

การสังเคราะห์ไอไลต์ Na-X จากดินขาวธรรมชาติ

นางสาวมนธวีล บุญส่งประเสริฐ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF Na-X ZEOLITE FROM NATURAL KAOLIN



Miss Montawan Boonsongprasert

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

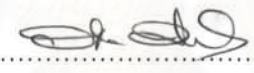
Copyright of Chulalongkorn University

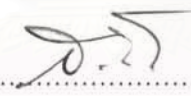
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวธรรมชาติ
โดย นางสาวมนธวัล บุญส่งประเสริฐ
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

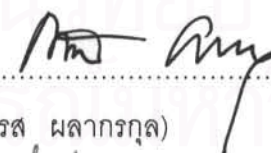

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

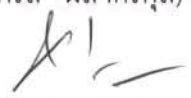
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.กนกกรส ผลากรกุล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

มนธวัล บุญส่งประเสริฐ : การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวธรรมชาติ. (SYNTHESIS OF Na-X ZEOLITE FROM NATURAL KAOLIN) อ. ที่ปรึกษา : ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ,
อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย 106 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวธรรมชาติด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยใช้ดินขาวจากจังหวัดเพชรบูรณ์ที่มีองค์ประกอบเป็นอะลูมิเนียมซิลิเกต (อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 6.20) ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X เริ่มจากการปรับปรุงคุณภาพเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในดินขาว ซึ่งประกอบด้วยการบด การเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และการรีฟลักซ์กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร จากนั้นนำดินขาวทำปฏิกิริยากับเบสและเข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ตัวแปรที่ศึกษา คือ อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล และเวลาในการเกิดผลึก ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์คือ อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0 และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 12 ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดผลึกเท่ากับ 48 ชั่วโมง สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ได้ร้อยละ 88.4 และทดสอบการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซนที่เป็นตัวทำละลายใช้แล้วจากกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โดยใช้ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวดูดซับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต..... มนธวัล บุญส่งประเสริฐ
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4972438023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: KAOLIN / Na-X ZEOLITE / HYDROTHERMAL SYNTHESIS

MONTAWAN BOONSONGPRASERT : SYNTHESIS OF Na-X ZEOLITE FROM NATURAL KAOLIN. THESIS ADVISOR : PROF. SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D., THESIS COADVISOR : CHAWALIT NGAMCHARUSSRIVICHAI, Ph.D., 106 pp.

This research investigated the hydrothermal synthesis of Na-X zeolite by using natural kaolin, that mainly consists of alumina and silica as starting material. Prior to the synthesis of Na-X zeolite, natural kaolin was pretreated to remove the organic and inorganic matters. The pretreatment consisted of mill and sieving natural kaolin to the size of 44 micron, followed by calcination at 700°C for 3 h and refluxing with 1 M of HCl solution. The effects of different synthesis parameters, including the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio, $\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio, hydrothermal temperature, and crystallization time, have been studied. The optimum conditions to synthesize Na-X zeolite with high crystallinity from the pretreated kaolin were the $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio of 3, $\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio of 12, and hydrothermal temperature of 90 °C for 48 hr, giving the maximum yield of 88.4%. The synthesized Na-X was used as an adsorbent in the adsorption of chloride from spent hexane in batch system.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Technology.....Student's signature.....*Montawan B.*
Field of study....Chemical Technology....Advisor's signature.....*S.D.H.*
Academic year.....2008..... Co-advisor's signature.....*Chawalit Ngamcharussrivichai*

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณา
ให้คำปรึกษาแนะนำการทำวิจัย รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ
และให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดียิ่ง

ขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการ
สอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ และ ดร.กนกกรส ผลากรกุล ที่ได้กรุณา
รับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้
สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนวัสดุ
อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณบุคลากรภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้
ห้องปฏิบัติการและให้คำแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่
ช่วยเหลือตั้งแต่เริ่มดำเนินการวิจัยและเป็นกำลังใจให้จนกระทั่งทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา
ให้ความช่วยเหลือ และให้การสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 วารสารปริทัศน์.....	4
2.1 ซีไอไลต์	4
2.1.1 ประวัติซีไอไลต์.....	4
2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีไอไลต์.....	6
2.1.3 การสังเคราะห์ซีไอไลต์.....	18
2.1.4 สมบัติที่สำคัญของและประโยชน์ซีไอไลต์.....	23
2.1.5 การประยุกต์ใช้ซีไอไลต์ในปัจจุบัน.....	24
2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดินขาว.....	26
2.2.1 การจำแนกดินขาวและแหล่งดินขาวในประเทศ.....	27
2.2.2 สมบัติทางกายและทางเคมีของดินขาว.....	31
2.2.3 ประโยชน์ของดินขาว.....	31
2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการดูดซับ.....	33
2.3.1 กลไกการดูดซับ.....	33
2.3.2 จลนศาสตร์ของการดูดซับ.....	34
2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	35

2.3.4	ประเภทของสารดูดซับ.....	36
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
3	เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1.	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	40
3.2.	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	43
3.3.	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	45
3.4	การดำเนินการวิจัย.....	46
3.5	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	47
3.5.1	การวิเคราะห์สมบัติของดินขาว.....	47
3.5.2	การปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของดินขาว.....	47
3.5.3	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X.....	48
3.5.4	การดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซน.....	49
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	50
4.1	การวิเคราะห์สมบัติของดินขาว.....	50
4.1.1	การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในดินขาวธรรมชาติด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence: XRF).....	50
4.1.2	การวิเคราะห์สมบัติของดินขาวธรรมชาติด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD).....	51
4.1.3	การวิเคราะห์สมบัติของดินขาวธรรมชาติด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (scanning electron microscope : SEM).....	53
4.2	การปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของดินขาว.....	54
4.2.1	การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพและทางความร้อนของดินขาว (physical and thermal treatment).....	54
4.2.2	การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี (chemical treatment).....	55
4.2.3	การสลายควอตซ์ (breaking quartz).....	56
4.3	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X	61
4.3.1	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X.....	61
4.3.2	ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X.....	66

4.3.3	ผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X.....	67
4.3.4	ผลของอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X.....	
4.4	ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	69
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	73
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	75
	รายการอ้างอิง.....	76
	ภาคผนวก.....	79
	ภาคผนวก ก สูตรการคำนวณ.....	80
	ภาคผนวก ข สมบัติของสารเคมี.....	81
	ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในไฮโดรคาร์บอน.....	86
	ภาคผนวก ง รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน.....	89
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	106

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	ขนาดของช่องเปิดของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ.....	10
2.2	ซีโอไลต์ต่างๆ แบ่งตามลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของวงแหวน	12
2.3	ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่สามารถสังเคราะห์ได้	20
3.1	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ และค่าที่กำหนด.....	48
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวธรรมชาติ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	51
4.2	องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	55
4.3	องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความสารเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก).....	56
4.4	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นที่ภาวะในการสังเคราะห์ต่างๆ	69

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 โครงสร้างทรงสี่หน้าของซิลิกอน $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และอะลูมิเนียม $[\text{AlO}_4]^{5-}$ และการเชื่อมต่อกันในผลึกซีโอไลต์.....	6
2.2 รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ).....	7
2.3 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์.....	8
2.4 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์.....	8
2.5 การเกิดโครงสร้างของผลึกแบบต่างๆ.....	9
2.6 โครงสร้างสามมิติของซีโอไลต์ Linde Type A (LTA) ซีโอไลต์ Faujasite (FAU) และซีโอไลต์ ZSM-5 (MFI).....	11
2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5.....	11
2.8 ขนาดและลักษณะทางเรขาคณิตของช่องเปิดสำหรับซีโอไลต์.....	12
2.9 โครงสร้างของ Analcite Group.....	14
2.10 โครงสร้างของ Natrolite Group.....	14
2.11 โครงสร้างของ Chabazite Group.....	14
2.12 โครงสร้างของ Phillipsite Group.....	15
2.13 โครงสร้างของ Heulandite Group.....	15
2.14 โครงสร้างของ Mordenite Group.....	15
2.15 โครงสร้างของ Faujasite Group.....	17
2.16 โครงสร้างของ Melanophlogite Group.....	17
2.17 โครงสร้างของ Lovdarite Group.....	17
2.18 การเกิดซีโอไลต์จากอนุภาคของเจล.....	22
2.19 ประจุลบที่เกิดจากการแทนที่ด้วย $(\text{AlO}_2)^-$ ในโครงสร้างของซีโอไลต์.....	23
2.20 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต.....	29
2.21 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต.....	29
2.22 ขั้นตอนของการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน.....	34
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	39
3.2 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล.....	41

3.3	ตู้อบแบบแกว่งได้.....	41
3.4	ตู้อบ (Hot Air Oven).....	42
3.5	เตาเผาไฟฟ้า (muffle furnace).....	42
3.6	ตะแกรงร่อน 325 mesh.....	42
3.7	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD).....	43
3.8	เครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer Emmerett-Teller adsorption : BET).....	44
3.9	เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (scanning electron microscope : SEM).....	45
3.10	ชุดการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซนแบบแบตช์.....	49
4.1	ดินขาวธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X.....	50
4.2	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพีคของดินขาวธรรมชาติ.....	52
4.3	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพีคของอัลฟาควอตซ์.....	52
4.4	ภาพถ่าย SEM ของดินขาวธรรมชาติ กำลังขยาย 2,000 เท่า.....	53
4.5	ดินขาวธรรมชาติก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน.....	54
4.6	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาดต่างกัน.....	57
4.7	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านและไม่ผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	58
4.8	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X, Hydrated.....	59
4.9	รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ไม่มีการกำจัดเหล็ก และดินขาวที่ผ่านการกำจัดเหล็ก.....	59
4.10	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ.....	62
4.11	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ.....	62
4.12	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่ ณ เวลาต่างๆที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส.....	63
4.13	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่ ณ เวลาต่างๆที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส.....	64

4.14	ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่เวลาต่างๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	65
4.15	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่างๆ กัน.....	66
4.16	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนซิลิกาต่อ อะลูมินาต่างๆ กัน.....	67
4.17	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาต่างๆ กัน.....	68
4.18	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาต่างๆ กัน.....	68
4.19	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรม.....	71
4.20	ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่ภาวะดีที่สุดที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	72
ง1	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของดินขาวธรรมชาติ.....	89
ง2	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 200 mesh ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8.....	89
ง3	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 200 mesh และผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8.....	90
ง4	รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8.....	90

- ง34 รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 12..... 105



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นผลึกของสารอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) โครงสร้างของซีโอไลต์เป็นผลึกที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีความพรุนสม่ำเสมอตลอดทั้งโครงสร้าง ประโยชน์ของซีโอไลต์มี 3 ด้านหลัก คือ ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และเป็นตัวดูดซับ การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในอุตสาหกรรมปัจจุบันที่สำคัญคือขนาดของโพรงซีโอไลต์ และสมบัติทางเคมีของอะตอมที่ล้อมรอบ เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างอันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล ซีโอไลต์จึงถูกใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (separation) และเนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์เกาะกันอยู่อย่างหลวมๆ จึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ นอกจากนั้นซีโอไลต์ยังถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีโดยเฉพาะในการทำไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่แตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง (hydrocarbon cracking)

ซีโอไลต์ได้ถูกใช้เป็นตัวดูดซับในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี เนื่องจากในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีจำนวนมากได้มีการใช้สารอินทรีย์เป็นตัวทำละลาย เมื่อตัวทำละลายอินทรีย์ผ่านกระบวนการก็ทำให้ความบริสุทธิ์ลดน้อยลง การนำตัวทำละลายกลับไปใช้ใหม่ทำได้โดยการกำจัดสิ่งเจือปนซึ่งนิยมใช้วิธีการดูดซับ (adsorption) ซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับส่วนใหญ่ที่ใช้เป็นวัสดุที่มีราคาแพง และประเทศไทยยังต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก และเนื่องจากการใช้งานในอุตสาหกรรมของซีโอไลต์ขึ้นอยู่กับขนาดของโพรง ดังนั้นซีโอไลต์ Na-X จึงเป็นซีโอไลต์ที่มีขนาดของโพรงเหมาะสมในการดูดซับคลอไรด์ออกจากตัวทำละลายอินทรีย์

ดินขาว (kaolin) เป็นดินที่เกิดจากแร่อะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicates) เป็นวัตถุดิบชนิดหนึ่งที่ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางเชิงพาณิชย์และทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งพบได้ทั่วไปในประเทศไทย ดินขาวที่พบในประเทศไทยมี 2 ชนิด ซึ่งจำแนกตามความแตกต่างขององค์ประกอบหลักทางเคมี เช่น สารประกอบของอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งเกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิตที่ผุพังโดยบรรยากาศ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ และสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเกิดจากการแปรสภาพของหินปูนที่ผุพังโดยบรรยากาศ และภาวะแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาว เนื่องจาก

องค์ประกอบส่วนใหญ่ของดินขาวเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์และมีมูลค่าสูงในอุตสาหกรรมเคมีงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จาก ดินขาวที่มีอยู่ในประเทศ และนำซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบในกระบวนการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซนที่ใช้เป็นตัวทำละลายในขั้นตอนการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล
2. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมล ของซิลิกาต่ออะลูมินา อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล และเวลาในการเกิดผลึก

1.3 ขอบเขตและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X
2. ปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยวิธีการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และกำจัดสิ่งเจือปน (Fe_2O_3) โดยการรีฟลักซ์ (reflux) ด้วยสารเคมี ตัวแปรที่ศึกษา คือ
 - ชนิดของสารเคมี
 - กรด ได้แก่ HCl และ H_2SO_4
 - เบส ได้แก่ NaOH
 - เบสร่วมกับกรด ได้แก่ NaOH ร่วมกับ HCl และ NaOH ร่วมกับ H_2SO_4
 - ความเข้มข้นของสารเคมี
 - ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
 - ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร
3. วิเคราะห์องค์ประกอบของดินขาว ภายหลังจากปรับปรุงคุณภาพ และภายหลังจากกำจัดสิ่งเจือปน ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)

4. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือ
 - อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา
 - อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา
 - อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล
 - เวลาในการเกิดผลึก
5. วิเคราะห์สมบัติของสารที่สังเคราะห์ได้
 - องค์ประกอบของธาตุ ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
 - โครงสร้างของสาร ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction Spectrometer (XRD)
 - พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเทคนิค N_2 adsorption/desorption
 - ลักษณะพื้นผิวและรูปร่างผลึก ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM)
6. ทดสอบซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ในกระบวนการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซนและวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในเฮกเซนด้วยวิธี UOP 588-94
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X
2. เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับดินขาวซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่ทั่วไปในประเทศ

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 ซีโอไลต์ (จตุพร และนุรักษ์, 2547; Szostak, 1998)

ซีโอไลต์ มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก zein แปลว่า to boil และ lithos แปลว่า stone รวมความหมายก็คือ boiling stone หรือ หินเดือด เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์ธรรมชาติแล้วสามารถเห็นการระเหยของน้ำได้ชัดเจน ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นผลึกของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ของโลหะแอลคาไลน์ (Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+) โลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (Mg^+ , Ca^{2+}) หรือไอออนบวกอื่นๆ เช่น NH_4^+ , H_3O^+ , H^+ , TMA^+ (tetramethylammonium ion) เป็นต้น โครงสร้างมีลักษณะเป็นรูพรุนสม่ำเสมอจำนวนมาก ซีโอไลต์สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย ขึ้นกับโครงสร้างรูพรุนและสมบัติของซีโอไลต์แต่ละประเภท เช่น ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และเป็นตัวดูดซับ (adsorbent)

2.1.1 ประวัติซีโอไลต์

ซีโอไลต์ถูกพบครั้งแรกโดย Cronstedt ในปี ค.ศ. 1756 ซึ่งเป็นซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด Stilbite ต่อมาในปี ค.ศ. 1777 Fontana ได้อธิบายปรากฏการณ์การดูดซับของถ่านชาร์ ในปี ค.ศ. 1840 A. Damour ได้ค้นพบว่าน้ำที่อยู่ในโครงผลึกของซีโอไลต์ จะถูกกำจัดไปด้วยการดีไฮเดรชัน (dehydration) แล้วจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (spongy-framework) ซึ่งสามารถดูดซับแอลกอฮอล์ เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดออกไซด์ และปรอทได้ ในปี ค.ศ. 1845 H.S. Thompson ได้ทดลองพบว่า ดินสามารถ ดูดซับเกลือแอมโมเนียได้ เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียบนดินและกรอง จะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียถูกดินดูดซับไว้ ต่อมา Way ได้แสดงให้เห็นว่าการดูดซับที่เกิดขึ้น เกิดจากสารประกอบซิลิเกตไฮเดรตในดิน

ในปี ค.ศ. 1862 Claire Deville ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Levynite โดยให้ความร้อนแก่สารละลายผสมของโพแทสเซียมซิลิเกตกับโซเดียมอะลูมิเนตที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และในปี ค.ศ. 1882 Schulten สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Analcime ได้ ในปี ค.ศ. 1909 Grandjean ได้ทดลองการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิด Chabazite พบว่าซีโอไลต์ชนิดนี้สามารถ

ดูดซับแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ไอโอดีน โบรมีน และไฮโดรฟลูออโรอิก ในปี ค.ศ. 1925 Weigel และ Steinhof ค้นพบว่าซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกดูดซับสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก และปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ออกมา ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดย McBain ในปี ค.ศ. 1932 และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Molecular sieving หรือตะแกรงร่อนโมเลกุล (Szostak, 1998)

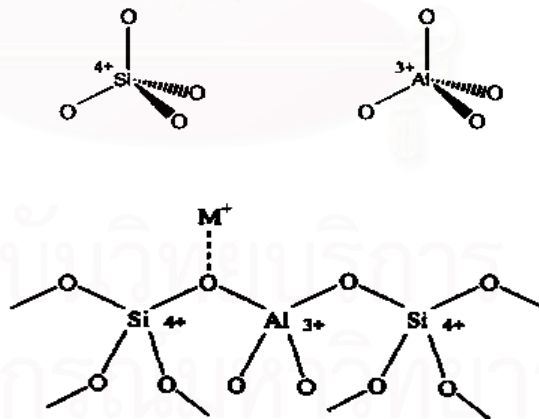
ปี ค.ศ. 1930 ได้มีการอธิบายโครงสร้าง และสมบัติของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ และตะแกรงร่อนโมเลกุล และในปีเดียวกันนี้ R. Barrer และ J. Sameshima ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นเป็นครั้งแรก และในปี ค.ศ. 1933 Dent Smith ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ Chabazite ในปี ค.ศ. 1940 Milton ได้เริ่มทำการศึกษาค้นคว้าสังเคราะห์ซีโอไลต์เพื่อใช้ในกระบวนการแยกแก๊สและการทำอากาศให้บริสุทธิ์ และในปี ค.ศ. 1954 Union Carbide Corporation สามารถสังเคราะห์ ซีโอไลต์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรก โดยใช้ในกระบวนการแยกและการทำสารให้บริสุทธิ์ ต่อมา Reed และ Breck ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์สำหรับใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นครั้งแรก ต่อมาในปี ค.ศ. 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมของ Faujasite ซึ่งเกิดจากธรรมชาติ และซีโอไลต์ A ที่สังเคราะห์ขึ้น และในปี ค.ศ. 1962 บริษัท Mobil Oil ได้มีการนำซีโอไลต์ A ที่สังเคราะห์ขึ้นไปใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

หลังจากนั้นการพัฒนาซีโอไลต์เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว ในปีค.ศ. 1980 มีการค้นพบซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติกว่า 40 ชนิด และซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์กว่า 100 ชนิด ซีโอไลต์ที่พบตามธรรมชาติ (natural or mineral zeolite) อาจอยู่ในรูปของแร่ธาตุส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ในพื้นที่หลายแห่งของโลก เป็นกลุ่มผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของโลหะแอลคาไลน์ ตัวอย่างเช่นซีโอไลต์ชนิด Faujasite, Erionite, Chabazite และ Offertite เป็นต้น ซีโอไลต์ธรรมชาติเดิมนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง หลังจากได้ค้นพบว่าซีโอไลต์มีสมบัติของตะแกรงร่อนโมเลกุลและการแลกเปลี่ยนไอออน จึงได้นำซีโอไลต์มาใช้เป็นตัวดูดซับในการแยกแอมโมเนียในกระบวนการกำจัดน้ำเสีย สำหรับซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น (synthetic zeolite) ในช่วงแรกการสังเคราะห์ทำขึ้นภายใต้ความดัน และอุณหภูมิสูง ซึ่งส่งผลให้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้เป็นซีโอไลต์ชนิดเดียวกันกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมาในปีค.ศ. 1959 Milton และคณะทำงานของบริษัท Union Carbide Corporation ได้พัฒนาวิธีในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ต่ำ สารตั้งต้นในการสังเคราะห์มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูง ทำปฏิกิริยาในภาชนะปิด หรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการและเทคนิคนี้ได้มีการพัฒนาและขยายออกไปเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal Process) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิประมาณ 100-200 องศา

เซลเซียส และความดันสูง ตามระยะเวลาที่กำหนดภายใต้ปริมาณน้ำที่มีมากเกินไป อย่างไรก็ตาม ได้มีวิธีการใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยใช้อุณหภูมิต่ำตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงจุดเดือดของน้ำ ตัวอย่างเช่น ซีโอไลต์ A, X และ Y เป็นต้น ซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์สามารถนำไปใช้งานแพร่หลายในเชิงพาณิชย์มากกว่าซีโอไลต์ที่เกิดตามธรรมชาติเนื่องจากมีองค์ประกอบที่แน่นอน และมีความบริสุทธิ์สูงกว่า (Dyer A., 1988)

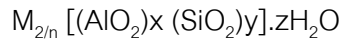
2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

โครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโครงร่าง 3 มิติ หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วย อะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงร่างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงร่างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลดังรูป 2.1 ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติ ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ 1×10^{-10} เมตร) (Szostak, 1998)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทรงสี่หน้าของซิลิกอน $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และอะลูมิเนียม $[\text{AlO}_4]^{5-}$ และการเชื่อมต่อกันในผลึกซีโอไลต์ (Szostak 1998)

นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก ซึ่งสามารถซึ่งสามารถกำจัดออกได้โดยให้ความร้อน ซีโอไลต์มีสูตรโมเลกุลทั่วไปดังนี้ (Szostak, 1998)



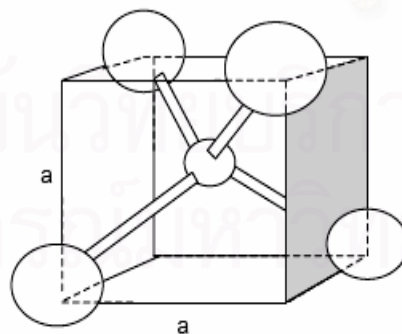
โดยที่ n จำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนของไอออนบวก (M)

x, y เป็นเลขจำนวนเต็ม (ค่า y/x มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งมักใช้เป็นดัชนีตัวหนึ่งสำหรับแบ่งชนิดของซีโอไลต์)

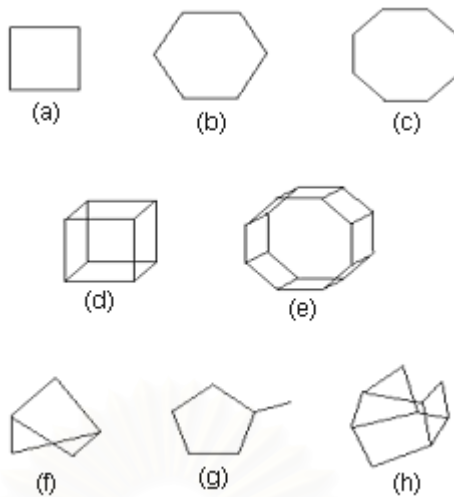
z เป็นจำนวนโมลของน้ำที่มีอยู่ในผลึกของซีโอไลต์

M เป็นโลหะหมู่ I หรือ II ซึ่งมีประจุบวกเท่ากับ n เพื่อดุลประจุลบ ณ ตำแหน่งของอะตอมอะลูมิเนียม

หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (primary units) ของซีโอไลต์คือ รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน (SiO_4) หรืออะลูมิเนียม (AlO_4) ดังรูป 2.2 และเมื่อหลายหน่วยของโครงสร้างปฐมภูมิจับตัวกันกลายเป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary building units) เกิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมต่างๆ เป็นวงเดี่ยว เช่น S4R, S6R หรือต่อเป็นวงคู่ เช่น D4R, D6R ดังรูป 2.3 ตำแหน่งมุมแทน Si หรือ Al เส้นตรงแทนอะตอมของออกซิเจน



รูปที่ 2.2 รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม ในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ) (เลิศ, 2545)

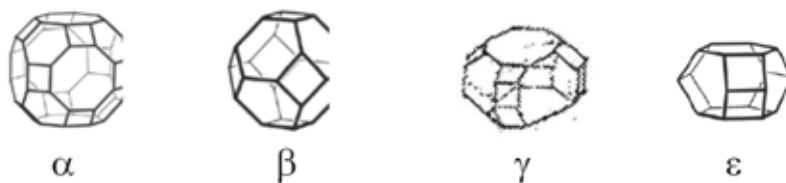


รูปที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างพหุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์

- (a) single four ring (S4R), (b) single six ring (S6R), (c) single eight ring (S8R),
 (d) double four ring (D4R), (e) double six ring (D6R), (f) complex 4-1,
 (g) complex 5-1 และ (h) complex 4-4-1 (Dyer A., 1988)

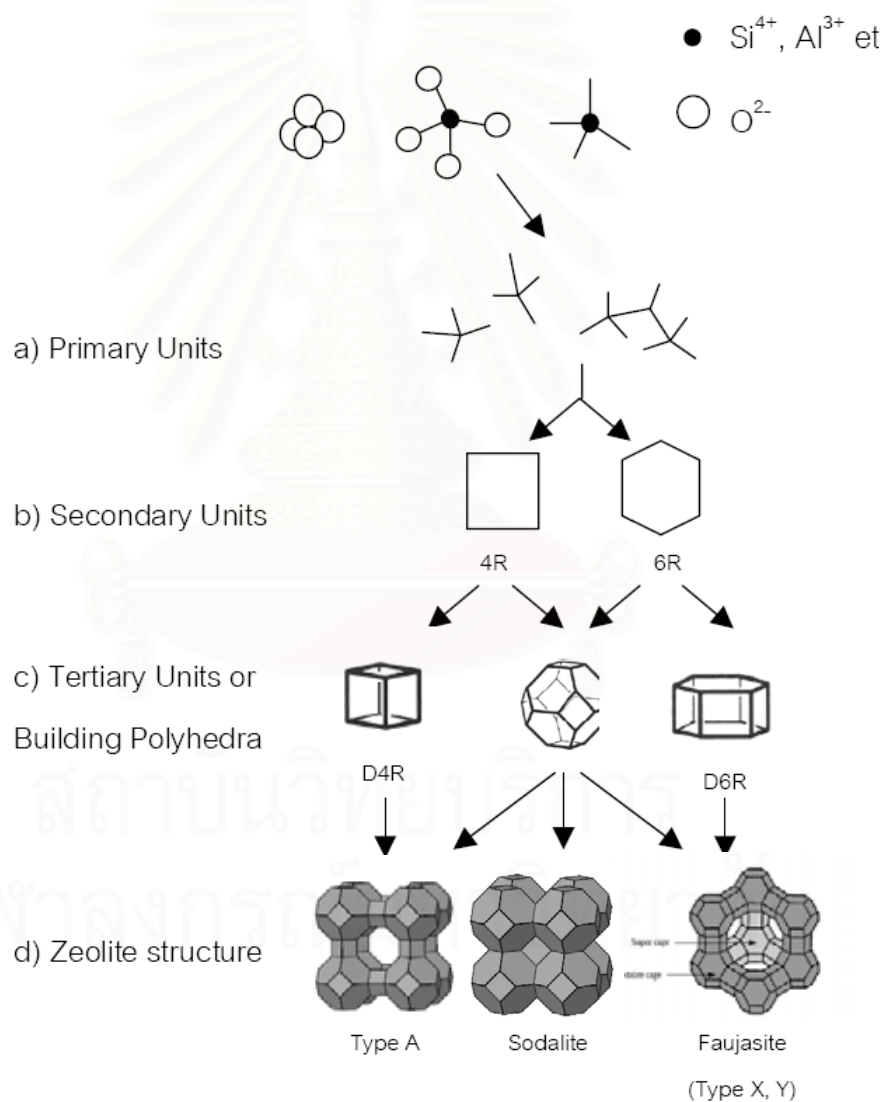
หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (polyhedral units) เป็นรูปทรงสมมาตรขนาดใหญ่ซึ่งเกิดขึ้นจากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นรูปทรงที่สลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นดังตัวอย่างในรูป 2.4

- ทรงเหลี่ยมยี่สิบหกหน้า หรือ α (truncated cuboctahedron)
- ทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ β (truncated octahedron type)
- ทรงเหลี่ยมสิบแปดหน้า หรือ γ (18-hedron)
- ทรงสิบเหลี่ยมเอ็ดหน้า หรือ ϵ (11-hedron)



รูปที่ 2.4 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์ (เลิศ, 2545)

เมื่อหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิทั้งแบบวงเดี่ยวและวงคู่ และหน่วยโครงสร้างรูป ทรงหลายหน้ามารวมกันจะเกิดเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์จะประกอบด้วยโพรง (cavity) หรือช่องว่างซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3-10 อังสตรอมดังรูป 2.5 ตัวอย่างโครงสร้างซีโอไลต์ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด Faujasite (FAU) ซึ่งเกิดจากทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ β cage ที่มีโพรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 อังสตรอม เชื่อมต่อกันด้วยปริซึมทรงหก octadecahedron เหลี่ยม (hexagonal prism) เป็นโครงสร้างทรงลูกบาศก์ (cubic structure) ทำให้เกิดโพรงขนาดใหญ่หรือซูเปอร์เคจ (super cage) (จตุพร และนุรักษ์, 2547)



รูปที่ 2.5 การเกิดโครงสร้างของผลึกแบบต่างๆ (Farrauto, 1997)

โครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยรูพรุนหรือช่องเปิดที่มีขนาดและรูปร่างที่แน่นอน ซึ่งประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนจัดเรียงเป็นวงแหวน ขนาดของวงแหวนแทนด้วยสัญลักษณ์ nOR เมื่อ n คือ จำนวนของอะตอมออกซิเจนซึ่งต่อกันเป็นวง และ OR คือ โครงสร้างของออกซิเจนที่ต่อกันเป็นวง ตัวอย่างเช่น 10OR คือวงแหวนที่ประกอบด้วยอะตอมออกซิเจนจำนวน 10 อะตอม และเนื่องจากขนาดอะตอมของออกซิเจนใหญ่กว่าอะตอมของซิลิกอนและ อะลูมิเนียม ดังนั้นผิวภายใน (internal surface) โพรงของซีโอไลต์จึงประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนเกือบทั้งหมด ขนาดของรูพรุนหรือช่องเปิดในซีโอไลต์ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1 แบ่งออกได้เป็น 3 ขนาด คือ (Szostak, 1998)

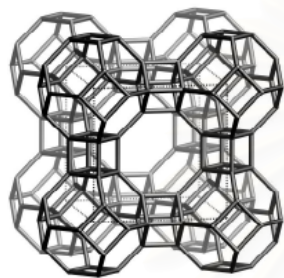
1. รูพรุนขนาดเล็ก (ขนาดรูพรุนน้อยกว่า 5 Å หรือ 8OR) เช่นซีโอไลต์ A (LTA) ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยโพรงสามมิติ (3-dimensional channel) เกิดจากการเชื่อมต่อกันของรูปทรงสี่หน้าของซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็นทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด (β or sodalite cage) ซึ่งจะเชื่อมต่อกันผ่าน D4R (double 4-rings) ดังรูปที่ 2.5

2. รูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุน 5-6 Å หรือ 10OR) เช่นซีโอไลต์ ZSM-5 (MFI) โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ประกอบด้วยช่องเปิดสองระบบเชื่อมต่อกัน ช่องเปิดระบบแรกมีลักษณะเป็น sinusoidal วางตัวในทิศ [001] มีขนาดเท่ากับ 5.4 x 5.6 อังสตรอมและช่องเปิดอีกระบบเป็นท่อตรงในทิศ [010] มีขนาดเท่ากับ 5.1 x 5.6 อังสตรอม โดยช่องเปิดทั้งสองระบบประกอบด้วยอะตอมออกซิเจน 10 อะตอม เชื่อมต่อเป็นวงรี (elliptical)

3. รูพรุนขนาดใหญ่ (ขนาดรูพรุน 7-8 Å หรือ 12OR) เช่นซีโอไลต์ Faujasite ชนิด X และ Y ช่องเปิดของซีโอไลต์กลุ่มนี้เป็นวงแหวนที่ประกอบด้วยออกซิเจนทั้งหมด 12 อะตอม โดยโครงสร้างเกิดการเชื่อมต่อกันของทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัดผ่าน D6R (double 6-ring) ทำให้เกิดโพรงขนาดใหญ่ (supercage) หรือ α cage ที่มีออกซิเจนล้อมรอบ 12 อะตอม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงเท่ากับ 13 อังสตรอม

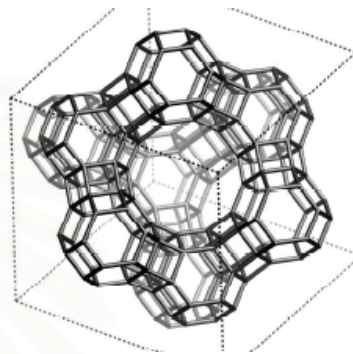
ตารางที่ 2.1 ขนาดของช่องเปิดของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ (Szostak, 1998)

Zeolite	Number of Rings	Pore diameter (Å)	Pore/Chennal structure
Zeolite A	8-membered oxygen ring	4.1	Intersection
ZSM-48	10-membered oxygen ring	5.3 x 5.6	Intersection
ZSM-5	10-membered oxygen ring	5.3 x 5.6 5.1 x 5.5	Intersection
Zeolite Y	12-membered oxygen ring	7.4	One dimensional
AlPO ₄ -5	12-membered oxygen ring	7.3	Intersection



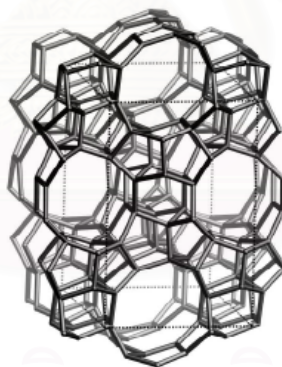
LTA

framework viewed along [001]



FAU

framework viewed along [111]

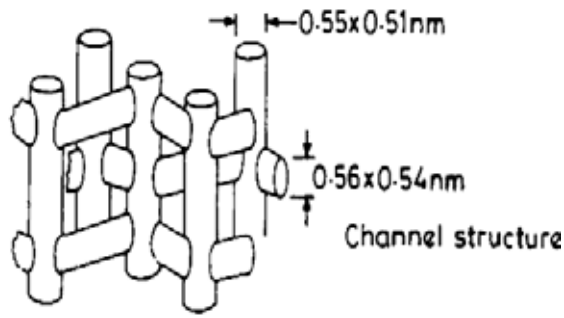


MFI

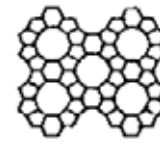
framework viewed along [010]

รูปที่ 2.6 โครงสร้างสามมิติของซีโอไลต์ Linde Type A (LTA)

ซีโอไลต์ Faujasite (FAU) และซีโอไลต์ ZSM-5 (MFI) (Baerlocher Ch., 2001)

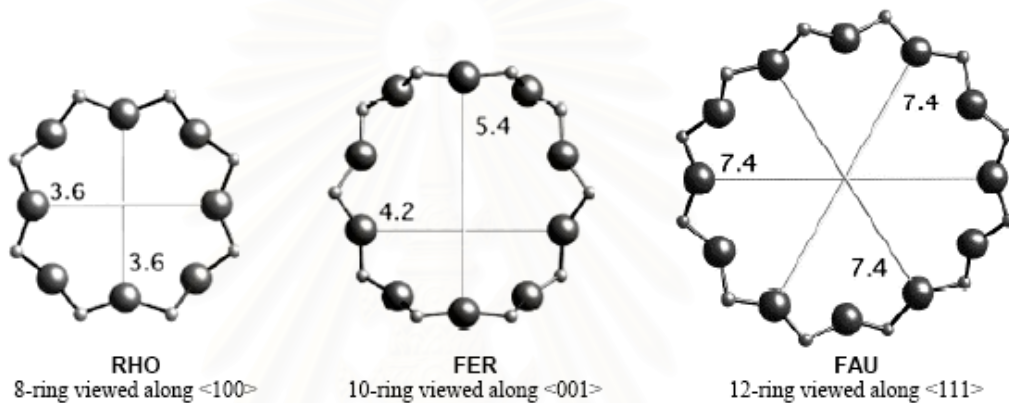


side view of channel structure



top view of channels

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (Bhatia, 1990)



รูปที่ 2.8 ขนาดและลักษณะทางเรขาคณิตของช่องเปิดสำหรับซีโอไลต์ (R.M. Barrer, 1986)

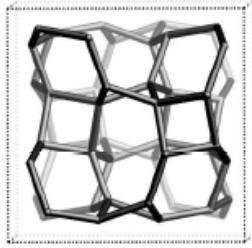
ตารางที่ 2.2 ซีโอไลต์ต่างๆ แบ่งตามลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของวงแหวน (Szostak, 1998)

12-membered ring	10-membered ring	8-membered ring
Faujasite (Type X, Y)	ZSM-5 (Silicate)	Type A, ZK-5
Mordenite	ZSM-11	Bikitate
Cancrinite	Dachiardite	Brewsterite
Gmelinite	Epistilbite	Chabazite
Type L	Ferrierite	TMA-E (AB)
Mazzite	Laumontite	Edingtonite
Offretite	Stilbite	Erionite
Omega	ZSM-23	Gismondine
ZSM-12	Theta-1 (ZSM-22)	Heulandite
		Paulingite
		Rho
		Thomsonite
		Yugawaralite

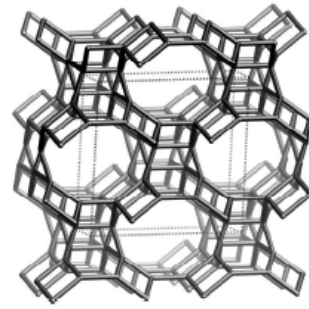
นอกจากนี้หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมต่อกันดังนี้ (Breck, 1974)

ประเภทของซีโอไลต์ที่แบ่งตามลักษณะการเชื่อมต่อของหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์ ได้แก่

1. Analcite Group เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring โดยมี 2 รูปแบบ คือ Analcite และ Laumontite ดังรูปที่ 2.9
2. Natrolite Group มีลักษณะโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกันจะมี 3 รูปแบบ คือ Natrolite, Edingtonite และ Thosonite ดังรูปที่ 2.10
3. Chabazite Group โครงสร้างประกอบไปด้วย 6-ring ต่อขนานกัน ซึ่งมีการเชื่อมต่อกันหลายรูปแบบ เช่น Offretite และ Reionite ดังรูปที่ 2.11
4. Phillipsite Group โครงสร้างประกอบไปด้วย 4-ring ต่อขนานกัน ดังรูปที่ 2.12
5. Heulandite Group โครงสร้างเกิดจาก 5-ring 4 วงเชื่อมต่อกันกับ 4-ring 2 วง ซึ่งเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ดังรูปที่ 2.13
6. Mordenite Group โครงสร้างเกิดจาก 5-ring 4 วงเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม โครงสร้างใน Mordenite Group มีทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ mordenite, epistilbite, ferrierite, bikitaite, dachiardite, ZSM-5 และ ZSM-11 ดังรูปที่ 2.14
7. Faujasite Group ซีโอไลต์ในกลุ่มนี้แบ่งออกเป็น Sodalite และ ZK-5 ดังรูปที่ 2.15
8. Melanophlogite Group ในกลุ่มนี้ ประกอบไปด้วย ZSM-39 และ melanophlogite ซึ่งแต่ละหน่วยที่ประกอบเป็น ZSM-39 และ melanophlogite จะมีหลายรูปแบบ เช่น 12-hedron, 12-hedron, 12-hedron และ 12-hedron ดังรูปที่ 2.16
9. Lovdarite Group เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring และ 8-ring ดังรูปที่ 2.17

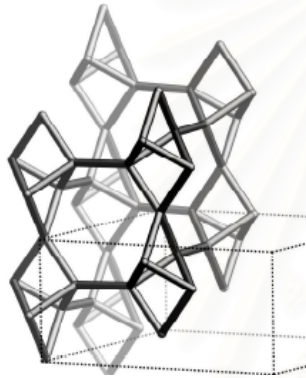


Analcite (ANA)
cubic, $Ia3d$

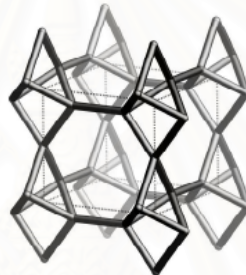


Laumontite (LAU)
monoclinic, $C2/m$

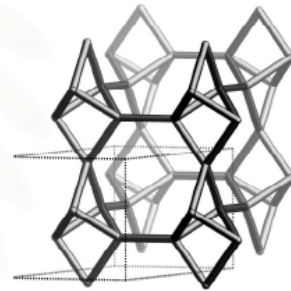
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ Analcite Group (Baerlocher Ch., 2001)



Natrolite
tetragonal, $I41/amd$

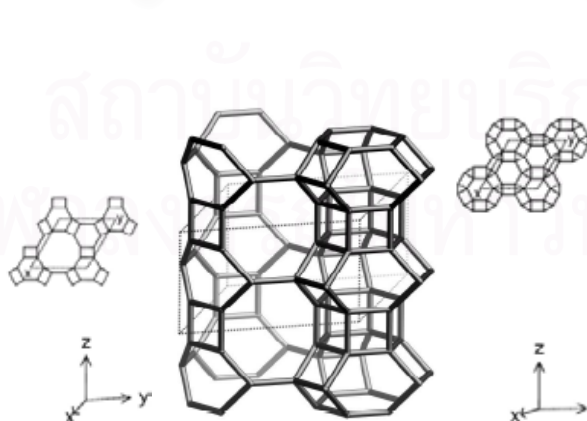


Edingtonite
orthorhombic, $P21212$

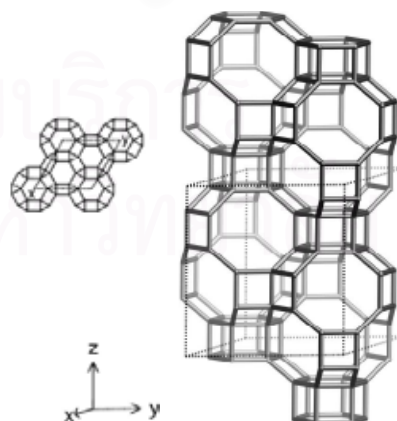


Thomsonite
orthorhombic, $Pnca$

รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ Natrolite Group (Baerlocher Ch., 2001)

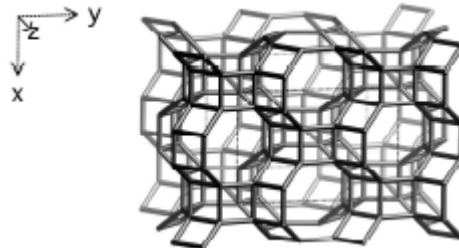


Offretite (OFF)
hexagonal, $P6m2$



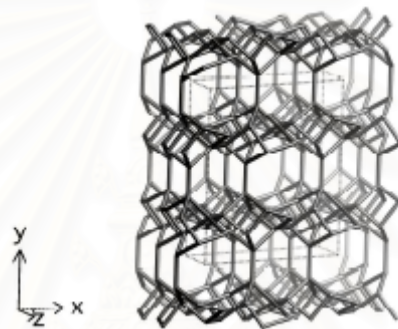
Chabazite (CHA)
trigonal, $R3m$

รูปที่ 2.11 โครงสร้างของ Chabazite Group (Baerlocher Ch., 2001)



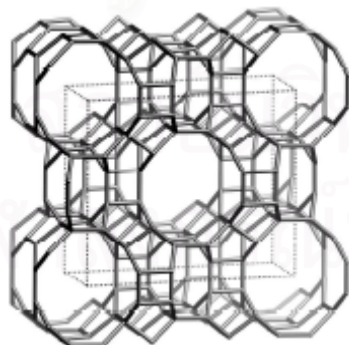
Phillipsite (PHI)
orthorhombic, $Cmcm$

รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ Phillipsite Group (Baerlocher Ch., 2001)

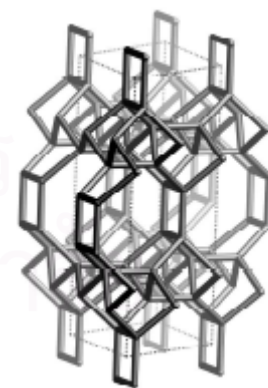


Heulandite (HEU)
monoclinic, $C2/m$

รูปที่ 2.13 โครงสร้างของ Heulandite Group (Baerlocher Ch., 2001)

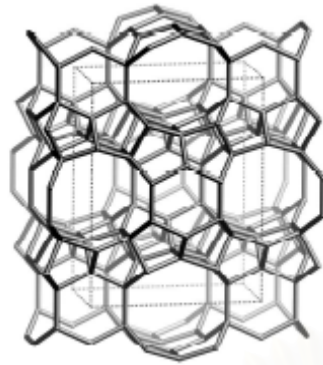
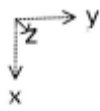


mordenite (MOR)
orthorhombic, $Cmcm$

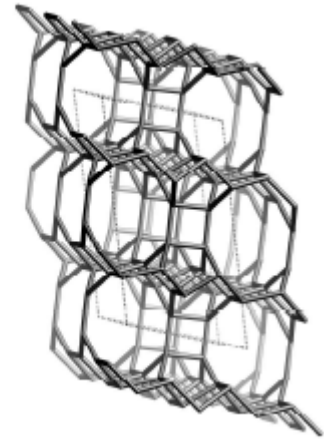
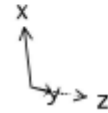


epistilbite (EPI)
monoclinic, $C2/m$

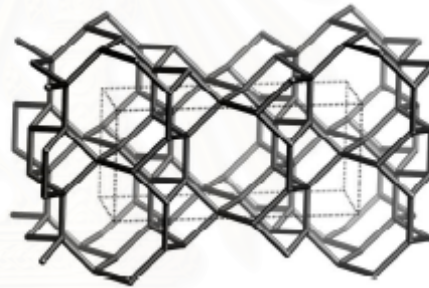
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ Mordenite Group (Baerlocher Ch., 2001)



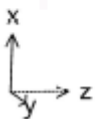
Ferrierite (FER)
orthorhombic, $Immm$



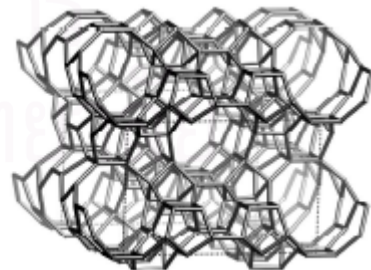
dachiardite (DAC)
monoclinic, $C12/m1$



bikitaite (BIK) **triclinic, P1**

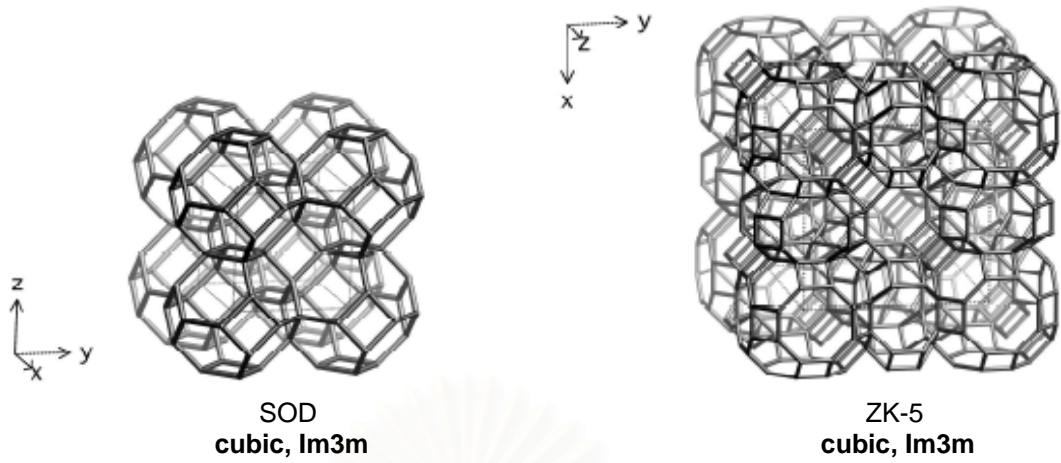


ZSM-5
orthorhombic, $Pnma$

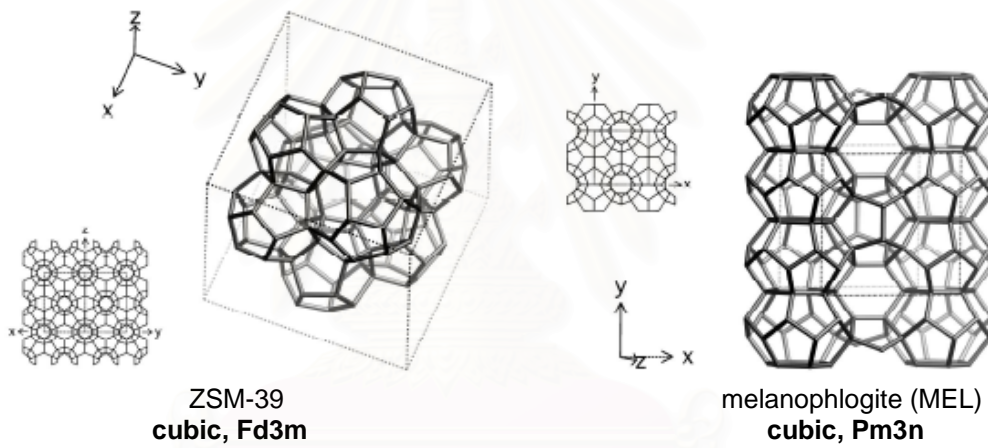


ZSM-11
tetragonal, $I4m2$

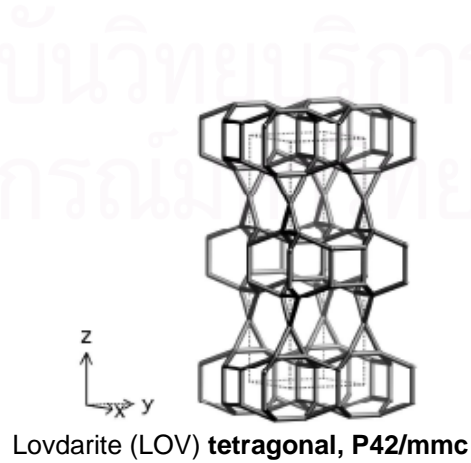
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ Mordenite Group (Baerlocher Ch., 2001) (ต่อ)



รูปที่ 2.15 โครงสร้างของ Faujasite Group (Baerlocher Ch., 2001)



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของ Melanophlogite Group (Baerlocher Ch., 2001)



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของ Lovdarite Group (Baerlocher Ch., 2001)

2.1.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ (จตุพร และนุรักษ์, 2547; Dyer A., 1988)

ซีโอไลต์แบ่งตามการกำเนิดได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี

2.1.3.1 ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (mineral zeolite or natural occurring zeolite) ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิเนียมซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์เบส (mono or divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำในผลึกบ้างบางส่วน หรือทั้งหมด โดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างซีโอไลต์จากธรรมชาติได้แก่ Faujasite, Erionite, Chabazite, Offertite, Gmelinite, Mordenite และ Heulandite เป็นต้น โดยประเภทของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติสามารถแบ่งได้ตาม Hydrological system ดังนี้

1. Saline, Alkaline Lakes ซีโอไลต์ชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ arid region และ semiarid region การตกตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ close basin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการควบคุม lake chemistry
2. Saline, Alkaline Soils ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ชนิดนี้ การก่อตัวใน arid region และ semiarid region เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวดินที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดิน แล้วจะละลายโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนต ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น และทำให้เกิดอะลูมิเนียมซิลิเกตในพื้นดินขึ้น
3. Marine Sediments ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำ และค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง
4. Open Hydrologic System ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash
5. Hydrothermal System ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีแอลคาไลน์กับสารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจาก ปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หิน และ ลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ตื้นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite

6. Burial Diagenetic System ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)
7. Magmatic System ซีโอไลต์ชนิดนี้เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างใน interstitial และ globules
8. ซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟ เป็นซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟในประเทศเยอรมัน ช่องว่างภายในผลึกจะเต็มไปด้วย analcime, clinoptilolite, erionite, harmotone และ phillipsite

2.1.3.2 ซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี (synthetic zeolite) เกิดจากการทำปฏิกิริยาของออกไซด์พื้นฐานต่างๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำ การสังเคราะห์ทำได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล (gelation) เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (sandlike) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่จะได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ตัวอย่างของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและที่ได้จากการสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 2.3

องค์ประกอบหลักในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ประกอบด้วย

1. อะลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลองโดยทั่วไปจะใช้สารประกอบของโลหะอะลูมิเนียม (metal aluminates) เป็นสารตั้งต้น ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้กัน คือ โซเดียมอะลูมิเนียม หรือ บางครั้งอาจใช้แหล่งแร่อะลูมิเนียมตามธรรมชาติ เช่น แก้ว feldspar หรือ felspatoides หรือ $Al(OH)_3$, $AlO(OH)$ อะลูมิเนียมอัลคอกไซด์
2. ซิลิกอน โดยทั่วไปจะใช้สารละลายของซิลิกา เช่น ซิลิกาโซล โดยมี ซิลิการ้อยละ 30 โดยน้ำหนัก บางครั้งอาจใช้ซิลิกาเจล แก้ว ทรายแร่ เป็นต้น
3. ไฮดรอกไซด์ ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ของโลหะหมู่ I และหมู่ II ที่อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้สามารถได้จากสารประกอบออกไซด์ และเกลือชนิดอื่นๆของโลหะหมู่ I และ II ได้
4. สารเคมีอื่น ๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) ที่แตกตัวให้ไฮดรอกไซด์ ซึ่งเรียกว่า สารโครงสร้าง (template) โดยใส่ในเจลเพื่อช่วยในการตกผลึกของ

ซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่สามารถสังเคราะห์ได้ (J.V. Smith, 1976)

ชื่อ	รูปแบบผลึก	องค์ประกอบทางเคมี
A	isometric	$\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$
Cancrinite	hexagonal	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Chabazite	rhombohedrol	$(\text{Ca}, \text{Na})_2\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24} \cdot 13\text{H}_2\text{O}$
Erionite	hexagonal	$(\text{Ca}, \text{K}_2, \text{Na}_2)_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$
Faujasite	isometric	$\text{Na}_{13}\text{Ca}_{11}\text{Mg}_9\text{K}_2\text{Al}_{55}\text{Si}_{37}\text{O}_{384} \cdot 235\text{H}_2\text{O}$
X	isometric	$\text{Na}_{86}\text{Al}_{86}\text{Si}_{106}\text{O}_{384} \cdot 264\text{H}_2\text{O}$
Y	isometric	$\text{Na}_{56}\text{Al}_{56}\text{Si}_{136}\text{O}_{384} \cdot 250\text{H}_2\text{O}$
Gemlinite	hexagonal	$(\text{Na}, \text{etc})_8\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{48} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
L	hexagonal	$\text{K}_9\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72} \cdot 22\text{H}_2\text{O}$
Mazzite	hexagonal	$\text{K}_{2.5}\text{Mg}_{2.1}\text{Ca}_{1.4}\text{Na}_{0.3}\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$
Mordenite	orthorombic	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{90} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
Offretite	hexagonal	$\text{KCaMgAl}_{15}\text{Si}_{13}\text{O}_{30} \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Sodalite	isometric	$\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24} \cdot 2\text{NaCl}$
ZK-5	isometric	$\text{Na}_{30}\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192} \cdot 98\text{H}_2\text{O}$

โดยทั่วไปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ใช้วิธีไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal process) โดยใช้สารประกอบอะลูมินา (เช่น sodium aluminates หรือ aluminum sulfate) และซิลิกา (เช่น sodium water glass, silica solution) ทำปฏิกิริยากับเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือ NR^{4+} เกิดเป็นเจลที่มีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียวกันซึ่งอยู่ในสภาพสารละลายต่างอิมตัวยวดยิ่ง (analkaline supersaturated solution) และแปลงสภาพเป็นโครงสร้างรูพรุนของผลึกอลูมิโนซิลิเกต (microporous crystalline aluminosilicate) ภายในเวลาที่กำหนด อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วงประมาณ 150 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านั้น และความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิมตัวในขณะนั้น บางครั้งในระบบอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์มากกว่าหนึ่งชนิด ซึ่งเรียกกระบวนการทางเคมีนี้ว่ากระบวนการซีโอไลไทเซชัน (zeolitization) ขั้นตอนสำคัญในการเกิดซีโอไลไทเซชัน ได้เป็น

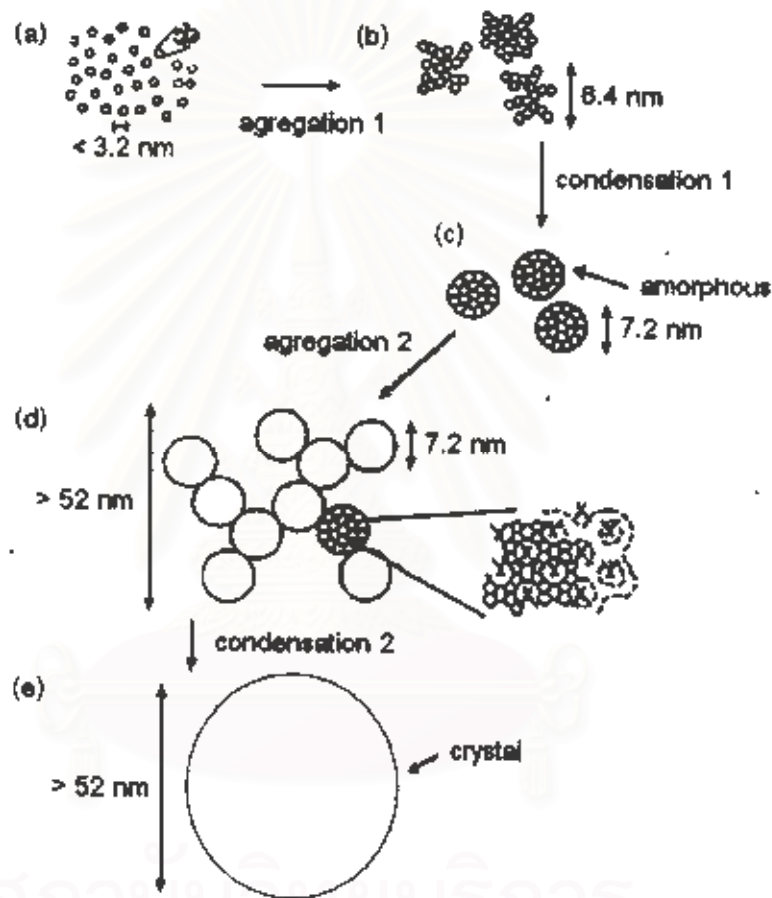
ซีโอไลต์ที่ต้องการ ได้แก่ ระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก (aging period) และกลไกการเกิดผลึก (mechanism of crystallization)

ระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก คือช่วงเวลาและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการเตรียม เจล โดยที่อุณหภูมิของเจลมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก (crystallization temperature) สิ่งหนึ่งที่สำคัญในช่วงระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก คือการละลายหรือดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ของซิลิกาด้วยเบส ซึ่งการละลายดังกล่าวเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของซิลิกา ผลิตภัณฑ์เริ่มแรกที่ได้อยู่ในรูปของโมโนเมอร์ซิลิเกตแอนไอออน (monomeric silicate anions) หลังจากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นโอลิโกเมอร์ซิลิเกต (oligomeric species) โดยผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างโอลิโกเมอร์ซิลิเกตกับโมโนเมอร์ซิลิเกต $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ เกิดเป็นโครงสร้างอะลูมิเนียมซิลิเกต

กลไกการเกิดผลึก แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่การอิ่มตัวยิ่งยวด (supersaturation) การเกิดนิวเคลียส (nucleation) และการเติบโตของผลึกซีโอไลต์ (crystal growth)

1. การอิ่มตัวยิ่งยวด เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นระหว่างการตกผลึก และเกิดได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขั้นตอนนี้ความเข้มข้นขององค์ประกอบอะลูมิเนียมและซิลิกอนที่ถูกละลายจะเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารละลายจากสารละลายที่มีเสถียรภาพไปเป็นสารละลายที่มีเสถียรภาพไม่แน่นอน (metastable solution) และสุดท้ายอยู่ในสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ (labile solution)
2. การเกิดนิวเคลียส (nucleation) ของสารละลายอิ่มตัวยิ่งยวดแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือ การเกิดนิวเคลียสขั้นปฐมภูมิ (primary nucleation) ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น การเกิดนิวเคลียสแบบเนื้อเดียว (homogeneous nucleation) และแบบเนื้อผสม (heterogeneous nucleation) โดยที่การเกิดนิวเคลียสแบบหลังเกิดจากการเหนี่ยวนำของสิ่งแปลกปลอมที่มีอยู่ในสารละลาย (impurities or foreign particles) และขั้นตอนที่สองคือการเกิดนิวเคลียสขั้นทุติยภูมิ (secondary nucleation) ซึ่งเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำของผลึกที่เกิดขึ้น
3. การเติบโตของผลึกซีโอไลต์ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นหลังจากการเกิดนิวเคลียส โดยนิวเคลียสจะเกิดการเติบโตโดยการเพิ่มหรือควบแน่นขององค์ประกอบที่ละลายอยู่ กลายเป็นผลึกซีโอไลต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและสมบูรณ์มากขึ้น

ลักษณะของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ของสารตั้งต้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของประจุบวกของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่ โดยปกติการก่อตัวของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก



รูปที่ 2.18 การเกิดซีโอไลต์จากอนุภาคของเจล (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

2.1.4 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ (Bruce, 1991)

เมื่อพิจารณาหน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์ พบว่าถ้าทุกหน่วยเป็น $[\text{SiO}_4]^{4-}$ สูตรอย่างง่าย (empirical) ของสารนี้คือ SiO_2 นั่นเอง ซึ่งมีสภาพประจุเป็นกลาง แต่ถ้าแทนที่ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ ด้วย $[\text{AlO}_4]^{5-}$ จะได้สูตรอย่างง่าย คือ $(\text{AlO}_2)^-$ ดังนั้นจึงมีประจุลบสำหรับทุกหน่วยของ $(\text{AlO}_2)^-$ หรือ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ประจุลบที่เกิดจากการแทนที่ด้วย $(\text{AlO}_2)^-$ ในโครงสร้างของซีโอไลต์ (เลิศ, 2545)

ตำแหน่งประจุลบที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณรอบ $(\text{AlO}_2)^-$ หรือ $(\text{AlO}_5)^{5-}$ ซึ่งจะมีไอออนประจุบวกของโลหะ (metal cation) มายึดเหนี่ยวด้วยแรงคูลอมบ์ (Coulombic force) เพื่อให้เกิดสมดุลในโครงสร้างทางประจุ ดังนั้นจำนวนประจุบวกที่พบในซีโอไลต์จะขึ้นกับจำนวนของหน่วย $(\text{AlO}_2)^-$ หรือ $(\text{AlO}_5)^{5-}$ และเลขออกซิเดชันของประจุบวก (ประจุบวกหนึ่งสำหรับโลหะแอลคาไลน์ และประจุบวกสองสำหรับโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท) ดังนั้นซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ ประจุบวกและโมเลกุลของน้ำ เป็นส่วนที่อยู่นอกโครงสร้างตาข่าย (framework network) ของซีโอไลต์ ดังนั้นการแลกเปลี่ยนประจุบวกหรือการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์จึงไม่ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เสียหาย

2.1.4.1 การแลกเปลี่ยนไอออน ซีโอไลต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของโลหะที่อยู่ในผลึกกับไอออนประจุบวกอื่นๆ ในสารละลายได้ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวกนี้ผันกลับได้

2.1.4.2 การดูดซับน้ำ ซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำเข้าไปในช่องว่างบริเวณผนังด้านในของโพรงชนิดต่างๆ ได้ และสามารถกำจัดน้ำออกได้ที่อุณหภูมิสูงพอ

2.1.4.3 การคัดขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงซึ่งมีทางให้โมเลกุลของสารใดๆ ผ่านเข้าออกได้เรียกว่าปากโพรง (aperture) โดยที่โมเลกุลที่มีรูปร่างและขนาดเล็กกว่าหรือขนาดเดียวกับปากโพรง

เท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติในการกรองแยกโมเลกุล

2.1.4.4 สมบัติที่สำคัญอื่นๆ ได้แก่ ความหนาแน่นของตำแหน่งกรด (acid site density) ความแรงของกรด (acid strength) และขนาดรูพรุน (pore size)

2.1.5 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในปัจจุบัน (จรัส, 2540)

จากสมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์จึงได้มีการนำซีโอไลต์ไปใช้งานในด้านต่าง ซึ่งการใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์ถูกกำหนดด้วยสมบัติพื้นฐานในระดับโมเลกุลของสาร ซึ่งมีอยู่สามด้านหลักๆ ด้วยกัน ได้แก่ เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) เป็นตัวดูดซับ (adsorption) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis)

2.1.5.1 สารลดความกระด้างของน้ำ (water softener)

เนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้นเกาะอยู่อย่างหลวมๆ จึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ โดยโลหะแอลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง นอกจากนี้ยังมีการนำซีโอไลต์มาใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอกแทนฟอสเฟต เนื่องจากฟอสเฟตเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

2.1.5.2 ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin)

จากสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของซีโอไลต์จึงมีการนำซีโอไลต์ไปใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนบวกต่างๆ ได้แก่ Zn^{2+} , Sn^{2+} , Ba^{2+} , Ca^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} และ Mn^{2+} เป็นต้น โดยการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของซีโอไลต์ขึ้นกับ ชนิดและความเข้มข้นของไอออนบวกที่ทำการแลกเปลี่ยนประจุกับซีโอไลต์ คุณสมบัติที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุ ตัวทำละลาย และโครงสร้างของซีโอไลต์

2.1.5.3 ตัวดูดซับ (adsorption)

เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างอันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล และเนื่องจากซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำได้ดีและสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้เมื่อมีการให้ความร้อน จึงได้มีการนำซีโอไลต์มาใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการทำสารให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (separation) เมื่อซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำหรือไอในสารที่ต้องการทำให้

ปฏิกิริยาหรือสารที่ต้องการแยก และน้ำในซีโอไลต์จะระเหยออกเมื่อมีการให้ความร้อน นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้ในการดูดซับสารอื่น เช่น แก๊สไฮโดรเจน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย ซึ่งเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับเช่นเดียวกับการดูดซับน้ำ และซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น

2.1.5.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวแยกโมเลกุล (catalysis and molecular sieve)

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จัดว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับซีโอไลต์อย่างมาก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมีกว่าพันล้านบาท และมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของตัวเร่งปฏิกิริยาคือซีโอไลต์ ด้วยเหตุที่ข้อดีของซีโอไลต์มีสถานะเป็นของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวสูงทำให้คงทนกว่า และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่าสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือแก๊ส ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานและเป็นมิตรกับธรรมชาติ สมบัติการเป็นตัวแยกโมเลกุล (molecular sieve) ของซีโอไลต์ขึ้นกับขนาดของช่องว่างที่อยู่ระหว่างโครงสร้างหน่วยย่อย และสามารถควบคุมขนาดของช่องนี้โดยควบคุมอุณหภูมิและไอออนประจุบวกที่อยู่ภายในหรืออยู่รอบๆ ช่องว่าง ทำให้บางช่องว่างนี้ไว้บางส่วนและนักเคมีสามารถเพิ่มหรือลดขนาดช่องว่างนี้ได้โดยการปรับปัจจัยสองประการดังกล่าว จึงมีการสังเคราะห์สารที่มีโครงสร้างคล้ายซีโอไลต์ และใช้สารกลุ่มนี้เป็นตัวแยกโมเลกุล และใช้สารดังกล่าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานและลดขั้นตอนเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมีเร็วขึ้นแล้ว ยังสามารถสร้างมูลค่าของสารตั้งต้นให้ออกมาเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเช่น เพิ่มค่าออกเทนของน้ำมัน โดยกำจัดองค์ประกอบที่เป็นสายตรงหรือแยกสารไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัวออกจากชนิดไม่อิ่มตัว เป็นต้น

2.1.5.5 ประโยชน์อื่นๆ

การใช้งานซีโอไลต์ในประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ใช้ในการเกษตร การเลี้ยงสัตว์ และการก่อสร้าง ในเชิงการเกษตรนั้น เป็นวิธีการที่เรียกว่า Zeoponic หมายถึง การนำซีโอไลต์ธรรมชาติมาปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนประจุ ใสประจุบวกที่เป็นสารอาหารของพืชลงไปแทน ทำให้โมเลกุลของซีโอไลต์กลายเป็นแหล่งอาหารของพืช ซึ่งสารอาหารนั้นๆ จะค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกมาทำให้สารอาหารไม่ถูกชะล้างไปโดยง่าย เป็นการประหยัดสารอาหารได้

2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดินขาว (กรมทรัพยากรธรณี, 2526; นงลักษณ์, 2540)

ดินขาว (Kaolin) ซึ่งมีรากศัพท์มาจากภาษาจีนว่า เกาเลียง (Kao Liang) เป็นชื่อของภูเขาที่มียอดแหลม (High Ridge) บางทีนิยมเรียกว่า China-Clay เพื่อเป็นเกียรติแก่ประเทศจีนซึ่งเป็นผู้ที่นำดินขาวมาใช้เป็นประเทศแรก ดินขาวเป็นแร่ชนิดหนึ่งในกลุ่มแร่ดิน (clay) โดยทั่วไปหมายถึงดินที่มีสีขาวยิ่งส่วนใหญ่อประกอบด้วยแร่ดิน ดินขาวเกิดจากแร่อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ที่เป็นโครงสร้างของหินชนิดต่างๆ เช่น หินฟันม้า (Feldspar) ไมกา (Mica) หินควอร์ตซ์ (Quartz) หินปูน (Lime stone) ฯลฯ อยู่ มีสารอินทรีย์ (organic matters) และออกไซด์ของโลหะต่างๆ ซึ่งทำให้เกิดสี เนื่องจากองค์ประกอบทางแร่และทางเคมีของดินขาวแต่ละแหล่งไม่เหมือนกัน จึงทำให้สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของดินขาวแต่ละแหล่งแตกต่างกันออกไป เช่น ความเป็นกรด-ด่าง การดูดซึมน้ำมัน ความขาว ความคม ความเหนียว และการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อน เป็นต้น

ดินขาวมักจะเกิดบนที่ราบสูงทั่วไป บางแหล่งอาจพบใกล้แหล่งน้ำในที่ราบลุ่ม เนื่องจากการพัดพาของกระแสน้ำ ทำให้มีสีขาวยิ่งกว่าและเป็นสีเทาบ้าง สีเหลืองอ่อนบ้าง เนื่องจากมีสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ได้แก่ แคลเซียม (Calcium) แมกนีเซียม (Magnesium) โซเดียม (Sodium) และโพแทสเซียม (Potassium) ซึ่งทำให้ความบริสุทธิ์ของดินขาวน้อยลง การใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง หรือเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ จะพบว่าเม็ดดินขาวมีลักษณะเป็นผลึกแผ่นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน หรือแท่งหกเหลี่ยม

ดินขาวจัดเป็นแร่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเพราะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากมาย เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมยางและอุตสาหกรรมยาปราบศัตรูพืช เป็นต้น ปัจจุบันอุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ดินขาวมากที่สุดและได้พัฒนาแหล่งภายในประเทศขึ้นมาใช้ กันอย่างแพร่หลายมานานแล้วซึ่งส่งผลให้อุตสาหกรรมภายในประเทศขึ้นมาใช้กันอย่างแพร่หลายมานานแล้ว ซึ่งส่งผลให้อุตสาหกรรมเซรามิกเกิดการพัฒนาอย่างมากสามารถผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส่งออกทำรายได้ให้แก่ประเทศปีละหลายพันล้านบาท ส่วนดินขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี ยางและยาปราบศัตรูพืช ซึ่งมีแนวโน้มการใช้เพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมดังกล่าว

2.2.1. การจำแนกดินขาวและแหล่งดินขาวในประเทศ

ดินขาวเกิดจากการสลายตัวหรือการผุพังของแร่อะลูมิเนียมซิลิเกตอันเนื่องมาจาก น้ำ ลม และกิจกรรมธรรมชาติ สำหรับประเทศไทยพบแหล่งดินขาวอยู่ทั่วไปทั้งภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ แหล่งสำคัญที่มีการผลิตอยู่ในปัจจุบันอยู่ในเขตจังหวัด ลำปาง เชียงราย แพร่ ลำพูน อุทัยธานี อุตรดิตถ์ สุโขทัย กาญจนบุรี ลพบุรี นครนายก ปราจีนบุรี ราชบุรี กระบี่ ระนอง นครศรีธรรมราช นราธิวาส สุราษฎร์ธานี และระยอง เป็นต้น(นงลักษณ์, 2540)

2.2.1.1 การจำแนกดินขาวจากแหล่งกำเนิดตามลักษณะทางธรณีวิทยา

จากแหล่งกำเนิดตามลักษณะทางธรณีวิทยาสามารถแบ่งดินขาวออกเป็น 3 ชนิด คือ (นงลักษณ์, 2540)

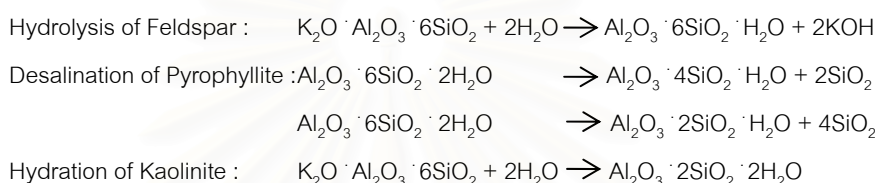
1. แหล่งที่เกิดจากการสะสมตัวของตะกอน (sedimentary origin) ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งดินขาว ดินเหนียว หรือดินสี ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องของหลายประการ เช่น ส่วนประกอบของหินเดิม กระบวนการผุพัง กระบวนการพัดพาและทับถม ตัวอย่างของดินเหล่านี้ ได้แก่ ดินขาวในจังหวัดเชียงราย จังหวัดระยอง จังหวัดนราธิวาส เป็นต้น ดินขาวที่มีการกำเนิดโดยการสะสมตัวของตะกอนนี้มักมี Kaolinite เป็นแร่องค์ประกอบหลัก และยังมี แร่ควอตซ์ Feldspar, Illite, Rhyolite และสารอินทรีย์ปะปนอยู่บ้างในปริมาณที่แตกต่างกันไปขึ้นกับแหล่งกำเนิด
2. แหล่งที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของหินโดยการกระทำของน้ำร้อนและแก๊สธรรมชาติ (hydrothermal and pneumatolytic origin) โดยหินเดิมซึ่งอาจเป็นหินภูเขาไฟ หินแกรนิต หรือหินดินดาน ได้ถูกเปลี่ยนแปลงโดยอิทธิพลของน้ำร้อน และแก๊สที่เกิดขึ้นภายหลังไปเป็นแร่ชนิดใหม่ ดินชนิดนี้ได้แก่ ดินขาวลำปาง ดินขาวอุตรดิตถ์ และดินขาวที่บริเวณหาดส้มแป้น จังหวัดระยอง โดยหินเดิมที่เป็นแกรนิต และหิน Rhyolite เมื่อได้เปลี่ยนแปลงสภาพเป็นดินขาวแล้วจะมี Kaolinite เป็นองค์ประกอบหลัก และสารอินทรีย์ปะปนอยู่บ้างในปริมาณที่แตกต่างกันไปขึ้นกับแหล่งกำเนิดแต่จะมีหรือไม่มีแร่ควอตซ์ หรือ แร่ Illite ก็ได้
3. แหล่งที่เกิดจากการผุพังของหินที่แหล่งกำเนิด (residual weathering origin) เป็นผลสืบเนื่องโดยตรงจากกระบวนการผุพังทำลายของหินตามธรรมชาติ และยังไม่ถูกพัดพาไปไกลจากแหล่งเดิม ตัวอย่างของดินขาวประเภทนี้ได้แก่ ดินขาวปราจีน ซึ่งจะมี Kaolinite และแร่ควอตซ์เป็นแร่องค์ประกอบหลัก อาจมีแร่ Illite ปนอยู่บ้าง

2.2.1.2 การจำแนกดินขาวจากความแตกต่างตามสารประกอบทางเคมี

การจำแนกดินขาวที่พบในประเทศไทยจากความแตกต่างตามสารประกอบทางเคมีที่มีองค์ประกอบหลักที่พบในประเทศไทยแบ่งได้ 2 ชนิด ดังนี้ (อายุวัฒน์, 2543)

1. ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต

ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต (รูปที่ 2.20) เกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิตที่ผุพังโดยบรรยากาศ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาวอยู่ในแหล่งเดิม กระบวนการเกิดดินขาวชนิดนี้ มีขั้นตอนของปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้



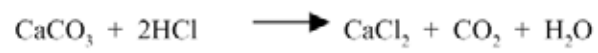
จากกระบวนการข้างต้น ทำให้ดินขาวชนิดนี้ มีสารประกอบที่เจือปนหลายชนิด ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา สารประกอบออกไซด์ของเหล็กออกไซด์ แคลเซียม โซเดียม และโปแทสเซียมที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงสภาพโดยสมบูรณ์ เมื่อนำมาล้างจึงปรากฏสิ่งตกค้างบนตะแกรงที่มีเม็ดหยาบ บางแห่งจะพบว่าเป็นเม็ดหิน หรือเม็ดทรายอย่างชัดเจน

ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตแสดงดังรูปที่ 2.22 เมื่อนำมาผสมกับน้ำ จะมีความเหนียวสามารถขึ้นรูปทรงได้ และเมื่อนำมาเผาถึงอุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะแข็งตัวคงรูปอยู่ได้ ไม่แตกยุ่ยสามารถนำมาผสมกับวัตถุอื่น ๆ เพื่อเป็นเนื้อดินปั้น (Bodies) หรือผสมน้ำเคลือบได้ดี เราสามารถตรวจสอบดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตได้โดยใช้หลอดทดลองแล้วเติมโคบอลต์ไนเตรต (CoNO_3) ลงไปเล็กน้อยแล้วนำไปเผาด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์จะปรากฏสีน้ำเงินขึ้น

2. ดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต

ดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (รูปที่ 2.21) เป็นดินขาวที่เกิดจากการแปรสภาพของหินปูนที่ผุพังโดยบรรยากาศ และสภาวะแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาว ดินขาวชนิดนี้สามารถนำมาทำแป้งผัดหน้าซึ่งเรียกว่า “ดินสอพอง (Marl)” ทำปุ๋ย ไล่ต้นไม้ เพราะมีธาตุโพแทสเซียม และโซเดียมเจือปน ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 2.20 การตรวจสอบดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำโดยการหยด

กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นลงไป จะเกิดฟองแก๊สอย่างรุนแรงเนื่องจากกรดเข้าไปทำปฏิกิริยากับ แคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



รูปที่ 2.20 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต



รูปที่ 2.21 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต

2.2.1.3 แหล่งดินขาวในประเทศ

แหล่งดินขาวที่มีสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต แหล่งใหญ่ที่พบในประเทศไทย ได้แก่

1. แหล่งดินขาวอำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

ดินขาวแหล่งนี้พบที่เขাপางค่า หรือเรียกชื่อตามพื้นบ้านว่า “ม่อนดินขาว” หรือ “ม่อนดี หิน” ที่เรียกเช่นนี้ เนื่องจากเป็นแหล่งที่มีดินขาวเกิดปะปนอยู่กับหินที่ผุพัง และมีหินดินดาน ค่อนข้างแข็ง ชาวบ้านแถบนั้นนำหินดินดานมาใช้ทำหินลับมีด ดินขาวแหล่งนี้ เกิดจากการผุพังการสลายตัวของหินฟันม้า ที่แปรสภาพมาจากหิน Liperite จึงทำให้มีปริมาณของหินแข็งปะปนอยู่มาก และมีการสะสมตัวอยู่บนไหล่เขาตอบนบน ความหนาไม่เกิน 5 เมตร และมีผิวดินปกปิดตอบนบนหนาประมาณ 0.5 เมตร

ดินขาวอำเภอแจ้ห่ม มีสีและลักษณะที่แตกต่างกันไป เป็นก้อนแข็ง เวลาล้างจมตัวดี เนื้อดินที่ล้างได้ประมาณ 34-68 เปอร์เซ็นต์ สีของดินมีสีขาวเหลืองถึงสีเทาอ่อน ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,300 องศาเซลเซียสมีการหดตัว 3.4-12.0 เปอร์เซ็นต์ และการดูดซึมน้ำ 7.8-22.9 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของเม็ดดิน 3-20 ไมครอน ความทนไฟ 1,621 องศาเซลเซียส ความแข็งแรง 136 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อแขวนลอยในน้ำมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.3

2. แหล่งดินขาว ตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง

เป็นดินขาวที่พบอยู่ในบริเวณเหมืองแร่ดีบุก ตำบลหาดส้มแป้น ตำบลบางวัน อำเภอเมือง จังหวัดระนอง ซึ่งเกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิตที่ปะปนอยู่กับหินควอตซ์และแร่ดีบุก ดินขาวแหล่งนี้เป็นดินขาวชนิดดีที่พบเป็นแหล่งแรกในประเทศ โดยมีปริมาณของอะลูมินาสูงและมีปริมาณสิ่งเจือปนน้อย จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆ ดินขาวที่พบในแหล่งนี้ เป็นดินร่วน มีสีขาว เวลาล้างจมตัวดีมาก เนื้อดินที่ล้างได้ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,300 องศาเซลเซียส มีการหดตัว 3.9-7.8 เปอร์เซ็นต์ และการดูดซึมน้ำ 30.0-40.5 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของเม็ดดิน 5-30 ไมครอน ความทนไฟ 1785 องศาเซลเซียส ความแข็งแรง 102 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.5 เมื่อแขวนลอยในน้ำ

3. แหล่งดินขาว อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี

ดินขาวแหล่งนี้ พบที่หมู่บ้านวังยาง และจัวงาม อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี ส่วนใหญ่เป็นแร่ Illite ที่เกิดจากการผุพังของหิน Rhyolite มีลักษณะเป็นดินร่วน มีสีขาว ความเหนียวน้อย เนื้อดินที่ล้างได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงอุณหภูมิ 800-1,250 องศาเซลเซียส มีการหดตัว 4.2-11.4 เปอร์เซ็นต์ และการดูดซึมน้ำ 2.1-20.8 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของเม็ดดิน 3-20 ไมครอน ความทนไฟ 1,300 องศาเซลเซียส เมื่อแขวนลอยในน้ำมีค่าพีเอชเท่ากับ 8.0

2.2.2. สมบัติทางกายและทางเคมีของดินขาว

1. ขนาดของเม็ดดิน (particle size) เกี่ยวข้องกับความเหนียว (plasticity) และการหดตัวของดินเมื่อแห้ง (dried shrinkage) ซึ่งโดยเฉลี่ยขนาดของเม็ดดินที่นำมาใช้ ควรมีขนาดประมาณ 0.05-10 ไมครอน ในปัจจุบันที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรม จะมีขนาดเม็ดดินประมาณ 0.05 ไมครอน

2. ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (green strength) เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ดิบ (green ware) มากเพราะดินขาวที่มีความเหนียวน้อย เมื่อขึ้นรูปแล้วจะเปราะง่าย โดยเฉลี่ยความแข็งแรงของดินขาวควรอยู่ระหว่าง 40-120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

3. การหดตัวหลังจากการเผา (Fired shrinkage) เกี่ยวข้องกับขนาดรูปทรงของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วดินขาวจะหดตัวหลังการเผาเฉลี่ยประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

2.2.3 ประโยชน์ของดินขาว (นงลักษณ์, 2540)

การใช้ประโยชน์ของดินขาวในอุตสาหกรรมเซรามิกจะมี 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทไสนาแวร์ สโตนแวร์ เครื่องสุขภัณฑ์ กระเบื้องคุณภาพสูง ส่วนกลุ่มที่สองประกอบด้วยผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการก่อสร้าง ได้แก่ อิฐก่อสร้าง อิฐปูพื้น ท่อระบายน้ำ กระเบื้องมุงหลังคา เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมกระดาษ มักมีการเติมดินขาวในระหว่างการผลิตเพื่อเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเยื่อกระดาษ ทำให้กระดาษมีสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น มีความขาว ความเรียบ และทึบแสง นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยดูดซึมหมึก และยังช่วยเพิ่มน้ำหนักของกระดาษอีกด้วย ดินขาวที่ใช้เป็นตัวเติม (filler) ในกระดาษจัดเป็นดินขาวที่มีคุณภาพสูง คือเป็นดินขาวที่มีการขัดสีหรือมีความคมต่ำ มีความละเอียดของอนุภาคและความขาวสว่างสูง ซึ่งดินขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษนี้จะช่วยเพิ่มราคาให้กับดินขาวมากกว่าอุตสาหกรรมเซรามิก 2 ถึง 3 เท่าตัว นอกจากนี้ในกระดาษที่ต้องการความขาว และมันมาก ๆ เช่น กระดาษปอนด์หรือกระดาษอาร์ต จะต้องใช้ดินขาวเคลือบบนกระดาษอีกชั้นหนึ่ง โดยจะต้องเป็นดินขาวที่มีความละเอียดและความขาวที่สูงกว่าดินขาวชนิดที่เป็นตัวเติมในเนื้อกระดาษ

ในอุตสาหกรรมสี ในเนื้อสีทาบ้านจะมีการเติมดินขาวเข้าไปแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ซึ่งมีราคาแพง นอกจากนั้นการเติมดินขาวยังเป็นการเพิ่มน้ำหนักของสี ทำให้สีมีราคาถูกลง และยังช่วยให้เนื้อสีและน้ำสีผสมเข้ากันเป็นอย่างดี และตกตะกอนช้า ในการนำดินขาวมาใช้ในอุตสาหกรรมสีต้องมีการพิจารณาสมบัติของดินขาวทางด้าน ความละเอียดและความหยาบของอนุภาค ความขาวสว่าง และการดูดซึมน้ำมัน

ในอุตสาหกรรมยาง การเติมดินขาวลงไปจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ลดความเปราะให้กับยาง ทำให้มีความคงทนต่อการขัดสี โดยดินขาวที่ใช้จะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร และต้องมีธาตุแมงกานีสต่ำ

ในอุตสาหกรรมพลาสติก สามารถนำดินขาวไปใช้เป็นตัวเติมในเนื้อพลาสติกหุ้มสายเคเบิล เนื่องจากมีราคาถูกแล้ว ยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความราบเรียบ ลดรอยร้าว และลดการหดตัวระหว่างการอบ ช่วยบดบังริ้วรอยในเนื้อพลาสติก นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด และยังช่วยในการเก็บรักษาความร้อนไว้ภายในเรือนกระจกให้กับพืชผลทางการเกษตรอีกด้วย

ประโยชน์ในทางเภสัชกรรม และเครื่องสำอางในทางเภสัชกรรม ได้มีการนำดินขาวมาใช้ผสมเป็นยารักษาโรคกระเพาะและลำไส้ เนื่องจากดินขาวสามารถดูดซับเชื้อโรคและสิ่งมีพิษเหล่านี้ได้ สำหรับยาใช้ภายนอก ดินขาวถูกใช้ในยาระงับการระคายเคืองจากไฟไหม้น้ำร้อนลวก ในส่วนของเครื่องสำอางนั้นได้มีการผสมดินขาวเข้าไปเพื่อทำให้เกิดความละเอียด นุ่มเนียน และสามารถกลมกลืนกับสารเคมีอื่นในเครื่องสำอางได้เป็นอย่างดี

ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมปุ๋ยและยาฆ่าแมลง โดยอาศัยหลักของความสามารถในการดูดซึมของดินขาว ช่วยในการยึดจับและใช้เป็นที่อยู่ของสารที่เป็นองค์ประกอบของปุ๋ยและยาฆ่าแมลงชนิดนั้นๆ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มน้ำหนักให้กับปุ๋ยและยาฆ่าแมลงให้ยึดกับพื้นที่ที่มีการใช้งาน นอกจากนี้ดินขาวยังใช้เป็นส่วนผสมในยาทารองเท้าสีขาว ผสมในซีเมนต์เพื่อป้องกันไม่ให้ห้องเสียบ และยังใช้ในการทำซอล์ก เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการดูดซับ (Eckenfelder, 1981 และ McCabe, 1993)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของสารสองสถานะ ไม่ว่าจะเป็นสถานะของแข็งหรือของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่พื้นผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) ซึ่งการเกาะติดบนพื้นผิวดังกล่าวสามารถจำแนกออกเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยพันธะเคมีซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวถูกดูดซับและสมบัติของพื้นผิวดูดซับ

2.3.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption mechanism) (Eckenfelder, 1981)

กระบวนการดูดซับแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (chemical adsorptions) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแรงที่มาเกี่ยวข้อง

2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical/Van der Waals adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวหน้าของโมเลกุลของแข็งกับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งได้แก่ แรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) และแรงกระจาย (dispersion force) ทั้งนี้แรงกระจายจะมีอยู่ทั่วไปในวัตถุทุกชนิดและเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การดูดซับจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (multilayer) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลก่อนหน้า ซึ่งจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorptions/activated adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากตัวดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงหรือพันธะทางเคมี ซึ่งเป็นผลจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนรูปของพันธะเคมีระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับผิวหน้าของของแข็ง เนื่องจากการดูดซับทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีจึงมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและมีความสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น (activation energy) ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้

บนพื้นผิวดังกล่าว จึงอาจกล่าวได้ว่าการดูดซับทางเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ และเป็น การดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)

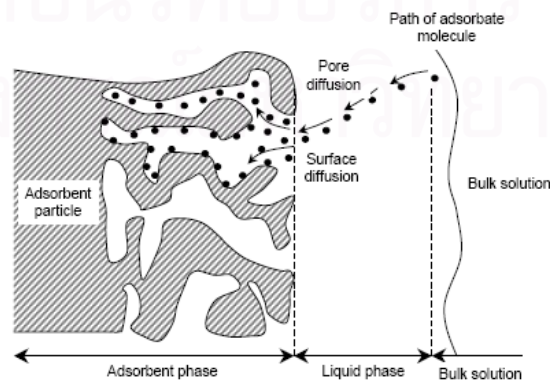
2.3.2 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption kinetic) (Eckenfelder, 1981)

อัตราเร็วในการดูดซับเกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecule transfer) ซึ่งมีความสำคัญต่อการดูดซับ การดูดซับโมเลกุลจากสารละลายโดยตัวดูดซับที่มีรูพรุนสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.3.2.1. การดูดซับขั้นแรก เป็นการถ่ายโอนโมเลกุลของสารถูกดูดซับจากสารละลาย โดยวิธีการแพร่ของโมเลกุลจากสารละลายไปยังพื้นผิวภายนอกของชั้นของเหลวบางๆ (film) ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ เรียกขั้นตอนนี้ว่า การแพร่ภายนอก (external or film diffusion)

2.3.2.2. การดูดซับขั้นที่สอง เป็นการแพร่ภายใน (internal diffusion) เกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนโมเลกุลของสารถูกดูดซับจากผิวภายนอกของชั้นฟิล์มเข้าสู่พื้นผิวภายใน (film transport) โดยวิธีการแพร่เข้าไปในรูพรุนที่เต็มไปด้วยของเหลวเข้าสู่ช่องว่างของตัวดูดซับ และเคลื่อนที่ไปตลอดพื้นผิวรูพรุนของแข็งนั้น (surface diffusion)

2.3.2.3. การดูดซับขั้นที่สาม เป็นการดูดซับของโมเลกุลที่อยู่ภายในพื้นผิวของรูพรุน ซึ่งเกิดจากการแพร่เข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (pore diffusion) กล่าวได้ว่าเป็นการแพร่ภายในอนุภาค (intraparticle diffusion) การดูดซับในขั้นนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมากจึงไม่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่โดยรวม อัตราการดูดซับทั้งหมดควบคุมโดยขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุด ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งการแพร่ภายในและการแพร่ภายนอก



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนของการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน (Montgomery, 1985)

2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ (Eckenfelder, 1981)

2.3.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

- พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นผลของความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิว จึงเห็นได้ชัดว่าพื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ โดยการดูดซับสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น

- ขนาดของอนุภาค

พื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคลดลง อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูงพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างของรูพรุนดังกล่าว ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค

- สภาพทางเคมีของพื้นผิว

เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของตัวดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโดยการเปลี่ยนแปลงของขั้วประจุบนผิวหน้าระหว่างการดูดซับทางเคมี ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายหลายชนิด

2.3.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกละลาย

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นหากสมบัติของสารถูกละลายได้แก่ ความยาวของสายโซ่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นและความสามารถในการละลายได้ลดลง นอกจากนี้มวลโมเลกุลที่มีค่าสูงจะทำให้ขนาดของสารถูกละลายใหญ่ขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.3.3.3 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ผ่านในชั้นฟิล์มหรือการแพร่ในรูพรุนซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีความหนามากทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกละลายที่เข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงข้ามถ้าระบบมีความปั่นป่วนสูงทำให้ไม่เกิดการสะสมในชั้นฟิล์ม สารถูกละลายจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง ทำให้กรณีนี้การเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2.3.3.4 ผลของอุณหภูมิ

เนื่องจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามหากอุณหภูมิลดลง ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ก็มีกระบวนการดูดซับทางเคมีบางชนิดที่สามารถเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ส่วนใหญ่เป็นการดูดซับสารจำพวกโลหะ เป็นต้น

2.3.4 ประเภทของสารดูดซับ

2.3.4.1 ประเภทสารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ ถ่านกระดุก ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามอาจมีข้อเสียคือ จับโมเลกุลคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับชนิดนี้จำกัด

2.3.4.2 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) อันที่จริงสารดูดซับชนิดนี้อาจจัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ก็ได้ แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอนินทรีย์อื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม ถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วสามารถนำมาทำการคืนสภาพได้โดยนำไปสัมผัสกับน้ำแล้วทำให้แห้ง นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 800-950 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศที่มีการควบคุมปริมาณออกซิเจนและความชื้น จากนั้นนำไปทำให้เย็นอย่างรวดเร็วในถังน้ำเย็นและล้างกำจัดส่วนที่เป็นฝุ่นออก นำไปใช้ใหม่

2.3.4.3 สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange resin) โมเลกุลาร์ซีฟชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ มีพื้นที่จำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ แต่มีข้อได้เปรียบคือสามารถคืนสภาพได้ง่ายกว่าและสิ้นเปลืองน้อยกว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าสารดูดซับจะอิ่มตัวด้วยสารที่ถูกดูดซับซึ่งการนำเอาสารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับเพื่อให้สามารถนำเอาสารดูดซับไปใช้ใหม่เรียกว่าการคืน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Akolekar D. และคณะ ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Na-X จากดินขาว โดยดินขาวเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อปรับปรุงคุณภาพ และทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 51 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วย X-ray diffraction พบว่าซีโอไลต์ชนิด X และ A เริ่มเกิดขึ้นที่ 48 ชั่วโมง โดยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณซีโอไลต์ X จะเพิ่มขึ้น ส่วนปริมาณซีโอไลต์ A ลดลง และที่เวลา 240 ชั่วโมงมีปริมาณของซีโอไลต์ X ถึงร้อยละ 95 และซีโอไลต์ A ร้อยละ 5

D. Novembre และคณะ ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จาก Tripolaceous deposits และ Volcanic zeolitised rocks ซึ่งวัตถุดิบทั้งสองชนิดเป็นหินที่พบในประเทศอิตาลี งานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์สารประเภทซีโอไลต์ ได้แก่ซีโอไลต์ Na-X และซีโอไลต์ไฮดรอกซิลโซดาไลต์ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากสารประกอบแอลคาไลน์ซิลิเกต ($\text{Na}_x\text{Si}_y\text{O}_z$) และสารประกอบแอลคาไลน์อะลูมิเนต ($\text{Na}_x\text{Al}_y\text{O}_z$) หิน Tripoli (Tripoli rocks) ซึ่งมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลัก เมื่อผ่านกระบวนการบำบัดทางเคมีจะได้สารประกอบโซเดียมซิลิเกต ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) และหินภูเขาไฟ (Volcanic rocks) เมื่อผ่านการบำบัดจะได้สารละลายโซเดียมอะลูมิเนต (NaAlO₂ solution) เมื่อนำผลิตภัณฑ์ทั้งสองผสมกันจะเกิดเจลของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ($\text{NaAlSi}_x\text{O}_y \cdot n\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเจลของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตนี้ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

Ivan C. และคณะ ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ X จากดินขาวที่ผ่านการกำจัดอะลูมิเนียมด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อปรับให้อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินามีค่าสูงขึ้น โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ความเร็วรอบในการกวน อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา และอัตราส่วนโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกา พบว่าภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนของการเกิดเจล (Gel formation Step) มีความเร็วที่ใช้ในการกวนเท่ากับ 450 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในขั้นตอนการปล่อยให้ตกผลึก (Aging Step) ภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน และในขั้นตอนของการเกิดผลึก (Crystallization Step) ภาวะที่เหมาะสมคืออุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.2 และอัตราส่วนโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ X

Na' dia Regina Camargo Fernandes Machado และคณะ ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-A และซีโอไลต์ Na-X จากเถ้าหินน้ำมัน โดยทำการเปรียบเทียบวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ 2 วิธี คือวิธีการรีฟลักซ์ (Refluxing method) และวิธีไฮโดรเทอร์มัล การสังเคราะห์จึงเริ่ม

จากการหลอมเหลวรวมกันของสารตั้งต้นกับโลหะแอลคาไลน์เพื่อสลายพันธะควอร์ตซ์ซึ่งเป็นแหล่งซิลิกาในสารตั้งต้น จากการศึกษาพบว่าที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณ Na-X ในผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการรีฟลักซ์ใช้เวลา 2.5 ชั่วโมง และที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของ Na-X ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลใช้เวลา 12 ชั่วโมง และที่ 96 ชั่วโมงของการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไฮดรอกซิลโซดาไลต์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทั้งสองวิธีคือซีโอไลต์ Na-X โดยที่ปริมาณผลึกของซีโอไลต์ Na-X ในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นกับเวลา แต่ในส่วนของซีโอไลต์ Na-A ปริมาณผลึกในผลิตภัณฑ์จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา

Sanhueza V. และคณะ ศึกษาการนำดินขาวมาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด Na-A ตัวแปรในการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อซิลิกา อัตราส่วนของน้ำต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เวลา และอุณหภูมิ โดยใช้ X-ray diffraction, Infrared spectroscopy, Scanning electron microscopy, Differential thermal analysis และ Cation exchange capacity วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์พบว่าภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ คือ อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา โซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อซิลิกา และน้ำต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5, 1.0 และ 50 ตามลำดับ ที่เวลา 15 ชั่วโมง อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Terzano R. และคณะ ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ทางเกษตรกรรมเพื่อลดมลภาวะที่เกิดขึ้น โดยทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาน้อยกว่า 1 จะเกิดซีโอไลต์ P และที่ อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินามากกว่า 1 จะเกิดซีโอไลต์ X โดยที่อุณหภูมิในการเกิดผลึกของซีโอไลต์ P จะสูงกว่าซีโอไลต์ X ใช้ X-ray diffraction และ Scanning electron microscopy ในการวิเคราะห์โครงสร้าง และพื้นผิวของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามลำดับ

Thammavong S. ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาว มีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิในการเผาในช่วง 700-900 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากับ 5, 7.5 และ 10 ตามลำดับ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากับ 2.5, 5, 7.5, 10, และ 15 ตามลำดับ มีการเติมโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) อุณหภูมิในการเกิดผลึกของซีโอไลต์ในช่วง 80-100 องศาเซลเซียส และเวลาในการเกิดผลึก (ageing period) เป็น 1, 3 และ 5 วัน พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากับ 7.5 ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากับ 10 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดผลึกของซีโอไลต์ X ที่สมบูรณ์

Vilma และคณะ ได้ศึกษาการนำดินขาวมาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด NaA ในอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา โซเดียมไดออกไซด์ต่อซิลิกา และน้ำต่อโซเดียมไดออกไซด์ เท่ากับ 1.9 หรือ 2.5 0.6 หรือ 1.0 และ 50 หรือ 90 ตามลำดับ โดยใช้เวลา 5 หรือ 15 ชั่วโมง และ อุณหภูมิ 80 หรือ 100 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาว่าตัวแปรใดบ้างที่มีผลกระทบต่อเส้นใย และ โครงสร้างของซีโอไลต์ เป็นต้น โดยใช้ X-ray diffraction, Infrared spectroscopy, Scanning electron microscopy, Differential thermal analysis และ Cation exchange capacity ซึ่งพบเงื่อนไขที่ดีในการสังเคราะห์ คือ ซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 2.5 โซเดียมไดออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 1.0 น้ำต่อโซเดียมไดออกไซด์ เท่ากับ 50 และ 15 ชั่วโมง ที่ 100 องศาเซลเซียส

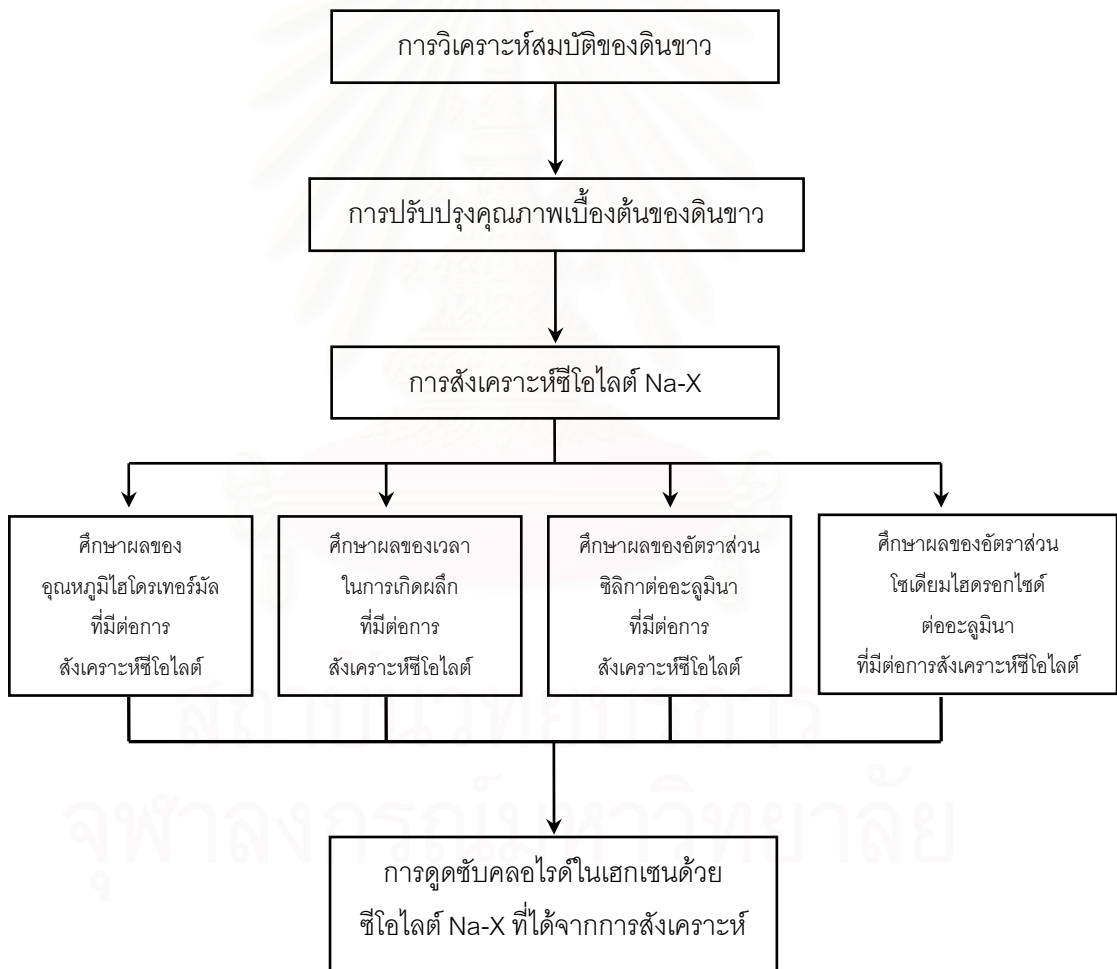
Xiong G. และคณะ ศึกษากระบวนการเกิดซีโอไลต์เอกซ์ด้วยเทคนิค UV Raman spectroscopic สังเคราะห์ซีโอไลต์จากวัตถุดิบที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1.5 ใน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่าซีโอไลต์ X เริ่มเกิดที่เวลา 2 ชั่วโมง โดยเกิดจากการรวมตัวของอะลูมิเนียมกับเบส Al(OH)_4^- และแตกตัวเป็นพันธะ Al-O ส่วนซิลิกาจะเกิดเป็น amorphous silicate หลังจากนั้นพันธะ Al-O และ amorphous silicate เปลี่ยนเป็นพันธะ Si-O-Si และ Al-O-Al และพบว่าโครงสร้างของซีโอไลต์เริ่มแรกประกอบด้วย 4-membered ring และเปลี่ยนเป็น 6 และ 12-membered ring ภายในเวลา 4 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินชาวธรรมชาติ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วนคือ การวิเคราะห์สมบัติของดินขาวที่ใช้ในการทดลอง การปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของดินขาว การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X และการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซนด้วยซีโอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ โดยขั้นตอนการวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล ภายนอกทำจากเหล็กไร้สนิม (stainless steel) เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 เซนติเมตร ยาว 11.5 เซนติเมตร ภายในทำจากเทฟลอน (teflon) เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร ยาว 11 เซนติเมตร พร้อมตู้อบแบบแกว่งได้ ดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3
2. ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) ดังรูปที่ 3.4
3. เตาเผาไฟฟ้า (muffle furnace) ดังรูปที่ 3.5
4. ชุดการรีฟลักซ์
5. ตะแกรงร่อน 325 mesh ดังรูปที่ 3.6
6. ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (stirring bar)
7. หม้อดูดความชื้น (desiccators)
8. เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 4 ตำแหน่ง
9. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter)
10. ชุดกรองพร้อมปั๊มดูดอากาศ (suction flask and vacuum pump)
11. โถปลอดความชื้น (desiccator)
12. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
13. โกร่งบดสาร (mortar)
14. กระจกทรงเบอร์ 93 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร
15. ปีกเกอร์เทฟลอน (teflon beaker) ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
16. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บสารเคมี
17. ชุดเครื่องแก้ว ประกอบด้วย ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ ขวดวัดปริมาตร ปิเปต บิวเรต แท่งแก้ว ขวดเก็บสาร กระจกนาฬิกา ถ้วยกระเบื้องทนความร้อน ฯลฯ



รูปที่ 3.2 ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัล



รูปที่ 3.3 ตู้อบแบบแกว่งได้รุ่น KH-02A ยี่ห้อ Hiro



รูปที่ 3.4 ตู้อบ (Hot Air Oven)



รูปที่ 3.5 เตาเผาไฟฟ้า (muffle furnace)



รูปที่ 3.6 ตะแกรงร่อน 325 mesh

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD)

เทคนิค X-ray diffraction (XRD) (รูปที่ 3.7) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอกซ์พลังงานสูงที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานจะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่วงในของอะตอมอนุภาคที่เป็นเป้าหลุดออกมา ทำให้เกิดออร์บิทัลว่างขึ้น อะตอมจะมีเสถียรภาพต่ำลง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าก็จะเข้ามาแทนที่ออร์บิทัลที่ว่างอยู่ การเข้ามาแทนที่นี้จะเกิดการคายพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปความร้อน และรังสีเอกซ์ และเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆกัน โดยมีตัวดีเทคเตอร์เป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกันจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างและสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณคร่าวๆ ของปริมาณความเป็นผลึกได้



รูปที่ 3.7 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ รุ่น JDX-8030 ยี่ห้อ JEOL

2. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence : XRF)

เทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometry เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำ ให้ชิ้นงานเกิดการปล่อย photon ออกมา (fluoresced) เนื่องจาก photon ที่ถูกปล่อยออกมามีพลังงานต่ำกว่าชนิดในชิ้นงานจะมีความยาว

คลื่นและพลังงานต่างกัน และเนื่องจากปริมาณของ photon ที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารนั้นๆ ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุและธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่างได้

3. เครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer Emmett-Teller adsorption : BET)

เครื่อง Surface area and porosity analyzer (รูปที่ 3.8) เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิว (surface area) ขนาดรูพรุน (pore diameter) และปริมาตรรูพรุน (pore volume) ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption measurement) โดยอาศัยหลักการวิธีของ Brunauer-Emmett-Teller (BET)



รูปที่ 3.8 เครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ

4. เครื่องสแกนิงอิเล็กตรอนไมโครสโคป (scanning electron microscope : SEM)

เครื่อง SEM (รูปที่ 3.9) เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (morphology) และขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเทคนิคที่ใช้ในช่วยให้เห็นลักษณะผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาถึงระดับอะตอม ซึ่งใช้ลำอิเล็กตรอนแทนแสง โดยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ปล่อยอิเล็กตรอนปฐุมภูมิโดยมีเลนส์รวมแสง (condenser lens) ทำหน้าที่บังคับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดและความเข้มเหมาะสมกับตัวอย่าง โดยมีขดลวดการส่องกราด (scanning coil) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวนอนและแนวตั้งบนระนาบของตัวอย่าง โดยเลนส์ใกล้วัตถุเป็นเลนส์อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดภาพชัดขึ้นและตัวตรวจวัด (detector) เป็นตัว

เปลี่ยนสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพของข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะผิวหน้าและลักษณะตัวอย่าง



รูปที่ 3.9 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กทรอนิกส์ไมโครสโคป รุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ดินขาวธรรมชาติจากแหล่งจังหวัดเพชรบูรณ์
2. โซเดียมอะลูมิเนต (sodium aluminate (anhydrous); NaAlO_2) ประกอบด้วย
 - อะลูมินา (Al_2O_3) ร้อยละ 50 ถึง 56 โดยน้ำหนัก
 - เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก
 - โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 40 ถึง 45 โดยน้ำหนัก
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , 97%) : Carlo Erba
4. กรดไฮโดรคลอริก บริสุทธิ์ร้อยละ 37 โดยน้ำหนัก ผลิตโดยบริษัท AnalaR
5. กรดซัลฟิวริก บริสุทธิ์ร้อยละ 96.60 โดยน้ำหนัก ผลิตโดยบริษัท Fisher Chemicals
6. เสกเซนจากกระบวนการผลิตโพลีเอทิลีน จากบริษัท ไทยโพลีเอทิลีน จำกัด
7. น้ำกลั่น

3.4 การดำเนินการวิจัย

เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ตัวแปรที่มีผลในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ได้แก่ อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล เวลาในการเกิดผลึก อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา โดยทำการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ภาวะ : เวลาในการเกิดผลึก 24 ชั่วโมง

อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0

อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8

ตัวแปร คือ อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส

2. ศึกษาผลของเวลาในการเกิดผลึก 24 ชั่วโมงที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ภาวะ : อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0

อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8

ตัวแปร คือ เวลาในการเกิดผลึก 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 192 และ 240 ชั่วโมง

3. ศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ภาวะ : อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส

เวลาในการเกิดผลึก 24 ชั่วโมง

อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8

ตัวแปร คือ อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 และ 6.0

4. ศึกษาผลของอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ภาวะ : อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส

เวลาในการเกิดผลึก 24 ชั่วโมง

อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0

ตัวแปร คือ อัตราส่วนของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา 2, 4, 8, 12, 16, 20 และ 24

3.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติของดินขาว

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของธาตุต่างๆ ในดินขาวธรรมชาติด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence: XRF)
2. วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของดินขาวธรรมชาติด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)
3. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและรูปร่างของผลึกของดินขาวธรรมชาติด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (scanning electron microscope : SEM)

3.5.2 การปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของดินขาว (pretreatment)

เนื่องจากดินขาวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X เป็นวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ จึงต้องนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในวัตถุดิบ การปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของดินขาวประกอบด้วย การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ (physical treatment) และทางความร้อน (thermal treatment) การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี (chemical treatment) และการสลายพันธะควอตซ์ (breaking quartz) ซึ่งขั้นตอนของการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้น ทำได้โดย

1. บดดินขาวและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh เพื่อให้ดินขาวมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.044 มิลลิเมตร
2. นำดินขาวที่ผ่านการบดและร่อนด้วยตะแกรงมาเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. นำดินขาวที่ได้จากข้อที่ 2 มาทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
4. ทำการเผาดินขาวจากข้อ 3 กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เพื่อสลายพันธะควอตซ์

3.5.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำขึ้นภายหลังจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของชาวด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยตัวแปรและค่าที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ และค่าที่กำหนด

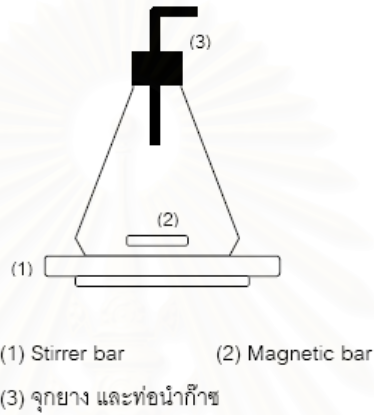
ตัวแปรที่ทำการศึกษา	ค่าที่กำหนด
อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล	80, 90, 100 องศาเซลเซียส
เวลาในการเกิดผลึก	6, 12, 24, 48, 72, 96, 120, 144, 192, 240 ชั่วโมง
อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0
อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา	2, 4, 8, 12, 16, 20, 24

ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ทำได้โดย

1. นำดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นจนผสมในสารละลายเบสโดยให้ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาที่ต้องการ ปรับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาด้วยโซเดียมอะลูมิเนต
2. นำสารละลายใส่เครื่องปฏิกรณ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (aging)
3. ให้อุณหภูมิกับเครื่องปฏิกรณ์ซึ่งอุณหภูมินี้เรียกว่าอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล และระยะเวลาในขั้นตอนนี้เรียกว่าเวลาในการเกิดผลึก
4. จากนั้นทำการกรองและล้างซีโอไลต์ที่ได้จนมี pH น้อยกว่า 9 หรือเป็นกลาง
อบซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

3.5.4 การดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซน

1. ชั่งน้ำหนักซีไอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ โดยให้มีอัตราส่วนของซีไอไลต์ต่อเฮกเซน เท่ากับ 1 กรัมต่อ 20 มิลลิลิตร
2. แช่ซีไอไลต์ในเฮกเซน กวนตลอดเวลา 24 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.10 ตรวจสอบปริมาณคลอไรด์ด้วย potentiometric titration (UOP method 588-94)



รูปที่ 3.10 ชุดการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซนแบบแบตเตอรี่

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของดินขาว

ดินขาวที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ในงานวิจัยนี้เป็นดินขาวจากจังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งเป็นดินขาวธรรมชาติ มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีของดินมีสีขาว ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ดินขาวธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

4.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆ ในดินขาวธรรมชาติด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence: XRF)

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาว สามารถวิเคราะห์ได้จากเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) เพื่อหาชนิดและปริมาณธาตุที่อยู่ในดินขาวธรรมชาติ โดยแสดงผลในรูปของสารประกอบออกไซด์ของธาตุ ดังแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าองค์ประกอบหลักของดินขาวธรรมชาติประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยปริมาณซิลิกา และอะลูมินาที่มีอยู่ในดินขาวมีค่าเท่ากับร้อยละ 74.17 และ 11.96 โดยน้ำหนักตามลำดับ หรือมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 6.20

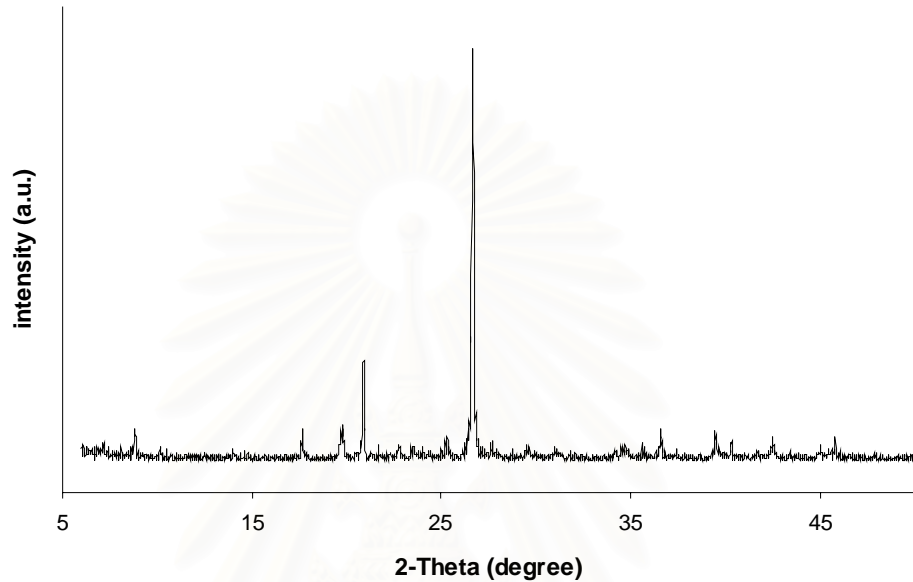
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวธรรมชาติ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Component	Content (% Weight)
SiO ₂	74.17
Al ₂ O ₃	11.96
K ₂ O	4.16
Fe ₂ O ₃	1.19
TiO ₂	0.1336
BaO	0.0437
ZrO ₂	0.0339
Rb ₂ O	0.0301
Y ₂ O ₃	0.0100
MnO	0.0075
ZnO	0.0059
CuO	0.0042
organic matter	8.25

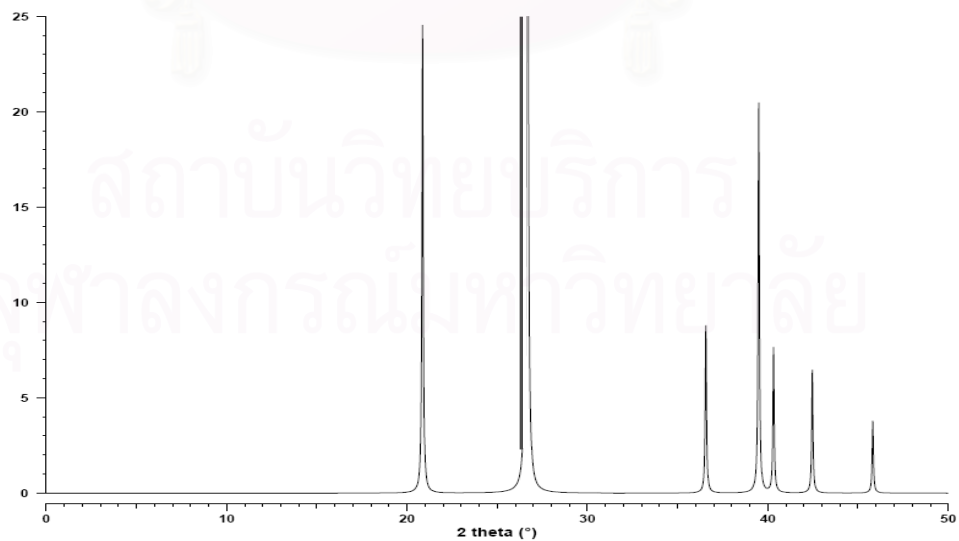
4.1.2 การวิเคราะห์สมบัติของดินขาวธรรมชาติด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD)

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) แสดงรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของดินขาวธรรมชาติดังรูปที่ 4.2 ปรากฏเส้นพีกที่มีความคมซึ่งเป็นลักษณะของความเป็นผลึก (crystalline) ของสารตัวอย่าง ดังนั้นจากรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของดินขาวธรรมชาติจึงสามารถบอกได้ถึงความเป็นผลึกของดินขาว จากการเปรียบเทียบรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของดินขาวกับรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันพีกของแอลฟาควอตซ์ (alpha quartz) ดังรูป 4.3 พบว่ารูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันปรากฏพีกตามแกน 2 theta ที่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งแสดงว่าดินขาวมีแอลฟาควอตซ์ เป็นองค์ประกอบ ซึ่งควอตซ์คือรูปหนึ่งของซิลิกาไดออกไซด์ (SiO₂) ที่มีความเสถียรที่สุด ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าซิลิกาในดินขาวอยู่ในรูปของแอลฟาควอตซ์ และจาก

รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของดินขาวที่ปรากฏพีคในตำแหน่ง 2 theta เท่ากับ 8.8, 17.6 และ 19.8 ซึ่งเป็นตำแหน่งของแร่ Kaolinite ซึ่งเป็นหนึ่งในกลุ่มแร่ตระกูลของอะลูมิเนียมซิลิเกตแร่ Kaolinite พบอยู่ในดินมากที่สุด จึงจัดได้ว่ามีความสำคัญมากกว่าแร่ดินชนิดอื่นๆ



รูปที่ 4.2 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพีคของดินขาวธรรมชาติ

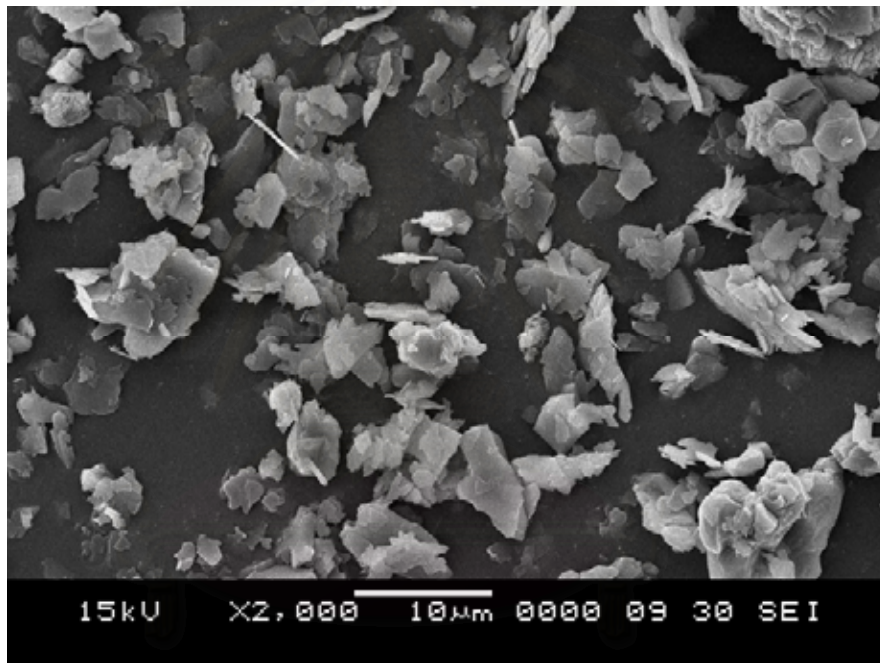


รูปที่ 4.3 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพีคของแอลฟาควอตซ์

(M.M.J. Treacy and Higgins, 2001)

4.1.3 การวิเคราะห์สมบัติของดินขาวธรรมชาติด้วยเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (scanning electron microscope : SEM)

เมื่อพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างของดินขาว ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงให้เห็นลักษณะผลึกของดินขาวเป็นแผ่นเหลี่ยม บาง ซ้อนกันเป็นชั้น ขนาดของผลึกของดินขาวประมาณ 1.2 ถึง 10 ไมครอน ดังรูป 4.4 และเมื่อพิจารณารูปทรงผลึกของดินขาวจากรูปที่ 4.4 พบว่ามีลักษณะเป็นผลึก มีเหลี่ยม มีมุม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ที่ให้รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันปรากฏเส้นพีคที่มีความคมแสดงให้เห็นถึงความเป็นผลึก (crystalline) ของดินขาว



รูปที่ 4.4 ภาพถ่าย SEM ของดินขาวธรรมชาติ กำลังขยาย 2,000 เท่า

4.2 การปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นของดินขาว

เนื่องจากดินขาวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X เป็นวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ จึงต้องนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในวัตถุดิบ และปรับปรุงคุณภาพเพื่อให้พร้อมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวประกอบด้วย การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ (physical treatment) การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน (thermal treatment) และการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี (chemical treatment) นอกจากนี้ยังมีการสลายควอตซ์ (breaking quartz) เพื่อให้ดินขาวพร้อมที่จะใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

4.2.1 การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพและทางความร้อนของดินขาว (physical and thermal treatment)

การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพของดินขาวทำได้โดยการบดและคัดขนาดด้วยตะแกรง (sieve) เพื่อให้ดินขาวมีขนาดอนุภาคเล็กลง ซิลิกาที่อยู่ในรูปของควอตซ์มีความเสถียรลดลง และสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสได้ง่ายขึ้น การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนทำได้โดยเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง การปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนทำขึ้นเพื่อเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในดินขาว และยังเป็นการเปลี่ยนโครงสร้างของดินขาว จาก Kaolin ไปเป็น Metakaolin ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า เมื่อดินขาวผ่านการปรับปรุงคุณภาพทางความร้อน ดินขาวจะมีสีเข้มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับดินขาวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ดินขาวธรรมชาติก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน

และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของดินขาวด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณของซิลิกาในดินขาวมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 74.17 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 79.06 โดยน้ำหนัก หรือมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) เพิ่มขึ้นจาก 6.20 เป็น 6.94 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อดินขาวผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูง สารประกอบอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในดินขาวจะสลายตัว ทำให้อัตราส่วนของซิลิกาที่มีอยู่ในดินขาวมีค่าสูงขึ้น ปริมาณของซิลิกาในดินขาวที่แสดงในรูปแบบร้อยละโดยน้ำหนักจึงมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Component	Natural Kaolin (wt.%)	Calcined Kaolin (wt.%)
SiO_2	74.17	79.06
Al_2O_3	11.96	11.40
K_2O	4.16	3.98
Fe_2O_3	1.19	1.19
organic matter	8.25	4.10
Others	0.27	0.27

4.2.2 การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี (chemical treatment)

การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีทำได้โดยการรีฟลักซ์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กับสารละลายกรดและเบสที่มีความเข้มข้นต่างๆ กันดังนี้ กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อกำจัดเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกจากดินขาวเนื่องจากเหล็กออกไซด์เป็นตัวขัดขวางอะลูมินัมในการเกิดเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่ากรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และ 4 โมลต่อลิตร สามารถลดปริมาณเหล็กออกไซด์ได้จากร้อยละ 1.19 โดยน้ำหนัก เป็นร้อยละ 0.41 และร้อยละ 0.44 โดยน้ำหนักตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Component	(wt.%)					
	1M HCl	4M HCl	1M H ₂ SO ₄	4M H ₂ SO ₄	1M NaOH + 1M HCl	1M NaOH +1M H ₂ SO ₄
SiO ₂	82.67	82.64	81.21	80.98	82.11	81.36
Al ₂ O ₃	11.31	11.32	11.35	11.32	11.33	11.34
K ₂ O	3.34	3.43	3.53	3.49	3.45	3.42
Fe ₂ O ₃	0.41	0.44	1.44	1.67	0.42	1.41
Others	2.27	2.17	2.47	2.54	2.69	2.47

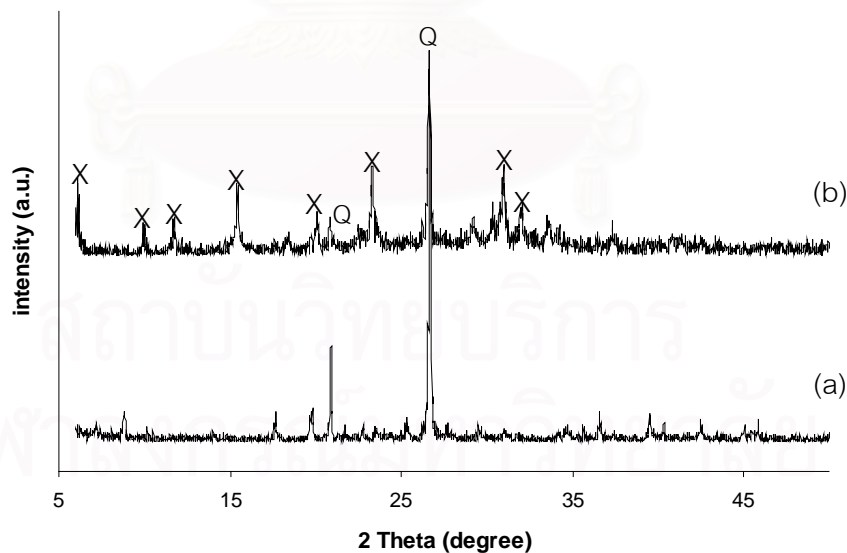
การรีฟลักซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 และ 4 โมลต่อลิตร ไม่สามารถลดปริมาณเหล็กออกไซด์ได้ ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณเหล็กออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของโลหะออกไซด์ เช่น TiO₂, BaO, ZrO₂ และ Rb₂O เป็นต้น ทำให้อัตราส่วนขององค์ประกอบอื่นๆ ในดินขาวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น อัตราส่วนของเหล็กออกไซด์จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย และการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์แล้วตามด้วยสารละลายกรด ไม่ส่งผลต่อปริมาณเหล็กออกไซด์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการลดปริมาณเหล็กออกไซด์ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารเคมี แต่จะขึ้นกับชนิดของสารเคมีเท่านั้น โดยการรีฟลักซ์ด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ทำให้ปริมาณเหล็กออกไซด์ลดลงมากที่สุด

4.2.3 การสลายควอตซ์ (breaking quartz)

จากการวิเคราะห์สมบัติของดินขาวด้วยเทคนิค XRD พบว่าซิลิกาในดินขาวจะอยู่ในรูปของแอลฟาควอตซ์ (alpha quartz) ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรที่สุด ความเสถียรของควอตซ์จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 575 องศาเซลเซียสและความดันสูงกว่า 1,000 บาร์ แต่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ทำขึ้นที่อุณหภูมิและความดันไม่สูงเพียงพอที่จะลดความเสถียรของควอตซ์ได้ ดังนั้นก่อนนำดินขาวมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องสลายควอตซ์ เพื่อให้ซิลิกาสามารถทำปฏิกิริยากับเบสและเกิดเป็นซีโอไลต์ได้ การสลายควอตซ์ทำได้โดยการบด (mill) และคัดขนาดด้วยตะแกรง (sieve) เพื่อให้ดินขาวมีอนุภาคเล็กลง จากนั้นก็ทำการ

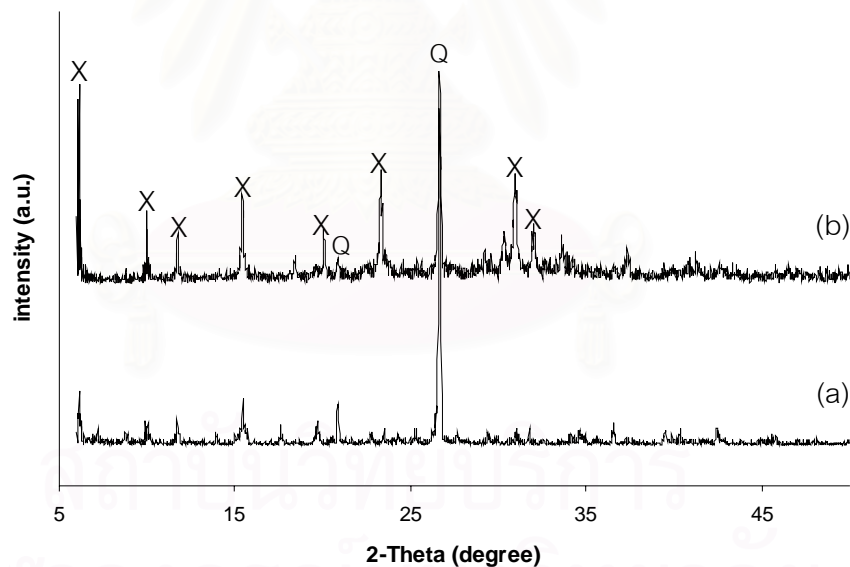
หลอมเหลว (fusion) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งผลของการสลายควอดซ์ที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X แสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

การศึกษาผลของขนาดอนุภาคดินขาวที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ทำได้โดยบดและคัดขนาดดินขาวด้วยตะแกรงขนาด 200 mesh และ 325 mesh โดยดินขาวที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงจะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร และ 0.044 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ซึ่งแสดงรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน และเปรียบเทียบรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X, Hydrated ดังรูป 4.8 กับรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 200 mesh ดังรูปที่ 4.6(a) พบว่าไม่สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X เนื่องจากไม่ปรากฏพีคตามแกน 2 theta ที่ตำแหน่งเดียวกัน และจากการเปรียบเทียบรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X, Hydrated กับรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh ดังรูปที่ 4.6 (b) พบว่าปรากฏพีคตามแกน 2 theta ที่ตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งแสดงว่าดินขาวที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

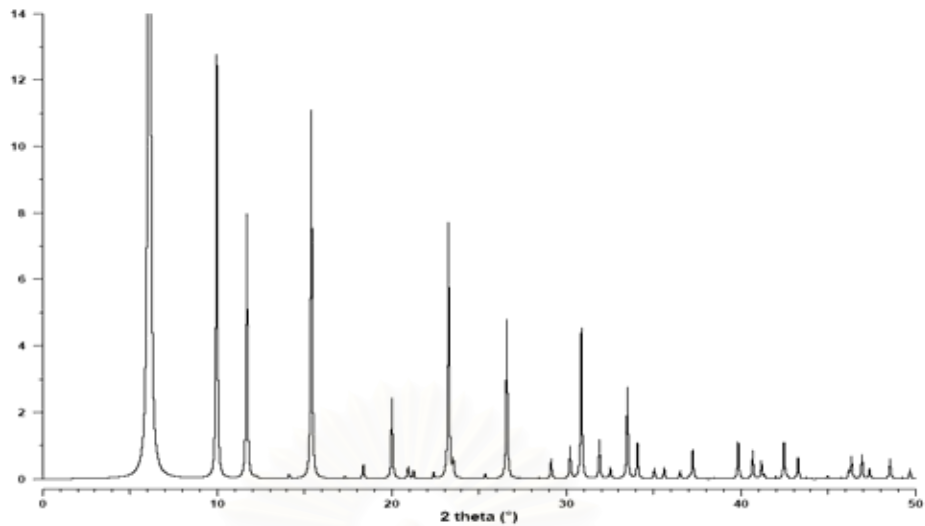


รูปที่ 4.6 รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาดต่างกัน
(a) ดินขาวที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 200 mesh
(b) ดินขาวที่ผ่านการคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh

จากการศึกษาผลของการสลายควอตซ์ที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X โดยนำดินขาวที่ใช้ในการสังเคราะห์ผ่านการบด และคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 325 เมช มาทำการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) และเปรียบเทียบรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันกับซีโอไลต์ Na-X (รูปที่ 4.8) พบว่ารูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันปรากฏพีคตามแกน 2 theta ที่ตำแหน่งเดียวกัน แสดงว่าทั้งดินขาวที่ผ่านและไม่ผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ และเมื่อความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 2-theta ของซีโอไลต์ Na-X พบว่าในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวที่ผ่านการสลายควอตซ์ด้วยการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์มีร้อยละผลได้ ซึ่งคิดจากอัตราส่วน intensity ของพีค XRD มากกว่าการสังเคราะห์จากดินขาวที่ไม่ผ่านการสลายควอตซ์ โดยร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากดินขาวที่ไม่ผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 29.5 ดังรูปที่ 4.7 (a) และซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากดินขาวที่ไม่ผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีร้อยละผลได้เท่ากับ 71.1 ดังรูปที่ 4.7 (b)

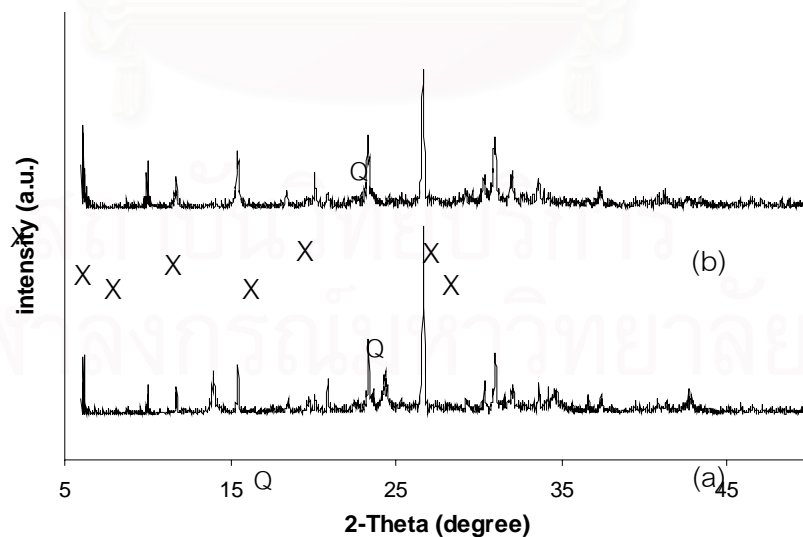


รูปที่ 4.7 รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านและไม่ผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์
(a) ดินขาวที่ผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์
(b) ดินขาวที่ไม่ผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์



รูปที่ 4.8 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีไอไลต์ Na-X, Hydrated
(M.M.J. Treacy and Higgins, 2001)

เพื่อศึกษาผลของเหล็กที่เจือปนอยู่ในดินขาวจึงทำการเปรียบเทียบการสังเคราะห์ซีไอไลต์ Na-X จากดินขาวที่ไม่มีการกำจัดเหล็ก และดินขาวที่ผ่านการกำจัดเหล็กด้วยการรีฟลักซ์กับกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีไอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 รูปแบบ XRD ของซีไอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้
จากดินขาวที่ไม่มีการกำจัดเหล็ก และดินขาวที่ผ่านการกำจัดเหล็ก
(a) ดินขาวที่ไม่มีการกำจัดเหล็ก (b) ดินขาวที่ผ่านการกำจัดเหล็ก

การสังเคราะห์ทำที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดผลึกเท่ากับ 24 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 2 และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8 พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวที่ผ่านการกำจัดเหล็กด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 โมลต่อลิตร มีร้อยละผลได้มากกว่าในกรณีการสังเคราะห์จากดินขาวที่ไม่มีการกำจัดเหล็กทำให้สามารถสรุปได้ว่าเหล็กที่อยู่ในดินขาวมีความสำคัญต่อปริมาณซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กเป็นตัวขัดขวางอะลูมินัมในการเกิดเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากในการกำจัดเหล็กออกจากดินขาวก่อนทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้คิดจากอัตราส่วน intensity ของพีค XRD โดยซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์จากดินขาวที่ไม่มีการกำจัดเหล็กออกไซด์ ดังรูป 4.9 (a) มีร้อยละผลได้เท่ากับ 51.1 และซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์จากดินขาวที่ผ่านการกำจัดเหล็กออกไซด์ ดังรูป 4.9 (b) มีร้อยละผลได้เท่ากับ 71.1

4.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

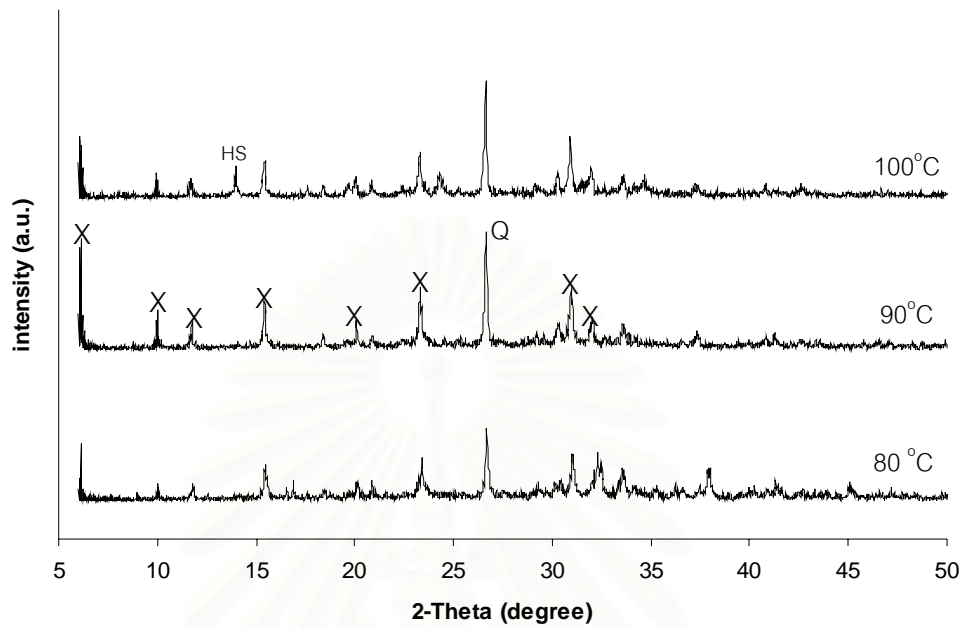
เมื่อดินขาวธรรมชาติที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ซึ่งวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะถูกทำขึ้นด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส ปรับอัตราส่วนซิลิกาและโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา นำสารละลายใส่เครื่องปฏิกรณ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (aging) จากนั้นให้อุณหภูมิกับเครื่องปฏิกรณ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล เวลาในการเกิดผลึก อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

4.3.1 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

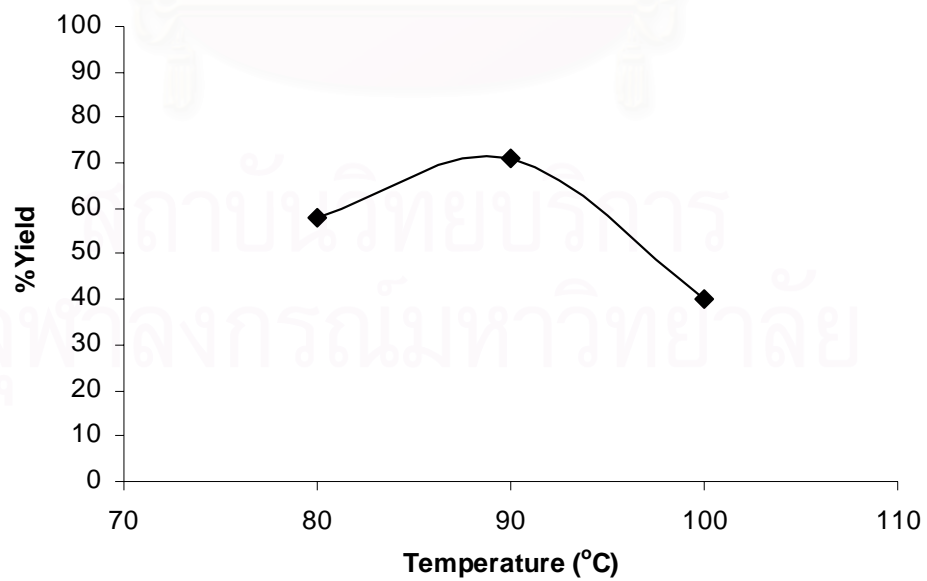
ซีโอไลต์ X เป็นซีโอไลต์ที่ไวต่ออุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลที่ใช้ในการสังเคราะห์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ปริมาณของซีโอไลต์ X ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงได้ และเนื่องจากวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X เป็นวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ ดังนั้นจึงต้องทำการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากวัตถุดิบธรรมชาตินั้นก่อน และจากการศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลที่มีต่อปริมาณซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้น ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิของการเกิดซีโอไลต์ Na-X เวลาในการเกิดผลึกเท่ากับ 24 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2 และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8 วิเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD ซึ่งแสดงรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันดังรูปที่ 4.10 พบว่ารูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส มีความสูงของพีคที่ตำแหน่ง 2-theta ของซีโอไลต์ Na-X มากที่สุด ซึ่งแสดงปริมาณซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้นมากที่สุด

ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.11 ที่อุณหภูมิไฮโดร-เทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้มีค่าเท่ากับ 71.1 และที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 80 และ 100 องศาเซลเซียสมีร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X เท่ากับ 58.2 และ 40.2 ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เนื่องจากมีร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X มากที่สุด ดังนั้นในงานวิจัยนี้

จึงได้เลือกใช้อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลที่ 90 องศาเซลเซียส ในการศึกษาตัวแปรอื่นๆต่อไป



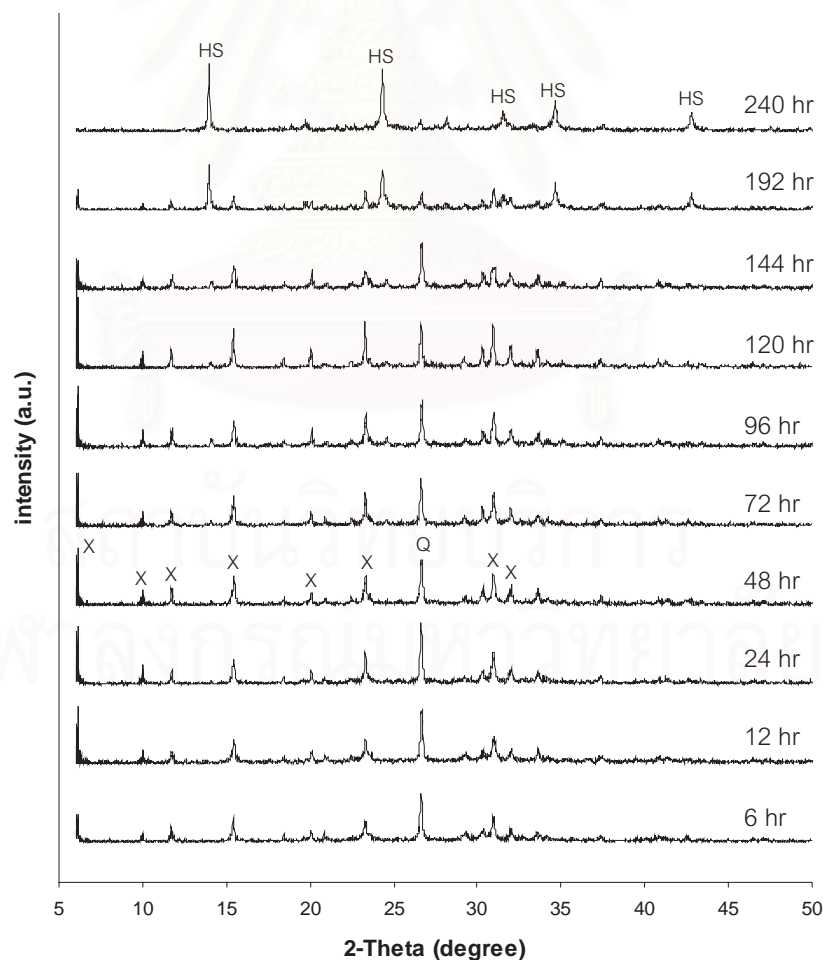
รูปที่ 4.10 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ



รูปที่ 4.11 กราฟร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลต่าง ๆ

4.3.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

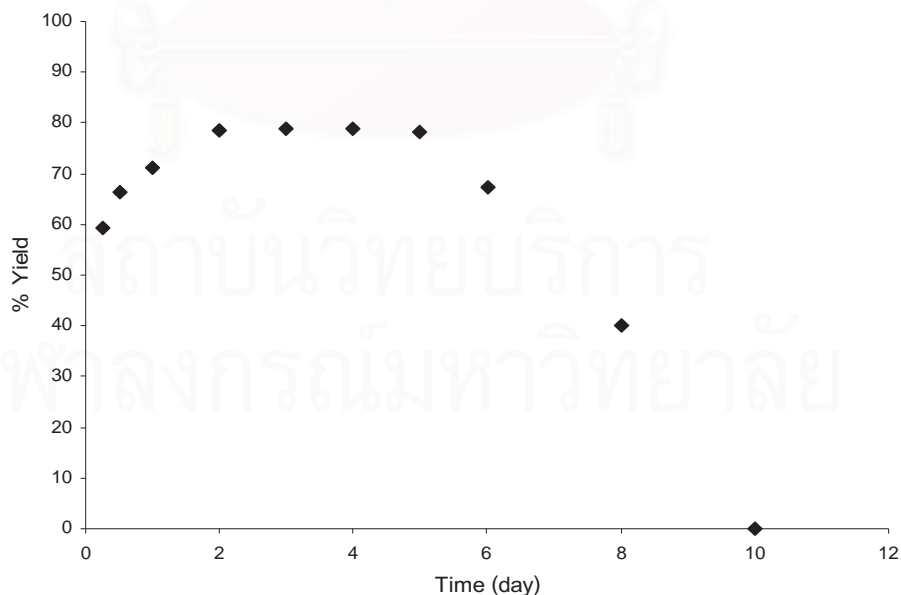
ในการศึกษาผลของเวลาต่อปริมาณของซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้น โดยทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ให้ร้อยละผลได้มากที่สุด อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8 และทำการศึกษาผลของเวลาในการเกิดผลึกตั้งแต่ 6 ถึง 240 ชั่วโมงหรือ 10 วัน รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่า intensity ที่ตำแหน่ง 2-Theta ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้มีความสูงของพีค XRD เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 6 จนถึง 48 ชั่วโมงแสดงว่าปริมาณซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ที่เวลาดั้งแต่ 48 จนถึง 120 ชั่วโมงหรือ 5 วัน ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จะมีปริมาณคงที่ ซึ่งสังเกตได้จากความสูงของพีค XRD ที่คงที่



รูปที่ 4.12 รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ใน เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส

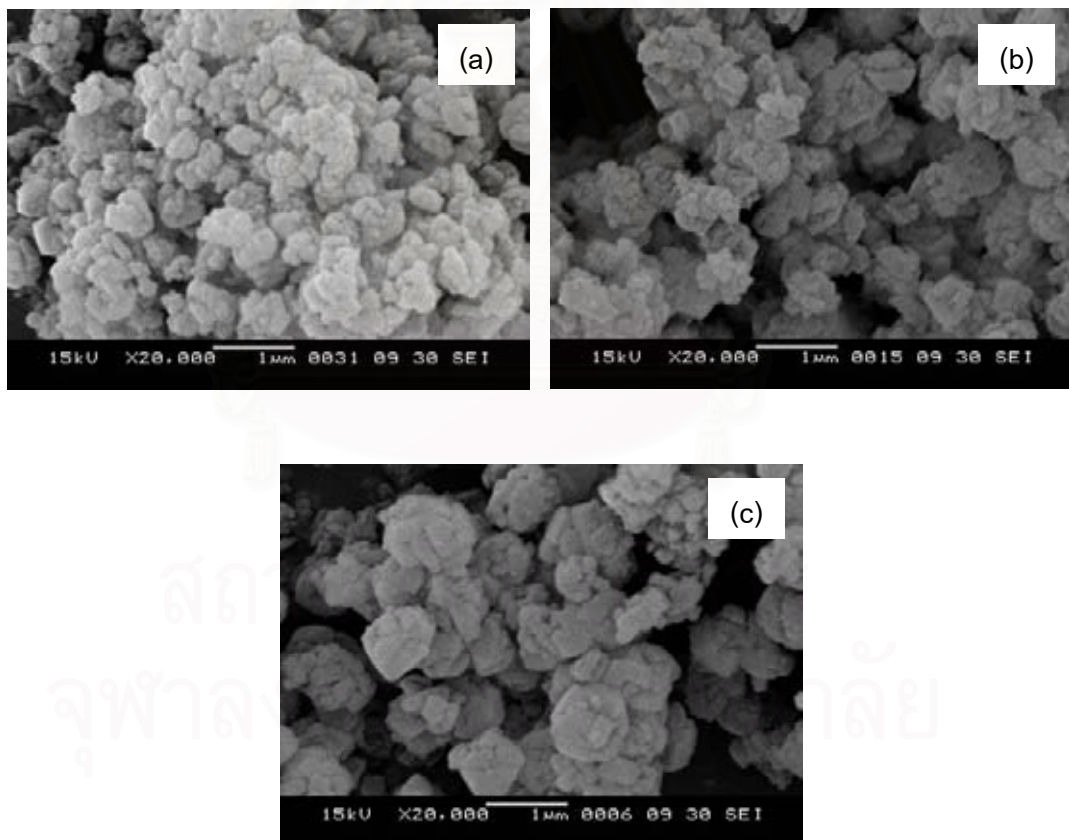
แต่เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นมากกว่า 120 ชั่วโมง ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จะมีปริมาณลดลง เนื่องจากเริ่มมีการเปลี่ยนรูปของซีโอไลต์ Na-X ไปเป็นไฮดรอกซิลโซดาไลต์ (hydroxyl soldalite) และที่เวลา 240 ชั่วโมง หรือ 10 วัน ซีโอไลต์ Na-X จะเปลี่ยนรูปเป็นไฮดรอกซิลโซดาไลต์โดยสมบูรณ์ ซึ่งเป็นซีโอไลต์ที่มีความเป็นผลึกและความเสถียรมากกว่า ซึ่งดูได้จากตำแหน่งของพีคของรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของไฮดรอกซิลโซดาไลต์ ที่แกน 2-Theta ปรากฏที่ตำแหน่ง 2-Theta มากกว่ารูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X

ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส ที่เวลา 6 ถึง 240 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าค่าร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 48 ชั่วโมงแรก จากนั้นจะมีค่าคงที่ และร้อยละผลได้ของซีโอไลต์จะมีค่าลดลงหลังจาก 120 ชั่วโมง เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของซีโอไลต์ Na-X ไปอยู่ในรูปไฮดรอกซิลโซดาไลต์ และจะเกิดเป็นไฮดรอกซิลโซดาไลต์โดยสมบูรณ์ที่เวลา 240 ชั่วโมง จึงสามารถสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X คือ 48 ชั่วโมง โดยมีร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X เท่ากับ 78.5



รูปที่ 4.13 กราฟร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ ใน เวลาต่างๆ ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส

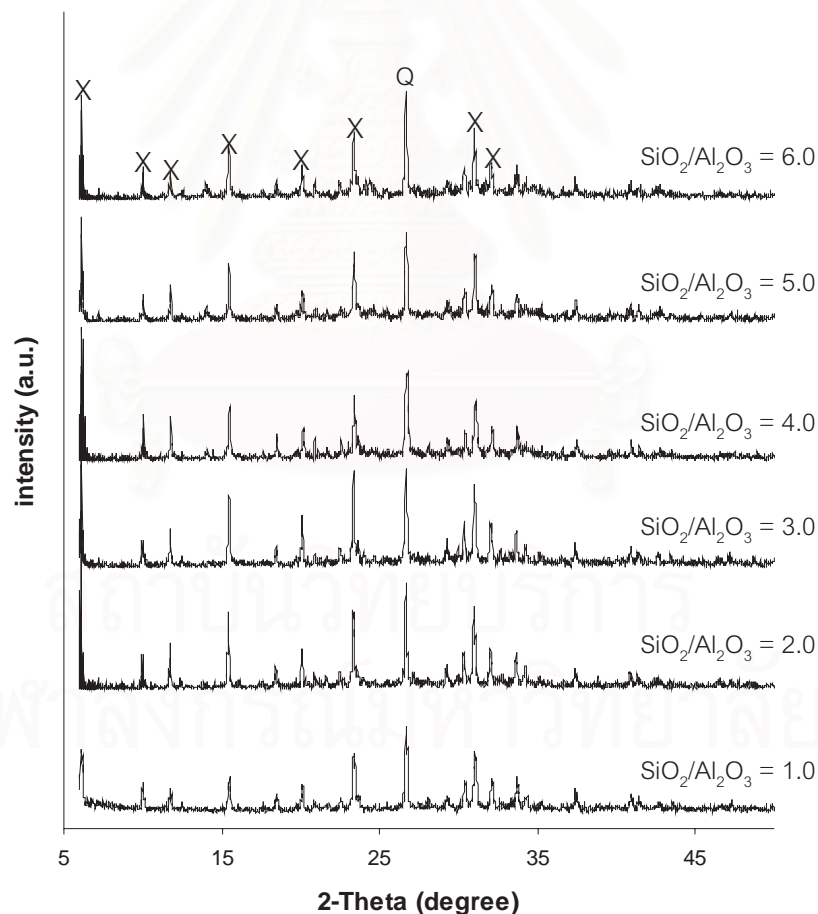
เมื่อพิจารณาจากลักษณะผลึกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่เวลาต่างๆ ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ลักษณะผลึกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ในตอนแรกจะมีลักษณะเป็นเจด ดังรูปที่ 4.14(a) ขนาดผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.14 (b) และเกิดเป็นผลึกสมบูรณ์ที่เวลาในการสังเคราะห์เท่ากับ 48 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.14 (c) โดยผลึกของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ขึ้นในรูปที่ 4.14 (a) และ (b) มีขนาดประมาณ 0.2 ถึง 0.5 ไมครอน แตกต่างกันตรงที่รูป 4.14 (b) ผลึกซีโอไลต์จะปรากฏเหลี่ยมและมุม ซึ่งแสดงความเป็นผลึกที่เพิ่มของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้กับเวลา และรูปที่ 4.14 (c) มีขนาดของผลึกของซีโอไลต์ประมาณ 1 ไมครอน และมีเหลี่ยมมีมุมที่ชัดเจน



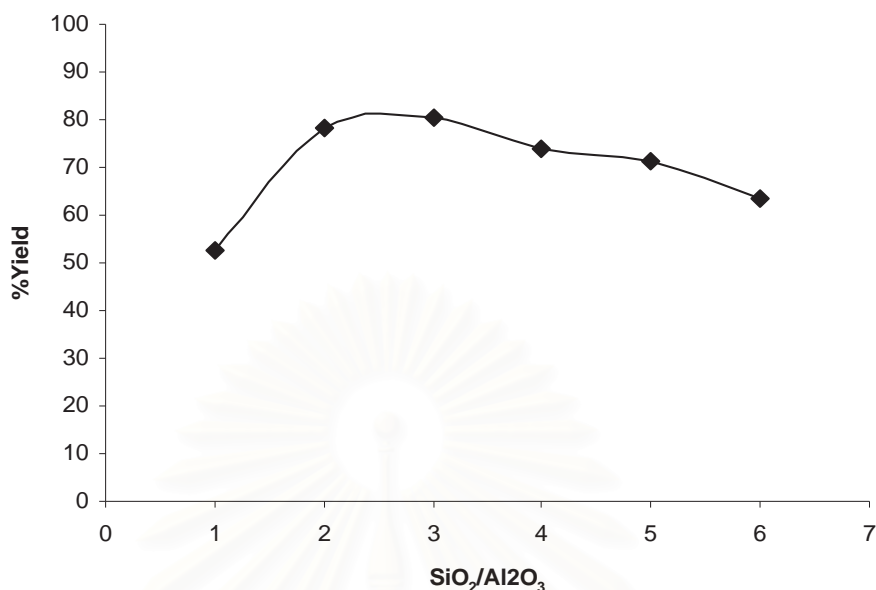
รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่เวลาต่างๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า (a) ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่เวลา 6 ชั่วโมง, (b) 12 ชั่วโมง และ (c) 48 ชั่วโมง

4.3.3 ผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่มีต่อปริมาณซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้น ทำการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1.0 ถึง 6.0 อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดผลึกเท่ากับ 48 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8 เมื่อวิเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD (รูปที่ 4.15) พบว่ารูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0 มีความสูงของพีค หรือ intensity ที่ตำแหน่ง 2-theta ของซีโอไลต์ Na-X มากที่สุด โดยร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.16 ที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0 ร้อยละผลได้มีค่าเท่ากับ 80.6 ซึ่งเป็นค่าร้อยละผลได้ที่มากที่สุด ดังนั้นอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X คือ 3.0



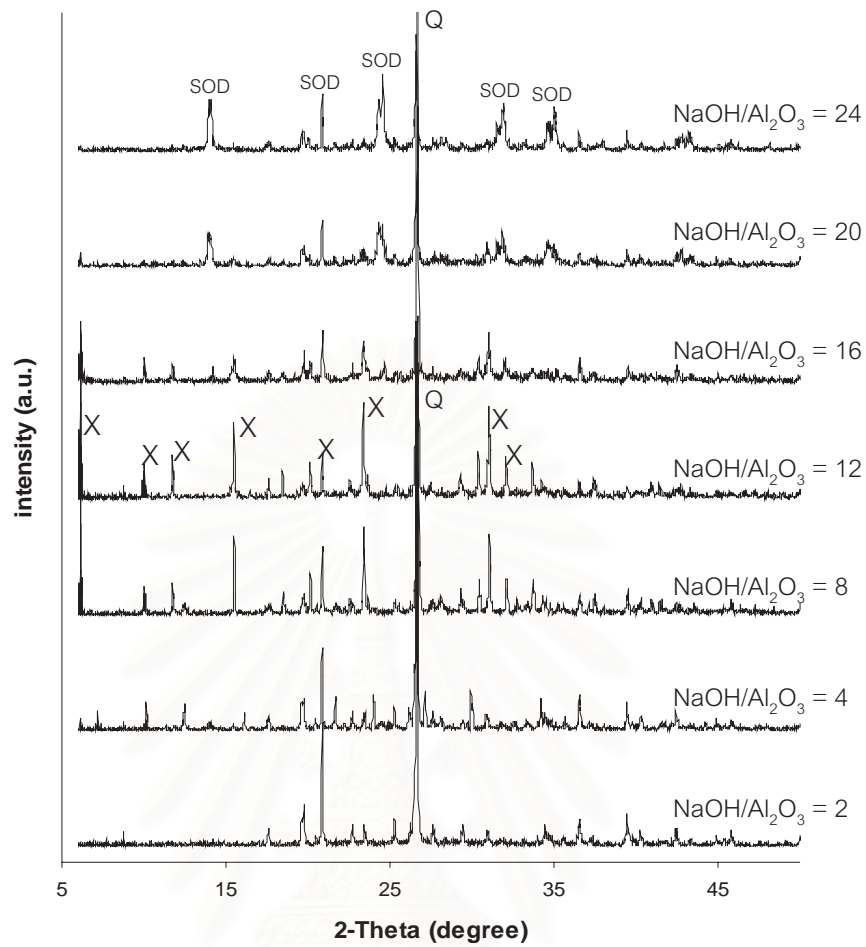
รูปที่ 4.15 รูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่างๆ กัน



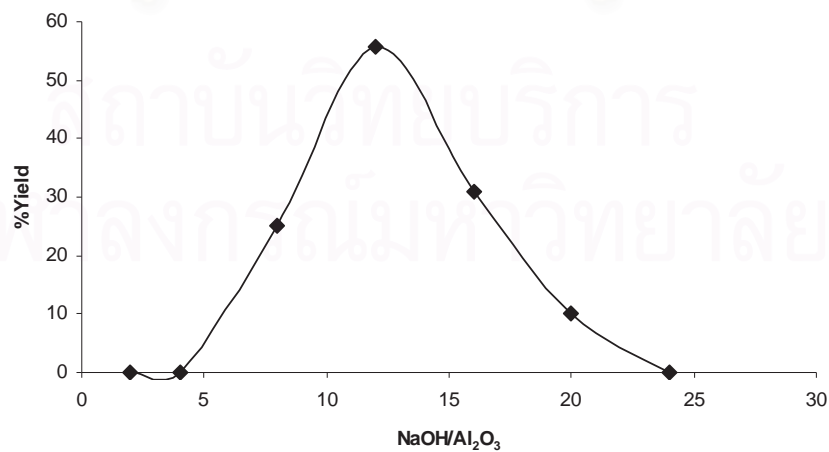
รูปที่ 4.16 ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ ที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่างๆ กัน

4.3.4 ผลของอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินามีต่อปริมาณ ซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้น โดยทำการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา ตั้งแต่ 2 ถึง 24 อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดผลึกเท่ากับ 48 ชั่วโมง และอัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้มีรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน แสดงดังรูปที่ 4.17 พบว่าที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 12 มีความสูงของพีคหรือ intensity ที่ตำแหน่ง 2-theta ของซีโอไลต์ Na-X มากที่สุด ซึ่งแสดงถึงปริมาณซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้นมากที่สุด ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.18 ที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 12 ร้อยละผลได้มีค่าเท่ากับ 55.7 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เกิดปริมาณซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้นมากที่สุด ดังนั้นอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวธรรมชาติคือ 12



รูปที่ 4.17 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาต่างๆ กัน



รูปที่ 4.18 ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาต่างๆ กัน

4.4 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

หลังจากศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X โดยใช้ดินขาวเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในครั้งนี้ ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล เวลาในการเกิดผลึก อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ วิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีผลในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ทำให้สามารถหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ได้ โดยภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ และร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้น มีค่ามากที่สุดเมื่ออุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดผลึกเท่ากับ 48 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0 และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 12

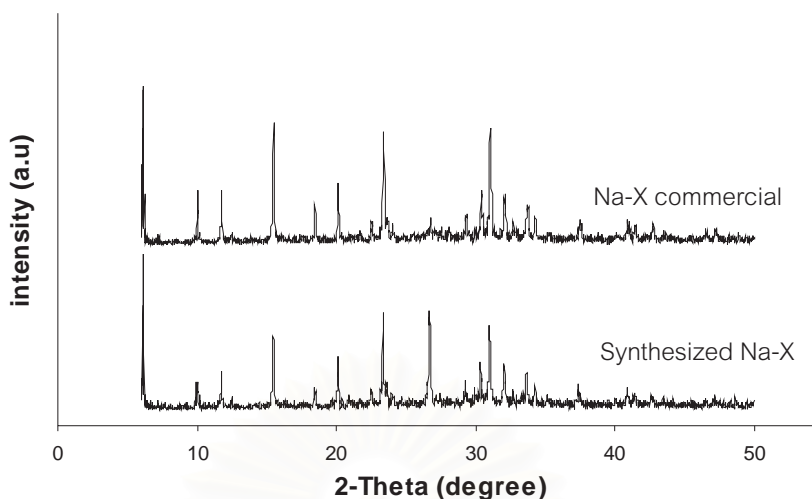
ตารางที่ 4.4 ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นที่ภาวะในการสังเคราะห์ต่างๆ

parameter	hydrothermal temperature (°C)	crystallization time (hr)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	NaOH/Al ₂ O ₃	% Yield of Na-X
temperature	80				58.2
	90	24	2.0	8.0	71.1
	100				44.8
crystallization time	90	6	2.0	8.0	59.5
		12			66.5
		24			71.1
		48			78.5
		72			78.8
		96			78.7
		120			78.3
		144			67.4
		192			39.9
240	0.0				

ตารางที่ 4.4 ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นที่ภาวะในการสังเคราะห์ต่างๆ (ต่อ)

parameter	hydrothermal temperature (°C)	crystallization time (hr)	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	NaOH/Al ₂ O ₃	% Yield of Na-X
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	90	48	1.0	8.0	52.7
			2.0		78.2
			3.0		80.6
			4.0		73.4
			5.0		71.5
			6.0		63.5
NaOH/Al ₂ O ₃	90	48	2.0	2.0	0.0
				4.0	0.0
				8.0	25.2
				12.0	55.7
				16.0	31.0
				20.0	41.8
	24.0	40.7			

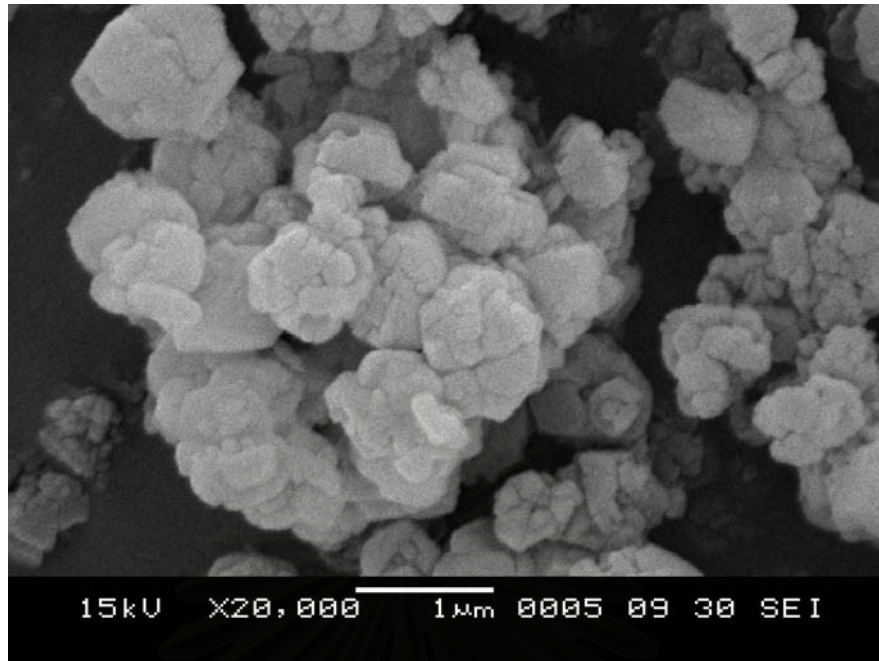
ผลจากการวิเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) แสดงรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ขึ้นเปรียบเทียบกับรูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรมดังรูปที่ 4.19 พบว่ารูปแบบเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันปรากฏพีคตามแกน 2 theta ที่ตำแหน่งเดียวกัน ยกเว้นที่ตำแหน่ง 2 theta เท่ากับ 26.6 ซึ่งเป็นตำแหน่งของแอลฟาควอตซ์ ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของซิลิกาที่มีอยู่ในดินขาวที่ใช้เป็นสารตั้งต้น โดยร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ขึ้นมีค่าเท่ากับ 88.4



รูปที่ 4.19 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้
เปรียบเทียบกับซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

จากการตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรมด้วยเทคนิค Brunauer Emmett-Teller adsorption (BET) พบว่าซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 395.30 ตารางเมตรต่อกรัม และซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 474.37 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้คิดเป็นร้อยละ 83.33 ของพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากในผลิตภัณฑ์มีปริมาณซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้เท่ากับร้อยละ 88.4 จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค Brunauer Emmett-Teller adsorption มีค่าน้อยกว่าพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

จากการพิจารณาลักษณะผลึกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า ดังรูป 4.20 ลักษณะผลึกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ปรากฏเหลี่ยม และมุม ซึ่งแสดงของความเป็นผลึกของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ที่แสดงรูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันที่มีความคมของพีคซึ่งแสดงถึงความเป็นผลึกขนาดของผลึกของซีโอไลต์ประมาณ 1 ไมครอน



รูปที่ 4.20 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่ภาวะดีที่สุดที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

จากการทดสอบการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซนที่เป็นตัวทำละลายใช้แล้วจากกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โดยใช้ซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของคลอไรด์ในเฮกเซนเท่ากับ 1,121 ppm ทดสอบการดูดซับคลอไรด์ด้วยซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้ อัตราส่วนของตัวดูดซับซีโอไลต์ Na-X 1 กรัม ต่อตัวทำละลายเฮกเซน 20 มิลลิลิตร เวลาที่ในการดูดซับเท่ากับ 48 ชั่วโมง พบว่าสามารถลดปริมาณคลอไรด์ในเฮกเซนได้ โดยความเข้มข้นของคลอไรด์ในเฮกเซนหลังผ่านการดูดซับเท่ากับ 782 ppm ซึ่งคิดเป็นร้อยละการกำจัดเท่ากับ 30.24 และความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 293.3 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ และเมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับคลอไรด์ด้วยซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรมซึ่งมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 228 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ซึ่งซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้มีความสามารถในการดูดซับมากกว่าซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรม

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินชาวธรรมชาติด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลในวิทยานิพนธ์นี้ได้ข้อสรุปดังนี้

5.1.1 การวิเคราะห์สมบัติของดินขาวที่ใช้ในการทดลอง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) พบว่าองค์ประกอบหลักของดินขาวธรรมชาติประกอบด้วยซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 6.20 จากการวิเคราะห์ดินขาวด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ทำให้ทราบว่าซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบหลักในดินขาวอยู่ในรูปของอัลฟาควอตซ์ ซึ่งเป็นรูปหนึ่งของซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีความเสถียรที่สุด และเมื่อพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างของดินขาวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า แสดงให้เห็นความเป็นผลึกของดินขาวซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ที่ให้รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันปรากฏเส้นพีคที่มีความคม โดยขนาดของผลึกของดินขาวประมาณ 1.2 ถึง 10 ไมครอน

5.1.2 การบำบัดเบื้องต้นของดินขาว

เนื่องจากดินขาวที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X เป็นวัตถุดิบที่มาจากธรรมชาติ จึงต้องนำมาผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพก่อนทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่มีอยู่ในวัตถุดิบ ซึ่งประกอบด้วย

- การปรับปรุงคุณภาพทางกายภาพ : บดและคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh
- การปรับปรุงคุณภาพทางความร้อนของดินขาว : เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง

- การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี : รีฟลักซ์กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง
- การสลายควอตซ์ (breaking quartz) : หลอมเหลว (fusion) ดินขาวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

5.1.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X

หลังจากที่ดินขาวผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นแล้วจะเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ วิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะถูกทำขึ้นด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ดินขาวจะทำปฏิกิริยากับสารละลายเบส ปรับอัตราส่วนซิลิกาและโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินา นำสารละลายใส่เครื่องปฏิกรณ์ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (aging) จากนั้นให้อุณหภูมิกับเครื่องปฏิกรณ์ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล เวลาในการเกิดผลึก อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ซึ่งได้ผลสรุปดังนี้

- อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์คือ 90 องศาเซลเซียส
- เวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X คือ 48 ชั่วโมง
- อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X คือ 3.0
- อัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X คือ 12

5.1.4 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

หลังจากศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีผลในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X ทำให้ทราบภาวะที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ คือภาวะที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัลเท่ากับ 90 องศาเซลเซียส เวลาในการเกิดผลึกเท่ากับ 48 ชั่วโมง อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0 และอัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 12 ซึ่งร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ Na-X ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 88.4 และซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 395.30 และซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 474.37 ซึ่งพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้คิดเป็นร้อยละ 83.33 ของพื้นที่ผิวของซีโอไลต์ Na-X ที่ใช้ในอุตสาหกรรม และจากการทดสอบการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซนที่เป็นตัวทำละลายใช้แล้วจากกระบวนการผลิตพอลิเมอร์โดยใช้ซีโอไลต์ Na-X ที่

สังเคราะห์ได้เป็นตัวดูดซับมีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 30.24 และมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 293.3 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และเชิงพาณิชย์สำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวธรรมชาติ รวมทั้งศึกษาการนำมาใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม

5.2.2 ควรศึกษาการดูดซับคลอไรด์ในแยกเซนต์ด้วยซีโอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ

5.2.3 ควรศึกษาหลักการดูดซับของโมเลกุลคลอไรด์ด้วยซีโอไลต์ Na-X

5.2.4 ควรมีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวแหล่งอื่นๆด้วย เนื่องจากดินขาวในแต่ละแหล่งมีองค์ประกอบในอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา และปริมาณสิ่งเจือปนไม่เท่ากัน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม. 2526. แร่. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : ศรีเมืองการพิมพ์, จตุพร วิทยาคุณ และ นุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. 2547. การเร่งปฏิกิริยา พื้นฐาน และการประยุกต์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์,
- จำรัส ลิ้มตระกูล. 2540. เคมีของซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์ ปีที่ 51 ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน-ธันวาคม 2540) : 420-423.
- นงลักษณ์ บรรยงวิชัย. 2540. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดินขาวและประโยชน์. วิทยาศาสตร์สำหรับประชาชน ครั้งที่ 549 (ตุลาคม 2540) : 1-5.
- นิรุติ วานิชกิจ. 2546. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากดินขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มนตรี ทองคำ. 2542. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เลิศ รักสันติชาติ. 2545. การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ทีที่ใช้แล้วสำหรับดูดซับเอทีลินไคคอลล. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุภาภรณ์ คางคำ. 2548. การพัฒนากระบวนการสำหรับการฟื้นฟูสภาพโมเลกุลาร์ซีพีที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
- อายุวัฒน์ สว่างผล. 2543. วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในงานเซรามิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. ภาควิชาหัตถศึกษาและอุตสาหกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏกำแพงเพชร,

ภาษาอังกฤษ

- Akolekar, D. Chaffee, A. and Russell, F.H. 1997. The transformation of kaolin to low-silica X zeolite. Elsevier Science Inc. : 359-365.
- ASTM Standard. 1994. Total Inorganic and Organic Chloride in Hydrocarbons by Potentiometric Titration. UOP Method 588-94. United States,

- Baerlocher, Ch. Meier, W.M. and Olson, D.H. 2001. Atlas of Zeolite Structure Types. 5th ed. Zurich Switzerland : ELSEVIER,
- Bhatia, S. 1990. Zeolite Catalysis. Principles and Applications. Boca Raton, Florida : CRC Press, Inc.,
- Breck, D.W., W.G. Eversole and R.M. Milton. 1956. New synthetic crystalline zeolites. Chem. Soc. 28 : 2338-2339.
- Breck, D.W. 1974. Zeolite Molecular Sieves. Structure, Chemistry and Use. New York : John Wiley & Sons, Inc. New York,
- Bruce, C. Gates. 1991. Catalytic Chemistry. New York: John Wiley and Sons,
- Dyer, A. 1988. An Introduction to Zeolite Molecular Sieves. New York : John Wiley & Sons, Inc. New York,
- Eckenfelder, W.W., Jr. 1981. Application of Adsorption to Wastewater Treatment : Enviro press,
- Farrauto, R.J. and Bartholomew. 1997. Fundamentals of industrial catalytic process. London : Blackie Academic & Professional,
- Ivan, C. Fernando, G. C. and Jose C. 2007. Synthesis of X-type Zeolite from Dealuminated Kaolin by Reaction with Sulfuric Acid at High Temperature. Ind. Eng. Chem. Res 46 : 1029-1038.
- J.V. Smith. 1976. Zeolite Chemistry and Catalysis. J.A. Rabo Ed. ACS Monograph 171,
- McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. 1993. Unit Operations of Chemical Engineering. 5th ed. Singapore : Mcgraw-Hill Inc,
- M.M.J. Treacy and J.B. Higgins. 2001. Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites. 4th ed. ELSEVIER,
- Na´dia Regina Camargo Fernandes Machado and Denise Maria Malachini Miotto. 2005. Synthesis of Na–A and –X zeolites from oil shale ash. Fuel 84 : 2289–2294.
- Novembre, D. Sabatino, B. D. Gimeno, D. Garcia-Valles, M. and Martnez-Manent, S.

2004. Synthesis of Na-X zeolites from tripolaceous deposits (Crotone, Italy) and volcanic zeolitised rocks (Vico volcano, Italy). Microporous and Mesoporous Materials 75 : 1-11.
- R.M. Barrer. 1986. Zeolite Structures. Proceeding of the 5 th International Conference on Zeolites. Naples:
- Robson, H. and Lillrud, K.P. 2001. Varified Syntheses of Zeolitic Materials. 2th ed. ELSEVIER,
- Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K. 1999. Adsorption by powders & porous solids: principles, methodology and applications. San Diego: Calif Academic Press,
- Sanhueza V., Kelm U., Cid R. 1999. Synthesis of molecular sieves from Chilean kaolinites: 1. Synthesis of NaA type zeolites. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 74 : 358-363.
- Szostak R. 1989. Molecular sieves principles of synthesis and identification. New York : Van Nostrand Reinhold,
- Terzano, R. Spagnuolo, M. Medici, L. Tateo, F. and Ruggiero P. 2005. Zeolite synthesis from pre-treated coal fly ash in presence of soil as a tool for soil remediation. Applied Clay Science. 29 : 99-110.
- Thammavong S. 2003. Studies of Synthesis, Kinetics and Particle size of Zeolite X from Narathiwat Kaolin. M.Sc. thesis Suranaree University of Technology.
- Xiong, G. Yu, Y. Feng, Z. Xin, Q. Xiao, F.S. and Li C. 2001. UV Raman spectroscopic study on the synthesis mechanism of zeolite X. Microporous and Mesoporous Materials. 42 : 317-323
- Szostak, R. 1998. Molecular Sieves Principle of Synthesis and Identification. 3st ed., Norstand Reinhold., Inc., New York,



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สูตรการคำนวณ

1. ร้อยละผลได้ = (ผลบวกของ intensity ของซีไอไลต์ Na-X ที่ได้จากการสังเคราะห์ / ผลบวกของ intensity รวมของผลิตภัณฑ์) x 100
2. ร้อยละการกำจัด = [(ความเข้มข้นเริ่มต้น - ความเข้มข้นที่เหลือ) / ความเข้มข้นเริ่มต้น] x 100
3. ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม) = [(ปริมาณเริ่มต้น (มก./ล.) - ปริมาณที่เหลือ (มก./ล.)] x ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มล.) / [ปริมาณตัวดูดซับ(ก.) x 1000]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

สมบัติของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) SODIUM HYDROXIDE (โซเดียมไฮดรอกไซด์)

สูตรทางเคมี (Formula) NaOH

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) 40 AMU

ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Color and Odor) ของแข็ง สีขาว ไม่มีกลิ่น

จุดเดือด (Boiling Point) 1,390 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว (Melting Point) 318 องศาเซลเซียส

ความดันไอ (Vapor Pressure) น้อยกว่า 18 มิลลิเมตรปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นไอ (Vapor Density) น้อยกว่า 1 กรัมต่อลิตร

อัตราการระเหย (Evaporating Rate) ไม่ระเหย

การละลายน้ำ (Solubility in Water) 111 กรัมต่อ 100 กรัม น้ำ ที่ 20 องศาเซลเซียส

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 2.13 ที่ 20 องศาเซลเซียส

ความเป็นกรดด่าง (pH-Value) 13 -14

จุดวาบไฟ (Flash Point) -

ขีดจำกัดการติดไฟ (Flammable limits) - ค่าต่ำสุด (LEL) -

- ค่าสูงสุด (UEL) -

อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง (Autoignition Temperature) -

คุณสมบัติอื่นๆ (Other properties) ไม่ติดไฟ

เสถียรภาพ (Stability) เสถียร

ภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง (Conditions to Avoid) อย่านำให้น้ำเข้าภาชนะเพราะจะเกิดปฏิกิริยา

สารที่ต้องหลีกเลี่ยง (Materials to Avoid) ตัวออกซิไดซ์แรง, กรดแก่, สารอินทรีย์, น้ำ,

ของเหลวไวไฟ, สารประกอบอินทรีย์ของฮาโลเจน โดยเฉพาะไตรคลอโรเอทิลีน

การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity) อาจก่อให้เกิดไฟ หรือการระเบิด การสัมผัสไนโตร

มีเทนและสารประกอบไนโตรทำให้เกิดแก๊สที่ไวต่อการกระแทก

การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness) สารกัดกร่อน

สมบัติของโซเดียมอะลูมิเนต

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) SODIUM ALUMINATE หรือ SODIUM ALUMINIUM

DIOXIDE (โซเดียมอะลูมิเนต หรือโซเดียมอะลูมิเนียมไดออกไซด์)

สูตรทางเคมี (Formula) $\text{Na}(\text{AlO})_2$, $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) 82

ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Color and Odor) ของแข็ง สีขาว ไม่มีกลิ่น

จุดเดือด (Boiling Point) -

จุดหลอมเหลว (Melting Point) 1650 องศาเซลเซียส

ความดันไอ (Vapor Pressure) -

ความหนาแน่นไอ (Vapor Density) -

อัตราการระเหย (Evaporating Rate) ไม่ระเหย

การละลายน้ำ (Solubility in Water) ละลายน้ำได้

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 1.5 ที่ 20 องศาเซลเซียส

จุดวาบไฟ (Flash Point) -

ขีดจำกัดการติดไฟ (Flammable limits) - ค่าต่ำสุด (LEL) -

- ค่าสูงสุด (UEL) -

อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง (Autoignition Temperature) -

คุณสมบัติอื่นๆ (Other properties) ไม่เกิดการเผาไหม้

Occupational exposure limits 2 mg/m^3

เสถียรภาพ (Stability) เสถียร

สภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง (Conditions to Avoid) ความชื้น

สารที่ต้องหลีกเลี่ยง (Materials to Avoid) กรด

การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity) ทำปฏิกิริยารุนแรงกับกรด

การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness) สารกัดกร่อน

สมบัติของกรดไฮโดรคลอริก

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) Hydrochloric acid 37% solution

สูตรทางเคมี (Formula) HCl

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) 36.46

ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Color and Odor) เป็นของเหลว ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน

จุดเดือด (Boiling Point) 53 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว (Melting Point) -26 องศาเซลเซียส

ความดันไอ (Vapor Pressure) 190 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นไอ (Vapor Density) -

อัตราการระเหย (Evaporating Rate) -

การละลายน้ำ (Solubility in Water) ละลายน้ำได้สมบูรณ์

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ความเป็นกรดต่าง (pH-Value) -

จุดวาบไฟ (Flash Point) -

ขีดจำกัดการติดไฟ (Flammable limits) - ค่าต่ำสุด (LEL) -

- ค่าสูงสุด (UEL) -

อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง (Autoignition Temperature) -

เสถียรภาพ (Stability) มีความเสถียรเมื่อเก็บในภาชนะที่เหมาะสม

ภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง (Conditions to Avoid) การให้ความร้อนสูง

สารที่ต้องหลีกเลี่ยง (Materials to Avoid) โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบของโลหะอัลคาไลน์ น้ำ

แอมโมเนีย โลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ ต่าง กรด สารประกอบของโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ โลหะ

โลหะผสม ฟอสฟอรัสออกไซด์ ฟอสฟอรัส ไฮไดรด์ สารประกอบของฮาโลเจน

สารประกอบจำพวกออกซีฮาโลเจน เปอร์แมงกาเนต ไนเตรต คาร์ไบด์ สารที่ไหม้ไฟได้ ตัว

ทำละลายอินทรีย์ อะเซติลีน ไนไตรล สารอินทรีย์จำพวกไนโตร อะนิลีน เปอร์ออกไซด์ พิค

เครต ไนไตรด์ ลิเทียม

การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity) ปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดเพลิงไหม้และ

การระเบิด อาจเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง เป็นอันตรายเมื่อทำปฏิกิริยากับ โลหะและเนื้อเยื่อ

ของสัตว์หรือพืช

การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness) มีฤทธิ์กัดกร่อน

สมบัติของกรดซัลฟิวริก

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) Sulfuric acid, reagent acs 96%

สูตรทางเคมี (Formula) H_2SO_4

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) 98.08

ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Color and Odor) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น

จุดเดือด (Boiling Point) 330 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว (Melting Point) -15 องศาเซลเซียส

ความดันไอ (Vapor Pressure) มากกว่า 0.00120 มิลลิเมตรปรอท

ความหนาแน่นไอ (Vapor Density) 1.2 กิโลกรัมต่อตารางเมตร

อัตราการระเหย (Evaporating Rate) ช้ากว่าอีเทอร์

การละลายน้ำ (Solubility in Water) ละลายน้ำได้ ที่ 20 องศาเซลเซียส

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 1.84

ความเป็นกรดต่าง (pH-Value) -

จุดวาบไฟ (Flash Point) -

ขีดจำกัดการติดไฟ (Flammable limits) - ค่าต่ำสุด (LEL) -

- ค่าสูงสุด (UEL) -

อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง (Autoignition Temperature) -

เสถียรภาพ (Stability) มีความเสถียรเมื่อเก็บในภาชนะที่เหมาะสม

ภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง (Conditions to Avoid) การให้ความร้อนสูง

สารที่ต้องหลีกเลี่ยง (Materials to Avoid) โลหะอัลคาไลน์ สารประกอบของโลหะอัล

คาไลน์ น้ำ แอมโมเนีย โลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ ต่าง กรด สารประกอบของโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ โลหะ

โลหะผสม ฟอสฟอรัสออกไซด์ ฟอสฟอรัส ไฮโดรด์ สารประกอบของฮาโลเจน สารประกอบจำพวก

ออกซีฮาโลเจน เปอร์แมงกานेट ไนเตรต คาร์ไบด์ สารที่ไหม้ไฟได้ ตัวทำละลายอินทรีย์ อะเซติลีน

ไนไตรด์ สารอินทรีย์จำพวกไนโตร อะนิลีน เปอร์ออกไซด์ พิคเครต ไนไตรด์ ลิเทียม

การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity) ปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดเพลิงไหม้และ

การระเบิด อาจเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง เป็นอันตรายเมื่อทำปฏิกิริยากับ โลหะและเนื้อเยื่อของสัตว์

หรือพืช

การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness) มีฤทธิ์กัดกร่อน

สมบัติของเฮกเซน หรือ นอร์มัลเฮกเซน

ชื่อทางเคมี (Chemical Name) n-HEXANE (เอ็น-เฮกเซน หรือ นอร์มัลเฮกเซน)

สูตรทางเคมี (Formula) C_6H_{14} หรือ $CH_3(CH_2)_4CH_3$

น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight) 86.2

ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Color and Odor) ของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นคล้ายปิโตรเลียม

จุดเดือด (Boiling Point) 69 องศาเซลเซียส

จุดหลอมเหลว (Melting Point) - 95 องศาเซลเซียส

ความดันไอ (Vapor Pressure) 124 มิลลิเมตรปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส

ความหนาแน่นไอ (Vapor Density) 2.97

อัตราการระเหย (Evaporating Rate) 20 % ที่ 25 องศาเซลเซียส

การละลายน้ำ (Solubility in Water) ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้บ้างในสารทำละลายอินทรีย์

ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 0.66 ที่ 20 องศาเซลเซียส

ความเป็นกรดต่าง (pH-Value) -

คุณสมบัติอื่นๆ (Other properties) ระดับที่รับรู้กลิ่นของสารเคมีนี้คือ ที่ความเข้มข้น 64 - 244 ppm ซึ่งเป็นระดับที่เกินค่ามาตรฐานที่อนุญาตให้มีได้ในบรรยากาศการทำงาน (50 ppm)

จุดวาบไฟ (Flash Point) - 21.7 องศาเซลเซียส

ขีดจำกัดการติดไฟ (Flammable limits) - ค่าต่ำสุด (LEL) 1.1 - ค่าสูงสุด (UEL) 7.5

อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง (Autoignition Temperature) 225 องศาเซลเซียส

เสถียรภาพ (Stability) ปกติมีความเสถียร

สภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง (Conditions to Avoid) ความร้อน แหล่งเชื้อเพลิง ประกายไฟและกระแสไฟฟ้าสถิต

สารที่ต้องหลีกเลี่ยง (Materials to Avoid) สารออกซิไดซ์ เช่น เปอร์ออกไซด์ ไนเตรท เปอร์คลอเรท เปอร์แมงกานेट เป็นต้น

การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity) ทำปฏิกิริยารุนแรงกับสารข้างต้น

การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness) ไม่กัดกร่อนโลหะ

ภาคผนวก ค

การวิเคราะห์ปริมาณคลอไรด์ในไฮโดรคาร์บอน UOP Method 588-94

สารเคมีที่ใช้

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์
2. อะซิโตน
3. ไอโซออกเทน
4. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
5. กรดไนตริก
6. โบแตสซียมคลอไรด์
7. ซิลเวอร์ไนเตรต
8. โทลูอิน
9. คองโกเรดเปเปอร์
10. โซเดียมไบไฟนิล

สารเคมีที่ต้องเตรียม

1. กรดไนตริก 5 โมล/ลิตร
2. ซิลเวอร์ไนเตรต 0.1 โมล/ลิตร
3. ซิลเวอร์ไนเตรต 0.01 โมล/ลิตร

การเตรียมอิเล็กโทรด

1. ทำความสะอาดขั้วซิลเวอร์อิเล็กโทรดด้วยดีเทอร์เจน จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วซับเบาๆ ด้วยกระดาษทิชชูให้แห้ง
2. ตรวจสอบดูว่าขั้วอิเล็กโทรดมี ตะกอนหรือคราบใดติดอยู่หรือไม่ถ้ายังมีอยู่ให้ขัดออกแล้ว ล้างใหม่ด้วยน้ำกลั่นอีกครั้ง เนื่องจากในการตรวจสอบคลอไรด์ แห่งอิเล็กโทรด จะมีการสัมผัสกับคลอไรด์ใน รูปของซิลเวอร์ คลอไรด์ทำให้บนอิเล็กโทรดอาจมีการสะสมหรือเกาะติดของซิลเวอร์คลอไรด์ ดังนั้นจึงต้องทำความสะอาดทุกครั้งก่อนทำการไตเตรต เพื่อความแม่นยำของผลการทดลอง

วิธีทำ

1. เติมไทโอซีน 50 มิลลิกรัม ลงในกรวยแยก พร้อมกับสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ ปริมาณคลอไรด์ ปริมาตรดังตาราง

Expected Halide Concentration	Sample Size (g)	Molarity of Silver Nitrate
1-5 mass-ppm	50-100	0.01
5-10 mass-ppm	25-35	0.01
0.5-10 mass-%	3-5	0.1
10-50 mass-%	18-20	0.1

2. เติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 5 มิลลิกรัม, น้ำกลั่น 20 มิลลิกรัม, กรดไนตริกเข้มข้น 5 โมล/ลิตร 10 มิลลิกรัม, โซเดียมไบไฟนิล 1 vial เขย่าประมาณ 3 นาที ตั้งทิ้งไว้จนสารเกิดการแยกชั้น

3. ปล่อยให้สารละลายที่แยกอยู่ในชั้นล่างออกมาเก็บไว้ในกรวยแยกอีกอันที่มีไอโซออกเทน 50 มิลลิกรัม เขย่าประมาณ 3 นาที ตั้งทิ้งไว้จนสารเกิดการแยกชั้น

4. ปล่อยให้สารละลายในชั้นตอนที่ 4 ที่แยกอยู่ในชั้นล่างออกมาเก็บไว้ในบีกเกอร์

5. เติมน้ำกลั่นลงในกรวยแยกชั้นตอนที่ 3 พร้อมกับเติมกรดไนตริกเข้มข้น 5 โมล/ลิตร 3-5 หยด เพื่อสกัดอีกครั้ง

6. ปล่อยให้สารละลายที่แยกอยู่ในชั้นล่างออกมาเก็บไว้ในกรวยแยกอันที่มีไอโซออกเทน เขย่าประมาณ 3 นาที ตั้งทิ้งไว้จนสารเกิดการแยกชั้น

7. ปล่อยให้สารละลายชั้นล่างออกมาเก็บไว้ในบีกเกอร์

8. ทดสอบสารละลายในบีกเกอร์ด้วยคองโกเรดเปเปอร์ให้ได้สีฟ้า (ถ้าไม่เป็นสีฟ้าให้เติมกรดไนตริกจนคองโกเรดเปเปอร์เปลี่ยนเป็นสีฟ้า)

9. นำสารละลายในบีกเกอร์ไปตั้งบนอ่างน้ำร้อนเพื่อระเหยตัวทำละลายบางส่วนออกจนกระทั่งเหลือสารละลายในบีกเกอร์ ประมาณ 25 มิลลิกรัม แล้วทำให้เย็น

11. เติมอะซิโตน 100 มิลลิกรัม จากนั้นนำไปไตเตรตด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต โดยวัดค่าการนำไฟฟ้า บันทึกปริมาตรสารละลายซิลเวอร์ไนเตรตที่ใช้จนถึงจุดยุติคำนวณปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดได้ โดยที่

C = ปริมาตรของซีลเวอร์ในเตรตที่ใช้ไตเตรตเพื่อให้สารตัวอย่างเข้าสู่จุดยุติ, มิลลิลิตร

D = ปริมาตรของซีลเวอร์ในเตรตที่ใช้ไตเตรตเพื่อให้สารตัวอย่าง (ปราศจากคลอไรด์) เข้าสู่จุดยุติ, มิลลิลิตร

Q = ความเข้มข้นของซีลเวอร์ในเตรตที่ใช้ไตเตรต, โมลต่อลิตร

T = ความเข้มข้นสารละลายซีลเวอร์ในเตรตที่ใช้ไตเตรต blank, moles/liter

W = ปริมาณสารตัวอย่าง, กรัม

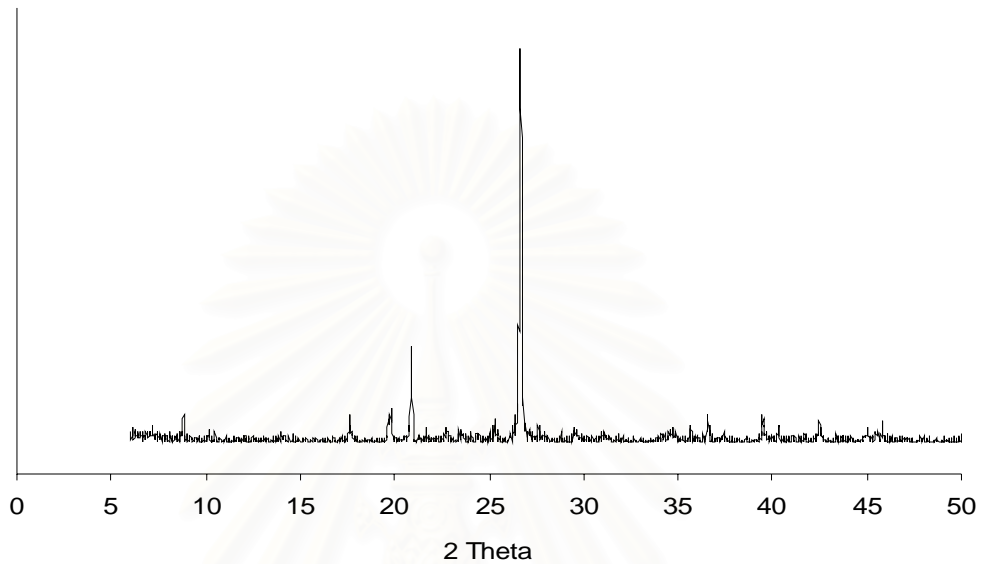
Z = Dilute factor (ในกรณีที่สารตัวอย่างมีความหนืดมากๆ) ถ้าไม่มีการ ทำให้เจือจาง Dilute factor จะเท่ากับ 1



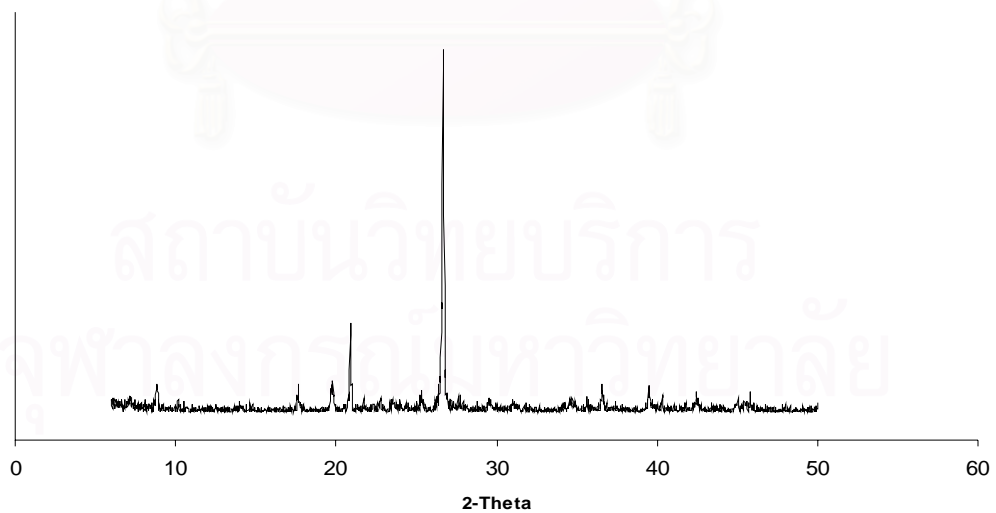
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

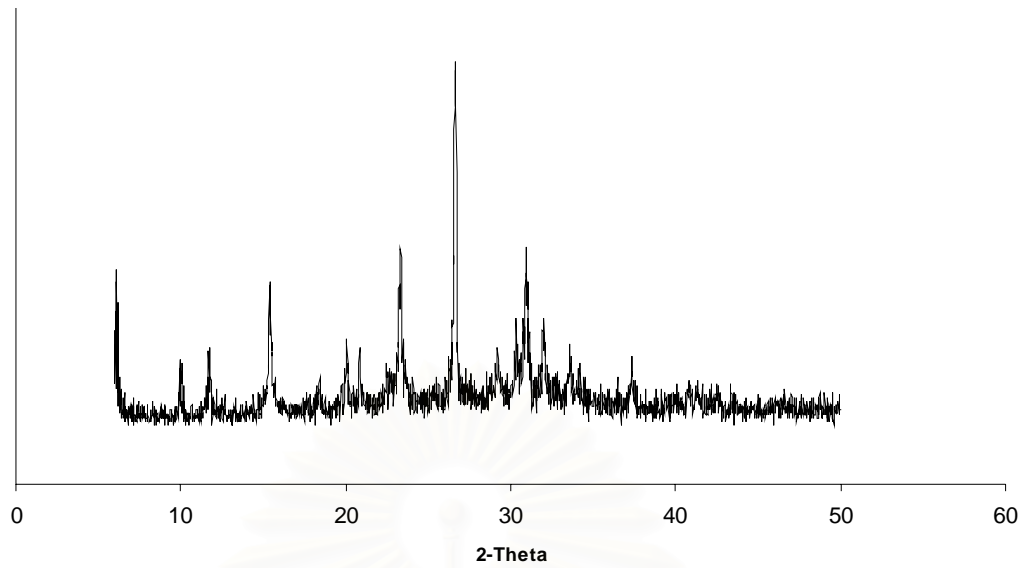
รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน



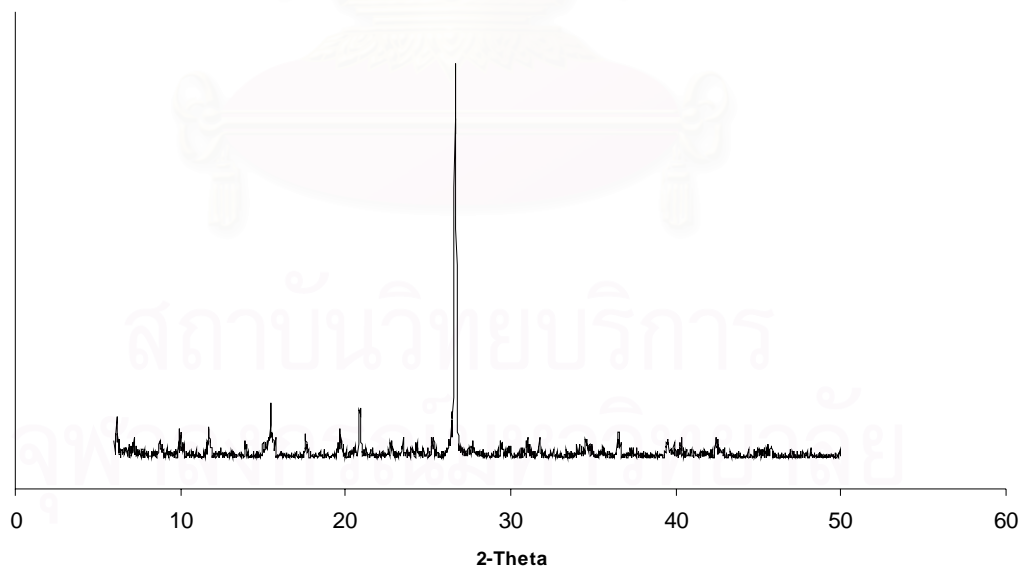
รูป ง1 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของดินขาวธรรมชาติ



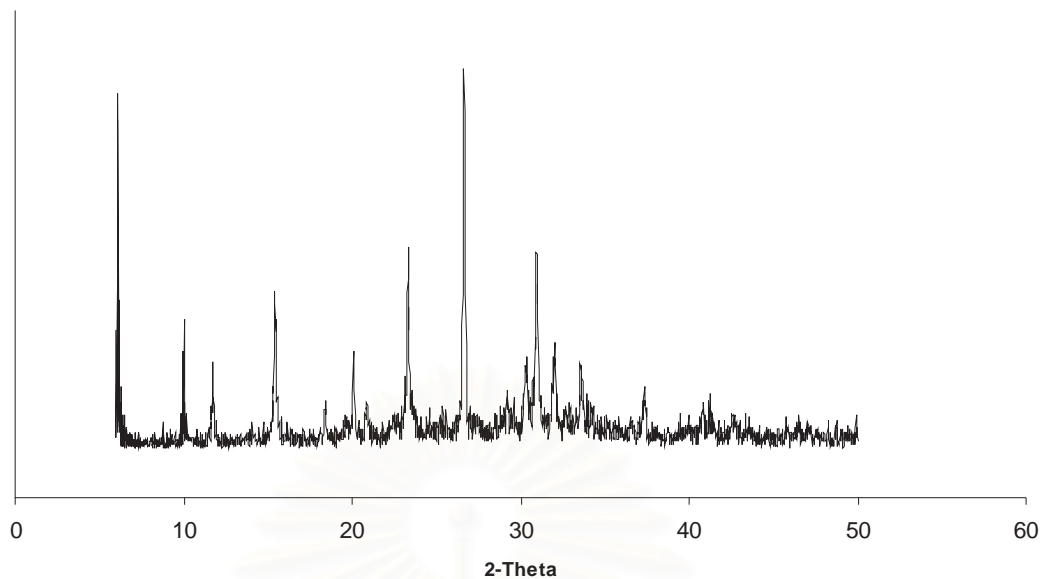
รูป ง2 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 200 mesh ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



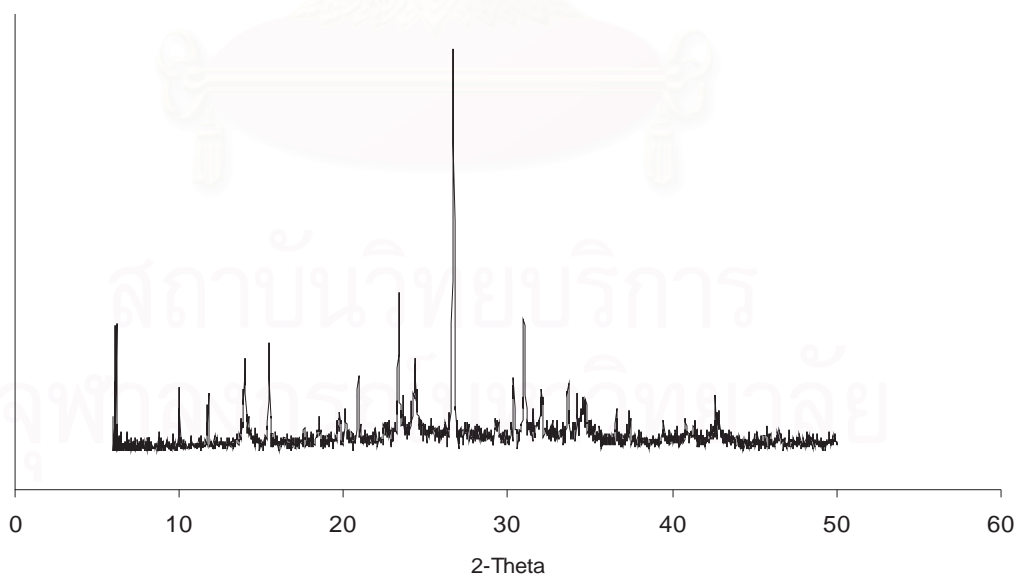
รูป 3 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 200 mesh และผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



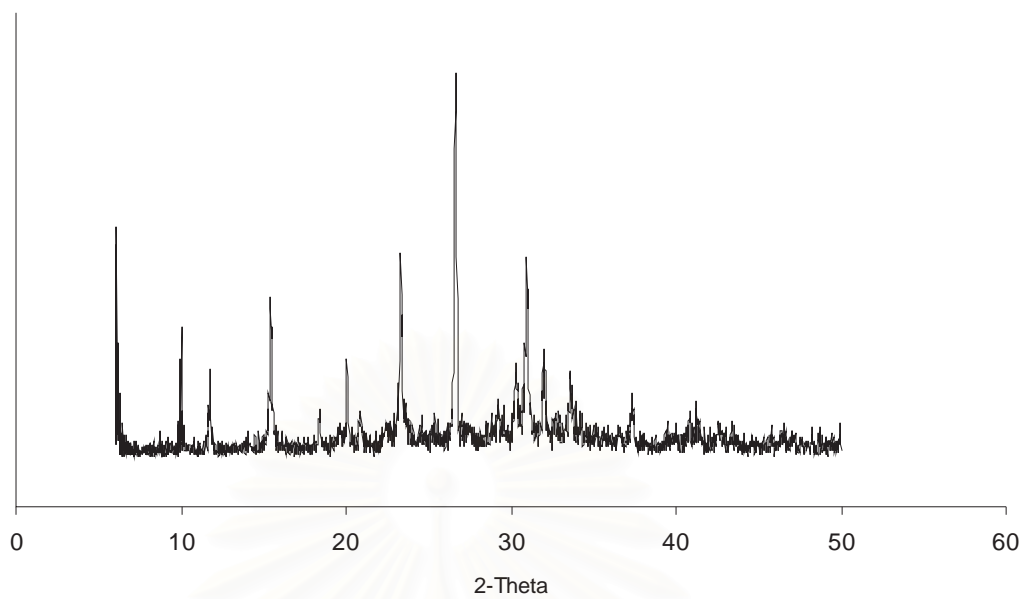
รูป 4 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



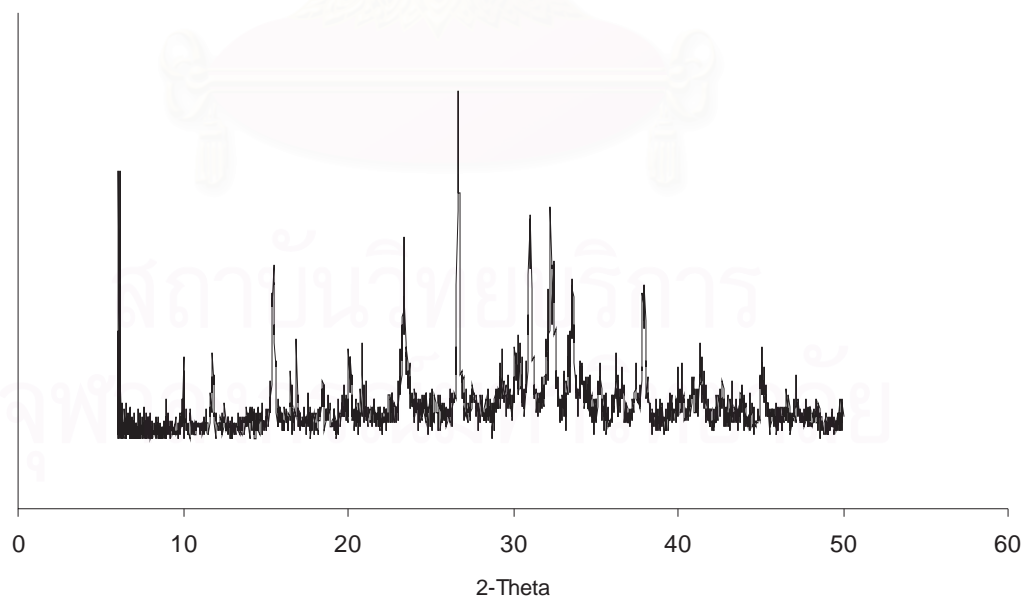
รูป ๖5 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงขนาด 325 mesh และผ่านการหลอมเหลวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



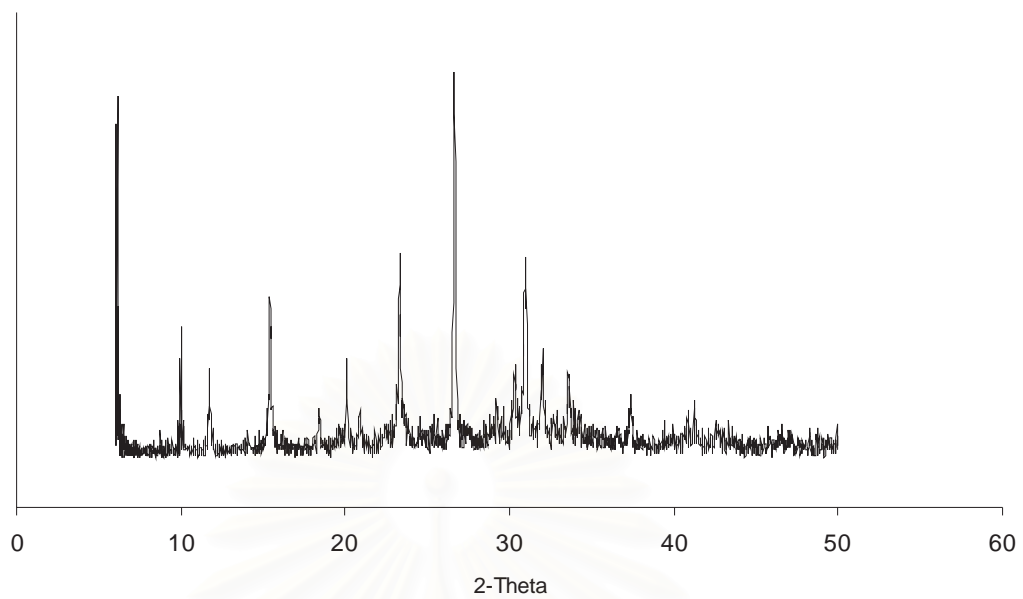
รูป ๖6 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ไม่มีการกำจัดเหล็ก ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



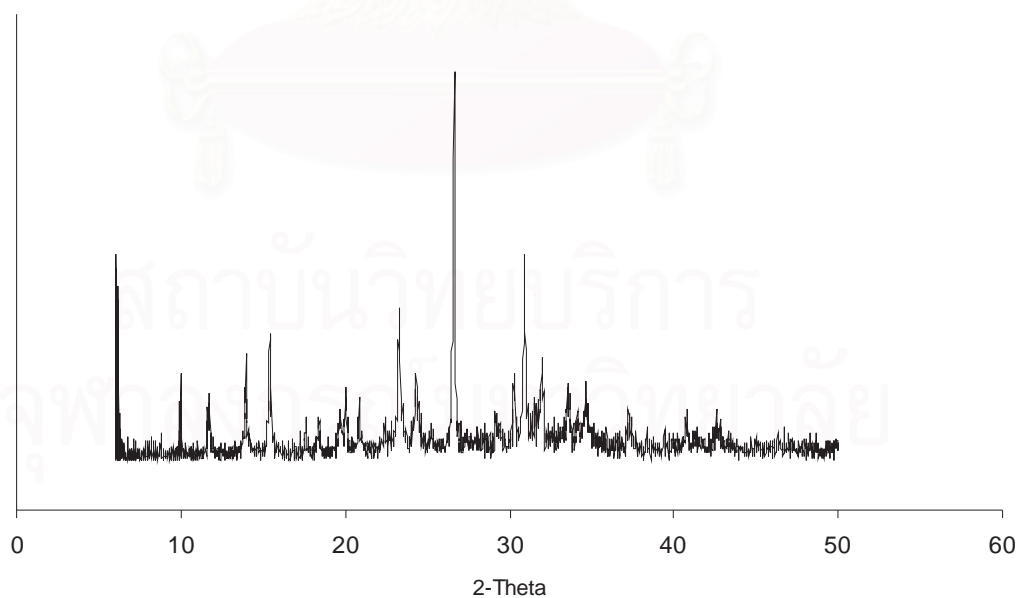
รูป ๗ รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวที่ผ่านการกำจัดเหล็ก ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



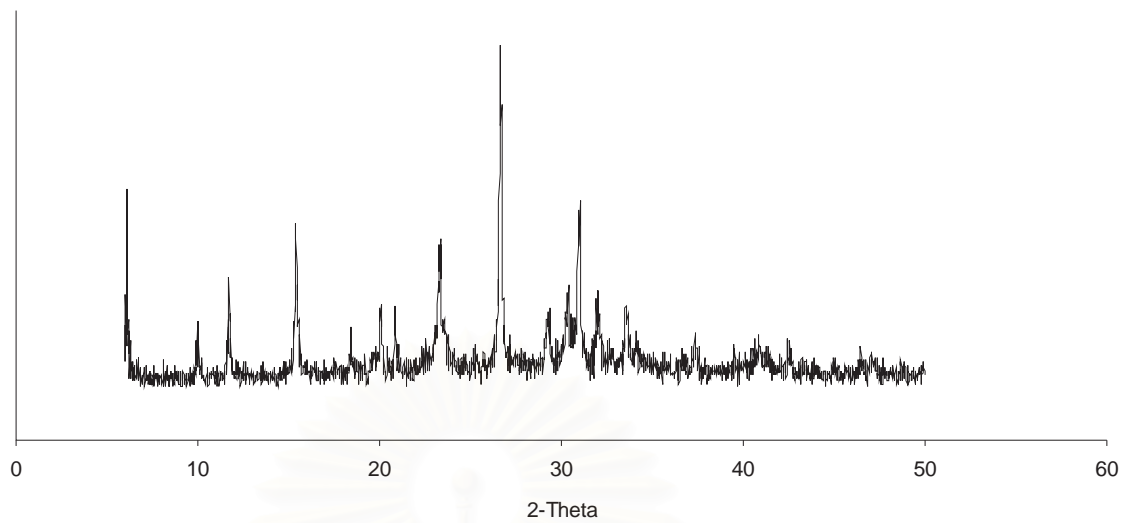
รูป ๘ รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 80 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



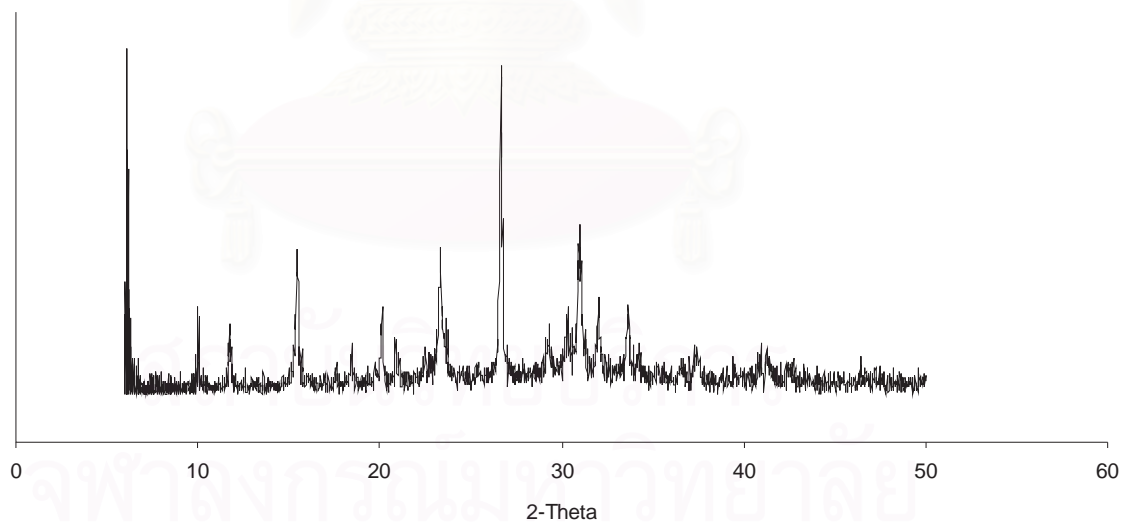
รูป ๙ รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



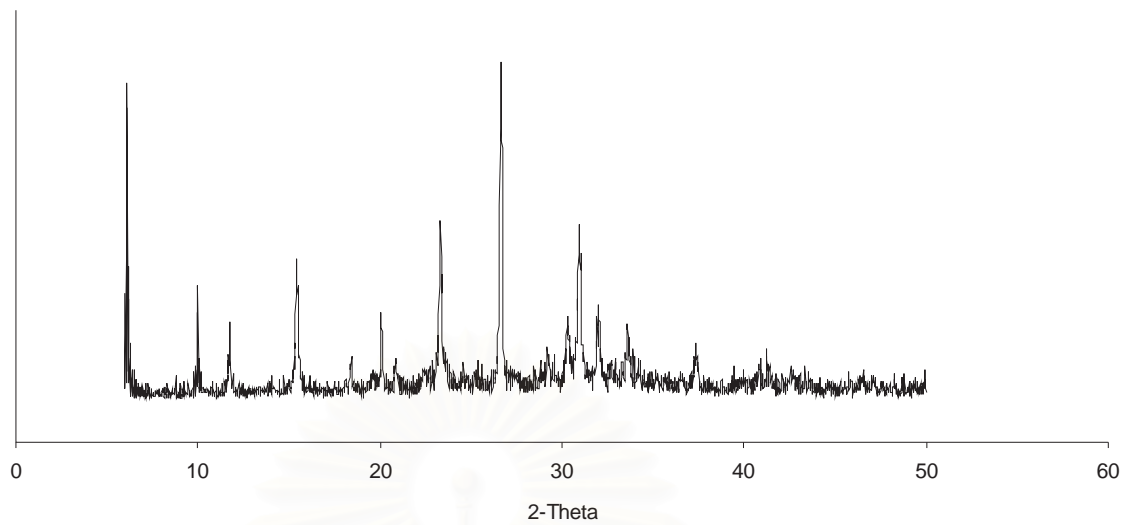
รูป ๑๐ รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 100 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



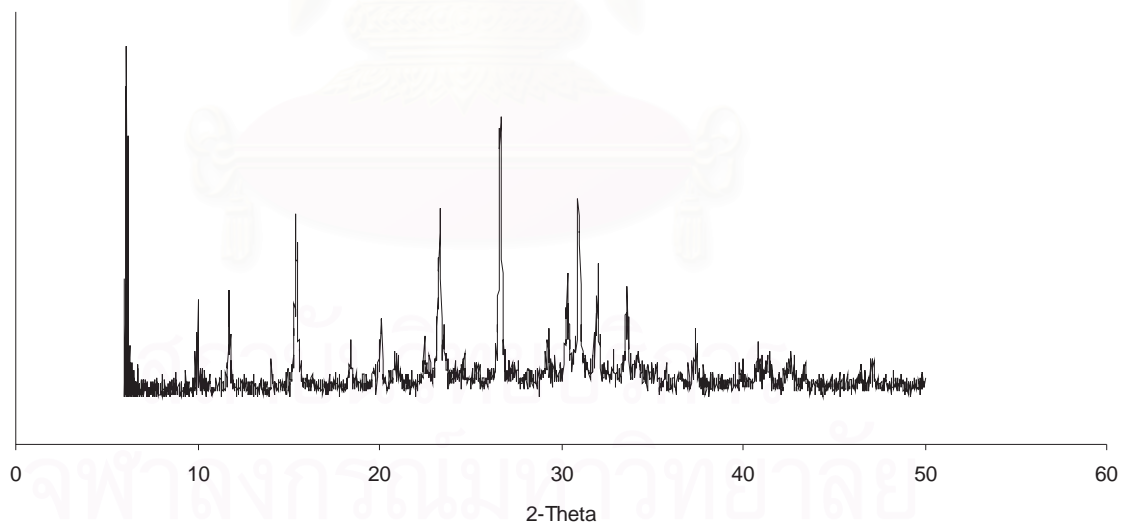
รูป 11 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 6 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



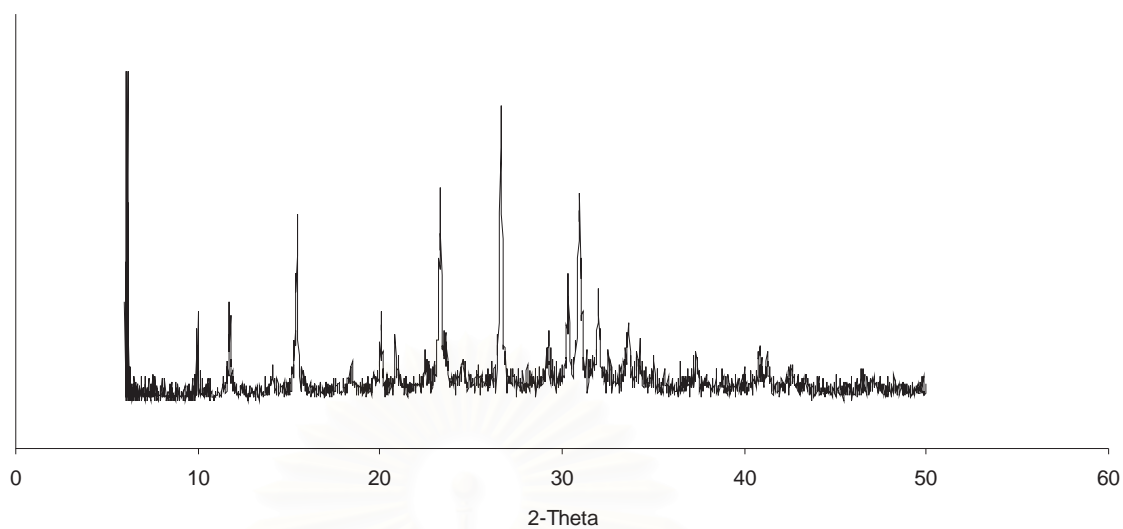
รูป 12 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 12 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



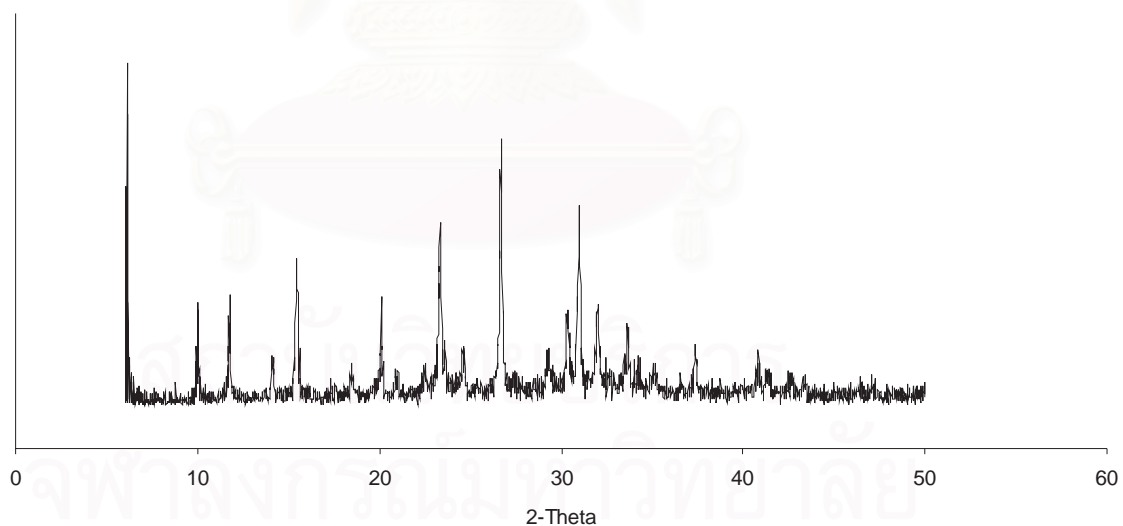
รูป 13 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



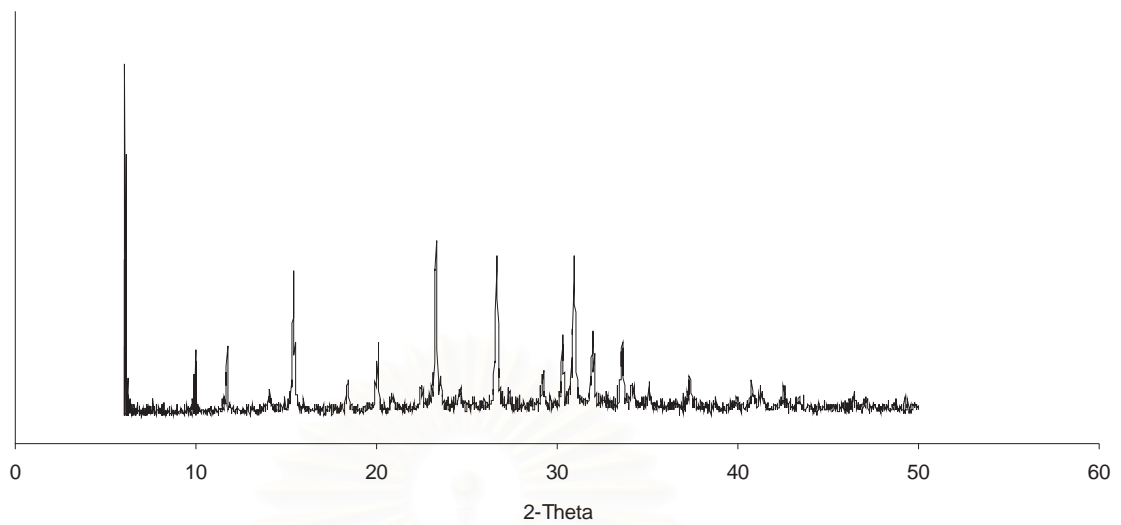
รูป 14 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



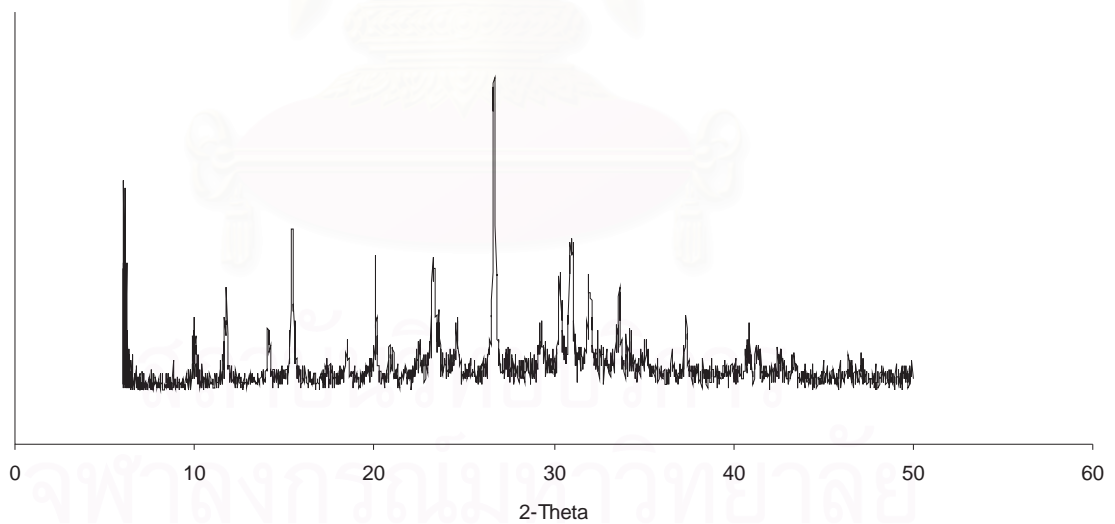
รูป 15 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 72 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



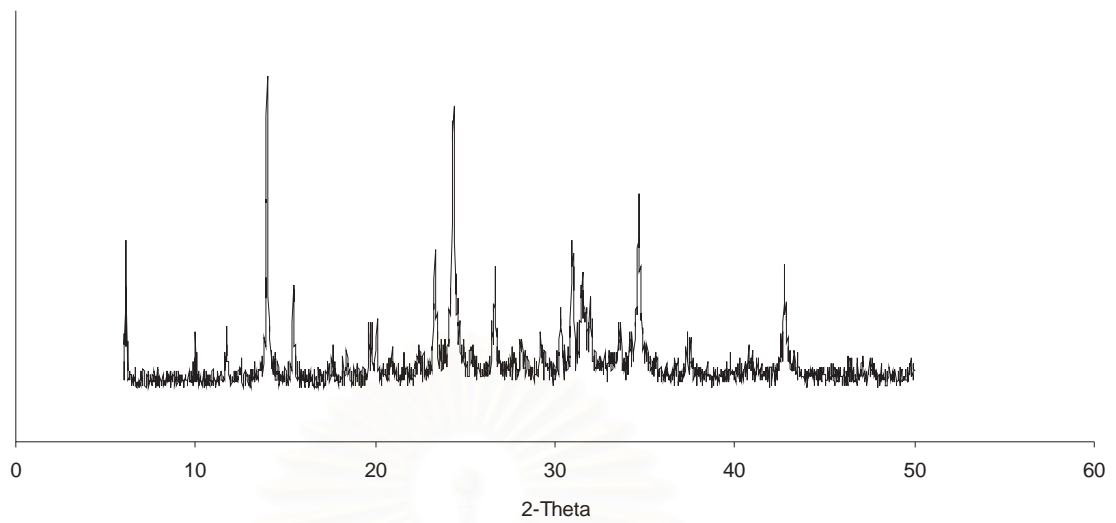
รูป 16 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 96 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



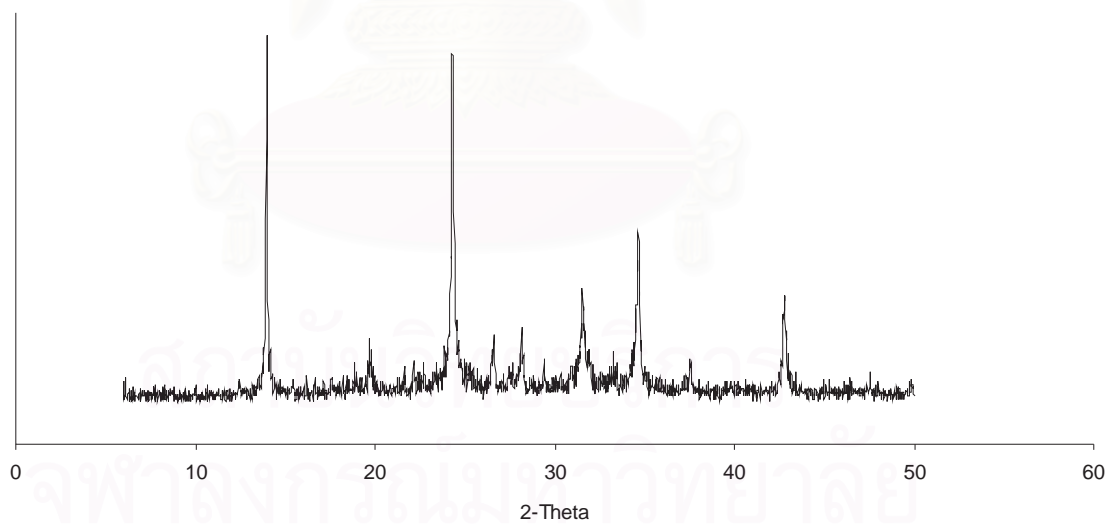
รูป 17 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 120 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



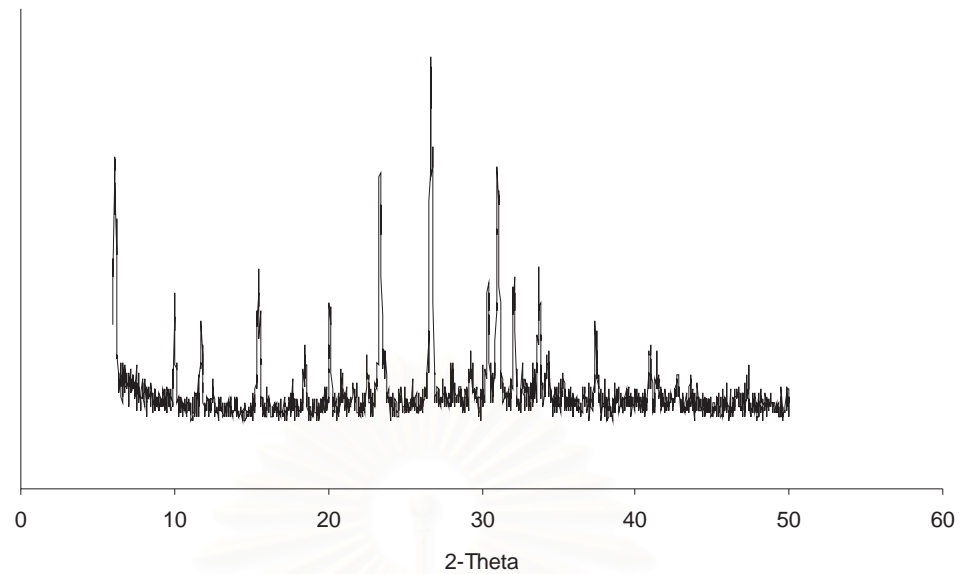
รูป 18 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 144 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



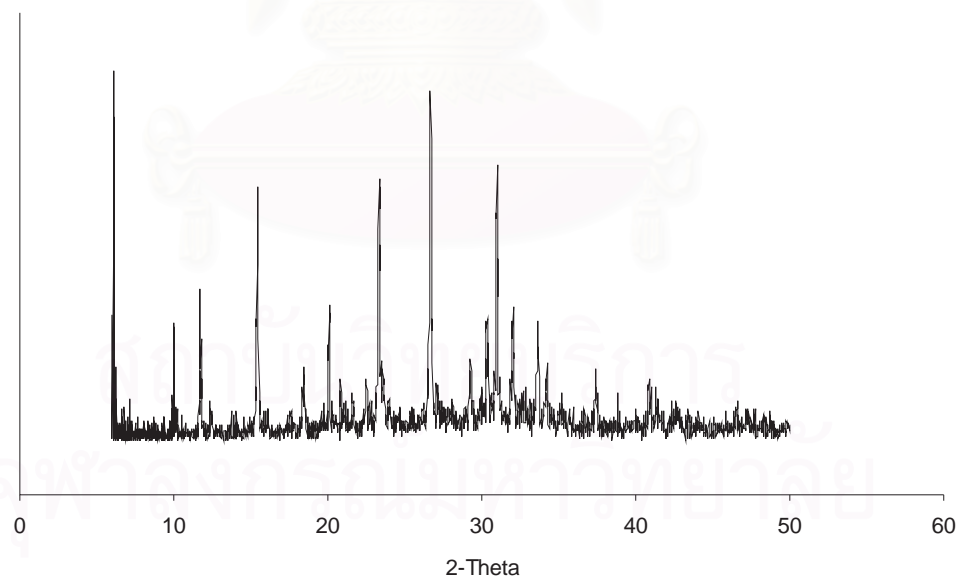
รูป 19 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 192 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



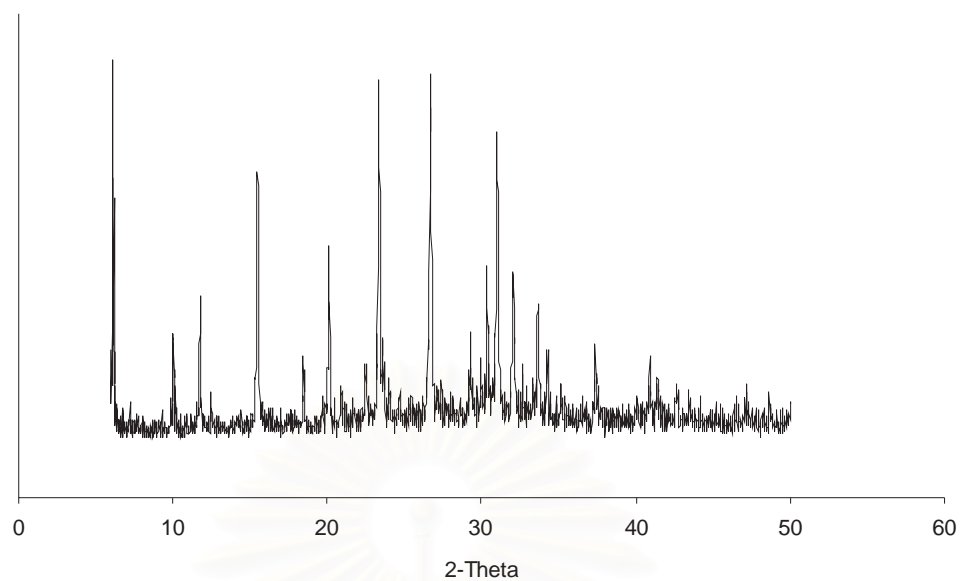
รูป 20 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 244 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



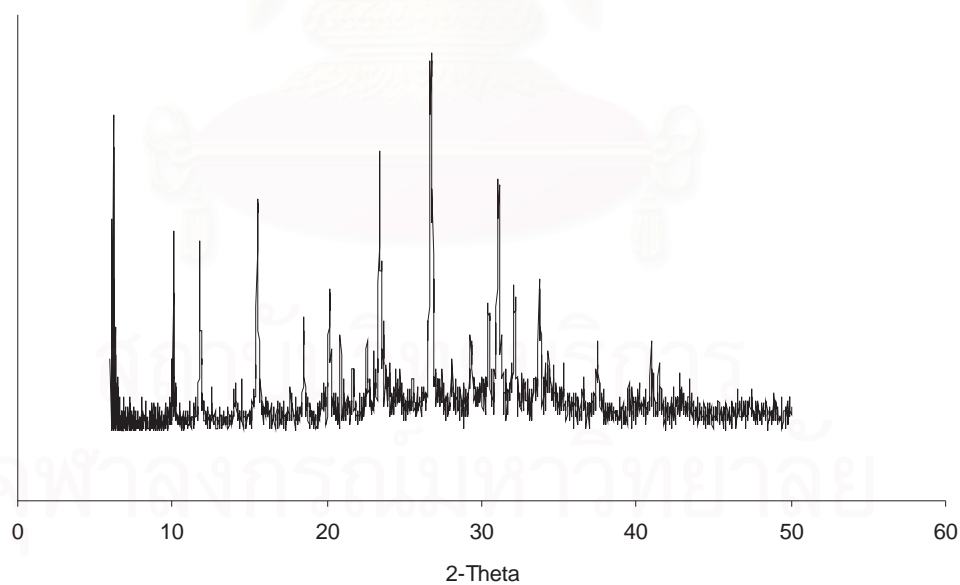
รูป 21 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



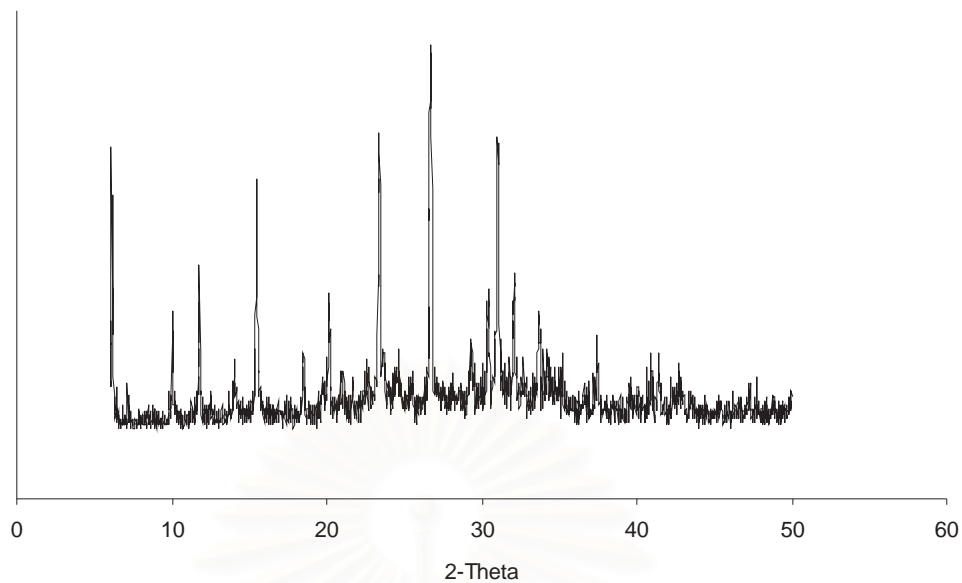
รูป 22 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



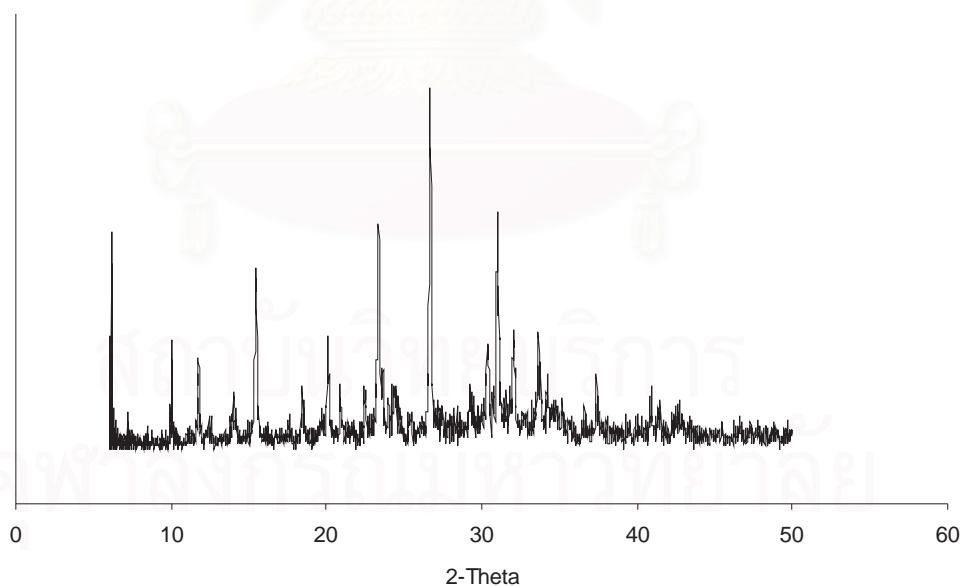
รูป 23 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



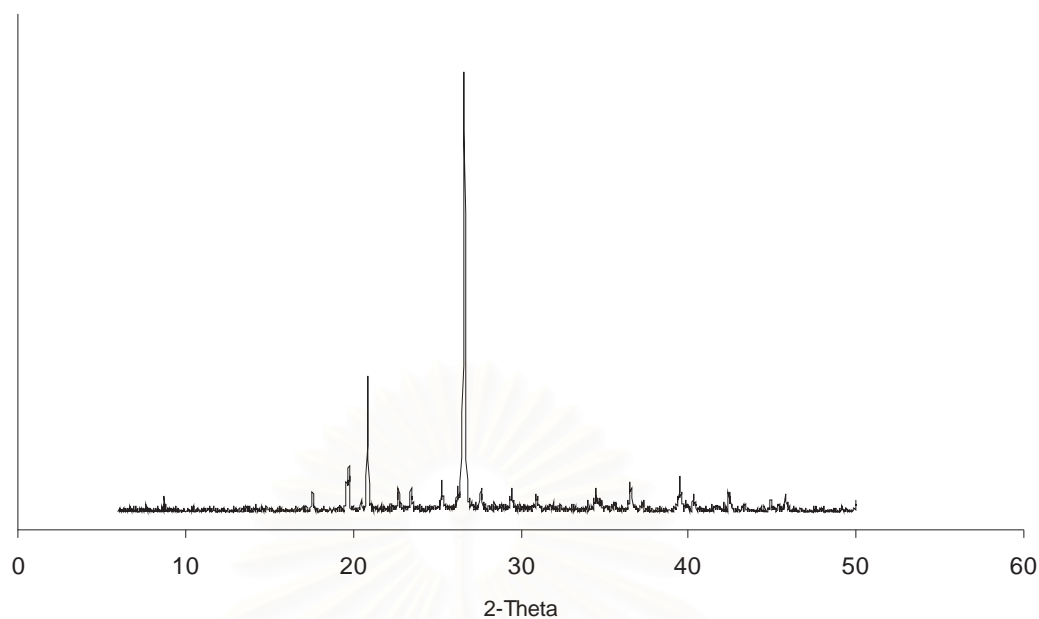
รูป 24 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 4.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



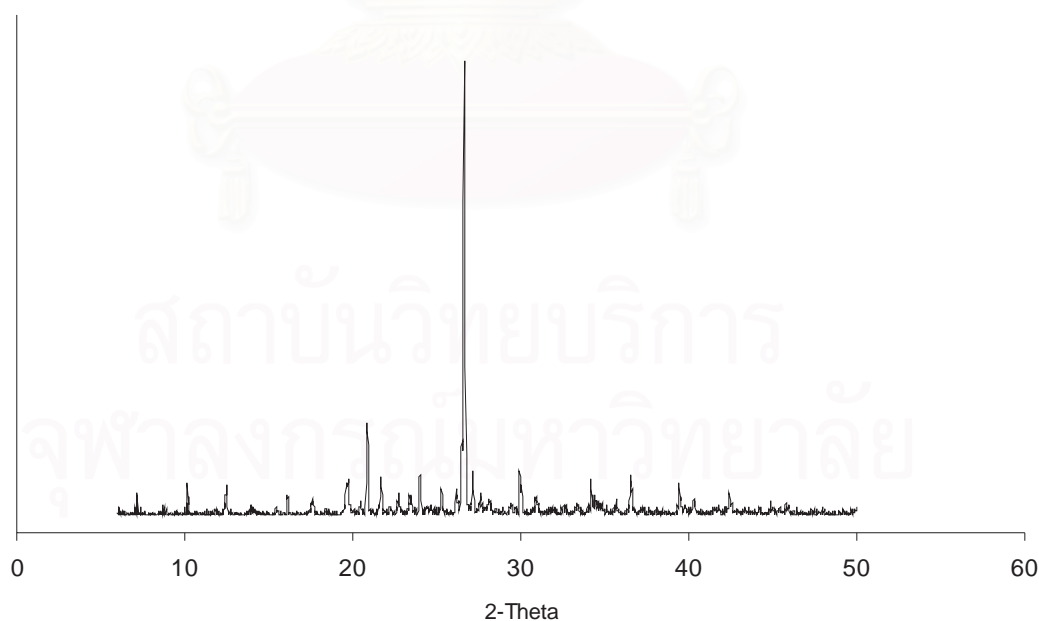
รูป 25 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 5.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



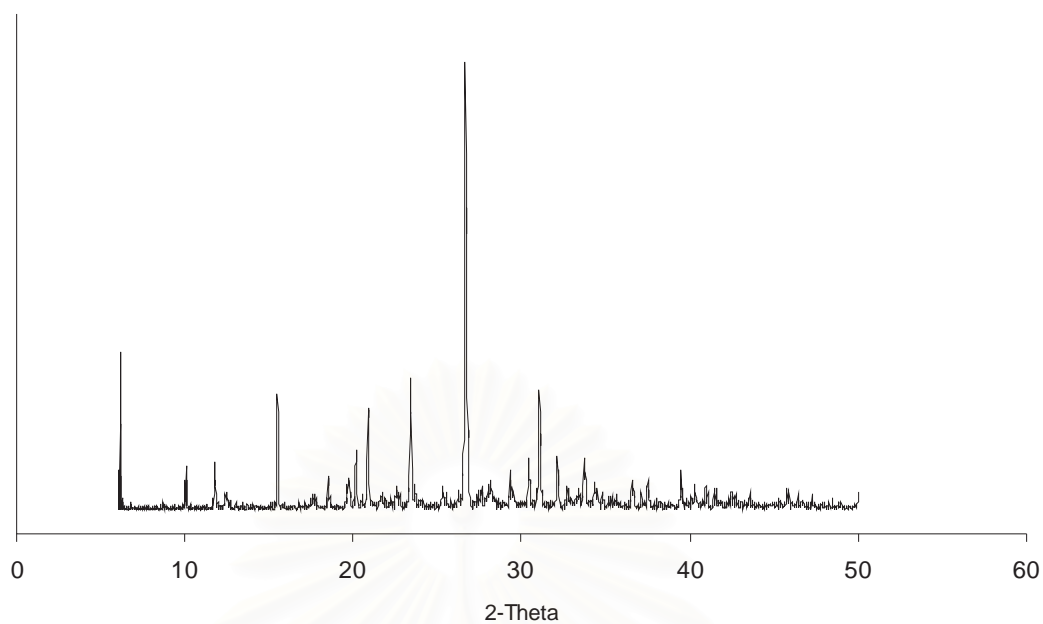
รูป 26 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 6.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



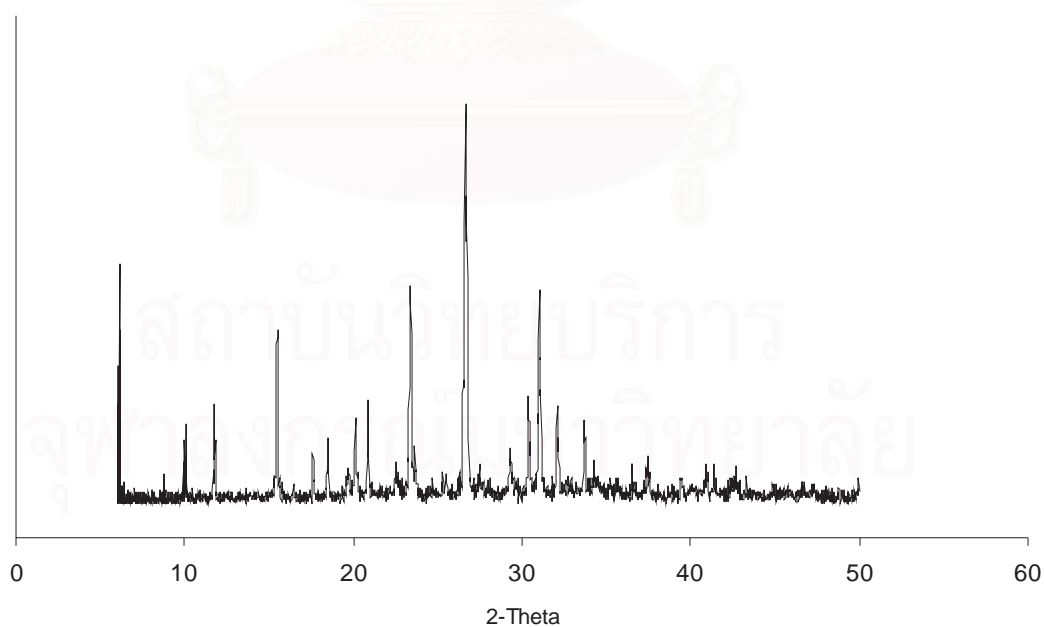
รูป 27 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 2



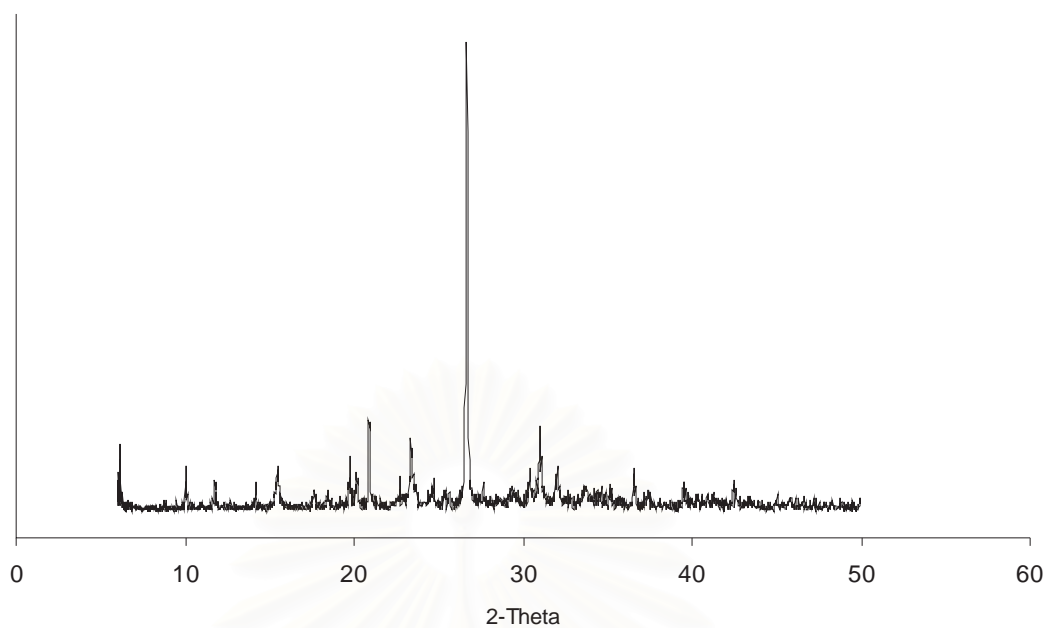
รูป 28 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 4



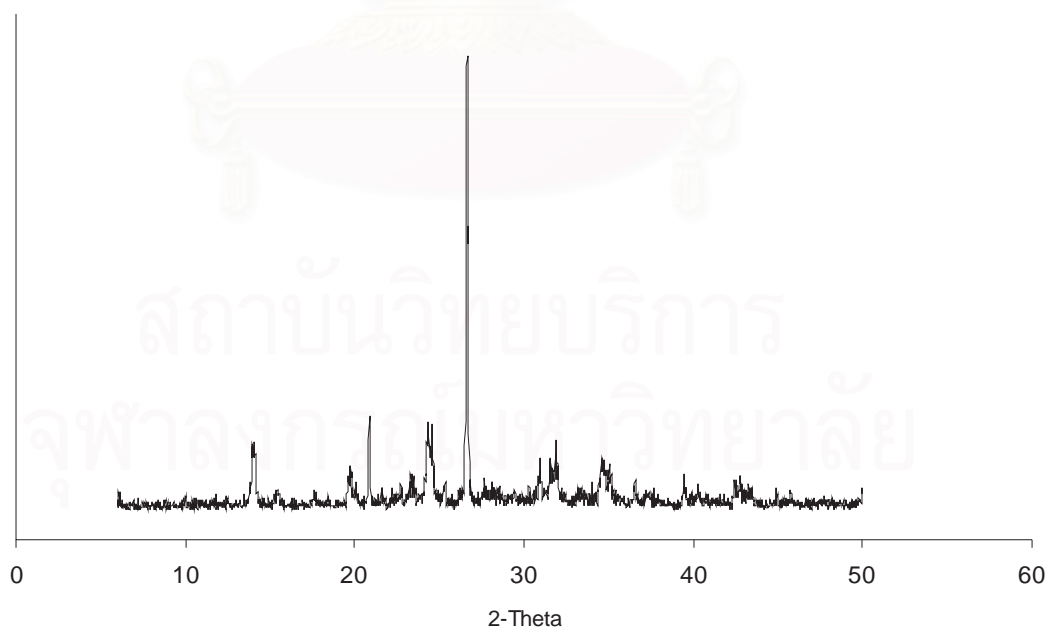
รูป ง29 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 8



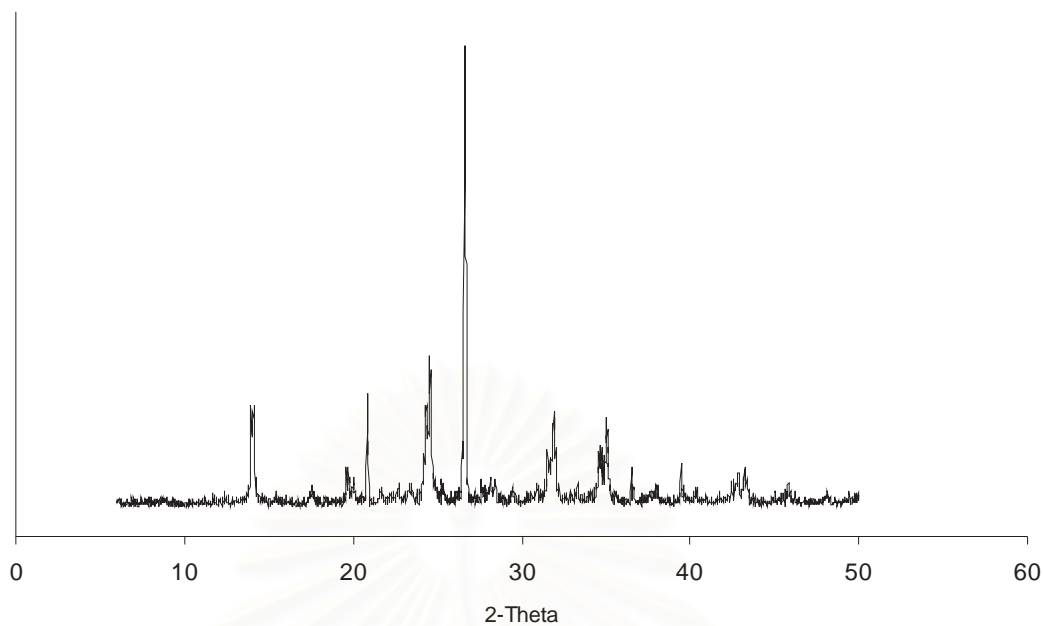
รูป ง30 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 12



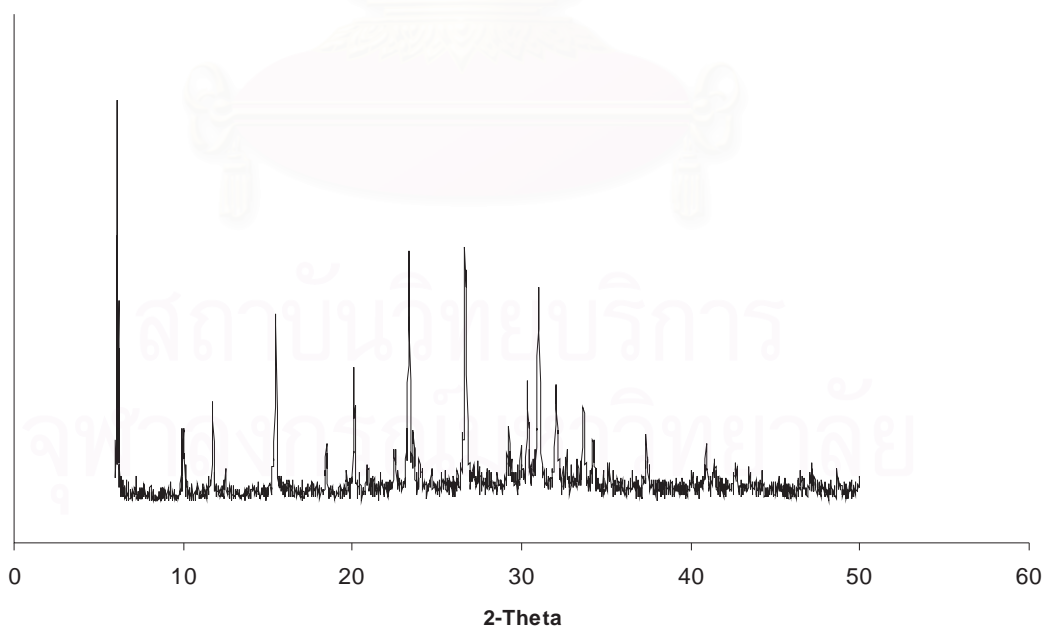
รูป ง31 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 16



รูป ง32 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 20



รูป ง33 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 24



รูป ง34 รูปแบบเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของซีโอไลต์ Na-X ทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล 90 องศาเซลเซียส 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาเท่ากับ 12

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวมณฑล บุญส่งประเสริฐ เกิดวันที่ 27 กุมภาพันธ์ 2527 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย