว่าซีโอไลต์ A สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 6 Bed Volume หรือซีโอไลต์ A 1 m^3 มีสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 6 m^3 และจากการที่เส้นกราฟมีลักษณะเป็นแถบกว้าง (Broad) ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งอาจเกิดการดูดซับและการคายซับเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน

จากการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศพบว่า ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออน และแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน มีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนจากอากาศได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติ โดยซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนและแมงกานีสไอออนสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 30 Bed Volume ดังรูปที่ 4.42 และ 4.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



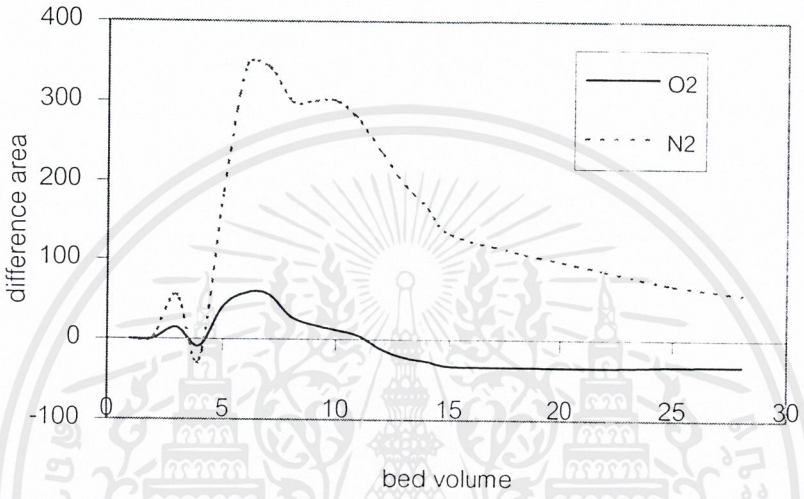
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ CoA IE C/N กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead)



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ MnA IE C/N กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

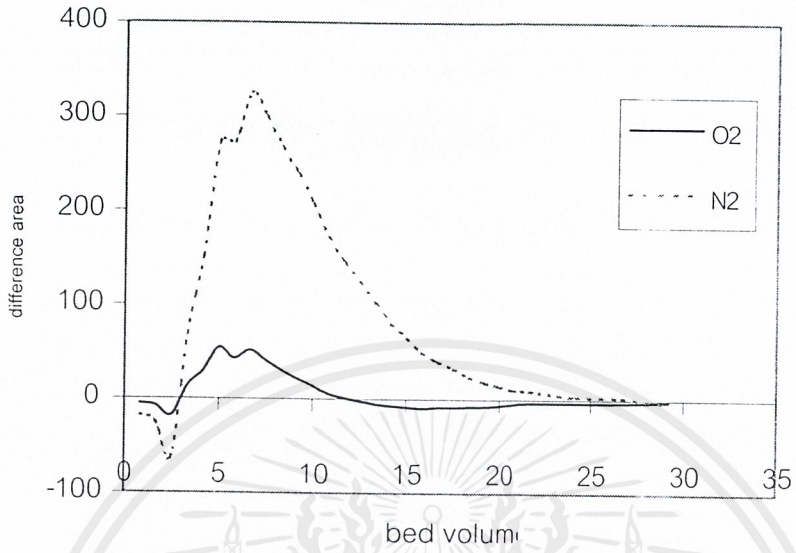
จากรูปที่ 4.44 พบว่า ซีโอไลต์ X ก่อนการปรับปรุงสมบัติสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 10 Bed Volume หรือซีโอไลต์ X 1 m^3 สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 10 m^3



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ X กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead)

เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติของซีโอไลต์ X ด้วยแมงกานีสไอออน โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน ที่แคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน พบว่าสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 10 Bed Volume ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับซีโอไลต์ X ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติ ดังรูปที่ 4.45

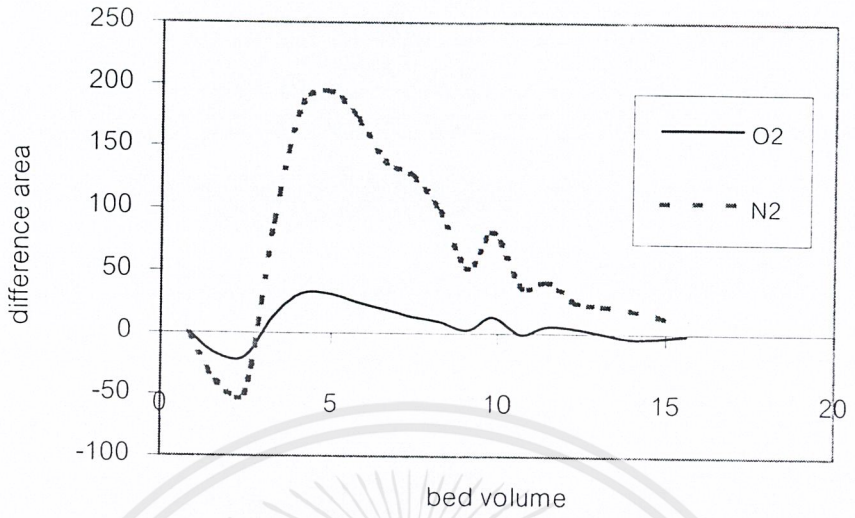
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ MnX IE C/N กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead)

เมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออน โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน และแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน พบว่าสามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 9 Bed Volume ซึ่งมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติ หรือซีโอไลต์ 1 m^3 สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ประมาณ 9 m^3 ดังรูปที่ 4.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Bed Volume และความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟเมื่อใช้คอลัมน์ที่บรรจุด้วยซีโอไลต์ CoX IE C/N กับคอลัมน์ที่บรรจุด้วยเม็ดแก้ว (glass bead)

สำหรับซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออนนั้นพบว่าความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้นได้ไม่ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการดูดซับ ดังหัวข้อที่ 4.2 4.3 และ 4.4

จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศ ของซีโอไลต์ที่ปรับปรุงสมบัติ ด้วยชุดทดสอบการดูดซับพบว่าผลการทดลองนี้สอดคล้องกับความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน ซึ่งขึ้นกับชนิดของโลหะ วิธีการเตรียม และผลของการแคลไซน์ โดยพบว่าซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนและแมงกานีสไอออน สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนได้มากขึ้น เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

5.1 ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ใช้ในการทดลอง

ซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X จากการตรวจสอบโครงสร้าง พบว่าซีโอไลต์ทั้งสองมีโครงสร้างที่แตกต่างกันคือ ซีโอไลต์ X จะมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่กว่าซีโอไลต์ A จึงทำให้ซีโอไลต์ X และจากการตรวจสอบไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนพบว่าซีโอไลต์ทั้งสองชนิดสามารถดูดซับก๊าซไนโตรเจนได้ดีกว่าก๊าซออกซิเจน เนื่องจากการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งโมเลกุลที่มีจุดเดือดต่ำกว่าจะมีความสามารถในการถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่มีจุดเดือดสูงกว่า และจากการที่ซีโอไลต์ X มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่กว่าซีโอไลต์ A ทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซไนโตรเจนเกิดขึ้นได้ดีกว่า เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนสามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนของซีโอไลต์ที่มีขนาดใหญ่ได้ดีกว่าซีโอไลต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็ก แต่โครงสร้างที่แตกต่างกันของซีโอไลต์ทั้งสองชนิดนี้ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

5.2 อิทธิพลของโลหะที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออนโดยวิธีการฝังตัว จะทำให้เกิดเป็นเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์เกิดขึ้นภายในรูพรุนของซีโอไลต์ X ทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X ดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ โดยการดูดซับที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการดูดซับทางเคมี ซึ่งการดูดซับก๊าซออกซิเจนสามารถเกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบคือ การดูดซับก๊าซออกซิเจนบนผิวของโลหะออกไซด์และการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะออกไซด์ แต่เหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่สามารถเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ A ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าซีโอไลต์ X ได้ ทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีเดียวกันนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนปรับปรุงสมบัติ

ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน โคบอลต์ไอออนจะเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ A ในรูปของ Exchangeable Cation ซึ่งจะทำให้ซีโอไลต์ A มีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A ก่อนปรับปรุงสมบัติ แต่ในขณะที่ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีเดียวกันนี้ ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ สันนิษฐานว่าโคบอลต์ที่เข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ X ได้เข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้โคบอลต์ไอออนมีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนลดลง ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนจึงลดลง

ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน แมงกานีสจะเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ในรูปของ Exchangeable Cation ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ทั้งสองชนิดดีขึ้น เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ก่อนปรับปรุงสมบัติ และเมื่อทดสอบการดูดซับก๊าซออกซิเจนติดต่อกันสองครั้ง ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X มีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนสูงขึ้น เนื่องจากแมงกานีสที่ได้ดูดซับก๊าซออกซิเจนไปครั้งหนึ่งแล้ว มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเกิดขึ้น โดยโครงสร้างของแมงกานีสที่เปลี่ยนไปนี้ มีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้ดี

5.3 อิทธิพลของวิธีการเตรียมที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

การปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ โดยวิธีการฝังตัว (Impregnation) พบว่าโลหะไอออน จะเกิดการตกตะกอนเป็นโลหะออกไซด์เกิดขึ้นในรูพรุนหรือบริเวณพื้นผิวของซีโอไลต์ เนื่องจากพื้นผิวซีโอไลต์มีความเป็นเบสสูง ซึ่งพบว่าเหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ มีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดี แต่เหล็กออกไซด์และโครเมียมออกไซด์ที่เกิดขึ้นสามารถเข้าไปอยู่ภายในรูพรุนของซีโอไลต์ X ซึ่งมีขนาดของรูพรุนที่ใหญ่กว่าซีโอไลต์ A ได้ดีกว่าดังนั้นความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X จึงดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ แต่ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

การปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์โดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) พบว่า โลหะไอออนจะเข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ในรูปของ Exchangeable Cation ซึ่งโคบอลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออนและแมงกานีสไอออนมีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดี แต่ซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน มีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากโคบอลต์ไอออนเข้าไปอยู่ในตำแหน่งหนึ่งซึ่งทำให้โคบอลต์มีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้น้อยลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนลดลงด้วย

สำหรับซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าซีโอไลต์ทั้งสองชนิดโครงสร้างมีการเสียสภาพเกิดขึ้นเนื่องจากสารละลายโลหะทั้งสองชนิดนี้จัดเป็น Hard Cation ทำให้สารละลายโลหะมีความเป็นกรดสูง และจากการที่ซีโอไลต์ทั้งสองชนิดจัดเป็นซีโอไลต์ประเภทที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูง ทำให้ซีโอไลต์มีความเสถียรต่อสภาวะที่เป็นกรดและความร้อนต่ำ

5.4 อิทธิพลของการแคลไซน์ที่มีต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน

จากการทดลองพบว่าความร้อนที่ใช้ในการแคลไซน์มีผลต่อโครงสร้างของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด คือซีโอไลต์ทั้งสองชนิดมีความเป็นผลึกลดลง เนื่องจากซีโอไลต์ทั้งสองชนิดจัดเป็นซีโอไลต์ประเภทที่มีปริมาณอะลูมิเนียมต่ำ

นอกจากนี้ความร้อนและบรรยากาศที่ใช้ในการแคลไซน์ยังมีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนด้วยคือ ซีโอไลต์ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกโดยวิธีการฝังตัวเมื่อผ่านการแคลไซน์แล้วพบว่าโครงสร้างมีการเสียสภาพเกิดขึ้น แต่ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลง สำหรับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยเหล็กไอออนและโครเมียมไอออน โดยวิธีการฝังตัวซึ่งพบว่าความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์นี้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ แต่เมื่อผ่านการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้งแล้ว พบว่าความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ก่อนทำการปรับปรุงสมบัติ เนื่องจากการดูดซับก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นการดูดซับทางเคมี เมื่อผ่านการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้ง ทำให้มีการดูดซับก๊าซออกซิเจนเกิดขึ้น เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน ทำให้การดูดซับก๊าซออกซิเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ในกรณีของซีโอไลต์ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน พบว่าเมื่อทำการแคลไซน์ในบรรยากาศของออกซิเจนพบว่า เหล็กไอออนและโครเมียมไอออนเกิดการออกซิไดซ์กลายเป็นโลหะออกไซด์เกิดขึ้น ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์มีการเสียสภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยโคบอลต์ไอออนพบว่าโคบอลต์มีการออกซิไดซ์เกิดขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของเหล็กไอออนและโครเมียมไอออน ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์ A มีการเสียสภาพเกิดขึ้นเช่นกันแต่ในซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีเดียวกันนี้ พบว่าโคบอลต์ไอออนไม่เกิดการออกซิไดซ์ ซึ่งสันนิษฐานว่า โคบอลต์ไอออนได้เข้าไปอยู่ในรูพรุนของซีโอไลต์ X ซึ่งตำแหน่งที่โคบอลต์เข้าไปอยู่นั้น ทำให้โคบอลต์ไอออนมีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนได้น้อยลง ทำให้ไม่เกิดการออกซิไดซ์ขึ้น และความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนยังลดลงอีกด้วย

ซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกด้วยแมงกานีสไอออนโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อผ่านการแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจนแล้ว พบว่าบรรยากาศที่ใช้ในการแคลไซน์ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติแล้ว แต่ในกรณีของซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติ และผ่านการแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจนพบว่า เกิด Solid State Exchange ของแมงกานีสไอออนในซีโอไลต์ X เกิดขึ้น ซึ่งการเกิด Solid State Exchange นี้ส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนดีขึ้นเมื่อเทียบกับซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยวิธีเดียวกันนี้แต่ไม่ผ่านการแคลไซน์ และเมื่อทำการทดสอบการดูดซับก๊าซออกซิเจนครั้งที่สองของซีโอไลต์ ทั้งสองชนิดนี้ พบว่าการดูดซับก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X ในครั้งที่ 2 ลดลงเมื่อเทียบกับการดูดซับครั้งแรกเนื่องจากการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับทางเคมี จึงทำให้การดูดซับในครั้งที่สองมีการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้น้อยกว่าการดูดซับครั้งแรก และในซีโอไลต์ A สามารถดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่ 2 ได้ดีกว่าครั้งแรกโดยสันนิษฐานว่าโครงสร้างของแมงกานีสมีการเปลี่ยนแปลงหลังการดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งแรก

5.5 การทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศด้วยชุดทดสอบการดูดซับ

เมื่อนำซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ที่ปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนและผ่านการแคลไซน์ในบรรยากาศของไนโตรเจน ไปทำการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศด้วยชุดทดสอบการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส พบว่าซีโอไลต์ A ที่ปรับปรุงสมบัติด้วยโคบอลต์ไอออนและแมงกานีสไอออน มีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนจากอากาศได้ดีขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากการที่มีการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ที่ Bed Volume ที่สูงกว่า และปริมาณของพื้นที่ใต้กราฟที่มีมากกว่า เมื่อเทียบกับซีโอไลต์ A และซีโอไลต์ X ก่อนปรับปรุงสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่า วิธีการฝังตัวเหมาะสมสำหรับใช้ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ ด้วยโลหะไอออนที่จัดเป็น Hard Cation และวิธีการแลกเปลี่ยนไอออนเหมาะสมสำหรับใช้ในการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ ด้วยโลหะไอออนที่จัดเป็น Soft Cation ซึ่งซีโอไลต์ที่ได้ทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกดังกล่าวจะมีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการศึกษาถึงโครงสร้างของแมงกานีสไอออนที่อยู่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ A เนื่องจากแมงกานีสไอออนที่อยู่ในซีโอไลต์ A นี้เมื่อทำการดูดซับก๊าซออกซิเจนในครั้งที่สอง พบว่ามีความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจนได้ดีกว่าครั้งแรก ซึ่งแน้วโน้มไม่เหมือนกับโลหะไอออนชนิดอื่นที่เมื่อทำการดูดซับก๊าซออกซิเจนครั้งที่สองแล้ว การดูดซับก๊าซออกซิเจนจะลดลงเมื่อเทียบกับการดูดซับก๊าซออกซิเจนครั้งแรก
2. ทำการศึกษาถึงโครงสร้างของโคบอลต์ไอออนที่อยู่ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ X ซึ่งพบว่าโคบอลต์ไอออนนี้มีอันตรกิริยากับก๊าซออกซิเจนลดลง ซึ่งเมื่อผ่านการแคลไซน์ในบรรยากาศของอากาศแห้งแล้วโคบอลต์นี้ ไม่มีการออกซิไดซ์เกิดขึ้น ซึ่งแนวโน้มไม่เหมือนกับโลหะไอออนอื่น ซึ่งเมื่อผ่านการแคลไซน์แล้วพบว่ามีการออกซิไดซ์เกิดขึ้น
3. ทดลองทำการปรับปรุงสมบัติพาราแมกเนติกของซีโอไลต์ Y เพื่อใช้ในการทดสอบความสามารถในการดูดซับก๊าซออกซิเจน ซึ่งซีโอไลต์ Y นี้มีลักษณะโครงสร้างเหมือนซีโอไลต์ X แต่แตกต่างกันที่อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมและปริมาณโลหะ

Na_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	CoO
20.7%	33.3%	43.9%	1.81%

กำหนด

% X คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของซิลิกา

% Y คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของอะลูมินา

% M คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของโลหะ

สูตรการหาอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม

$$\frac{SiO_2}{Al_2O_3} = \frac{\%\ X}{\%\ Y} \times \frac{(MW\ Al_2O_3)}{(MW\ SiO_2)}$$

ดังนั้น

$$\frac{Si}{Al} = \frac{(SiO_2/Al_2O_3)}{2}$$

จากตัวอย่างตารางข้างต้น

$$\frac{SiO_2}{Al_2O_3} = \frac{43.9 \times 101.96}{33.3 \times 60.0855} = 2.24$$

ดังนั้น $\frac{Si}{Al} = \frac{2.24}{2} = 1.12$

สูตรการหาปริมาณโลหะ

$$\text{ปริมาณโลหะ(\% wt)} = \frac{\text{เปอร์เซ็นต์ของโลหะออกไซด์ x น้ำหนักโลหะใน 1 โมเลกุลของโลหะออกไซด์}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลรวมของโลหะออกไซด์}}$$

จากตัวอย่างในตารางข้างต้น

$$\text{ปริมาณโคบอลต์(\% wt)} = \frac{1.81 \times 58.9332}{74.9332} = 1.42\ \%\ wt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหา Bed Volume

1. ชั่งน้ำหนักของซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดสอบการแยกอากาศ แล้วนำมาหาปริมาตรของซีโอไลต์ โดยใช้กระบอกตวง type B ขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 1 ครั้ง
2. นำปริมาตรอากาศที่ฉีดในแต่ละครั้งหารด้วยปริมาตรของซีโอไลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 1ข ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของกลุ่มตัวอย่างซีโอไลต์ A

ตัวอย่าง	Method	บรรยากาศในการแคลไซน์	Surface Area (m^2/g)	สีที่สังเกตเห็น	Si/Al	ปริมาณโลหะ(%wt)
A		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	532.2 572.1	ขาว ขาว	0.9	-
FeA	การฝังตัว	ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	496.2 520.6	ส้ม ส้ม	0.9	0.4
CrA		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	562.6 587.8	เขียวอ่อน เหลือง	0.9	0.3
CoA		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	469.6 537.1	ชมพูอ่อน ขาวขุ่น	0.9	1.23
MnA		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	443.1 477.9	ขาว ขาว	0.9	1.16
FeA	การแลกเปลี่ยนไอออน	ไม่แคลไซน์ ไนโตรเจน	457.2 375.4	ส้ม ส้ม	1.0	12
CrA		ไม่แคลไซน์ ไนโตรเจน	0 0	เขียวอ่อน เหลือง	0.9	0.79
CoA		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง ไนโตรเจน	425.8 350 460.9	ชมพู เทา คราม	0.9	11.8
MnA		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง ไนโตรเจน	521.8 433.8 382.9	ขาว ขาว ขาว	0.9	10.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2ข ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิว สีที่สังเกตเห็น อัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม และปริมาณโลหะของกลุ่มตัวอย่างซีโอไลต์ X

ตัวอย่าง	Method	บรรยากาศในการแคลไซน์	Surface area (m^2/g)	สีที่สังเกตุเห็น	Si/Al	ปริมาณโลหะ(%wt)
X		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	511.6 637.7	ขาว ขาว	1.1	-
FeX	การฝังตัว	ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	434.5 412.8	ส้ม ส้ม	1.1	0.38
CrX		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	428.5 444.8	เขียวอ่อน เหลือง	1.1	0.4
CoX		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	405.4 429.6	ชมพูอ่อน เทา	1.1	1.42
MnX		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง	400.4 513.6	ขาว ขาว	1.1	1.22
FeX	การแลกเปลี่ยนไอออน	ไม่แคลไซน์ ไนโตรเจน	484.5 269.6	ส้ม ส้ม	1.1	9.8
CrX		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง ไนโตรเจน	515 669.6 562.3	เขียวอ่อน เหลือง เขียว	1.0	2.45
CoX		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง ไนโตรเจน	709.3 442.1 616.2	ชมพู คราม คราม	1.1	11.64
MnX		ไม่แคลไซน์ อากาศแห้ง ไนโตรเจน	411.1 451 456	ขาว ขาว ขาว	1.1	9.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3ข ตารางแสดงปริมาตรของซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดสอบการแยกอากาศของซีโอไลต์ A

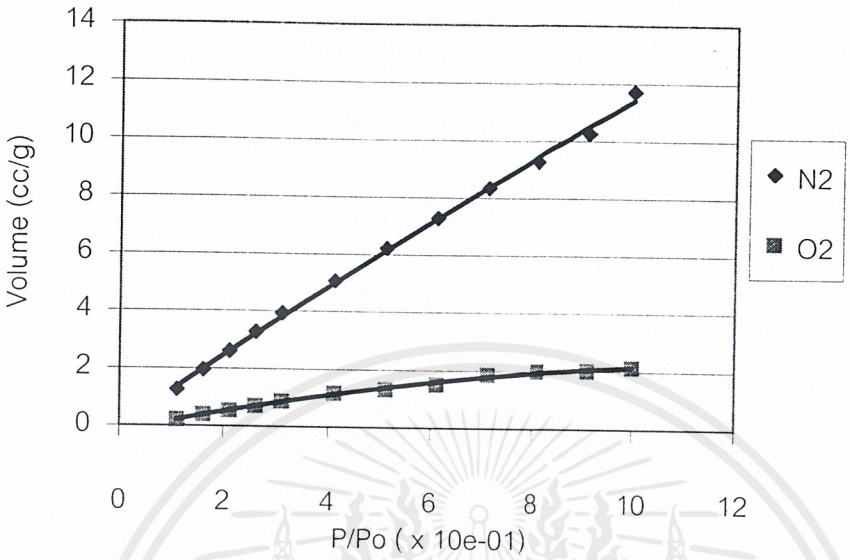
ซีโอไลต์	ปริมาตร (ml)
A	2.46
FeA IE C/N	0.92
CoA IE C/N	1.19
Mn A IE C/N	0.83

ตารางที่ 4ข ตารางแสดงปริมาตรของซีโอไลต์ที่ใช้ในการทดสอบการแยกอากาศของซีโอไลต์ X

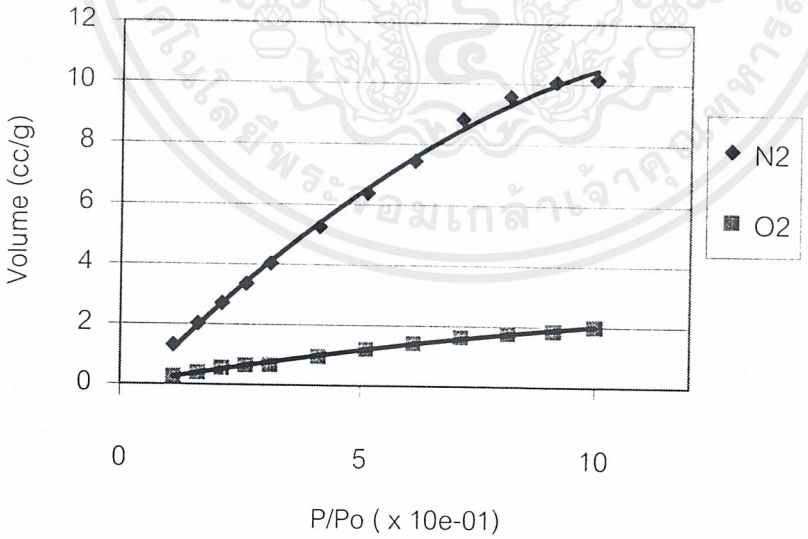
ซีโอไลต์	ปริมาตร (ml)
X	1.88
FeX IE C/N	0.9
CrX IE C/N	1.8
CoX IE C/N	1.22
Mn X IE C/N	1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

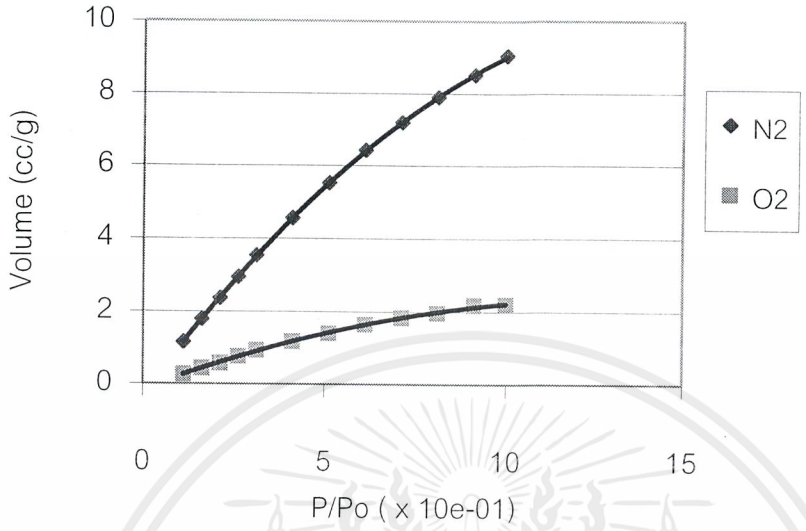


รูปที่ 1ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A n/C

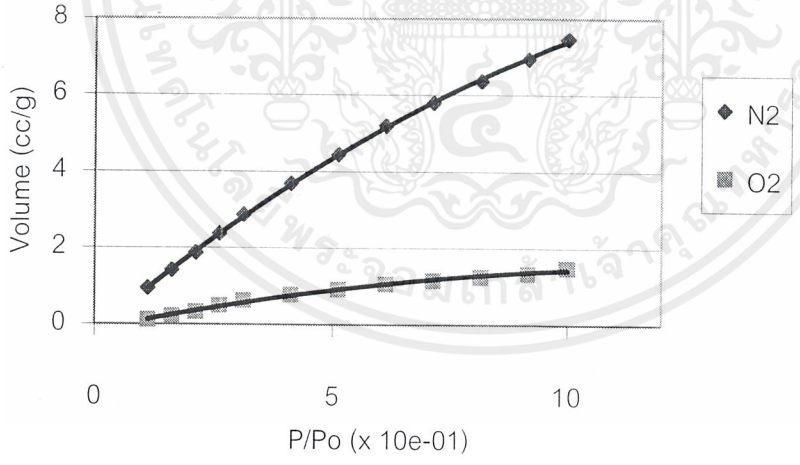


รูปที่ 2ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ A C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

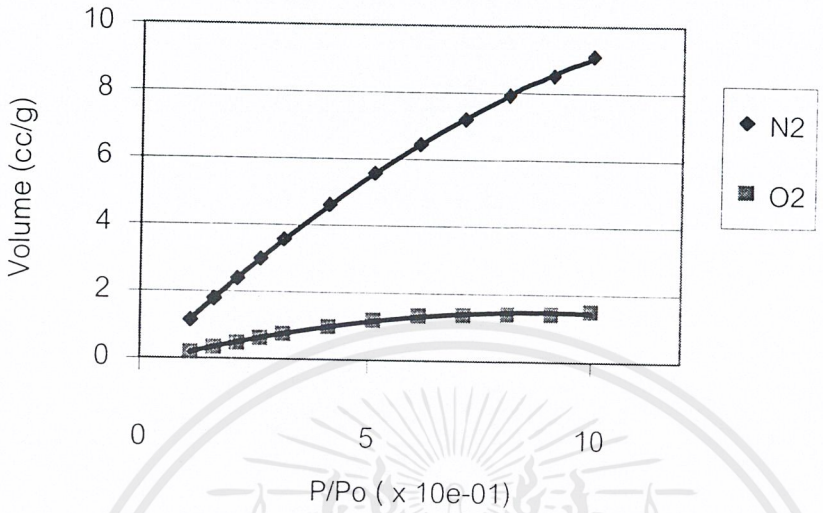


รูปที่ 3ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ FeA IMP n/C

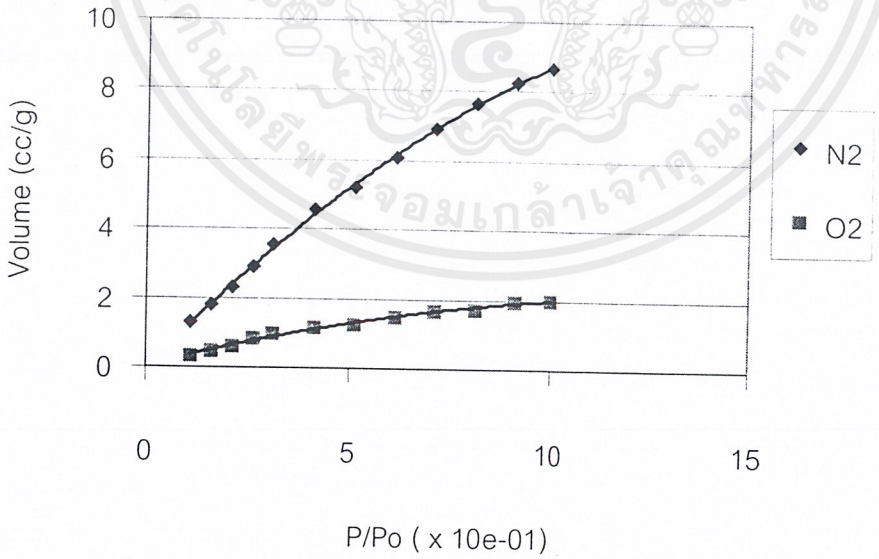


รูปที่ 4ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ FeA IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

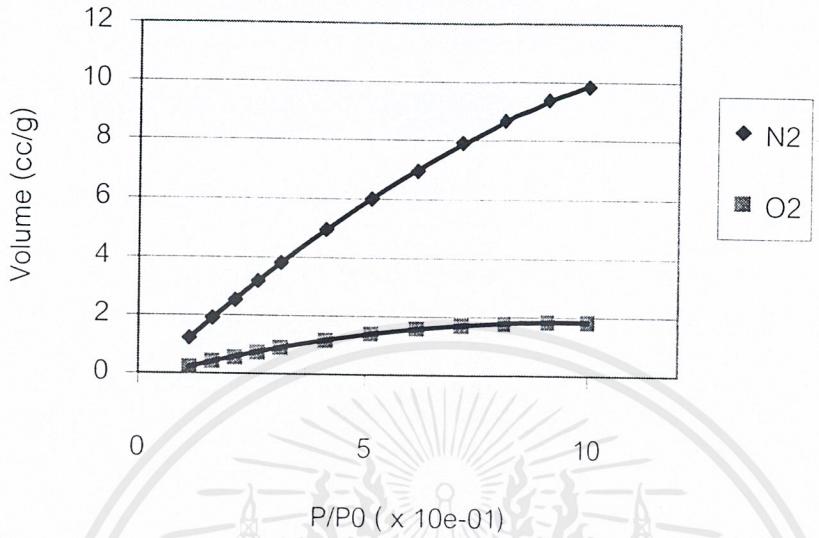


รูปที่ 5ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CrA IMP n/C

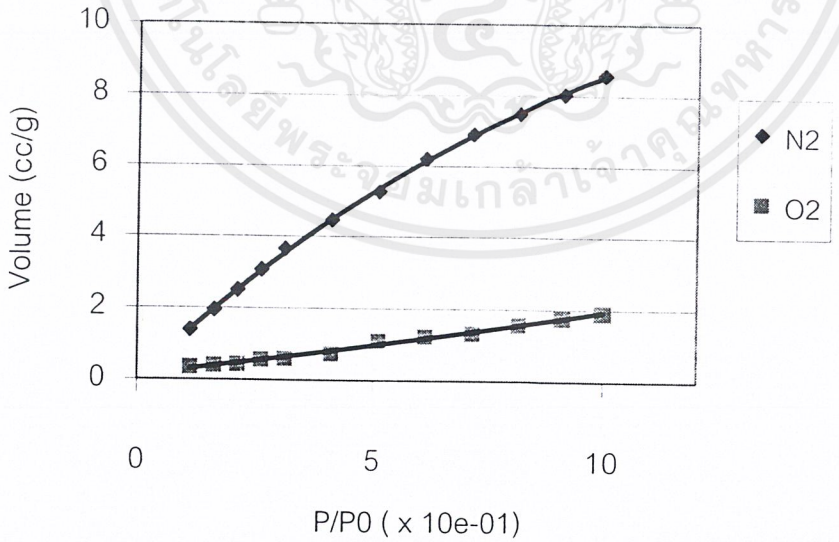


รูปที่ 6ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CrA IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

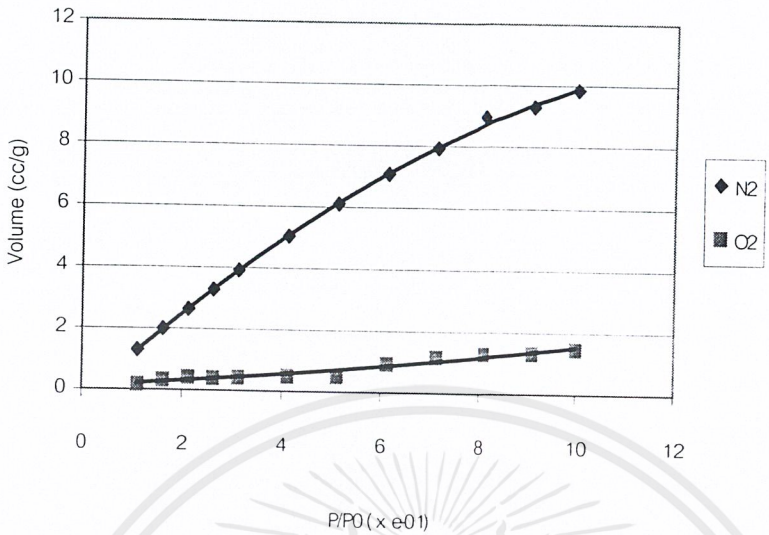


รูปที่ 7ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoA IMP n/C

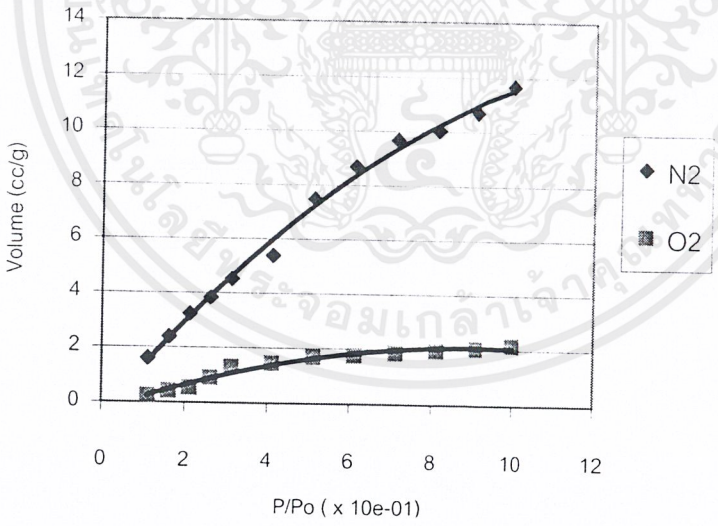


รูปที่ 8ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoA IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

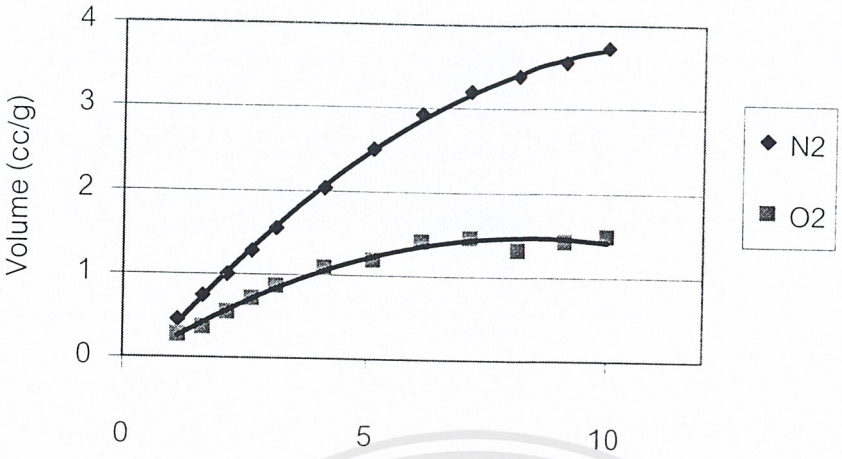


รูปที่ 9ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnA IMP n/C

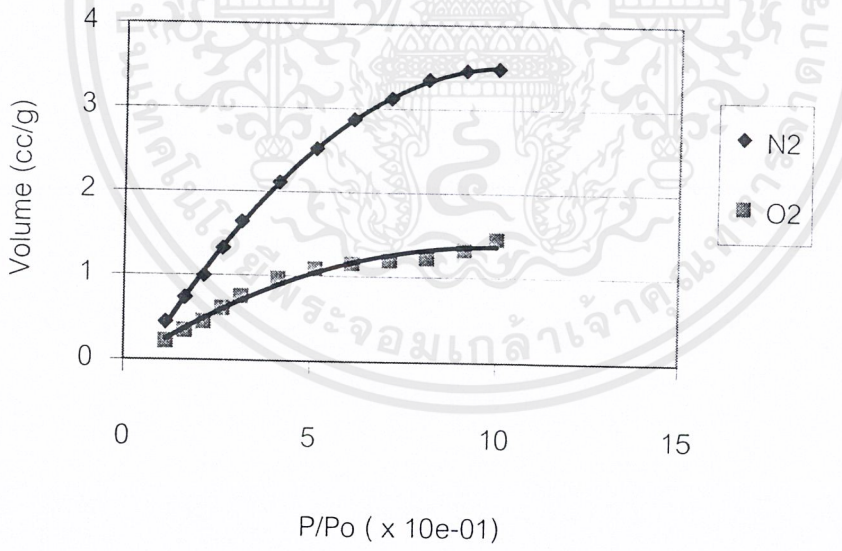


รูปที่ 10ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnA IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

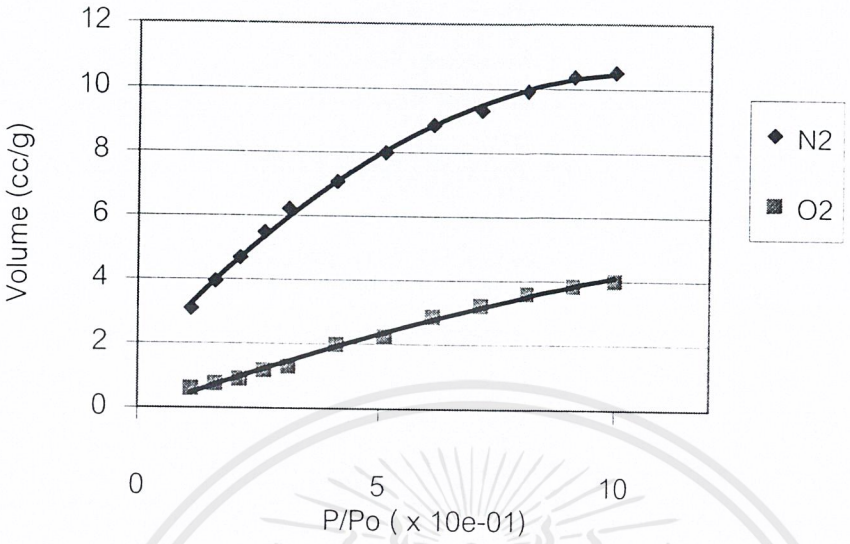


รูปที่ 11ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ FeA IE n/C

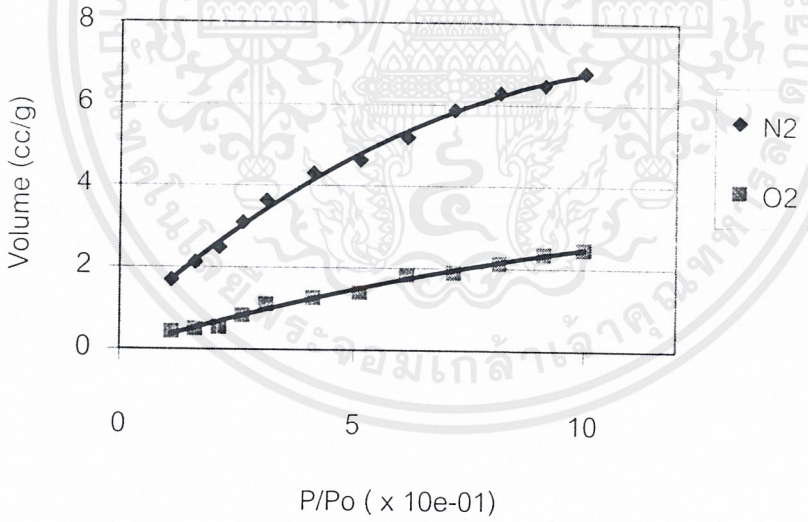


รูปที่ 12ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ FeA IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

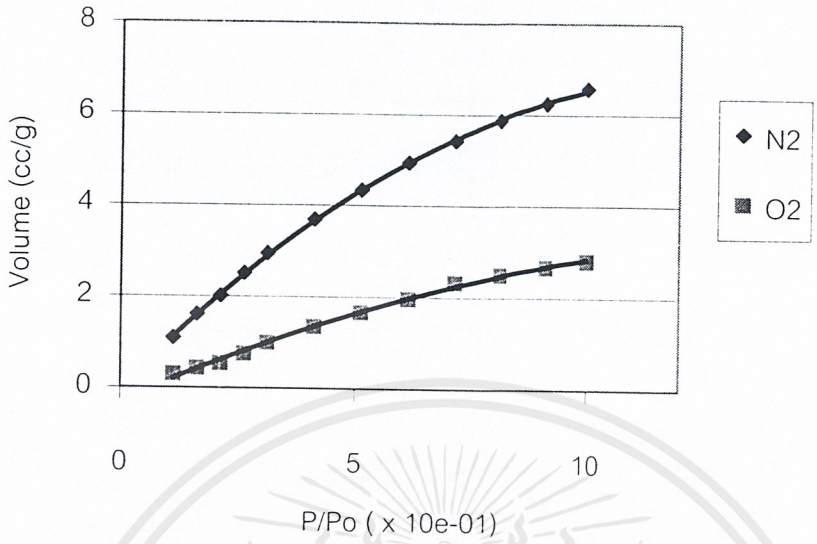


รูปที่ 13ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoA IE n/C

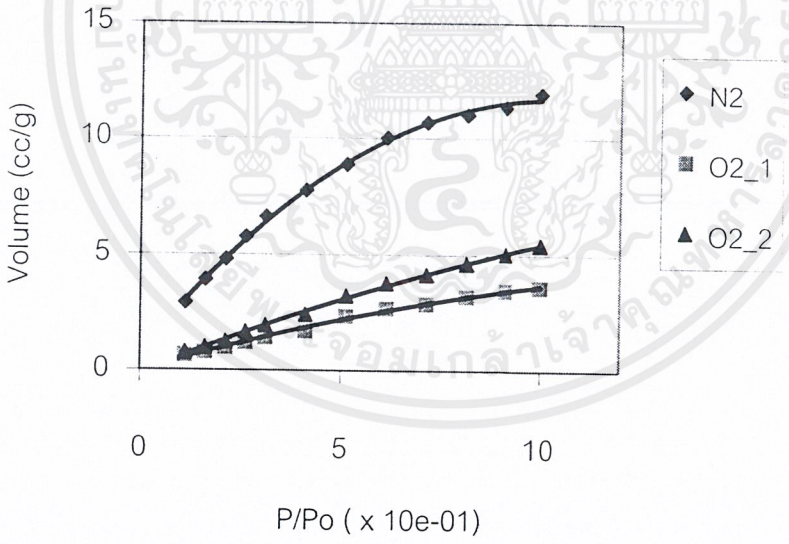


รูปที่ 14ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoA IE C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

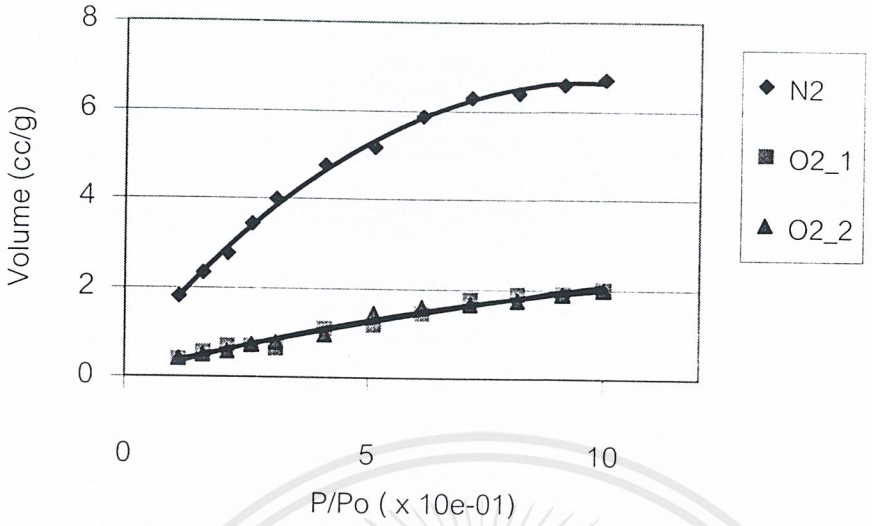


รูปที่ 15ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoA IE C/N

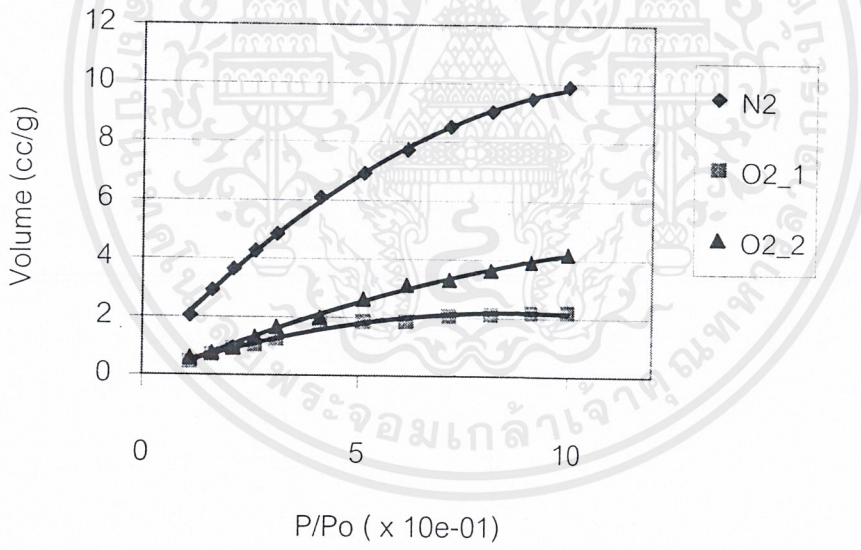


รูปที่ 16ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnA IE n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

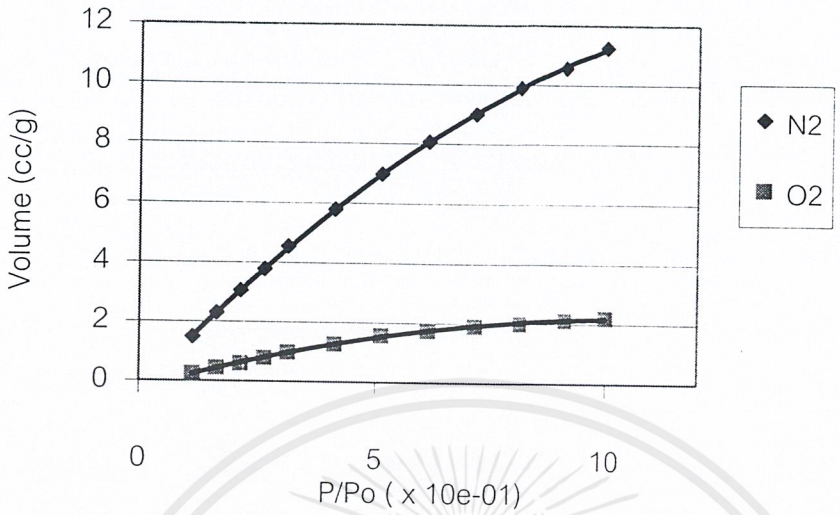


รูปที่ 17ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnA IE C/O

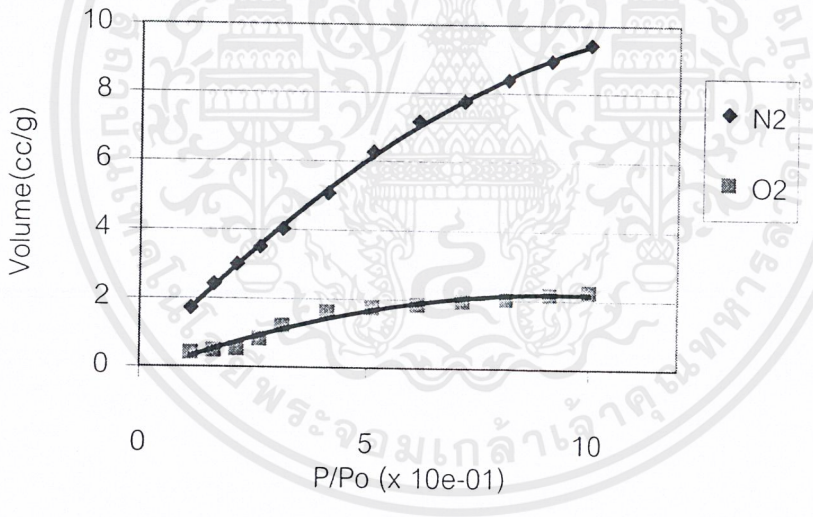


รูปที่ 18ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnA IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

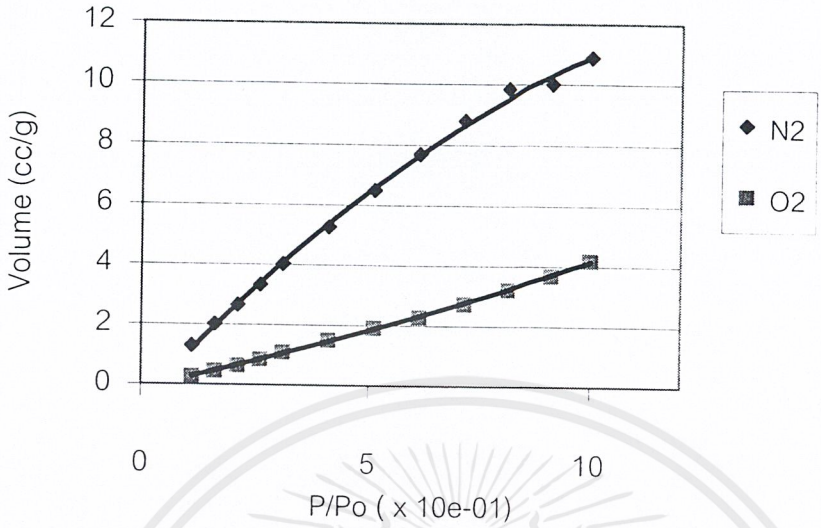


รูปที่ 19ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X n/C

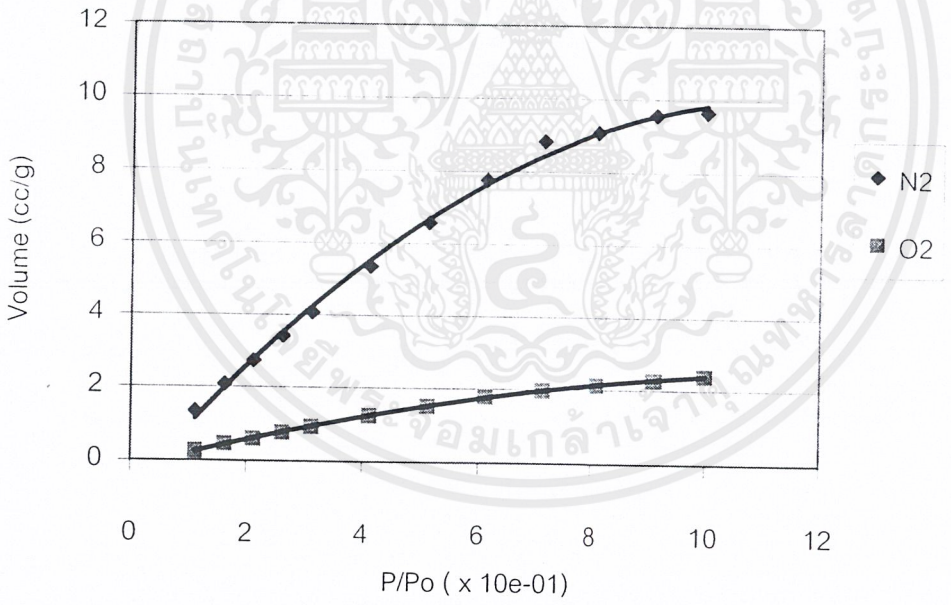


รูปที่ 20ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ X C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

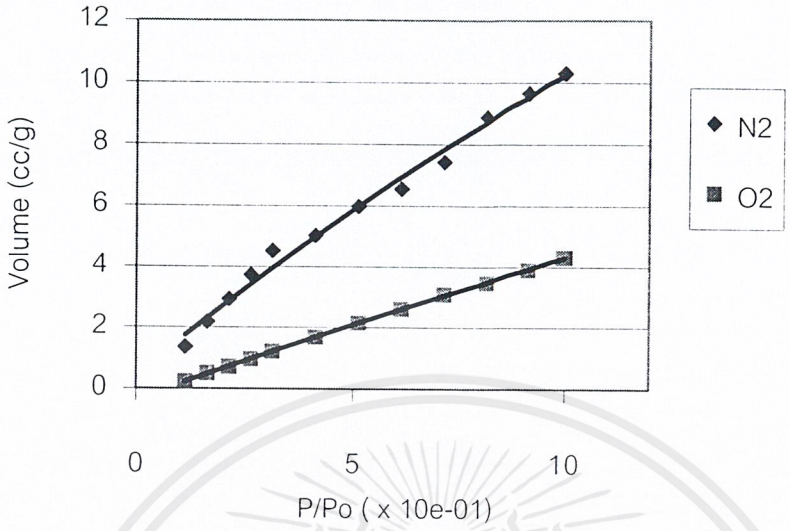


รูปที่ 21ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ FeX IMP n/C

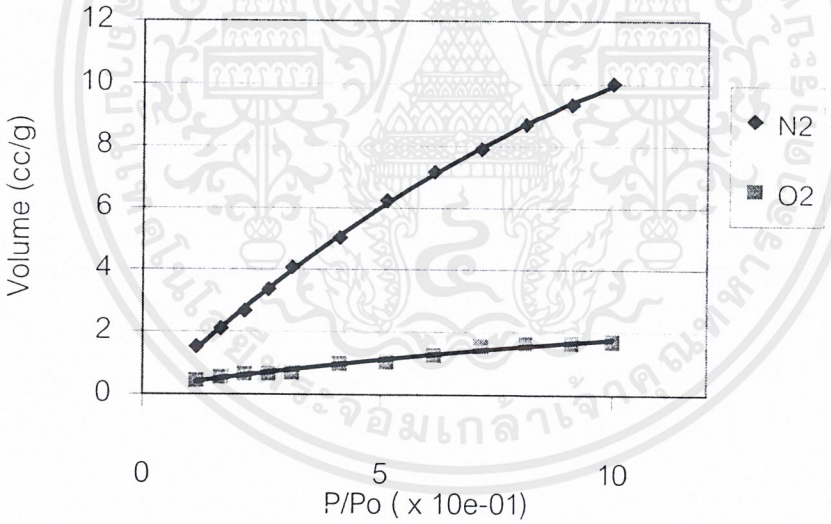


รูปที่ 22ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ FeX IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

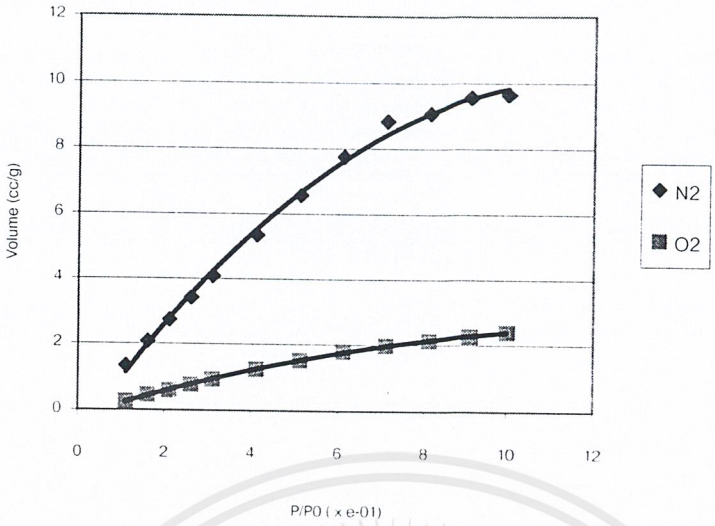


รูปที่ 23ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CrX IMP n/C

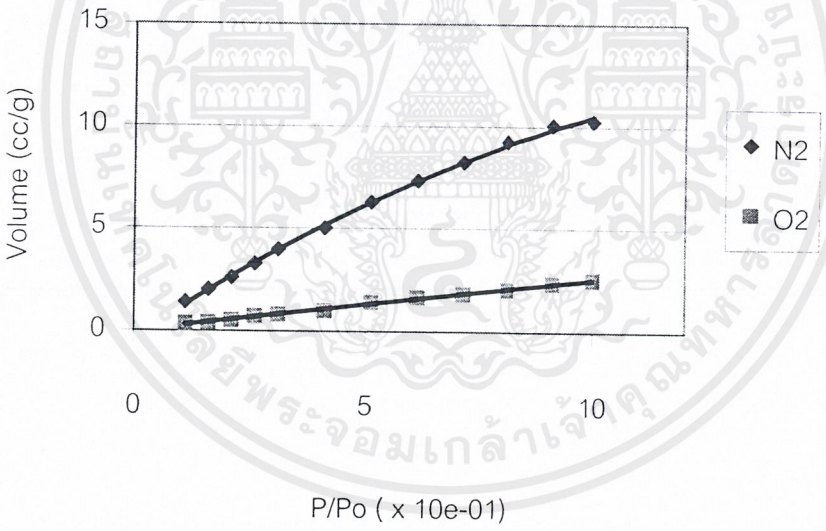


รูปที่ 24ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CrX IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

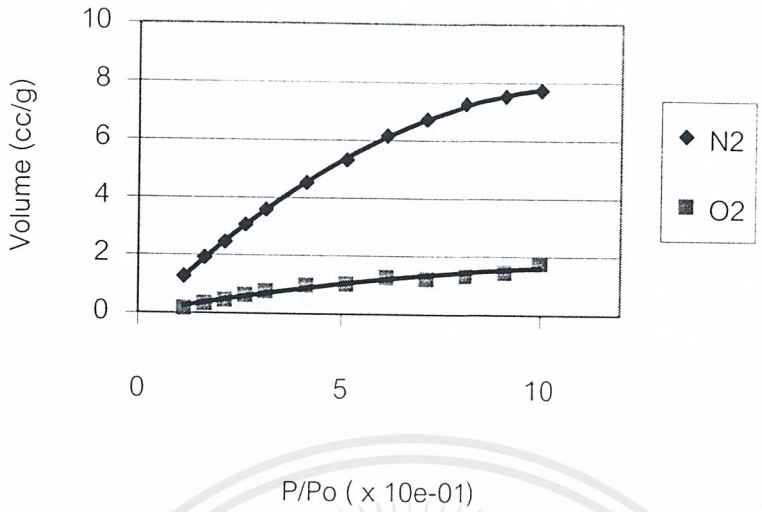


รูปที่ 25ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoX IMP n/C

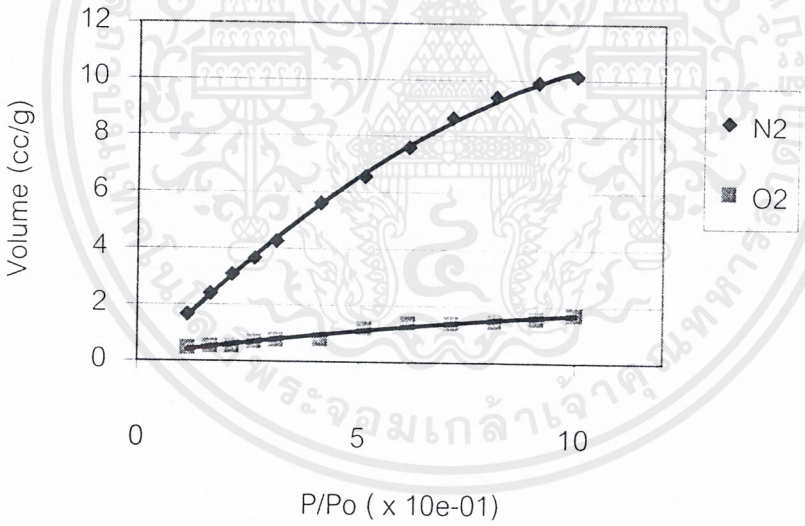


รูปที่ 26ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoX IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

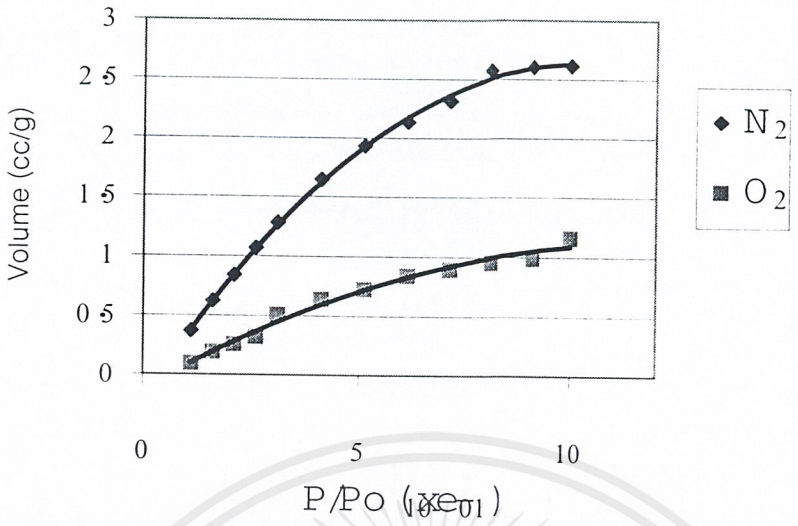


รูปที่ 27ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX IMP n/C

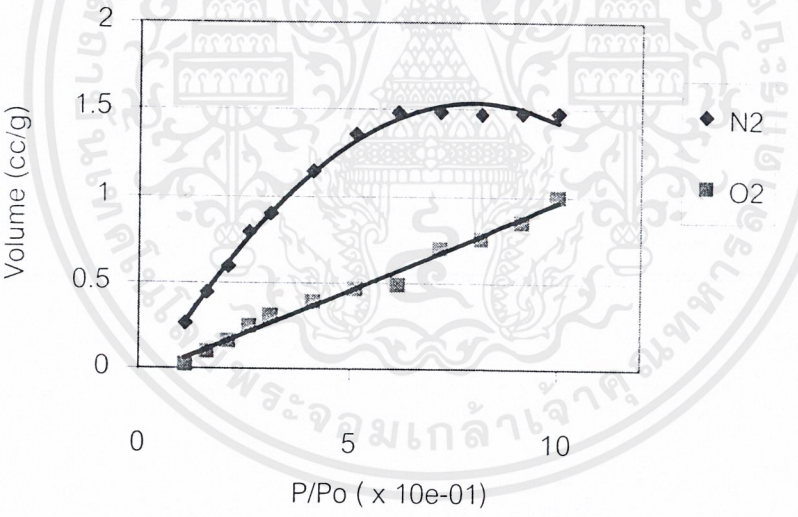


รูปที่ 28ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

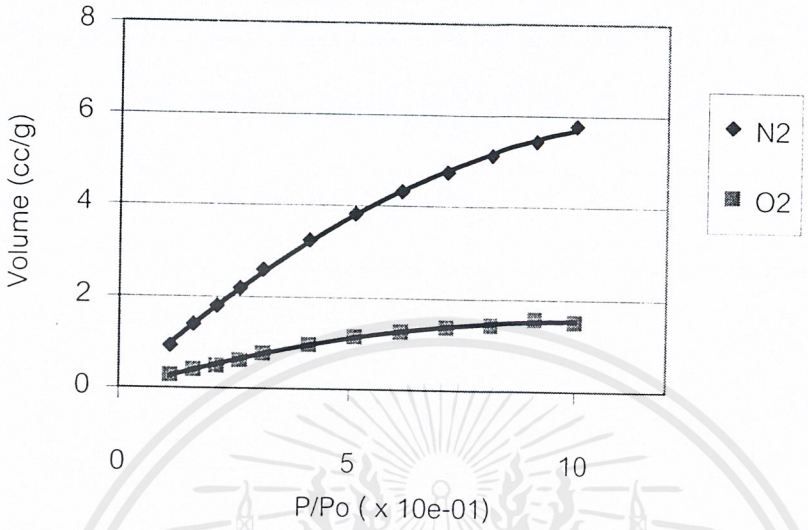


รูปที่ 29ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ FeX IE n/C

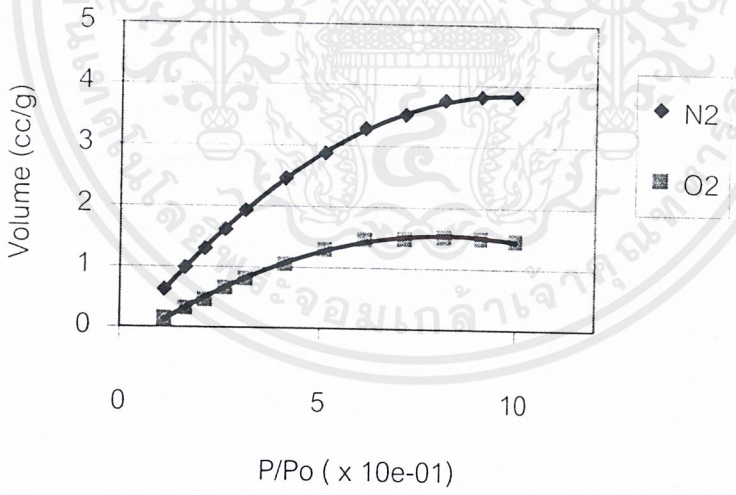


รูปที่ 30ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ FeX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

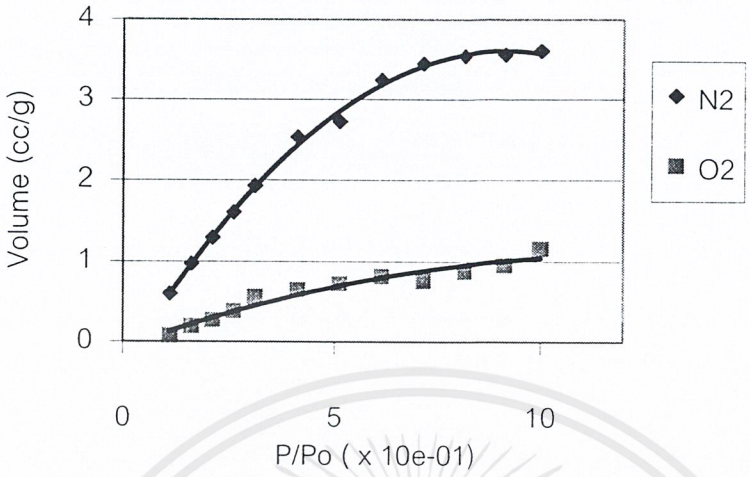


รูปที่ 31ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CrX IE n/C

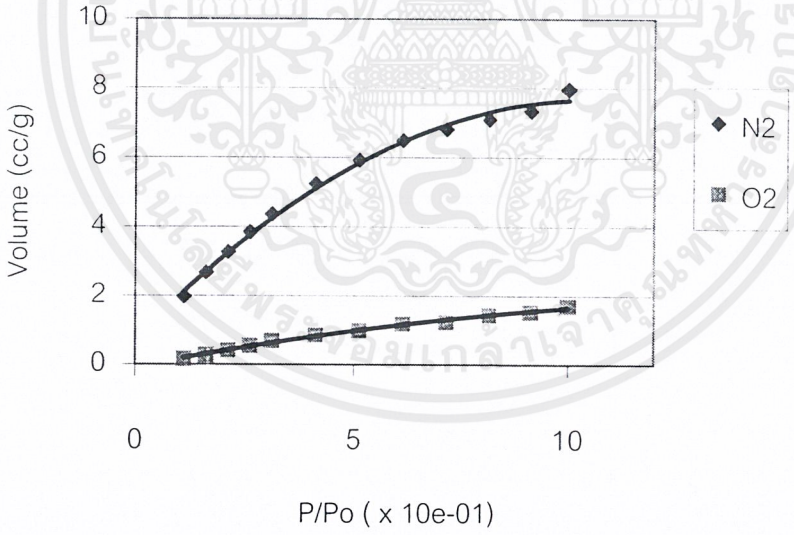


รูปที่ 32ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CrX IE C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

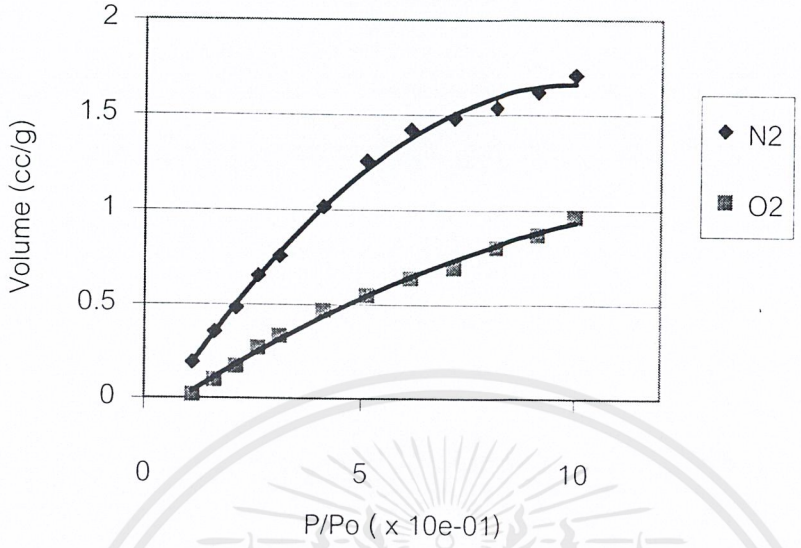


รูปที่ 33ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CrX IE C/N

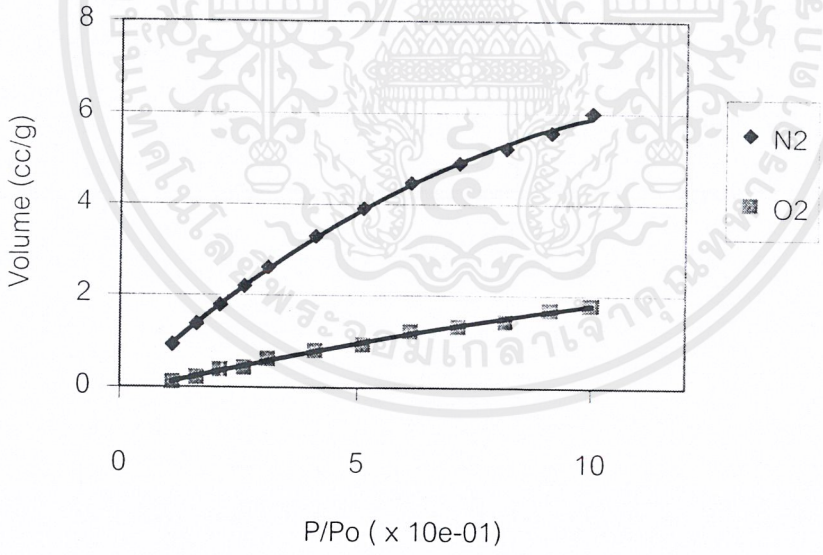


รูปที่ 34ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoX IE n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

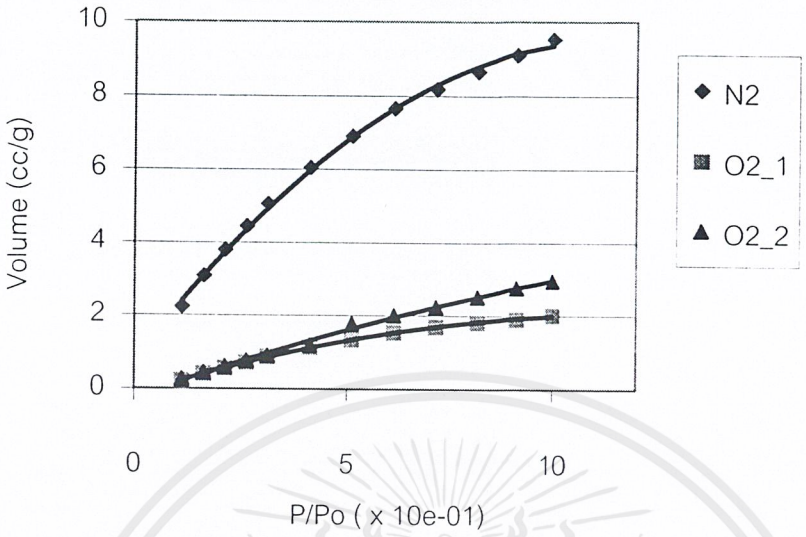


รูปที่ 35ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoX IE C/O

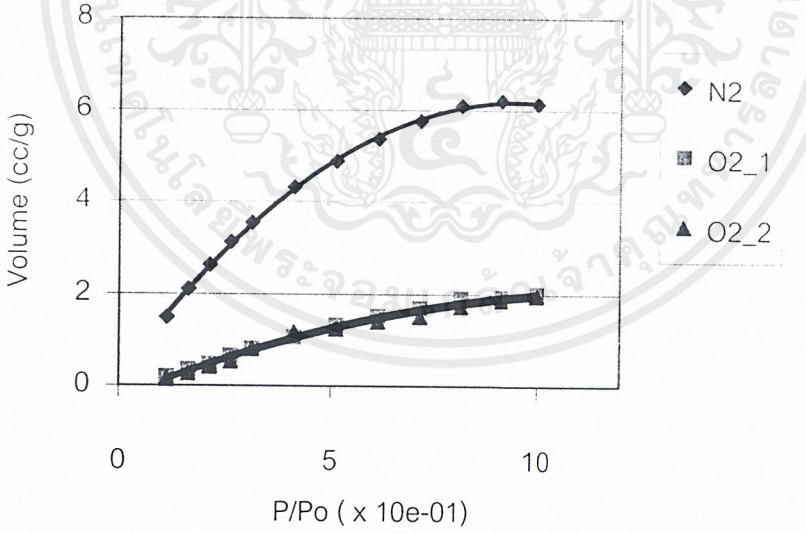


รูปที่ 36ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ CoX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

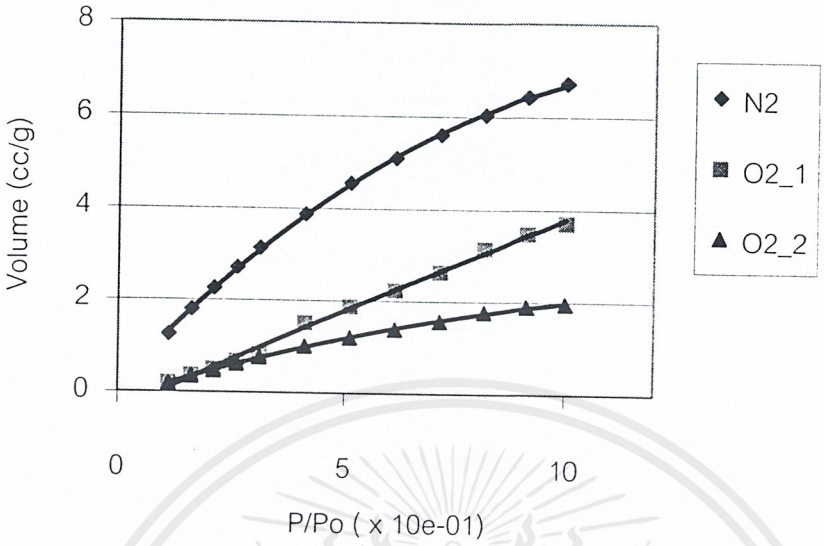


รูปที่ 37ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX IE n/C



รูปที่ 38ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX IE C/O

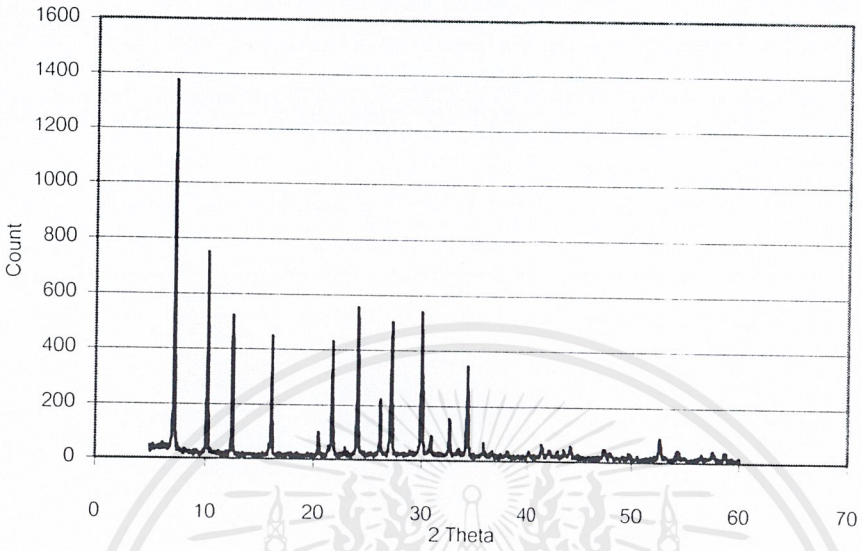
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



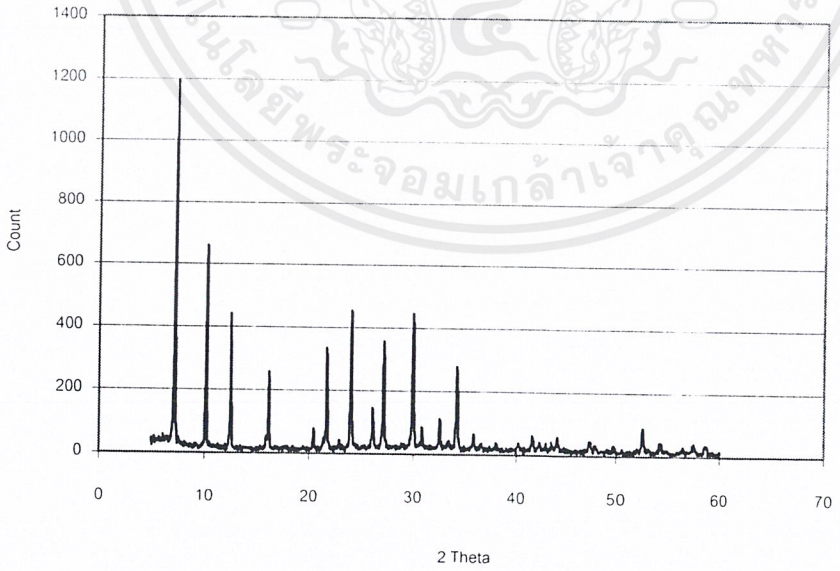
รูปที่ 39ค ไอโซเทอมการดูดซับก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนของซีโอไลต์ MnX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

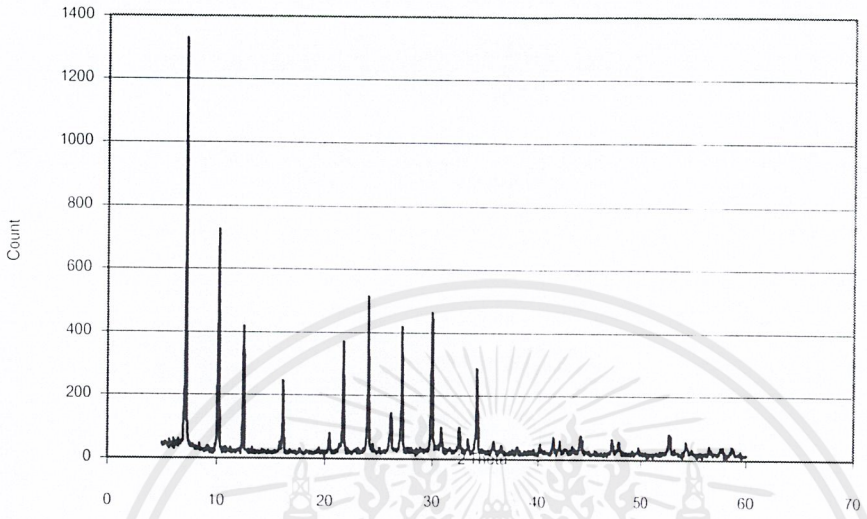


รูปที่ 1ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A n/C

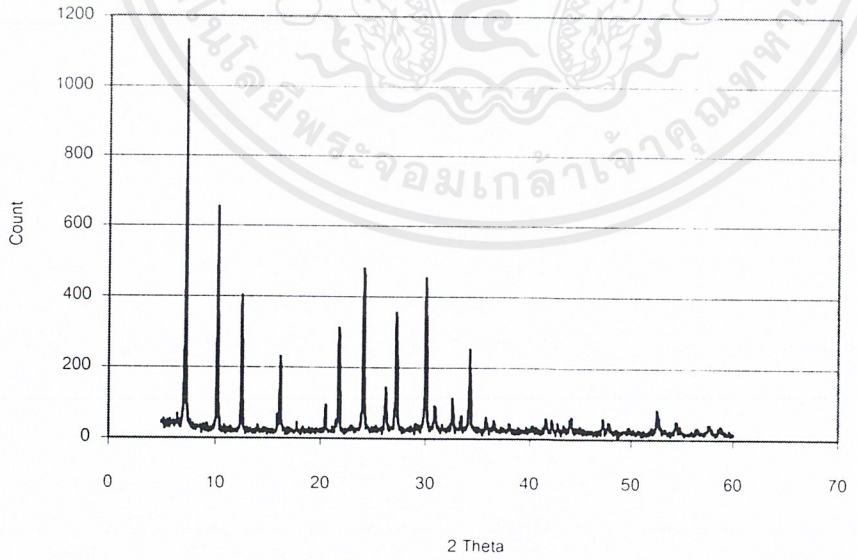


รูปที่ 2ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ A C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

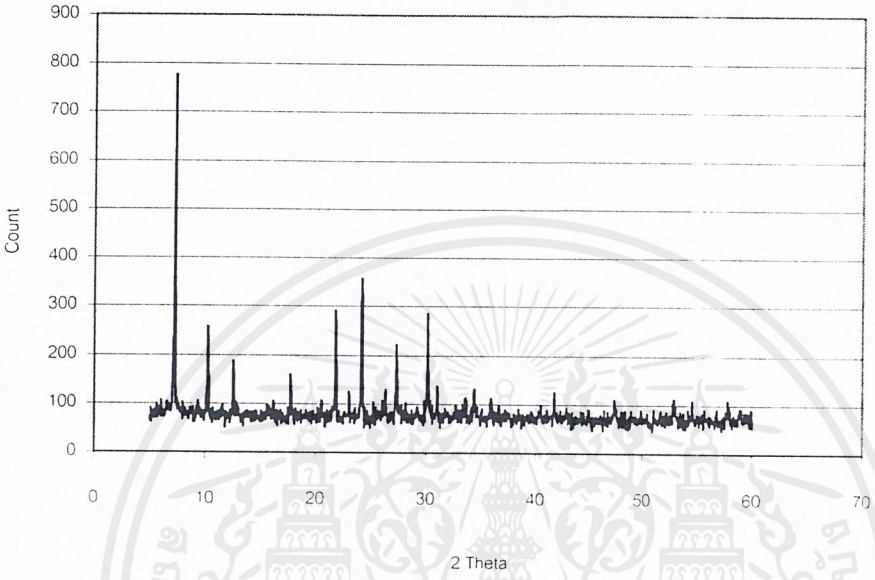


รูปที่ 3ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeA IMP n/C

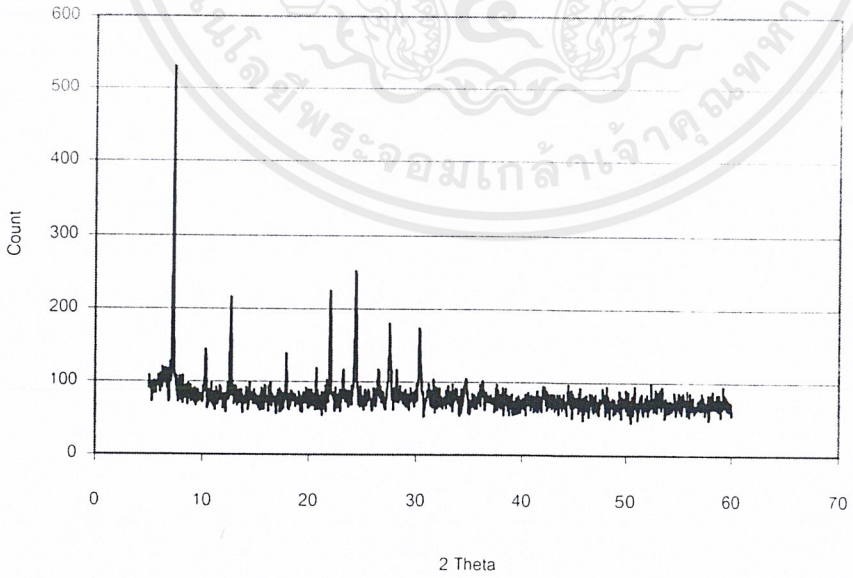


รูปที่ 4ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeA IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

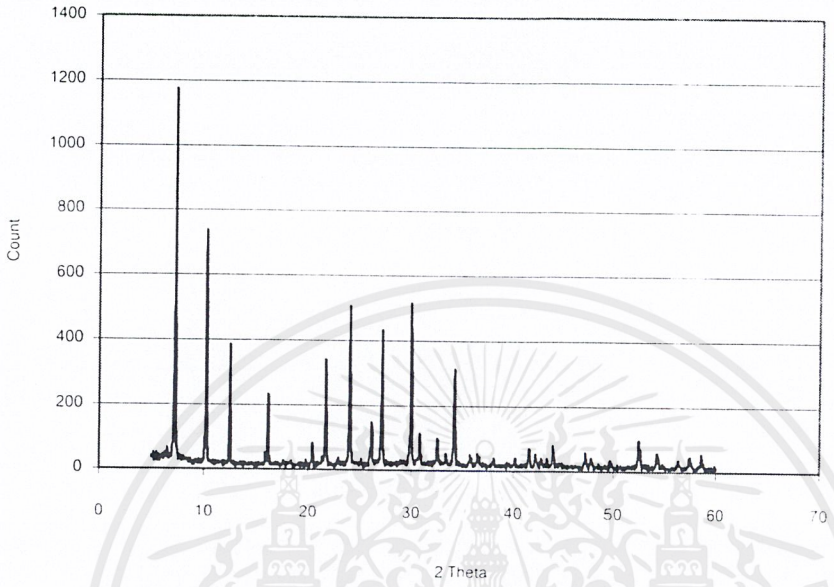


รูปที่ 5ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeA IE n/C

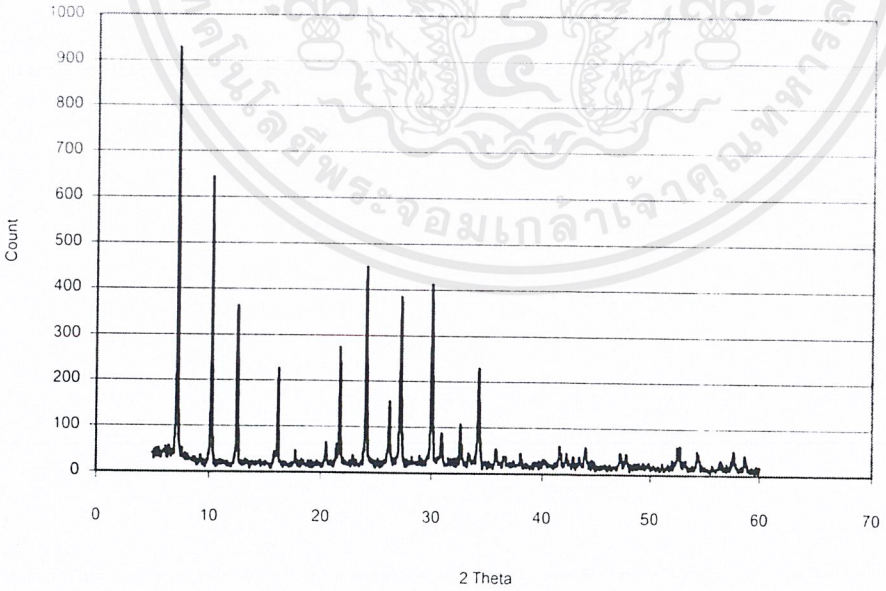


รูปที่ 6ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeA IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

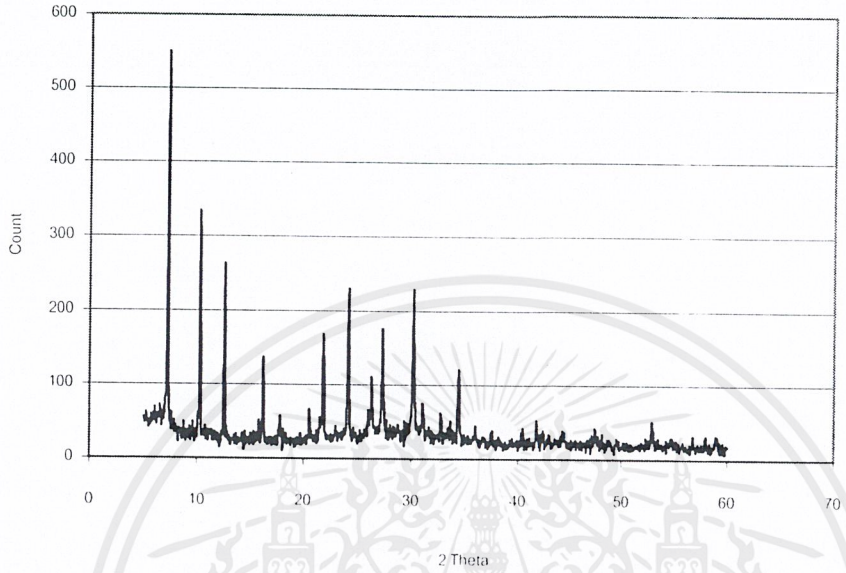


รูปที่ 7ง รูปแบบการเลี้ยวรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrA IMP n/C

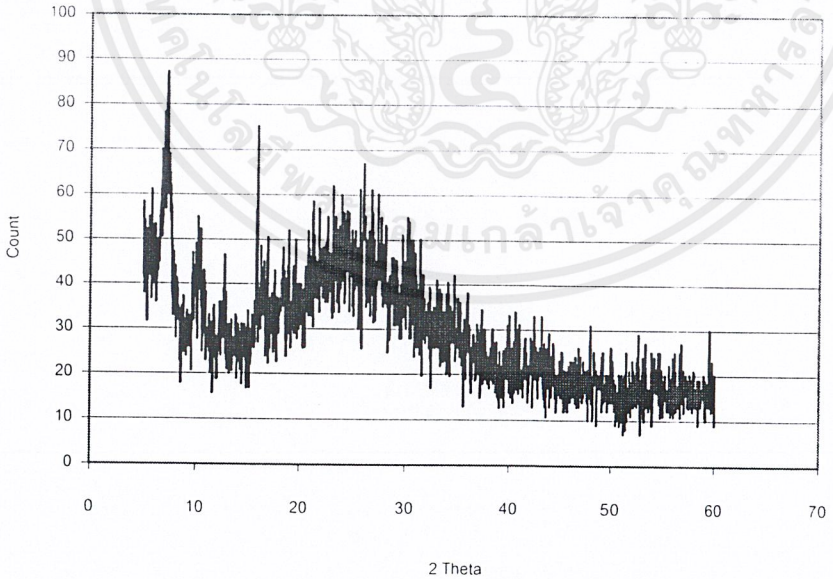


รปที่ 8ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrA IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

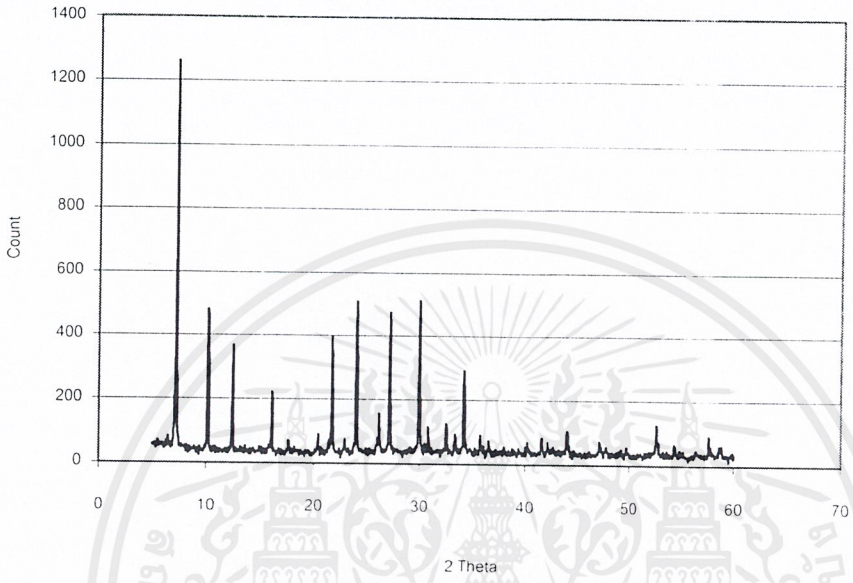


รูปที่ 9ง รูปแบบการเบี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrA IE n/C

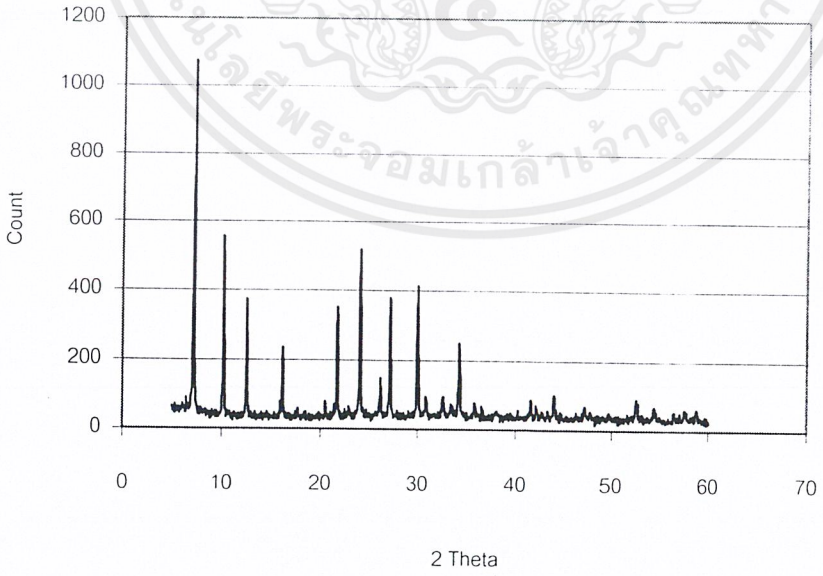


รูปที่ 10ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrA IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

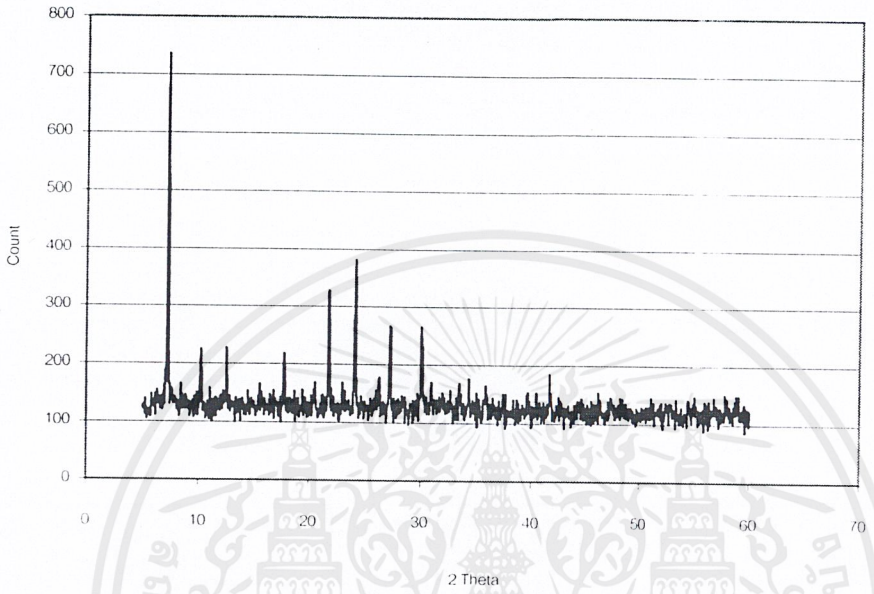


รูปที่ 11ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoA IMP n/C

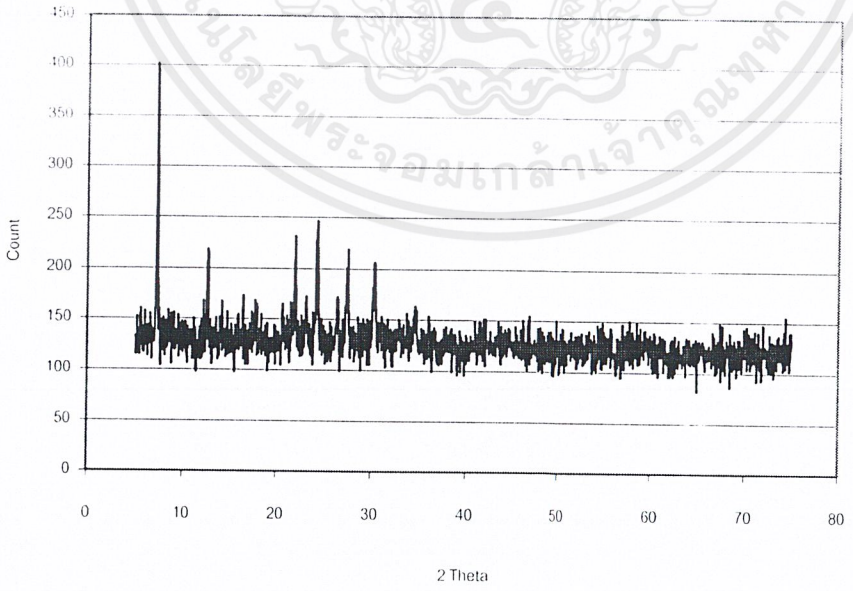


รูปที่ 12ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoA IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

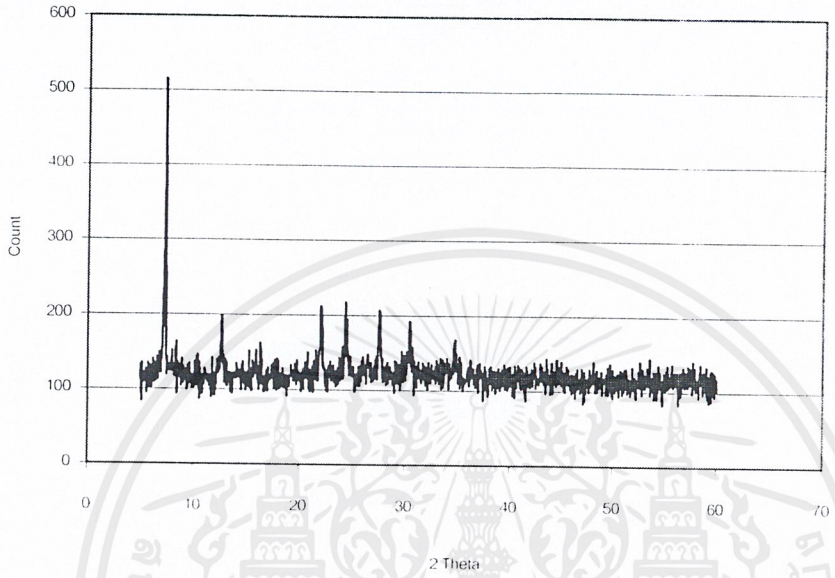


รูปที่ 13ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoA IE n/C

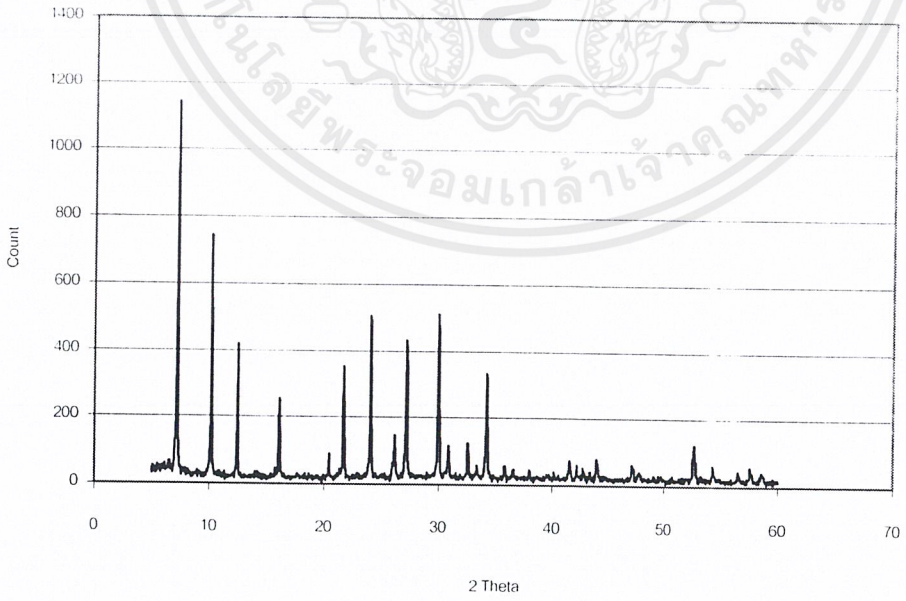


รูปที่ 14ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoA IE C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

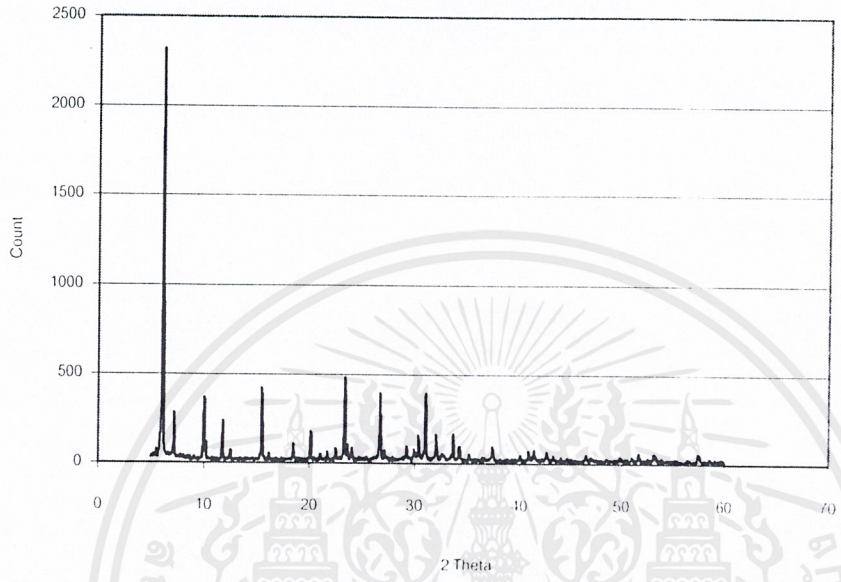


รูปที่ 15ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoA IE C/N

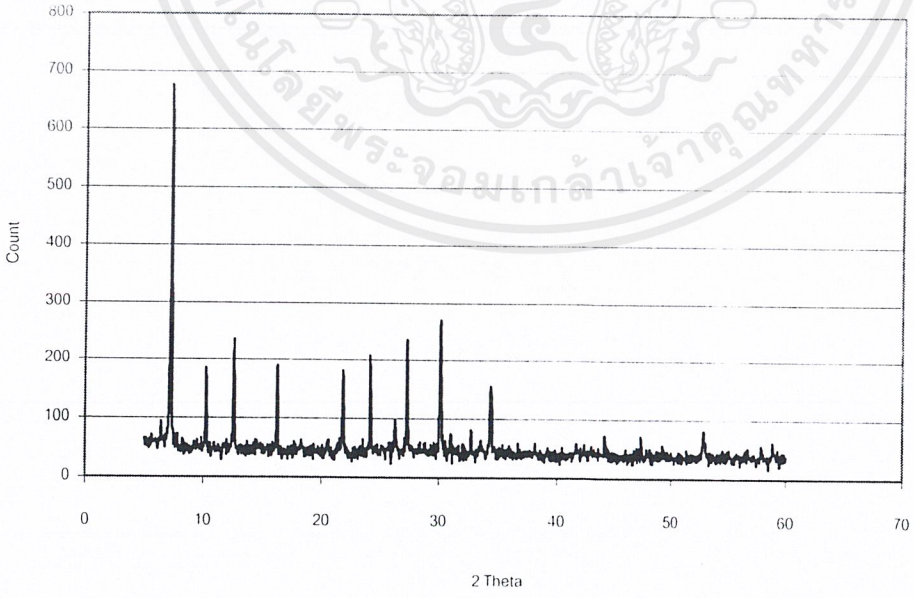


รูปที่ 16ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnA IMP n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

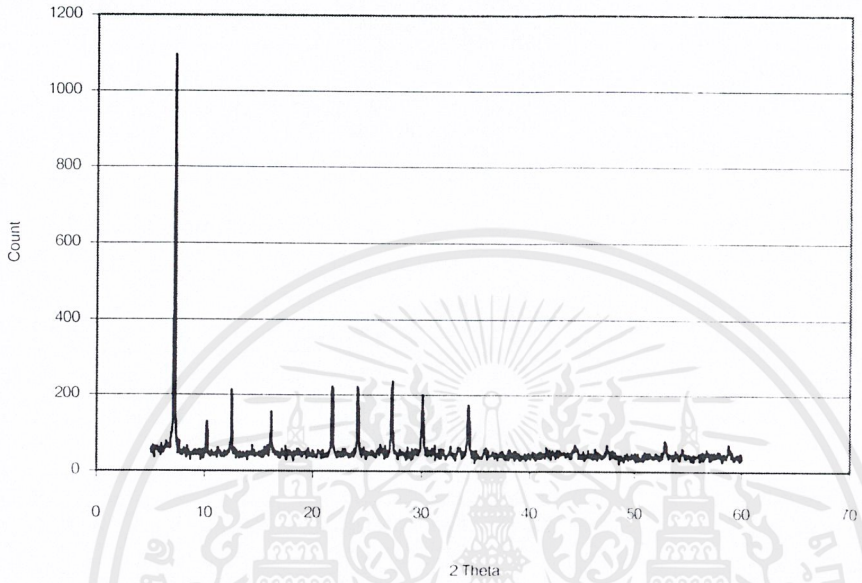


รูปที่ 17ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnA IMP C/O

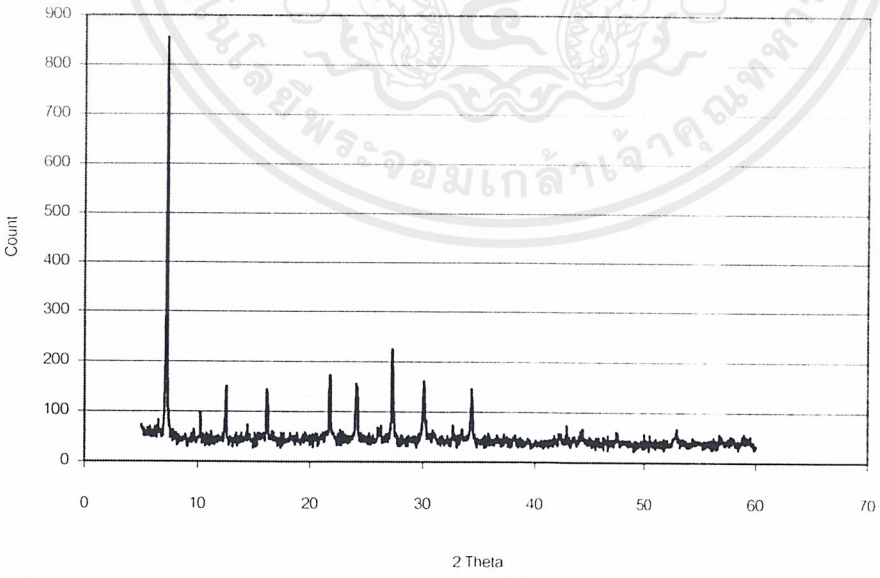


รูปที่ 18ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnA IE n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

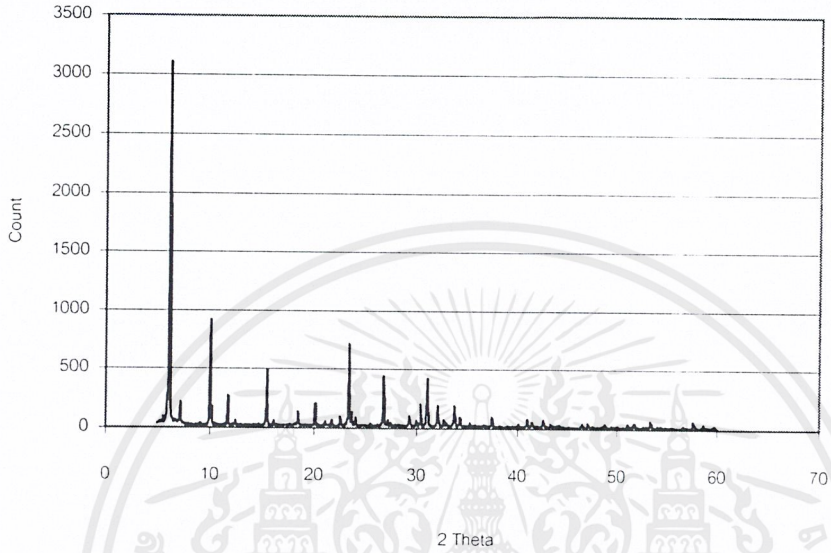


รูปที่ 19ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnA IE C/O

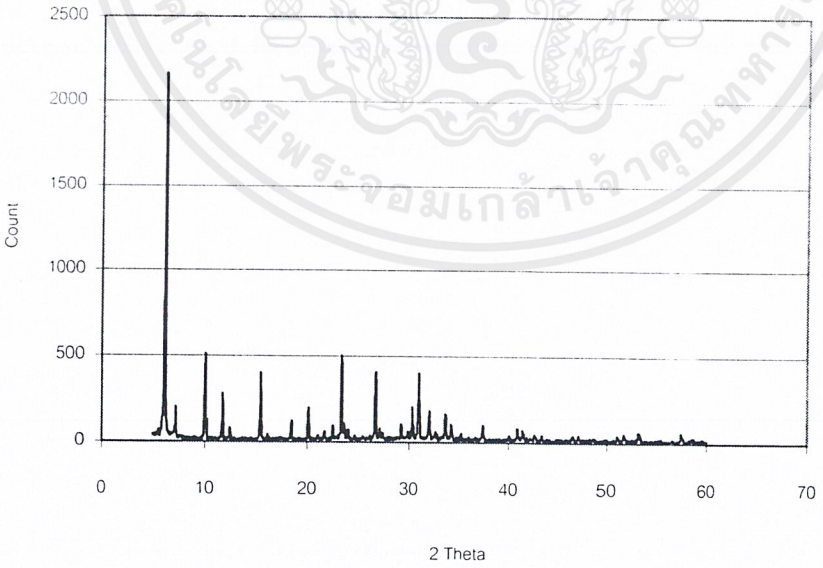


รูปที่ 20ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnA IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

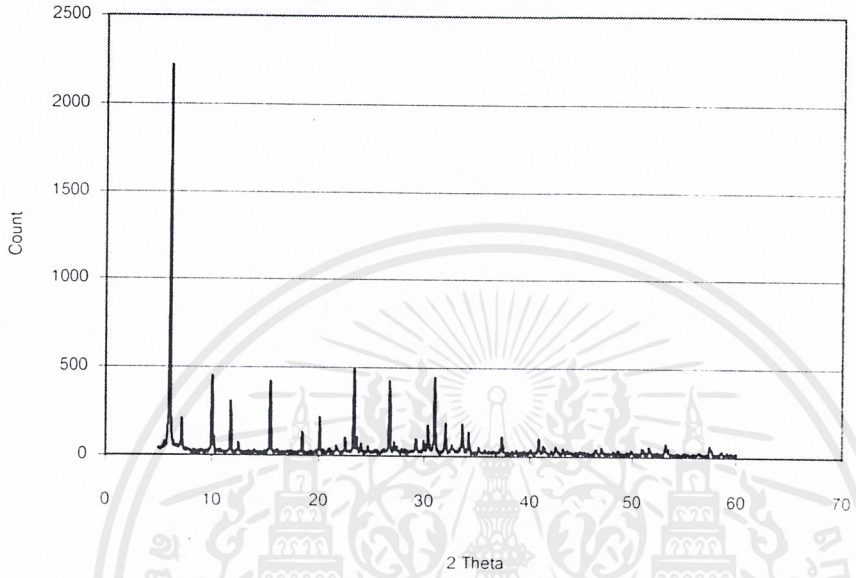


รูปที่ 21ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X n/C

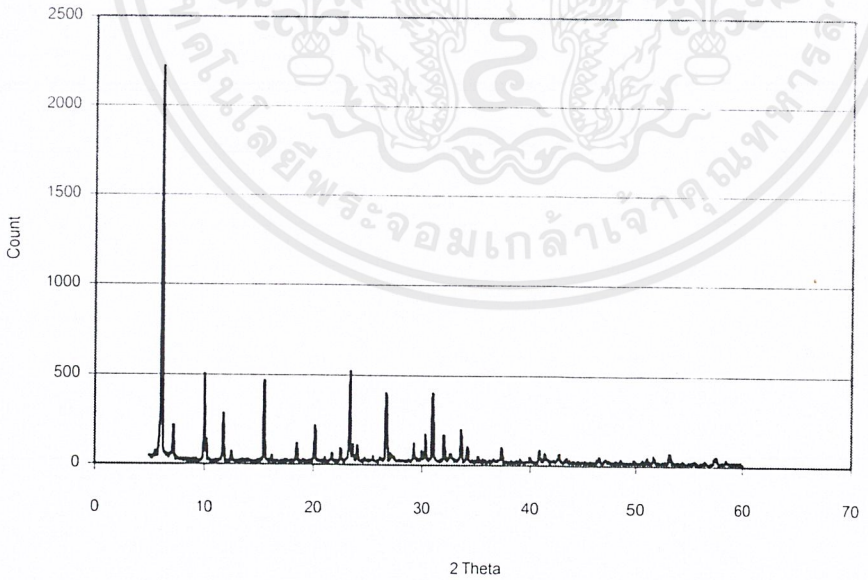


รูปที่ 22ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ X C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

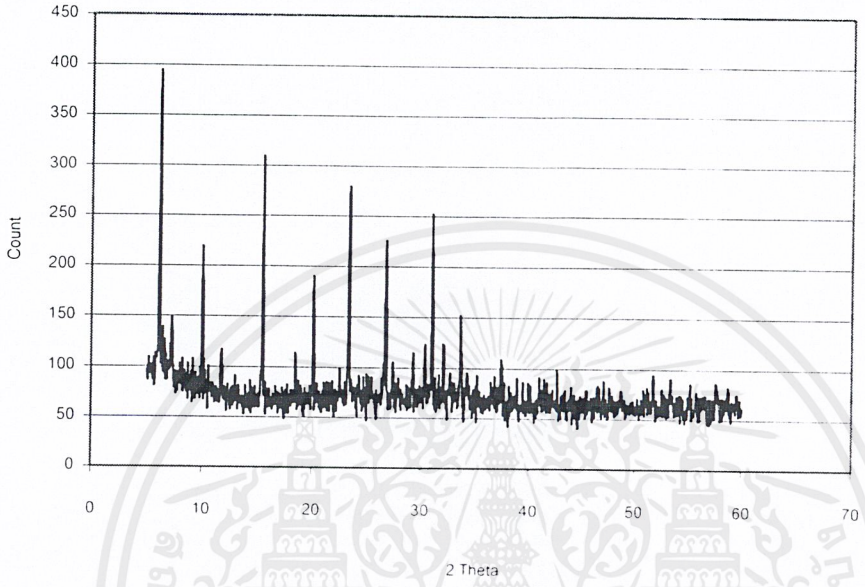


รูปที่ 23ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeX IMP n/C

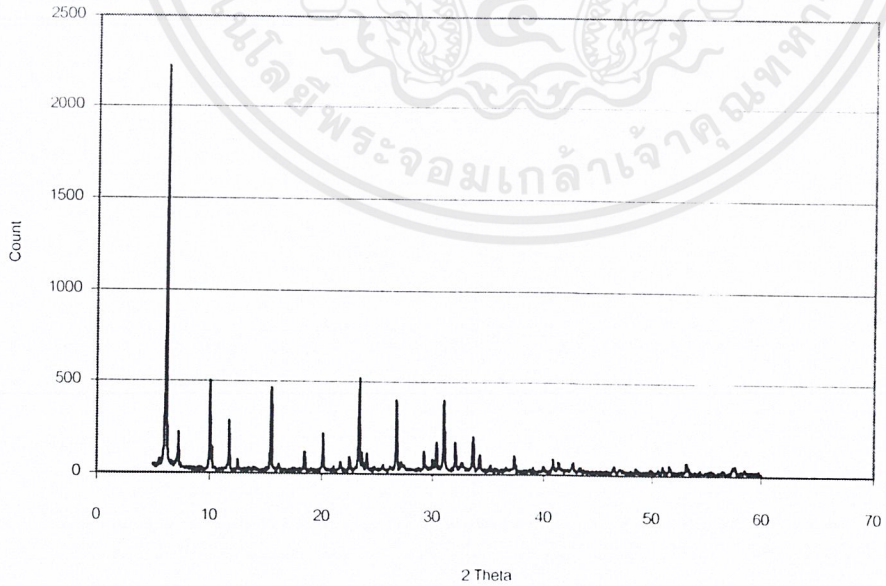


รูปที่ 24ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeX IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

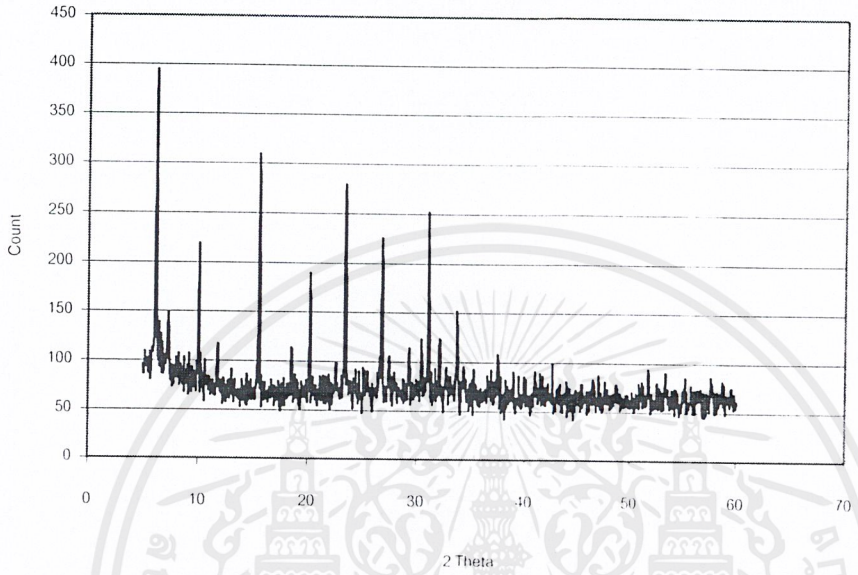


รูปที่ 25ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeX IE n C

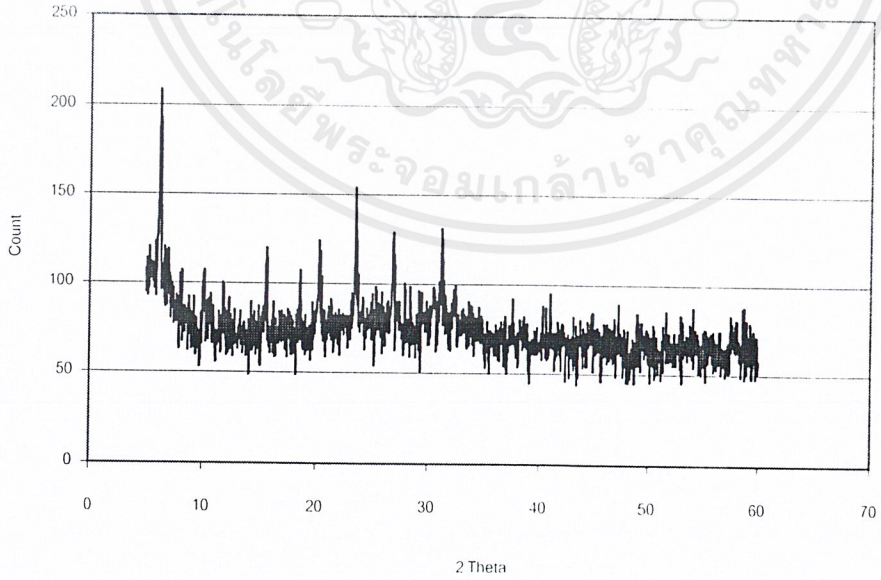


รูปที่ 26ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeX IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

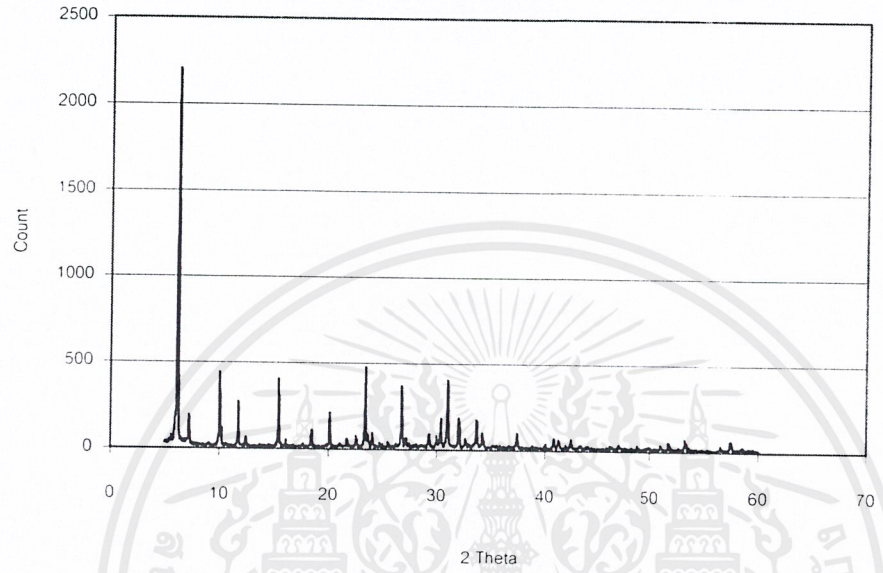


รูปที่ 27ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeX IE n/C

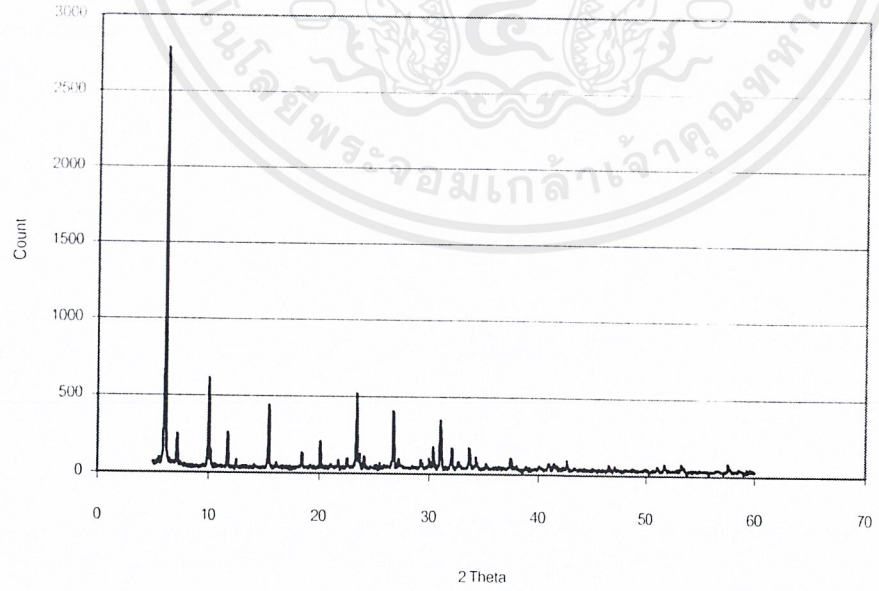


รูปที่ 28ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ FeX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

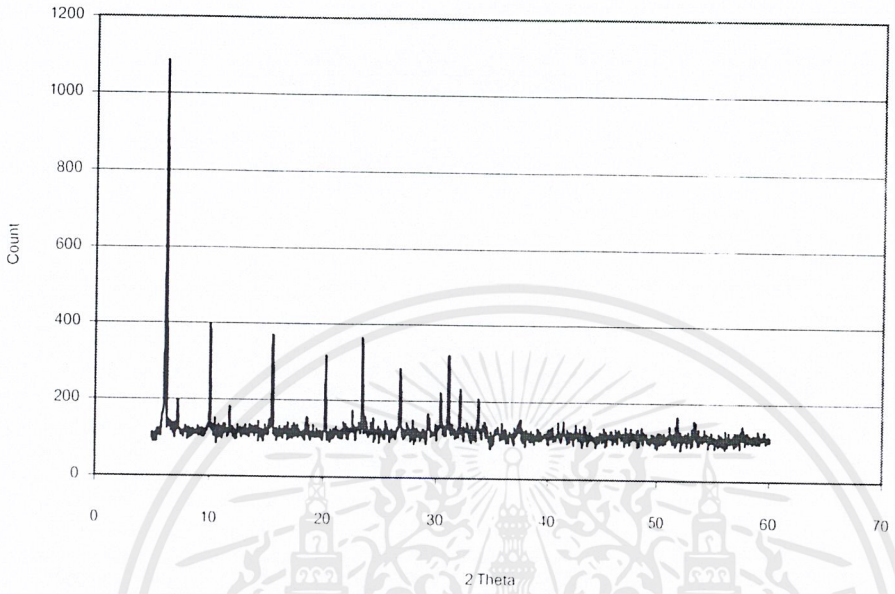


รูปที่ 29ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrX IMP n/C

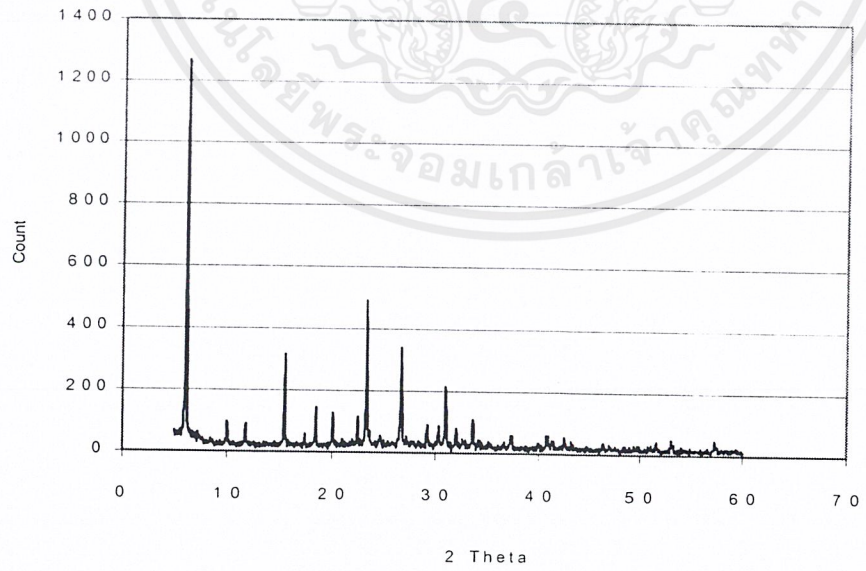


รูปที่ 30ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrX IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

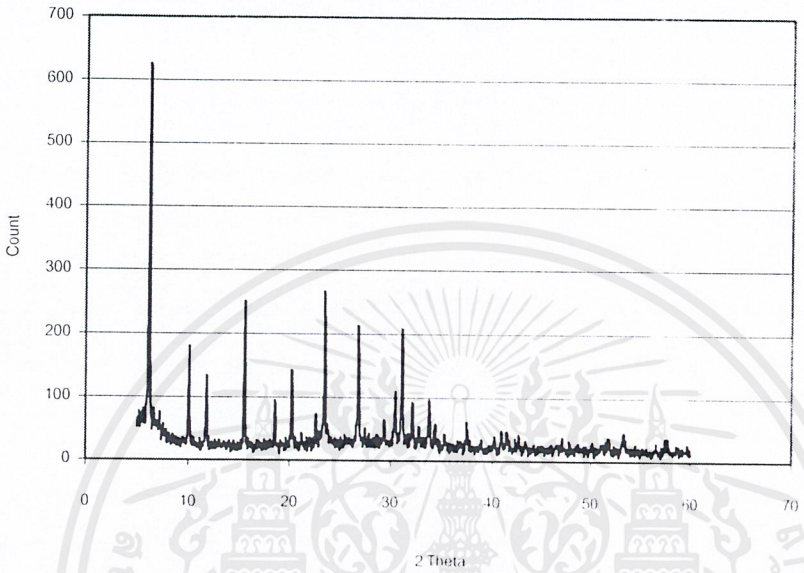


รูปที่ 31ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrX IE n/C

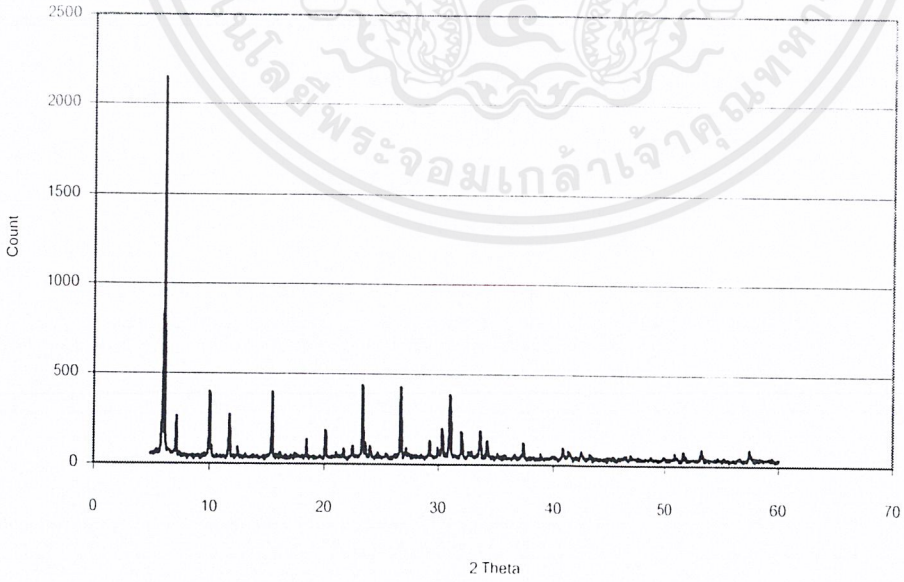


รูปที่ 32ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrX IE C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

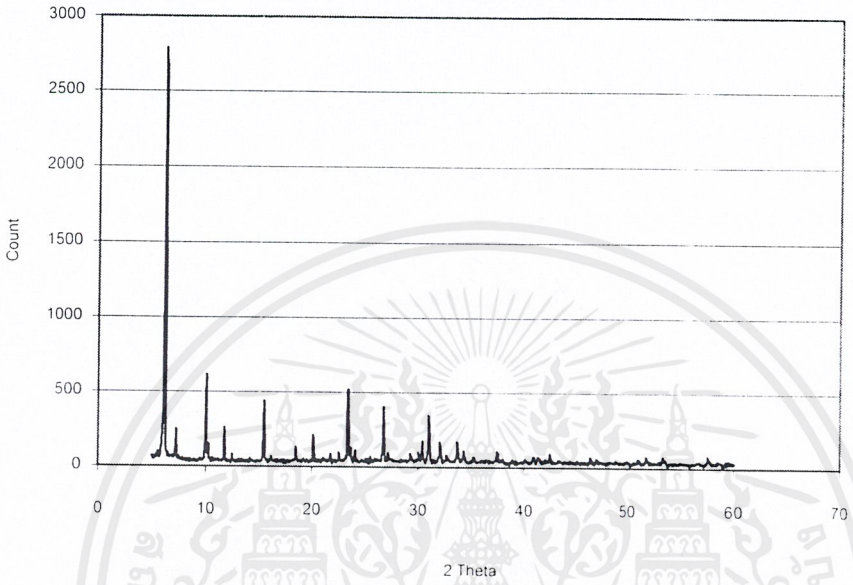


รูปที่ 33ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CrX IE C/N

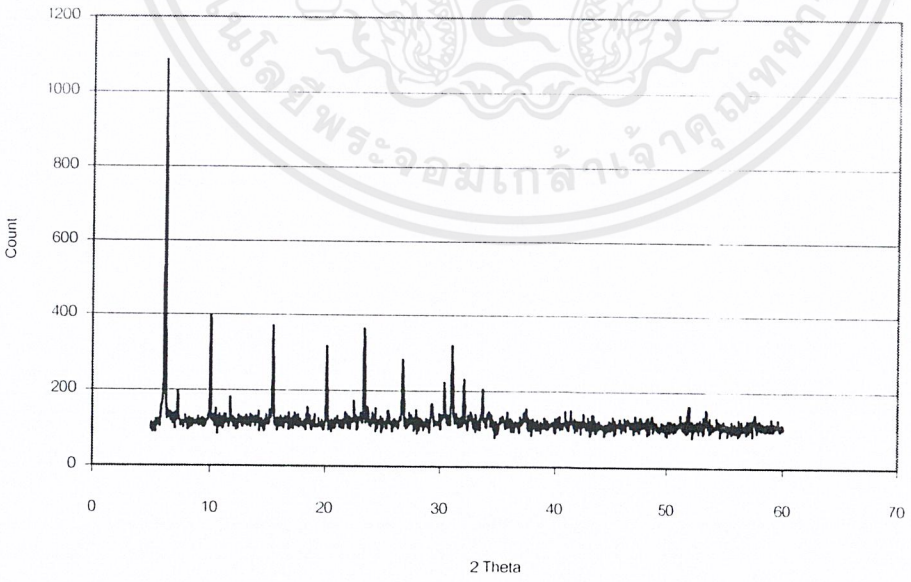


รูปที่ 34ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoX IMP n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

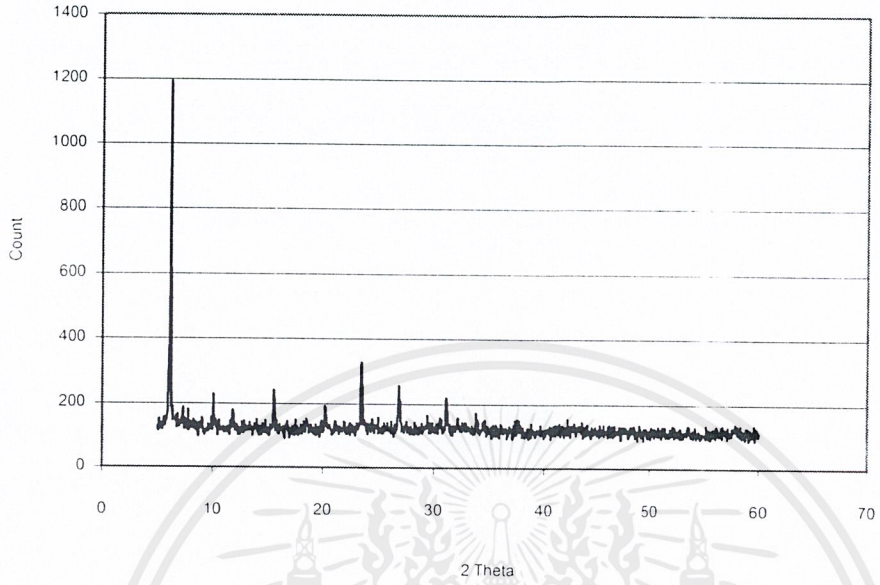


รูปที่ 35ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoX IMP C/O

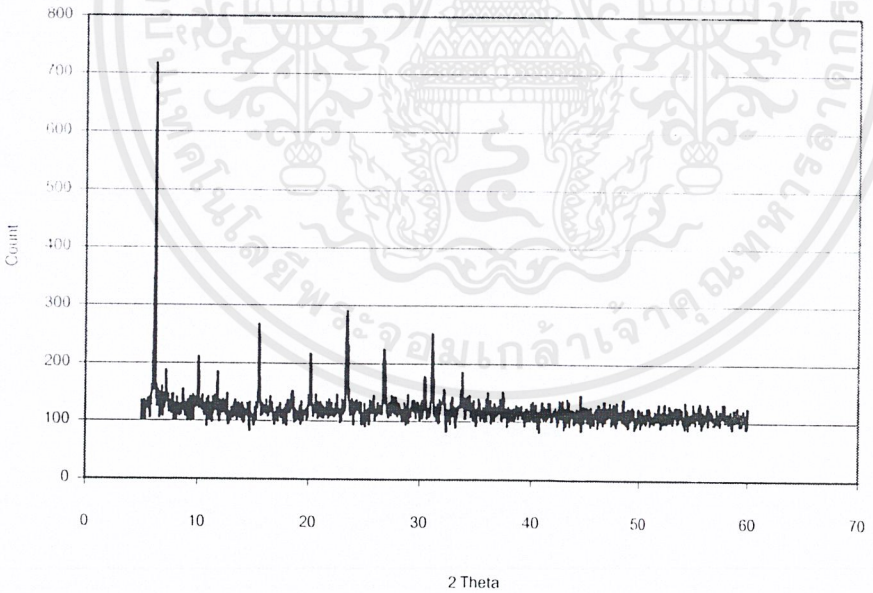


รูปที่ 36ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoX IE n/C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

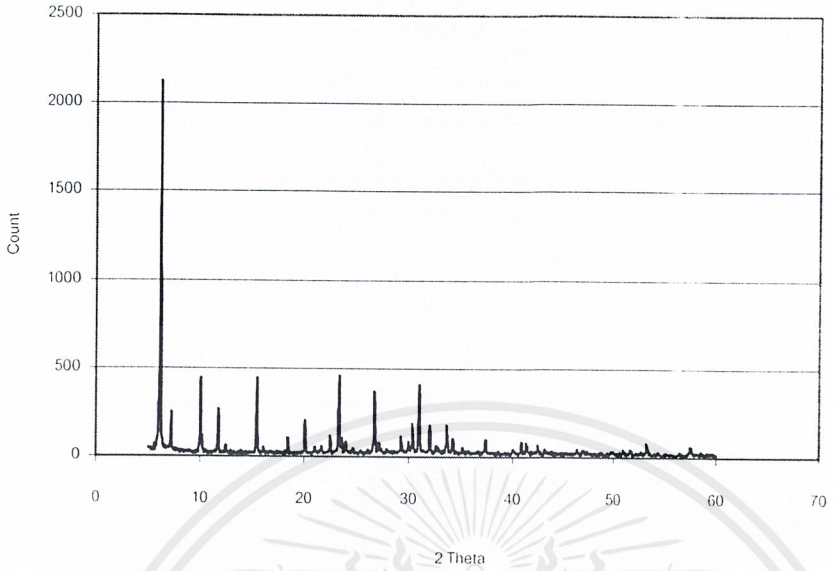


รูปที่ 37ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoX IE C/O

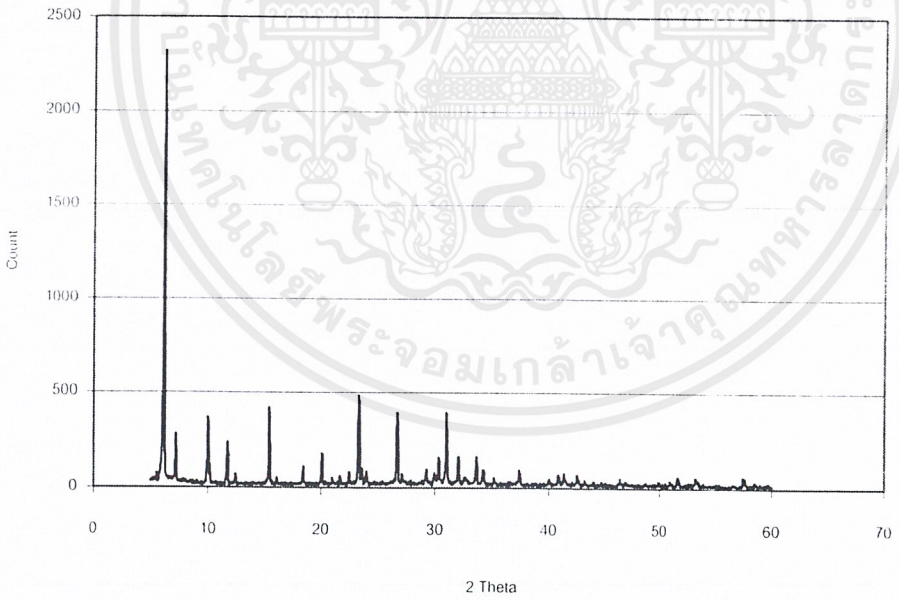


รูปที่ 38ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ CoX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

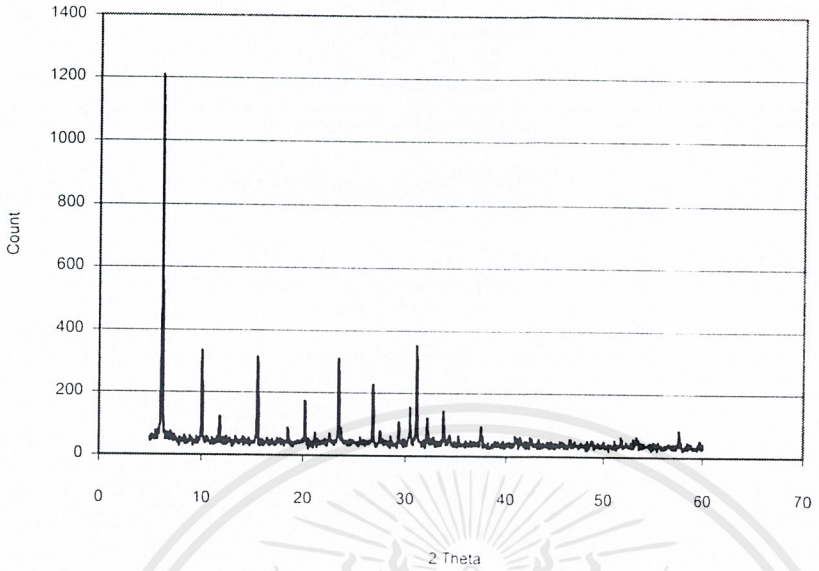


รูปที่ 39ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnX IMP n/C

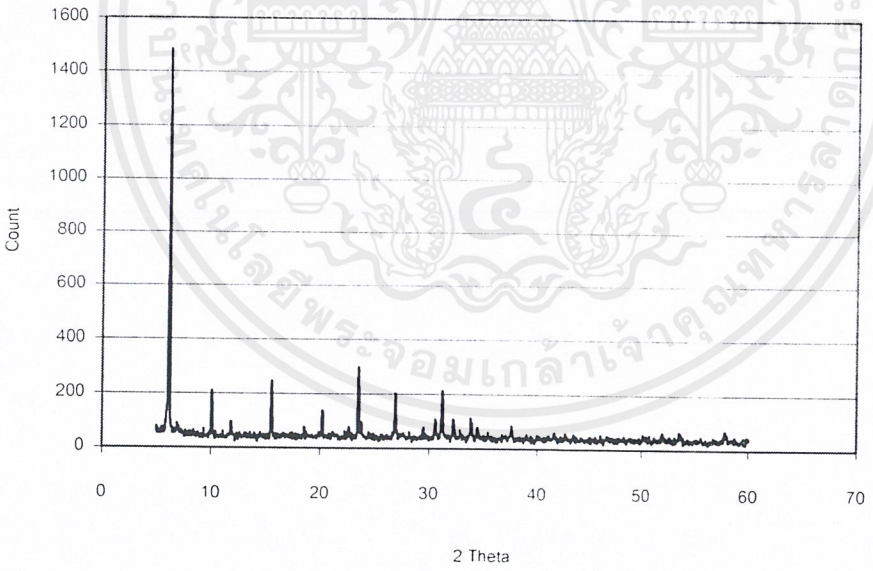


รูปที่ 40ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnX IMP C/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

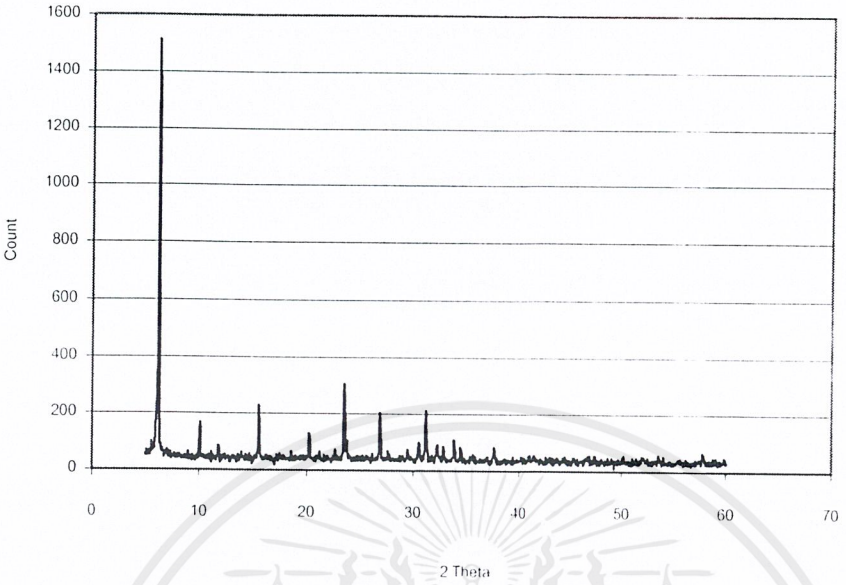


รูปที่ 41ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnX IE n/C



รูปที่ 41ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnX IE C/O

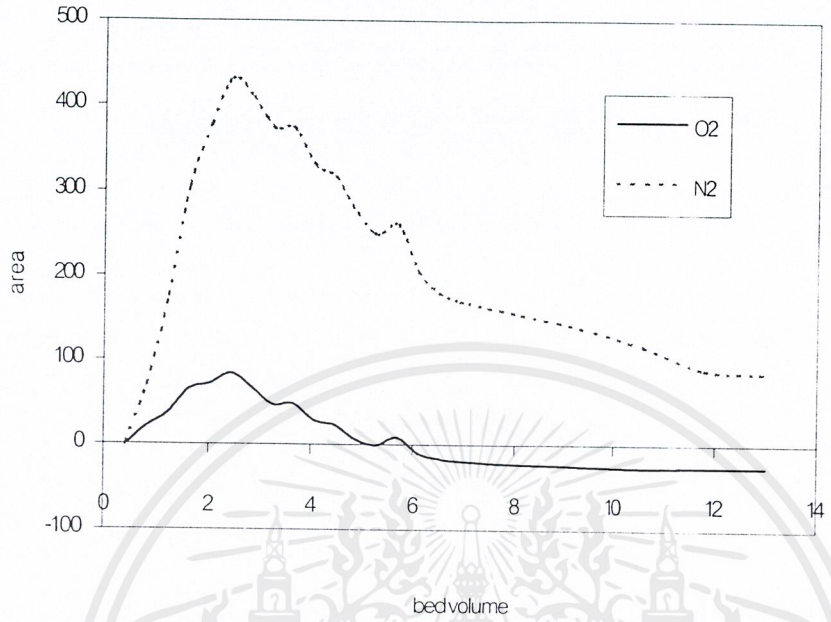
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



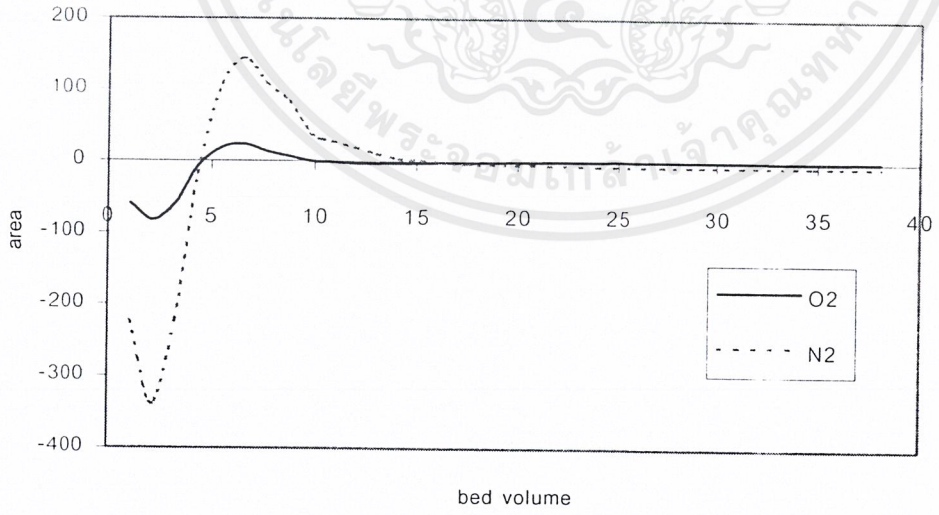
รูปที่ 42ง รูปแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของซีโอไลต์ MnX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

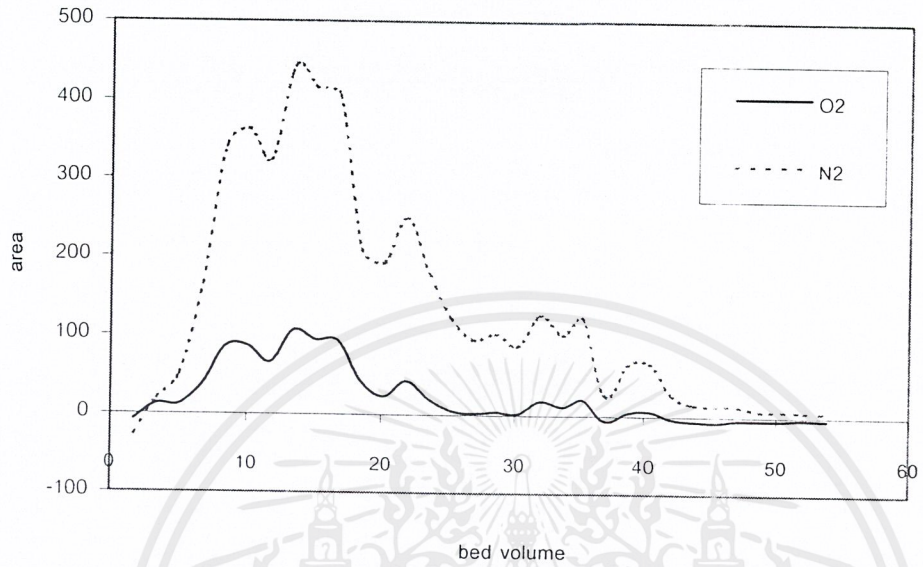


รูปที่ 1จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ A

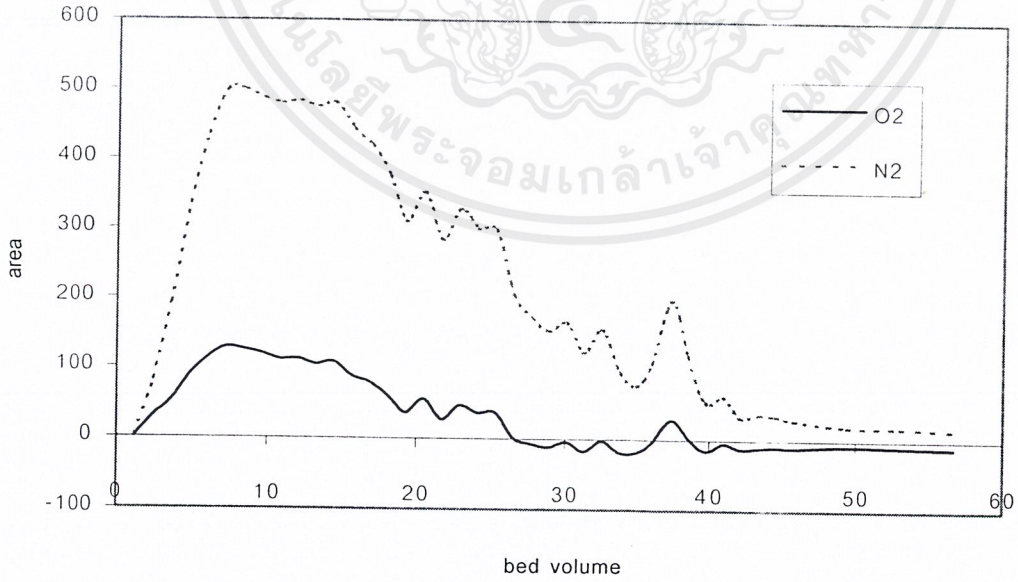


รูปที่ 2จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ FeA IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

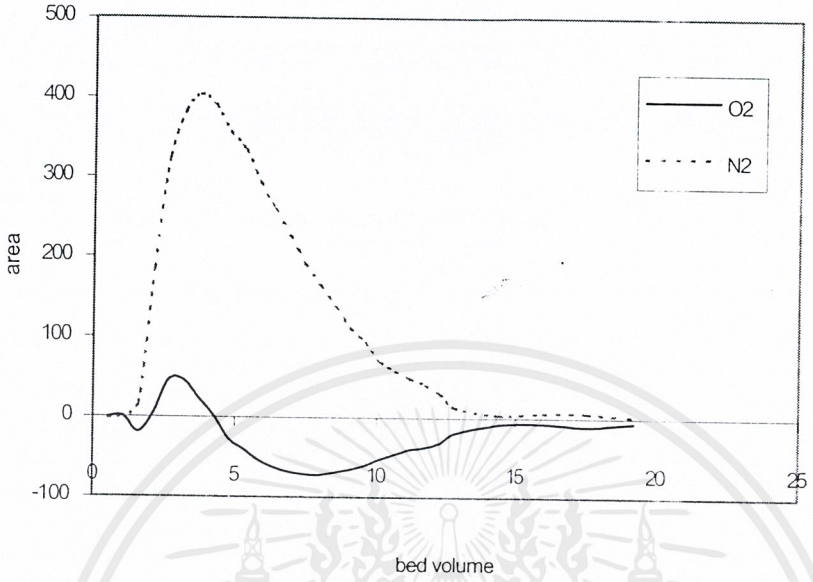


รูปที่ 3จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ CoA IE C/N

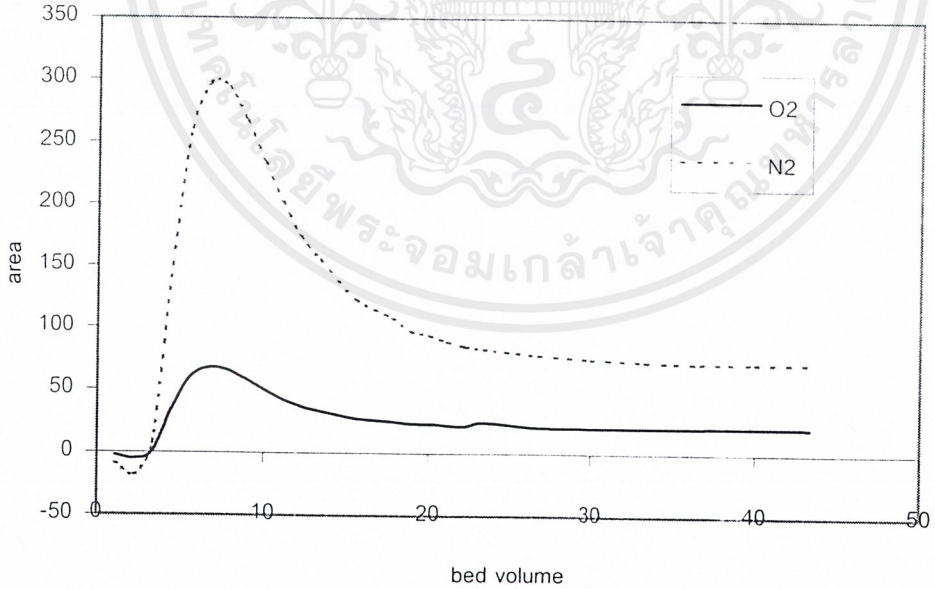


รูปที่ 4จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ MnA IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

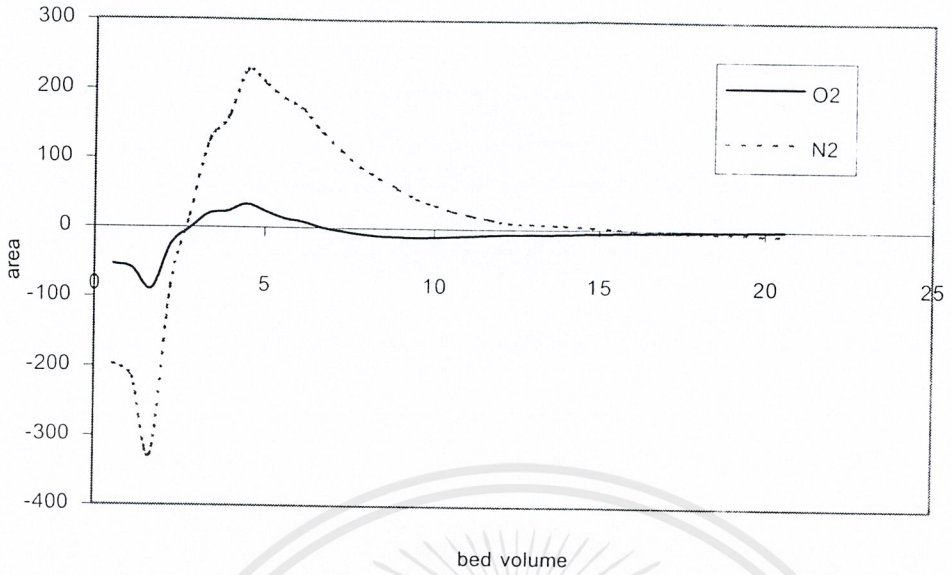


รูปที่ 5จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ X

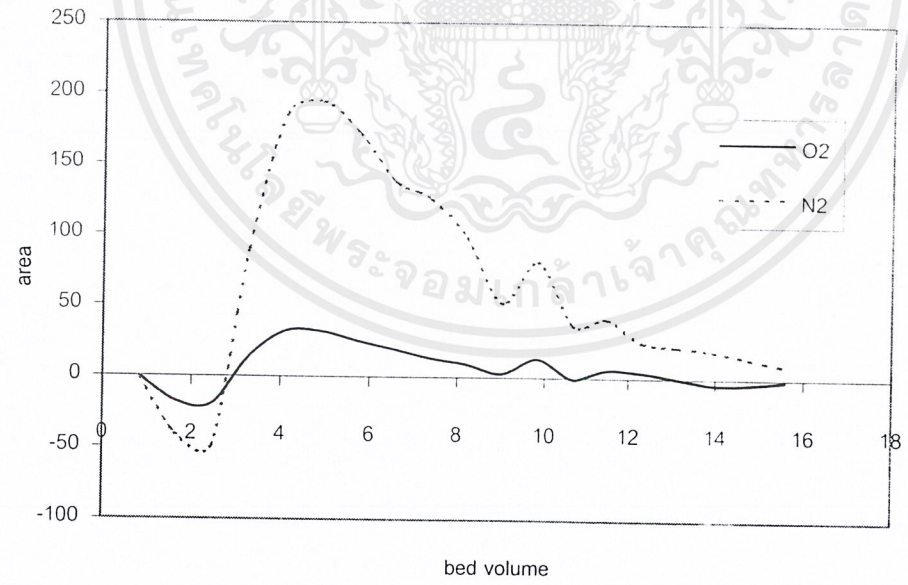


รูปที่ 6จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ FeX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

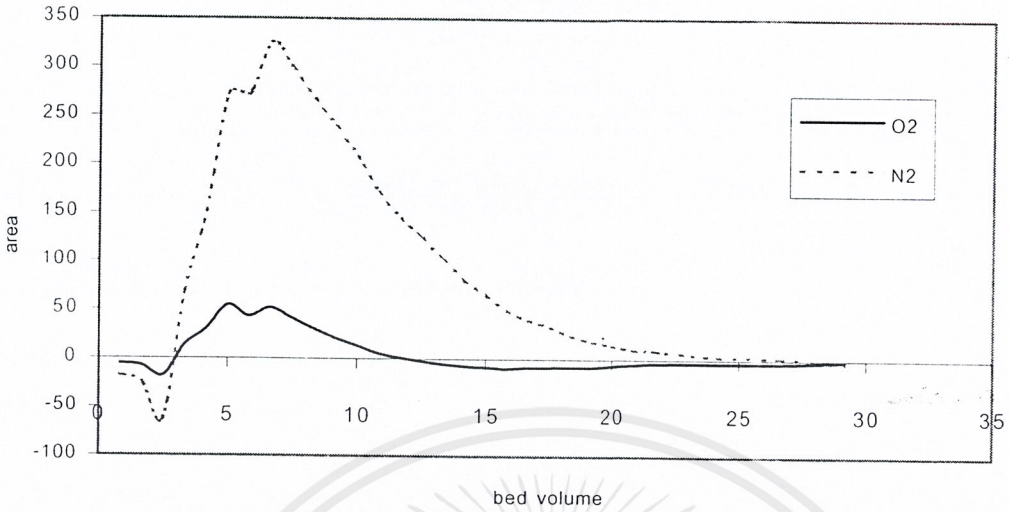


รูปที่ 7จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ CrX IE C/N



รูปที่ 8จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ CoX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9จ แสดงผลการทดสอบการแยกก๊าซออกซิเจนจากอากาศของซีโอไลต์ MnX IE C/N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. Ruhemann,M.Separation of Gases.2nd ed., Oxford UniversityPress.1949
2. Millon,R.M., Buffalo,N.Y."Molecular Sieve Adsorbents" U.S Pat. 2,882,244 April 14,1959.
3. Izumi,J., Tsutaya,H., Amitani,T., Kubo,M., Maechara,K. "Oxygen Adsorbent and Process for the Separation of Oxygen and Nitrogen Using the Same" U.S Patent no. 4,453,952 June12,1984.
4. ตะวัน สุขน้อย เอกสารประกอบการสอนวิชาซีโอไลต์และสารมีรูพรุนที่เกี่ยวข้อง ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2543
5. http:// www.iza-sc.ethz.ch/
6. ศักดา ไตรศักดิ์ โครงสร้างอะตอมและพันธะเคมีบนพื้นฐานทฤษฎีควอนตัม โครงการตำรา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ม.ป.ป.
7. Choudary,N.V.,Jasra,R.V."Process for the Separation of A Molecular Sieve Adsorbent for Selectively Adsorbing Oxygen from A Gaseous Mixture." U.S Patent no.6,087,289 July 11,2000.
8. Skoog,D.A.,West,D.M.,Holler,F.J.Fundamentals of Analytical Chemistry. 6th ed., Saunders College, pp.226, New York, c1992.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้