

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การใช้วีดิทัศน์เอ แยกนิเทศ ตะกั่ว และสังกะสี ออกจากสารละลาย

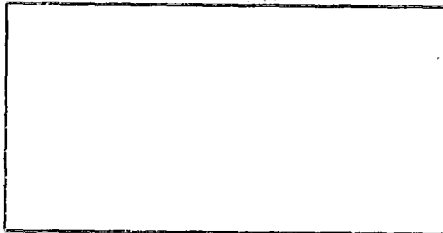


นายกวี ดำรงสิริพร
นางสาวกาญจน์ สหพัฒนสมบัติ

2/พ.
ก 3247
2536

612524621

สาขา _____
เลขทะเบียน _____
วัน, เดือน, ปี _____



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2536

REMOVING NICKEL LEAD AND ZINC BY USING ZEOLITE A

Mr.Khawe Damrongsiriporn

Ms.Karn Sahapattanasombat

A Special Project Submitted in Partial Fullfillment of the

Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

1993

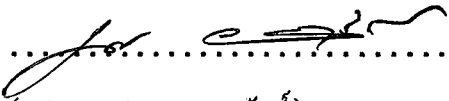
ทำข้อโครงการพิเศษ การวิจัยไอโอดีเอ แยกนก กิล ตะกั่ว และสังกะสีออกจากสารละลาย

โดย นาย กวี ดำรงสิริพร
น.ส. กาญจน์ สหพัฒน์สมบัติ

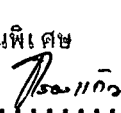
ภาควิชา เคมี

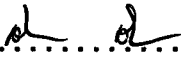
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล
อ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย

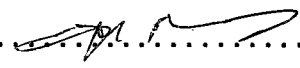
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาด-
กระบัง อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... รักษาการหัวหน้าภาควิชาเคมี
(ผศ. นงนุช เกตุรานุกัณฑ์)

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ


..... ประธานกรรมการ
(อ. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์)


..... กรรมการ
(ผศ. สิริภัค สระตันดี)


..... กรรมการ
(ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล)


..... กรรมการ
(อ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย)

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การนำซีโรไลต์เอแยกนิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสีออกจากสารละลาย
นักศึกษา	นายกรวี ดารงสิริพร นางสาวกาญจน์ สหพัฒนสมบัติ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล อ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย
ภาควิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2536

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ ได้ทำการสังเคราะห์ซีโรไลต์เอ ด้วยวิธีไฮโดรเจล (Hydrogel process) เป็นการทำปฏิกิริยาของ โซเดียมอลูมิเนตกับโซเดียมซิลิเกต ที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วใบพัดกวน 1000 รอบ/นาที

ซีโรไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ มีความเป็นด่างเท่ากับ 10.80 และจากการวิเคราะห์สมบัติด้วยเทคนิคเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรคชัน อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี-โตนเมทรี และสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป พบว่าซีโรไลต์ที่สังเคราะห์ได้มีสมบัติเช่นเดียวกับซีโรไลต์เอมาตรฐาน

จากการศึกษาโครงสร้างของซีโรไลต์เอ พบว่ามีลักษณะเป็นตะแกรงรูมเลกุลที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับรูมเลกุลที่มีขนาดพอเหมาะ จึงสามารถนำแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้

เมื่อนำซีโรไลต์เอสังเคราะห์ที่ได้มาทดสอบประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปริมาตร 1 ลิตร ออกจากสารละลายในเวลา 10 นาที พบว่าต้องนำซีโรไลต์เอสังเคราะห์จำนวน 0.5, 0.6 และ 2 กรัมต่อลิตรในการแยกโลหะตะกั่ว(II) สังกะสี(II) และนิกเกิล(II) ออกจากสารละลายได้หมดที่ pH 6.8 6.5 และ 8.3 ตามลำดับ

Nickel respectively. The effective time was 10 minutes for every metal ions and basicity of the solution were 6.8, 6.5 and 8.3 for Lead, Zinc and Nickel respectively.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่อง การใช้ซีโรไลต์เอ ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย เพื่อเสนอต่อภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม โครงการพิเศษนี้สำเร็จ ล่วงแล้ว ผู้เสนอได้รับความแนะนำและความช่วยเหลือ จากคณาจารย์และบุคคลหลายฝ่าย ซึ่งเป็น ประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์ของโครงการพิเศษนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณผู้ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้ คือ

ผศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล	อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ
อ. พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย	อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ
ผศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช	คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอม- เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ดร. อมร เพชรสม	ภาควิชาเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อ. มาลาตี หัยคุปต์	ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คุณประเสริฐ เขียวพัฒนา	ภาควิชาธรณีวิทยา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คุณฉวีตี ตัณฑ์สุทธิ	บริษัทคอลเกต-ปาล์มโรลลิฟ
คุณณรงค์ศักดิ์ พิทักษ์มวลชน	บริษัท พี แอนด์ เอนด์ แอสรชชีเอท จำกัด

อนึ่งยังมีบุคคลที่มีพระคุณอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ผู้เสนอโครงการ พิเศษขอขอบคุณมาในโอกาสนี้ด้วย

กวี คารังสิริพร

กาญจน์ สหพัฒนสมบัติ

15 มีนาคม 2536

สารบัญ

เรื่อง

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ

ดัชนีรูป

ดัชนีตาราง

บทที่ 1

บทนำ

บทที่ 2

ลักษณะเฉพาะของซีไอไลต์ และการประยุกต์

2.1	โครงสร้างของซีไอไลต์.....	1
2.2	ช่องว่างภายในโครงสร้างของซีไอไลต์เอ.....	3
2.3	โครงสร้างอลูมิเนียมซิลิเกตของซีไอไลต์เอ.....	3
2.4	การสังเคราะห์ซีไอไลต์เอ.....	6
2.5	สมบัติของซีไอไลต์	
	(1) สมบัติทางกายภาพ	
	1.1 รูปร่าง.....	9
	1.2 ขนาดของอนุภาคซีไอไลต์เอ.....	11
	1.3 ความหนาแน่น.....	12

1.4 การสิ้นไนโตรเจน	12
1.5 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์	15
(2) สมบัติทางเคมี	
2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดกับเบสแก่	16
2.2 สมบัติในการดูดซับของซีโอไลต์	16
2.3 สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์	17
2.6 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในการบำบัดน้ำทิ้ง	22

บทที่ 3

การทดลอง

ตอนที่ 3.1 การสังเคราะห์และการทดสอบคุณสมบัติของซีโอไลต์	
3.1.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ โดยวิธีไฮโดรเจล	23
3.1.2 การทดสอบสมบัติ	
3.1.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน	25
3.1.2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีอินฟราเรดสเปคโตรโฟโตเมทรี	26
3.1.2.3 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป	26
3.1.2.4 การหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	26
3.1.2.5 การหาค่า pH ของซีโอไลต์ เมื่อกระจายตัวในน้ำ	26
ตอนที่ 3.2 การใช้ซีโอไลต์เอ แยกโลหะหนักออกจากสารละลาย	27

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ตอนที่ 4.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ และทดสอบสมบัติทั่วไป	
4.1.1 ผลการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ	29
4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทั่วไป	

4.1.2.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน...	29
4.1.2.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตเมทรี.....	29
4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป.....	29
4.1.2.4 ผลการหาการกระจายของขนาดอนุภาคซีโอโลต์เอ	29
4.1.2.5 ผลการทดสอบ pH ของซีโอโลต์เอ เมื่อกระจายตัวอยู่ในน้ำ.....	30
ตอนที่ 4.2 ผลการใช้ซีโอโลต์เอ แยกโลหะหนักออกจากสารละลาย.....	31

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง วิเคราะห์ผล และข้อเสนอแนะ.....	57
---	----

<u>เอกสารอ้างอิง</u>	63
----------------------------	----

ภาคผนวก

ตารางแสดงสมบัติของซีโอโลต์เอ.....	พ-1
ตารางแสดงสเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอโลต์สังเคราะห์.....	พ-2

ดัชนีรูป

รูปที่ 2.1	แสดงลักษณะโพรงภายในที่เชื่อมต่อกันใน 3 ทิศทาง.....	3
รูปที่ 2.2	แสดงลักษณะรูปทรงกรวยแปดหน้า.....	4
รูปที่ 2.3	แสดงแบบจำลอง โครงสร้างของซีโอไลต์เอ.....	5
รูปที่ 2.4	แสดงลักษณะการเกิดผลึกซีโอไลต์.....	7
รูปที่ 2.5	แสดงระยะเวลาของการเกิดผลึกซีโอไลต์เอ และซีโอไลต์ เอ็กซ์ โดยวิธี เอ็กซ์-เรย์พาวเดอร์.....	8
รูปที่ 2.6	แสดงรูปทรงผลึกแบบ penetration twining ของซีโอไลต์เอ.....	9
รูปที่ 2.7	แสดงการเกิดผลึกซีโอไลต์เอ ที่เวลาต่าง ๆ กัน.....	10
รูปที่ 2.8	แสดงค่าการกระจายของขนาดอนุภาคของซีโอไลต์เอ.....	11
รูปที่ 2.9	แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์เอ.....	11
รูปที่ 2.10	แสดงสเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์ และไฮดรอกซีโซดาไลต์.....	14
รูปที่ 2.11	(ซ้าย) แสดง โมเลกุลเล็กถูกดูดซับ..... (ขวา) แสดง โมเลกุลใหญ่ไม่ถูกดูดซับ.....	17 17
รูปที่ 2.12	กราฟของการแลกเปลี่ยนไอออน.....	19
รูปที่ 2.13	แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ	20
รูปที่ 2.14	แสดงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อการแลกเปลี่ยนไอออน.....	21
รูปที่ 3.1	แสดงเครื่องมือ.....	25
รูปที่ 4.0	เอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน ของตัวอย่างซีโอไลต์เอ มาตรฐาน.....	36
รูปที่ 4.1	เอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน ของซีโอไลต์เอ ที่สังเคราะห์ได้.....	37
รูปที่ 4.2	สเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์เอ มาตรฐาน.....	38
รูปที่ 4.3	สเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์เอ ที่สังเคราะห์ได้.....	39
รูปที่ 4.4	รูปผลึกซีโอไลต์เอ มาตรฐาน.....	40
รูปที่ 4.5	รูปผลึกซีโอไลต์เอ ที่สังเคราะห์ได้.....	40
รูปที่ 4.6	แสดงการกระจายของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอนุภาคซีโอไลต์เอ.....	41

รูปที่ 4.7	แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ.....	42
รูปที่ 4.8	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลา เมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้น ต่าง ๆ.....	43
รูปที่ 4.9	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป	44
รูปที่ 4.10	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น ปริมาณต่าง ๆ เมื่อเติมซีโอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 2 g/l.....	45
รูปที่ 4.11	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออน เทียบกับ pH ของสารละลาย.....	46
รูปที่ 4.12	แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายตะกั่วไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ.....	47
รูปที่ 4.13	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลา เมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้น ต่าง ๆ.....	48
รูปที่ 4.14	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป	49
รูปที่ 4.15	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออน เข้มข้นปริมาณต่าง ๆ เมื่อเติมซีโอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 0.5 g/l....	50
รูปที่ 4.16	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออน เทียบกับ pH ของสารละลาย.....	51
รูปที่ 4.17	แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ	52
รูปที่ 4.18	แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลา เมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้น ต่าง ๆ.....	53

รูปที่ 4.19 แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป	54
รูปที่ 4.20 แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น ปริมาณต่าง ๆ เมื่อเติมซีโอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 0.6 g/l.....	55
รูปที่ 4.21 แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออน เทียบกับ pH ของสารละลาย.....	56

ดัชนีตาราง

ตารางที่ 2.1	แสดงผลของไอออนบวกที่มีต่อปริมาณของรูพรุนในซีโอไลต์เอ.....	12
ตารางที่ 2.2	แสดงตำแหน่งของสเปคตรัม.....	13
ตารางที่ 2.3	แสดงรูปแบบของเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอ.....	15
ตารางที่ 2.4	แสดงค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์.....	20
ตารางที่ 2.5	แสดงอันตรายจากโลหะหนักและมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม	22
ตารางที่ 5.1	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างซีโอไลต์เอ มาตรฐาน กับซีโอไลต์เอ ที่สังเคราะห์ได้.....	58
ตารางที่ 5.2	แสดงประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้ซีโอไลต์เอ ที่สังเคราะห์ได้.....	60

บทที่ 1

บทนำ

โลหะหนักที่เกิดจากน้ำทิ้งในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิดแตกต่างกันไปตามประเภทของโรงงาน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำขึ้น เช่น นิกเกิล ตะกั่ว และ สังกะสี เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปไอออนในน้ำทิ้ง สามารถเคลื่อนที่ได้ไว ทำให้ถูกดูดซับได้ยากจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุดูดซับ หรือ สารเคมี ที่มีประสิทธิภาพดีในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง วัสดุนั้นๆที่มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง (1) ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ผงซักฟอก บำบัดน้ำเสีย การเกษตร เป็นต้น คือ ซีโอไลต์เอ ซึ่งมีลักษณะของโครงสร้างเป็นตะแกรงโมเลกุล สามารถดูดซับ และแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับสารละลายได้ (2-8) จึงสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ จากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้มีความสนใจที่จะนำซีโอไลต์มาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้ง

โครงการพิเศษนี้จึงได้ทำการวิจัย เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์เอ ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยเริ่มต้นจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ ด้วยวิธีไฮโดรเจล (9) แล้วศึกษาสมบัติของซีโอไลต์เอที่ได้เปรียบเทียบกับซีโอไลต์ เอ มาตรฐาน ด้วยเทคนิค เอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน เทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป เป็นต้น จากนั้นจึงนำซีโอไลต์เอ ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพในการแยกนิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ออกจากสารละลาย (10-12) โดยควบคุมตัวแปรต่าง ๆ เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพ เช่น ระยะเวลาในการกระจายตัวของซีโอไลต์เอ ในสารละลาย ระยะเวลาที่ pH สมดุลของสารละลาย pH ของสารละลาย ความเข้มข้นของซีโอไลต์เอ ที่ใช้ ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลาย เป็นต้น

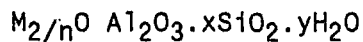
ผลการวิจัยที่ได้จากโครงการพิเศษนี้จะเป็นประโยชน์ในการนำซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้บำบัดน้ำทิ้ง และเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าต่อไปในอนาคต รวมทั้งอาจจะเป็นประโยชน์ในทางหนึ่งทางใดแก่ท่านผู้สนใจจะศึกษาในเรื่องดังกล่าว

บทที่ 2

ลักษณะเฉพาะของซีโอไลต์ และการประยุกต์ใช้

2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นผลึกอัญมณีโมลิเบตของโลหะหมู่ 1 และ 2 เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แอมโมเนียม แคลเซียม ซึ่งมีน้ำผลึกอยู่ ซีโอไลต์มีโครงสร้างผลึกเป็นอัญมณีโมลิเบตที่ต่อกันไปอย่างไม่มีที่สิ้นสุดในสามมิติของรูปทรงสี่หน้าของ AlO_4 และ SiO_2 ที่มีการใช้ออกซิเจนร่วมกัน ซีโอไลต์อาจแสดงได้โดยสูตรอย่างง่าย ดังนี้



โดยปกติแล้วให้ x เท่ากับ หรือ มากกว่า 2 ซึ่ง AlO_4 จะต่อกับเฉพาะ SiO_4 เท่านั้น n เป็นเลขประจุของประจุบวก

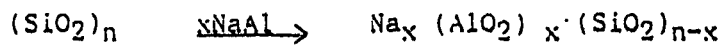
จากโครงสร้างพื้นฐานของซิลิกอน (Silicon) เมื่อ Al^{3+} เข้าไปแทน Si^{4+} ในโครงสร้างจะทำให้เกิดโครงสร้างใหม่ที่เป็นโครงร่างที่มีประจุลบจำนวนมาก (polyanionic framework) มีองค์ประกอบเป็น $[(Al_xSi_{n-x})O_2]^{x-}$ จะเห็นว่าจะเกิดประจุลบขึ้น ซึ่งประจุลบนี้จะถูกทำให้สมดุลได้โดยการใส่ประจุบวกเข้าไป ประจุบวกที่ใส่เข้าไปนี้ คือโลหะอัลคาไล หรือ อัลคาไลน์เอิร์ธ ดังสมการข้างล่างนี้



M = โลหะ (Cation) ที่มีประจุ + m

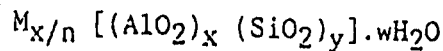
X = จำนวนอะตอมของอลูมิเนียม (Al)

ถ้า M = โซเดียม เราจะเขียนสมการเคมีที่เกิดขึ้นได้ดังนี้



อัตราส่วนของ O/(Al+Si) ในโครงสร้างผลึกจะมีค่าเท่ากับ 2 ในโครงสร้างของซิลิเกตจะมีทั้งช่องว่างและรูที่ต่อเชื่อมกัน ซึ่งจะเต็มไปด้วยประจุบวกและโมเลกุลของน้ำ ซึ่งประจุบวกนี้สามารถเคลื่อนที่ หรือเกิดการแลกเปลี่ยนกับประจุบวกอื่น ๆ ได้ น้ำที่อยู่ภายในผลึกของซิลิเกตก็สามารถเคลื่อนย้ายได้เช่นกัน ในซิลิเกตหลาย ๆ ชนิดทั้งซิลิเกตจากแร่และจากการสังเคราะห์ การแลกเปลี่ยนประจุบวกหรือการใส่หน้าออกอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างได้

สูตรโครงสร้างของซิลิเกตมักถูกแสดงในรูปของหน่วยเซลล์ของผลึก ดังนี้



M เป็นไอออนบวกที่มีประจุ n

w เป็นจำนวนโมเลกุลของน้ำ

อัตราส่วนของ y/x บกตีแล้วมีค่าระหว่าง 1-5 ขึ้นกับโครงสร้างของผลึก และผลรวม (x+y) จะเท่ากับจำนวนของรูปทรงสี่หน้าทั้งหมดในหน่วยเซลล์

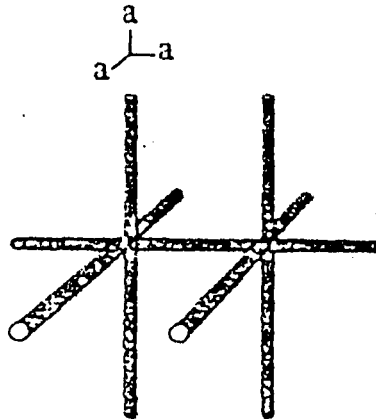
เครื่องหมาย [] แสดงถึงองค์ประกอบในโครงสร้างหลัก

2.2 ช่องว่างภายในโครงสร้างซีโรไลต์เอ

ธรรมชาติของช่องว่างและโพรงที่เชื่อมต่อกันในโครงสร้างซีโรไลต์ที่ถูกทำการใส่ น้ำ ออกหมดแล้ว จะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโรไลต์ ระบบ ช่องว่างในโครงสร้างของซีโรไลต์เอ คือ

ระบบช่องว่างใน 3 มิติ(3-dimensional system)

ช่องว่างแบบนี้จะมีช่องว่างเท่ากันในทุกทิศทาง(equidimensionals)มีเส้นผ่าศูนย์กลางของโพรงทุกโพรงเท่ากันหมดโดยไม่คำนึงถึงทิศทาง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงระบบช่องว่างใน 3 มิติของซีโรไลต์เอ

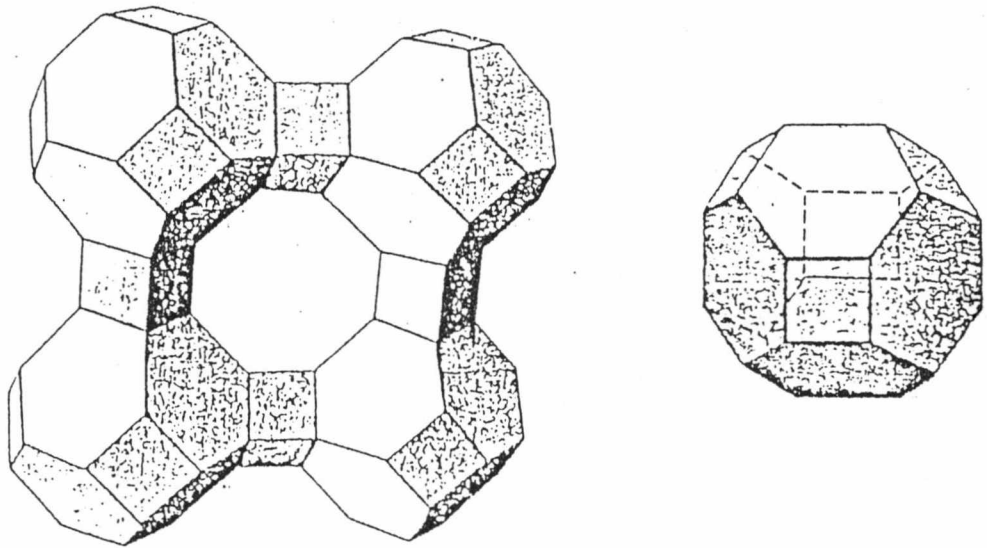
(จาก breck, 1974, Fig 2.28)

2.3 โครงสร้างอนุโมโนลิทิกของซีโรไลต์เอ

ซีโรไลต์เอประกอบด้วยรูปทรงหลายเหลี่ยม 2 ชนิด คือ

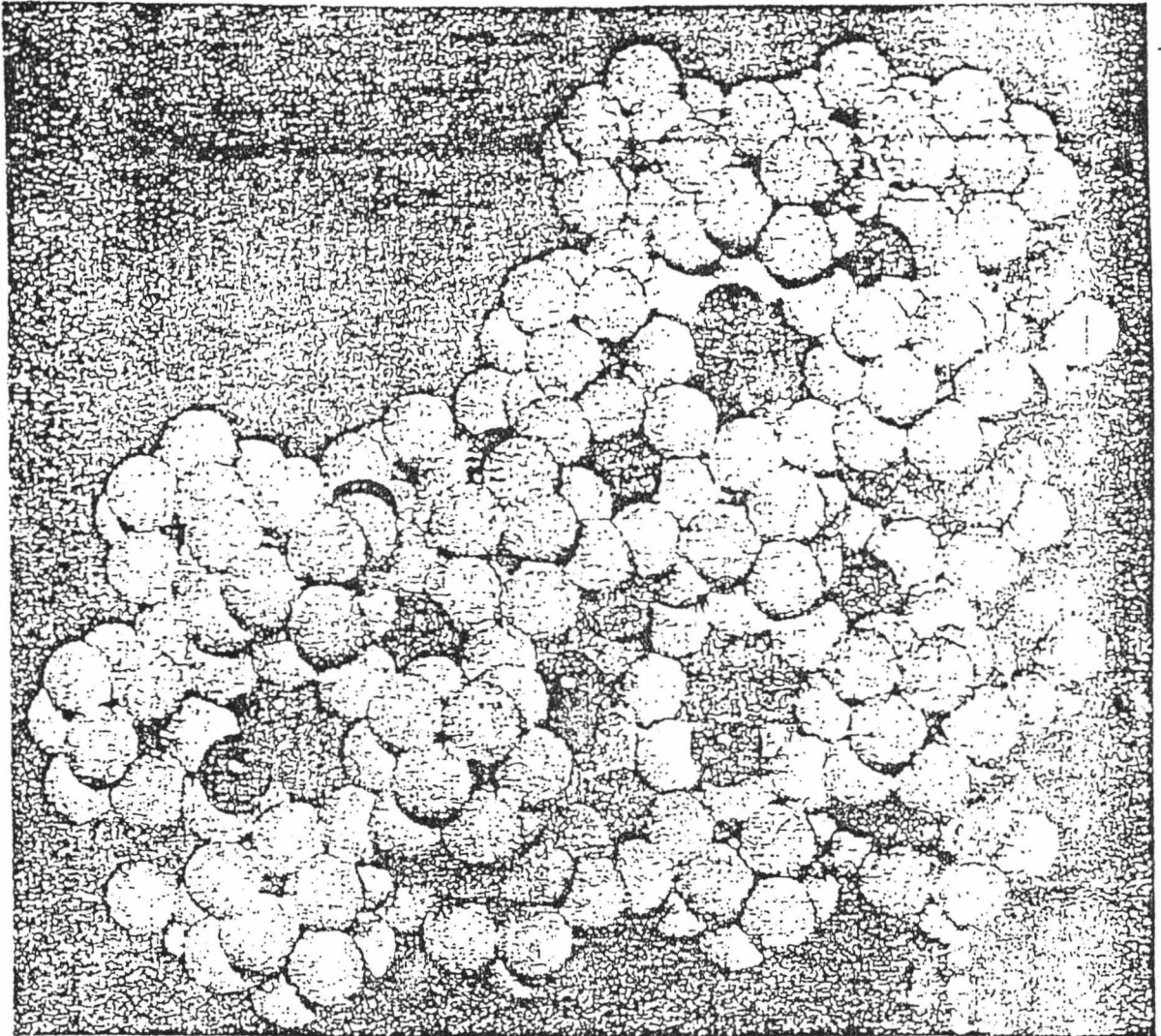
1. การจับตัวเป็นรูปลูกบาศก์โดย 2 รูปของทรงสี่หน้า หรือ D4R
2. จับตัวกันด้วย 24 รูปของทรงสี่หน้าเป็นรูปทรงกรวยหน้า หรือ ทรงเบต้าดังรูป

ที่ 2:2



รูปที่ 2.2 แสดงการจับตัวเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้า (truncated octahedron)
าเซโอไลต์เอ

(จาก Breck , 1974 , Fig 2.33)



รูปที่ 2.3 แบบจำลอง space-filling แสดงโครงสร้างของซีโอไลต์เอ

(จาก Breck ,1974, Fig 2.36)

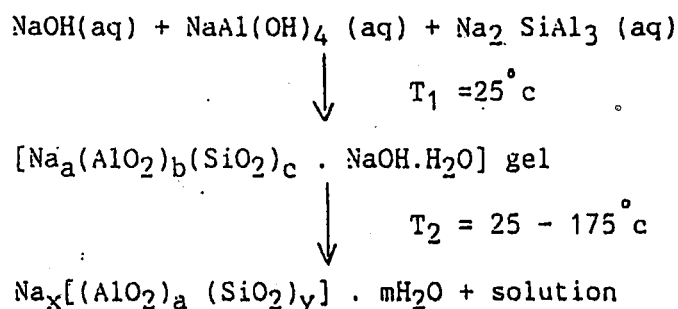
บทติแแล้วซีโอไลต์เอประกอบด้วย 24 รูปของทรงสี่หน้าเป็น 12 รูปของ AlO_4 และ 12รูปของ SiO_4 มีน้ำบรรจุอยู่ 27 โมเลกุล โดยมีการสลับกันไปของ AlO_4 และ SiO_4 ในโมเลกุลเพราะ Si/Al เป็น 1: 1

2.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

ซีโอไลต์ถูกเตรียมมาได้ด้วยภาวะไฮโดรเทอร์มอล โดยการตกผลึกซีโอไลต์จากระบบที่เป็นสารละลายของน้ำ ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสม โดยมีภาวะทั่วไปของการสังเคราะห์ดังนี้

1. มีสารตั้งต้นที่ว่องไว
2. อยู่ในสภาวะที่มีค่า pH สูง เช่นในโซเดียมไฮดรอกไซด์
3. อุณหภูมิและความดันในปฏิกิริยาต่ำ
4. ส่วนประกอบของเจลมีความเข้มข้นอิ่มตัวอย่างยิ่งยวดเพื่อทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย

เจลในที่นี้คือสารประกอบโลหะของอลูมิเนียมซิลิเกต ที่มีน้ำอยู่มากซึ่งเตรียมจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย สารตั้งต้นที่ว่องไว ของแข็งส่วนที่แขวนลอยหรือสารอลูมิเนียมซิลิเกตที่ว่องไว เช่น เมตาเคอลิน เราอาจเขียนสมการที่เกิดผลึกซีโอไลต์ได้ดังนี้

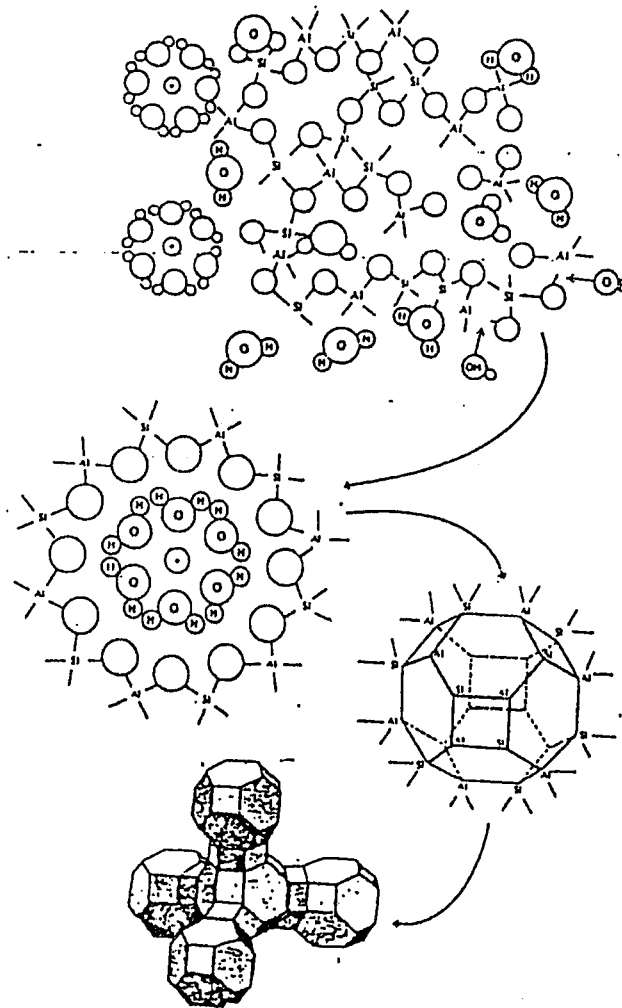


Zeolite crystals

เราอาจเตรียมเจลจากสารตั้งต้นที่ละลายน้ำ เช่น NaAlO_2 , $\text{NaO} \cdot \text{SiO}_2$ และ NaOH ซึ่งจะใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกันในการเตรียมเจลที่จะเป็นซีโอไลต์ต่างชนิดกัน

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ นั้นจะถูกกำหนดระยะเวลาในการเตรียมในสารละลาย NaOH เพราะถ้าทิ้งไว้จะทำให้ซีโอไลต์เอเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์พีที่เสถียรกว่า เช่น ซีโอไลต์เอจะเสถียรในสารละลาย 1 โมล NaOH เป็นเวลา 2 วัน และจะเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์พีใน เวลา 6-10 วัน ถ้าแช่ซีโอไลต์เอในสารละลาย NaOH ที่เข้มข้นมาก เช่น 10 % NaOH ซีโอไลต์เอจะเปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกซีโซดาไลต์

กลไกการเกิดเป็นซีโอไลต์ จะเกิดการพอลิเมอร์เชนร่วม (copolymerization) ของพวกซิลิเกตและอลูมิเนียมที่อยู่ในสภาพของเจล จากนั้นเจลเกิดปฏิกิริยาดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ด้วยหมู่ไฮดรอกซีของน้ำ และเกิดเป็นนิวคลีโอ (nuclei) เพื่อก่อตัวเป็นผลึกของซีโอไลต์ต่อไปดังรูปที่ 2.4

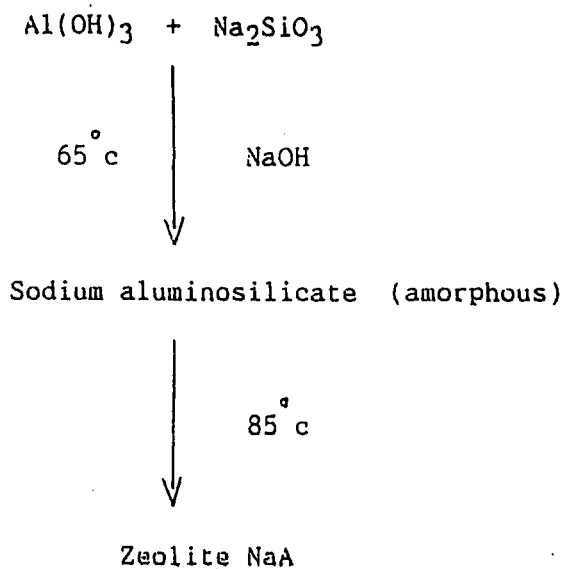


รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดผลึกซีโอไลต์ โดยการเกิดดีพอลิเมอร์ไรเซชันของเจลด้วยไฮดรอกซีไอออน จากนั้นรูปร่างที่หน้าจะจับตัวกันใหม่เกิดเป็นรูปร่างหลายเหลี่ยมขึ้น

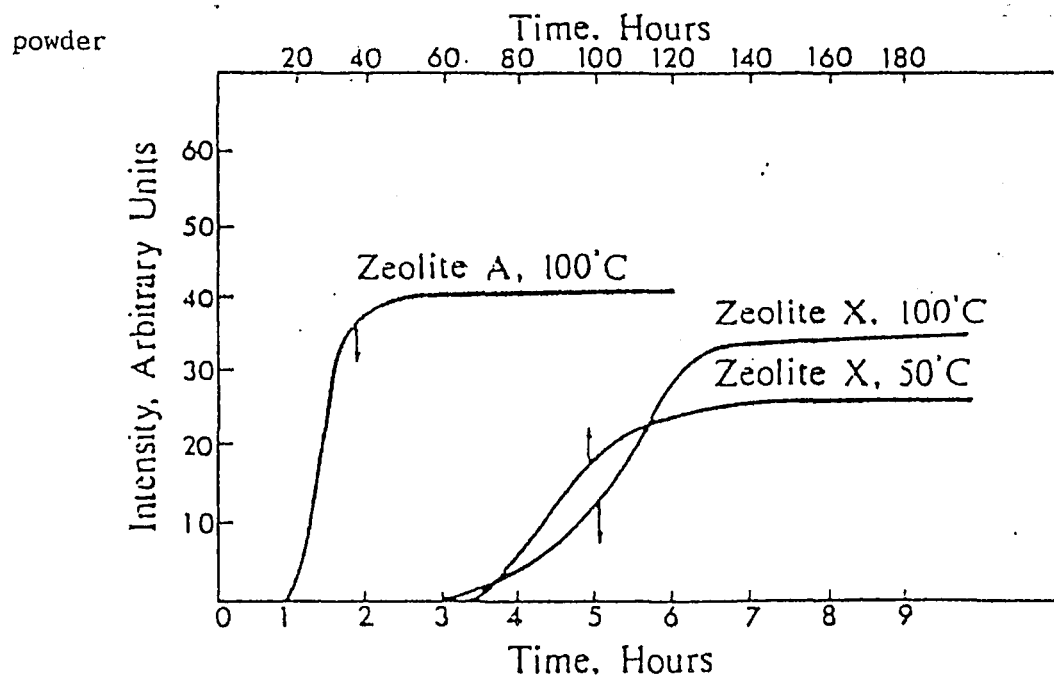
(จาก Breck , 1974 , Fig 4.23)

กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่นิยมมาซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบบไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal) ที่สำคัญ คือ

Hydrogel process (Precipitation Process) เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูง ในระยะเวลาที่กำหนดไว้ โดยอาจเขียนขั้นตอนการสังเคราะห์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 แสดงระยะเวลาการเกิดผลึกซีโอไลต์เอและเอ็กซ์ วัดโดยวิธี x-ray powder



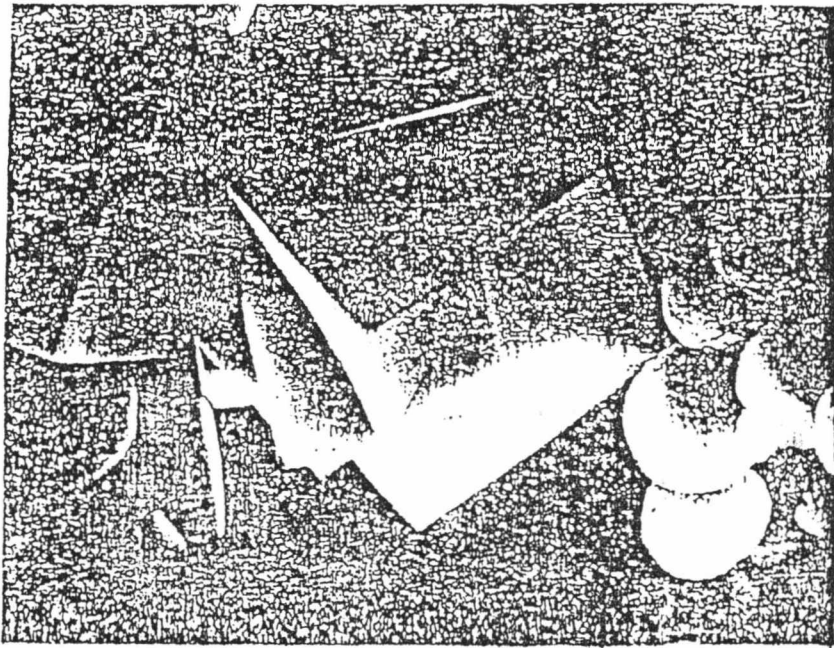
(จาก Breck, 1974, Fig 4.7)

2.5 สมบัติของซีโอไลต์

(1) สมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ที่สำคัญได้แก่

1.1) รูปร่าง (morphology) ผลึกของซีโอไลต์สังเคราะห์จะมีรูปแบบเฉพาะผลึกของซีโอไลต์เอ โดยปกติมีรูปร่างเป็นรูปลูกบาศก์แบบ penetration twins หรือเรียกอีกอย่างว่าแบบฟลูออสปาร์วีน (Fluorspar twin)

รูปที่ 2.6 แสดงรูปร่างผลึกแบบ penetration twinning ของซีโอไลต์เอ ขยาย 20,000 เท่า



(จาก Breck , 1974 , Fig. 5.3)

รูปที่ 2.7 แสดงการเกิดผลึกซีโอไลต์ที่เวลาต่าง ๆ กัน



เพลตที่ 1 เริ่มเกิดเจล



เพลตที่ 2 : 100°C, 1 ชั่วโมง



เพลตที่ 3 : 100°C, 1.25 ชั่วโมง



เพลตที่ 4 : 100°C, 1.5 ชั่วโมง



เพลตที่ 5 : 100°C, 1.5 ชั่วโมง
เริ่มเกิดผลึก



เพลตที่ 6 : 100°C, 2 ชั่วโมง
ผลึกมีขนาดใหญ่ขึ้น



เพลตที่ 7 : ผลึกมีขนาด 30 ไมครอน

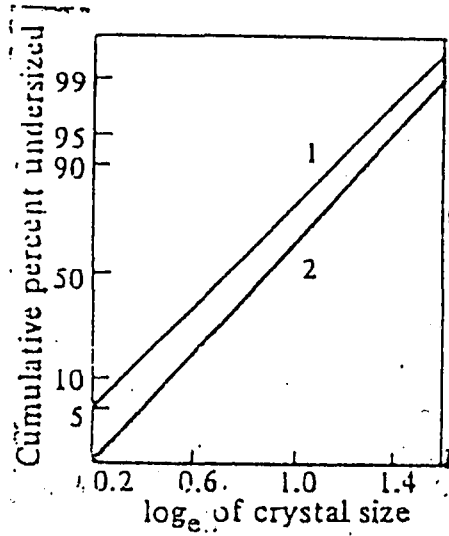


เพลตที่ 8 : ผลึกมีความหนา 50
อังสตรอม

(จาก Breck , 1974 , Fig 4.24)

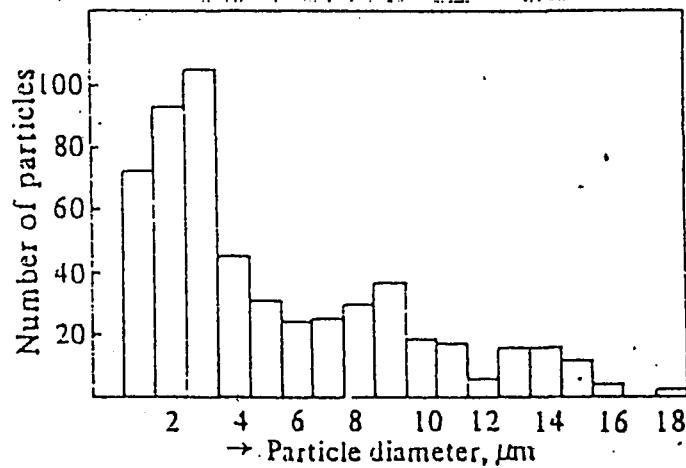
1.2) ขนาดของอนุภาคของซีโอไลต์เอ (particle size of synthetic Zeolite A)

จากการวัดด้วย x-rays พบว่าซีโอไลต์เอมีการกระจายอนุภาคอยู่ในช่วง 1-10 ไมครอน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงค่าการกระจายของขนาดของซีโอไลต์เอ

(จาก Breck , 1974 , Fig . 5.10)



รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของซีโอไลต์เอ

(จาก Breck , 1974 , Fig . 5.11)

1.3) ความหนาแน่น (Density) ซีโอไลต์จะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 1.9-2.3 กรัมต่อมิลลิเมตร โดยความหนาแน่นของซีโอไลต์จะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของโพลอนของโลหะและปริมาณของรูพรุน ดังตารางที่ 2.1

Unit Cell	Density (g/cc)	$a_0(\text{Å})$	$V_p' (\text{Å}^3/\text{uc})$
$\text{Li}_8\text{Na}_4(\text{A}) \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$	1.91	12.04	735
$\text{Na}_{12}(\text{A}) \cdot 27 \text{H}_2\text{O}$	1.99	12.32	833
$\text{Ag}_{12}(\text{A}) \cdot 24 \text{H}_2\text{O}$	2.76	12.38	733
$\text{Ti}_{9.6}\text{Na}_{2.4}(\text{A}) \cdot 20 \text{H}_2\text{O}$	3.36	12.38	584
$\text{Ca}_6(\text{A}) \cdot 30 \text{H}_2\text{O}$	2.05	12.26	883

ตารางที่ 2.1 ผลของไอออนบวกที่มีต่อปริมาณรูพรุนในซีโอไลต์เอ

(จาก Breck, 1974 , Table 5.8)

1.4) การสั่น (vibration) ของโครงสร้าง

ศึกษาโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกป (infrared spectroscopy) ที่ไอไลต์แต่ละชนิดจะมีการสั่นเหมือนกันขึ้นกับโครงสร้างผลึก โดยทั่วไปอาจแบ่งสัณฐานอินฟราเรดออกได้ สองชนิดคือ

1) สัณฐานที่เกิดขึ้นจากการสั่นภายใน (internal vibration) ของรูปสี่หน้า (tetrahedron) ของ TO_4 ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐาน สัณฐานนี้จะแบ่งการสั่นโดยสัณฐานที่เกิดจากโครงสร้างอื่นเลย และสัณฐานนี้จะเกิดขึ้นกับซีโอไลต์ทุกชนิด

2) การสั่นที่จุดเชื่อมต่อระหว่างรูปสี่หน้า (external vibration) สัณฐานนี้จะแตกต่างกันไปบนซีโอไลต์แต่ละตัวตามลักษณะของโครงสร้างที่ต่างกัน

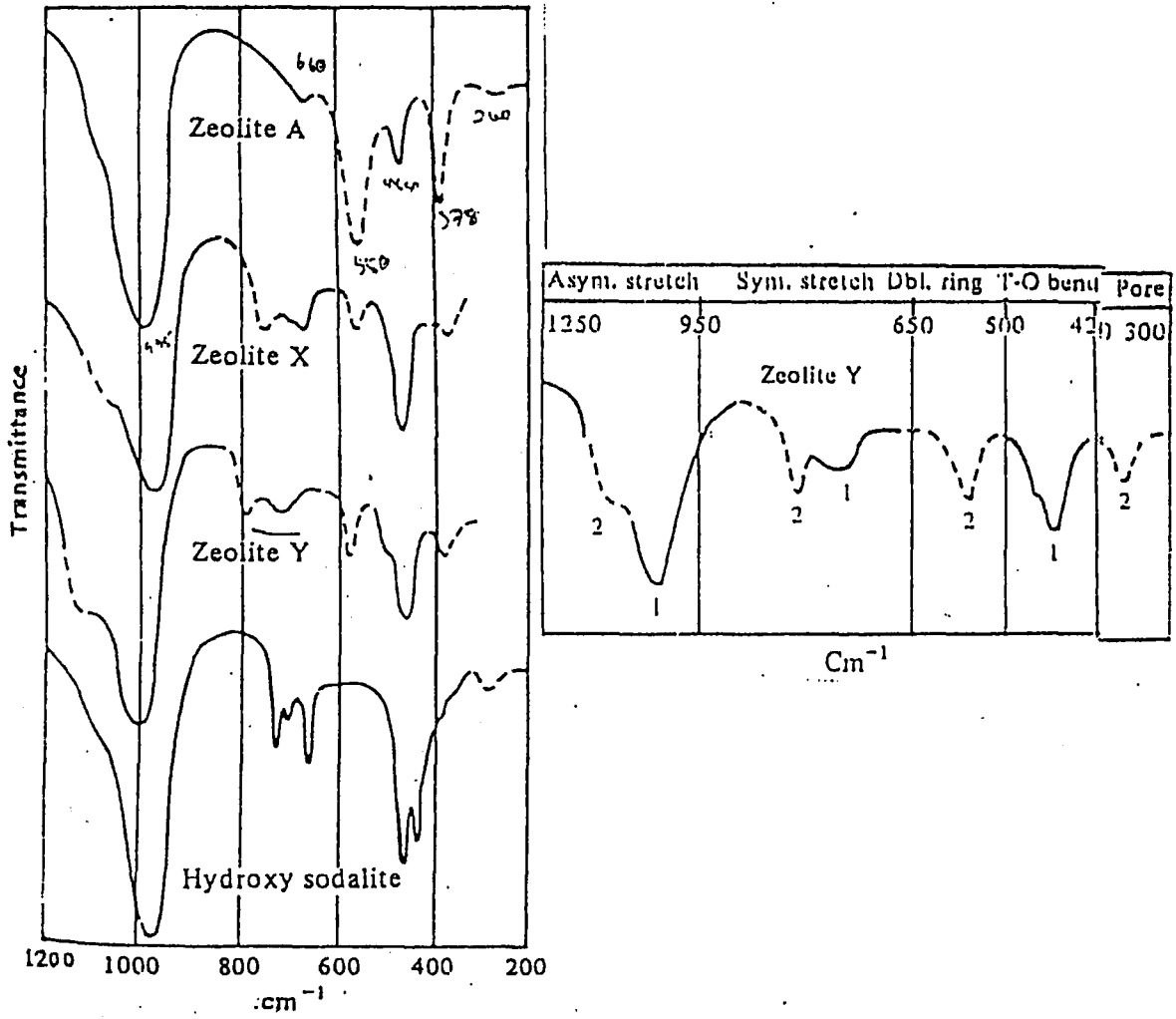
ลักษณะของสัณฐานอินฟราเรดที่ได้บันทึก ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.2 แสดงตำแหน่งของสเปคตรัม

	ลักษณะการสั่น	เลขคลื่น (เซนต์ิเมตร) ⁻¹
1.การสั่นภายใน	- การยืดแบบไม่สมมาตร	1250-950
	- การยืดแบบสมมาตร	720-650
	- การงอของพันธะระหว่างซิลิกอน (อลูมิเนียม)กับออกซิเจน	500-420
2.การสั่นภายนอก	- การสั่นของวงคู่	650-500
	- การเปิดของโพรง	420-300
	- การยืดแบบสมมาตร	750-820
	- การสั่นแบบไม่สมมาตร	1150-1050 sh.

(จาก Breck, 1974, p.418.)

รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์ และไฮดรอกซีโซดาลิต



(จาก Breck ,1974, pp.418-419)

1.5 โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์

ศึกษาโดยวัชเทตโคเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน

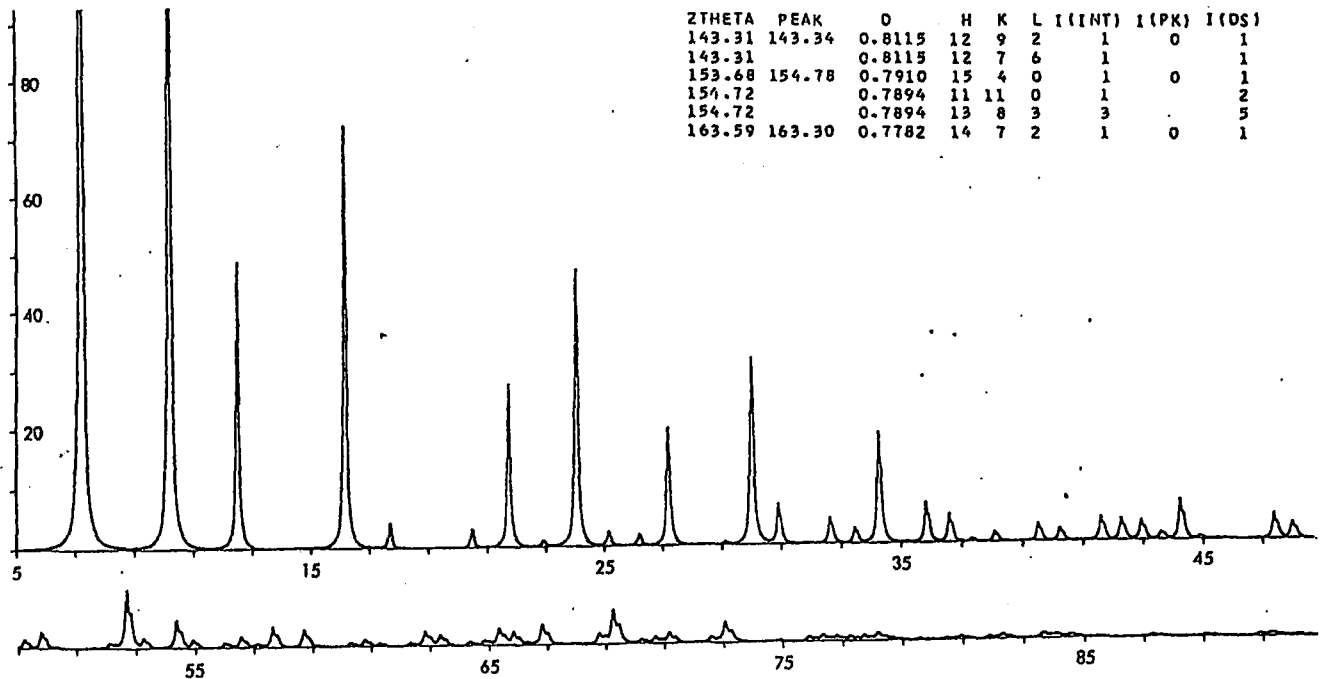
โครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิดจะหา

รูปแบบของ เอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันต่าง ๆ กัน ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.3 แสดงรูปแบบของเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์เอ

NA-TYPE A ZEOLITE (DEHYDRATED) - SMITH AND DOWELL, 1968

THETA	PEAK	D	H	K	L	I (INT)	I (PK)	I (OS)	2THETA	PEAK	D	H	K	L	I (INT)	I (PK)	I (OS)
7.19	7.20	12.280	1	0	0	100	100	100	49.77		1.8306	6	3	0	1		1
10.18	10.18	8.683	1	1	0	64	61	64	52.66	52.66	1.7367	5	5	0	4	3	4
12.47	12.48	7.090	1	1	1	17	16	18	52.66		1.7367	7	1	0	2		2
16.13	16.14	5.492	2	1	0	28	24	28	53.22	53.22	1.7195	7	1	1	1	1	1
17.68	17.68	5.013	2	1	1	2	1	2	54.34	54.34	1.6868	6	4	1	3	2	3
20.44	20.44	4.342	2	2	0	1	1	1	54.89	54.90	1.6711	7	2	1	1	0	1
21.69	21.70	4.093	3	0	0	3	9	3	55.99	56.00	1.6410	6	4	2	1	0	1
21.69		4.093	2	2	1	9	9	9	56.53	56.54	1.6265	5	4	4	1	1	1
24.01	24.02	3.703	3	1	1	20	16	21	57.60	57.60	1.5987	7	3	1	2	1	2
25.10	25.10	3.545	3	2	2	1	1	1	58.67	58.66	1.5723	6	4	3	1	1	1
26.14	26.14	3.406	3	2	0	1	1	1	58.67		1.5723	6	5	0	1		1
27.15	27.16	3.282	3	2	1	9	7	9	60.76	60.76	1.5231	7	4	0	1	0	1
29.98	29.98	2.978	4	1	0	8	11	8	62.80	62.80	1.4783	8	2	1	1	1	1
29.98		2.978	3	2	2	7	7	7	62.80		1.4783	7	4	2	1		1
30.87	30.88	2.894	3	3	0	1	2	1	63.31	63.30	1.4677	6	5	3	1	1	1
30.87		2.894	4	1	1	2	2	2	65.31	65.32	1.4275	7	5	0	1	1	1
32.58	32.58	2.746	4	2	0	2	1	2	65.31		1.4275	7	4	3	1	1	1
33.41	33.42	2.680	4	2	1	1	1	1	65.80	65.80	1.4180	7	5	1	1	1	1
34.22	34.22	2.618	3	3	2	9	6	10	65.80		1.4180	5	5	5	2	1	1
35.79	35.80	2.507	4	2	2	3	2	4	66.79	66.80	1.3994	8	3	2	1	1	3
36.56	36.56	2.456	5	0	0	2	2	2	68.74	68.74	1.3644	8	4	1	1	1	1
38.04	38.04	2.363	3	3	3	1	1	1	69.22	69.22	1.3561	8	3	3	4	2	5
39.48	39.48	2.280	5	2	0	1	1	1	70.66	70.66	1.3320	9	2	0	1	0	1
39.48		2.280	4	3	2	1	1	1	71.14	71.14	1.3242	6	5	5	1	1	1
40.19	40.18	2.242	5	2	1	1	1	1	73.03	73.04	1.2944	7	5	4	2	1	2
41.56	41.56	2.171	4	4	0	2	1	2	75.84	75.84	1.2533	8	4	4	1	0	1
42.24	42.24	2.138	5	2	2	2	1	2	76.77	76.76	1.2405	8	5	3	1	0	1
42.91	42.90	2.106	5	3	0	1	1	1	83.64	83.64	1.1552	9	4	4	1	0	1
42.91		2.106	4	3	3	1	1	1	84.54	84.54	1.1451	9	5	3	1	0	1
43.56	43.56	2.076	5	3	1	1	0	1	94.47	94.48	1.0492	8	8	3	1	0	2
44.21	44.22	2.047	6	0	0	3	2	3	98.56	98.56	1.0163	11	5	0	1	0	1
44.21		2.047	4	4	2	1	1	1	103.61	103.62	0.9801	11	6	0	1	0	1
47.36	47.36	1.9178	5	4	0	1	1	1	104.08	104.04	0.9769	10	7	3	1	0	1
47.36		1.9178	4	4	3	1	1	1	110.21	110.20	0.9391	11	5	5	1	0	1
47.97	47.98	1.8948	5	4	1	2	1	2	115.60	115.60	0.9103	11	6	5	1	0	1
49.17	49.18	1.8513	6	2	2	1	0	1	130.13	130.16	0.8494	12	8	1	1	0	1
49.77	49.76	1.8306	5	4	2	1	1	1	139.69	139.72	0.8205	12	8	4	1	0	1

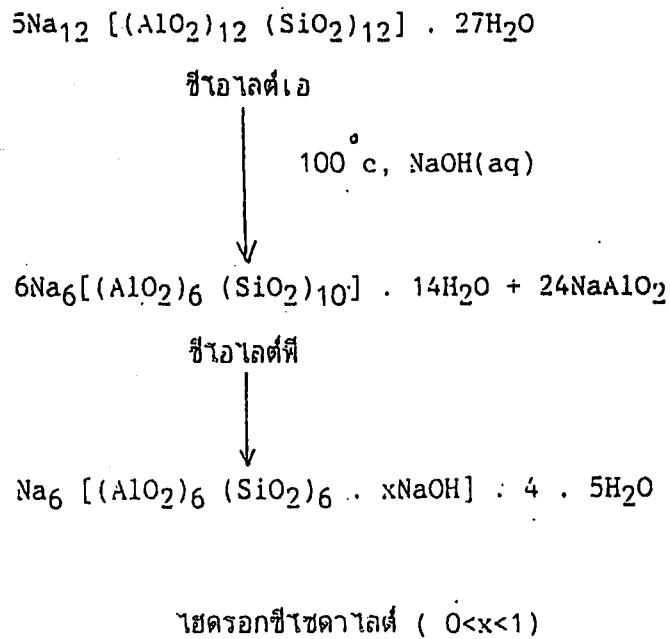


Na - Type A Zeolite (Dehydrated) - Smith and Dowell, 1968
 $\lambda = \text{CuK}\alpha$ Half width at $40^\circ 2\theta$: 0.11 \times 28 Plot scale $I_{PK}(\text{max}) = 300$

(2) สมบัติทางเคมี (Chemical properties)

2.1) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับเบสแก่ (reaction with strong base)

ซีโอไลต์เอ สามารถเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์พี โดยหาปฏิกิริยากับด่างในสภาวะที่เหมาะสมและสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นไฮดรอกซีซีโอไลต์ (hydroxy sodalite, Hs) ซึ่งแสดงให้ดังสมการ

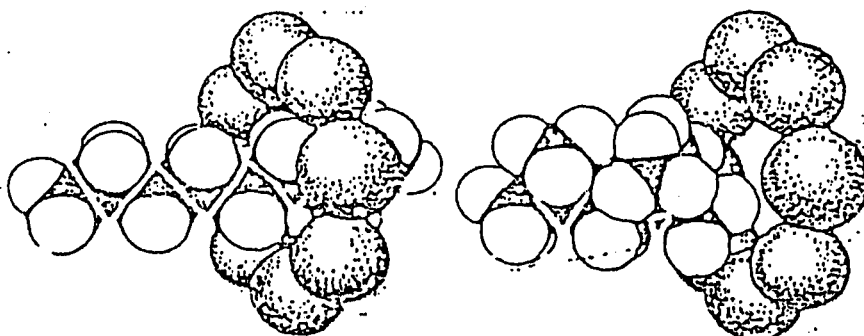


จากการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ จะพบว่ามีซีโอไลต์พี บะบวมด้วยเสมอ ซีโอไลต์พีนี้ไม่สามารถเปลี่ยนกลับเป็นซีโอไลต์เอได้อีก แต่จะเปลี่ยนไปเป็นไฮดรอกซีซีโอไลต์

2.2) สมบัติในการดูดซับของซีโอไลต์

เมื่อทำการกำจัดน้ำในโมเลกุลซีโอไลต์ โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 350-400 °C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงขึ้นไป อนุกรมโมเลกุลของซีโอไลต์จะว่างเปล่าและสามารถดูดซับโมเลกุลอื่น ๆ ได้ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.20

รูปที่ 2.11 แสดง (ซ้าย) ไม้เลกุลเล็กที่ถูกดูดซับไว้ , (ขวา) ไม้เลกุลใหญ่ไม่ถูกดูดซับ



(จาก Frederick. A., vol.4, Fig.1, p.166.)

ซึ่งสมบัตินี้สามารถใช้ในการแยกสารบางอย่างออกจากกันได้ โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างไม้เลกุล (selectivity of shape and size)

2.3) สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์ (Cation-Exchange properties)

ไอออนบวกที่สามารถแลกเปลี่ยนของซีโอไลต์จะเกาะอยู่ที่โครงร่างรูปทรงสี่หน้า ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายด้วยสารละลายเข้มข้นของไอออนตัวอื่น ๆ ซีโอไลต์จะมีค่าความจุสูงถึง 3-4 มิลลิอีควิวาเลนต์ (milliequivalents) ต่อกรัม ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณอลูมิเนียมในโครงร่างผลึกนอกจากนี้ยังมีปัจจัยอย่างอื่น ๆ อีก โดยค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น จะบอกให้ทราบถึงจำนวนลูมิเนียมที่แทนซิลิกอนในโครงร่างรูปทรงสี่หน้า ยิ่งมีลูมิเนียมไปแทนที่ซิลิกอนมากเท่าใด การขาดประจุบวกก็ยิ่งมีมากเท่านั้น

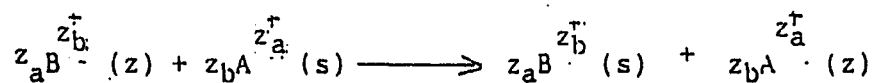
ปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนบวกของซีโอไลต์

1. ธรรมชาติของไอออนบวก (ขนาด ประจุ)
2. โครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
3. ความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลาย
4. อุณหภูมิ

การแลกเปลี่ยนไอออนจะทำให้คุณสมบัติของซีโอไลต์เปลี่ยนไป อาทิเช่น

1. ความทนต่อความร้อน
2. การดูดซับ
3. ความไวต่อการเป็นแคตะลิสต์

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแสดงได้ดังนี้



เมื่อ z_a และ z_b คือค่าประจุของโลหะ A และ B ตามลำดับ

(z) และ (s) หมายถึงซีโอไลต์และสารละลาย (solution) ตามลำดับ

ถ้า A_z และ A_s หมายถึงสัดส่วนโมล (mol fractions) ของไอออนของโลหะ A ในซีโอไลต์และสารละลาย

B_z และ B_s หมายถึงสัดส่วนโมล (mol fractions) ของไอออนของโลหะ A ในซีโอไลต์และสารละลาย

เมื่อนำค่า A_z กับ A_s และ B_z กับ B_s ไปสร้างกราฟดังตัวอย่างในรูปที่

2.21 จะได้กราฟของการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange isotherms)

จากกราฟจะได้ค่า α_B^A เป็นตัวประกอบการแยก (separation factor)

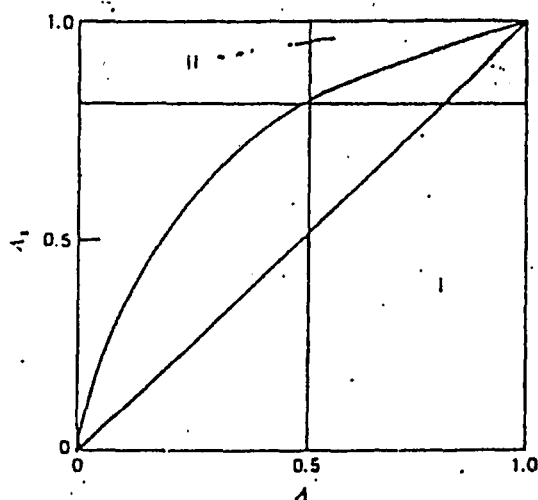
$$\text{เมื่อ } \alpha_B^A = \frac{\text{พื้นที่ I}}{\text{พื้นที่ II}}$$

$$= \frac{A_z B_s}{B_z A_s}$$

จะได้ว่าสัมประสิทธิ์การแยก (Selectivity coefficient)

$$K_B^A = \frac{A_z^{z_B} B_s^{z_A}}{B_z^{z_A} A_s^{z_B}}$$

ค่า K_B^A จะสามารถบอกถึงความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของไอออนโลหะในซีโอไลต์ ไอออนโลหะที่สามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนโลหะที่มีวาเลนซ์



รูปที่ 2.12. กราฟของการแลกเปลี่ยนไอออน ค่า $K_B^A =$ พื้นที่ I/พื้นที่ II

(จาก Breck, Encyclopedia, Fig. 9.)

ซึ่ง +1 หรือ +2 ซึ่งสามารถจัดเรียงไอออนของโลหะจากค่า Selectivity มากไปหาน้อยได้ดังนี้

พวกที่มีวาเลนซ์ + 1 : Ag > Tl > Na > K > NH₄ > Rb > Li > Cs

พวกที่มีวาเลนซ์ + 2 : Zn > Sr > Ba > Ca > Co > Ni > Cd > Hg > Mg

อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนในซีโอไลต์จะถูกควบคุมโดยการแพร่ของไอออนในโครงสร้างของซีโอไลต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับรัศมีของอนุภาค ค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ของไอออนและอุณหภูมิตัวอย่างของการแลกเปลี่ยนไอออนของโซเดียมเอ็กซ์ (NaX) ซีโอไลต์ นั้นมีการเคลื่อนที่ของไอออนของโซเดียมจากตำแหน่งที่สองเข้าไปในแอลฟา-เคจ

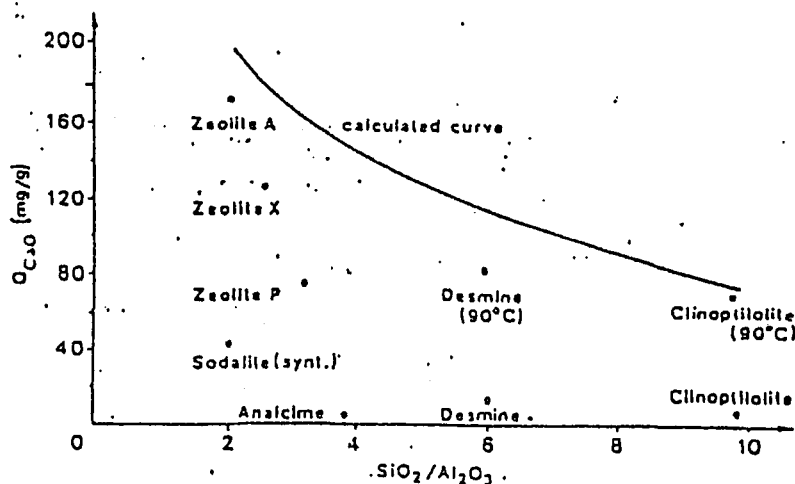
การแลกเปลี่ยนไอออนจะสมบูรณ์ขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ซีโอไลต์แต่ละตัวจะมีความสามารถ
 การแลกเปลี่ยนไอออนแต่ละตัวไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับค่าความจุไอออนของซีโอไลต์นั้น ๆ ค่า
 อัตราส่วนของซิลิกอนต่ออลูมิเนียม จะมีความสัมพันธ์ต่อความจุ ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์

Zeolite	Si/Al ratio	meq/g.
chabazite	2	5
mordenite	5	2.6
erionite	3	3.8
clinoptilolite	4.5	2.6
zeolite A	1	7.0
zeolite X	1.25	6.4
zeolite Y	2.0	5.0

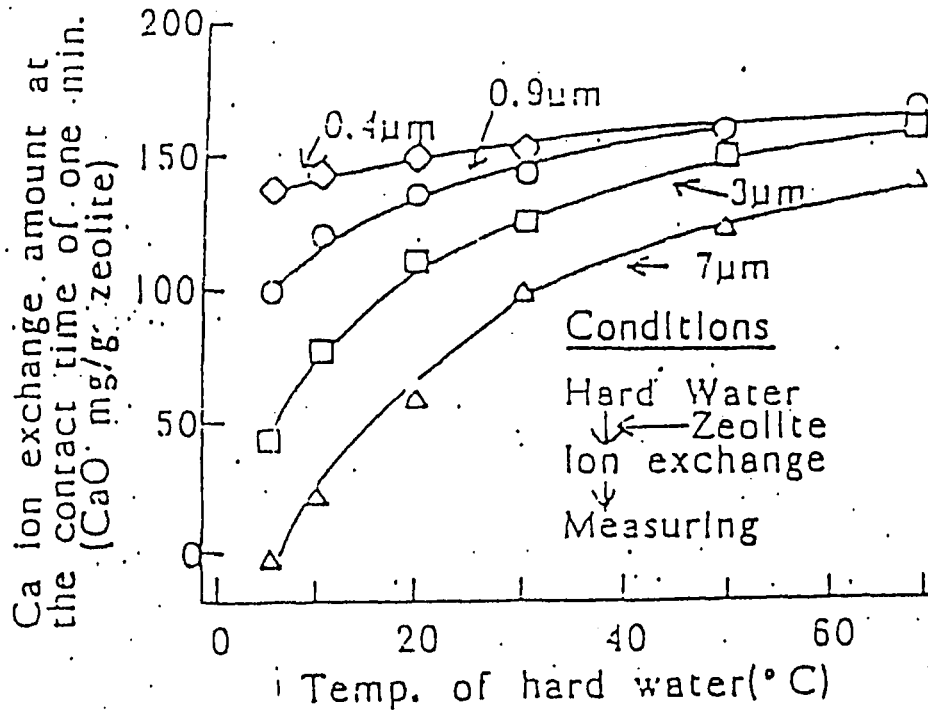
(จาก Breck, Encyclopaedia, table 2.)

รูปที่ 2.13 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ นอก
 จากนี้ขนาดของอนุภาค ยังมีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนอีกด้วย ดังผลที่ได้ในรูปที่ 2.23



(จาก Smolka, 1978, p.490.)

รูปที่ 2.14 แสดงผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อการแลกเปลี่ยนไอออน



(จาก Bruno 1987, p.26)

ซีโอไลต์แต่ละตัวจะมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เฉพาะของตน สมบัติเหล่านี้ เช่น

1. มีสมบัติในการดูดซับน้ำได้มาก
2. เมื่อทำการไล่หน้าออกจากโมเลกุลแล้วจะมีความหนาแน่นต่ำและมีปริมาตรของช่องว่างมาก
3. ผลึกมีความเสถียรภาพเมื่อทำให้แห้งและปริมาตรของช่องว่างที่เกิดขึ้นจะมีมาก เมื่อคิด

เป็น % จะได้ว่าอาจมีมากถึง 50%

4. มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
5. เมื่อไล่หน้าภายนอกจนหมดก็จะได้ molecular - size channels ที่มีขนาดและรูปร่างเหมือน ๆ กัน
6. สมบัติทางกายภาพอื่น ๆ เช่น การเป็นตัวนำทางไฟฟ้า (electrical conductivity)
7. สามารถดูดซับแก๊สและไอ
8. มีสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

2.6 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในการบำบัดน้ำทิ้ง

จากคุณสมบัติของซีโอไลต์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ โครงสร้างซีโอไลต์ที่มีการแทนที่ Si^{4+} ด้วย Al^{3+} ทำให้ประจุขาดความสมดุล (เป็น - มากขึ้น) ซีโอไลต์จึงสามารถดูดซับประจุบวกเข้าไปในโครงสร้างที่มีลักษณะที่เป็นโพรงตาข่าย 3 มิติ และสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกเหล่านั้นได้ ซึ่งความสามารถในการดูดซับและแลกเปลี่ยนไอออนนั้นขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออลูมินา และลักษณะเฉพาะตัวของไอออนแต่ละชนิด จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์มีความสนใจที่จะศึกษาการนำซีโอไลต์มาใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก เพื่อแยกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา การนำซีโอไลต์ เอ ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย เพื่อที่จะนำผลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำทิ้งหรือด้านอื่นต่อไป

ตารางที่ 2.5. แสดงอันตรายที่เกิดจากโลหะหนักบางชนิด และมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม

โลหะหนัก	อันตรายจากโลหะหนัก	ปริมาณสูงสุดที่ยอมให้มีได้ในน้ำทิ้ง
นิกเกิล	สะสมในเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์	0.2 mg/l
ตะกั่ว	ก่อให้เกิดการเจ็บป่วย หรือ อันตรายถึงชีวิตได้	0.2 mg/l
สังกะสี		5.0 mg/l

บทที่ 3

การทดลอง

ตอนที่ 3.1 การสังเคราะห์ไฮโดรเจลโดยวิธี Hydrogel process โดยใช้ 18 % NaOH

3.1.1 การสังเคราะห์ไฮโดรเจล

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์ให้ความร้อน (hot plate) ที่สามารถให้ความร้อน ได้ถึงอุณหภูมิ 300 °C พร้อมแท่งแม่เหล็กสำหรับกวน
2. หม้อทำปฏิกิริยา (reactor)
3. เครื่องกวนเชิงกล (mechanical stirrer) แบบ RW20 ของบริษัท IKA labortechnik พร้อมใบกวน
4. ชุดกรองสารและกระดาษกรอง
5. อ่างน้ำมัน (oil bath)
6. เทอร์มิเตอร์ที่ใช้วัดได้ 0-300 °C
7. เครื่องเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (x-ray diffractometer) แบบ PW 1730/10 ของบริษัท Phillips
8. เครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Infrared spectrophotometer) Model IR-400 FT 1760X ของบริษัท Perkin-Elmer
9. เครื่องเคลือบไอออน (Ion sputter) แบบ IFC-1100E ของบริษัท JEOL
10. เครื่องสแกนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning electron microscope) แบบ JSM 5200 ของบริษัท JEOL
11. เครื่องมาสเตอร์ไซเซอร์ เอ็กซ์ (Mastersizer X)
12. เครื่องพีเอชมิเตอร์ แบบ CG 840 ของบริษัท SCHOTT

สารเคมี

1. น้ำกลั่น (double distilled water)
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 18 %
3. โซเดียมเมตาซิลิเกตที่ปราศจากน้ำ (Na_2SiO_3 anhydrous)
4. อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$)

การสังเคราะห์

1. การเตรียมสารละลายของโซเดียมอลูมิเนต

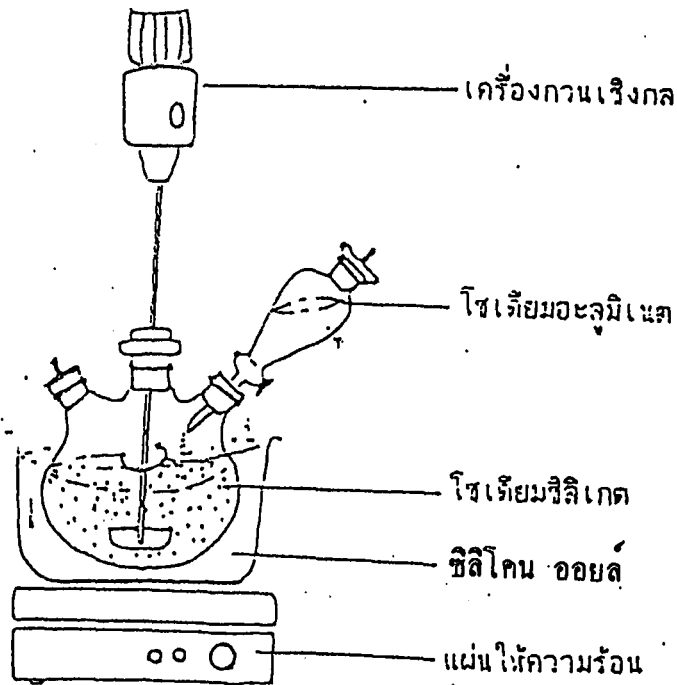
ตวง 18 % โซเดียมไฮดรอกไซด์ 122.4 cm^3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 cm^3 ทำการให้ความร้อนพร้อมกวนสารละลายจนกระทั่งอุณหภูมิของสารละลายเป็น 90–95 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ มา 73.6875 g ค่อย ๆ ปล่อยลงในสารละลายที่ละลายจนละลายหมดจึงค่อย ๆ เติมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ลงไปจนกระทั่งละลายหมดค่อย ๆ เติมน้ำ 221.2 cm^3 ลงในบีกเกอร์ ที่ละลายจนหมด

2. การเตรียมสารละลายของโซเดียมซิลิเกต

ตวง 18 % โซเดียมไฮดรอกไซด์มา 108.5 cm^3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 600 cm^3 เติมน้ำ และซั่งโซเดียมเมตาซิลิเกต มา 99.5 g ใส่ลงในบีกเกอร์จนกระทั่งละลายหมด ปล่อยลงในหม้อปฏิริยา

3. การทำปฏิริยา

ตั้งหม้อปฏิริยา ดังรูป ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 90–100 $^{\circ}\text{C}$ พร้อมทั้งกวนอย่างสม่ำเสมอ เติมสารละลายโซเดียมอลูมิเนตลงไปทั้งหมดภายใน 15 นาที (เติมในอัตราเร็วประมาณ 23 cm^3 /min) กวนด้วยความเร็ว 1000 rpm. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และกรองขณะร้อนพร้อมทั้งล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นจำนวนมาก ๆ หลาย ๆ ครั้ง จนน้ำล้างตะกอนมี pH เป็นกลาง นำผลิตภัณฑ์ไปอบที่อุณหภูมิ 50–60 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 16–20 ช.ม.



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่องมือ

3.1.2. การทดสอบคุณสมบัติ

3.1.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน

เป็นการศึกษาสภาพการจัดเรียงตัวของผลึก โดยการให้รังสีเอ็กซ์ชนอิเล็กตรอนในผลึกของสาร แล้วเกิดการเลี้ยวเบน อาจเกิดการเสริมหรือหักล้างกัน โดยเกิดขึ้นเป็นไปตามกฎของแบรกก์ (Bragg's law) โดยนำสารตัวอย่างมาอัดลงบน Sample holder แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วย เครื่องเอ็กซ์-เรย์ ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (XRD) 40 กิโลวัตต์ 30 มิลลิแอมป์-แอมป์ ช่วง (R) 10^3 ระดับต่ำสุด (LL) 2.20 หน้าต่าง (W) 3.5 ทิศการวัดที่มุม θ (theta) ที่ 4-46 องศา ด้วยอัตราเร็ว (time constant, t) 1 องศา/นาที

3.1.2.2 การวิเคราะห์สารด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

นำสารตัวอย่างมาอัดเป็นแผ่นด้วยโพรเพสเทียมบรมด์ เรียกว่า " KBr disc" แล้วนำไปวัดด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่เลขคลื่น 4000 cm^{-1} ถึง 200 cm^{-1}

3.1.2.3 การวิเคราะห์โดยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป

ศึกษาลักษณะรูปร่างของผลึกซีโรไลต์เอ โดยนำสารตัวอย่างไปติดบนเซลล์ แล้วนำไปเคลือบทองด้วยเครื่องเคลือบไอออน นำไปส่องด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป โดยใช้กำลังขยาย 1000 เท่า ถึง 2000 เท่า

3.1.2.4 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องมาสเตอร์ไซเซอร์

ศึกษาถึงการกระจายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค

1. ทำ aligning ของ laser power ให้ได้ค่าประมาณ 60 % ขึ้นไป
2. ทำการวัด background โดยใช้น้ำกลั่น
3. ใส่ซีโรไลต์ลงในอ่าง sample ที่มีน้ำกลั่นอยู่แล้วให้มีค่าของ obscuration ประมาณ 10-30 %
4. ทำการวัดขนาดอนุภาคของซีโรไลต์
5. บันทึกค่าขนาดของอนุภาคโดยเฉลี่ยจากเครื่อง โดยเครื่องจะบอกในรูปของ $d(0.5)$ ซึ่งเป็นค่า Percentile ที่ 0.5 ของกราฟที่แสดง width of the volume distribution ซึ่งเทียบได้กับค่า median diameter ของซีโรไลต์

3.1.2.5 การหาค่า pH เมื่อกระจายตัวในน้ำ

ชั่งสารตัวอย่าง 1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 150 cm^3 เติมน้ำกลั่นลงไป 100 cm^3 ทำการกวนเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปวัดค่าพีเอชด้วยเครื่องพีเอชมิเตอร์

ตอนที่ 3.2

3.2.1 การวิเคราะห์ไอโอดีนด้วยวิธีอะตอม

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ซีโรไลต์เอทีสังเคราะห์เอง
2. สารละลายไอโอดีน (Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+})
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 M ใช้สำหรับปรับ pH ของสารละลาย
4. กระดาษกรองเบอร์ 42
5. บีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร
6. เครื่องปั่นกวน
7. พีเอชมิเตอร์
8. เครื่องเฟลม อะตอมมิก แอ็บซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Flame-Atomic, Absorption) Spectrophotometer แบบ AA 680 ของบริษัท Shimadzu

Atomic, Absorption) Spectrophotometer แบบ AA 680 ของบริษัท Shimadzu

** อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง = อุณหภูมิห้อง (28±1 องศาเซลเซียส)

การทดลอง

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลง pH เทียบกับเวลา

เตรียมสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 500 cm^3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ใส่ผงซีโรไลต์ลงไป แล้วปั่นกวนสารละลายโดยใช้ใบพัดกวนด้วยความเร็ว 5 รอบต่อนาที พร้อมทั้งทำการวัด pH และบันทึกค่าทุก ๆ 1 นาที

2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลง % การแยกของนิกเกิลเทียบกับเวลา

เตรียมสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 500 cm^3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ใส่ผงซีโรไลต์ลงไป แล้วปั่นกวนสารละลายโดยใช้ใบพัดกวนด้วยความเร็ว 5 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1,2,3,...15 นาที แล้วรินน้ำสารละลายที่ผ่านการแยกโลหะหนักออกด้วยซีโรไลต์ในแต่ละบีกเกอร์มากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 นำสารละลายที่ผ่านกระดาษกรองแล้วไปวัดค่าความเข้มข้นนิกเกิลไอออนที่เหลือโดยใช้เครื่อง A.A. แล้วคำนวณหา % การแยกดังนี้

$$\% \text{ การแยก} = 100 [\text{Ni}^{2+}_{\text{init}} - \text{Ni}^{2+}_{\text{final}}] / [\text{Ni}^{2+}_{\text{init}}]$$

$[\text{Ni}^{2+}_{\text{init}}]$ = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายนิกเกิลไอออน

$[\text{Ni}^{2+}_{\text{final}}]$ = ความเข้มข้นที่เหลือของสารละลายนิกเกิลไอออน

3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลง % การแยกของนิกเกิลเทียบกับปริมาณซีโรไลต์เตรียมสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาตร 500 cm^3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ใส่ผงซีโรไลต์ลงไปในปริมาณต่าง ๆ แล้วปั่นกวนสารละลายโดยใช้ใบพัดกวนด้วยความเร็ว 5 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที แล้วรีบทำการกรองและหา % การแยก(ที่ความเข้มข้นของซีโรไลต์ต่าง ๆ)เช่นเดียวกับข้อ 2

4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลง % การแยกของนิกเกิลเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิล

เตรียมสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 cm^3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร เติมซีโรไลต์ลงไปในปริมาณความเข้มข้นที่สามารถแยกนิกเกิลออกได้หมด(หาได้จากกรทดลองข้อ 3)แล้วปั่นกวน กรอง และหา % การแยกเช่นเดียวกับข้อ 2 แล้วทำการทดลองเช่นเดียวกันอีก โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น นิกเกิลไอออนเป็น 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

5. ศึกษาการเปลี่ยนแปลง % การแยกของนิกเกิล เมื่อเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลาย

เตรียมสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 500 cm^3 ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร ใส่ผงซีโรไลต์ลงไปในปริมาณความเข้มข้นที่สามารถแยกนิกเกิลออกได้หมด(หาได้จากกรทดลองข้อ 3) ปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที ปรับ pH ของสารละลายโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 รมลต่อลิตรจนได้ pH ตามต้องการ แล้วปั่นกวนต่อเป็นเวลา 10 นาที กรอง และหา % การแยก(ที่ค่า pH ต่าง ๆ) เช่นเดียวกับข้อ 2

**ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนสารละลายนิกเกิลไอออนเป็นสารละลาย ตะกั่ว(II) และสังกะสี(II) ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ตอนที่ 4.1 การสังเคราะห์ซีโรไลต์ เอ (Hydrogel process) และทดสอบสมบัติทั่วไป

4.1.1 ผลการสังเคราะห์ซีโรไลต์ เอ (Hydrogel process)

จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมสารละลายโซเดียมอลูมิเนต ลงในสารละลายโซเดียมซิลิเกต แล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะ เป็นเจลสีขาวขุ่นเมื่อทำปฏิกิริยาต่อไปจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะ เป็นผลึกผงสีขาวละเอียด

4.1.2 ผลการทดสอบสมบัติทั่วไป

4.1.2.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์-เรย์ดิฟแฟรกชัน

ผลการวิเคราะห์สารแสดงดังรูป 4.1 พบว่าตำแหน่ง 2θ ของพีกต่าง ๆ ถูกต้องตามตำแหน่งมาตรฐาน แต่ความเข้มบางตำแหน่งเช่น ที่ 2θ ประมาณ 14 24.1 31 34.3 ต่างจากมาตรฐานไปบ้างเนื่องจากเกิดพีกของ Hydroxy sodalite ซึ่งเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แบบ Hydrogel ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับตัวอย่างซีโรไลต์เอ มาตรฐาน (รูป 4.0) และอาจมีพีกอื่น ๆ ต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากสิ่งเจือปน หรือ กระบวนการผลิต

4.1.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

ผลการทดลองดังรูป 4.2-4.3 สอดคล้องกับมาตรฐาน โดยมีพีกที่สำคัญคือที่ ประมาณ 1000, 660, 560, 460, 375

4.1.2.3 ผลการวิเคราะห์โดยเทคนิคสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป

จากรูปถ่ายที่ได้ (4.4, 4.5) พบว่าซีโรไลต์เอ ที่สังเคราะห์ได้มีรูปร่าง เหมือนตัวอย่างซีโรไลต์ เอ มาตรฐาน

4.1.2.4 ผลของการหาการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค

จากการทดลองพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคซีโรไลต์เอ ที่สังเคราะห์ได้ มีการกระจายอยู่ในช่วง 1.32-68.33 ไมโครเมตร ส่วนซีโรไลต์เอ มาตรฐาน

มีการกระจายอยู่ในช่วง 1.32-11.55 ไมครเมตร (ดูรูป 4.6)

4.1.2.5 ผลการทดสอบ pH เมื่อซีโรไลต์เอ กระจายตัวในน้ำด้วยความ
เข้มข้น 1 % w/v

จากการทดลองพบว่า ซีโรไลต์ เอ ที่สังเคราะห์ได้มีค่า pH(10.80)ใกล้เคียงกับซีโรไลต์ เอ มาตรฐาน(10.95)แสดงให้เห็นว่าซีโรไลต์มีฤทธิ์เป็นเบส

ตอนที่ 4.2 ผลการใช้ซีโอไลต์ เอ แยกโลหะหนักออกจากสารละลาย

ผลการทดลอง รูปที่ 4.7

แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

- เมื่อเติมซีโอไลต์ลงไปจะทำให้ pH เพิ่มขึ้นจนถึงที่ประมาณ 10 นาทีพอถือได้ว่าเวลาให้เป็นเวลาที่ pH สมดุลของสารละลาย

- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอไลต์ จะทำให้ pH ที่สมดุลมีค่าสูงขึ้น

ผลการทดลอง รูปที่ 4.8

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลา เมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

- % Ni removal จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการกวนสารละลายเพิ่มขึ้นและเมื่อใช้เวลาประมาณ 10 นาทีขึ้นไป % removal จะค่อนข้างคงที่ ดังนั้นพอจะถือได้ว่าที่เวลา 10 นาที เป็นเวลาที่ % removal อยู่ในสภาวะสมดุล

- เมื่อใช้ความเข้มข้นซีโอไลต์เพิ่มขึ้น % removal สมดุลจะเพิ่มขึ้น

* จากผลการทดลองรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะเห็นว่าเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมคือ 10 นาทีขึ้นไป เพราะเป็นเวลาที่ pH และ % removal สมดุล จึงใช้เวลา 10 นาทีในการปั่นกวนเป็นเวลามาตรฐานสำหรับการทดลองต่อไป (รูปที่ 4.9 4.10 และ 4.11)

ผลการทดลอง รูปที่ 4.9

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป

- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอไลต์จะทำให้ % Ni removal เพิ่มขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอเทียบกับความเข้มข้นของซีโอไลต์

- ที่ปริมาณความเข้มข้นของซีโอไลต์ประมาณ 2 g/l สามารถ remove ได้ 100 %

ผลการทดลอง รูปที่ 4.10

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้นปริมาณต่าง ๆ เมื่อเติมซีโอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 2 g/l

- เมื่อความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิลไอออนเพิ่มขึ้นจะทำให้ % Ni removal ลดลง
- ที่ความเข้มข้นของนิกเกิล 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิลถูกแยกออกได้ในปริมาณ 25 29.25 และ 31.5 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ต่อลิตร ตามลำดับ

ผลการทดลอง รูปที่ 4.11

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออน เทียบกับ pH ของสารละลาย

- เมื่อ pH ของสารละลายลดลง % Ni removal จะลดลง
- เมื่อ pH ลดลง % removal จะลดลงค่อนข้างมากและ % removal จะต่ำมากที่ pH โดยประมาณต่ำกว่า 3.1

ผลการทดลอง รูปที่ 4.12

แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายตะกั่วไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

- เมื่อเติมซีโอไลต์ลงไปจะทำให้ pH เพิ่มขึ้นจนถึงที่ประมาณ 10 นาทีพอถือได้ว่าเวลานี้เป็นเวลา pH สมดุลของสารละลาย
- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอไลต์ จะทำให้ pH ที่สมดุลมีค่าสูงขึ้น

ผลการทดลอง รูปที่ 4.13

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลา เมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

- % Pb removal จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการกวนสารละลายเพิ่มขึ้นและเมื่อใช้เวลาประมาณ 10 นาทีขึ้นไป % removal จะค่อนข้างคงที่ ดังนั้นพอจะถือได้ว่าที่เวลา 10 นาที เป็นเวลาที่ % removal อยู่ในสภาวะสมดุล

- เมื่อใช้ความเข้มข้นซีโอไลต์เพิ่มขึ้น % removal สมดุลจะเพิ่มขึ้น

* จากผลการทดลองรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นว่าเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมคือ 10 นาทีขึ้นไป เพราะเป็นเวลา pH และ % removal สมดุล จึงใช้เวลา 10 นาที ในการปั่นกวนเป็นเวลามาตรฐานสำหรับการทดลองต่อไป (รูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16)

ผลการทดลอง รูปที่ 4.14

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป

- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอไลต์ จะทำให้ % Pb removal เพิ่มขึ้นค่อนข้างเร็วและสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของซีโอไลต์
- ที่ปริมาณความเข้มข้นของซีโอไลต์ประมาณ 0.5 g/l สามารถ remove ได้ 100 %

ผลการทดลอง รูปที่ 4.15

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออนเข้มข้น ปริมาณต่าง ๆ เมื่อเติมซีโอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 0.5 g/l

- เมื่อความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วไอออนเพิ่มขึ้นจะทำให้ % Pb removal ลดลง
- ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตะกั่วถูกแยกออกได้ ในปริมาณ 100 118.5 และ 136.5 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ต่อลิตร ตามลำดับ

ผลการทดลอง รูปที่ 4.16

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออน เทียบกับ pH ของสารละลาย

- เมื่อ pH ของสารละลายลดลง % Pb removal จะลดลง
- เมื่อ pH ของสารละลายต่ำลง % Pb removal จะลดลงอย่างลดลงไม่มากนัก และเมื่อ pH ประมาณ 1.1 % Pb removal สูงถึง 75 %

ผลการทดลอง รูปที่ 4.17

แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

- เมื่อเติมซีโอไลต์ลงไปจะทำให้ pH เพิ่มขึ้นจนถึงที่ประมาณ 10 นาทีพอถือได้ว่าเวลานี้เป็นเวลาที pH สมดุลของสารละลาย
- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอไลต์ จะทำให้ pH ที่สมดุลมีค่าสูงขึ้น

ผลการทดลอง รูปที่ 4.18

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลา เมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

- % Zn removal จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการกวนสารละลายเพิ่มขึ้นและเมื่อใช้เวลาประมาณ 10 นาทีขึ้นไป % removal จะค่อนข้างคงที่ ดังนั้นพอจะถือได้ว่าที่เวลา 10 นาที เป็นเวลาที่ % removal อยู่ในสภาวะสมดุล

- เมื่อใช้ความเข้มข้นซีโอไลต์เพิ่มขึ้น % removal สมดุลจะเพิ่มขึ้น

- เมื่อเติมซีโอไลต์ลงไปจะทำให้ pH เพิ่มขึ้นจนถึงที่ประมาณ 10 นาทีพอถือได้ว่าเวลานี้เป็นเวลา pH สมดุลของสารละลาย

- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอไลต์ จะทำให้ pH สมดุลเพิ่มขึ้น

* จากผลการทดลองรูปที่ 4.17 และ 4.18 จะเห็นว่าเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมคือ 10 นาทีขึ้นไป เพราะเป็นเวลา pH และ % removal สมดุล จึงใช้เวลา 10 นาที ในการปั่นกวนเป็นเวลามาตรฐานสำหรับการทดลองต่อไป (รูปที่ 4.19, 4.20 และ 4.21)

ผลการทดลอง รูปที่ 4.19

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป

- เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีโอไลต์ จะทำให้ % Zn removal เพิ่มขึ้นค่อนข้างรวดเร็วเมื่อเทียบกับความเข้มข้นของซีโอไลต์

- ที่ปริมาณความเข้มข้นของซีโอไลต์ประมาณ 0.6 g/l สามารถ remove ได้ 100 %

ผลการทดลอง รูปที่ 4.20

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น ปริมาณต่าง ๆ เมื่อเติมซีโอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 0.6 g/l

- เมื่อความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีไอออนเพิ่มขึ้นจะทำให้ % Zn removal ลดลง

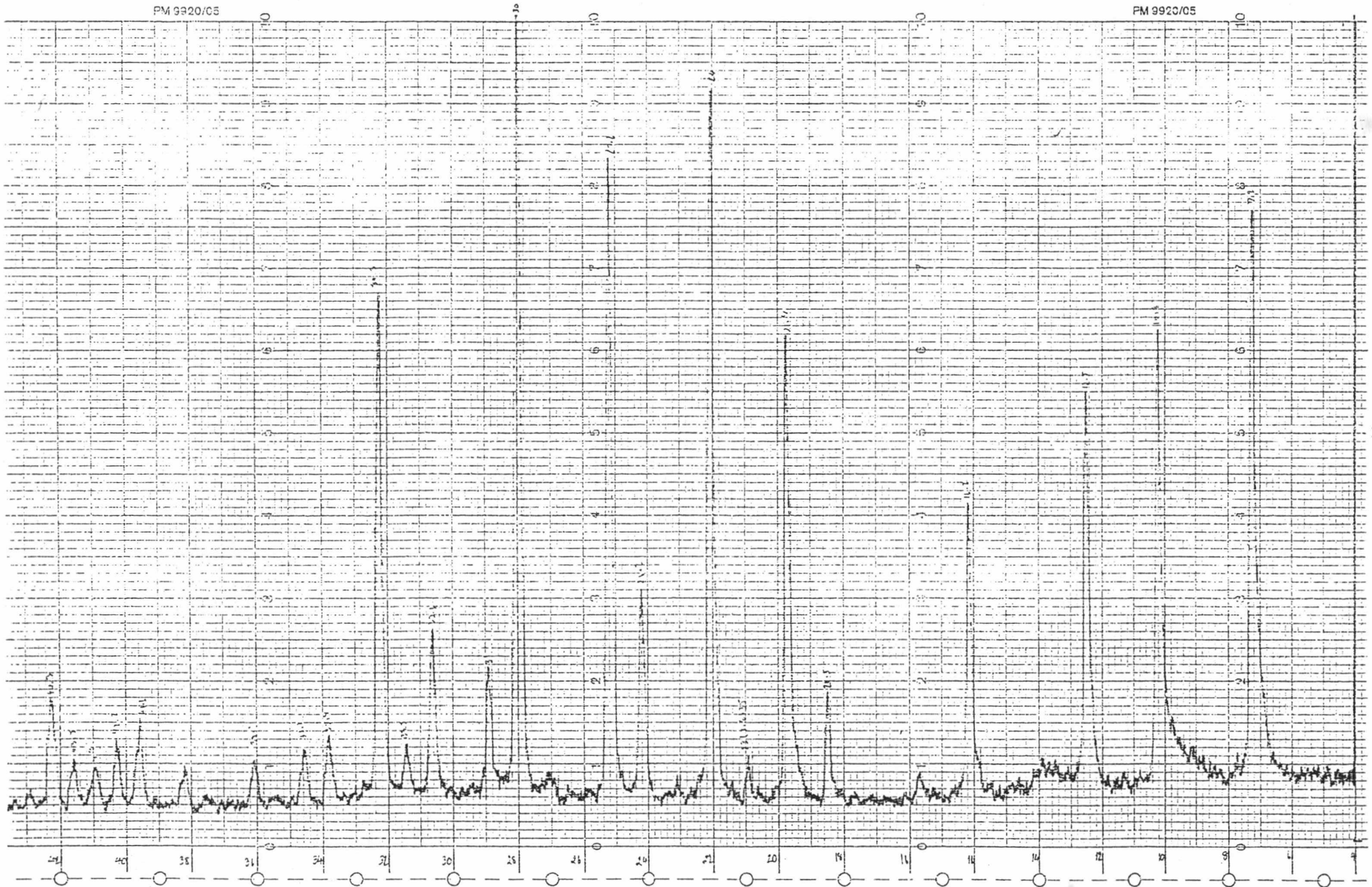
- ที่ความเข้มข้นของสังกะสี 50 60 และ 70 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีถูกแยกออกได้ในปริมาณ 83.3 96.25 และ 109.37 มิลลิกรัมต่อกรัมของซีโอไลต์ต่อลิตร ตามลำดับ

ผลการทดลอง รูปที่ 4.21

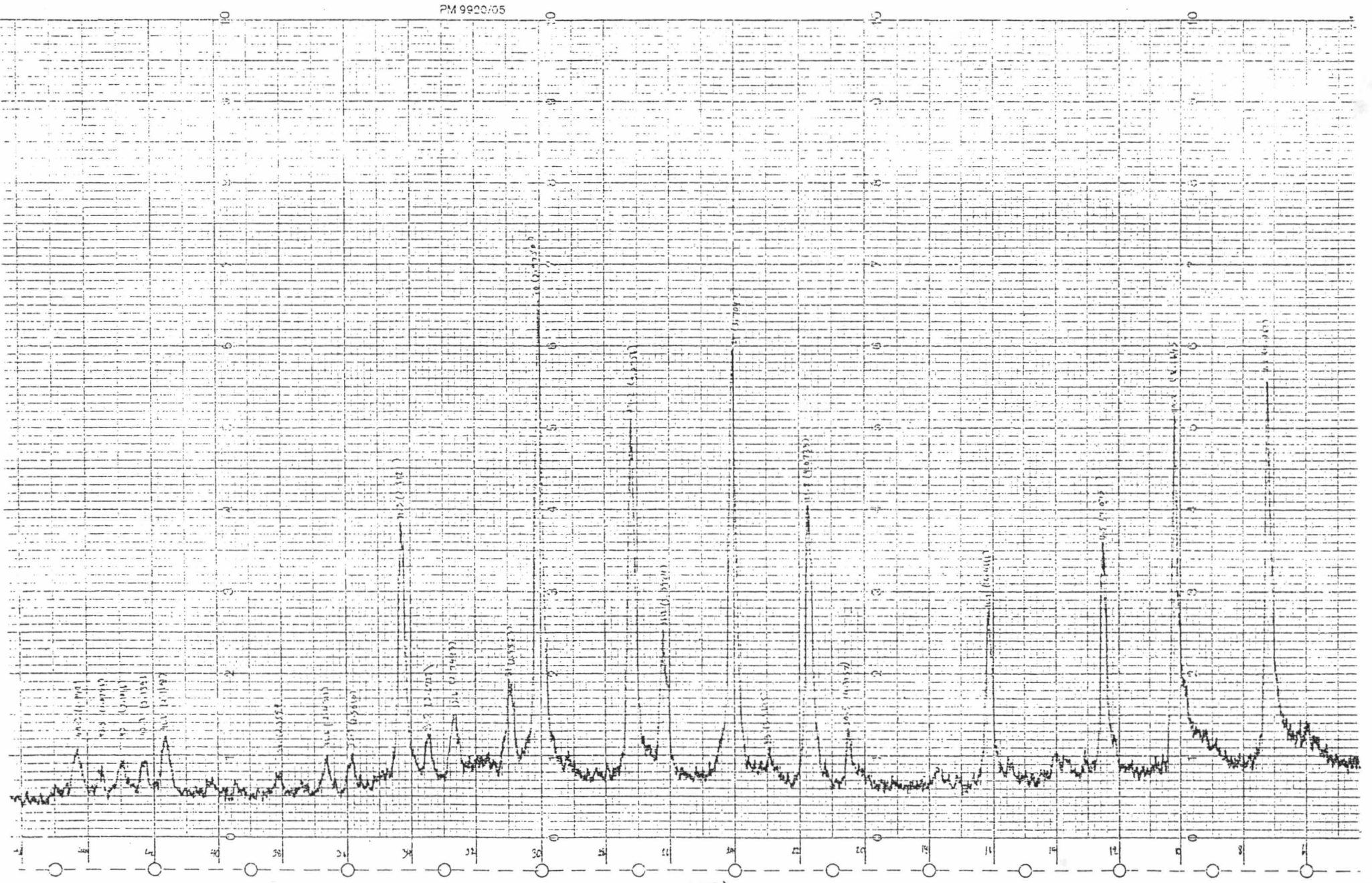
แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออน เทียบกับ
pH ของสารละลาย

- เมื่อ pH ของสารละลายลดลง % Zn removal จะลดลง
- เมื่อ pH ของสารละลายต่ำลง % Zn removal จะลดลงน้อยมากและที่

pH ประมาณ 1.1 % Zn removal สูงถึง 82 %

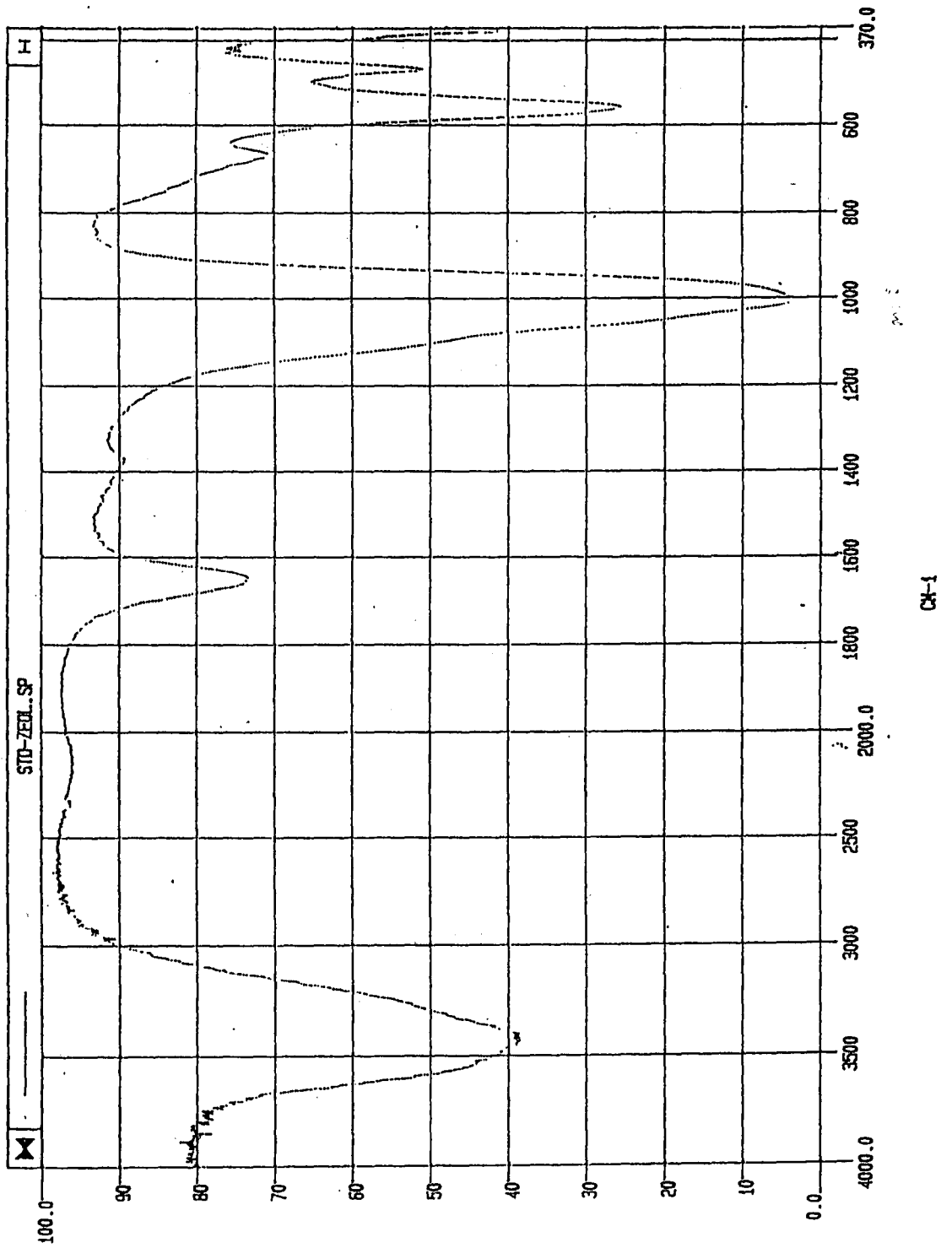


รูปที่ 4.0 เอ็มอาร์-1 โปรตีนแพพริกของตัวอย่างที่โอโตค 10 มกราคม



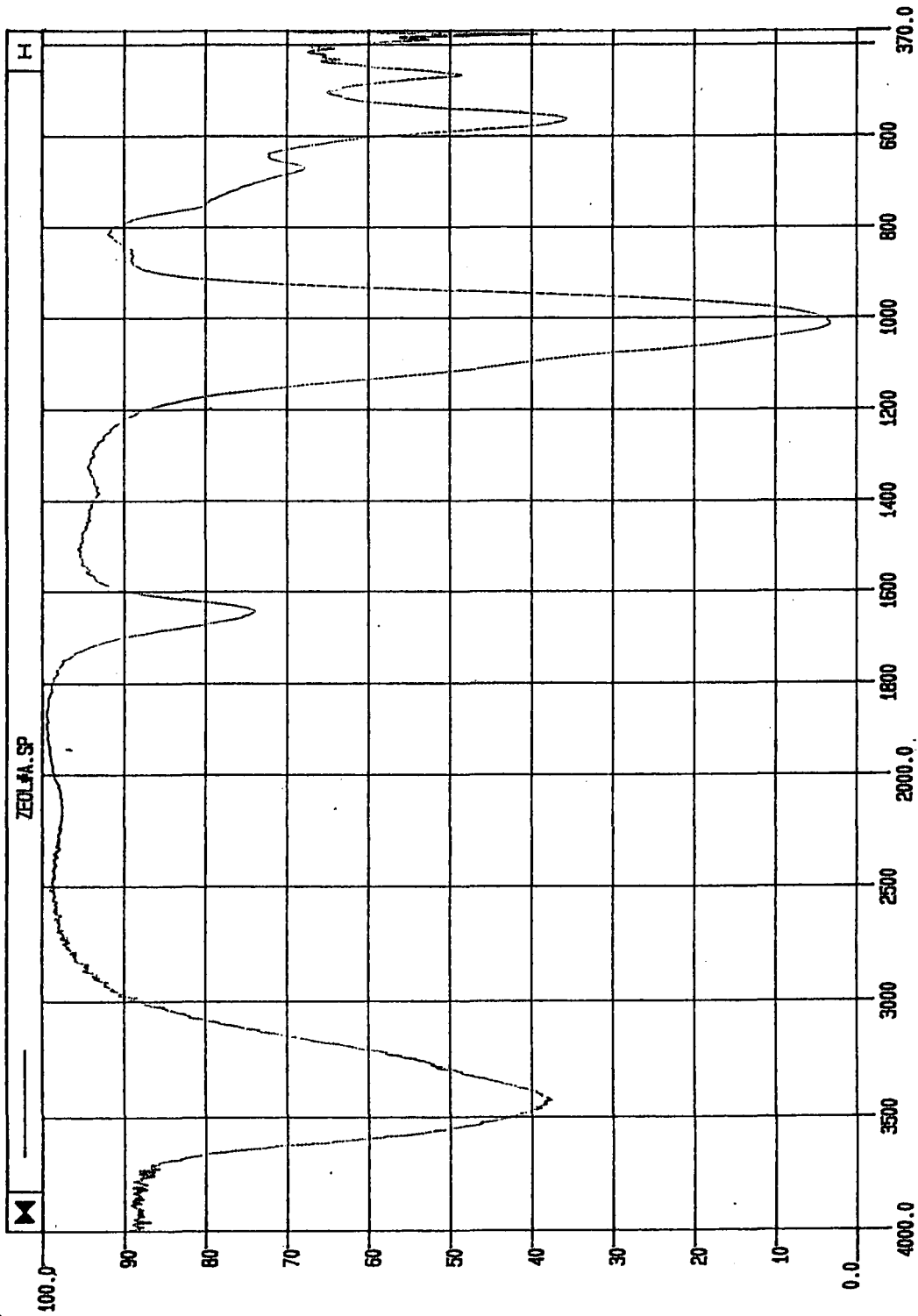
PM 9920:05

รูปที่ 4.2 สเปกตรัมอินฟราเรดของตัวอย่างซีไอโลกมาตรฐาน

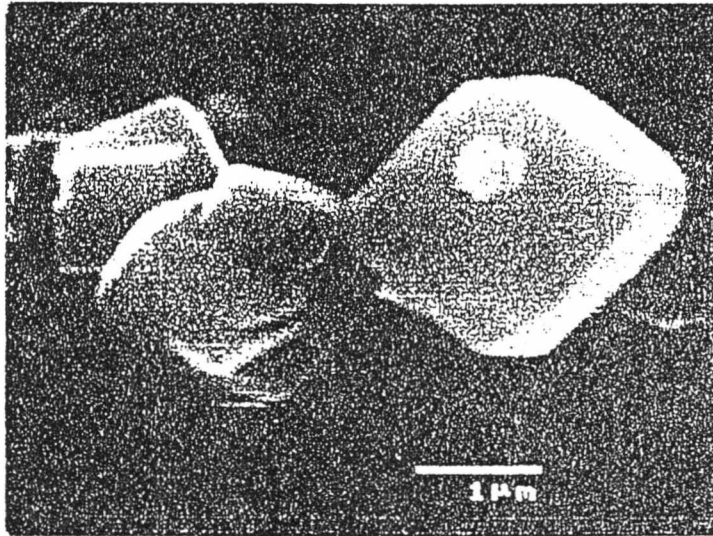


II

รูปที่ 4.3 สเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้



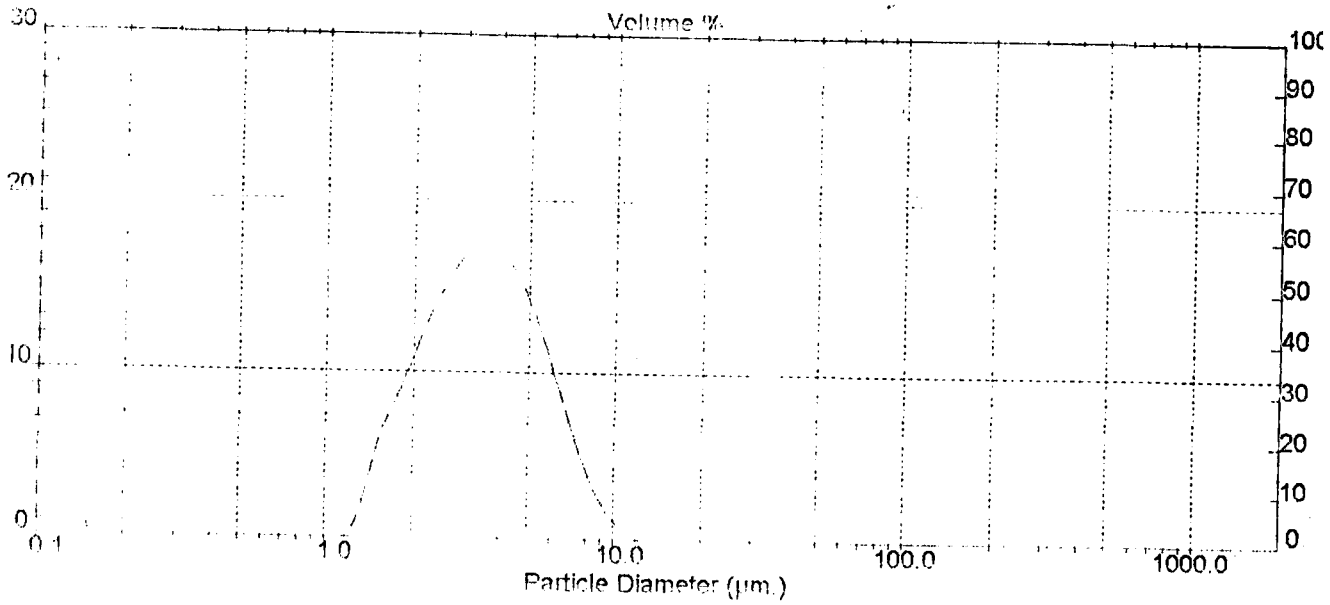
รูปที่ 4.4 แสดงซีโวลต์เอมาตราจากกาต้มน้ำขยาย 20000 เท่า



รูปที่ 4.5 แสดงซีโวลต์เอมาตราที่ได้จาก 18% NaOH 90-100 °c กาต้มน้ำขยาย 10000 เท่า



รูปที่ 4.6 แสดงการกระจายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคซีไอไลท์เอ

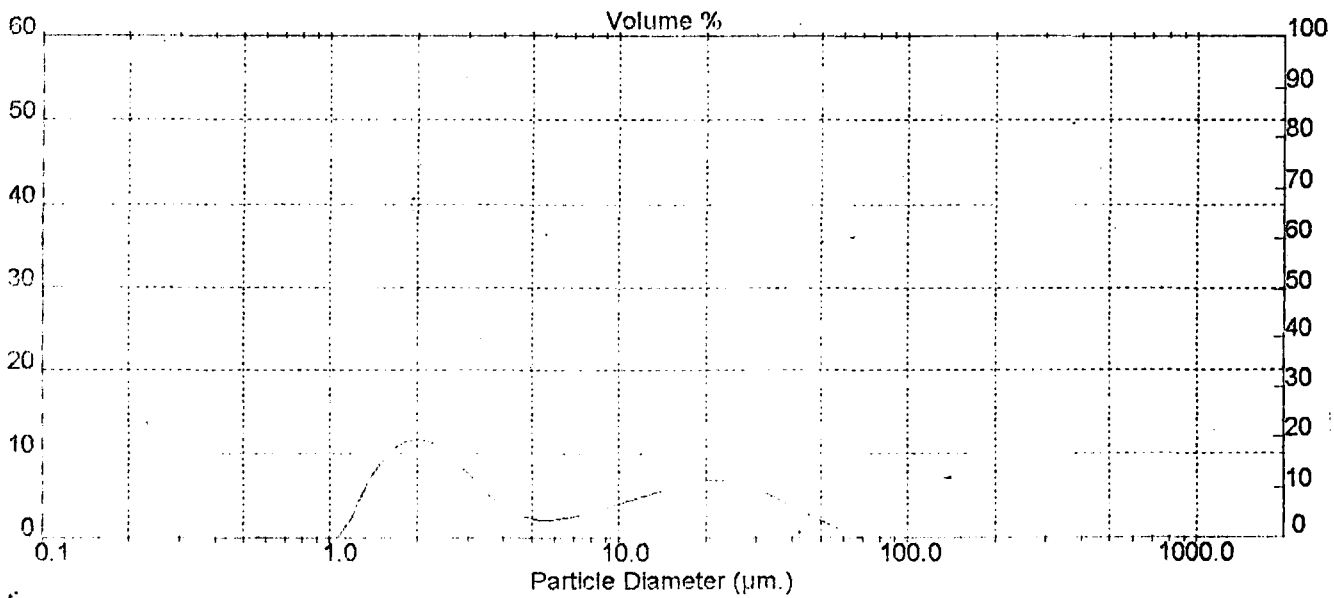


Malvern Instruments Ltd.
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1.1a
Serial No. 6293

03 Feb 94

-ซีไอไลท์เอ มาตรฐาน



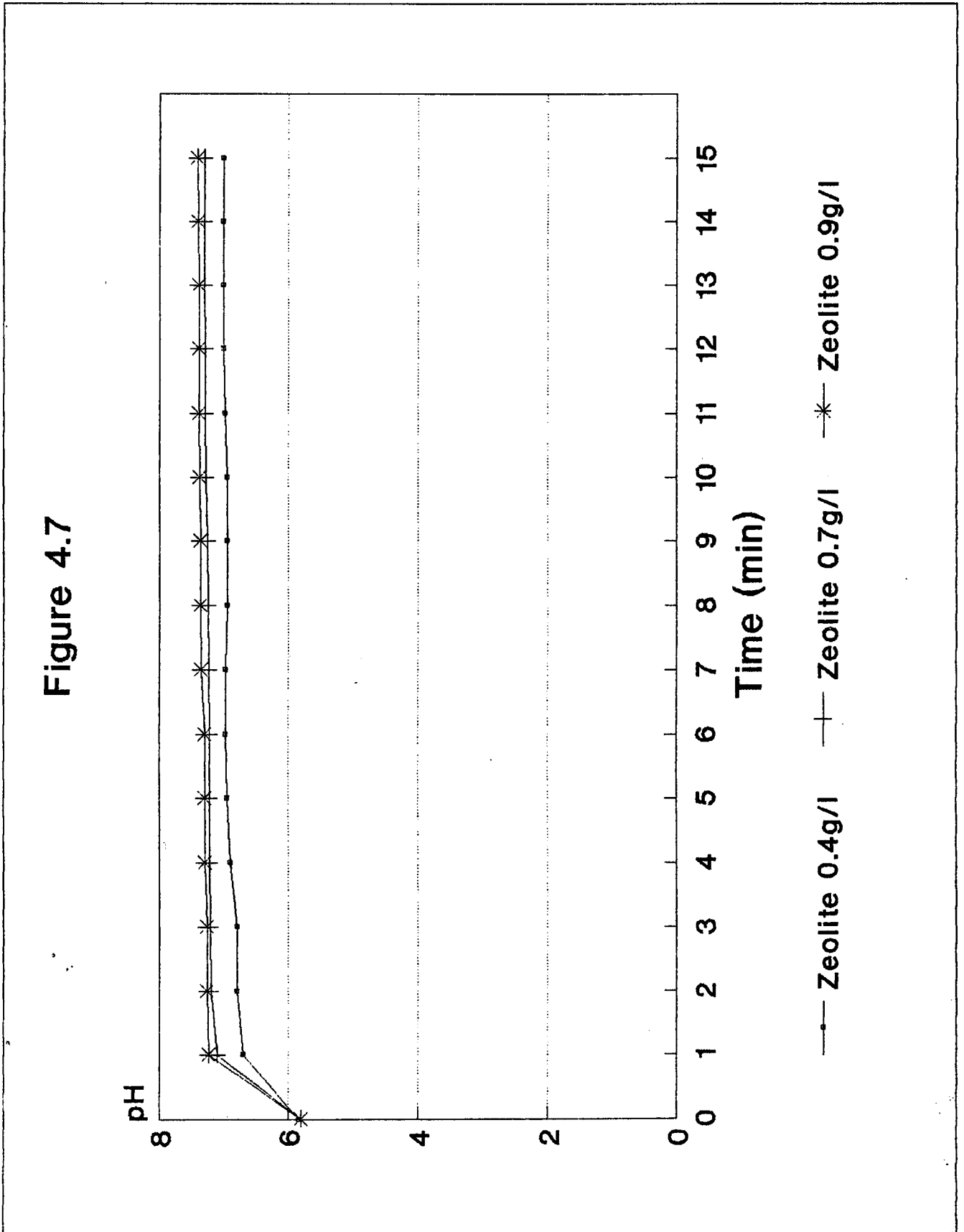
Malvern Instruments Ltd.
Malvern, U.K.

MasterSizer X Ver. 1.1a
Serial No. 6299

-ซีไอไลท์เอ ที่สังเคราะห์ได้

ผลการทดลอง รูปที่ 4.7

แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายไนเตรตไอออนเข้มข้น 50 mg/l
เทียบกับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

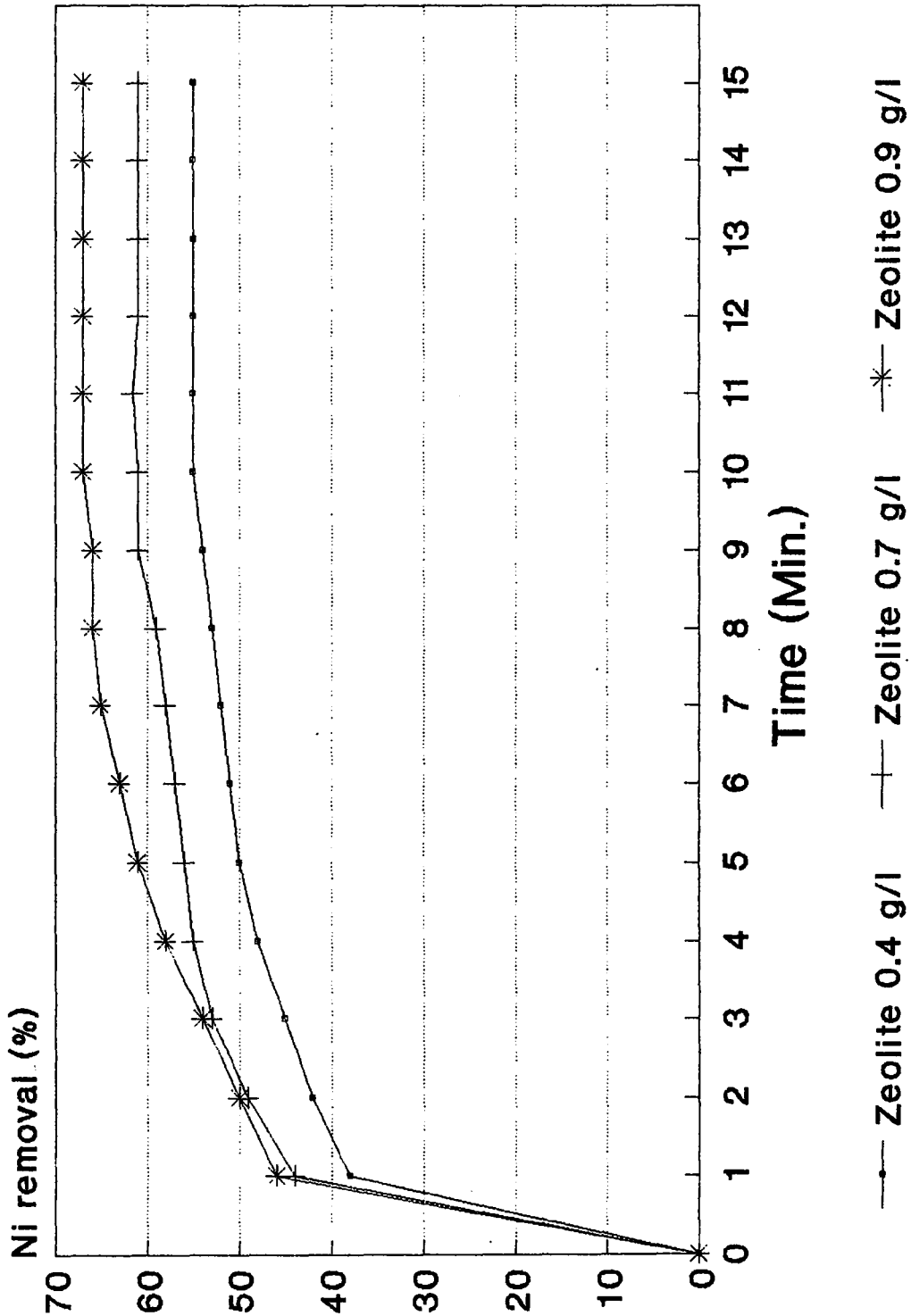


ผลการทดลอง รูปที่ 4.8

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออนเข้มข้น

50 mg/l เทียบกับเวลา เมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

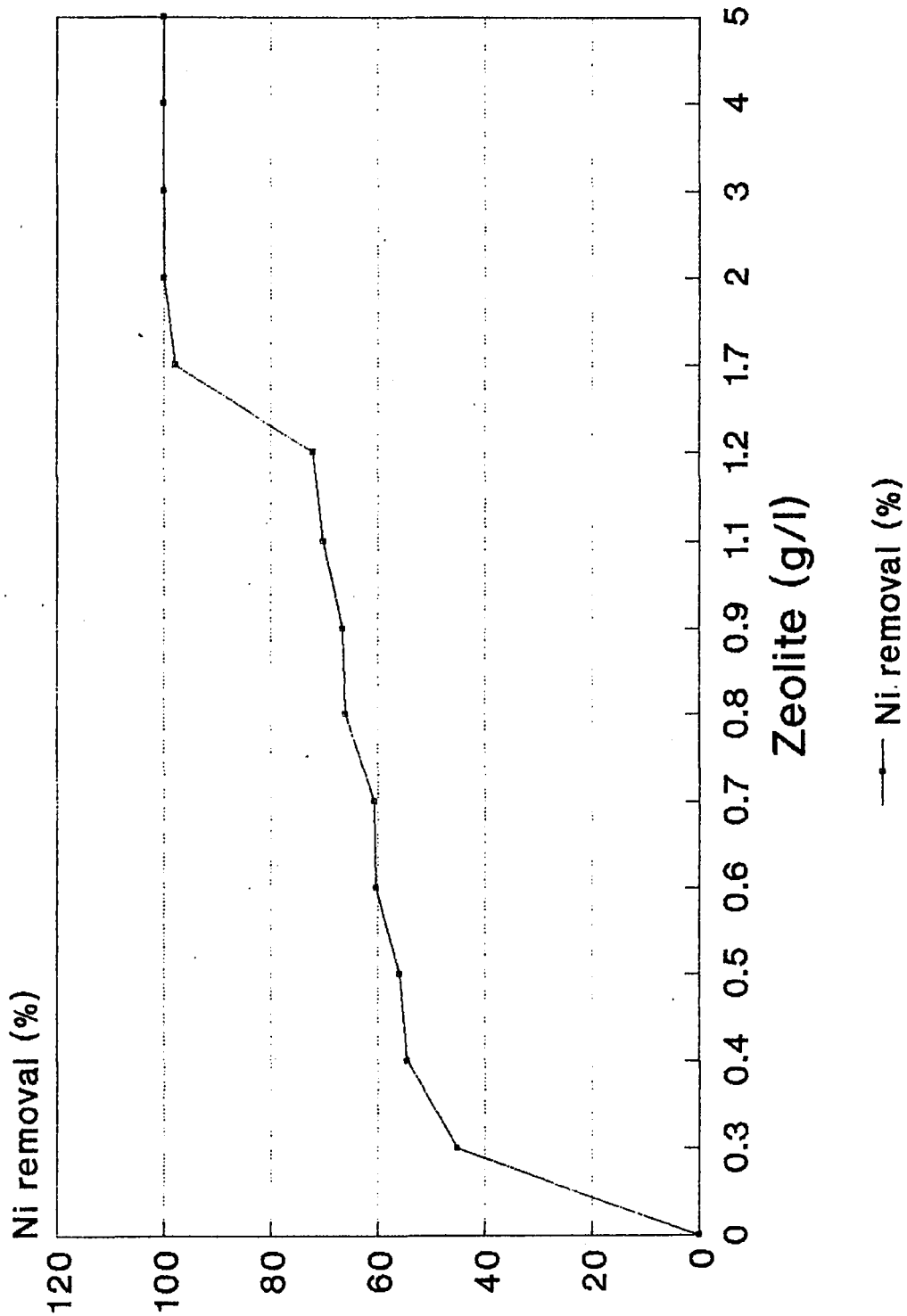
Figure 4.8



แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิเกิลไอออนเข้มข้น

50 mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป

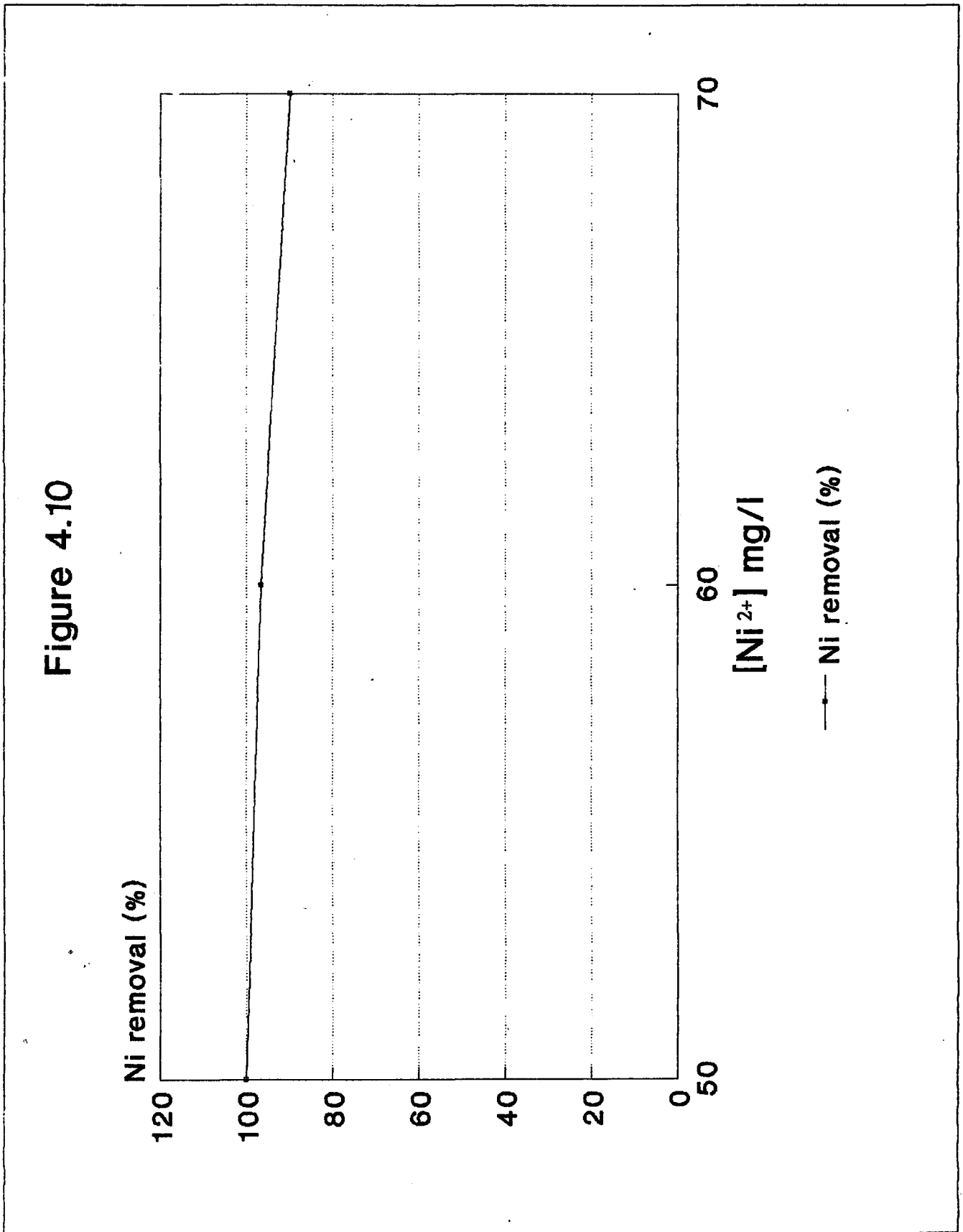
Figure 4.9



ผลการทดลอง รูปที่ 4.10

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายนิกเกิลไอออนเชิงเส้นปริมาณ

ต่าง ๆ เมื่อเติมซีไอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 2 g/l

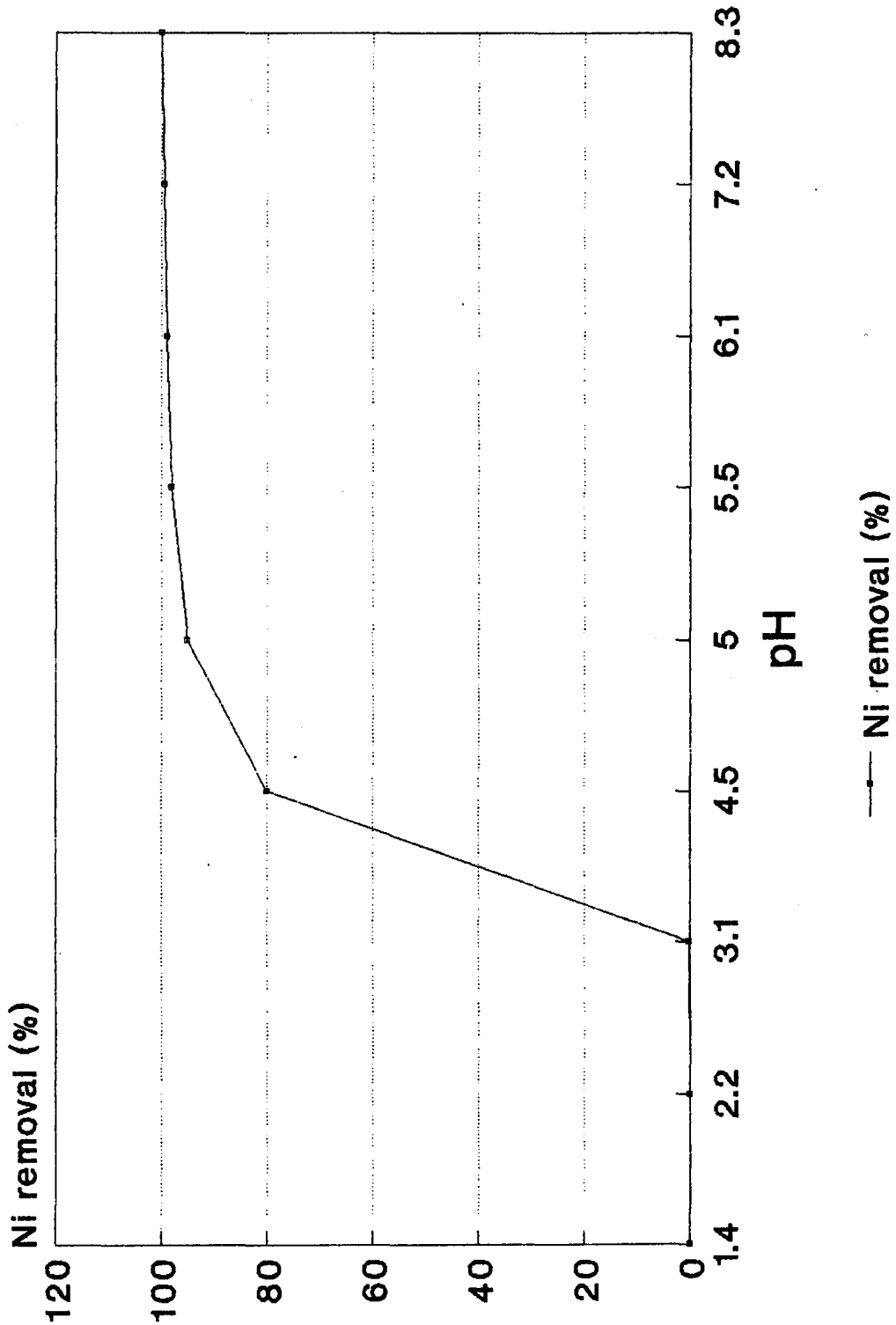


ผลการทดลอง รูปที่ 4.11

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Ni removal ของสารละลายฟิเกิลไฮดรอกไซด์ เทียบกับ

pH ของสารละลาย

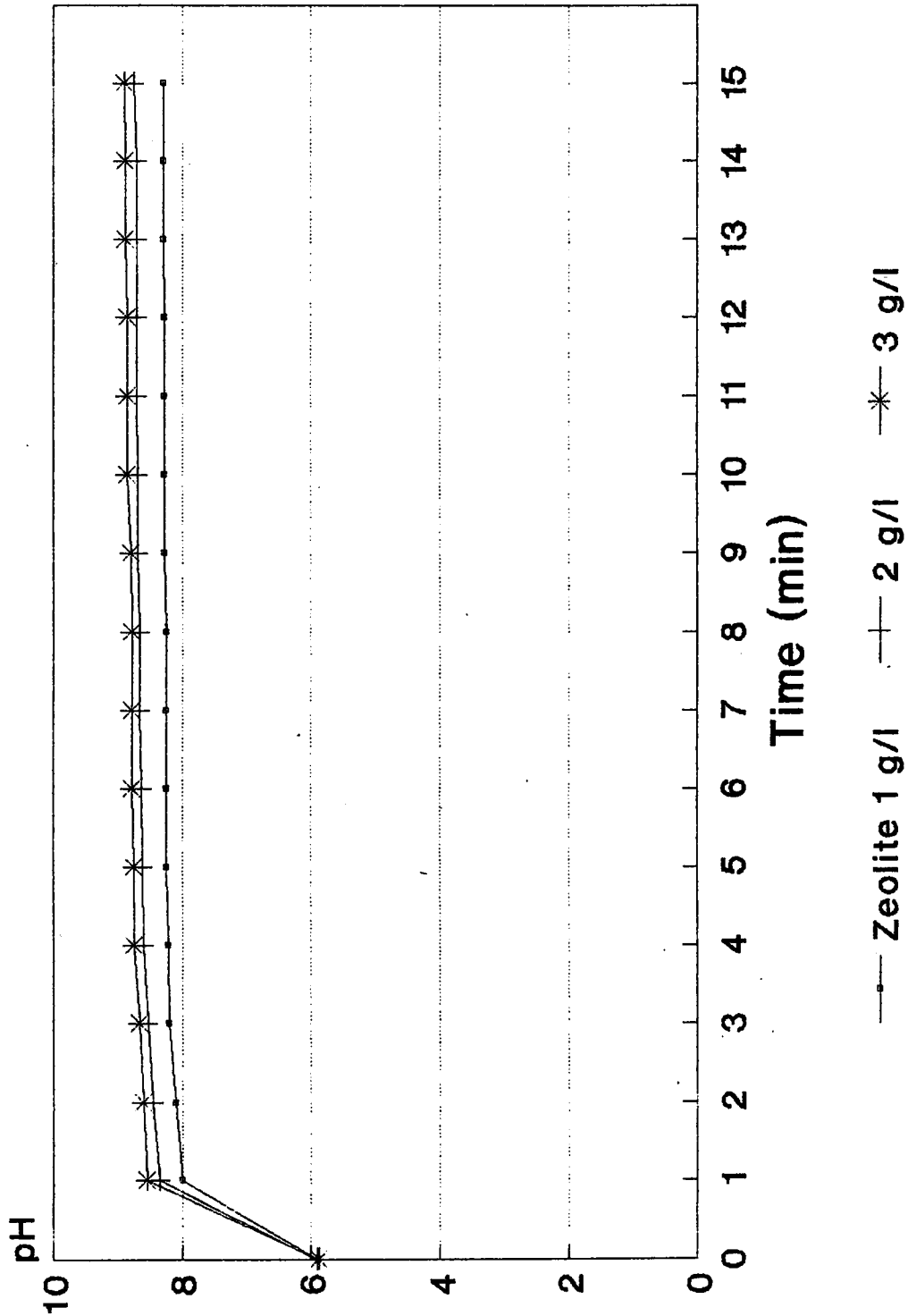
Figure 4.11



ผลการทดลอง รูปที่ 4.12

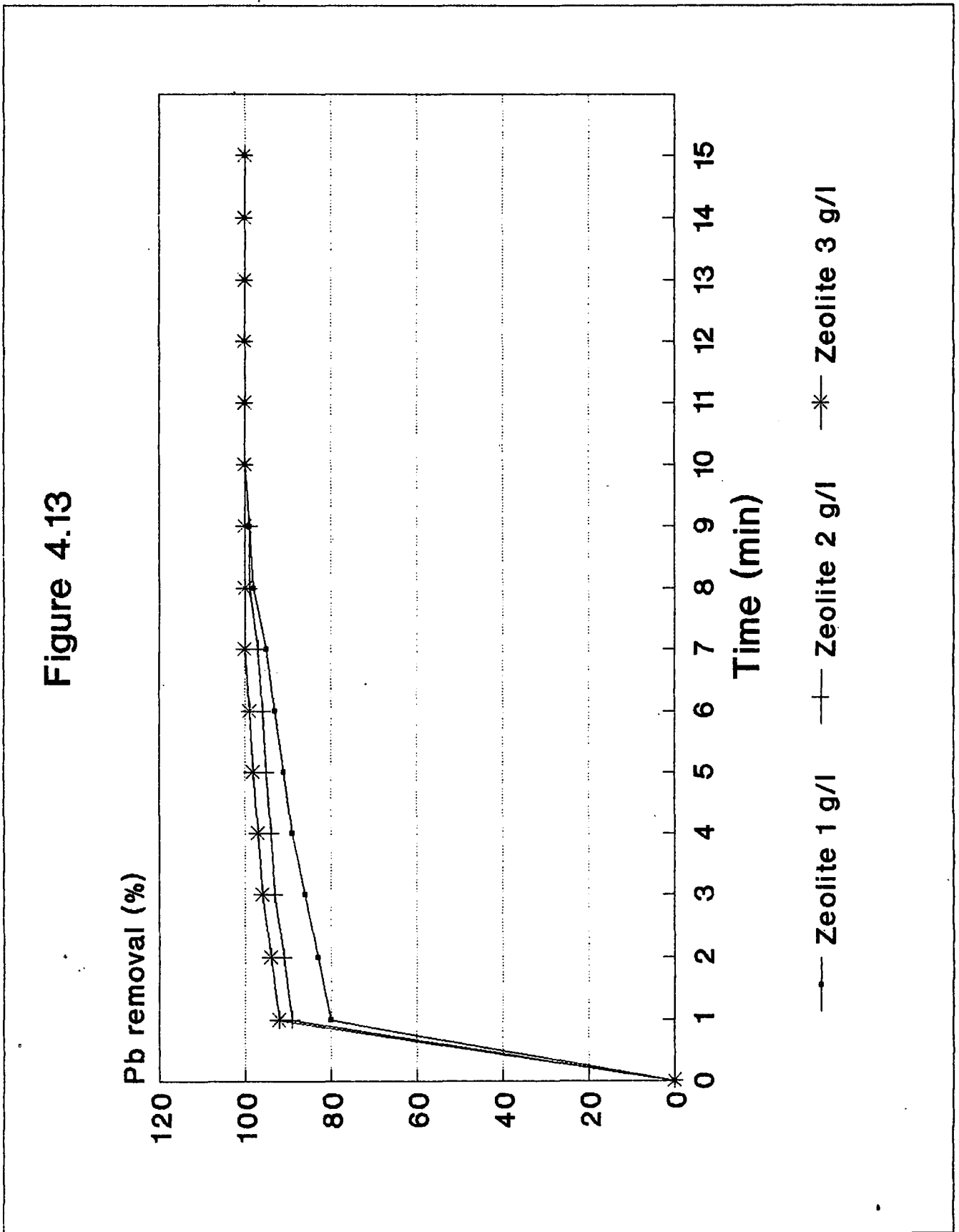
แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายตะกั่วไอออนแข็งเป็น 50 mg/l เทียบ
กับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงในบริเวณความเข้มข้นต่าง ๆ

Figure 4.12



ผลการทดลอง รูปที่ 4.13

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออนแอมป์ใน
50 mg/l เทียบกับเวลา เรือเคมิซีโอโลต เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

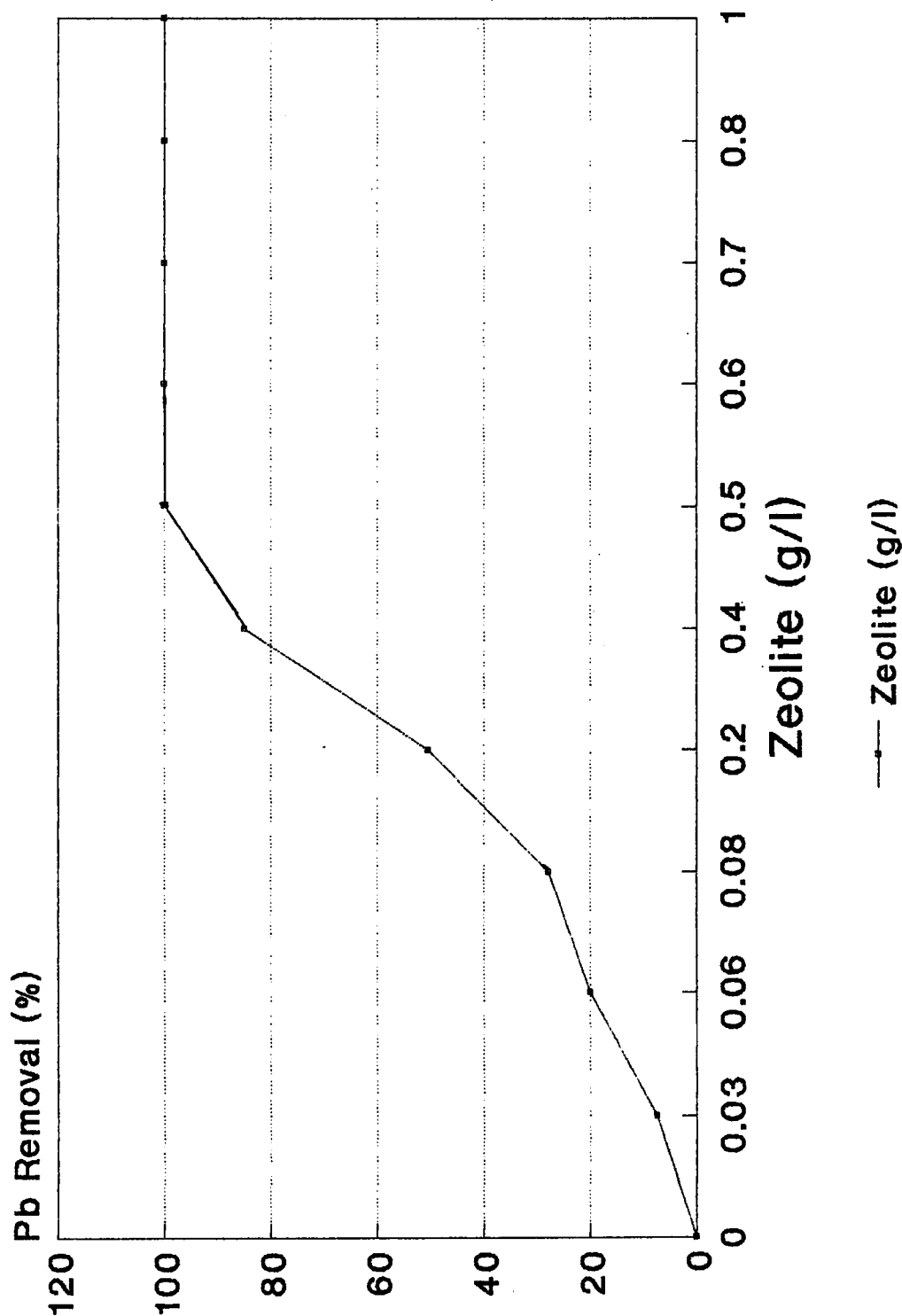


ผลการทดลอง รูปที่ 4.14

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออนแ่มเข้มข้น

50 mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป

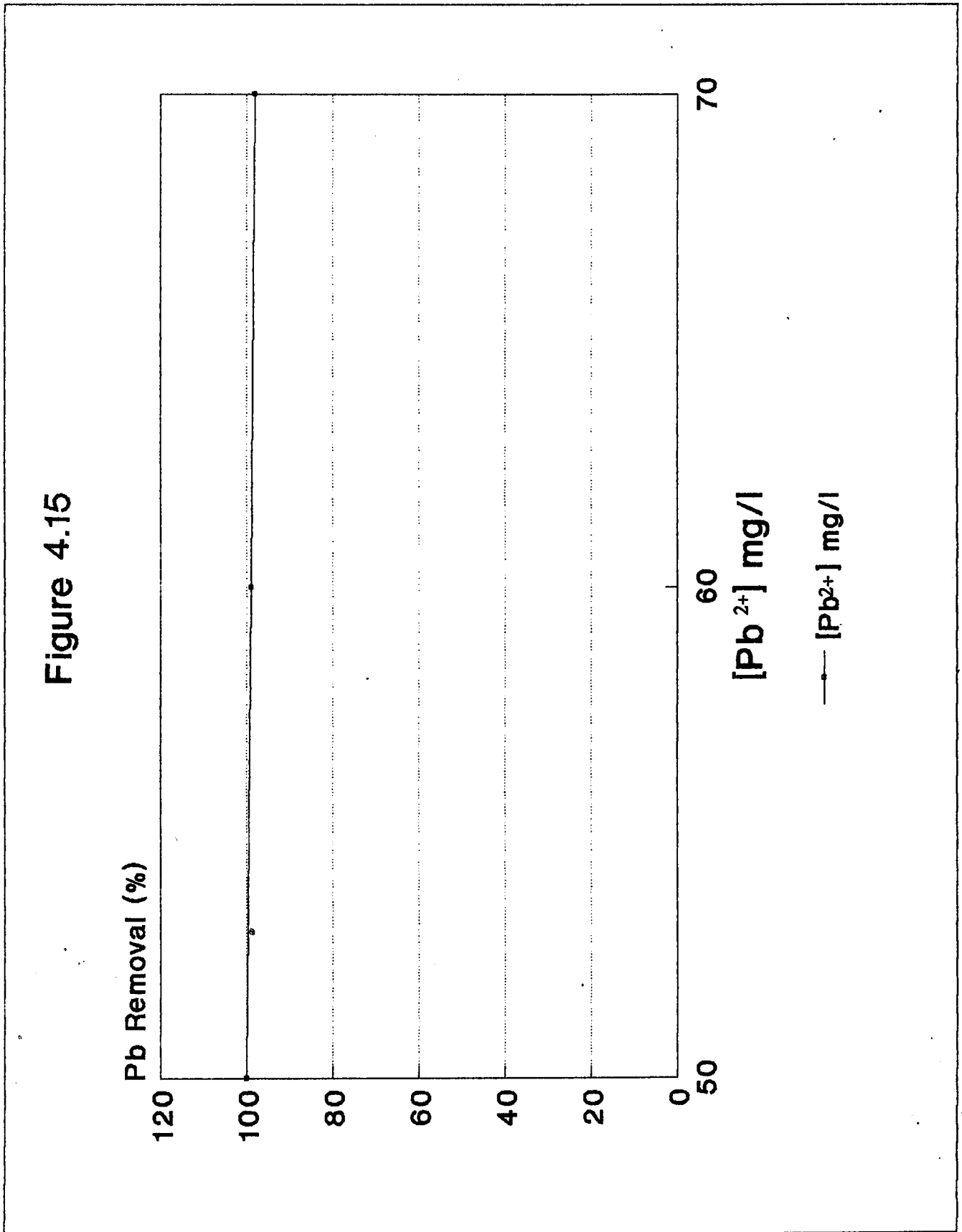
Figure 4.14



ผลการทดลอง รูปที่ 4.15

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออนเข้มข้น

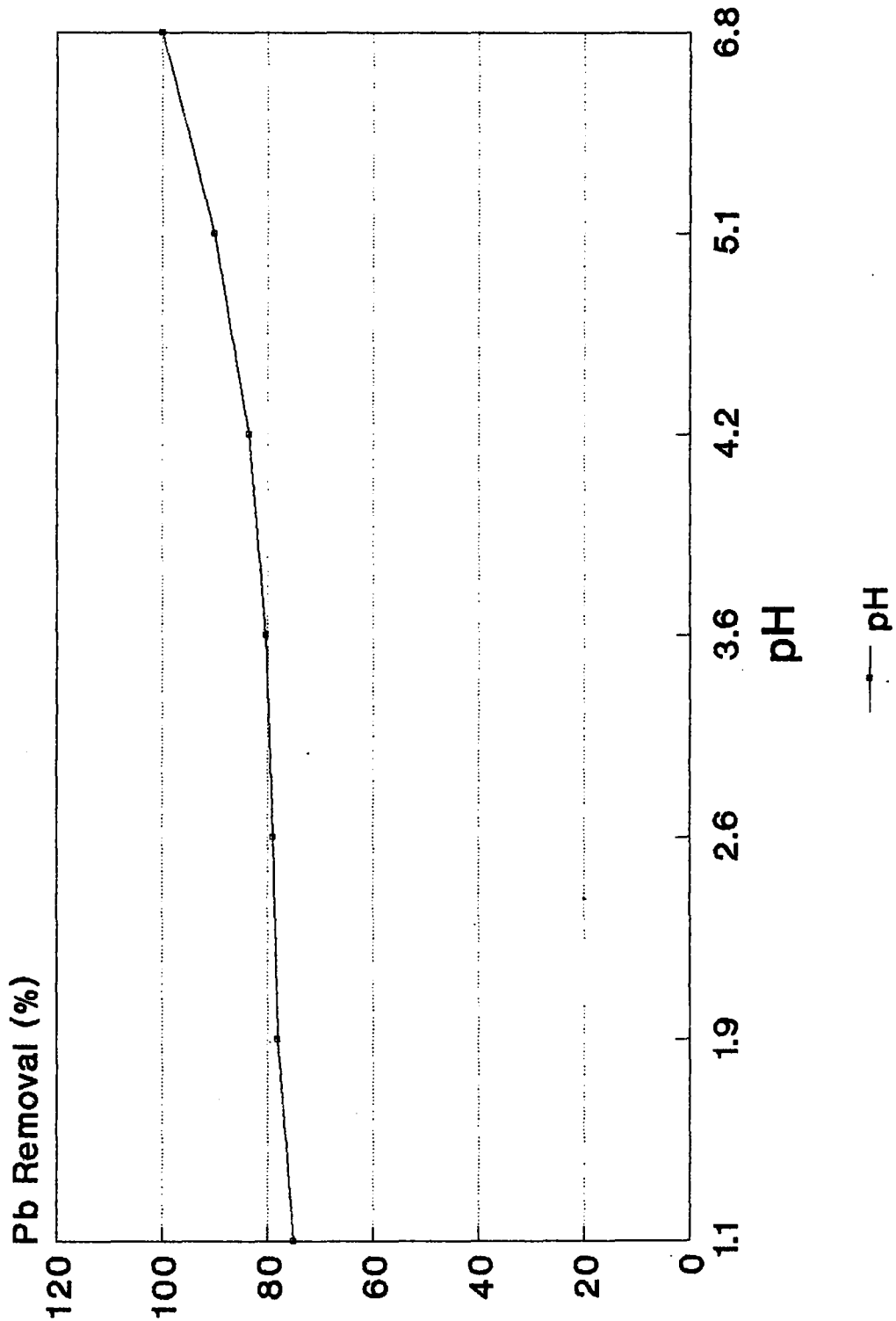
ปริมาณต่าง ๆ เมื่อเติมซีโอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 0.5 g/l



แสดงการเปลี่ยนแปลง % Pb removal ของสารละลายตะกั่วไอออน เทียบกับ

pH ของสารละลาย

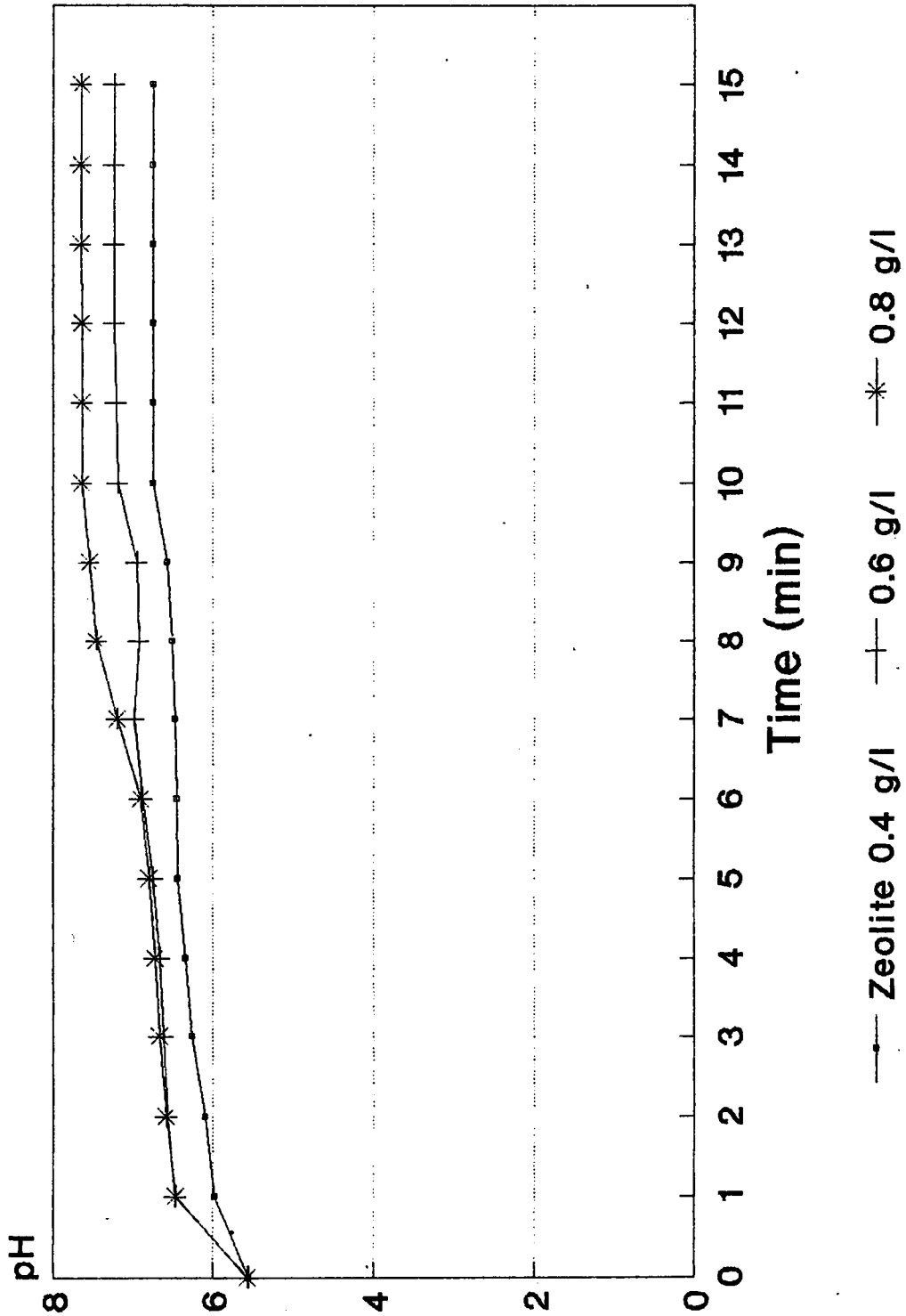
Figure 4.16



ผลการทดลอง รูปที่ 4.17

แสดงการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50 mg/l
เทียบกับเวลาเมื่อเติมซีโอไลต์ เอ ลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

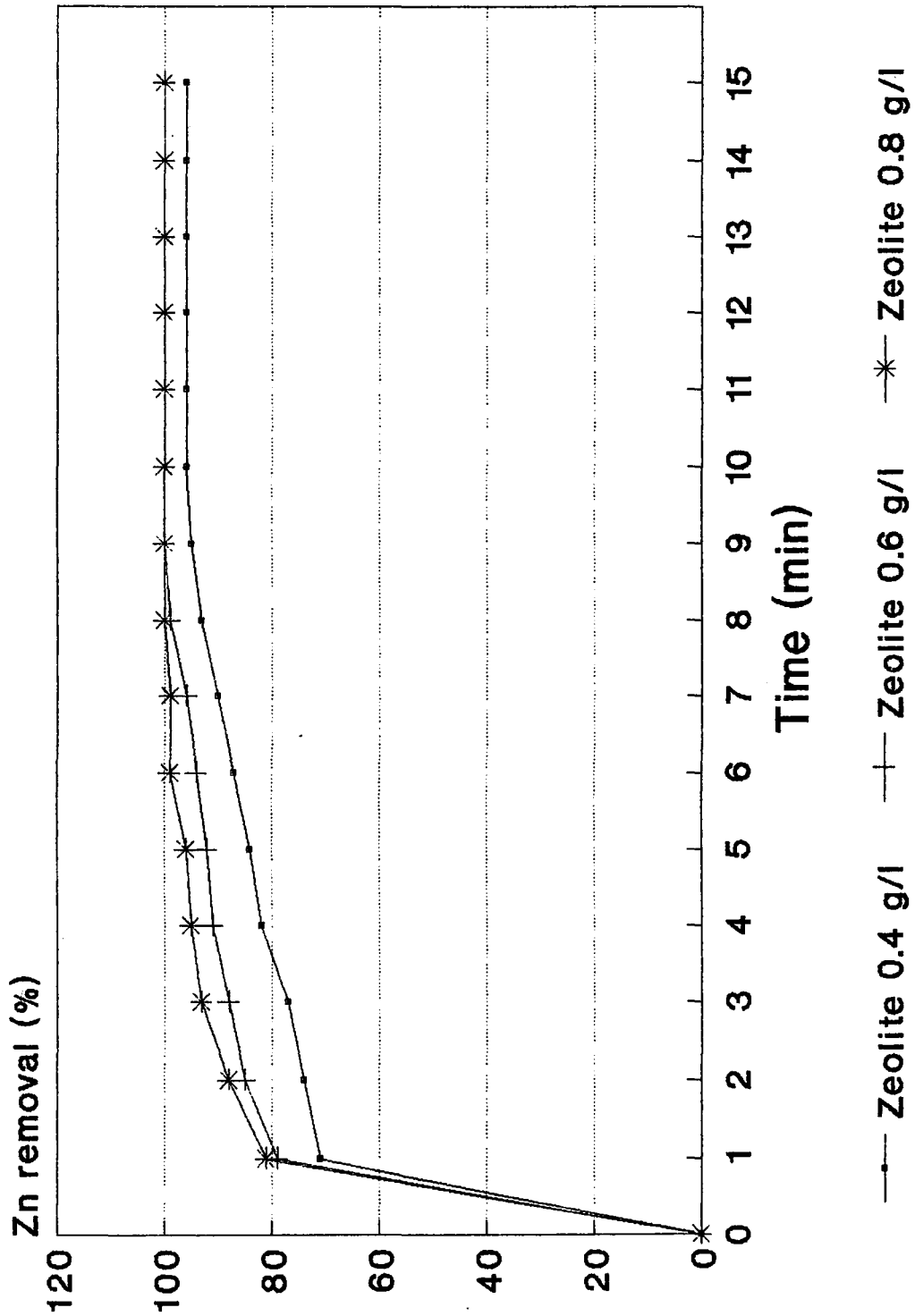
Figure 4.17



ผลการทดลอง รูปที่ 4.18

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50 mg/l เทียบกับเวลา เมื่อเติมซีโอไลต์ เอลงไปในปริมาณความเข้มข้นต่าง ๆ

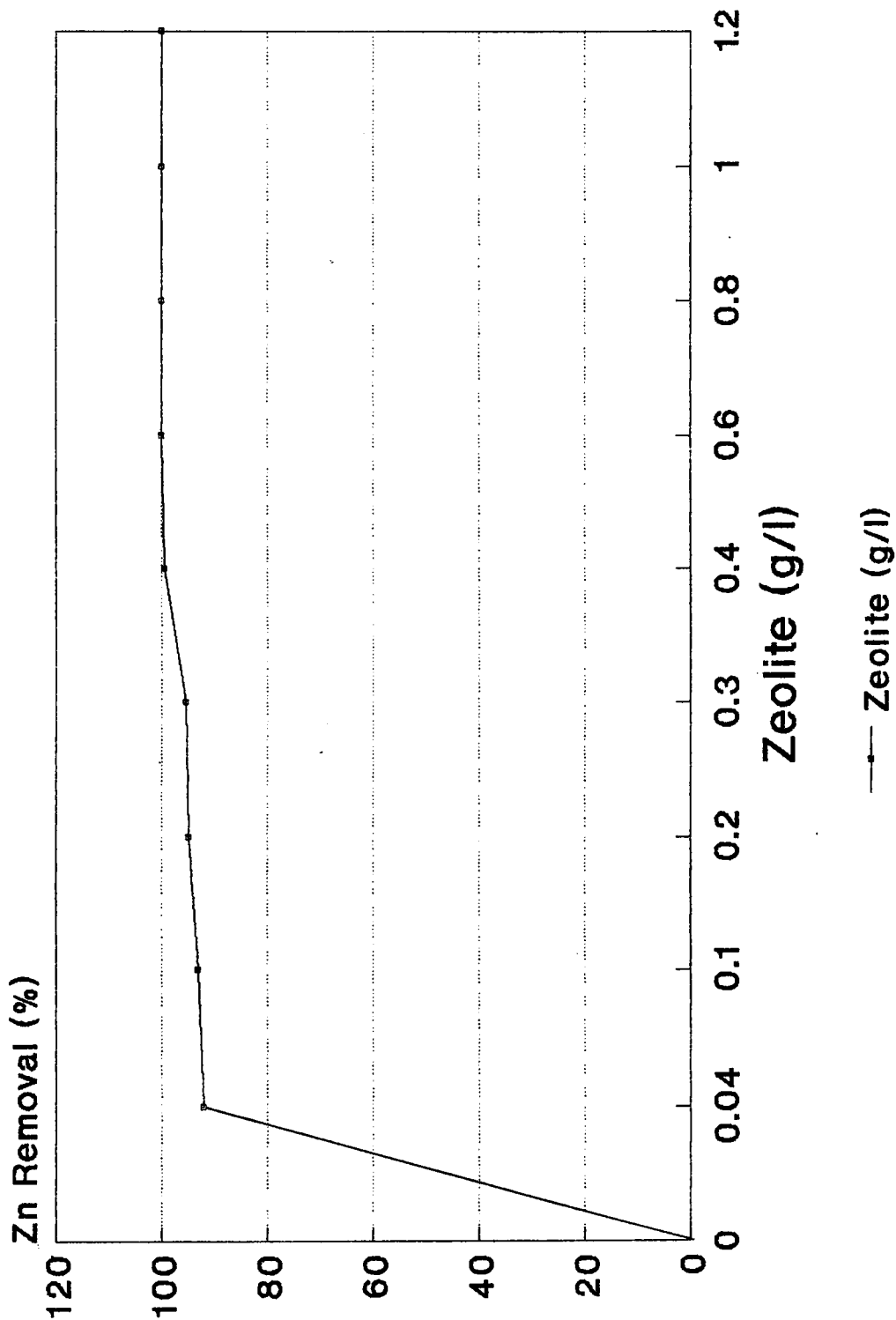
Figure 4.18



แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น 50

mg/l เทียบกับปริมาณความเข้มข้นซีโอไลต์ที่เติมลงไป

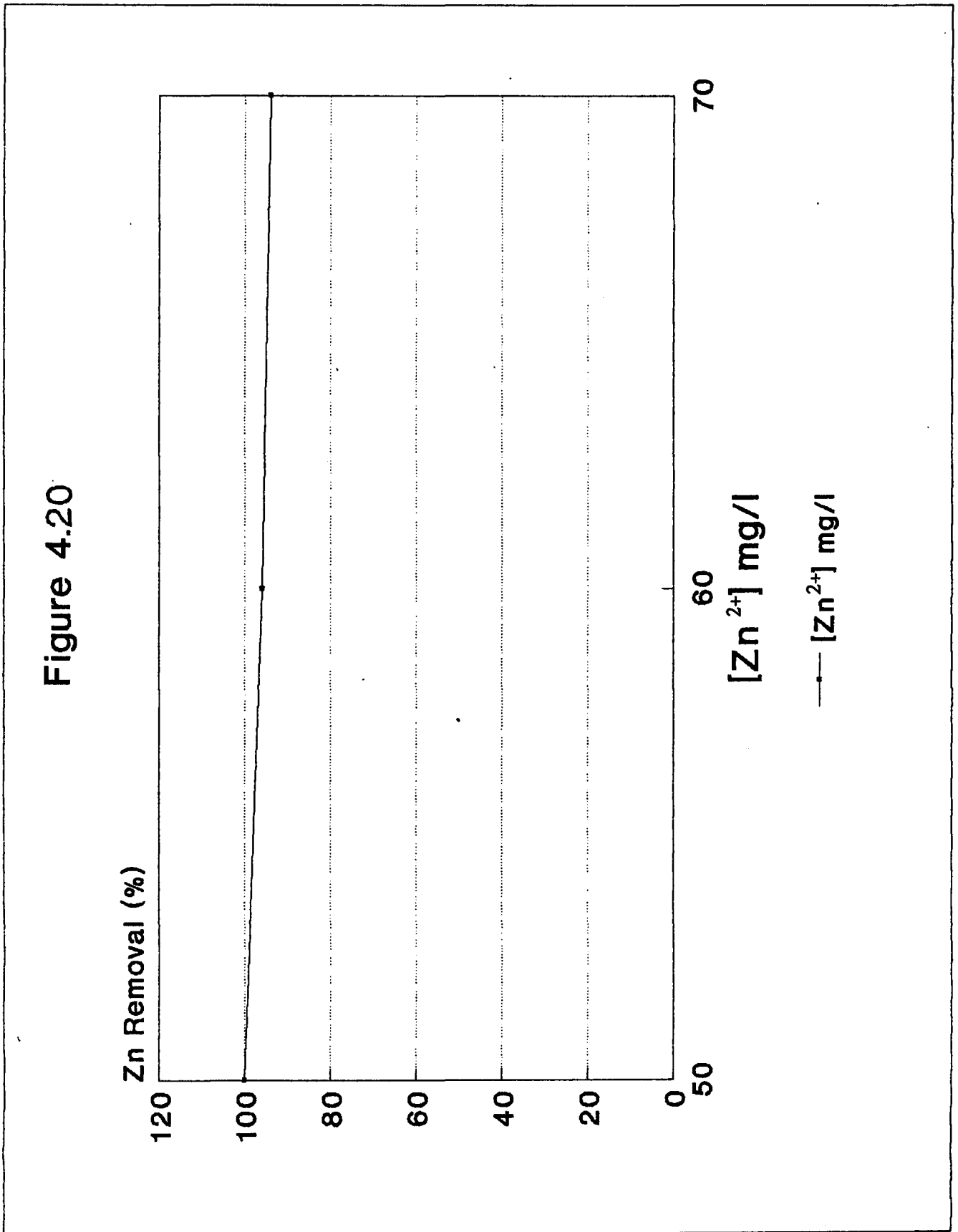
Figure 4.19



ผลการทดลอง รูปที่ 4.20

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออนเข้มข้น

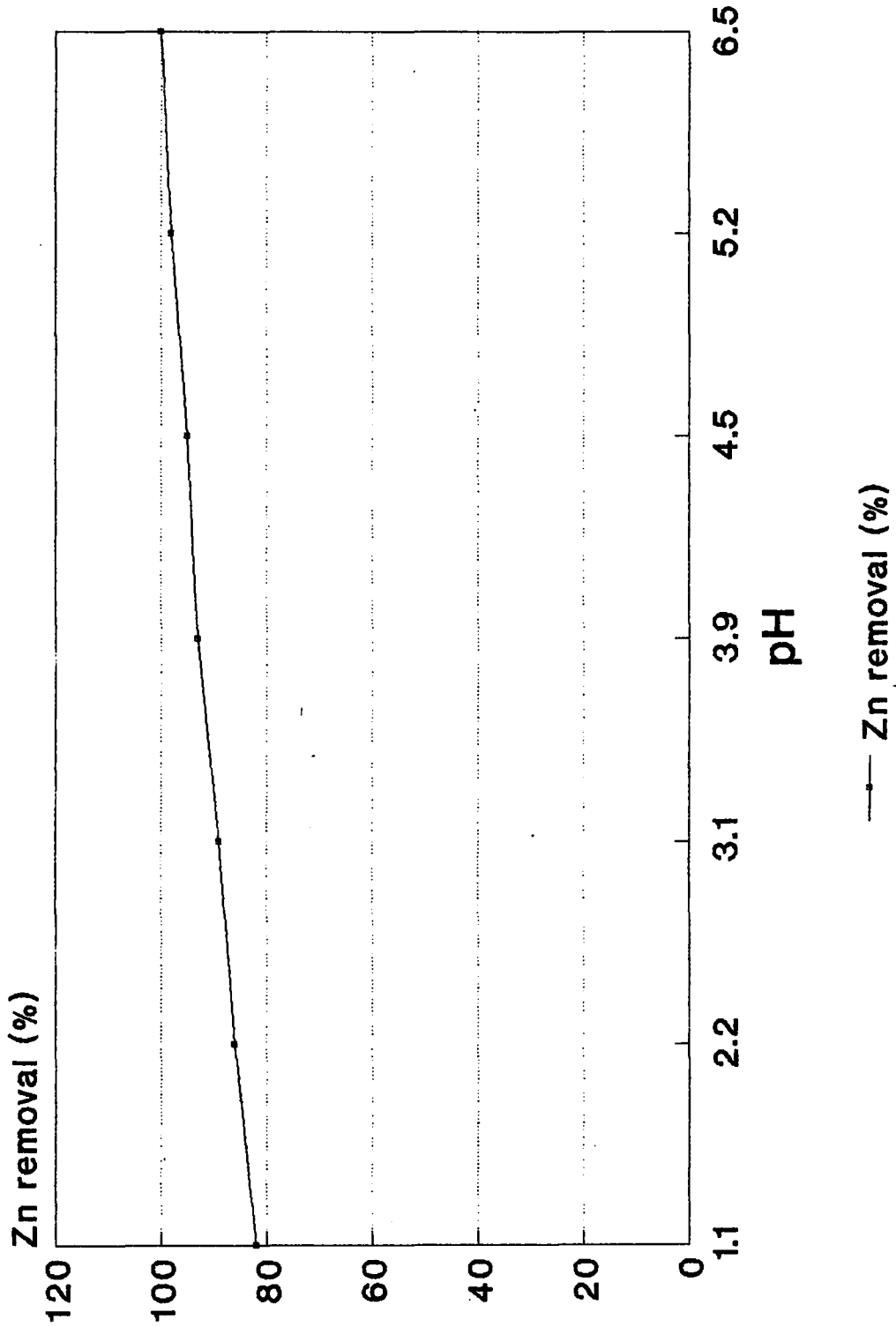
ปริมาณต่าง ๆ เมื่อเติมซีโอไลต์ในปริมาณความเข้มข้น 0.6 g/l



ผลการทดลอง รูปที่ 4.21

แสดงการเปลี่ยนแปลง % Zn removal ของสารละลายสังกะสีไอออน เทียบกับ pH ของสารละลาย

Figure 4.21



บทที่ 5

สรุปผล วิจัยารณ์ และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

ขั้นตอนแรก ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ซีโรไลต์เอ ด้วยวิธีไฮโดรเจล (Hydrogel process) พบว่าสภาพการจัดเรียงตัวของผลึก หมู่มงักชั้น รูปร่างของผลึก การกระจายของขนาดอนุภาค pH เมื่อกระจายตัวในน้ำ ของซีโรไลต์ที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับซีโรไลต์เอมาตรฐาน พบว่ามีสมบัติใกล้เคียงกัน แสดงได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติระหว่างซีโรไลต์เอามาตรฐานกับซีโรไลต์ที่สังเคราะห์ได้

คุณสมบัติ	ซีโรไลต์เอามาตรฐาน	ซีโรไลต์เอสังเคราะห์ (วิธีไฮดรเจล)
1. ตำแหน่งที่ 2 ๐ จากเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน	7.2, 10.18, 12.48, 16.14, 21.7, 24.01, 27.16, 29.98, 34.22	7.2, 10.18, 12.48, 16.14, 21.7, 24.01, 27.16, 29.98, 34.22
2. ตำแหน่งของหมู่ฟังก์ชัน		
T-O asym.strech(cm^{-1})	1000	1000
T-O sym.strech(cm^{-1})	660	660
Double ring (cm^{-1})	560	560
T-O bending (cm^{-1})	460	460
pore opening (cm^{-1})	370	375
3. รูปร่างของผลึก	รูปลูกบาศก์	รูปลูกบาศก์
4. การกระจายตัวของขนาด เส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค	1.32-11.55 μm .	1.32-68.33 μm .
5. pH เมื่อกระจายตัวในน้ำ	10.95	10.80

ขั้นตอนที่สอง เป็นการศึกษาผลของการใช้ ซีไอไลต์เอ แยกโลหะหนักออกจากสารละลายใน
กรณีของ นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนัก
เรียงตามลำดับดังนี้ $Pb^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$ แสดงได้ตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 แสดงประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้ซีโอไลต์เอที
สังเคราะห์ได้

การทดลอง	Mn ²⁺	Ni ²⁺	Pb ²⁺	Zn ²⁺	หมายเหตุ
1. ศึกษาเวลาที่ใช้ pH และ % การแยกสมมูล (นาที่)	10	10	10	10	ดูรูป 4.7 4.8 4.12 4.13
2. ศึกษา % การแยก เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของซีโอไลต์ที่เติมลงไป โดยให้ [Mn ²⁺] = 50 mg/l คงที่					4.17 และ 4.18
- เมื่อความเข้มข้นของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น	% การแยกเพิ่มขึ้น	% การแยกเพิ่มขึ้น	% การแยกเพิ่มขึ้น	% การแยกเพิ่มขึ้น	ดูรูป 4.9 4.14 และ 4.19
- ปริมาณซีโอไลต์ (g/l) ที่ใช้ในการแยกโลหะหนักออกได้หมด	2.0	0.5	0.6	0.6	
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการแยกเมื่อ [Mn ²⁺] เพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นของซีโอไลต์คงที่	% การแยกลดลงมาก	% การแยกลดลงน้อยมาก	% การแยกลดลงน้อย	% การแยกลดลงน้อย	ดูรูป 4.10 4.15 และ 4.20
4. ศึกษา % การแยก เมื่อเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลาย	pH ต่ำลง : % การแยกลดลงมาก	pH ต่ำลง : % การแยกลดลงน้อย	pH ต่ำลง : % การแยกลดลงน้อยมาก	pH ต่ำลง : % การแยกลดลงน้อยมาก	ดูรูป 4.11 4.16 และ 4.21

วิจารณ์ผลการทดลอง

ปัจจัยที่อาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักของซีโอไลต์ ได้แก่

1. ไอออนที่มีขนาดเล็ก (Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+}) มีแนวโน้มจะถูกดูดซับมากกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากมีแรงดึงดูดระหว่างประจุของไอออนกับโครงสร้างของซีโอไลต์ ตามกฎของคูลอมบ์ คือ $F = KQ_1Q_2/r^2$

2. โครงสร้างของซีโอไลต์เอ ที่ขาดประจุเนื่องจากการแทนที่ Si^{4+} ในโครงสร้างด้วย Al^{3+} จะให้จึงมีแนวโน้มที่จะต้องการดูดซับไอออนที่มีประจุบวกมาก มากกว่าไอออนที่มีประจุบวกต่ำ เช่น Ni^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} ในสารละลายจะถูกซีโอไลต์ดูดซับได้ดีกว่า H^+

3. ความเข้มข้นของไอออนในสารละลายถ้ามีมาก จะมีแนวโน้มถูกดูดซับได้ดีกว่า ไอออนที่มีความเข้มข้นต่ำ เช่น เมื่อ pH ของสารละลายลดลง ($[\text{H}^+]$ เพิ่มขึ้น) โลหะหนักจะถูกดูดซับได้น้อยลง เนื่องจาก H^+ ถูกดูดซับได้มากขึ้น

4. โครงสร้างที่ขาดประจุบวกของซีโอไลต์เอ จะสามารถดูดซับประจุเข้าไปได้สูงสุดจำนวนหนึ่ง เพราะฉะนั้นโลหะชนิดเดียวกันถ้าอยู่ในสปีชีส์ ไอออนที่ต่างกัน โลหะนั้นจะถูกแยกได้ในปริมาณไม่เท่ากัน เช่น ในสารละลายตะกั่ว ถ้าตะกั่วอยู่ในสปีชีส์ ไอออน Pb^{2+} จะถูกดูดซับได้สูงสุดจำนวนหนึ่ง แต่ถ้าอยู่ในสปีชีส์ ไอออน PbOH^+ จะถูกดูดซับได้มากกว่า เนื่องจากประจุบวกของสปีชีส์แบบหลังมีเพียงครึ่งหนึ่งของสปีชีส์แบบแรก ฉะนั้นตะกั่วที่อยู่ในรูป PbOH^+ จะถูกแยกได้มากกว่า

5. ไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าโพรงของซีโอไลต์จะสามารถเข้าไปในโพรงและถูกดูดซับได้ แต่ถ้าไอออนมีขนาดใหญ่ไปอาจหลุดออกมาได้ง่าย จะเห็นได้ว่าขนาดของไอออนควรเหมาะสมกับโครงสร้างของซีโอไลต์จึงจะถูกดูดซับได้ดี

6. คุณสมบัติในการตกตะกอนของโลหะแต่ละชนิด ถ้าสามารถตกตะกอนได้มากที่สภาวะหนึ่ง จะทำให้โลหะนั้นถูกแยกออกได้ด้วยการกรองได้มาก แต่ไม่ได้หมายความว่าโลหะชนิดนั้นถูกดูดซับโดยซีโอไลต์ได้มาก

ประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักของซีโอไลต์ อาจแตกต่าง หรือ คล้ายคลึงกัน เนื่องจากปัจจัยที่กล่าวมา หรือ ปัจจัยอื่น หรือ น้ำหนักจากปัจจัยต่าง ๆ ไม่เท่ากัน หรือ เกิดจากปัจจัยอื่น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโลหะหนักแต่ละชนิดซึ่งเป็นเรื่องที่ควรศึกษาต่อไป

ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรศึกษาถึง สเปคส์ ไอออน ของโลหะหนักในสภาวะต่าง ๆ เพื่อจะทราบถึงกลไกในการแยกของโลหะหนักออกจากสารละลาย
- 2) ควรศึกษาประสิทธิภาพในการแยกโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ออกจากสารละลาย
- 3) ควรศึกษาการใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์ในด้านอื่น เช่น การใช้ซีโอไลต์ผสมในดิน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการอุ้มน้ำของดิน การใช้ซีโอไลต์ เป็นวัสดุดูดซับกลิ่นแทนวัสดุมีพิษ เช่น 1,4 dichlorobenzene เป็นต้น
- 4) ควรศึกษากระบวนการต่าง ๆ ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลายเพิ่มเติม เช่น กระบวนการกรองสารละลาย เป็นต้น
- 5) ประสิทธิภาพของซีโอไลต์ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลายอาจแตกต่างไปจากงานวิจัยนี้ เมื่อเปลี่ยนแปลงวิธีการทดลอง หรือ การควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ไม่เหมือนกัน

เอกสารอ้างอิง

1. Power, T. "Water Treatment-Clarifying the Market for Minerals" Ind. Miner. 215 (1985):35-52.
2. Kerr, G.T. "Synthetic Zeolites" Sci. Amer. 12(1989):82-87
3. Way, J.T. "Power of Soils to Absorb Manure" J.R. Agric. Soc. 11 (1850):313-379.
4. Weigel, O. and E, Steinhoff., "Adsorption of Organic Liquid Vapors by Chabazite" Z. Kristallogr. 61(1925):125-154.
5. Break, D.W. in Synthetic Zeolites, Properties and Applications. p.32. AIME preprint 73 H36, England, 1973.
6. Barrer, R.M. in Zeolites and Clay Minerals as Sorbents and Molecular Sieves. p. 499. Academic Press, England, 1978.
7. Break, D.W. in Zeolites Molecular Sieves. p.759. Academic Press, Wiley, England, 1974.
8. Bruno, W. Surface Chemistry. in Surfactants and Detergents. p.255., Chulalongkorn University, Bangkok, 1978.
9. Fitton, R.C. and Flore, B.A. "Preparation of Improved Zeolites" U.S. Pat. 4075280, Feb. 21, 1978.
10. Higgins T.D. and Sater V.E., Combined of removal chromium, cadmium and nickel from wastes. Env. Progress, 3, 12-25(1984).
11. Groffman A., Peterson S. and Brookins D., Removing Lead from Wastewater Using Zeolite. Water Environment & Technology, pp. 54-59 (May, 1992).
12. Mavros P., Zouboulis A.I. and Lazaridis N.K., Removal of metal ions from wastewaters. The case of nickel. Environmental Technology, Vol 14, pp. 83-91(1993).

ภาคผนวก

Structure Group:	3
Reference:	102, 103, 105-112, 115, 172
Chemical Composition	
Typical Oxide Formula:	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 4.5 \text{H}_2\text{O}$
Typical Unit Cell Contents:	$\text{Na}_{12} [(\text{AlO}_2)_{12} (\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 27 \text{H}_2\text{O}$, pseudo cell and 8X for true cell
Variations:	Si/Al = ~0.7 to 1.2; occlusion of NaAlO_2 in β -cages
Crystallographic Data	
Symmetry:	Cubic
Space Group:	$\text{Pm}\bar{3}\text{m}$ ($\text{Fm}\bar{3}\text{c}$ for true cell)
Unit Cell Constants:	$a = 12.32 \text{ \AA}$, pseudo cell $a = 24.64 \text{ \AA}$ for true cell
Density:	1.99 g/cc
Unit Cell Volume:	1870 \AA^3 pseudo cell
X-Ray Powder Data:	Table 4.26
Structural Properties	
Framework:	Stereo 2.16
SBU:	D4R
Cage type:	α, β (one each)
Channel System:	Fig. 2.28a
	Three-dimensional, to [100]; 4.2 \AA and to [111]; 2.2 \AA minimum diameter
Hydrated—	
Free Apertures:	2.2 \AA into β -cage and 4.2 \AA into α -cage
Cation Locations:	8 S_I on 6-rings, 4 cations with H_2O in the 8-rings
Dehydrated—	
Free Apertures:	4.2 \AA
Cation Locations:	8 S_I in 6-rings, 3 S_{II} in 8-rings, 1 S_{III} at the 4-ring
Effect of Dehydration:	None on framework, 4 cations move to S_{II}
Location of H_2O Molecules:	Dodecahedral arrangement in α -cage 4 molecules in β -cage.
Largest Molecule Adsorbed:	C_2H_4 at RT, O_2 at -183°C
Magnetic Diameter, σ , \AA :	3.9 and 3.6

(จาก Breck , 1974 , Table 2.18)

ตาราง แสดงสเปกตรัมอินฟราเรดของซีโอไลต์สังเคราะห์

Zeolite	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	Asymmetric Stretch			Symmetric Stretch			cm^{-1} Double Rings		T-O Bend		Pore Opening	
A	1.88	1090	1050	995			660	550		464		378	260
		vwsh	vwsh	s			vw	ms		m		ms	vwb
Ca ^{ex} A	1.9	1130	1055	998	742	705	665	542		460		376	
		vwsh	vwsh	s	vwsh	vwsh	vw	ms		m		m	
N-A	3.58	1131		1030	750		675	572		474		385	
		vwsh		s	vwsh		vw	ms		m		m	
N-A	6.01	1151		1044	750		698	581		475		393	
		vwsh		s	vwsh		vw	ms		m		m	
X	2.40		1060	971	746	690	668	560		458		406	365
			msh	s	m	wsh	m	m		ms		w	m
Y	3.42	1135		985	760		686	564		508	460		372
		msh		s	m		m	m		vwsh	ms		m
Y	4.87	1130		1005	784		714	635	572	500	455		380
		msh		s	m		m	vw	m	wsh	ms		m
La ^{ex} Y	5.0	1135		1006	790		705		565	500	450		382
		msh		s	m		m		m	wsh	ms		m
Y	5.63	1130		1017	789		718	645	575	504	456		383
		msh		s	m		m	vw	m	mwsh	ms		m
B (P)	2.8	1105		995-	772	738	670	600				435	380
		mwsh		1000s	mwsh	mw	mw	m				ms	ms
Hydroxy-sodalite (HS)	2.0	1096		986	729	701	660			461	432		382
		vwsh		s	m	mw	m			ms	ms		vwb
Ω	7.7	1130		1024	805		722	610		451			372
		wsh		s	mw		mw	mw		ms			m
ZK-S	6.0	1158		1048	890		730	572		445		408	
		wsh		s	vwb		mw	m		m		wsh	
R	3.25	1136		1007	738	678		625	508	452	426		370
		mwsh		s	w	w		m	mw	m	m		vwsh
G	5.44	1138		1027	720	696		632	515	460	408		378
		mwsh		s	w	wsh		m	m	m	m		vwsh
D	4.62	1184		1018	755	711		631	513	459	415		376
		mwsh		s	wsh	w		m	m	m	m		vwsh
S	2.5	1140		1020	770	722	690	623	sh	518	448	424	370
		wsh		s	vwsh	mw	vwsh	595	mb	mb	m	ms	vwsh
T	7.0	1156	1059	1010	771	718		623	575	467	433	410	366
		wsh	s	s	w	w		mw	w	ms	ms	vwsh	wsh
Hydroxy-cancrinite (HC)	2.0	1095	1035	1000	965	755	680	624	567	498	458	429	390
		mw	msh	s	msh	w	m	m	m	mw	ms	ms	mw
L	6.0	1160	1080	1015	767	721		642	606	580	474	435	375
		wsh	s	s	mw	mw		vwsh	m	wsh	ms	wsh	vwsh
C (Analcime-type)	4.0	1162	1012	952	740	686		615		442	410		
		vwsh	s	s	m	wb		vw		ms	ms		
Zeolon	9.95	1216	1180	1046	795,	715,		621	571,	448			370
		w	vwsh	s	772	690		w	555	ms			vwsh
					wb	wb		w	w				
W	3.6	1128		1006	786	691		637	590	512	483	432	375
		msh		s	756	mw	mb	mw	wb	vwsh	vwsh	ms	vwsh
							mw						

s = strong; ms = medium strong; m = medium; mw = medium weak; w = weak; vw = very weak; sh = shoulder; b = broad.

(จาก Breck , 1974 , Table 5.5)