

การสังเคราะห์ซีไอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ



นางสาวศุภลักษณ์ วรมังครัตน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF ZSM-5 ZEOLITE FROM NATURAL KAOLIN



Miss Supphalak Woramankarat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Chemical Technology

Faculty of Science


Chulalongkorn University

Academic Year 2007


Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ
โดย	นางสาวศุภลักษณ์ วรมังครรัตน์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศ.ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


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


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.กนกพร ผลากรกุล)


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

คุณลักษณะ วรมังกรรัตน์ : การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ. (SYNTHESIS OF ZSM-5 ZEOLITE FROM NATURAL KAOLIN) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : อ.ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย 108 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ โดยศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้แก่ อัตราส่วนโดยมวลของซิลิกาต่ออะลูมินา ปริมาณสารก่อโครงร่าง อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ดินขาวที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นดินขาวธรรมชาติจากจังหวัดเพชรบูรณ์จึงมีสิ่งเจือปนอยู่มาก จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการทางความร้อน ทางกายภาพและทางเคมี ก่อนนำไปใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ส่งผลให้อัตราส่วนโดยมวลของซิลิกาต่ออะลูมินาในดินขาวเพิ่มขึ้นจาก 6.2 เป็น 7.3 ทำการปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต จากการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 คือ อัตราส่วนโดยมวลของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07 และมีค่าความเป็นกรด-เบสของเจล เท่ากับ 10 ± 1 โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้ร้อยละ 95.80 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยและมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 0.75 ไมโครเมตร และ 389.2 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ เมื่อนำไปทดลองใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบเป็นเชื้อเพลิงเหลวพบว่ามีประสิทธิภาพในการแตกตัวน้ำมันปาล์มดิบที่ใกล้เคียงกับซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้า

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....*อภิรักษ์ วัฒนรัตน์*
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*ว.ว.*
ปีการศึกษา.....2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*ว.ว.*

4972513423 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: KAOLIN / ZSM-5 / ZEOLITE / HYDROTHERMAL

SUPPHALAK WORAMANKARAT : SYNTHESIS OF ZSM-5 ZEOLITE FROM NATURAL KAOLIN. THESIS ADVISOR : PROF. SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D., THESIS COADVISOR : CHAWALIT NGAMCHARUSSRIVICHAI, Ph.D., 108 pp.

ZSM-5 zeolite was synthesized from local natural kaolin, Petchaboon Province, Thailand, via a hydrothermal process using tetrapropylammonium bromide (TPA-Br) as a templating agent. Many impurities were found in natural kaolin, and the pretreatment was required prior to use as silica and alumina sources. In the first step, kaolin was thermally treated to get rid of volatile matter followed by mechanical treatment to break large particles to smaller ones. Subsequently, the small kaolin particles were treated with acid to remove inorganic impurities. Finally, quartz, as the major form of SiO_2 broken down by fusion with NaOH. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ molar ratio of the kaolin was adjusted by adding sodium silicate solution up to 100. The optimum synthesis conditions for ZSM-5 zeolite are hydrothermal temperature of 170°C , reaction time of 24 hours, the TPA/ SiO_2 ratio of 0.07 and gel pH of 10 ± 1 . The production yield of ZSM-5 was 95.8%. The synthesized ZSM-5 had average particle size of 0.75 micron and specific surface area of $389.2 \text{ m}^2/\text{g}$. Applying the synthesized ZSM-5 as a catalyst in cracking of crude palm oil revealed a similar cracking product distribution when compare to the commercial ZSM-5 zeolite.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Chemical Technology.....Student's Signature *Suphalak Woramankarat*
Field of Study...Chemical Technology...Advisor's Signature *S-D 21*
Academic Year.....2007.....Co-advisor's Signature *Chawalit Ngamcharussrivichai*

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และดร.ชวลิต งามจรุสศรีวิชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำการทำวิจัย ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ ในระหว่างการดำเนินวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนงานวิจัยตลอดการศึกษา

กราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรพน ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตรสานต์ และ ดร.กนกกรส ผลการกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการสอบ ตลอดจนให้คำแนะนำ เสนอแนะและความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณบุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และกรุณาช่วยเหลือพร้อมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ และ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัยการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนของดำเนินงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	4
2.2 ดินขาว.....	4
2.2.1 แหล่งกำเนิดดินขาว.....	4
2.2.2 สมบัติทางกายภาพของดินขาว.....	6
2.2.3 สมบัติทางเคมีของดินขาว.....	6
2.3 ซีโอไลต์.....	7
2.3.1 วิวัฒนาการของซีโอไลต์.....	7
2.3.2 นิยามของซีโอไลต์.....	8
2.3.3 การจำแนกซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง.....	10
2.3.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	16
2.3.5 ประโยชน์ของซีโอไลต์.....	18
2.4 ซีโอไลต์ ZSM-5.....	20
2.5 กระบวนการการแตกตัว.....	25
2.5.1 การแตกตัวด้วยความร้อน.....	25

		ช
บทที่		หน้า
2	2.5.2 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา.....	26
	2.5.3 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม.....	28
	2.6 ปาล์มน้ำมัน.....	29
	2.7 การวิเคราะห์น้ำมันดิบ.....	30
	2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	35
	3.1 รูปแบบการศึกษา.....	35
	3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	35
	3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินชาว ธรรมชาติ.....	35
	3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์สมบัติของดินชาวและซีโอไลต์ ZSM-5.....	36
	3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	39
	3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบสมบัติของน้ำมัน.....	42
	3.3. สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	42
	3.3.1 สารเคมีที่ใช้ในการการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินชาว ธรรมชาติ.....	42
	3.3.2 สารเคมีที่ใช้ในการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.....	43
	3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	43
	3.4.1 การปรับปรุงคุณภาพของดินชาวเบื้องต้น.....	43
	3.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินชาวธรรมชาติ.....	44
	3.4.3 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	45
	3.4.4 การแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่ง ปฏิกิริยา.....	45
4	ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	47
	4.1 การวิเคราะห์สมบัติของดินชาวเบื้องต้น.....	47
	4.2 การปรับปรุงคุณภาพของดินชาวเบื้องต้น.....	49

บทที่	หน้า
4	4.2.1 ผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางความร้อน..... 49
	4.2.2 ผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางกายภาพ..... 51
	4.2.3 ผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางเคมี.... 52
4.3	ผลของตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาว..... 54
	4.3.1 ผลของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา..... 54
	4.3.2 ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล..... 57
	4.3.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล..... 61
	4.3.4 ผลของปริมาณสารก่อโครงร่าง..... 64
4.4	การเปรียบเทียบสมบัติของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติกับซีโอไลต์ทางการค้า..... 68
4.5	การแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา..... 70
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 73
	5.1 สรุปผลการวิจัย..... 73
	5.3 ข้อเสนอแนะ..... 75
	รายการอ้างอิง..... 76
	ภาคผนวก..... 80
	ภาคผนวก ก การคำนวณการปริมาณโซเดียมซิลิเกตเพื่อปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา..... 81
	ภาคผนวก ข การคำนวณร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้..... 83
	ภาคผนวก ค รูปแบบ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่ภาวะในการทดลองต่างๆ..... 89
	ภาคผนวก ง ตัวเร่งปฏิกิริยา..... 99
	ภาคผนวก จ สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 103
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 108

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ประวัติของการศึกษาเกี่ยวกับซีโอไลต์.....	7
2.2 การจำแนกกลุ่มของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ.....	12
2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจัดจำแนกตามโครงสร้างทุติยภูมิ.....	12
2.4 สารก่อโครงร่างที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5.....	23
4.1 วัตถุประสงค์ประกอบของดินขาวที่ใช้ในการทดลอง.....	46
4.2 วัตถุประสงค์ประกอบของดินขาวก่อนและหลังแคลไซน์.....	49
4.3 วัตถุประสงค์ประกอบของดินขาวหลังทำการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี.....	51
4.4 สมบัติของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาว และซีโอไลต์เกรดทางการค้า	69
ข1. ค่า intensity ของพีคเอกลักษณ์ ที่ร้อยละโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5 ต่างๆ.....	86
ข2. ค่า intensity ของพีคเอกลักษณ์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100.....	88
ง1. การเปรียบเทียบปัจจัยในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิธพันธุ์.....	100
ง2. ตัวอย่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่มีความสำคัญเชิงอุตสาหกรรม.....	101

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต.....	5
2.2 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	6
2.3 โครงสร้าง 2 มิติ ของอะลูมิเนียมซิลิเกต.....	9
2.4 โครงสร้างทรงสี่หน้าของผลึกซีโอไลต์.....	9
2.5 ขนาดและลักษณะทางเรขาคณิตของช่องเปิดสำหรับซีโอไลต์.....	10
2.6 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์.....	10
2.7 ลักษณะเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์.....	11
2.8 การเลือกทำปฏิกิริยาจากรูปร่างของสารตั้งต้นภายในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์.....	15
2.9 การเลือกทำปฏิกิริยาภายในโครงสร้างของซีโอไลต์.....	15
2.10 การเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์จากอนุภาคของเจล.....	18
2.11 โครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ ZSM-5.....	21
2.12 ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ระนาบ [100].....	21
2.13 ลักษณะช่องว่างทั้งสองระบบในซีโอไลต์ ZSM-5.....	22
2.14 รูปแบบ XRD มาตรฐานของซีโอไลต์ ZSM-5.....	24
2.15 ต้นปาล์มและผลปาล์ม.....	29
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ความร้อนในระบบไฮโดรเทอร์มัล รุ่น KH-02A ของ Hiro.....	36
3.2 ตู้อบเครื่องปฏิกรณ์ในระบบไฮโดรเทอร์มัล.....	36
3.3 เทคนิค X-ray diffraction (XRD).....	37
3.4 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ รุ่น JDX-8030 ยี่ห้อ JEOL.....	37
3.5 เทคนิค X-ray fluorescence spectrometry (XRF).....	38
3.6 เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM).....	39
3.7 เครื่อง Surface area and porosity analyzer รุ่น ASAP 2020 ยี่ห้อ Micromeritic	38
3.8 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 70 ลิตร.....	41
3.9 เครื่องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์.....	41
3.10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น รุ่น Varian CP-3800.....	42
4.1 รูปแบบ XRD ของดินขาวจากจังหวัดเพชรบูรณ์.....	48
4.2 ลักษณะทางกายภาพของดินขาวและภาพถ่าย SEM ของอนุภาคดินขาว.....	48
4.3 ลักษณะทางกายภาพของดินขาวหลังผ่านการแคลไซน์.....	49
4.4 รูปแบบ XRD ของดินขาวก่อนและหลังแคลไซน์.....	50

ภาพประกอบ

หน้า

4.5	รูปแบบ XRD ของดินขาวหลังผ่านการบดและคัดแยกอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนและหลังผ่านการแคลไซน์.....	51
4.6	รูปแบบ XRD ของดินขาวธรรมชาติและซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้.....	53
4.7	รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากเจลที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่างๆ และซีโอไลต์ ZSM-5 มาตรฐาน.....	55
4.8	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากเจลที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 และ 200.....	56
4.9	ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากเจลที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาต่างๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	56
4.10	รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ.....	58
4.11	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ.....	59
4.12	ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	60
4.13	รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ.....	61
4.14	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ.....	62
4.15	ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	63
4.16	รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกาต่างๆ.....	64
4.17	ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกาต่างๆ.....	65
4.18	ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกาต่างๆ ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	66
4.19	รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติและซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้า.....	68

ภาพประกอบ	หน้า
4.20 ผลของชนิดซีโอไลต์ HZSM-5 ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม.....	70
4.21 ผลของชนิดซีโอไลต์ HZSM-5 ต่อร้อยละการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์ น้ำมันโดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม.....	71
ข1. รูปแบบ XRD ของดินขาวธรรมชาติ.....	83
ข2. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก.....	84
ข3. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก.....	84
ข4. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก.....	85
ข5. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก.....	85
ข6. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก.....	86
ข7. ความสัมพันธ์ระหว่างค่า intensity เฉลี่ยกับร้อยละโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5	87
ค1. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ของเจล เท่ากับ 20 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07.....	89
ค2. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ของเจล เท่ากับ 40 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07.....	90
ค3. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ของเจล เท่ากับ 60 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07.....	90
ค4. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ของเจล เท่ากับ 80 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07.....	91
ค5. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ของเจล เท่ากับ 100 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07.....	91

ภาพประกอบ

หน้า

ค16. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.04..... 97

ค17. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.06..... 97

ค18. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.09..... 98

ค19. รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.10..... 98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ดินขาว (kaolin) เป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติที่สามารถพบได้ในประเทศไทย ส่วนใหญ่การนำดินขาวไปใช้ประโยชน์นั้นจำกัดอยู่เพียงในวงการอุตสาหกรรมเซรามิกส์ แต่ในปัจจุบันดินขาวได้เริ่มเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมอื่นๆ อาทิเช่น อุตสาหกรรมยาง พลาสติก สี ซีเมนต์ เครื่องสำอาง วัสดุทนไฟ และไฟเบอร์ป้องกันความร้อน เป็นต้น โดยจากการศึกษาสมบัติของดินขาวพบว่า ดินขาวมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาและอะลูมินา ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ ได้อีกมากมาย

เนื่องด้วยองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ซึ่งเป็นซิลิกาและอะลูมินาเช่นเดียวกับดินขาว ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำดินขาวมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาวนั้นนับเป็นการเพิ่มมูลค่าของดินขาวได้อีกทางหนึ่ง โดยซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีคุณค่าในเชิงพาณิชย์สูง และมีประโยชน์การใช้งานที่หลากหลาย อาทิเช่น ใช้เป็นสารดูดซับ (adsorbent) ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีต่างๆ เช่น การเปลี่ยนไอโซเมอร์ (isomerization) การเติมหมู่แอลคิล (alkylation) เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่ามีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากวัตถุดิบตั้งต้นซึ่งใช้เป็นแหล่งของซิลิกา และอะลูมินาที่แตกต่างกันออกไป ไม่ว่าจะเป็นสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมอะลูมิเนตโดยตรง หรือจากวัตถุดิบเหลือใช้จากอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ เช่น ถ้ำกลบ และถ้ำลอยถ่านหินลิกไนต์ เป็นต้น ซึ่งนับว่าเป็นการใช้ประโยชน์จากสิ่งเหลือใช้เหล่านั้นได้อย่างคุ้มค่า นอกเหนือไปจากนั้นการนำวัตถุดิบที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แร่เซอเพนไทน์ (serpentine) เพอไรต์ (perlite) และดินขาวมาใช้ในการสังเคราะห์ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ช่วยในการเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบที่มีอยู่ในธรรมชาติและในประเทศได้เป็นอย่างมาก โดยซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวัตถุดิบดังกล่าวมาข้างต้น สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีได้ ทั้งยังมีสมบัติและให้ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ไม่แตกต่างกับซีโอไลต์เกรดทางการค้าอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา ปริมาณสารก่อโครงสร้าง อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล
- 1.2.2 หาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาว

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาว
- 1.3.2 เพิ่มมูลค่าของดินขาว และลดปริมาณการนำเข้าซีโอไลต์ ZSM-5 จากต่างประเทศ

1.4 ขอบเขตการศึกษา

- 1.4.1 ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวธรรมชาติเบื้องต้นด้วยสารเคมี และความร้อน ก่อนทำการสังเคราะห์ เพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ
- 1.4.2 สังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล
- 1.4.3 นำซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ ไปใช้ในปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับซีโอไลต์ทางการค้า

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

- 1.5.1 ค้นหาข้อมูล ทฤษฎี และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ
- 1.5.2 จัดหาอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
- 1.5.3 วิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบของดินขาวก่อนทำการทดลอง ได้แก่
 - องค์ประกอบธาตุ ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
 - โครงสร้าง ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)
 - พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเทคนิค N_2 adsorption/desorption
 - ลักษณะพื้นผิวและรูปร่างผลึก ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

1.5.4 ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวเบื้องต้น เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกจากดินขาว ด้วยการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางกายภาพ และกระบวนการทางเคมี โดยตัวแปรที่ศึกษาในส่วนของกระบวนการทางเคมี ได้แก่

- ชนิดของสารเคมี
 - กรด ได้แก่ HCl และ H_2SO_4
 - เบสร่วมกับกรด ได้แก่ NaOH ร่วมกับ HCl และ NaOH ร่วมกับ H_2SO_4
- ความเข้มข้นของสารเคมี
 - ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร
 - ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร

1.5.5 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 โดยตัวแปรที่ศึกษา คือ

- อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินา
- ปริมาณสารก่อโครงร่าง
- อุณหภูมิ
- เวลา

1.5.6 ตรวจสอบลักษณะสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเทคนิคต่างๆ

- องค์ประกอบธาตุ ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
- โครงสร้าง ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD)
- พื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยเทคนิค N_2 adsorption/desorption
- ลักษณะพื้นผิวและรูปร่างผลึก ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

1.5.7 วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีคุณค่าในเชิงพาณิชย์สูง โดยมีการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ใช้เป็นสารดูดซับ และใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีอย่างแพร่หลาย และเนื่องด้วยองค์ประกอบหลักของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่เป็นซิลิกาและอะลูมินา เช่นเดียวกับดินขาวซึ่งเป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติที่สามารถพบได้ในหลายภูมิภาคของประเทศไทย ดังนั้นการนำดินขาวมาใช้เป็นวัตถุดิบหลัก โดยใช้เป็นแหล่งซิลิกาและอะลูมินาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จึงก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศได้อย่างคุ้มค่า ลดการสูญเสียในเชิงเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากการนำเข้าสู่ซีโอไลต์ ZSM-5 จากต่างประเทศ นอกจากนั้นยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของดินขาวอีกด้วย

2.2 ดินขาว

ดินขาวมีรากศัพท์มาจากภาษาจีน เกาเลียง (Kao Liang) เป็นชื่อของภูเขาที่มียอดแหลม (high ridge) บางทีนิยมเรียกว่า China-Clay เพื่อเป็นเกียรติแก่ประเทศจีน ซึ่งเป็นประเทศที่นำดินขาวมาใช้เป็นประเทศแรก (กรมทรัพยากรธรณี, 2526)

ดินขาว เป็นดินที่เกิดจากแร่อะลูมิโนซิลิเกต ที่เป็นโครงสร้างของหินชนิดต่างๆ เช่น หินฟันม้า (feldspar) ไมกา (mica) ควอตซ์ (quartz) หินปูน (lime stone) ฯลฯ ดินขาวมักจะเกิดบนที่ราบสูงทั่วไป บางแหล่งอาจพบใกล้แหล่งน้ำในที่ราบลุ่ม เนื่องจากการพัดพาของกระแสน้ำ ทำให้มีสีขาวหม่นค่อนข้างเป็นสีเทาบ้าง สีเหลืองอ่อนบ้าง เนื่องจากมีสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ได้แก่ แคลเซียม (calcium) แมกนีเซียม (magnesium) โซเดียม (sodium) และโพแทสเซียม (potassium) ซึ่งทำให้ความบริสุทธิ์ของดินขาวน้อยลง และหากใช้กลังจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูง หรือเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ จะพบว่าเม็ดดินขาวมีลักษณะเป็นผลึกแผ่นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน หรือแท่งหกเหลี่ยม

2.2.1 แหล่งกำเนิดดินขาว

ดินขาวที่พบในประเทศมี 2 ชนิด ซึ่งจำแนกความแตกต่างตามสารประกอบทางเคมีที่มีองค์ประกอบหลักดังนี้ [อายุวัฒน์, 2543]

2.2.1.1 ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต

ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต เกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิตที่ผุพังโดยบรรยากาศ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาวอยู่ในแหล่งเดิม โดยดินขาวชนิดนี้มีสารประกอบที่เจือปนหลายชนิด ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และโพแทสเซียม (K_2O) เป็นต้น ที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงสภาพโดยสมบูรณ์ เมื่อนำมาล้าง จึงปรากฏสิ่งตกค้างบนตะแกรงที่มีเม็ดหยาบ บางแหล่งจะพบว่าเป็นลักษณะของเม็ดหิน หรือเม็ดทรายอย่างชัดเจน

ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตดังรูปที่ 2.1 เมื่อนำมาผสมกับน้ำ จะมีความเหนียวสามารถขึ้นรูปทรงได้ และเมื่อนำมาเผาถึงอุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะแข็งตัวคงรูปอยู่ได้ ไม่แตกยุ่ยสามารถมาผสมกับวัตถุบดอื่นๆ เพื่อเป็นเนื้อดินปั้น (bodies) หรือผสมน้ำเคลือบได้ดี ส่วนการตรวจสอบดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต โดยใส่หลอดทดลอง แล้วเติมโคบอลต์ไนเตรต (CoNO_3) ลงไปเล็กน้อย เพื่อให้เกิดความขึ้น แล้วนำไปเผาจะปรากฏสีน้ำเงินขึ้น

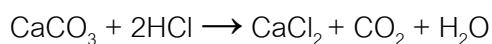


รูปที่ 2.1 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต

2.2.1.2 ดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต

ดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต เกิดจากการแปรสภาพของหินปูนที่ผุพังโดยบรรยากาศ และภาวะแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาว ดินขาวชนิดนี้สามารถนำมาทำแป้งผัดหน้าทีเรียกว่า “ดินสอพอง (Marl)” ทำปุ๋ยใส่ต้นไม้ เพราะมีธาตุโพแทสเซียม และโซเดียมเจือปน โดยลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตดังรูปที่ 2.2 การตรวจสอบดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำโดยการหยดกรดเกลือเข้มข้นลงไป

จะเกิดฟองก๊าซอย่างรุนแรงเนื่องจากกรดเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ส่งผลให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยา



รูปที่ 2.2 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต

2.2.2 สมบัติทางกายภาพของดินขาว

2.2.2.1 ขนาดของเม็ดดิน (particle size) เกี่ยวข้องกับความเหนียว (plasticity) และการหดตัวของดินเมื่อแห้ง (dried shrinkage) ซึ่งโดยเฉลี่ยขนาดของเม็ดดินที่นำมาใช้ ควรมีขนาดประมาณ 0.05 – 10 ไมครอน ในปัจจุบันที่ใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรม จะมีขนาดเม็ดดินประมาณ 0.05 ไมครอน

2.2.2.2 ความแข็งแรงเมื่อแห้ง (green strength) เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ดิบ (green ware) มาก เพราะดินขาวที่มีความเหนียวน้อย เมื่อขึ้นรูปแล้วจะเปราะง่าย โดยเฉลี่ยความแข็งแรงของดินขาวควรอยู่ระหว่าง 40 - 120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

2.2.2.3 การหดตัวหลังจากการเผา (fired shrinkage) เกี่ยวข้องกับขนาดรูปทรงของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วดินขาวจะหดตัวหลังการเผาเฉลี่ยประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

2.2.3. สมบัติทางเคมีของดินขาว

ดินขาวมีสารประกอบทางเคมีเป็น $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งองค์ประกอบหลักดังนี้ คือ SiO_2 , Al_2O_3 และ H_2O เท่ากับ 46.3 39.8 และ 13.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีข้างต้น ถือเป็นหลักสากลในการวิเคราะห์ทางเคมี ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงไป ด้วยเนื่องจากเหตุ 2 ประการ คือ

2.2.3.1 โครงสร้างของดินขาวที่แทนที่ด้วยโลหะที่มีประจุบวก

2.2.3.2 สารประกอบอื่นๆ เจือปน ได้แก่ Quartz, Feldspar, Rutile, Pyrite, Tourmaline, Zircon, Hematite, Magnetite, Fluoride และ Muscovite เป็นต้น

2.3 ซีโอไลต์

2.3.1. วิวัฒนาการของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ถูกพบครั้งแรกโดย Cronstedt ในปี ค.ศ.1756 ซึ่งเป็นซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด stilbite คำว่า ซีโอไลต์ (zeolite) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก แปลว่า หินเดือด (boiling stones) โดย zeo แปลว่า เดือด และ lithos แปลว่า หิน เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนซีโอไลต์จะปลดปล่อยไอน้ำออกมา และซีโอไลต์สามารถดูดน้ำกลับคืนได้ง่าย กล่าวคือเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ [จตุพร และนุรักษ์, 2547] ต่อมาในปี ค.ศ.1862 St. Claire Deville สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ levynite ได้โดยให้ความร้อนแก่สารละลายผสมของโพแทสเซียมซิลิเกตกับโซเดียมอะลูมิเนต ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และในปี ค.ศ.1882 Schulten [Breck, 1974] สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ Analcime ได้ และในช่วงปี ค.ศ.1956 [Breck, 1956] สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ A และชนิด X ได้ ในปี ค.ศ.1960 และได้มีการนำซีโอไลต์ไปใช้ในกระบวนการปิโตรเลียม หลังจากนั้นการพัฒนาทางด้านซีโอไลต์เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งถึงปัจจุบันพบว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติสามารถแบ่งเป็น 34 ชนิด และซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์มีประมาณ 100 ชนิด [Bhatia, 1990] อย่างไรก็ตามพบว่าซีโอไลต์สังเคราะห์สามารถนำไปใช้งานแพร่หลายในเชิงพาณิชย์มากกว่าซีโอไลต์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

ตารางที่ 2.1 ประวัติของการศึกษาเกี่ยวกับซีโอไลต์

ค.ศ.	เหตุการณ์
1756	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติเป็นครั้งแรก โดยให้ชื่อว่า stibite
1825	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด levynite
1842	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด faujasite
1862	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ levynite เป็นครั้งแรก
1863	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด mordenite
1870-88	การศึกษาสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์เป็นครั้งแรก
1890	การค้นพบซีโอไลต์ธรรมชาติชนิด erionite
1929	การอธิบายถึงความเป็นกรดในซีโอไลต์
1930-1934	การกำหนดโครงสร้างของซีโอไลต์เป็นครั้งแรก
1932	การอธิบายสมบัติตะแกรงร่อนโมเลกุล (molecular sieve) ของซีโอไลต์
1948	สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์บริสุทธิ์ได้เป็นครั้งแรก

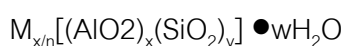
ตารางที่ 2.1 ประวัติของการศึกษาเกี่ยวกับซีโอไลต์ (ต่อ)

ค.ศ.	เหตุการณ์
1948	สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ mordenite
1949	การเตรียมซีโอไลต์ในรูปกรด
1956-64	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ A X และ Y โดยบริษัท Union carbide
1962	การนำซีโอไลต์ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาการแตกตัว โดยบริษัท Mobil Oil
1971-72	การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 และ ZSM-8 โดยบริษัท Mobil Oil
1975	การนำซีโอไลต์ ZSM-5 ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเอทิลเบนซีน
1978	การนำซีโอไลต์ ZSM-5 ไปใช้ในการกำจัดไขในน้ำมัน การศึกษาโครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 และ ZSM-11
1979	การวิเคราะห์ซีโอไลต์โดยใช้เครื่อง Electron Microscopy ที่มีความละเอียดสูงและเครื่อง NMR
1985	การเริ่มนำซีโอไลต์ ZSM-5 ไปใช้ในการผลิตแก๊สลิ้นจากเมทานอลในระดับอุตสาหกรรม
1986	การสังเคราะห์อะลูมิโนฟอสเฟต (aluminophosphate) และซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบซิลิกาสูงชนิด NU-1 และ FU-1

2.3.2 นิยามของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบโครงสร้างผลึกของอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีความเป็นผลึกสูง มีโครงสร้างเป็นตาข่ายสามมิติ (framework) ของ $[\text{SiO}_4]^{4-}$ และ $[\text{AlO}_4]^{5-}$ ต่อเรียงกันโดยใช้อะตอมของออกซิเจนร่วมกัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.4ก และ 2.4ข ตามลำดับ) ภายในโครงสร้างโดยทั่วไปจะเป็นโครงสร้างเปิด และมีโพรงซึ่งมีโมเลกุลของน้ำและไอออนบวกของหมู่ I และหมู่ II อยู่ภายในโพรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4ค โดยทั่วไป ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม สตรอนเชียม และแบเรียม เป็นต้น โดยประจุบวกของโลหะนี้จะเกาะกับซีโอไลต์อย่างหลวมๆ พร้อมทั้งจะแลกเปลี่ยนกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้

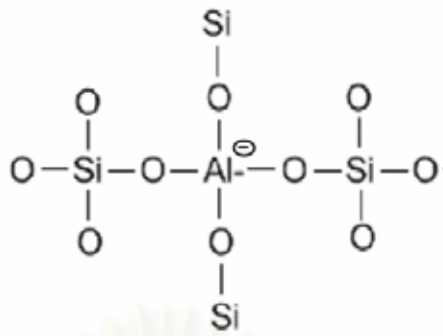
สูตรโครงสร้างของซีโอไลต์แสดงในรูปของหน่วยเซลล์ ดังนี้



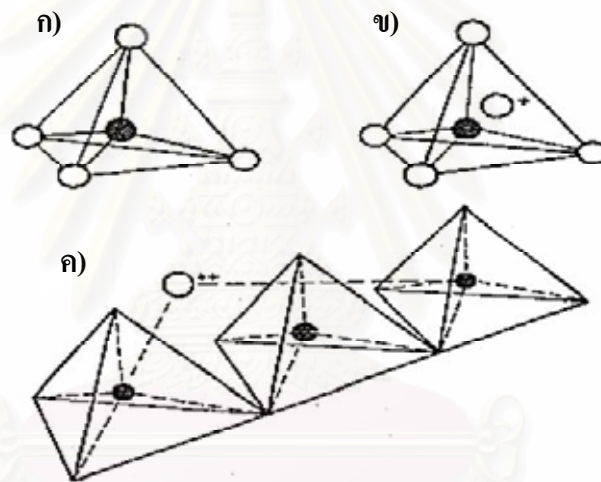
เมื่อ M คือ ไอออนบวกที่มีวาเลนซ์เล็กตรอนเท่ากับ n

w คือ จำนวนของน้ำในโมเลกุล

y/x คือ อัตราส่วน Si/Al จะมีค่าในช่วง 1-5 ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของซีโอไลต์

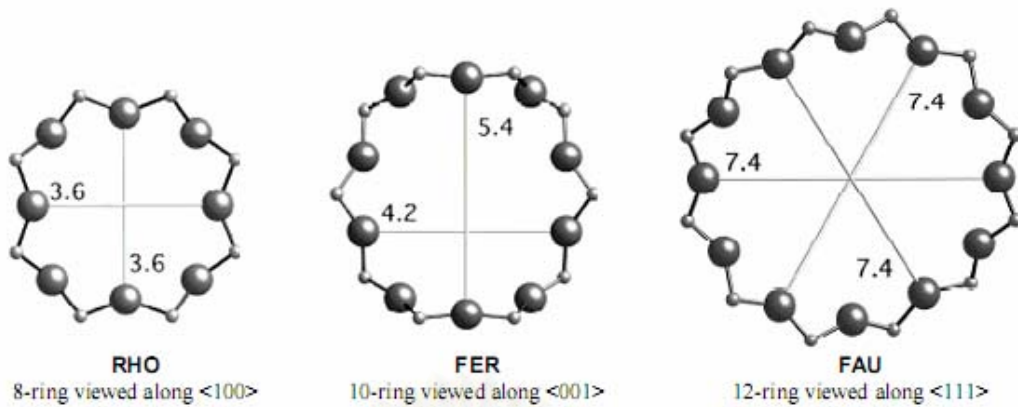


รูปที่ 2.3 โครงสร้าง 2 มิติ ของอะลูมิโนซิลิเกต



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทรงสี่หน้าของ (ก) $[\text{SiO}_4]^{4-}$ (ข) $[\text{AlO}_4]^{5-}$ และ
(ค) การจัดเรียงตัวในผลึกของซีโอไลต์

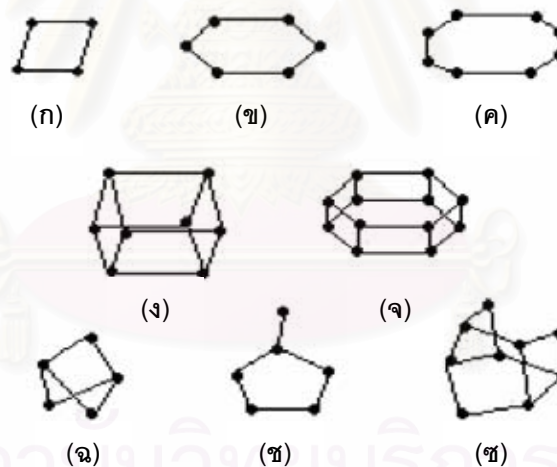
เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์มีขนาดของช่องว่างหรือโพรงที่สม่ำเสมอ โดยทั่วไปมีขนาดประมาณ 3-10 อังสตรอม ขึ้นกับหน่วยของโครงสร้างผลึก จึงทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเหมือนตะแกรงร่อนโมเลกุล (molecular sieve) ซึ่งจะยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าโพรงเข้าไปในโครงสร้าง ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่กว่าโพรงไม่สามารถผ่านเข้าได้ นอกจากนี้ยังมีถ่านหิน แก้วที่มีรูพรุน (porous glass) และถ่านคาร์บอน (active carbons) ก็มีสมบัตินี้เช่นกัน



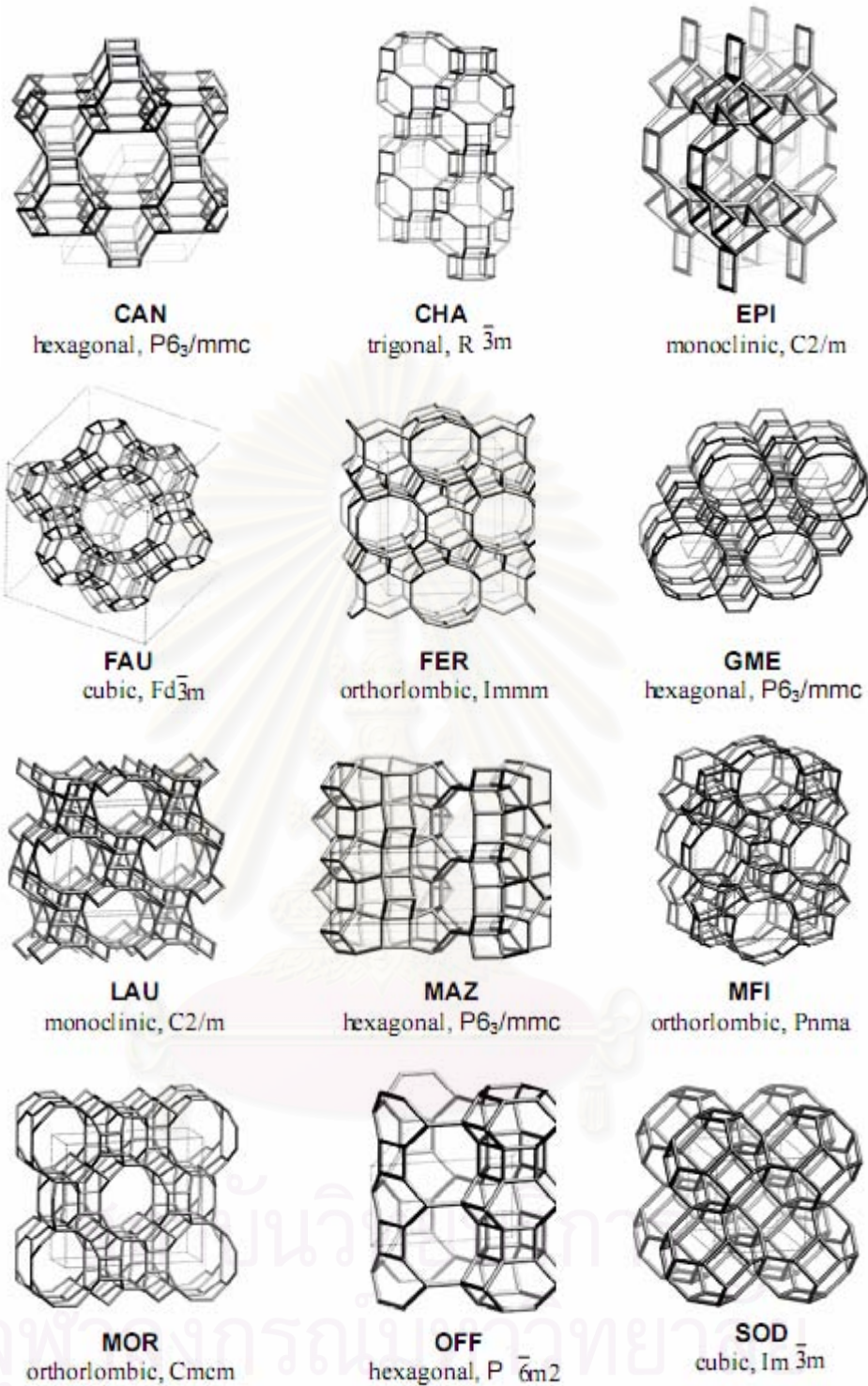
รูปที่ 2.5 ขนาดและลักษณะทางเรขาคณิตของช่องเปิดสำหรับซีโอไลต์ [R.M. Barrer, 1986]

2.3.3. การจำแนกซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง [Breck, 1974]

โครงสร้างของซีโอไลต์สามารถแบ่งเป็นหน่วยโครงสร้างย่อยๆ (sub-units) ของทรงสี่หน้าของอะลูมิเนียมและซิลิกอน ที่จัดเรียงตัวซ้ำๆ กัน โดยเรียกหน่วยย่อยของโครงสร้างนี้ว่าเป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units : SBUs) ซึ่งแบ่งได้เป็น 8 SBUs ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ (ก) single fouring (S4R), (ข) single six ring (S6R), (ค) single eight ring (S8R), (ง) doublefour ring (D4R), (จ) double six ring (D6R), (ฉ) complex 4-1, (ช) complex5-1 และ (ซ) complex 4-4-1 [Dyer,1988]



รูปที่ 2.7 ลักษณะเชิงโครงสร้างของซีโอไลต์ [J.V. Smith, 1976; Szostak, 1989]

การจำแนกชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ สามารถแบ่งกลุ่มโครงสร้างของซีโอไลต์ได้เป็น 7 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และสามารถจำแนกโครงสร้างของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิได้ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 การจำแนกกลุ่มของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ [Breck, 1974]

Group	Secondary Building Units (SBUs)
1	Single 4-ring, S4R
2	Single 6-ring, S6R
3	Double 4-ring, D4R
4	Double 6-ring, D6R
5	Complex 4-1, T ₅ O ₁₀ unit
6	Complex 5-1, T ₈ O ₁₆ unit
7	Complex 4-4-1, T ₁₀ O ₂₀ unit

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจัดจำแนกตามโครงสร้างทุติยภูมิ [Breck, 1974]

Secondary Building Units (SBUs)	Structure Type	Name	Typical unit cell content
S4R	ANA	Analcime	Na ₁₆ Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆ ·10H ₂ O
	ANA	Wairakite	Ca ₈ Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆ ·16H ₂ O
	GIS	Gismondine	Ca ₄ Al ₈ Si ₈ O ₃₂ ·16H ₂ O
	GIS	Amicite	K ₄ Na ₄ Al ₈ Si ₈ O ₃₂ ·10H ₂ O
	GIS	Gobbinsite	Na ₅ Al ₅ Si ₁₁ O ₃₂ ·11H ₂ O
	GIS	Zeolite NaP-1	Na ₆ Al ₆ Si ₁₀ O ₃₂ ·12H ₂ O
	LAU	Laumonite	Ca ₄ Al ₈ Si ₁₆ O ₄₆ ·16H ₂ O
	MER	Merlionite	K ₅ Ca ₂ Al ₉ Si ₂₃ O ₆₄ ·24H ₂ O
	PAU	Paulingite	(K ₂ ,Na ₂ ,Ca,Ba) ₇₆ Al ₁₅₂ Si ₅₂₀ O ₁₃₄₄ ·700H ₂ O
PHI	Phillipsite	K ₂ Ca _{1.5} NaAl ₆ Si ₁₀ O ₃₂ ·12H ₂ O	

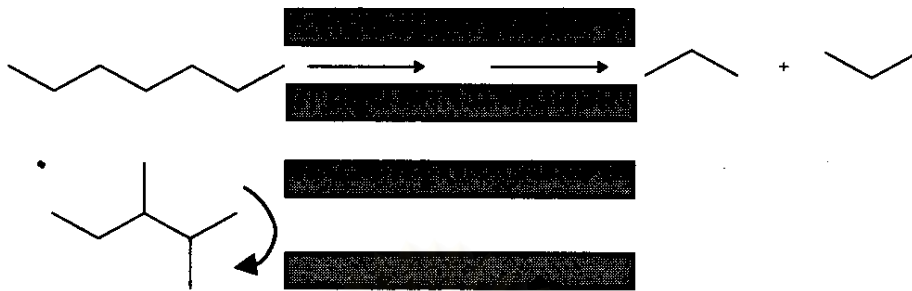
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจัดจำแนกตามโครงสร้างทุติยภูมิ [Breck, 1974] (ต่อ)

Secondary Building Units (SBUs)	Structure Type	Name	Typical unit cell content
	PHI	Harmotome	$Ba_2Ca_{0.5}Al_5Si_{11}O_{32} \cdot 12H_2O$
	YUG	Yugawaralite	$Ca_2Al_4Si_{12}O_{32} \cdot 8H_2O$
S6R	CAN	Cancrinite hydrate	$Na_6Al_6Si_6O_{24} \cdot 8H_2O$
	ERI	Erionite	$Na_2K_2Mg_{0.5}Ca_2Al_9Si_{27}O_{72} \cdot 27H_2O$
	LEV	Levynite (Levyne)	$NaCa_3Al_7Si_{11}O_{36} \cdot 18H_2O$
	LTL	Zeolite L	$K_6Na_3Al_9Si_{27}O_{72} \cdot 21H_2O$
	LOS	Zeolite Losod	$Na_{12}Al_{12}Si_{12}O_{48} \cdot 19H_2O$
	MAZ	Mazzite (Zeolite Omega)	$Mg_2K_3Ca_{1.5}Al_{10}Si_{26}O_{72} \cdot 28H_2O$
	OFF	Offretite	$KCa_2Al_5Si_{13}O_{36} \cdot 15H_2O$
	SOD	Sodalite hydrate (HS)	$Na_6Al_6Si_6O_{24} \cdot 8H_2O$
D4R	LTA	Zeolite A	$Na_{12}Al_{12}Si_{46}O_{146} \cdot 27H_2O$
D6R	CHA	Chabazite	$Ca_2Al_4Si_8O_{24} \cdot 13H_2O$
	CHA	Wilhendersonite	$K_2Ca_2Al_6Si_6O_{24} \cdot 10H_2O$
	FAU	Faujasite	$Na_{12}Ca_{12}Mg_{11}Al_{58}Si_{134}O_{384} \cdot 235H_2O$
	FAU	Zeolite X	$Na_{88}Al_{88}Si_{104}O_{384} \cdot 220H_2O$
	GME	Gmelinite	$Na_8Al_8Si_{16}O_{48} \cdot 24H_2O$
	KFI	Zeolite ZK-5	$Na_{30}Al_{30}Si_{66}O_{192} \cdot 98H_2O$
	RHO	Zeolite Rho	$(Na,Cs)_{12}Al_{12}Si_{36}O_{96} \cdot 46H_2O$
	EDI	Edingtonite	$Ba_2Al_4Si_6O_{20} \cdot 8H_2O$
	NAT	Natrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 16H_2O$
	NAT	Tetranatrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 16H_2O$
	NAT	Paranatrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 24H_2O$
	NAT	Mesolite	$Na_{16}Ca_{16}Al_{48}Si_{72}O_{240} \cdot 64H_2O$
	NAT	Scolecite	$Ca_8Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 24H_2O$
	THO	Thomsonite	$Na_4Ca_8Al_{20}Si_{20}O_{80} \cdot 24H_2O$

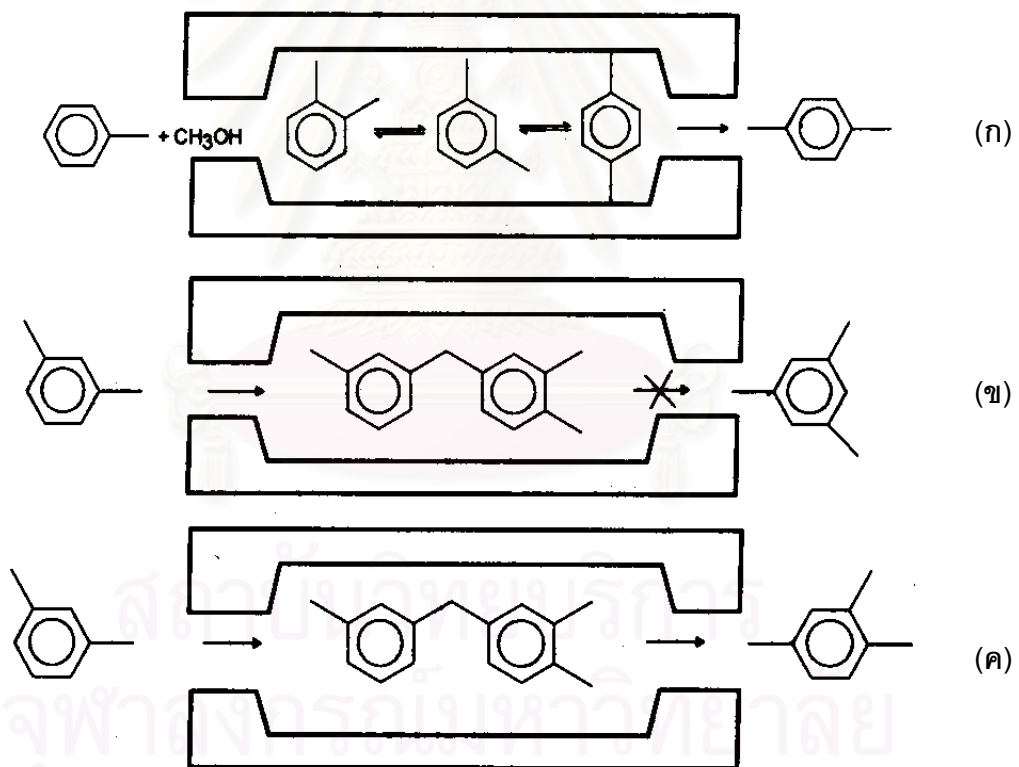
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่ถูกจัดจำแนกตามโครงสร้างทุติยภูมิ [Breck, 1974] (ต่อ)

Secondary Building Units (SBUs)	Structure Type	Name	Typical unit cell content
D6R	THO	Gonnardites	$\text{Na}_5\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{11}\text{O}_{40} \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
5-1	BIK	Bikitaite	$\text{Li}_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
	DAC	Dachiardite	$\text{Na}_5\text{Al}_5\text{Si}_{19}\text{O}_{48} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	EPI	Epistilbite	$\text{Ca}_3\text{Al}_6\text{Si}_{18}\text{O}_{48} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	FER	Ferrierite	$\text{NaCa}_{0.5}\text{Mg}_2\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72} \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
	MFI	Zeolite ZSM-5	$\text{Na}_n\text{Al}_n\text{Si}_{96-n}\text{O}_{192} \sim 16\text{H}_2\text{O} (n \sim 3)$
	MOR	Mordenite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	4-4-1	BRE	Brewsterite
HEU		Heulandite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
HEU		Clinoptilolite	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$
STI		Stibite	$\text{Na}_2\text{Ca}_4\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72} \cdot 34\text{H}_2\text{O}$
STI		Stellerite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72} \cdot 28\text{H}_2\text{O}$
STI		Barrerite	$\text{Na}_8\text{Al}_8\text{Si}_{28}\text{O}_{72} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$

การที่ซีโอไลต์มีขนาดและรูปร่างของโพรงที่เป็นลักษณะเฉพาะตัว ทำให้ซีโอไลต์มีความจำเพาะสูงเชิงรูปร่าง (shape selectivity) พิเศษในการเร่งปฏิกิริยาเคมี คือ สามารถเลือกสารตั้งต้นให้เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ ถ้าสารตั้งต้นมีขนาดใหญ่กว่าโพรงจะไม่สามารถผ่านเข้าไปจับกับตำแหน่งว่องไว (active site) ได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 นอกจากนี้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ก็มีผลต่อปฏิกิริยาเช่นกัน รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดผลิตภัณฑ์แล้ว สารที่มีรูปร่างเหมาะสมเท่านั้นจึงผ่านออกมาจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ส่วนสารที่มีกิ่งก้านมากจะติดอยู่ภายในโพรง [จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษฏานุรักษ์, 2547]



รูปที่ 2.8 การเลือกทำปฏิกิริยาจากรูปร่างของสารตั้งต้นภายในตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์
[จตุพร และนุรักษ์, 2547]



รูปที่ 2.9 การเลือกทำปฏิกิริยาภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ (ก) การเลือกทำปฏิกิริยา
(ข) การเลือกจากรูปร่างของสารมัธยันต์ (intermediate) และ
(ค) การเลือกจากรูปร่างของสารผลิตภัณฑ์ [จตุพร และนุรักษ์, 2547]

2.3.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ สามารถทำได้โดยใช้กระบวนการให้ความร้อนที่ความดันไอน้ำ อิ่มตัว (hydrothermal) โดยทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส และความดันสูง ปฏิกิริยาจะดำเนินไปตามระยะเวลา ความดัน และอุณหภูมิที่กำหนด ภายใต้ความดันไอน้ำอิ่มตัว อย่างไรก็ตามได้มีวิธีการใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ใช้อุณหภูมิต่ำ ซึ่งสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ที่อุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมihองจนถึงจุดเดือดของน้ำ

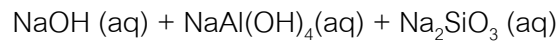
องค์ประกอบหลักในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ [Dyer, 1988]

1. อะลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลองโดยทั่วไปจะใช้เมทัลอะลูมิเนต (metal aluminates) เป็นสารตั้งต้น เช่น โซเดียมอะลูมิเนต หรือบางครั้งอาจใช้ $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{AlO}(\text{OH})$ อะลูมิเนียมแอสคอกไซด์ เกลืออะลูมิเนียม หรือแหล่งแร่อะลูมิเนียมตามธรรมชาติ เช่น แก้ว หิน ฟันม้า หรือ เฟลด์สปาทอยด์ (feldspatoides)
2. ซิลิกอน โดยทั่วไปจะใช้สารละลายของซิลิกา เช่น โซเดียมเมทาซิลิเกตเพนตะไฮเดรต (sodium metasilicate pentahydrate) ซิลิกาไซล เช่น ซิลิกา 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก บางครั้งอาจใช้ซิลิกาเจล แก้ว ทราาย แร่ควออร์ตซ์ เป็นต้น
3. ไอออนบวก ได้แก่ ไอออนของโลหะหมู่ I และ หมู่ II ที่อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้สามารถเตรียมได้จากสารประกอบออกไซด์ และเกลือชนิดอื่นๆ ของโลหะหมู่ I และ II
4. สารเคมีอื่น ๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) ที่แตกตัวให้ไอออนบวก ซึ่งเรียกว่า สารก่อโครงร่าง (template) โดยใส่ในเจลเพื่อช่วยในการตกผลึกของซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

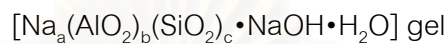
การสังเคราะห์ซีโอไลต์ใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal process) โดยการนำสารประกอบซิลิกา เช่น โซเดียมซิลิเกต (sodium silicate) สารประกอบอะลูมินา เช่น โซเดียมอะลูมิเนต หรือ อะลูมิเนียมซัลเฟต (aluminium sulfate) เป็นต้น ผสมกับสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งไฮดรอกไซด์ไอออนจะเป็นตัวช่วยเปลี่ยนซิลิกาให้อยู่ในรูปของซิลิเกตโดยสารละลายที่ผสมกันแล้วเรียกว่า เจล เป็นสาร hydrous metal aluminosilicate ที่เกิดจากการเกิดโคโพลิเมอร์ไรเซชัน (copolymerization) ของซิลิเกตและอะลูมิเนตที่อยู่ในสารละลาย มีกลไกการเกิดพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation-polymerization mechanism) เจลที่ได้สามารถนำไปสังเคราะห์ซีโอไลต์ ด้วยการตกผลึกภายใต้กระบวนการปรับปรุงคุณภาพด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ตั้งแต่อุณหภูมihองจนถึงอุณหภูมipระมาณ 175 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจใช้อุณหภูมสูงถึง 300 องศาเซลเซียส ความดันที่ใช้เป็นความดันออโต-จีเนียส (autogeneous pressure) ซึ่งมีค่าประมาณใกล้เคียงกับความดันไอที่

อิ่มตัว (saturated vapor pressure) ของน้ำที่อุณหภูมิกำหนดโดยระยะเวลาที่ใช้ในการตกผลึก อาจมีค่าตั้งแต่สองถึงสามชั่วโมง ไปจนถึงระยะเวลาที่เป็นวัน

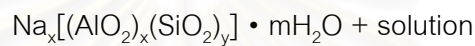
ตัวอย่างการเตรียมเจลและการตกผลึกของซีโอไลต์สามารถแสดงได้โดยใช้ระบบของ $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นระบบหนึ่งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ [Breck, 1974]



T ~ 25 องศาเซลเซียส



T - 25 ถึง 175 องศาเซลเซียส

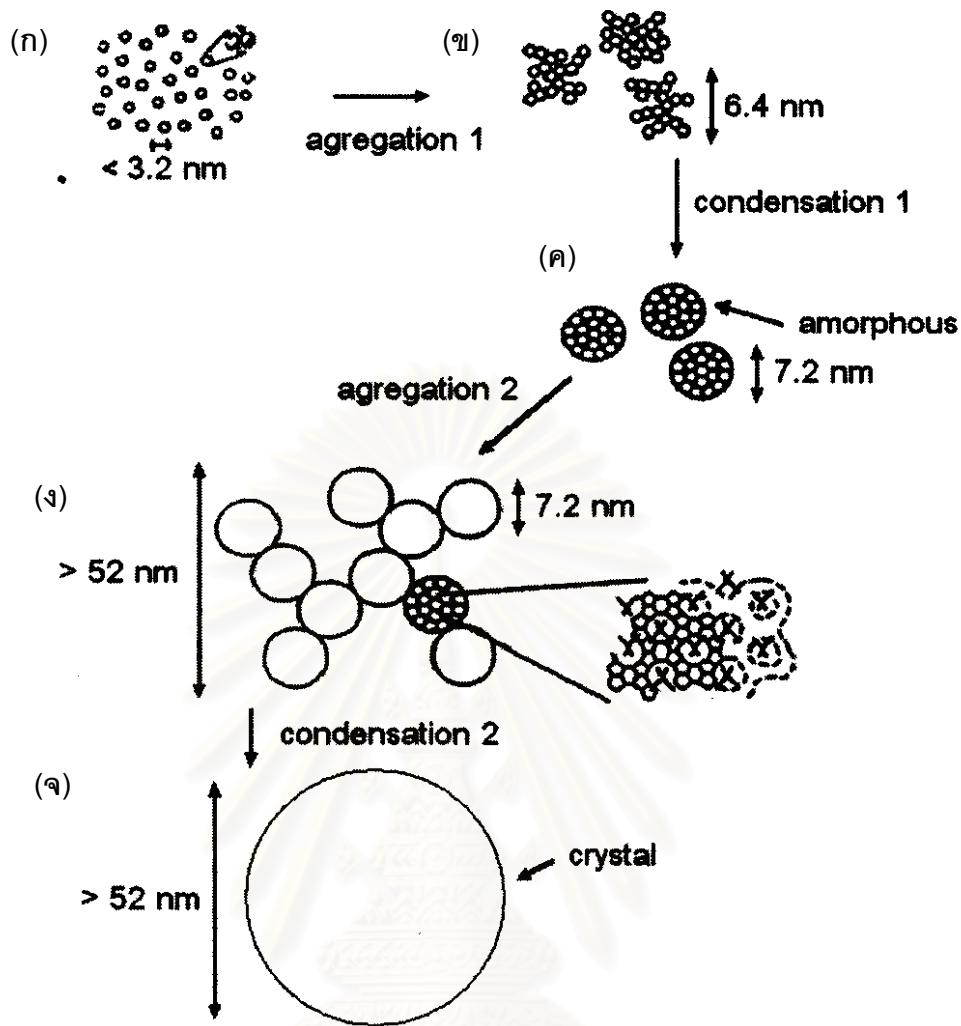


zeolite crystals

- เมื่อ
- a, b, c คือ จำนวนอะตอมของธาตุที่อยู่ในเจล
 - x, y คือ จำนวนอะตอมของธาตุที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์
 - m คือ จำนวนโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์

ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์เริ่มจากการเกิดเจล ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องคือ (รูป ก) การรวมกลุ่มกันของเจล (aggregation) ที่มีอนุภาคเล็กกว่า 3.2 นาโนเมตร เป็นกลุ่มสายโซ่ที่มีขนาดประมาณ 6.4 นาโนเมตร (รูป ข) ซึ่งจะเกิดการควบแน่นต่อไปเป็นอนุภาคอสัณฐาน (amorphous) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 7.2 นาโนเมตร (รูป ค) จากนั้นอนุภาคอสัณฐานจะรวมกลุ่มกันเป็นสายโซ่ที่มีความยาวมากกว่า 52 นาโนเมตร (รูป ง) และสุดท้ายคือการจับกันอีกครั้งหนึ่งของสายโซ่ที่เกิดจากอนุภาคอสัณฐานพร้อมกับการจัดโครงสร้างเป็นผลึก (รูป จ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 การเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์จากอนุภาคของเจล

[จตุพร และนุรักษ์, 2547]

2.3.5 ประโยชน์ของซีโอไลต์

เนื่องด้วยสมบัติของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้าง [Breck, 1974] อันได้แก่

1. สามารถเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้ในปริมาณมาก
2. มีความหนาแน่นต่ำและมีปริมาตรช่องว่างมากเมื่อถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง
3. มีความเสถียรเมื่อน้ำถูกดึงออกจากโครงสร้าง
4. สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้
5. มีขนาดช่องว่างที่เท่ากันสม่ำเสมอเมื่อผลึกถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง
6. สามารถดูดซับก๊าซและไอได้
7. มีสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา

ด้วยสมบัติสำคัญต่างๆ ของซีโอไลต์ ส่งผลให้มีการนำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ที่หลากหลายแตกต่างกันออกไป โดยการใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์ประกอบไปด้วย 3 ด้านหลักๆ ได้แก่ ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchanger) และตัวดูดซับ (adsorbent)

2.3.5.1 ตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากซีโอไลต์มีจุดหลอมเหลวสูง มีความคงทน และสามารถนำกลับมาใช้ได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของเหลว หรือ ก๊าซ ทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ส่งผลให้ซีโอไลต์มีความสำคัญในอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมีเป็นอย่างยิ่ง โดยปฏิกิริยาเคมีที่ใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [Dyer, 1988 และ Bhatia, 1990] ได้แก่

ก) การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) เป็นการแตกพันธะของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสายโซ่ยาวในน้ำมันดิบให้เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีสายโซ่สั้นลงและมีมูลค่าสูงขึ้น เช่น แกโซลีน

ข) การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking) เป็นการเปลี่ยนไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก โดยการแตกพันธะคาร์บอนคาร์บอนโดยใช้ไฮโดรเจนช่วย

ค) รีฟอร์มมิง (reforming) ทำการเปลี่ยนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนประเภทแอลิฟาติกให้เป็นแอโรแมติก

ง) การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของ C_5 และ C_6 (C_5/C_6 isomerization) เป็นการเปลี่ยนเฮกเซนและเพนเทนที่มีค่าออกเทนต่ำให้เป็นไอโซเพนเทน และไดเมทิลบิวเทนซึ่งมีค่าออกเทนที่สูงกว่าการกำจัดไขในน้ำมัน (dewaxing)

จ) การเติมหมู่แอลคิลในเบนซีน (benzene alkylation) เช่น การผลิตเอทิลเบนซีนจากเอทิลีนและเบนซีน หรือการผลิตคิวมินจากเบนซีนและโพรพิลีน เป็นต้น

ฉ) การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของไซลีน (xylene isomerization) เป็นการเปลี่ยนไอโซเมอร์ของ *o*-ไซลีน ให้เป็น *p*-ไซลีน ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการเตรียมกรด terephthalic เพื่อผลิตพอลิเอสเตอร์ (polyester)

2.3.5.2 ตัวแลกเปลี่ยนประจุ

จากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์อย่างหลวมๆ พร้อมทั้งจะแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ เนื่องจากน้ำที่ไม่กระด้าง หรือน้ำอ่อนนั้น เมื่อเติมสารซักฟอกลงไปก็จะเกิดฟองในปริมาณมาก โดยโลหะแอลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์ จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมไอออนและแมกนีเซียมไอออน ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นสาเหตุของน้ำกระด้าง และมีการนำซีโอไลต์มาใช้ลดความกระด้างของน้ำแทนฟอสเฟตในผงซักฟอกเนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอก ถ้าใช้ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมได้กล่าวคือ ฟอสเฟตจะทำให้พีชน้ำ หรือพวกสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัด และเมื่อมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้เกิดน้ำเสียได้

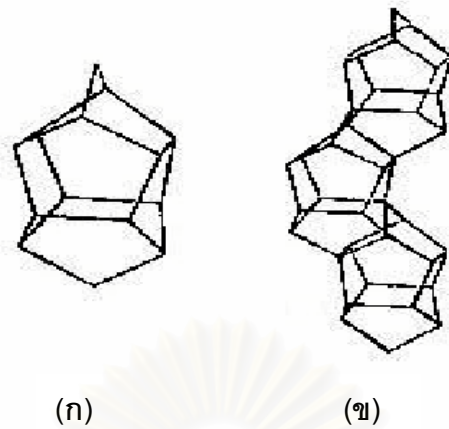
จากหลักการแลกเปลี่ยนประจุนี้ ทำให้สามารถใช้ซีโอไลต์ ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียมไอออนกับโซเดียมไอออนที่อยู่ในโพรงของซีโอไลต์

2.3.5.3 ตัวดูดซับ

จากลักษณะพิเศษของโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้ดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด ซึ่งสามารถใช้ทั้งในกระบวนการดึงน้ำออก (dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (separation) ซึ่งซีโอไลต์นั้นมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่าง เป็นหลักการพื้นฐานของการดูดซับโมเลกุลโดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการดึงน้ำออกนั้น เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดซับน้ำได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ กล่าวคือ เมื่อมีการให้ความร้อนน้ำก็จะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้งก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก หรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอื่นแทน เช่น ก๊าซไอโอดีน ตะกั่ว หรือ แอมโมเนีย [จำรัส, 2540]

2.4 ซีโอไลต์ ZSM-5

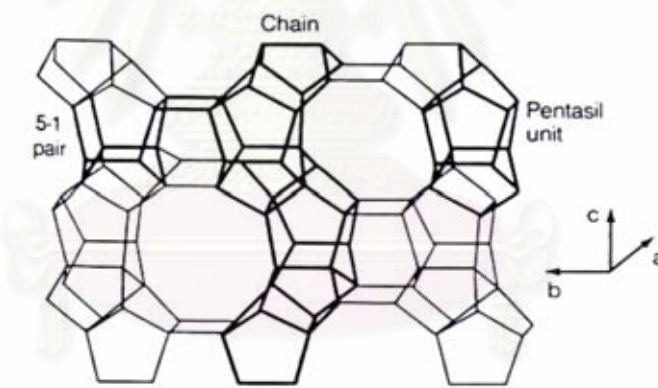
ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ในตระกูลเพนตะซิล (pentasil) ลักษณะของโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยของโครงสร้างย่อย (building unit) เป็นวงแหวนห้าเหลี่ยม (five-membered ring) จำนวนแปดวง ที่เชื่อมทรงสี่หน้าของซิลิกาและอะลูมินาเข้าด้วยกัน (รูปที่ 2.11ก) หน่วยของโครงสร้างย่อยในซีโอไลต์ ZSM-5 จะต่อเรียงกันตรงบริเวณขอบต่อเรียงกันเป็นสายโซ่ (รูปที่ 2.11ข) ซึ่งสายโซ่เหล่านี้ได้เชื่อมโยงต่อกันเป็นแผ่นและมีการเชื่อมโยงจากแผ่นไปเป็นโครงสร้างสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 โครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ ZSM-5 [Kokotailo, 1978]

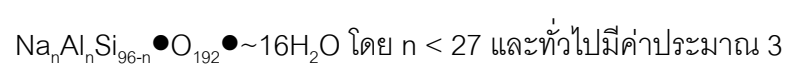
(ก) วงแหวนห้าเหลี่ยมโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ ZSM-5

(ข) ลักษณะการเชื่อมต่อดวงแหวนห้าเหลี่ยมเป็นโครงสร้างย่อยของซีโอไลต์ ZSM-5 ในระนาบ [001]

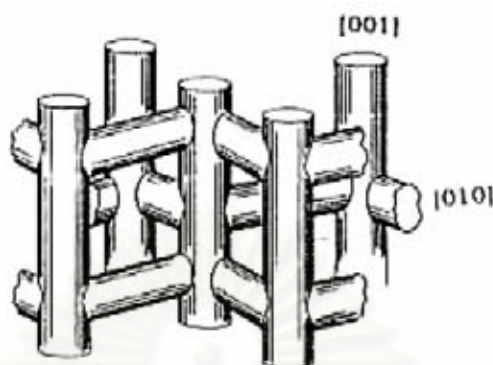


รูปที่ 2.12 ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ระนาบ [100] [Kokotailo, 1978]

โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 เป็น orthorhombic โดยมี $a = 20.1$ $b = 19.9$ และ $c = 13.4$ อังสตรอม บางครั้งอาจมีโครงสร้างเป็น monoclinic โดยมี Na^+ เป็นองค์ประกอบในหน่วยเซลล์ (unit cell)



โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ประกอบด้วยช่องว่างสองระบบเชื่อมติดกัน (intersection) โดยช่องว่างหนึ่งจะมีลักษณะเป็น sinusoidal ซึ่งวางตัวอยู่ในทิศ [001] และช่องว่างอีกระบบหนึ่งมีลักษณะเป็นท่อตรงในทิศ [010] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะช่องว่างทั้งสองระบบในซีโอไลต์ ZSM-5 [Kokotailo, 1978]

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 มักใช้อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาในช่วงตั้งแต่ 20 ขึ้นไป จนถึงการใช้ซิลิกาบริสุทธิ์ ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = \infty$) ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ได้ในกรณีหลังมีชื่อเรียกว่า ซิลิกาไลต์ (silicalite) [Szostak, 1992] และมีการใช้สารก่อโครงสร้างซึ่งเป็นไอออนบวกของสารอินทรีย์ โดยสารโครงสร้างนี้จะช่วยการละลายของอะลูมินตและซิลิกตไอออน และช่วยจัดเรียงโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึกให้เกิดซีโอไลต์ตามชนิดที่ต้องการ [Dyer, 1988; Bhatia, 1990] ซึ่งสารก่อโครงสร้างเหล่านี้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารก่อโครงสร้างที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 [Szostak, 1992]

Organic	Citation
TPA	US3, 702, 886(1972)
TEA	PP IZC 10(1989)
DEA	Zeo. 8:508(1988)
Tripropylamine	PP IZC 10(1989)
Diethylamine	PP IZC 10(1989)
DMEPA	US4, 565, 681(1986)
HEXDM	Zeo. 8:495(1988)
1,6-hexanediol	EP 42, 225(1981)
no alkali	Ger. 3, 021, 580(1981)
propylamine+propylbromide	JP 85, 71, 517(1985)

ตารางที่ 2.4 สารก่อโครงสร้างที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 [Szostak, 1992] (ต่อ)

Organic	Citation
tripropylamine+methyl iodide	JP 85, 71, 517(1985)
triethyl-n-propylammonium ⁺	Zeo. 2:313(1982)
diquat phosphonium ²⁺	Ger. 3, 333, 124(1985)
alkyltropinium	US4, 592, 902(1986)
fluorocarbon-carboxylic acid	JP 84, 73, 425(1984)
fluorocarbon-sulfonic acid	JP 84, 73, 425(1984)
piperazine	Zeo. 8:501(1988)
Pip+TPA	Zeo. 8:501(1988)
Pip+TBA	Zeo. 8:501(1988)
Pip + TrBPe	Zeo. 8:501(1988)
Monoethylene glycol dimethylether	EP 51, 74(1982)
Cyanoalkanes	JP 86, 68, 318(1986)
Cyanoalkenes	JP 86, 68, 318(1986)
N-2-hydroxyethylpiperazine-N-2-	US4, 639, 360(1987)
Ethanesulfonic acid	

ตัวอย่างกระบวนการที่ใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

ก) การเปลี่ยนเมทานอลหรือสารประกอบที่มีออกซิเจน (oxygenate) ไปเป็นแก๊สโซลีน (gasoline) ที่มีค่าออกเทนสูง หรือ โอลิฟิน

ข) ปฏิกิริยาการเติมหมู่แอลคิล เช่น การสังเคราะห์เอทิลเบนซีน พารา-เอทิลโทลูอีน โพรพิลเบนซีน

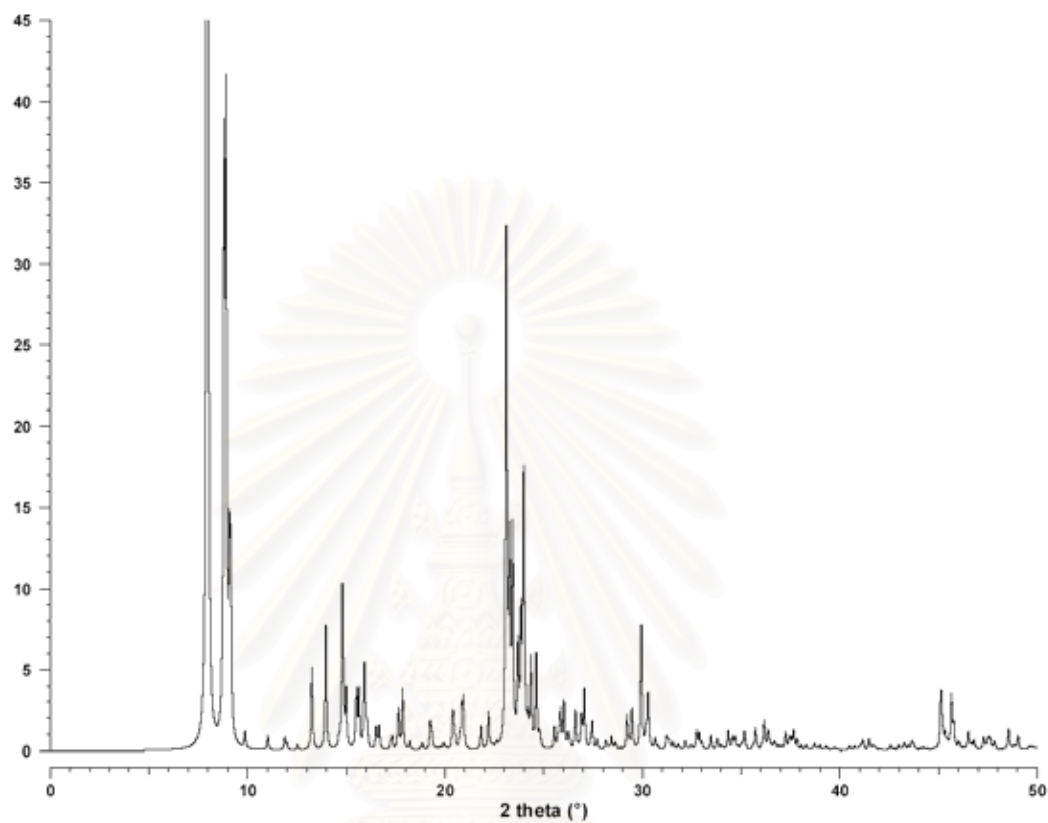
ค) การเปลี่ยนไอโซเมอร์ของไซลีนและพาราฟินชนิดเบา เช่น C₄-C₈

ง) การกำจัดไขในน้ำมัน

จ) ปฏิกิริยารีฟอร์มมิงของแนฟทา

ฉ) การสังเคราะห์เบนซีน โทลูอีน และไซลีน หรือ BTX จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโดยตรง

ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 นั้น ใช้เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งรูปแบบ XRD ที่ได้ แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบ XRD มาตรฐานของซีโอไลต์ ZSM-5 [M.M.J. Treacy, 2001]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 กระบวนการการแตกตัว (cracking process)

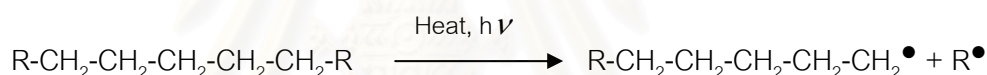
กระบวนการการแตกตัวสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทตามกลไกของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ

2.5.1 การแตกตัวด้วยความร้อน (thermal cracking)

การแตกตัวด้วยความร้อนเป็นกระบวนการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนขนาดใหญ่ให้มีขนาดของโมเลกุลเล็กลงโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพียงอย่างเดียว ซึ่งหากควบคุมให้การแตกตัวเป็นไปอย่างพอดี จะมีการเลือกเกิดผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการในปริมาณมาก ในขณะที่การให้ความร้อนที่เกินพอดี จะทำให้โมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนแตกตัวมากเกินไป และได้ผลิตภัณฑ์เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น C_1 - C_4 ซึ่งมีมูลค่าต่ำ

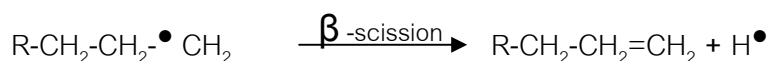
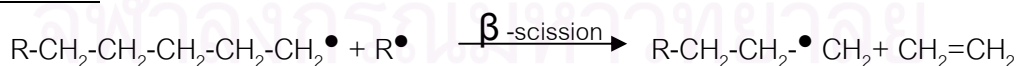
กระบวนการการแตกตัวด้วยความร้อนเป็นปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ (free radical) แบบห่วงโซ่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

2.5.1.1 ขั้นเริ่มต้น (initiation step) เป็นขั้นตอนในการทำให้เกิดอนุมูลอิสระ โดยความร้อนไปทำให้พันธะคาร์บอน-คาร์บอนของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนแตกออก เกิดเป็นอนุมูลอิสระดังสมการ

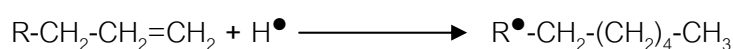


2.5.1.2 ขั้นการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องแบบห่วงโซ่ (propagation step) อนุมูลอิสระในขั้นเริ่มต้นทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง โดยปฏิกิริยาจะเริ่มจากอนุมูลอิสระเข้าไปจับพันธะคาร์บอนที่ตำแหน่ง β เกิดอนุมูลอิสระใหม่ขึ้นมา (β -fission) ทำให้สายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเกิดความไม่เสถียร ส่งผลให้เกิดขั้นตอนการถ่ายทอดไฮโดรเจน (chain transfer) เพื่อทำให้โมเลกุลเกิดการเสถียร จึงเกิดเป็นสารต่างๆ ที่มีขนาดเล็กลงจากพอลิเมอร์เดิม พร้อมกับเกิดอนุมูลอิสระตัวใหม่ขึ้นต่อ เพื่อเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องไปเรื่อยๆ

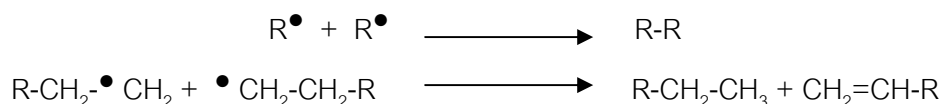
β -fission



Chain transfer



2.3.1.3 ขั้นหยุดปฏิกิริยา (termination step) อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะหยุดปฏิกิริยาต่อเนื่องโดยทำปฏิกิริยากันเอง เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ใหญ่ขึ้น อาจเกิดเป็นโมเลกุลใหม่โมเลกุลเดียว หรือเกิดเป็นโมเลกุลย่อย 2 โมเลกุล



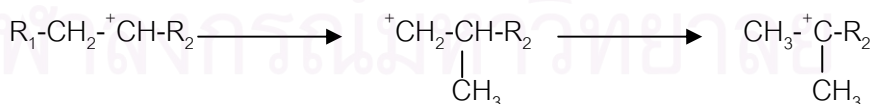
2.5.2 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking)

การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาเป็นการนำตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ามาช่วยทำการแตกย่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมและมีคุณภาพพอดตามต้องการได้ กลไกการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วย

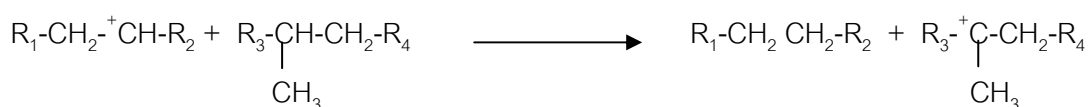
2.5.2.1 ปฏิกิริยาดีไฮโดรจีเนชัน (dehydrogenation) และการเกิดเกิดคาร์บอนเนียมไอออน (carbonium ion) ขั้นตอนนี้เกิดจากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสูญเสียไฮโดรดีไอออนที่มีประจุลบให้กับตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความเป็นกรด ทำให้คาร์บอนเนียมไอออนมีสภาพเป็นบวกทางไฟฟ้า โดยคาร์บอนเนียมไอออนที่เกิดขึ้นจะมีเสถียรภาพแตกต่างกันตามโครงสร้างของไอออน โดย tertiary ion จะมีเสถียรภาพมากกว่า secondary ion และ primary ion ตามลำดับ



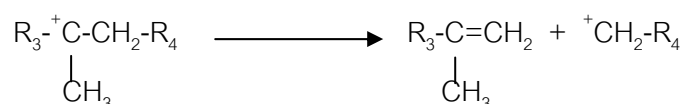
2.5.2.2 ปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่เมทิลภายในโมเลกุลของคาร์บอนเนียมไอออน ทำให้ได้คาร์บอนเนียมไอออนที่มีโครงสร้างที่เสถียรมากขึ้น



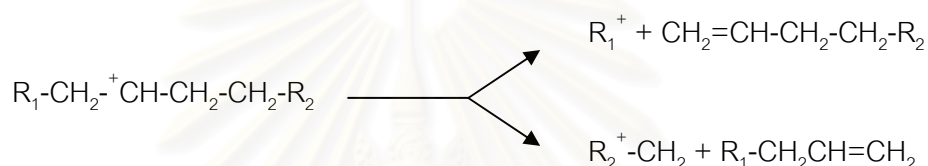
และเกิดการเคลื่อนย้ายไฮไดรด์ (hydride transfer) จากโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนหนึ่งไปยังคาร์บอนเนียมไอออน



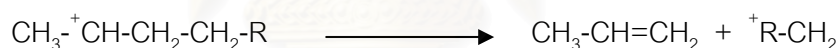
สำหรับคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดใหญ่สามารถเกิดปฏิกิริยา β -scission หรือการแตกพันธะที่ตำแหน่งเบต้า (นับจากคาร์บอนที่มีประจุบวก) ซึ่งจะได้สารประกอบโอเลฟิน และคาร์บอนเนียมไอออนที่มีขนาดเล็กลง โดยมักจะเป็น primary carbonium ion ดังสมการ



ในบางกรณีคาร์บอนเนียมไอออนสามารถเกิดการแตกตัวได้มากกว่า 1 รูปแบบ เช่นในตัวอย่างของ secondary carbonium ion



ในส่วนของ R-CH=CH_2 การเกิดการแตกพันธะที่ตำแหน่งเบต้า จะได้ผลิตภัณฑ์เพียงตัวเดียว ดังสมการ



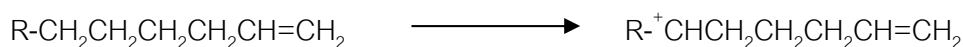
ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ โพรพีน (propene) เกิดจากปฏิกิริยาการเติมโปรตอนและอยู่ในรูปคาร์บอนเนียมไอออนซึ่งไม่สามารถเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าต่อไปได้



isopropyl carbonium ion เกิดปฏิกิริยาเคลื่อนย้ายไฮโดรด์กับโมเลกุลประกอบไฮโดรด์คาร์บอนอื่น ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรเพน หรืออาจเกิดการสูญเสียโปรตอน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโพรพีน

ในการเกิดวงแหวนเอโรแมติกจากปฏิกิริยาดีไฮโดรไซโคลเซชัน (dehydrocyclization) โดยโอเลฟินเกิดเป็นคาร์บอนเนียมไอออนแล้วเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่ตำแหน่งเบต้าได้สารประกอบ olefin carbonium ion ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จากนั้นเกิดปฏิกิริยากับโอเลฟินเกิดปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายไฮโดรด์ไอออนจากบริเวณที่เป็นกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งจะได้ allylic

carbonium ion ที่มีเสถียรภาพและเกิดการรับโปรตอนจาก cyclohexadine ซึ่งในขั้นสุดท้ายจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแอมโรแมติก



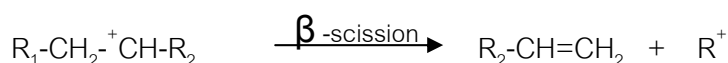
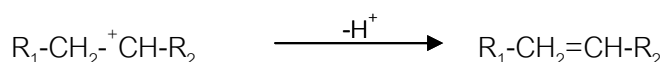
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ประกอบด้วยก๊าซที่มีโอเลฟินสูง องค์ประกอบของเบนซินที่มีค่าออกเทนสูงเนื่องจากมีสารจำพวกแอมโรแมติกและโอเลฟินมาก องค์ประกอบของน้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนต่ำ กากน้ำมันชนิดใส และโค้ก (coke) ที่จะเกาะติดอยู่บนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ส่งผลให้พื้นที่ผิวรูพรุนและความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงเกิดการเสื่อมสภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

2.5.3 การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วม (hydrocracking)

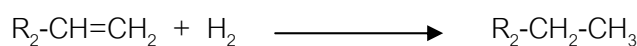
การแตกตัวโดยใช้ไฮโดรเจนร่วมเป็นกระบวนการที่รวมการแตกโมเลกุลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาและการเติมไฮโดรเจนไว้ด้วยกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เป็นประเภท 2 หน้าที่ (dual function) คือ มีองค์ประกอบที่ช่วยในการแตกพันธะคาร์บอน-คาร์บอนของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอน และมีองค์ประกอบที่ช่วยเติมไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้มักประกอบด้วยสารจำพวกซิลิกาและอะลูมินาที่สามารถช่วยในการแตกพันธะคาร์บอนได้พร้อมๆ กับการเติมไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มต้นจากการเกิดคาร์บอนเนียมไอออนที่ตำแหน่งกรดบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



คาร์บอนเนียมไอออนอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ โดยการกำจัดโปรตอนออก ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินหรือเกิดการแตกพันธะที่ตำแหน่งเบต้า ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโอเลฟินและคาร์บอนเนียมไอออนตัวใหม่ จากนั้นเกิดเป็นปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน โอเลฟินที่ผ่านการเติมไฮโดรเจนจะกลายเป็นสารประกอบพาราฟิน



catalyst

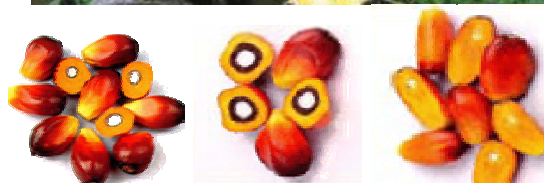


หากปฏิกิริยาทำในภาวะที่อุณหภูมิ 400 – 480 องศาเซลเซียส ความดัน 35 – 170 บรรยากาศ จะเกิดปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารประกอบที่อิ่มตัวค่อนข้างมาก และมีปริมาณแอมเตกต่ำ ซึ่งทำให้แก๊สไลน์ที่ได้มีค่าออกเทนที่ต่ำกว่าแก๊สไลน์จากระบวนการแตกตัวเชิงปฏิกิริยา จึงมักนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องบิน (jet fuel) และน้ำมันดีเซล รวมทั้งยังได้สารประกอบประเภท LPG ซึ่งใช้เป็นสารป้อนในกระบวนการปิโตรเคมี อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ใดๆ นั้นต้องอาศัยปัจจัยอื่นๆ ควบคู่กันไป โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นยังขึ้นกับเวลา ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา

นอกจากนี้การเติมไฮโดรเจนที่ตำแหน่งกรดของตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยทำความสะอาดพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาไปพร้อมๆ กันด้วย เนื่องจากไฮโดรเจนจะช่วยกำจัดโค้กที่เกิดขึ้นออกไป กระบวนการแตกตัวด้วยการใช้ไฮโดรเจนรวมนี้ เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ทำให้อุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิอย่างดี เพราะหากอุณหภูมิสูงเกินไปอาจทำให้เกิดโค้ก และตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพ หรือทำให้เครื่องปฏิกรณ์ได้รับความเสียหายรวมทั้งไม่ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

2.6 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacq.) (รูปที่ 2.12) เป็นพืชน้ำมันสำหรับใช้ในการบริโภคและอุปโภคที่สำคัญและสามารถให้ปริมาณน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่สูงมาก เมื่อเปรียบเทียบกับพืชน้ำมันชนิดอื่น



รูปที่ 2.15 ต้นปาล์มและผลปาล์ม [ศุนยวิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี, 2550]

ในกระบวนการสกัดน้ำมันจากผลปาล์ม จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน 2 ชนิด คือ

- น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil) สกัดจากเนื้อปาล์ม มีสีส้ม เนื่องจากมีองค์ประกอบของเบต้าแคโรทีน โดยเบต้าแคโรทีนนี้สามารถกำจัดได้โดยนำน้ำมันปาล์มดิบไปต้ม จนกระทั่งสีส้มของน้ำมันปาล์มดิบจางหายไป น้ำมันปาล์มดิบเป็นน้ำมันพืชชนิดหนึ่งที่มีไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acids) ค่อนข้างสูง จึงมีน้ำมันบางส่วนที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งของแข็ง (semi-solid) ที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ยังมีวิตามินเอและวิตามินอีสูงกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ

- น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (palm kernel oil) สกัดจากเมล็ดในของผลปาล์ม มีสมบัติคล้ายน้ำมันมะพร้าว มีกรดลอริก (lauric acid) ซึ่งเป็นกรดไขมันอิ่มตัวในปริมาณค่อนข้างมาก และมีกรดไขมันไม่อิ่มตัว (polyunsaturated fatty acids, PUFA) ในปริมาณน้อย น้ำมันเมล็ดในของผลปาล์มสามารถแยกออกเป็นส่วนของแข็งและของเหลวได้ โดยการกรองและบีบอัดความดัน ส่วนที่เป็นของแข็ง เรียกว่า สเตียร์น (stearin) ใช้ทำเนย ส่วนที่เป็นของเหลว เรียก โอลีน (olein) ใช้ในการบริโภคและในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่ [มฤดี, 2540]

น้ำมันปาล์มดิบประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) และกรดไขมันที่อิ่มตัว (saturated fatty acid) ในสัดส่วนที่สมดุล และมีวิตามินอีสูงจึงส่งผลให้น้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพสูง กรดไขมันไม่อิ่มตัวส่วนใหญ่จะเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวพันธะเดี่ยวโอเลอิก (mono-unsaturated oleic acid) ร้อยละ 40 ขณะที่กรดไขมันอิ่มตัวประกอบด้วย กรดปาล์มมิติก (palmitic acid) ร้อยละ 44 และกรดสเตียริก (stearic acid) ร้อยละ 5 ด้วยสัดส่วนของกรดไขมันดังกล่าว ทำให้น้ำมันปาล์มมีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารหลายประเภท นอกจากนี้ น้ำมันปาล์มยังใช้เป็นส่วนผสมของเนยเหลืองหรือมาการีน และใช้ในอุตสาหกรรมผลิต สบู่ ผงซักฟอก เครื่องสำอาง และยา [พรพนีย์, 2550]

2.7 การวิเคราะห์น้ำมันดิบ (crude oil evaluation) [ปราโมทย์, 2537; Satterfield, 1991]

เป็นวิธีการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและสมบัติของส่วนต่างๆ ในน้ำมันดิบเริ่มต้น ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (gas chromatography) โดยทำการกลั่นแยกน้ำมันเป็นส่วนต่างๆ ตามคาบจุดเดือด (boiling range) อย่างละเอียดในช่วง 5 – 10 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลานานจึงไม่นิยมทำกัน ปัจจุบันจึงใช้วิธีการกลั่นแยกน้ำมันดิบตามคาบจุดเดือดอย่างกว้างๆ ให้พอดีกับช่วงจุดเดือดของผลิตภัณฑ์ที่จะนำไปใช้ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูป โดยสามารถแบ่งได้เป็นช่วงดังนี้

- ส่วนกลั่นที่มีคาบจุดเดือดตั้งแต่ IBP (initial boiling point) จนถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่าส่วนกลั่นแกโซลีน มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน
- ส่วนกลั่นที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 200 – 250 องศาเซลเซียส เรียกว่า ส่วนกลั่นน้ำมันก๊าด (kerosene fraction) มักใช้เป็นน้ำมันก๊าดเพื่อให้แสงสว่าง ถ้าจุดเกิดควันไม่ต่ำจนเกินไป น้ำมันก๊าดที่มีคุณภาพดี มีจุดเยือกแข็งต่ำ และมีสมบัติอื่นๆ ที่เหมาะสม สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้
- ส่วนกลั่นที่มีคาบจุดเดือดระหว่าง 250 – 370 องศาเซลเซียส เรียกว่าส่วนกลั่นแก๊สออกอยล์ (gas oil fraction) ซึ่งเหมาะในการใช้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล
- ส่วนกลั่นที่มีคาบจุดเดือดสูงกว่า 370 องศาเซลเซียส เรียกว่า กากน้ำมัน (residue) อาจนำไปใช้ได้หลายอย่างแล้วแต่สมบัติของกากน้ำมัน เช่น ใช้เป็นน้ำมันเตาหรือนำไปผลิตเป็นยางมะตอย หรือผลิตเป็นน้ำมันเครื่อง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Brisdon และคณะ (2003) ได้เตรียมไฮโดรเจลจากสารละลายไซเดียมซิลิเกต และอะลูมิเนียมซิลิเกตที่อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si/Al) ในช่วง 15 - 100 เพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 โดยใช้เตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (tetrapropylammonium bromide, TPA-Br) เป็นสารก่อโครงร่าง พบว่าสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ที่อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 10 และค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 10 จากนั้นนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้มาคัลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และแลกเปลี่ยนไอออนด้วยสารละลายแอมโมเนียมไนเตรตแล้ว สามารถมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเปลี่ยนเมทานอลเป็น MTBE โดยความว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมลดลง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น รั้อยละการเลือกเกิด (selectivity) เป็น MTBE จะเพิ่มขึ้นเป็น 90-98

Dong และคณะ (2003) ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากแร่เซอเพนไทน์ (serpentine mineral) ที่ผ่านการบำบัดด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ทำให้ได้ซิลิกาที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น โดยนำไปใช้เป็นแหล่งซิลิกาสำหรับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล สัดส่วนขององค์ประกอบในการสังเคราะห์เป็น $a\text{Na}_2\text{O} : b\text{Al}_2\text{O}_3 : c\text{SiO}_2 : d\text{H}_2\text{O} : e(\text{TPA})_2\text{O}$ ที่อุณหภูมิ 125-185 องศาเซลเซียส และเวลา 12-48 ชั่วโมง พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 เมื่อ $a=11.7$, $b=1$, $c=90$, $d=3510$ และ $e=10$ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ได้รั้อยละของผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 เท่ากับ 90-97 ขนาดอนุภาคของ ZSM-5 ที่ได้โดยเฉลี่ย 1.2 ไมโครเมตร และมีพื้นที่ผิว 357 ตารางเมตรต่อกรัม

Kim และคณะ (1998) สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่อุณหภูมิต่ำได้ โดยใช้ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ความดัน 1 บรรยากาศ และใช้อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าขนาดและรูปร่างผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 จะเปลี่ยนไป เมื่ออัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเปลี่ยนไป โดยเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาลดลง ขนาดผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 จะเล็กลง และรูปร่างของผลึกจะเปลี่ยนจาก euhedral เป็น spherulite และที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินามากกว่า 100 เกิดผลึกได้อย่างสมบูรณ์

Rawtani และคณะ (1989) ศึกษาผลของสัดส่วนองค์ประกอบเริ่มต้น ความเป็นเบสและระยะเวลาที่ใช้ต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ภายใต้ความดันไอน้ำอิ่มตัวโดยใช้ซิลิกาจากเถ้าแกลบที่อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม เท่ากับ 24.88 อัตราส่วนโดยโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกา ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) ในช่วง 3.25 - 15.15 อัตราส่วนโดยโมลของน้ำต่ออะลูมินา ($\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) ในช่วง 108 - 2786 อุณหภูมิ 125 - 200 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 6 - 120 ชั่วโมง จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นซีโอไลต์ ZSM-5 ที่มีรูปร่างผลึกแบบออร์โธโรมบิก โดยร้อยละผลได้ของซีโอไลต์จะลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ยังขึ้นกับเวลา โดยระยะเวลาที่เหมาะสม คือ 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ซีโอไลต์ ZSM-5 ร้อยละ 95

ธีระพงษ์ นามโท (1999) สังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากซิลิกาของเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ โดยใช้ TPA-Br เป็นสารก่อโครงร่าง และใช้โซเดียมซิลิเกตปรับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา และทำปฏิกิริยาที่ภาวะไฮโดรเทอร์มัลภายใต้ความดันบรรยากาศของไนโตรเจน จากการทดลองพบว่าสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้ที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาตั้งแต่ 20 - 100 ที่ความดัน 1 - 5 บรรยากาศ อุณหภูมิ 180 - 210 องศาเซลเซียส และระยะเวลา 2 - 4 ชั่วโมง โดยที่อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 40-60 จะเกิดผลึก ZSM-5 มากที่สุด

สิรินทร์รักษ์ จำปาน้อย (2004) สังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากเถ้าแกลบ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลโดยใช้ TPA-Br เป็นสารก่อโครงร่าง โดยนำเถ้าแกลบไปต้มในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และคัลไซน์ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะได้เถ้าแกลบที่มีร้อยละของซิลิกาเท่ากับ 99.90 โดยได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 คือ อัตราส่วนโดยโมลของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 80 เมื่อใช้อัตราส่วนไฮดรอกไซด์ต่อซิลิกา (NaOH/SiO_2) เท่ากับ 0.45 อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ความดันเริ่มต้นที่ 1 บรรยากาศของไนโตรเจน และระยะเวลาเป็น 2 ชั่วโมง โดยสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้ตั้งแต่ร้อยละ 97 จนเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์สมบูรณ์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะเห็นว่าซีโอไลต์ ZSM-5 สามารถสังเคราะห์ได้จากสารเคมีบริสุทธิ์โดยตรง อาทิเช่น โซเดียมซิลิเกต อะลูมิเนียมซิลเฟต เป็นต้น และจากวัตถุดิบจากธรรมชาติอีกด้วย ที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้ดินขาวธรรมชาติ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาและอะลูมินาเช่นกัน เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5

ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซีโอไลต์ ZSM-5 สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งในงานวิจัยนี้สนใจศึกษาการใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ เพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยผลจากการศึกษาวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา มีดังนี้

Daniela G. และคณะ (2004) ศึกษาการแตกตัวด้วยความร้อนของน้ำมันพีช 3 ชนิด คือ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม และน้ำมันละหุ่ง ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส และความดัน 1 บรรยากาศ โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (batch reactor) ขนาด 5 ลิตร ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำมันทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบของโอเลฟิน พาราฟิน กรดคาร์บอกซิลิก (carboxylic acid) และแอลดีไฮด์ (aldehyde) และมีสมบัติทางเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลที่ใช้งานจริง โดยเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันละหุ่งมีองค์ประกอบของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่ยาวกว่าเชื้อเพลิงเหลวจากน้ำมันถั่วเหลืองและน้ำมันปาล์ม

Ooi และคณะ (2003) ศึกษาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์ม โดยทำการศึกษาผลของขนาดรูพรุนและอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อสมบัติของเชื้อเพลิงเหลวที่ผลิตได้ พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาด (microporous) สามารถให้เชื้อเพลิงเหลวที่มีองค์ประกอบในช่วงแก๊สไลน์มากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีรูพรุนขนาดกลาง (mesoporous) และการเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม ส่งผลให้เชื้อเพลิงเหลวที่มีองค์ประกอบในช่วงแก๊สไลน์ลดลง

นอกจากนี้ Ooi และคณะ (2004) ยังได้ศึกษาการแตกตัวของกรดไขมัน โดยทำการทดลองเหมือนงานวิจัยข้างต้น โดยใช้ HZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะต่างๆ และหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการผลิตแก๊สไลน์ พบว่าที่อุณหภูมิ 440 องศา-เซลเซียส เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 0.27 ชั่วโมง และอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันและตัวเร่งปฏิกิริยา เท่ากับ 9.64 ให้ร้อยละผลได้ของแก๊สไลน์สูงสุด คือ ร้อยละ 44.4 โดยน้ำหนัก

มารีนา มงคล (2003) ศึกษาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มใช้แล้ว ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ และ HZSM-5 ในเครื่องปฏิกรณ์แบบขนาดเล็ก (microreactor) ทรงกระบอกเพื่อ

ผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว พบว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 430 องศาเซลเซียส ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลา 60 นาที และน้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยา 0.5 กรัม และเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 ภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา คือ อุณหภูมิที่ 430 องศาเซลเซียส ความดันของแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลา 60 นาที และใช้น้ำหนักตัวเร่งปฏิกิริยาเพียง 0.05 กรัม

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงในการแตกตัวของน้ำมันได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบ โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับ ZSM-5 เกรดทางการค้า



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 รูปแบบการศึกษา

เป็นงานวิจัยเชิงการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ ซึ่งใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal process) ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ (batch) และศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้แก่ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล พร้อมทั้งวิเคราะห์สมบัติของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ นอกจากนี้ยังนำซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ไปทดสอบประสิทธิภาพในการใช้งานโดยใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ทางการค้า

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ประกอบไปด้วย

1. ชุดเครื่องปฏิกรณ์ในระบบไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal synthesis reactor) แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2
2. แท่งกวนแม่เหล็ก (magnetic bar)
3. เครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
4. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH meter)
6. ชุดกรองพร้อมปั๊มดูดอากาศ (suction flask and vacuum pump)
7. ตู้อบไฟฟ้า (oven)
8. เตาเผาอุณหภูมิสูง (muffle furnace)
9. ตะแกรงร่อน
10. ถ้วยกระเบื้อง (crucible)
11. โถปลอดความชื้น (desiccator)
12. เตาไฟฟ้า
13. ขวดก้านกลมขนาด 1 ลิตร

14. ตัวควบแน่น (condenser)
15. สายยาง
16. ปีกเกอร์เทฟลอน (teflon beaker) ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
17. เทอร์โมมิเตอร์ (thermometer)
18. ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump)
19. โกร่งบดสาร (mortar)
20. กระจกทรงเบอร์ 93 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร
21. ปิเปต ขนาด 2 10 และ 20 มิลลิลิตร
22. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บสารเคมี



รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิบัติการความร้อนในระบบไฮโดรเทอร์มัล รุ่น KH-02A ของ Hiro

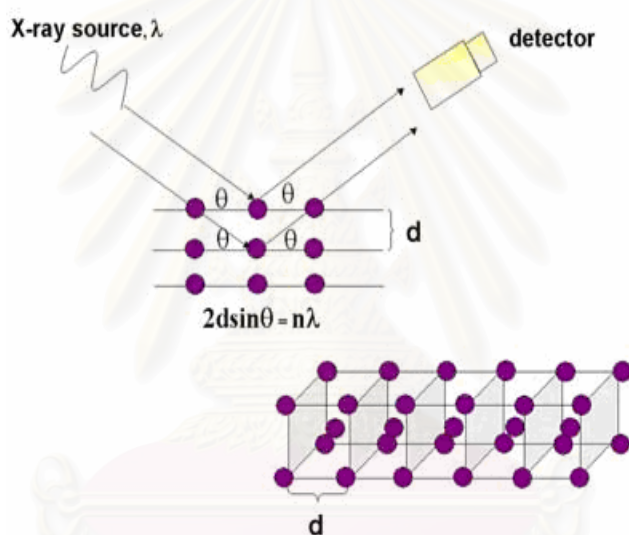


รูปที่ 3.2 ตู้อบเครื่องปฏิบัติการความร้อนในระบบไฮโดรเทอร์มัล

3.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของดินขาว และซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ ประกอบด้วย

1. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray Diffractometer : XRD)

เครื่อง XRD ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น JDX-8030 ของ JEOL โดยเครื่อง XRD เป็นเครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยา ในด้านชนิด โครงสร้างและความเป็นผลึกของสารประกอบที่เปลี่ยนแปลงไป โดยอาศัยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีตัวตรวจวัด (detector) เป็นตัวรับข้อมูล แสดงดังรูปที่ 3.3 โดยสารประกอบและธาตุที่มีองค์ประกอบหรือโครงสร้างต่างกันจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับจึงสามารถบ่งบอกชนิด โครงสร้างของโครงผลึกของสารนั้นๆ ได้



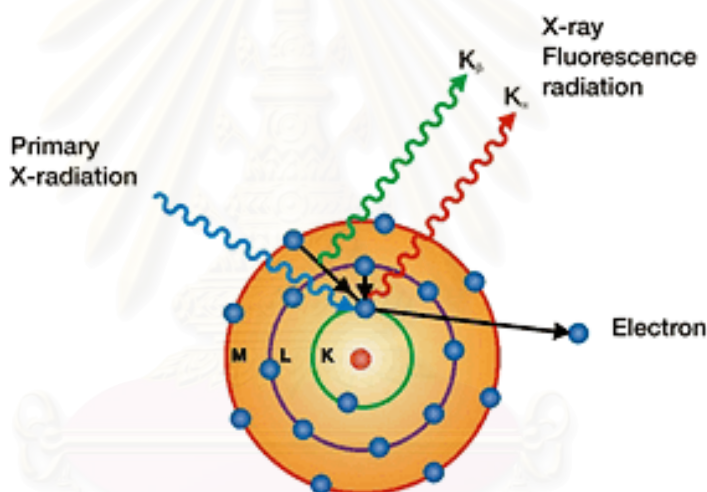
รูปที่ 3.3 เทคนิค X-ray diffraction (XRD)



รูปที่ 3.4 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ รุ่น JDX-8030 ยี่ห้อ JEOL

2. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer : XRF)

เครื่อง XRF ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น SRS3400 ของ Siemens ซึ่งเครื่อง XRF เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุและธาตุองค์ประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการเมื่อรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงาน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากชั้นพลังงานและเกิดการปล่อย photon ออกมา (fluoresce) ทำให้มีออร์บิทัลว่างเกิดขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนในชั้นถัดมาซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะเข้ามาแทนที่อย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 3.5 เนื่องจาก photon ที่ปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่นและพลังงานต่างกันและปริมาณ photon ที่ปล่อยออกมาขึ้นกับปริมาณของธาตุนั้นในสารนั้นๆ จึงสามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุในสารนั้นได้

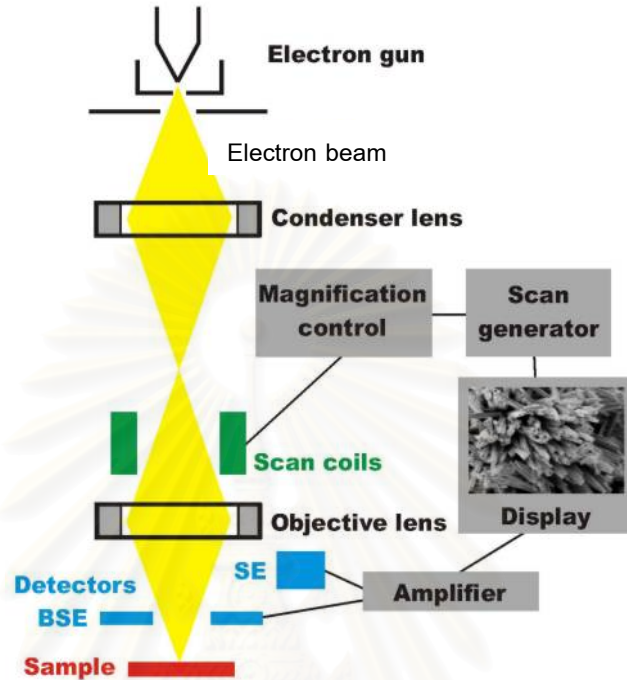


รูปที่ 3.5 เทคนิค X-ray fluorescence spectrometry (XRF)

3. เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (Scanning Electron Microscope : SEM)

เครื่อง SEM ที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็น รุ่น JSM-5800 LV ยี่ห้อ JEOL เครื่อง SEM เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ลักษณะสัณฐาน (morphology) และขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นเทคนิคที่ใช้ในช่วยให้เห็นลักษณะผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาถึงระดับอะตอม ซึ่งใช้ลำอิเล็กตรอนแทนแสง โดยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ปล่อยอิเล็กตรอนปฐมภูมิโดยมีเลนส์รวมแสง (condenser lens) ทำหน้าที่บังคับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดและความเข้มเหมาะสมกับตัวอย่าง โดยมีขดลวดการส่องกราด (scanning coil) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในแนวนอนและแนวตั้งบนระนาบของตัวอย่าง โดยเลนส์ใกล้วัตถุเป็นเลนส์อิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดภาพชัดขึ้นและตัวตรวจวัด เป็นตัวเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็น

สัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพของข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะผิวหน้าและลักษณะตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)

4. เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (Surface area and porosity analyzer)

เครื่อง Surface area and porosity analyzer แสดงดังรูปที่ 3.7 เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิว (surface area) ขนาดรูพรุน (pore diameter) และปริมาตรรูพรุน (pore volume) ด้วยเทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน (N_2 adsorption-desorption measurement) โดยอาศัยหลักการวิธีของ Brunauer-Emmett-Teller (BET)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 เครื่อง Surface area and porosity analyzer รุ่น ASAP 2020 ยี่ห้อ Micromeritic

3.2.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบไปด้วย

1. เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก (microreactor) ดังแสดงในรูปที่ 3.8
2. ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล (temperature control)
3. ขดลวดความร้อนแบบ Injection
4. เทอร์โมคัพเพิล แบบเค (K-type) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร
5. ชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9
6. ชุดกรองสูญญากาศ
7. กระจกทรงใยแก้ว
8. ปีกเกอร์ ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
9. ตู้อบไฟฟ้า
10. เครื่องชั่งที่อ่านได้ละเอียดถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
11. อะลูมิเนียมฟอยล์
12. ฉนวนความร้อน
13. บั้มสูญญากาศ
14. กระจกทึบ
15. นาฬิกาจับเวลา



รูปที่ 3.8 เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก ปริมาตร 70 ลิตร ทนความร้อนได้ถึง 500 องศาเซลเซียส
ความดัน 10 เมกกะพาสแกล



รูปที่ 3.9 เครื่องควบคุมเครื่องปฏิกรณ์

3.2.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของน้ำมัน คือ

1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography) และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น (simulated distillation)

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น และซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น รุ่น Varian CP-3800 พร้อมดีเทคเตอร์ (detector) แบบ FID และคอลัมน์ CP-SIL 5 CP สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันตามจุดเดือด ตามมาตรฐาน ASTM D2887 แสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น รุ่น Varian CP-3800

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1. สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ ได้แก่

1. ดินขาว (kaolin)
2. สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3 , 27% SiO_2) : Panreac
3. เตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ($\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{NBr}$, 98%) : Aldrich
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH , 97%) : Carlo Erba
5. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid, 98%) : Fisher Chemicals
6. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, 37%) : AnalaR
7. แอมโมเนียมไนเตรต (NH_4NO_3 , AR grade) : Qrec
8. น้ำกลั่น

3.2.3. สารเคมีที่ใช้ในการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่

1. น้ำมันปาล์มดิบ (crude palm oil)
2. แก๊สไฮโดรเจน (H_2 , 99.99%) : TIG Trading
3. ซีโอไลต์ ZSM-5 ($SiO_2/Al_2O_3 = 23.3$)
4. ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์จากดินขาวธรรมชาติ
5. โทลูอีน (C_7H_8 , 99%) : Fisher Chemicals

3.4 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

3.4.1 การปรับปรุงคุณภาพดินขาวเบื้องต้น

เนื่องจากดินขาวที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติ จึงมีสิ่งเจือปนต่างๆ อยู่มาก ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ กระบวนการปรับปรุงคุณภาพประกอบไปด้วย 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการทางความร้อน (thermal treatment) กระบวนการทางกายภาพ (physical treatment) และกระบวนการทางเคมี (chemical treatment) โดยทั้ง 3 กระบวนการมีขั้นตอน ดังนี้

กระบวนการทางความร้อน

นำดินขาวไปทำการแคลไซน์ (calcination) ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส ในเตาเผา อุณหภูมิสูง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ที่เป็นสารระเหยง่าย (volatile matter) ออกจากโครงสร้างของดินขาว

กระบวนการทางกายภาพ

นำดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางความร้อน มาบดให้ละเอียด จากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 325 เมช เพื่อคัดแยกขนาดอนุภาคของดินขาว

กระบวนการทางเคมี

1. การบำบัดด้วยสารเคมี

ภายหลังจากดินขาวผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว นำดินขาวดังกล่าวมาทำการต้มในกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนของดินขาวต่อกรดไฮโดรคลอริก เท่ากับ 1 กรัมต่อ 4 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองแยก และล้างดินขาวด้วยน้ำกลั่นจนมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง จากนั้นนำดินขาวที่ผ่านการบำบัดด้วยสารเคมีไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ทำการทดสอบผลของชนิดและความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางเคมี โดยเลือกใช้

1. สารละลายกรด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 1 และ 4 โมลต่อลิตร
2. สารละลายเบสร่วมกับสารละลายกรด ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายเบส ร่วมกับสารละลายกรด คือ กรดไฮโดรคลอริก และกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ตามลำดับ

เก็บดินขาวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพทั้ง 3 ขั้นตอนในโถปลอดความชื้นเพื่อรอการใช้งานต่อไป

2. การแตกอนุภาคของควอร์ตซ์

การแตกอนุภาคของควอร์ตซ์ในดินขาวนั้น ใช้กระบวนการแอลคาไลน์ฟิวชัน (alkaline fusion) โดยเผาดินขาวที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการบดโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ละเอียด จากนั้นผสมให้เข้ากันกับดินขาว ที่อัตราส่วนดินขาวต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 1 กรัม ต่อ 1 กรัม เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้จนเย็น แล้วนำไปใช้เป็นแหล่งซิลิกาและอะลูมินาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5

3.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ

1. ละลายดินขาวที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพในน้ำกลั่นในปิกเกอร์เทอร์รอน กวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก
2. เตรียมสารละลายของสารก่อโครงร่าง โดยสารก่อโครงร่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (tetrapropylammonium bromide, TPA-Br) กวนอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. จากนั้นผสมสารละลายของดินขาวและเตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์เข้าด้วยกัน กวนอย่างต่อเนื่องอีก 1 ชั่วโมง
4. หยดสารละลายผสมดังกล่าวลงในภาชนะที่บรรจุสารละลายโซเดียมซิลิเกต เพื่อปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาตามที่ต้องการ ทำการกวนของผสมดังกล่าวอย่างต่อเนื่องอีก 2 ชั่วโมง
5. ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง จนเกิดเจล จากนั้นเทเจลที่เตรียมได้ลงในเครื่องปฏิกรณ์ในระบบไฮโดรเทอร์มัล ซึ่งมีลักษณะเป็นภาชนะเทอร์รอน บรรจุอยู่ในภาชนะสแตนเลส-สตีล ปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้เรียบร้อย

6. จากนั้นนำเครื่องปฏิกรณ์ไปเข้าตู้อบ ทำการปรับอุณหภูมิ และปรับความเร็วรอบในการหมุนเครื่องปฏิกรณ์ตามที่กำหนด เพื่อทำการตกผลึก (crystallization) ในระยะเวลาที่ต้องการ
7. เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด จึงทำการแยกผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ กรองล้างผลึกที่สังเคราะห์ได้ด้วยน้ำกลั่น จนมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนผลึกแห้งสนิท
8. นำผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ไปเผาต่อที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อกำจัดสารก่อโครงร่างออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์

3.4.3 การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange)

ในการแลกเปลี่ยนไอออนนั้น ใช้สารละลายของแอมโมเนียมไนเตรต ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยใช้อัตราส่วนของดินขาวต่อสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต เท่ากับ 1 กรัม ต่อ 150 มิลลิลิตร ทำการต้มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นกรองแยก และล้างผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนผลึกแห้งสนิท สุดท้ายนำไปแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เก็บไว้ในโถปิดอความชื้นเพื่อรอการใช้งานต่อไป

3.4.4 การแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

1. นำน้ำมันปาล์มดิบไปกรองแบบสุญญากาศเพื่อกรองแยกสิ่งสกปรกและเนื้อปาล์มออกจากน้ำมัน
2. ชั่งน้ำมันปาล์มดิบและตัวเร่งปฏิกิริยาตามสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นนำน้ำมันปาล์มดิบและตัวเร่งปฏิกิริยาใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็ก แล้วปิดฝาให้สนิท
3. นำเครื่องปฏิกรณ์ไปใส่อากาศที่อยู่ภายในออกโดยผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าไปอย่างช้าๆ แล้วอัดแก๊สไฮโดรเจนจนได้ความดันที่กำหนด โดยสังเกตความดันจาก regulator ที่ต่อระหว่างถังบรรจุแก๊สไฮโดรเจนกับเครื่องปฏิกรณ์ ทำการตรวจสอบรอยรั่วของแก๊สโดยใช้น้ำสบู่ทดสอบตามข้อต่อของเครื่องปฏิกรณ์ หากปรากฏว่าไม่มีการรั่วของแก๊สไฮโดรเจน ค่อยๆ หมุนวาล์วปิดเพื่อไม่ให้แก๊สออก
4. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์เข้ากับชุดควบคุมเครื่องปฏิกรณ์ และต่ออุปกรณ์ขดลวดความร้อนแบบ injection เข้าเครื่องปฏิกรณ์ แล้วหุ้มด้วยฉนวนทับอีกครั้งเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนระหว่างการทดลอง จากนั้นต่อเทอร์โมคัพเฟิลเข้ากับเครื่องปฏิกรณ์

5. ปรับกระแสไฟฟ้าจากหม้อแปลงไฟฟ้าให้กับขดลวดให้ความร้อน และเปิดสวิตช์เครื่องเขย่า
6. เริ่มทำการจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์คงที่ตามที่กำหนดไว้ เมื่อครบเวลาที่ทำปฏิกิริยาแล้ว นำฉนวนและขดลวดความร้อนออก ใช้พัดลมเป่าเครื่องปฏิกรณ์จนภายในเครื่องปฏิกรณ์มีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ปลดอยแก๊สภายในเครื่องปฏิกรณ์ออก
7. กรองผลิตภัณฑ์ของเหลวด้วยอุปกรณ์การกรองแบบสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองใยแก้วเพื่อแยกส่วนที่เป็นของเหลวเก็บไว้ในขวดเพื่อรอการวิเคราะห์
8. ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยสารละลายโทลูอีน เช็ดทำความสะอาดด้วยกระดาษซับที่ซึมน้ำหนักเตรียมไว้ จากนั้นนำส่วนที่เป็นของแข็งและกระดาษซับไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 คืน แล้วนำไปชั่งเพื่อคำนวณร้อยละของการเปลี่ยนแปลงต่อไป
9. นำผลิตภัณฑ์ของเหลว (ผลิตภัณฑ์น้ำมัน) ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีจำลองการกลั่น เพื่อวิเคราะห์ค่าการกระจายองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์สมบัติของดินขาวเบื้องต้น

เนื่องจากดินขาวเป็นดินที่สามารถพบได้ในหลายภูมิภาคของประเทศไทย ดังนั้นสมบัติของดินขาวจึงแตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศที่พบ โดยดินขาวที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดินขาวจากจังหวัดเพชรบูรณ์ มีสีขาว เนื้อดินละเอียด จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบของดินขาวสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF) พบว่ามีปริมาณซิลิกาสูงที่สุด คิดเป็นร้อยละ 74.15 โดยน้ำหนัก รองลงมา คือ อะลูมินา (Al_2O_3) นอกจากนี้ยังพบธาตุองค์ประกอบอื่นๆ อาทิเช่น โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) และโลหะออกไซด์อื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย อันได้แก่ ไททานเนียมออกไซด์ (TiO_2) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) รูบิเดียมออกไซด์ (Rb_2O) แบเรียมออกไซด์ (BaO) และ แมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1

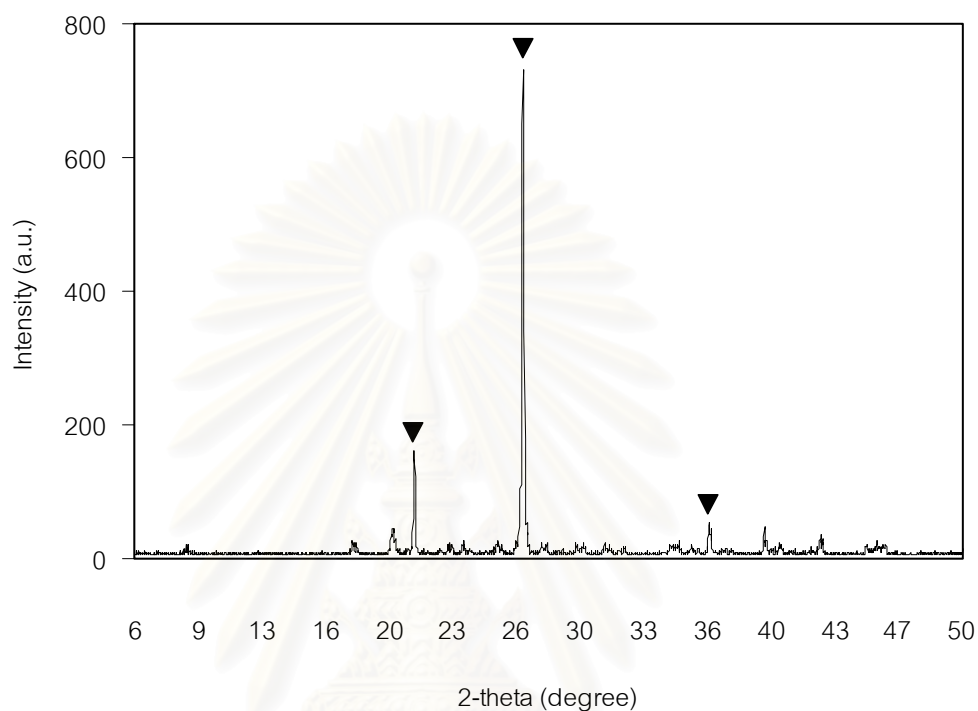
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวที่ใช้ในการทดลอง

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
SiO_2	74.17
Al_2O_3	11.96
K_2O	4.16
Fe_2O_3	1.19
อื่นๆ	8.52

นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์สมบัติของดินขาวด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer (XRD) ปรากฏรูปแบบ XRD ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งประกอบด้วยพีคหลักที่สำคัญ 3 พีคด้วยกัน คือที่ตำแหน่ง 2-theta เท่ากับ 20.5 26 และ 36 องศา จากการเปรียบเทียบรูปแบบ XRD นี้กับรูปแบบ XRD มาตรฐาน พบว่าพีคในตำแหน่งดังกล่าวเป็นพีคเอกลักษณ์ของควออร์ตซ์ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าซิลิกาที่พบในดินขาวส่วนใหญ่น่าจะอยู่ในรูปผลึกควออร์ตซ์

ควออร์ตซ์เป็นผลึกของซิลิกาที่มีความแข็ง (hardness) มาก ความหนาแน่นผลึกสูง และมีความเสถียรทางเคมีและความร้อนสูง ยากที่จะแตกอนุภาคด้วยการบำบัดทางเคมีและบดย่อย

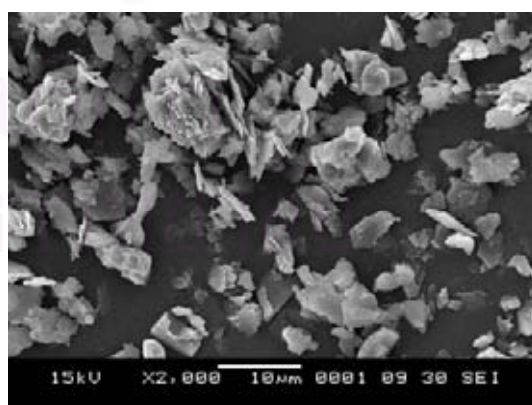
ธรรมชาติ รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะทางกายภาพและลักษณะอนุภาคของดินขาวซึ่งถ่ายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าผลึกของดินขาวมีลักษณะเป็นแผ่นเกาะกลุ่มกัน ซึ่งคล้ายคลึงกับภาพถ่าย SEM ของดินขาวจากจังหวัดอุดรธานี [อมลวรรณ และวิชัย, 2549]



รูปที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของดินขาวจากจังหวัดเพชรบูรณ์
(▼ แสดงตำแหน่งพีคเอกลักษณะของควออร์ตซ์)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) ภาพถ่ายลักษณะทางกายภาพของดินขาว
และ (ข) ภาพถ่าย SEM ของอนุภาคดินขาว

4.2 การปรับปรุงคุณภาพของดินขาวเบื้องต้น

จากผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของดินขาวจะเห็นได้ว่าดินขาวมีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาและอะลูมินาจึงมีความเหมาะสมสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ อย่างไรก็ตามในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จำเป็นต้องใช้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาสูง แต่ดินขาวที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 6.20 และมีสิ่งเจือปนต่างๆ อยู่มาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ เหล่านั้น ก่อนนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 นอกจากนี้ซิลิกาส่วนใหญ่ในดินขาวอยู่ในรูปของควอร์ตซ์ซึ่งจะแตกตัวและละลายในสารละลายเบสได้น้อยมาก จึงอาจซึ่งจะส่งผลให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้ และไม่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ดังนั้นในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวเบื้องต้นจึงต้องทำการศึกษาการแตกอนุภาคของควอร์ตซ์ในดินขาวด้วย

4.2.1 ผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางความร้อน

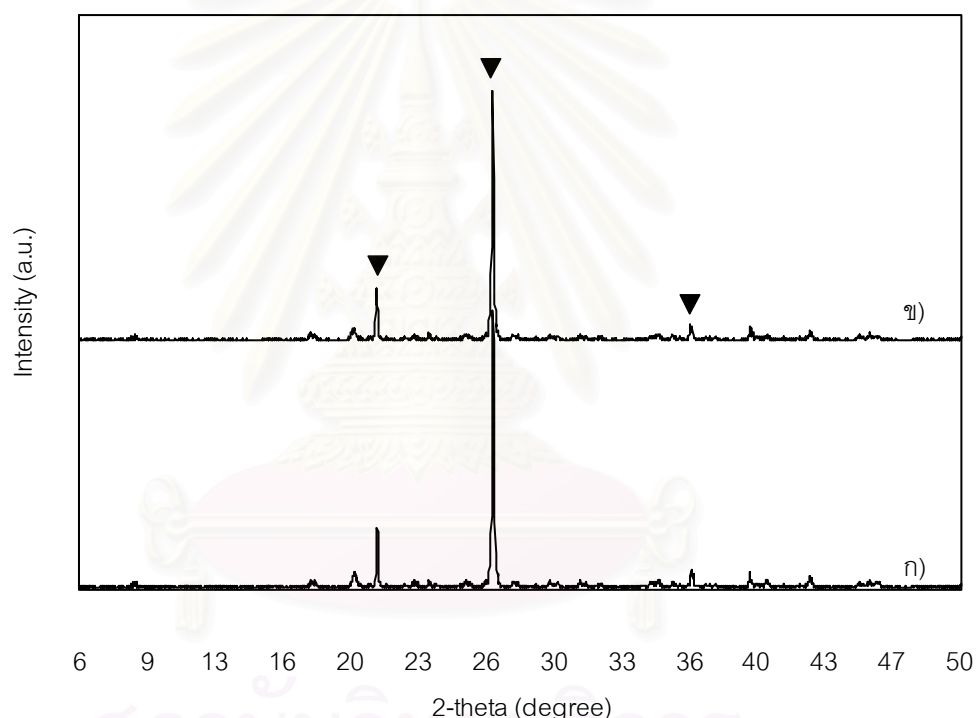
เมื่อดินขาวผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง [Ping และคณะ, 2006] พบว่าสีของดินขาวเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมโดยเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีน้ำตาล ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวดินขาวมีการเปลี่ยนแปลงไปเป็น metakaolin ซึ่งมีพื้นที่ผิวมากกว่าดินขาวธรรมชาติและความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าธาตุองค์ประกอบของดินขาวเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย โดยองค์ประกอบที่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่ นั้น เป็นสารระเหยได้ (volatile matter) แต่ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าร้อยละโดยน้ำหนักของอะลูมินาและโพแทสเซียมออกไซด์มีค่าลดลงเล็กน้อย



รูปที่ 4.3 ลักษณะทางกายภาพของดินขาวหลังผ่านการแคลไซน์

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของดินขาวก่อนและหลังแคลไซน์

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ก่อนแคลไซน์	หลังแคลไซน์
SiO ₂	74.17	79.06
Al ₂ O ₃	11.96	11.40
K ₂ O	4.16	3.98
Fe ₂ O ₃	1.19	1.19
อื่นๆ	8.52	4.37



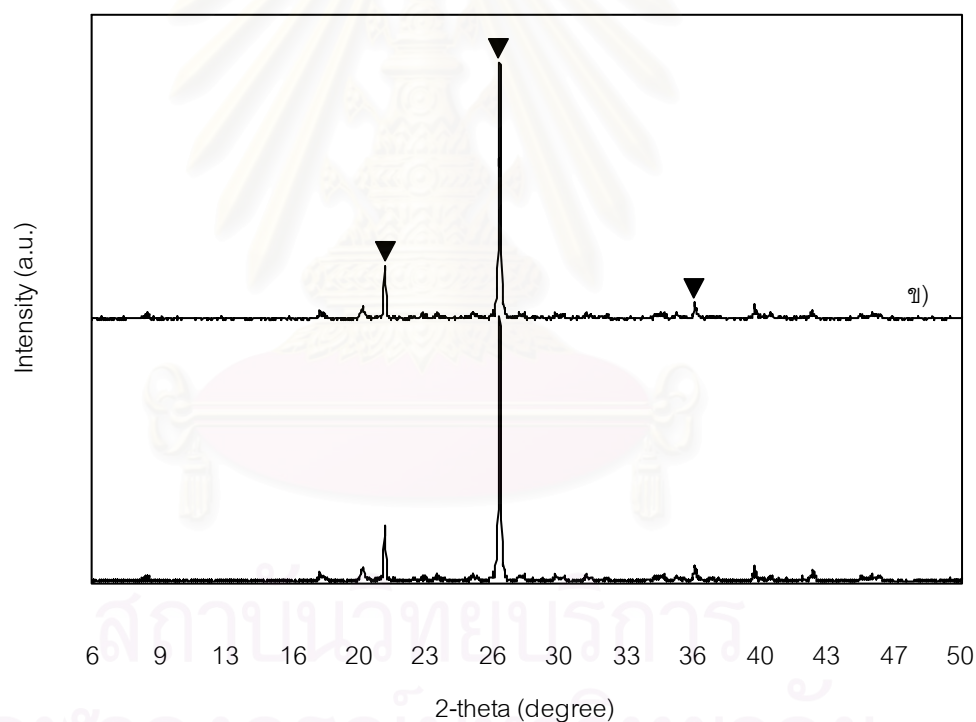
รูปที่ 4.4 รูปแบบ XRD ของดินขาว ก) ก่อนแคลไซน์ และ ข) หลังแคลไซน์
(▼ แสดงตำแหน่งพีคเอกลักษณ์ของควออร์ตซ์)

ผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวก่อนและหลังแคลไซน์แสดงในตารางที่ 4.2 ร้อยละโดยน้ำหนักของอะลูมินาที่ลดลงจะส่งผลให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของดินขาวเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยลดปริมาณสารละลายไฮเดียมซิลิเกตที่ต้องเติมลงไปเพื่อปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาในขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์รูปแบบ XRD ของดินขาวที่ผ่านการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสเปรียบเทียบกับรูปแบบ XRD

ของดินขาวก่อนการแคลไซน์ (รูปที่ 4.4) จะเห็นได้ว่า intensity ของพีคในตำแหน่งที่แสดงเอกลักษณ์ของควอร์ตซ์ก่อนและหลังการแคลไซน์ไม่แตกต่างกัน ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางความร้อนเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถแตกอนุภาคของควอร์ตซ์ที่มีอยู่ในดินขาวได้ และสามารถลดปริมาณสิ่งเจือปนต่างๆ ในดินขาวได้เพียงบางส่วนเท่านั้น จึงมีความจำเป็นต้องทำการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการในลำดับต่อไป

4.2.2 ผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางกายภาพ

การปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางกายภาพประกอบด้วยการบดดินขาวให้ละเอียดด้วยโม่บดสาร และการคัดแยกขนาดอนุภาคด้วยตะแกรงร่อนขนาด 325 เมส จะได้อนุภาคของดินขาวไม่เกิน 0.044 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.5 รูปแบบ XRD ของดินขาว ก) หลังผ่านการบดและคัดแยกอนุภาคด้วยตะแกรงร่อน และ ข) หลังผ่านการแคลไซน์ (▼ แสดงตำแหน่งพีคเอกลักษณ์ของควอร์ตซ์)

ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจากรูปแบบ XRD ของดินขาวภายหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางกายภาพเปรียบเทียบกับรูปแบบ XRD ของดินขาวหลังผ่านการแคลไซน์ (รูปที่ 4.5) พบว่า intensity ของพีคเอกลักษณ์ของควอร์ตซ์ในดินขาวยังคงสูงอยู่ แสดงว่าการปรับปรุง

คุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางกายภาพทั้งการบดและการคัดแยกอนุภาคของดินขาวไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะแตกสลายอนุภาคของควอร์ตซ์ได้ นอกจากนี้ยังแสดงว่าอนุภาคของควอร์ตซ์ในดินขาวมีขนาดที่ค่อนข้างเล็กกว่า 0.044 มิลลิเมตร (ขนาดของตะแกรง) จึงสามารถผ่านรูของตะแกรงร้อนได้

4.2.3 ผลของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการทางเคมี

1. การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี

การปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีประกอบด้วยการใช้กรด ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริกและกรดซัลฟิวริก ที่มีความเข้มข้นต่างๆ กัน คือ 1 โมลต่อลิตร และ 4 โมลต่อลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ทำการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ร่วมกับกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ร่วมกับกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรเช่นกัน ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบทางเคมีของดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีด้วยเทคนิค XRF

ตารางที่ 4.3 ธาตุองค์ประกอบของดินขาวหลังการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมี

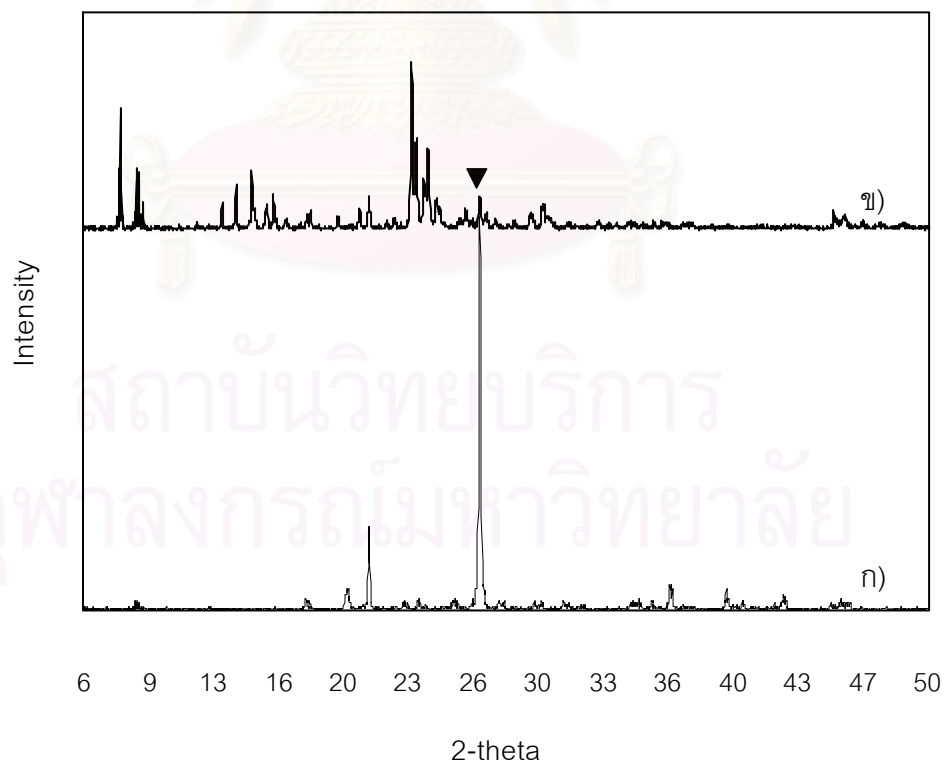
ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก						
	หลังแคลไซน์	HCl 4 M	HCl 1 M	H ₂ SO ₄ 4 M	H ₂ SO ₄ 1 M	NaOH 1 M + HCl 1 M	NaOH 1 M + H ₂ SO ₄ 1 M
SiO ₂	74.17	82.64	82.67	80.98	81.21	82.11	74.17
Al ₂ O ₃	11.96	11.32	11.31	11.32	11.35	11.33	11.96
K ₂ O	4.16	3.43	3.34	3.49	3.53	3.45	4.16
Fe ₂ O ₃	1.19	0.44	0.41	1.67	1.44	0.42	1.19
อื่นๆ	8.52	2.17	2.27	2.54	2.47	2.69	8.52

จากตารางที่ 4.3 เห็นได้ว่าร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุองค์ประกอบส่วนที่เป็นสิ่งเจือปนในดินขาวลดลงอย่างเห็นได้ชัดภายหลังจากการปรับปรุงคุณภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริกหรือกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้นต่างๆ รวมถึงการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับกรดทั้งสองชนิด อย่างไรก็ตามการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรสามารถกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจากดินขาวได้มากที่สุด ซึ่งเห็นได้จากร้อยละโดยน้ำหนักของโพแทสเซียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์ และสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่มีค่าลดลงมากที่สุด เมื่อ

เปรียบเทียบกับร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุองค์ประกอบที่มีอยู่ในดินขาวภายหลังผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการทางความร้อน นอกจากนี้ร้อยละโดยน้ำหนักของสิ่งเจือปนที่ลดลง ส่งผลให้ร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาในดินขาวเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาในดินขาวจึงเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีอัตราส่วน เท่ากับ 6.20 เป็น 7.30 ซึ่งจะช่วยลดปริมาณสารละลายไฮเดียมซิลิเกตที่ต้องเติมลงไปในช่วงขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 เพื่อทำการปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาให้เป็นไปตามต้องการอีกด้วย

2. การแตกอนุภาคของควออร์ตซ์ด้วยกระบวนการแอลคาไลน์ฟิวชัน

แม้ว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยสารเคมีจะสามารถลดปริมาณสิ่งเจือปนต่างๆ ในดินขาวได้ และส่งผลให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาในดินขาวเพิ่มขึ้น แต่เนื่องซิลิกาในดินขาวยังคงอยู่ในรูปของควออร์ตซ์ ที่มีความเสถียรมาก ไม่สามารถแตกตัวและละลายในสารละลายเบส ทำให้อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ไม่เป็นไปตามที่คำนวณไว้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำดินขาวที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วยกระบวนการต่างๆ ข้างต้นแล้วมาทำการแตกอนุภาคของควออร์ตซ์ที่ยังคงเหลืออยู่ในดินขาวด้วยกระบวนการแอลคาไลน์ฟิวชันก่อนที่จะนำดินขาวดังกล่าวไปใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ต่อไป



รูปที่ 4.6 รูปแบบ XRD ของ (ก) ดินขาวธรรมชาติ และ (ข) ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้
(▼ แสดงตำแหน่งพีคเอกลักษณ์ของควออร์ตซ์)

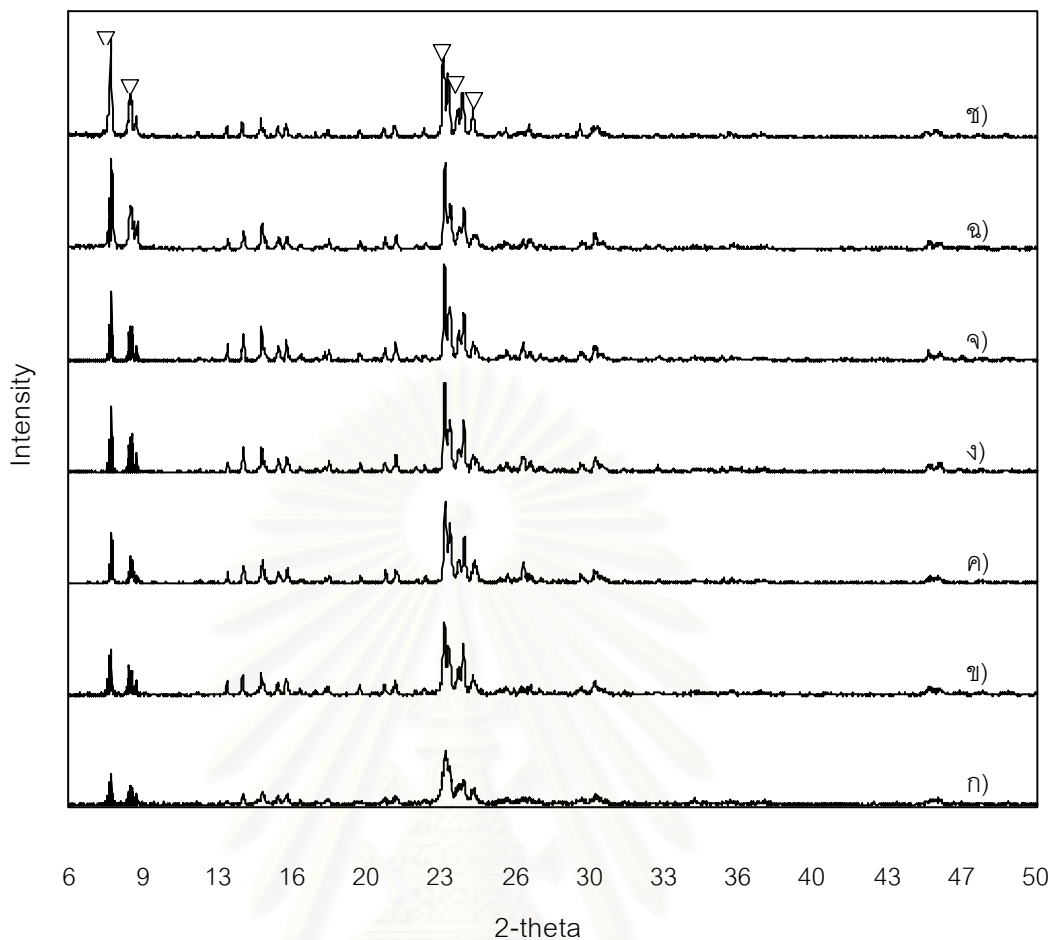
ภายหลังดินขาวผ่านขั้นตอนการแตกอนุภาคของควอร์ตซ์ด้วยกระบวนการแอลคาไลน์ฟิวชันโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าปริมาณของควอร์ตซ์ในดินขาวลดลง เมื่อพิจารณา รูปแบบ XRD ในรูปที่ 4.6 พบว่า intensity ของพีคเอกลักษณ์ของควอร์ตซ์ในดินขาวลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการแอลคาไลน์ฟิวชันสามารถแตกอนุภาคของควอร์ตซ์ที่มีอยู่ในดินขาวได้ โดยสามารถลดปริมาณของควอร์ตซ์ได้มากถึงร้อยละ 96

4.3 ผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาว

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงผลของตัวแปรต่างๆ ต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ 4 ตัวแปร ประกอบด้วย อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล และปริมาณสารก่อโครงร่างซึ่งก็คือ TPA-Br โดยกำหนดให้ค่าความเป็นกรด-เบสของเจล เท่ากับ 10 ± 1 กวนสารละลายด้วยอัตราเร็วคงที่ 500 รอบต่อนาที และหมุนเครื่องปฏิกรณ์ด้วยความเร็ว 15 รอบต่อนาที ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM) และ N_2 adsorption/desorption measurement โดยได้ผลดังนี้

4.3.1 ผลของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา

ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาค่อนข้างสูง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 คือ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาสูงกว่า 20 [Brisdon และคณะ, 2003] ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 โดยศึกษาผลของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลในช่วง 20 - 200 และทำการปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาดังกล่าวด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต กำหนดให้ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลคงที่ที่ 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07 ค่าความเป็นกรด-เบสของเจล เท่ากับ 10 ± 1 และหมุนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเร็ว 15 รอบต่อนาที รูปที่ 4.7 แสดงรูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลต่างๆ พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับรูปแบบ XRD มาตรฐานของซีโอไลต์ ZSM-5



รูปที่ 4.7 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากเจลที่มี

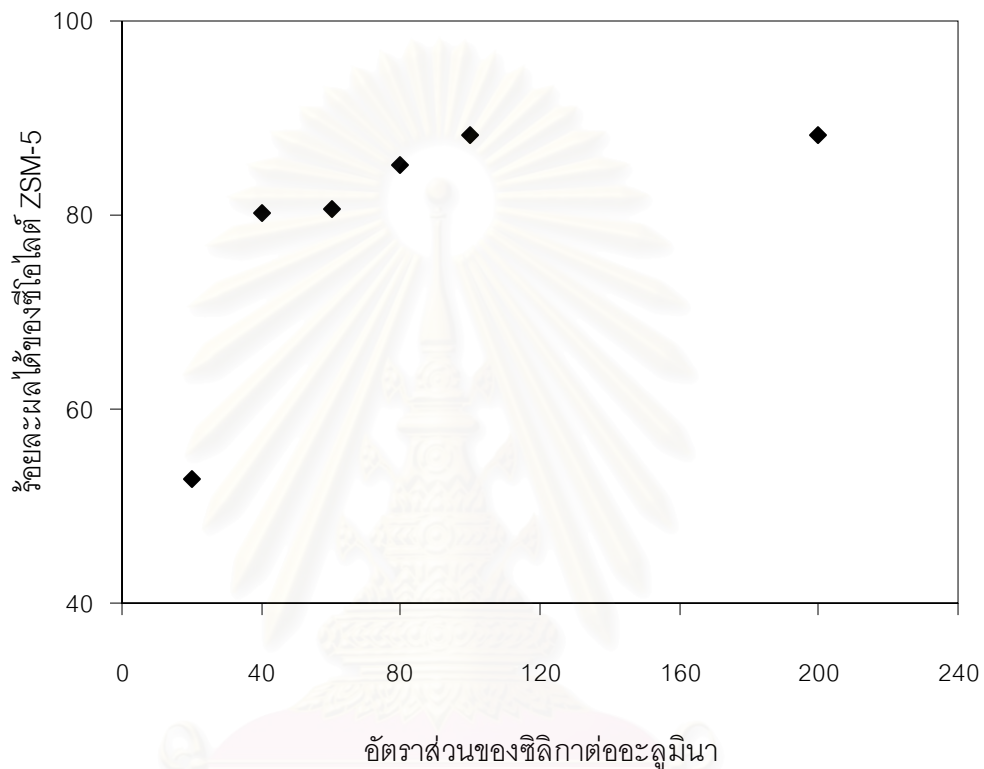
อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ ก) 20 ข) 40 ค) 60 ง) 80 จ) 100 ฉ) 200

และ ข) ซีโอไลต์ ZSM-5 มาตรฐาน ที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ เท่ากับ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07

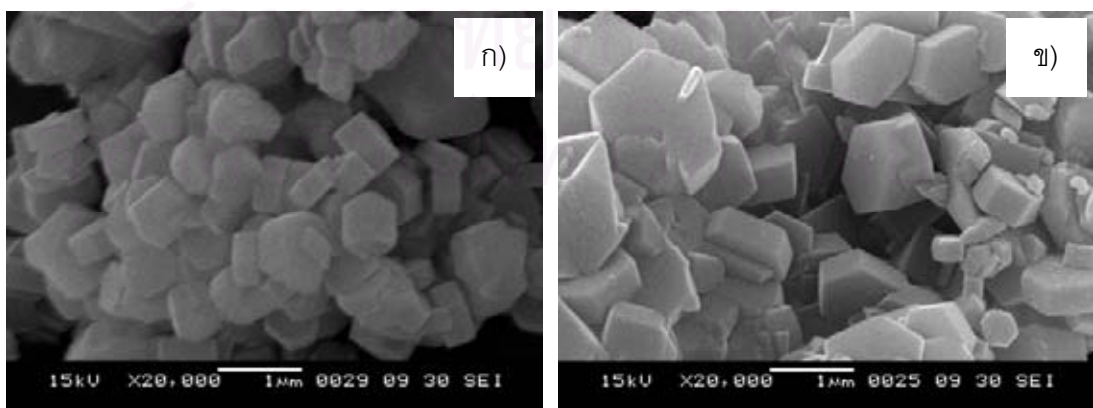
(▽ แสดงตำแหน่งพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5)

จากรูปที่ 4.7 พบว่ามีพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 ปรากฏขึ้นที่ทุกๆ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่ใช้ในการสังเคราะห์ เมื่อทำการปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้น intensity ของพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มขึ้น และให้ร้อยละผลได้ (yield) ของซีโอไลต์ ZSM-5 มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 คำนวณจากการเปรียบเทียบระหว่าง intensity ของพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้กับรูปแบบ XRD มาตรฐานของซีโอไลต์ ZSM-5 ดังแสดงในภาคผนวก ข

จากรูปที่ 4.8 แสดงร้อยละของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้นและมีค่าคงที่ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 โดยสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้สูงที่สุดถึงร้อยละ 88.20 แสดงให้เห็นว่าการปรับเพิ่มอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มากกว่า 100 นั้น ไม่ส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้



รูปที่ 4.8 ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากเจล ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาต่างๆ



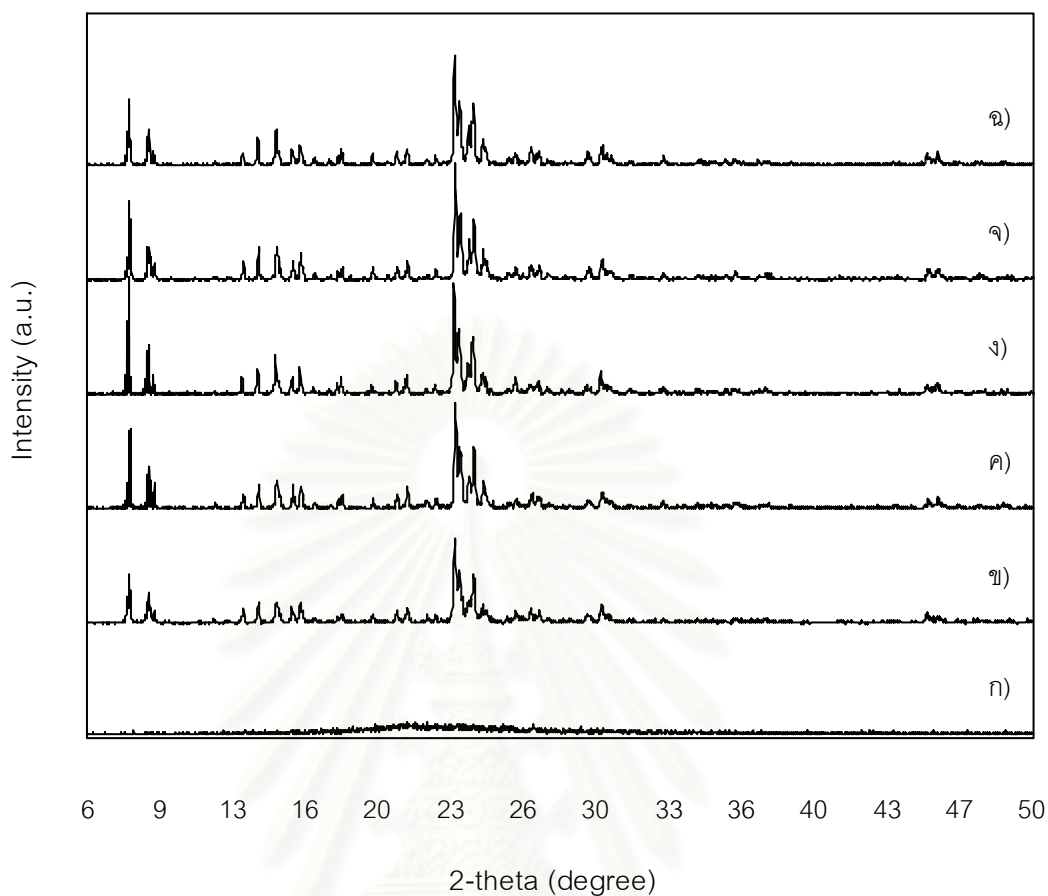
รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากเจล ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ (ก) 100 และ (ข) 200 ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 และ 200 (รูปที่ 4.9) เห็นได้ว่าขนาดผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 200 ให้ผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์จากเจลที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100 และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของขนาดผลึก (crystal size distribution) ยังพบว่าที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 200 มีการกระจายตัวของขนาดผลึกที่ไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลที่ 100 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ต่อไป

4.3.2 ผลของเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

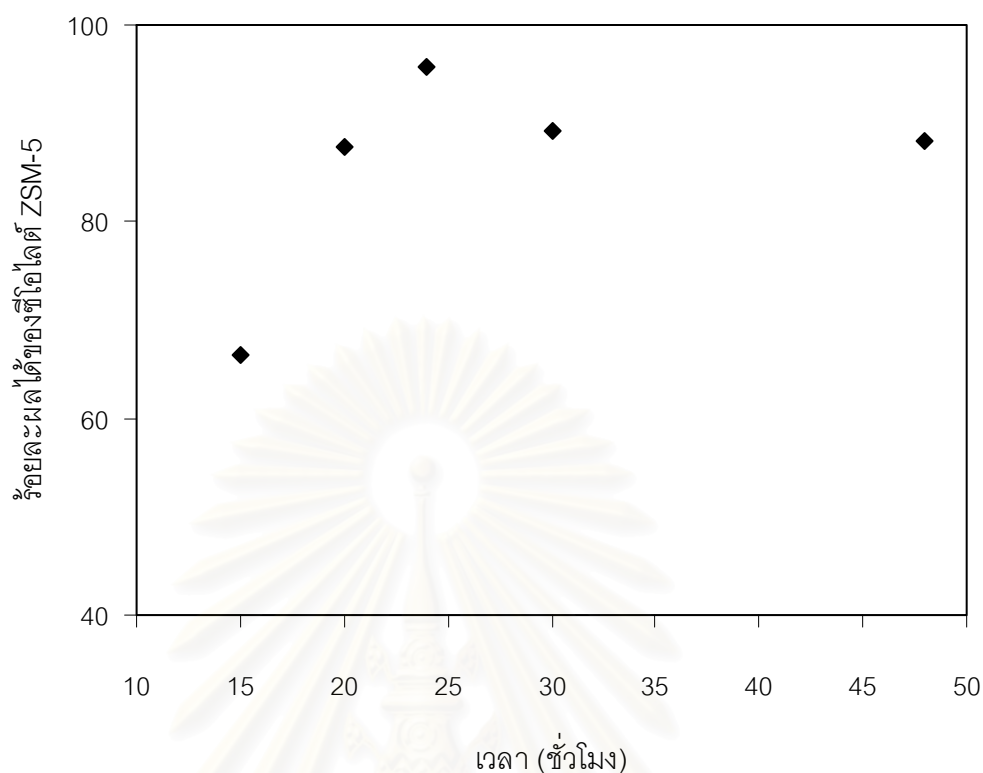
เวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 เนื่องจากเมื่อนำเจลที่เตรียมได้เข้าสู่กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลแล้ว จะเกิดการตกผลึกเป็นซีโอไลต์ ZSM-5 ระยะเวลาที่เหมาะสมนั้นจะส่งผลให้ปริมาณและขนาดของผลึกซีโอไลต์ ZSM-5 สังเคราะห์ได้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลตั้งแต่ 4 - 48 ชั่วโมง โดยกำหนดให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาคงที่ เท่ากับ 100 อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 170 องศาเซลเซียส อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07 ค่าความเป็นกรด-เบสของเจล เท่ากับ 10 ± 1 และหมุนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเร็ว 15 รอบต่อนาที รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ กัน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.10 เห็นได้ว่าที่ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 4 ชั่วโมง ไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 ในรูปแบบ XRD เนื่องจากที่เวลา 4 ชั่วโมงนั้น ยังไม่เหมาะสมต่อการเกิดผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 จนกระทั่งที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 15 ชั่วโมง จึงเริ่มปรากฏพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ชัดเจนขึ้น แต่ยังคงให้ intensity ของพีคเอกลักษณ์ที่ค่อนข้างต่ำ นั่นแสดงว่าการเกิดผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ยังไม่สมบูรณ์นัก โดย intensity ในรูปแบบ XRD ของพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มขึ้น



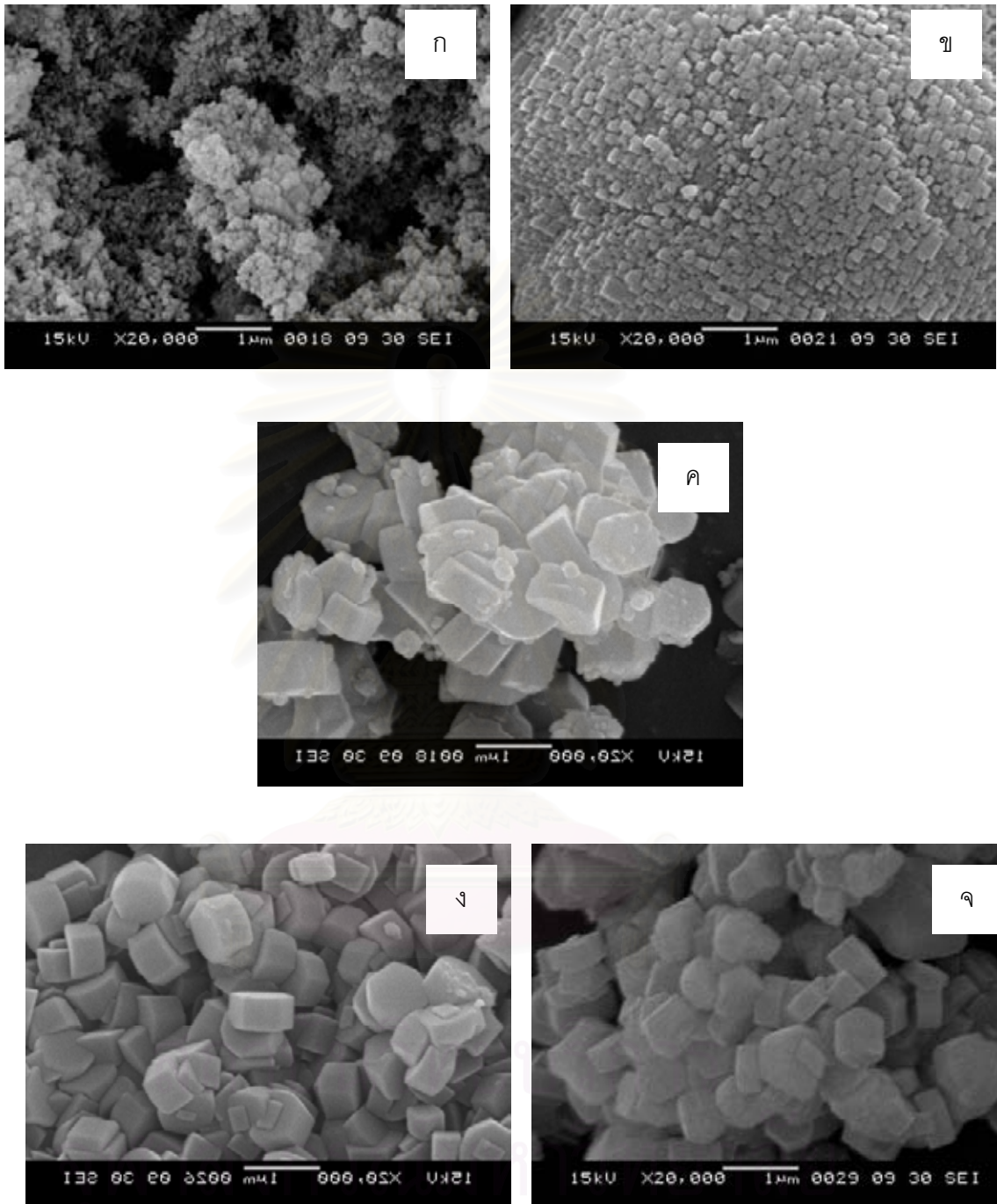
รูปที่ 4.10 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ก) 4 ข) 15 ค) 20 ง) 24 จ) 30 และ ฉ) 48 ชั่วโมง โดยมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100 อุณหภูมิ เท่ากับ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07

นอกจากนี้รูปที่ 4.10 เห็นได้ว่าที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 24 ชั่วโมง ให้ intensity ของพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 สูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับที่ระยะเวลาอื่นๆ ส่งผลให้ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้สูงสุดเช่นกัน โดยมีร้อยละผลได้เป็น 95.80 ดังแสดงในรูปที่ 4.11 แต่เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มขึ้นเป็น 30 และ 48 ชั่วโมง intensity ของพีคเอกลักษณ์และร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 จะลดลง



รูปที่ 4.11 ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ

เมื่อพิจารณาร่วมกับภาพถ่าย SEM (รูปที่ 4.12) ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ สามารถยืนยันได้ว่าที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 4 ชั่วโมง ไม่สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้ เนื่องจากไม่ปรากฏลักษณะผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ในขณะที่เวลา 15 ชั่วโมง เห็นได้ว่าผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 โตขึ้น โดยมีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กๆ ที่ยังคงเกาะกลุ่มกันอยู่ และจะเริ่มแยกตัวออก เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้น แต่ที่เวลา 20 ชั่วโมง รูปร่างของผลึกที่ได้ยังไม่สมบูรณ์นัก รวมถึงการกระจายตัวของขนาดผลึกยังไม่สม่ำเสมอ เมื่อเพิ่มระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 24 ชั่วโมง รูปร่างของผลึกซีโอไลต์ ZSM-5 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมที่ชัดเจนขึ้น ทั้งยังมีการกระจายตัวของขนาดผลึกที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ และเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึง 48 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่ามีรูปร่างผลึกที่ใกล้เคียงกับที่เวลา 24 ชั่วโมง แต่การกระจายตัวของขนาดผลึกจะดีกว่าที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังนั้นระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 24 ชั่วโมง เหมาะสมในการใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5

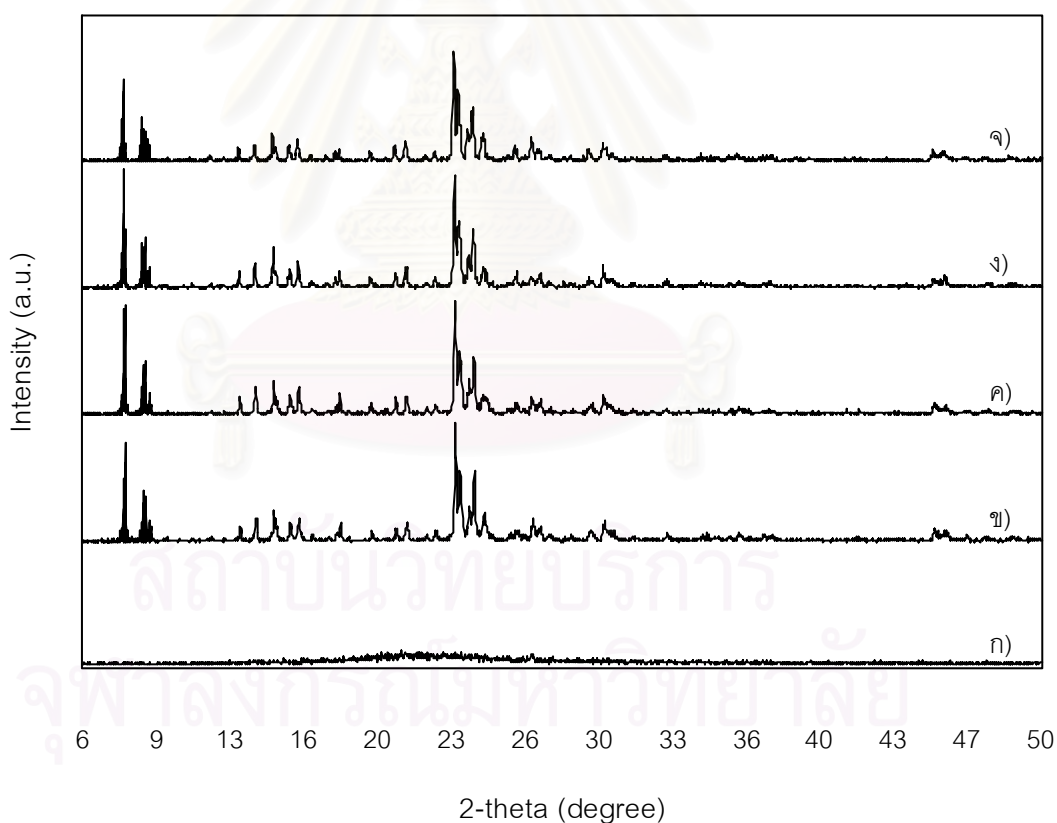


รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ที่ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ก) 4 ข) 15 ค) 20 ง) 24 และ จ) 48 ชั่วโมง ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

4.3.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล

อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่ทำการศึกษาในงานวิจัยอยู่ในช่วง 120 – 180 องศาเซลเซียส โดยกำหนดอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 ภายใต้กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเป็นเวลา 24 ชั่วโมง อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07 ค่าความเป็นกรด-เบสของเจล เท่ากับ 10 ± 1 และหมุนเครื่องปฏิกรณ์ด้วยความเร็ว 15 รอบต่อนาที

เมื่อนำซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติที่อุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ กัน ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD (รูปที่ 4.13) พบว่าเมื่อทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จะไม่พบโครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ดังแสดงจากการไม่ปรากฏพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 จากรูปที่ 4.13 เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลให้สูงขึ้น พีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 จะมี intensity เพิ่มขึ้น โดยที่อุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 170 องศาเซลเซียส ให้ intensity ของพีคเอกลักษณ์ของซีโอไลต์ ZSM-5 สูงสุด



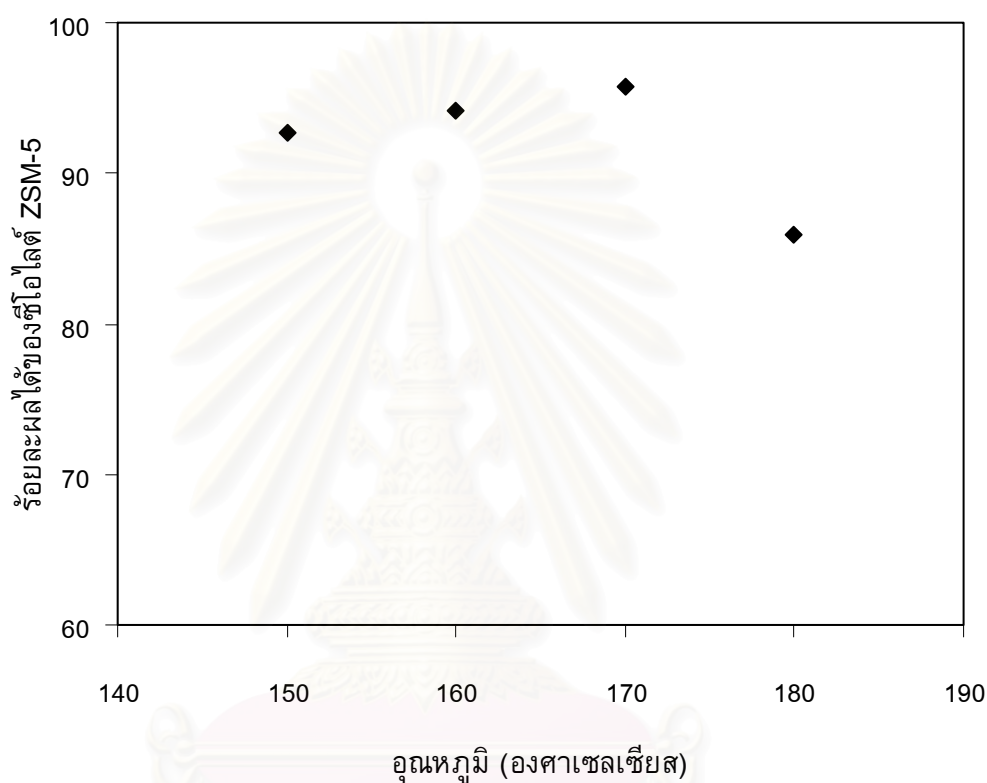
รูปที่ 4.13 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ

ที่อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ ก) 120 ข) 150 ค) 160 ง) 170

และ จ) 180 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100

ระยะเวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07

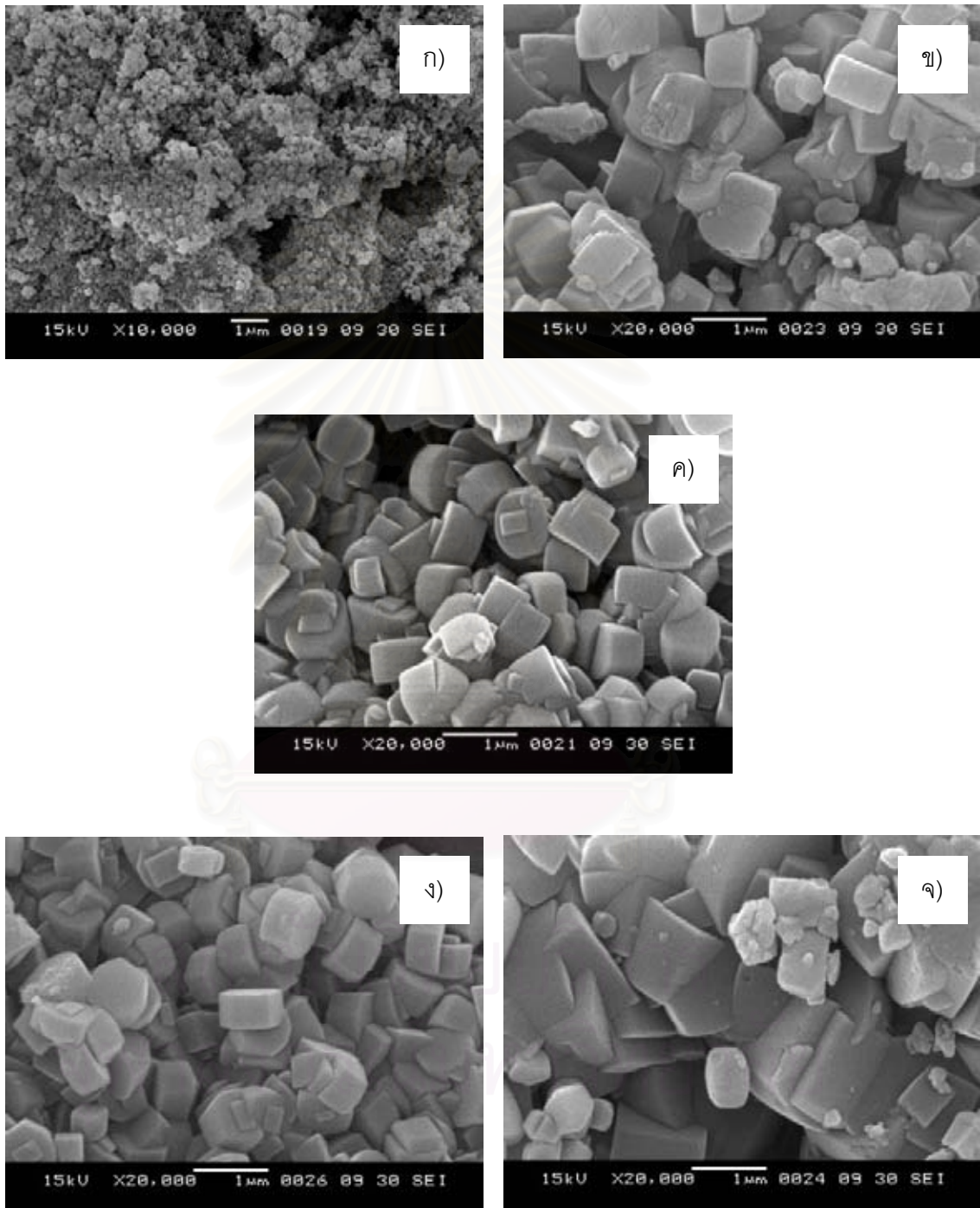
นอกจากนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 170 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 สูงสุด เมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิอื่นๆ นอกจากนี้หากเพิ่มอุณหภูมิเป็น 180 องศาเซลเซียส intensity ของพีคเอกซ์กัมจะลดลง และร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ก็ลดลงด้วยเช่นกัน ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Dong และคณะ



รูปที่ 4.14 ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ที่อุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลต่างๆ

ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 120 องศาเซลเซียส ไม่ปรากฏลักษณะผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 แต่มีลักษณะเป็นอสัณฐาน (amorphous) แสดงว่าไม่สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้ที่อุณหภูมินี้ เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มสูงขึ้น จะพบลักษณะผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ชัดเจนขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 160 และ 170 องศาเซลเซียส รูปร่างของผลึกมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่การกระจายตัวของขนาดผลึกที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส มีความสม่ำเสมอมากกว่า และให้ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 สูงกว่าอีกด้วย แต่เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลเพิ่มขึ้นเป็น 180 องศาเซลเซียส พบว่ารูปร่างผลึกมีลักษณะที่

เปลี่ยนแปลงไป โดยเกิดการหลอมรวมกัน กลายเป็นผลึกที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นคุณสมบัติของ
กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 คือ 170 องศาเซลเซียส

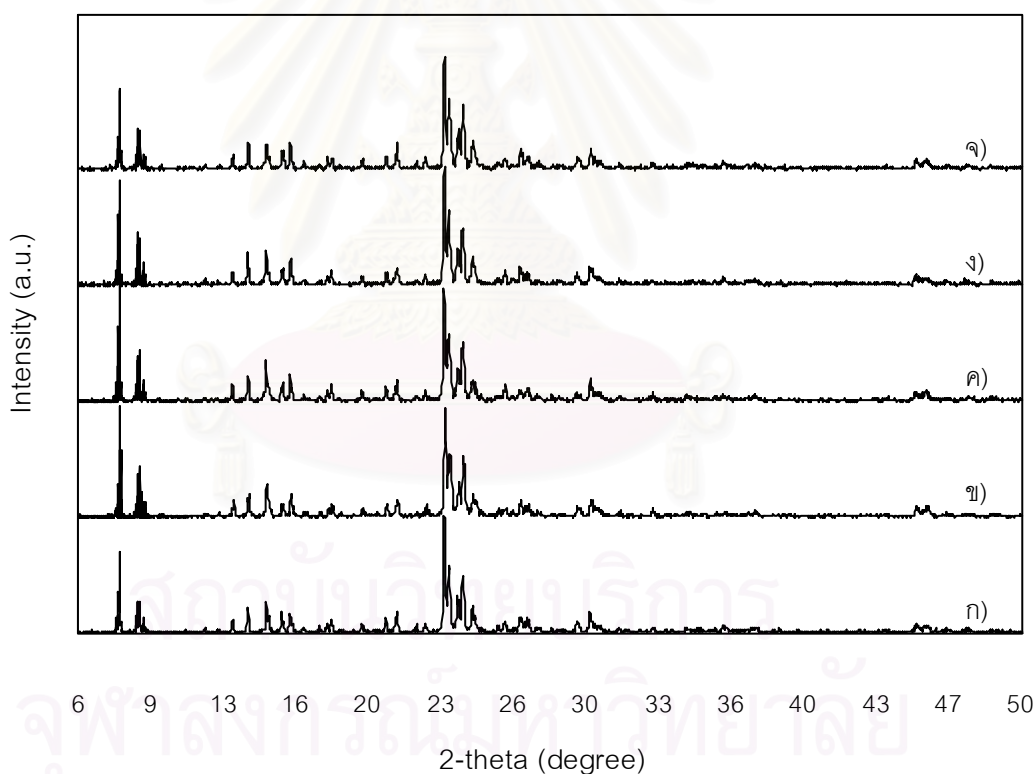


รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ
ที่อุณหภูมิของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ ก) 120 ข) 150 ค) 160 ง) 170
และ จ) 180 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

4.3.4 ผลของปริมาณสารก่อโครงสร้าง

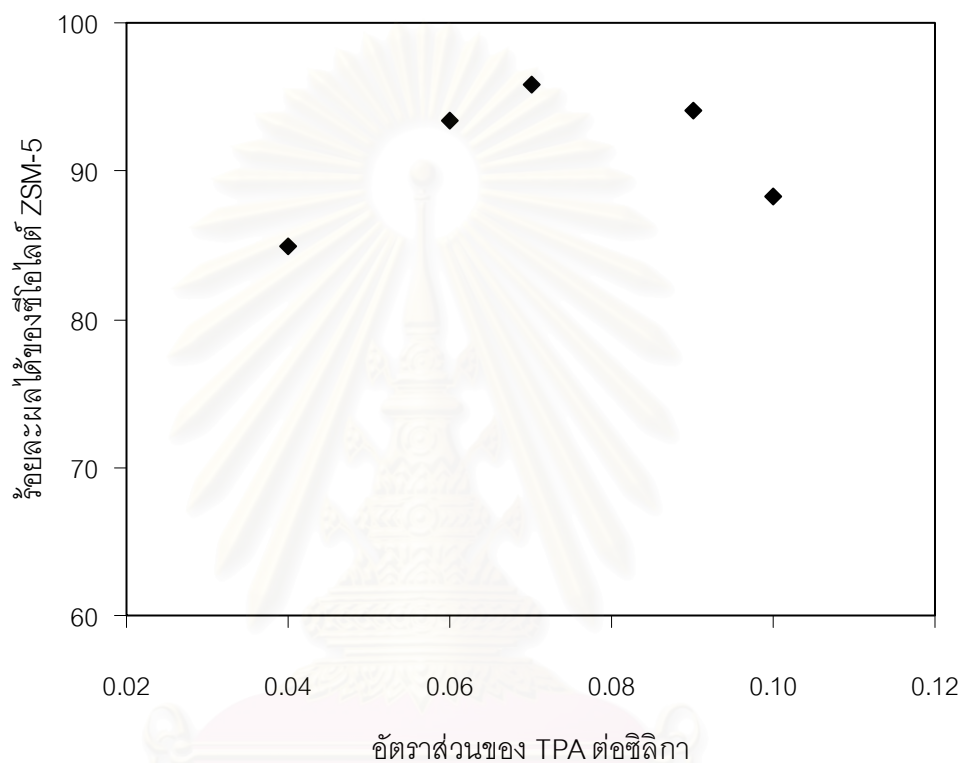
สารก่อโครงสร้างที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้แก่ เตตระโพรพิล-แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TPAOH) เตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เป็นต้น ซึ่งสารก่อโครงสร้างนี้เติมลงไป ในขั้นตอนของการสังเคราะห์เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดโครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ในช่วงการตกผลึกและช่วยป้องกันการเปลี่ยนแปลงเฟสของผลึกซีโอไลต์ ZSM-5 ภายหลังจากการตกผลึก โดยสารก่อโครงสร้างนี้จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 ด้วยการเผาที่อุณหภูมิสูง [Dong และคณะ, 2003]

ปริมาณสารก่อโครงสร้างที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 คิดเป็นอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกาในช่วง 0.04 – 0.07 และกำหนดให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลคงที่ที่ 100 ภายใต้ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลนาน 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส มีค่าความเป็นกรด-เบสของเจล เท่ากับ 10 ± 1 และหมุนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเร็ว 15 รอบต่อนาที



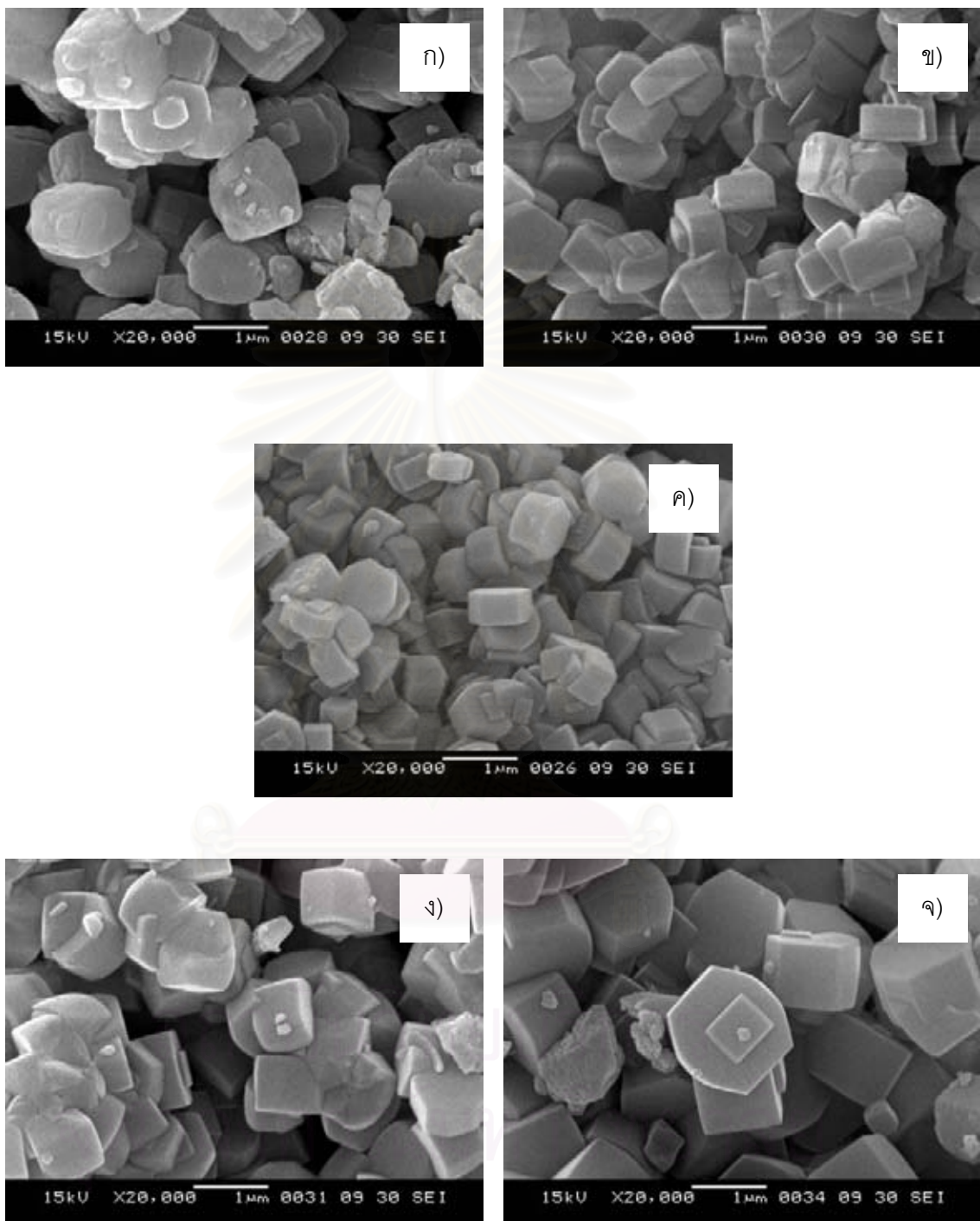
รูปที่ 4.16 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ที่อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ ก) 0.04 ข) 0.06 ค) 0.07 ง) 0.09 และ จ) 0.10 โดยมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100 เวลาของกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิ เท่ากับ 170 องศาเซลเซียส

เมื่อนำซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ปรากฏพีคเอกลักษณะของซีโอไลต์ ZSM-5 ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เมื่ออัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกาเพิ่มขึ้นจาก 0.04 เป็น 0.06 และ 0.07 ตามลำดับ intensity ของพีคเอกลักษณะของซีโอไลต์ ZSM-5 จะเพิ่มสูงขึ้น และร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน (รูปที่ 4.17)



รูปที่ 4.17 ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ที่อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกาต่างๆ

เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เป็น 0.06 และ 0.07 กรัม จะเห็นได้ว่า intensity ของพีคเอกลักษณะและร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 มีค่าลดลงตามลำดับ จากรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07 จะให้ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 สูงสุด คิดเป็นร้อยละ 95.80



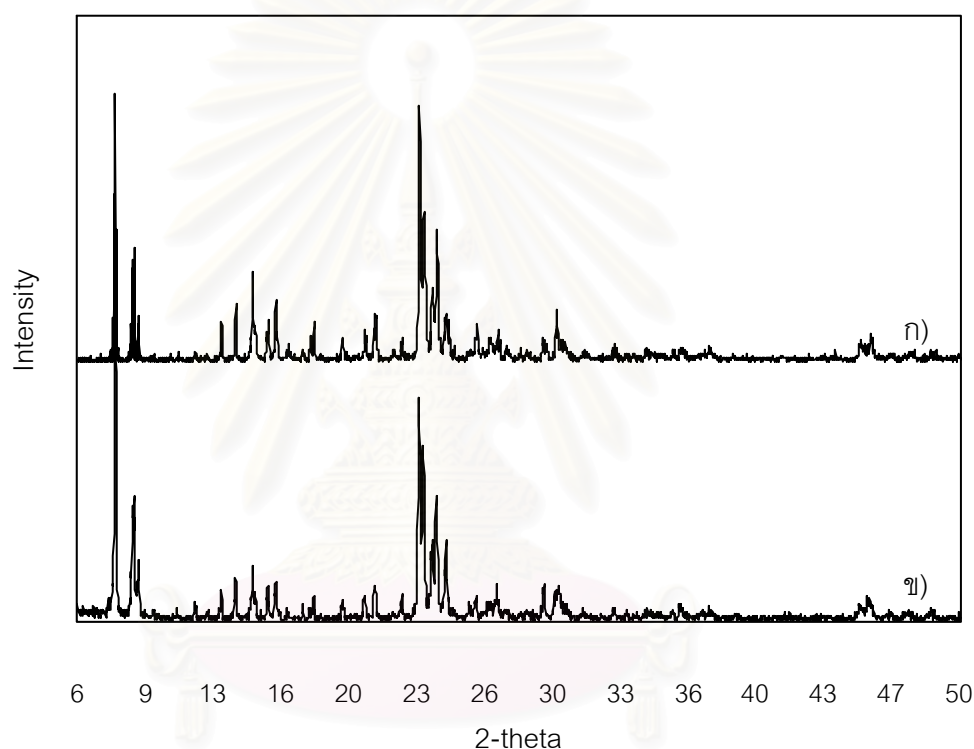
รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ที่อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ ก) 0.04 ข) 0.06 ค) 0.07 ง) 0.09 และ จ) 0.10 กำลังขยาย 20,000 เท่า

ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ แสดงดังรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าลักษณะผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 มีความแตกต่างกันตามปริมาณสารก่อโครงร่างที่ใช้ในการสังเคราะห์ เมื่อใช้อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.04 รูปร่างของผลึกซีโอไลต์ ZSM-5 มีลักษณะไม่สมบูรณ์ เนื่องจากไม่ปรากฏลักษณะเหลี่ยมมุมของผลึกที่ชัดเจน แต่เมื่อทำการเพิ่มปริมาณสารก่อโครงร่าง รูปร่างลักษณะของผลึกมีความสมบูรณ์และมีความเป็นเหลี่ยมมุมมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามหากทำการเพิ่มปริมาณสารก่อโครงร่างมากเกินไป พบว่าผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ มีขนาดใหญ่ขึ้น [Scott และคณะ, 2003] แต่ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของขนาดผลึกไม่ได้เป็นไปในลักษณะผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 เนื่องจากร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 (รูปที่ 4.17) มีค่าลดลง ดังนั้นอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกาที่เหมาะสม คือ 0.07 เนื่องจากให้ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 สูงสุด และให้การกระจายตัวของขนาดผลึกที่สม่ำเสมอ และมีขนาดผลึกที่ค่อนข้างเล็ก

จากการทดลองนี้สรุปได้ว่าภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ คือ ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลด เท่ากับ 100 ภายใต้ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และใช้เตตระโพรพิล-แอมโมเนียมโบรไมด์เป็นสารก่อโครงร่างโดยมีอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07 และมีค่าความเป็นกรด-เบสของเจลด เท่ากับ 10 ± 1 และหมุนเครื่องปฏิกรณ์ที่ความเร็ว 15 รอบต่อนาที ซึ่งที่ภาวะดังกล่าวสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ได้มากถึงร้อยละ 95.80

4.4 การเปรียบเทียบสมบัติของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติกับซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้า

ในการเปรียบเทียบสมบัติของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติกับซีโอไลต์เกรดทางการค้านั้น ทำการเปรียบเทียบในส่วนของรูปแบบ XRD ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ตลอดจนพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ ZSM-5 ทั้งสองประเภท โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer เห็นได้ว่ารูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติและรูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14.19



รูปที่ 4.19 รูปแบบ XRD ของ ก) ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ และ ข) ซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้า

จากรูปที่ 14.19 เห็นได้ว่ารูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติและซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้า มีรูปแบบ XRD ที่คล้ายคลึงกัน โดยอาจมีความแตกต่างกันในส่วน of intensity ที่ตำแหน่งพีกเอกลักษณ์ต่างๆ โดย intensity ของตำแหน่งพีกเอกลักษณ์ในช่วง 2-theta เท่ากับ 8 – 9 และ 23 – 25 ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาตินั้นมีค่าต่ำกว่า intensity ในช่วง 2-theta ดังกล่าวของซีโอไลต์เกรดทางการค้าเล็กน้อย เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาว

ธรรมชาติกับร้อยละโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้า พบว่าได้ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 เท่ากับ 95.80

ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการที่ดินขาวนั้นเป็นวัตถุดิบทางธรรมชาติ ซึ่งมีสิ่งเจือปนต่างๆปะปนอยู่ในขณะที่ซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้านั้นสังเคราะห์จากวัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นสารเคมีบริสุทธิ์โดยตรง ถึงแม้ว่าดินขาวธรรมชาติจะผ่านขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการทางความร้อน กระบวนการทางกายภาพ หรือแม้แต่กระบวนการทางเคมี ก็ไม่สามารถกำจัดสิ่งเจือปนดังกล่าวออกจากดินขาวได้หมด สิ่งเจือปนดังกล่าวซึ่งเปรียบเสมือนตัวกีดขวางการเกิดผลึกของซีโอไลต์ ZSM-5 ส่งผลให้ไม่สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่บริสุทธิ์ได้

ภายหลังซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ซึ่งอยู่ในรูปของ Na-ZSM-5 ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนกับสารละลายแอมโมเนียมไนเตรต ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างโปรตอนในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรตกับไฮโดรเจนไอออนในโครงสร้างของซีโอไลต์ ได้เป็น HZSM-5 ที่มีตำแหน่งว่างไว้เป็นตำแหน่งกรด และส่งผลให้มีความว่างไวต่อการทำปฏิกิริยามากยิ่งขึ้น พบว่าสมบัติของซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้า แสดงได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติของซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ และซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้า

สมบัติ	ซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้า	ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้
BET surface area (m ² /g) ^ก	337.91	389.20
Average particle size (µm) ^ข	1.0	0.75

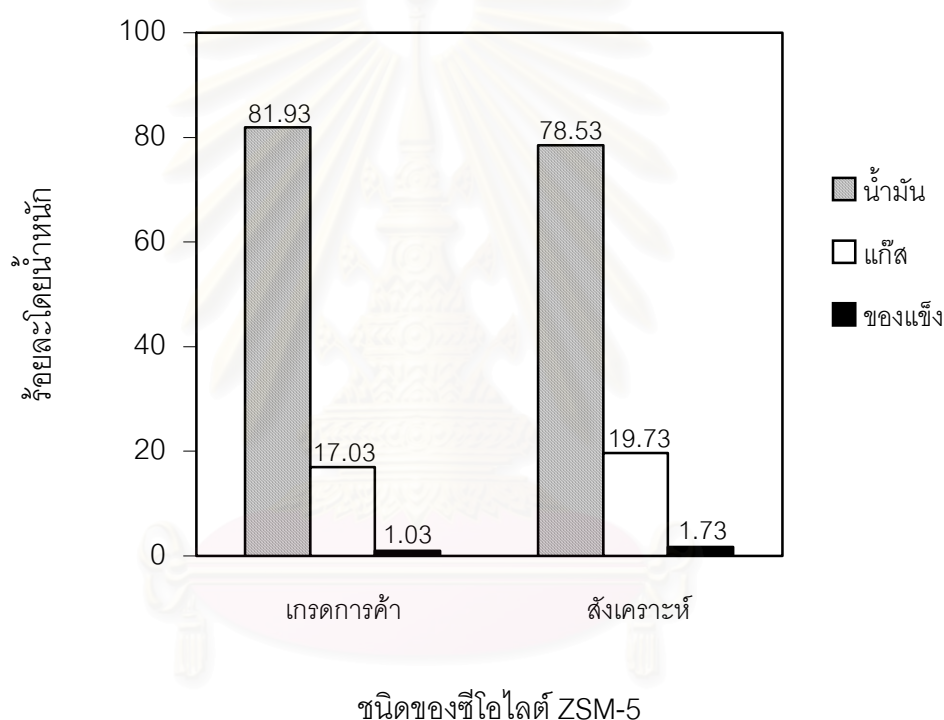
หมายเหตุ ก วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน

ข เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป

จากตารางที่ 4.4 เห็นได้ว่าซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ มีสมบัติที่ใกล้เคียงกับซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้า แต่มีขนาดของอนุภาคเฉลี่ย (average particle size) ที่เล็กกว่า ส่งผลให้พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface area) ของซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติมีค่ามากกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้าเล็กน้อย และด้วยสมบัติที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์จากดินขาวธรรมชาติอีกด้วย

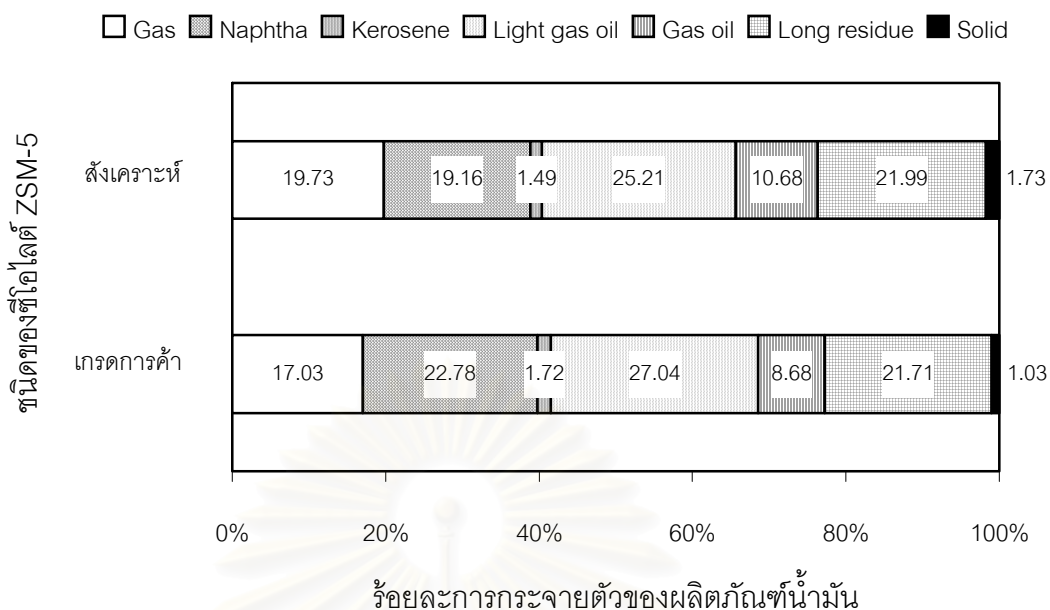
4.5 การนำซีโอไลต์ ZSM-5 ไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว

การนำซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติไปประยุกต์ใช้นั้น ในงานวิจัยศึกษาการนำไปใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มดิบไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ที่ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ น้ำมันปาล์มดิบ 30 กรัม และตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยากับกรณีที่ใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้า ภายใต้ภาวะในการทดลองเดียวกัน



รูปที่ 4.20 ผลของชนิดซีโอไลต์ HZSM-5 ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม



รูปที่ 4.21 ผลของชนิดซีโอไลต์ HZSM-5 ต่อร้อยละการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น 10 บาร์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา HZSM-5 0.05 กรัม

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงผลของชนิดซีโอไลต์ HZSM-5 ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว จากการใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้าและซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ พบว่ากรณีที่ใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันถึงร้อยละ 81.93 แก๊สร้อยละ 17.03 ของแข็งร้อยละ 1.03 และจากรูปที่ 4.21 แสดงผลของชนิดซีโอไลต์ HZSM-5 ต่อร้อยละการกระจายตัวของสัดส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมัน (product distribution) โดยน้ำหนัก ได้ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นแนฟทา 22.78 เคโรซีน 1.72 แก๊สออยล์เบา 27.04 แก๊สออยล์ 8.68 และกากน้ำมันหนัก 21.71 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ขณะที่กรณีที่ใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ได้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 78.53 แก๊สร้อยละ 19.73 ของแข็งร้อยละ 1.73 และได้ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันเป็นแนฟทา 19.16 เคโรซีน 1.49 แก๊สออยล์เบา 25.21 แก๊สออยล์ 10.68 และกากน้ำมันหนัก 21.99 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

เห็นได้ว่าเมื่อใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงกว่าการใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้เล็กน้อย และให้ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์น้ำมันส่วนที่เป็นแนฟทา เคโรซีน และแก๊สออยล์เบาที่มากกว่า นอกจากนี้

ยังให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ในส่วนที่เป็นแก๊สและของแข็งซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ส่วนที่ไม่ต้องการที่น้อยกว่าอีกด้วย จากงานวิจัยของ Coatas และคณะ (1999) พบว่าขนาดอนุภาคของซีโอไลต์ HZSM-5 มีผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ตลอดจนองค์ประกอบของแก๊สและแก๊สไลน์ โดยขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เล็กกว่าจะให้ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นแก๊สมากกว่าการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ ดังนั้นการที่ร้อยละของผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นแก๊สในปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวในกรณีที่ใช้ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติสูงกว่าในกรณีที่ใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้าเล็กน้อย

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Nor และคณะ (2001) ได้ศึกษาถึงผลของอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของซีโอไลต์ HZSM-5 ต่อการเปลี่ยนน้ำมันปาล์มดิบให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว พบว่าอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำๆ จะให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์น้ำมันส่วนที่เป็นแก๊สไลน์ที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่สูงกว่า เนื่องจากซีโอไลต์ HZSM-5 ที่มีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาสูงๆ มีตำแหน่งกรดที่ว่องไว (active acid site) ในการทำปฏิกิริยาที่น้อยกว่า ส่งผลให้การแตกพันธะของสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนสายยาวนั้นเป็นไปได้ยาก ในงานวิจัยนี้ก็เช่นเดียวกันเนื่องจากอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่แตกต่างกัน โดยซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาตินั้นมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100 แต่ซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้ามีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเพียง 23.3 ดังนั้นร้อยละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้ในส่วนของเนฟทาและเคโรซีนเมื่อใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จึงสูงกว่าในกรณีของการใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์จากดินขาวธรรมชาติ แต่ทั้งนี้ความแตกต่างในส่วนของร้อยละผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นเพียงส่วนเล็กน้อยเท่านั้น แสดงว่าซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์จากดินขาวธรรมชาตินั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำมันปาล์มดิบได้จริง ดังนั้นในการนำซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติไปใช้นั้นควรทำการปรับลดอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาให้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การตรวจสอบลักษณะสมบัติของดินขาว

ดินขาวที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นดินขาวที่มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิกาและอะลูมินา โดยมีร้อยละโดยน้ำหนักของซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบค่อนข้างสูง และมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 6.20 โดยน้ำหนัก แต่ทั้งนี้ซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่อยู่นั้นอยู่ในรูปของควอร์ตซ์ซึ่งมีความเสถียรสูง นอกจากนี้ยังมีสิ่งเจือปนต่างๆ อันได้แก่ โฟแทสเซียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ปะปนอยู่

5.1.2 การปรับปรุงคุณภาพของดินขาวเบื้องต้น

การปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการต่างๆ นั้น นับว่ามีประโยชน์และวัตถุประสงค์ที่แตกต่างต่างกันไป ในงานวิจัยนี้ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วยกระบวนการต่างๆ 3 กระบวนการ คือ

กระบวนการทางความร้อน โดยทำการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

กระบวนการทางกายภาพ โดยทำการบดและคัดแยกอนุภาคของดินขาวด้วยตะแกรงร่อนขนาด 325 เมส

กระบวนการทางเคมี โดยรีฟลักซ์ดินขาวด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้น 1 โมลต่อลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทำการแอลคาไลน์ฟิวชันกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อแตกอนุภาคของควอร์ตซ์

ภายหลังกระบวนการปรับปรุงคุณภาพสามารถลดปริมาณสิ่งเจือปนต่างๆ ในดินขาวได้ ส่งผลให้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของซิลิกาต่ออะลูมินาเพิ่มขึ้นเป็น 7.30 นอกจากนี้ยังสามารถแตกอนุภาคของควอร์ตซ์ในดินขาวได้ถึงร้อยละ 96

5.1.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ

จากการศึกษาพบว่าสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ โดยใช้ดินขาวเป็นทั้งแหล่งซิลิกาและอะลูมินาได้

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 ประกอบด้วย อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลในช่วง 20 – 200 ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลตั้งแต่ 4 – 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 – 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกาในช่วง 0.04 – 0.10 โดยได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ คือ

อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100

ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 24 ชั่วโมง

อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล เท่ากับ 170 องศาเซลเซียส

อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07

ที่ภาวะดังกล่าวให้ร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 สูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 95.80

5.1.4 สมบัติของซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้

ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคค่อนข้างเล็ก โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 0.75 ไมครอน และมีพื้นที่ผิวจำเพาะ เท่ากับ 389.20 ตารางเมตรต่อกรัม

5.1.5 การแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มดิบไปเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ภาวะการทดลองที่ใช้ในการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันปาล์มดิบไปเป็นเชื้อเพลิงเหลว คือ

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา	430	องศาเซลเซียส
เวลาในการทำปฏิกิริยา	30	นาที
ความดันแก๊สไฮโดรเจนเริ่มต้น	10	บาร์
ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา	0.05	กรัม

ที่ภาวะดังกล่าวให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 78.53 ร้อยละผลได้ของแก๊ส 19.73 ร้อยละผลได้ของของแข็ง 1.73 โดยน้ำหนัก องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีปริมาณร้อยละผลได้ของเนฟทา 19.16 เคโรซีน 1.49 แก๊สออกยลเบา 25.21 แก๊สออกยล 10.68 และกาน้ำมันหนัก 21.99 โดยน้ำหนัก ซึ่งใกล้เคียงกับการใช้ซีโอไลต์ HZSM-5 เกรดทางการค้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นซีโอไลต์ HZSM-5 ที่สังเคราะห์จากดินขาวธรรมชาติสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และเชิงพาณิชย์สำหรับการผลิตซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ ZSM-5 เกรดทางการค้า

5.2.2 ควรเลือกใช้ดินขาวจากหลายๆ แหล่งในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 เนื่องจากดินขาวจากแต่ละแหล่งมีสมบัติและปริมาณสิ่งเจือปนที่แตกต่างกันไป อาจส่งผลให้สามารถลดกระบวนการในการปรับปรุงคุณภาพของดินขาว ตลอดจนลดการใช้สารเคมีและระยะเวลาในขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวได้

5.2.3 เนื่องจากซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์จากดินขาวธรรมชาติมีอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเหมาะสำหรับการเร่งปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน และแอลคิลเลชัน เป็นต้น ดังนั้นก่อนนำใช้งานจริงควรทำการศึกษาสมบัติของซีโอไลต์ไม่ว่าจะเป็นอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา และขนาดอนุภาคของซีโอไลต์ เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานในด้านนั้นๆ ทั้งยังอาจลดการใช้สารเคมี และลดความรุนแรงของภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม. แร่. พิมพ์ครั้งที่ 3 พระนคร : ศรีเมืองการพิมพ์, 2526
จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยา : พื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ :
โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.

จินตนา สุมารินทร์. การแตกตัวด้วยไฮโดรเจนของน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก/
ถ่านกัมมันต์โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมี
เทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

จำรัส ลิ้มตระกูล. เคมีของซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์ของสมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย
ไทยฯ. 51, 6 (2540) : 420 – 423.

ธีระพงษ์ นามโท. การผลิตซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากถ่านล่อยถ่านหินลิกไนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2542.

ปราโมทย์ ไซยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์สุนทรออฟเซต, 2537.

พรรณนีย์ วิชชาชู. น้ำมันปาล์มกับไบโอดีเซล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : www.doa.go.th. [2550,
มิถุนายน 13]

มลฤดี เซาว์รัตน์. เอสเทอร์ฟิเคชันของกรดไขมันอิสระในรำข้าวและไฮโดรไลซิสน้ำมันรำข้าว.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2540.

มารีนา มงคล. การแตกตัวของน้ำมันพืชใช้แล้วเป็นเชื้อเพลิงเหลวโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบน
ถ่านกัมมันต์และHZSM-5. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิต-
วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

วิทยา เรืองพรพิสุทธ์. คะตะไลซิสแบบเฮเทอโรโรจีเนียส หลักทฤษฎี & การประยุกต์. กรุงเทพฯ :
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534.

ศุนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. วิชาการปาล์มน้ำมัน : การแปรรูปปาล์มน้ำมัน. 2550.
[ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.doa.go.th/>. [2550, มีนาคม 27].

สิรินทร์รักษ์ จำปาน้อย. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเพอร์ไลต์และแคลบ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
2547.

อมลวรรณ พิเศษสุวรรณิช และวิชัย สัจจพรปทานสกุล. กลไกของการปรับปรุงคุณภาพของดินขาวด้วย
กลวิธีโพลีเมอไรเซชัน. วิศวกรรมสาร มช. 33, 6 (2549) : 675 – 690.

อายุวัฒน์ สว่างผล. วัตถุดิบที่ใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมเซรามิกส์. ภาควิชาหัตถศึกษาและ
หัตถกรรมศิลป์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏกำแพงเพชร พิมพ์ครั้งที่ 1,
2543.

ภาษาอังกฤษ

Bhatia, S. Zeolite Catalysis : Principles and Applications. Boca Raton, Florida : CRC
Press, 1990.

Bond, B.C. Heterogeneous Catalysis Principles and Applications. 2nd ed. Oxford:
Clarendon Press, 1987.

Breck, D.W., W.G. Eversole and R.M. Milton. New synthetic crystalline zeolites. Amer.
Chem. Soc. 28 (1956) : 2338-2339.

Breck, D.W. Zeolite Molecular Sieves : Structure, Chemistry and Use. New York : John
Wiley & Sons. 1974.

Brisdon, B., Ali, M. A. and W. J. Thomas. Synthesis, characterization and catalytic
activity of ZSM-5 zeolites having variable silicon-to-aluminum ratios. Applied
Catalysis A: General. 252 (2003): 149-162.

Charles N., Satterfield. Heterogeneous Catalysis in Practice. New York: McGraw-Hill
Book, 1980.

Charles N.S. Chemical Engineering Series Heterogeneous Catalyst in Practice.
New York : McGraw-Hill, 1996.

Costas, S.T., Nicholaos, P.E., Lori, N., and Iakovos A.V. Performance of ZSM-5 as a Fluid
Catalytic Cracking Catalyst Additive: Effect of the Total Number of Acid Sites and
Particle Size. Ind. Eng. Chem. Res. 38 (1999) : 916-927.

Dong, K. and Hun, S. Synthesis and characterization of ZSM-5 zeolite from serpentine.
Applied Clay Science. 24 (2003) : 69-77.

Dyer, A. An Introduction to Zeolite Molecular Sieves. New York : John Wiley & Sons,
1988.

- Eva, M., Ray, L.F., Janos, K., and Erzsebet, H. The effect of quartz content on the mechanochemical activation of kaolinite. Journal of Colloid and Interface Science. 244 (2001) : 359-364.
- J.V. Smith. 1976. Zeolite Chemistry and Catalysis. J.A. Rabo Ed. ACS Monograph 171.
- Kim, W.J., Lee, M.C. and D.T. Hayhurst. Synthesis of ZSM-5 at low Temperature and atmospheric Pressure in a Pilot-Scale Batch Reactor. Microporous and Mesoporous Materials. 26 (1998) : 133-14.
- Kokotailo, G.T., S.L. Lawton and D.H. Olson. Structure of synthetic zeolite ZSM-5. Nature. 272 (1978) : 437-438.
- Lima, D.G., Soares, V. C.D., Ribeiro, E.B., Carvalho, D.A., Cardoso, É.C.V., Rassi F.C., Mundima, K.C., Rubima, J.C., and Suarez, P. A.Z. Diesel-like fuel obtained by Pyrolysis of vegetable oils. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 71 (2004) : 987-996.
- M.M.J. Treacy, and J.B. Higgins. Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites. Published on behalf of the Structure Commission of the International Zeolite Association. 4th ed. Elsevier, 2001.
- M. Lenarda, L. Storaro, A. Talon, E. Moretti, and P. Riello. Solid acid catalysts from clays: Preparation of mesoporous catalysts by chemical activation of metakaolin under acid conditions. Journal of Colloid and Interface Science. 331 (2007) : 537-543.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriott, P. Unit Operations of Chemical Engineering. 5th ed. Singapore: Mcgraw-Hill, 1993.
- Nádia R.C.F.M., and Denise M.M.M. Synthesis of Na-A and -X zeolites from oil shale ash. Fuel. 84 (2005) : 2289-2294.
- Nor, A.S.A., and Farizul, H.K. The effect of different SiO₂/Al₂O₃ ratios of HZSM-5 on the conversion of palm oil to liquid fuels. 15th Symposium of Malaysian Chemical Engineerings SOMChE. Malaysia. 2001.
- Ooi, Y.S., Twaiq, F., Zakaria, R., Mohamed A.R., and Bhatia, S. Biofuel Production from Catalytic Cracking of Palm Oil. Energy Sources. 25 (2003) : 859-869.
- Ooi, Y.S., Twaiq, F., Zakaria, R., Mohamed A.R., and Bhatia, S. Catalytic conversion of palm oil-based fatty acid mixture to liquid fuel. Biomass and Bioenergy. Vol. 27 (2004) : 447-484.

- Ping, W., Baojian, S., Dongdong, S., Tong, P., and Jinsen G. Synthesis of ZSM-5 zeolite from expanded perlite/kaolin and its catalytic performance for FCC naphtha aromatization. Catalysis Communications. 8 (2006) : 1452–1456
- Rawtani, A.V., M.S. Rao and K.V.G.K. Gokhale. Synthesis of ZSM-5 zeolite using silica from rice husk ash. Ind. Eng. Chem. Res. 28 (1989) : 1411-1414.
- R.M. Barre. Zeolite Structures. Proceeding of the 5th International Conference on Zeolites. Naples, 1986.
- Satterfield, C. N. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. New York : McGraw-Hill Inc., 1991.
- Scott, M. A., Kathleen, A. C., and Prabir, K. D. 2003. Handbook of zeolite science and technology. New York : M. Dekker : 21-59.
- Szostak R. Molecular sieves principles of synthesis and identification. New York : Van Nostrand Reinhold, 1989.
- Wei, Z., Shi-Yu, Z., Xiang-Ying, H., Hao, G., and Cui, Z. MFI-type boroaluminosilicate : A comparative study between the direct synthesis and the templating method. Journal of Solid State Chemistry. 179 (2006) : 855-865.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณปริมาตรสารละลายโซเดียมซัลไฟด์เพื่อปรับอัตราส่วนของซัลไฟด์ต่ออะลูมินาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ

การหาปริมาตรของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์เพื่อปรับอัตราส่วนของซัลไฟด์ต่ออะลูมินาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ ต้องทราบถึงองค์ประกอบของซัลไฟด์และอะลูมินาของดินขาวธรรมชาติ และองค์ประกอบของซัลไฟด์ที่ผสมอยู่ในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ รวมถึงมวลโมเลกุลของซัลไฟด์และอะลูมินา ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

องค์ประกอบของซัลไฟด์ในดินขาว	82.67	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)
องค์ประกอบของอะลูมินาดินขาว	11.31	(ร้อยละโดยน้ำหนัก)
องค์ประกอบของซัลไฟด์	27.00	(ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์)
มวลโมเลกุลของซัลไฟด์	60.09	
มวลโมเลกุลของอะลูมินา	101.96	

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ กำหนดให้อัตราส่วนของซัลไฟด์ต่ออะลูมินาที่ใช้เป็นอัตราส่วนโดยโมล

ตัวอย่างการคำนวณ

หาปริมาตรสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่ต้องเติมลงไปเพื่อปรับอัตราส่วนของซัลไฟด์ต่ออะลูมินาให้เท่ากับ 100 ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติปริมาณ 1 กรัม

กำหนดให้ปริมาตรสารละลายโซเดียมซัลไฟด์เท่ากับ X ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\text{โมลของซัลไฟด์ในดินขาว} = \frac{0.8267}{60.09} = 0.0138 \text{ โมล}$$

$$\text{โมลของอะลูมินาในดินขาว} = \frac{0.1131}{101.96} = 0.0011 \text{ โมล}$$

$$\begin{aligned} \text{โมลของซัลไฟด์ในสารละลายโซเดียมซัลไฟด์} &= \frac{27}{60.09} \\ &= 0.0045 \text{ โมล/มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 100 ต้องใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ

$$100 = \frac{(0.0138 \times 1) + (0.0045 \times X)}{0.0011 \times 1}$$

$$X = 21.63 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้นต้องเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต ปริมาตร 21.63 มิลลิลิตร เพื่อทำการปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลให้เท่ากับ 100



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

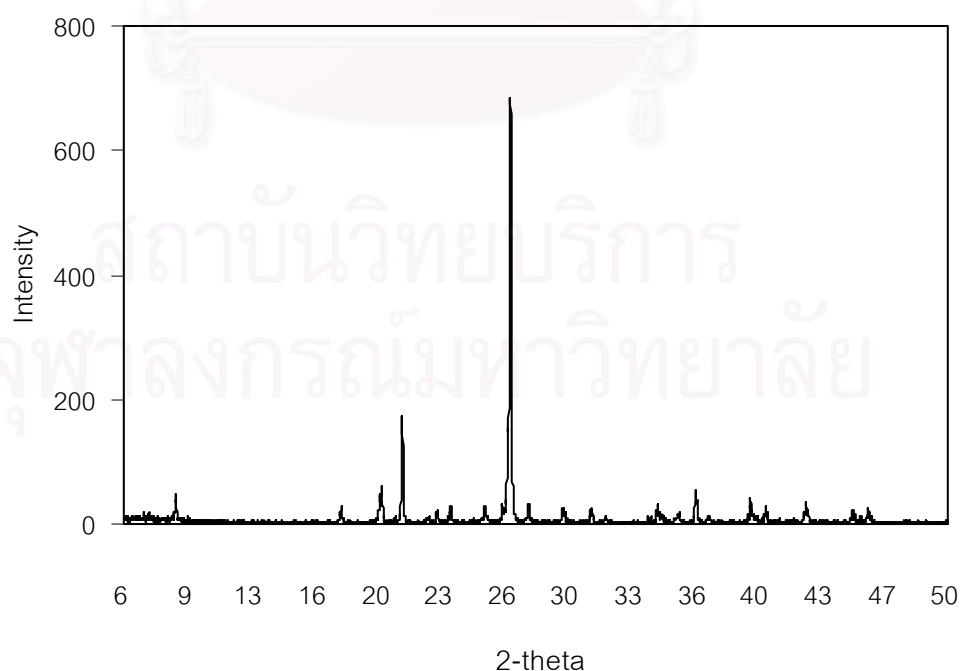
ภาคผนวก ข

การคำนวณหาร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์จากดินขาว

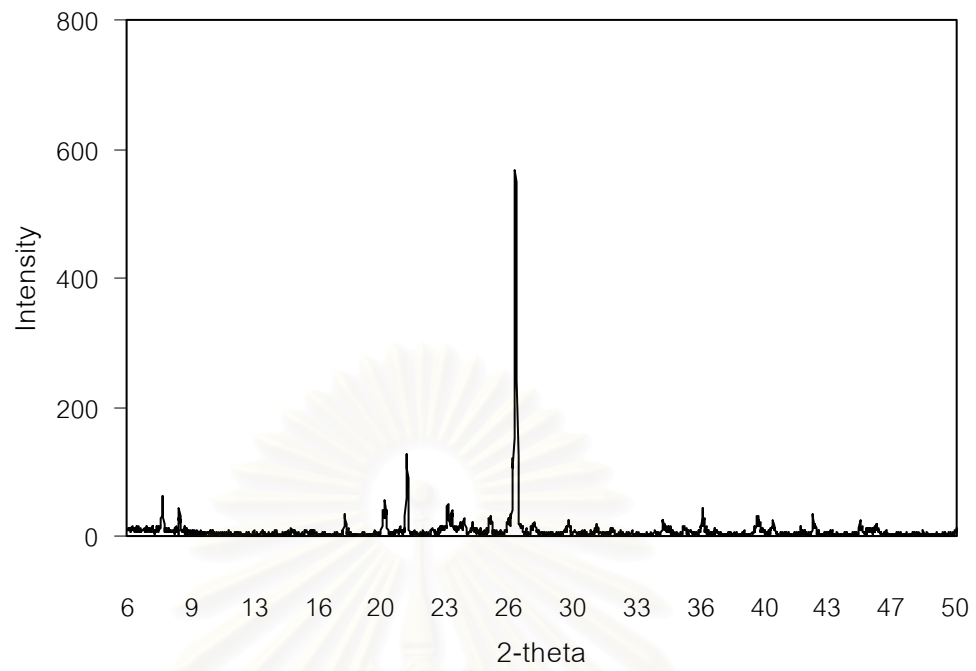
การหาร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์จากดินขาว ซึ่งวิธีการดังกล่าวทำได้ โดยการสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างอัตราส่วนผลมโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ทราบค่าแน่นอนกับค่า intensity ที่ได้จากรูปแบบ XRD โดยมีวัสดุที่ใช้ คือ ซีโอไลต์ ZSM-5 บริสุทธิ์ และดินขาวธรรมชาติ

วิธีการ

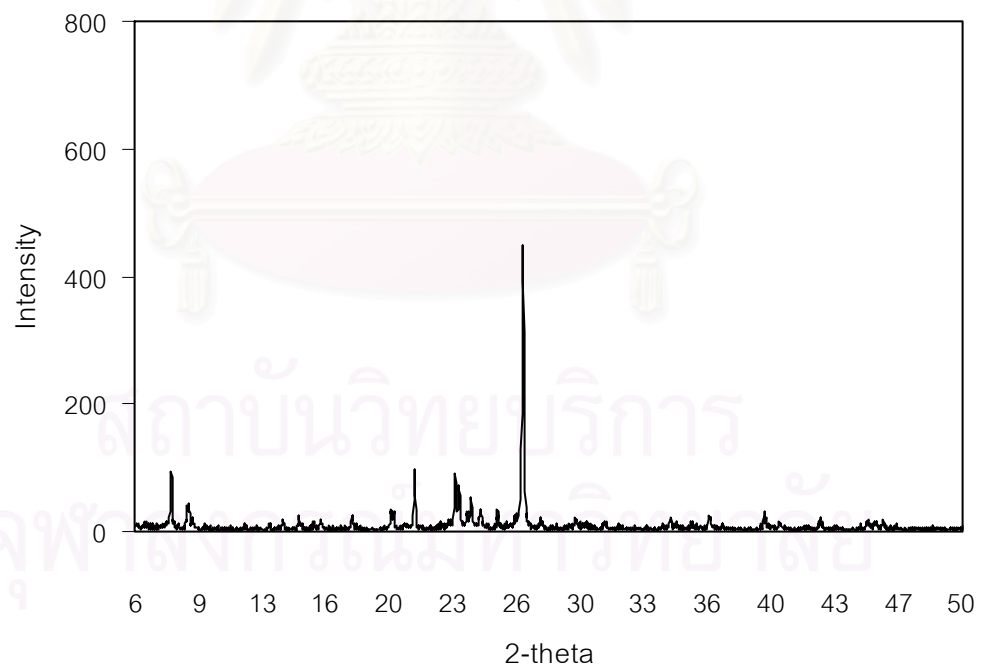
นำซีโอไลต์ ZSM-5 บริสุทธิ์ มาผสมกับดินขาวธรรมชาติที่ร้อยละอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซีโอไลต์เท่ากับ 20 40 60 80 และ 100 ตามลำดับ ผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน เช่นที่ร้อยละอัตราส่วนโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5 เท่ากับ 60 ต้องใช้ซีโอไลต์ 1.2 กรัม ผสมกับทรายมาตรฐาน 0.8 กรัม เป็นต้น เหตุที่ใช้ทรายมาตรฐานเป็นส่วนผสม เนื่องจากรูปแบบ XRD มีตำแหน่งพีคเอก-ลักษณะที่ไม่ซ้อนทับกับซีโอไลต์ ZSM-5 จากนั้นจึงนำซีโอไลต์ที่ผสมกับทรายมาตรฐานที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ กันไปวิเคราะห์โดยเครื่อง X-ray Diffraction เพื่อดูรูปแบบ XRD



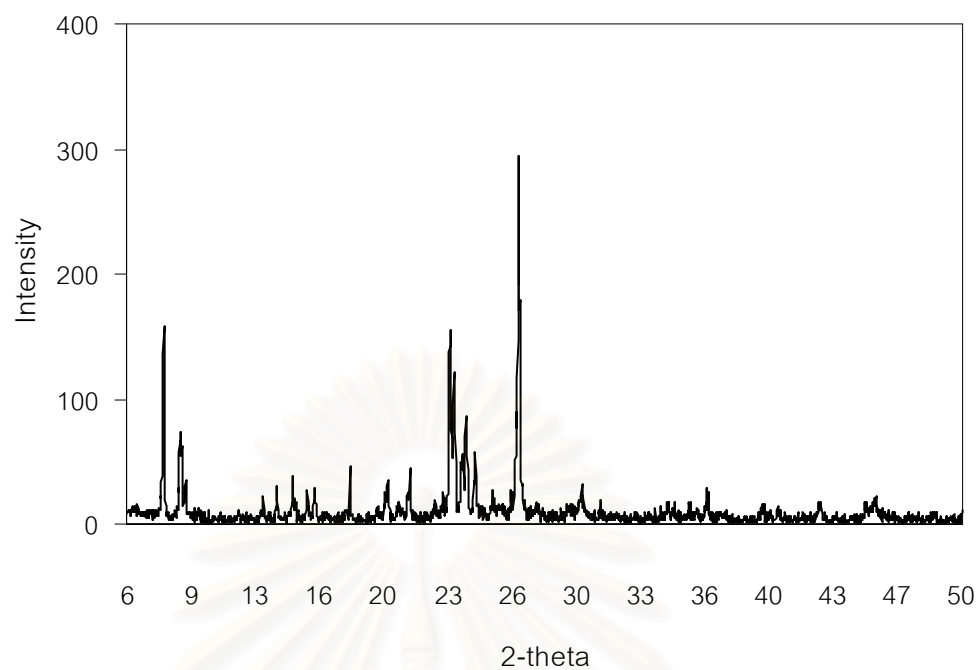
รูป ข1 รูปแบบ XRD ของดินขาวธรรมชาติ



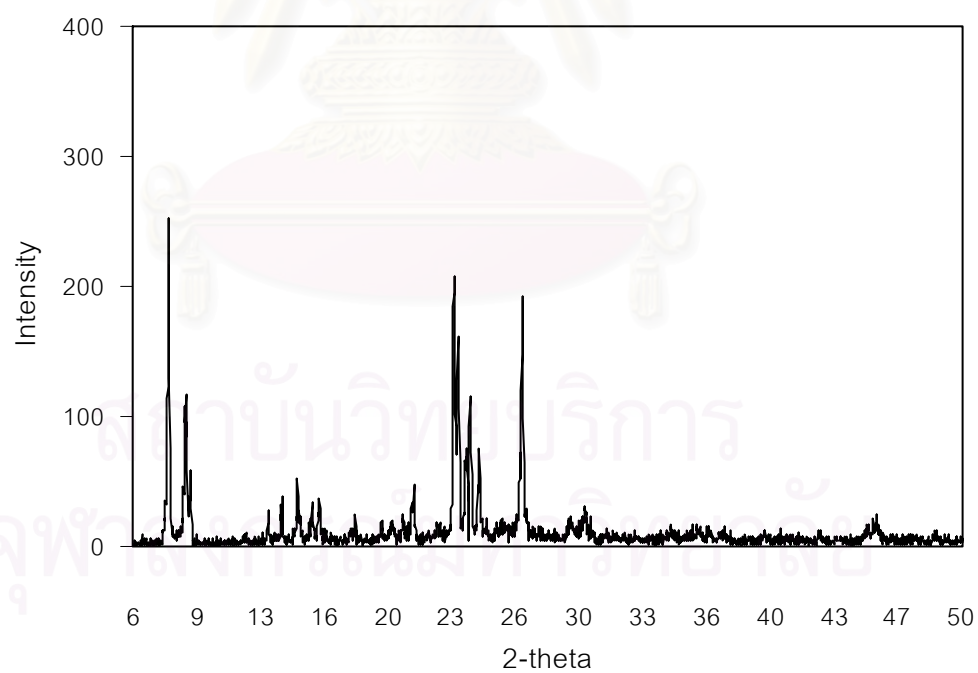
รูป ข2 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



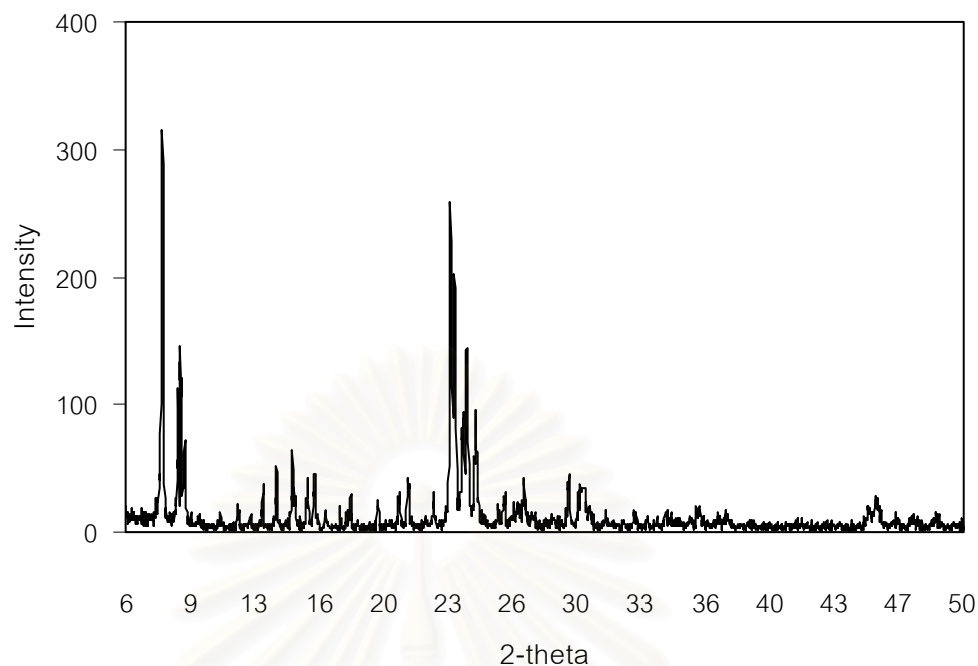
รูป ข3 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



รูป ข4 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก



รูป ข5 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก



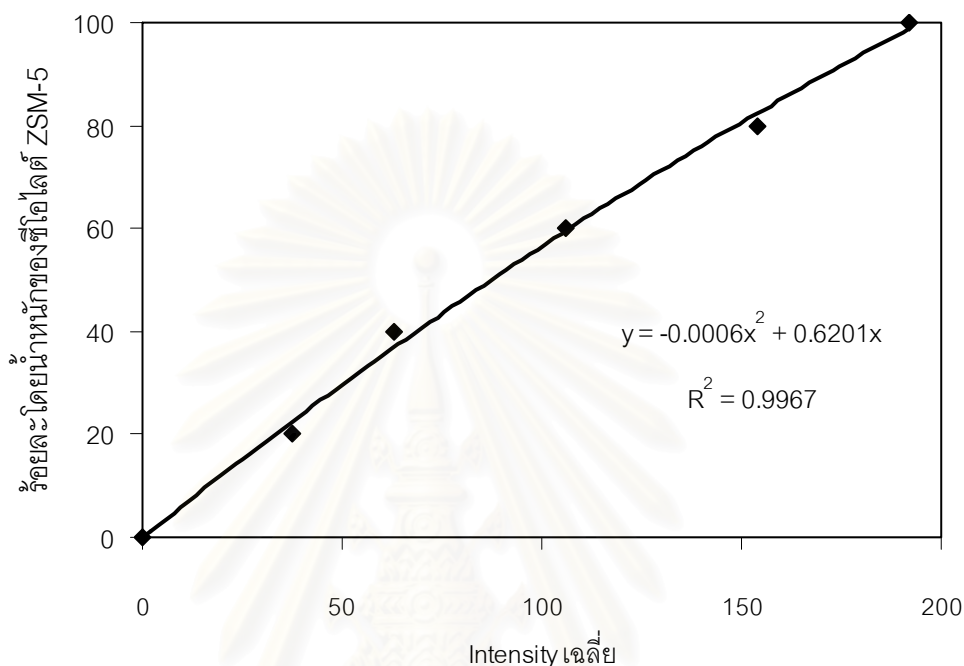
รูป ข6 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก

จากนั้นนำค่า intensity ของรูปแบบ XRD ที่ตำแหน่ง 2-theta ในช่วง 7 – 9 และ 22 – 25 ของรูป ข1 – ข6 ซึ่งแสดงรูปแบบ XRD ซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ กัน มาเฉลี่ย ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ ข1 ซึ่งแสดงค่า intensity เฉลี่ยของรูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ร้อยละอัตราส่วนโดยน้ำหนักต่างๆ กัน

ตารางที่ ข1 ค่า intensity ของพีคเอกลักษณะ ที่ร้อยละโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5 ต่างๆ

ร้อยละโดยน้ำหนัก ของซีโอไลต์ ZSM-5	intensity ช่วง 2-theta = 7-9		intensity ช่วง 2-theta = 22-25			ค่า intensity เฉลี่ย
	ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3	
20	63	54	51	29	21	43.6
40	95	44	91	52	33	63.0
60	158	73	156	87	57	106.2
80	253	177	207	116	76	153.8
100	316	146	259	145	95	192.2

จากตารางที่ ข1 นำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5 กับค่า intensity เฉลี่ยของพีคเอกลักษณ์ พร้อมทั้งสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ของกราฟมาตรฐาน เพื่อสามารถนำค่า intensity เฉลี่ยของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติไปแทนค่า เพื่อหาปริมาณความเป็นผลึกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้



รูป ข7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า intensity เฉลี่ยกับร้อยละโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5

จากกราฟในรูป ข7 จะได้สมการความสัมพันธ์ $y = -0.0006x^2 + 0.621x$

เมื่อ y คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5

x คือ ค่า intensity เฉลี่ย

การคำนวณหาร้อยละผลึกได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ZSM-5 จากดินขาวธรรมชาติ ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 100 ภายใต้ระยะเวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07 ซึ่งสามารถแสดงรูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ดังรูป ค10 สามารถอ่านค่า intensity ของพีคเอกลักษณ์ที่ตำแหน่ง 2-theta ต่างๆ ได้ดังตารางที่ ข2

ตารางที่ ข2 ค่า intensity ของพีคเอกลักษณ์ ที่ตำแหน่งต่างๆ ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่มีอัตราส่วน ซิลิกาต่ออะลูมินา เท่ากับ 100

อัตราส่วนซิลิกา ต่ออะลูมินา	intensity ในช่วง 2-theta = 7-9		intensity ในช่วง 2-theta = 22-25			ค่า intensity เฉลี่ย
	ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 1	ตำแหน่ง 2	ตำแหน่ง 3	
309	133	295	152	56	189	189

จากตารางที่ ข2 นำค่า intensity เฉลี่ยที่ได้ไปแทนที่ x ในสมการแสดงความสัมพันธ์ข้างต้น จะได้ค่า y ซึ่งเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้

$$y = (-0.0006 \times 189^2) + (0.621 \times 189)$$

$$y = 95.77$$

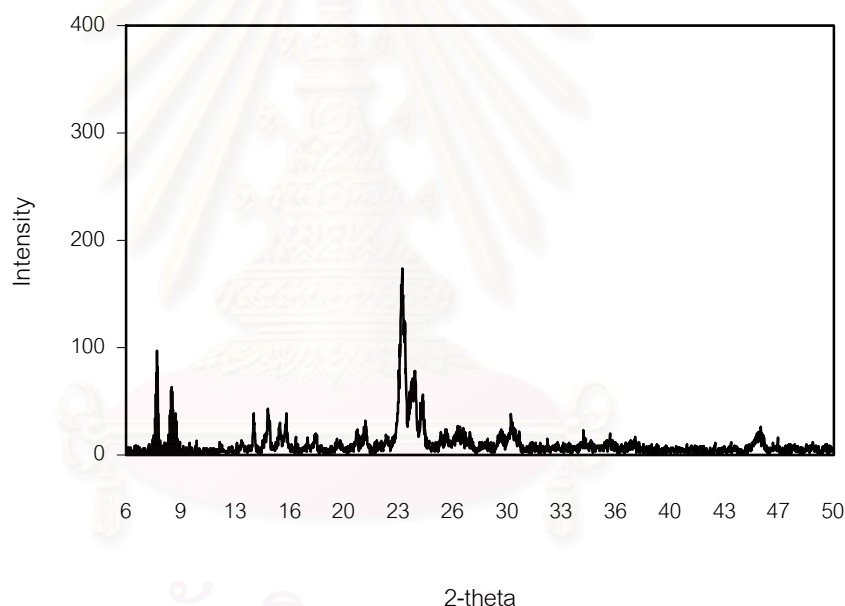
เพราะฉะนั้นร้อยละผลได้ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่ภาวะที่เหมาะสมดังกล่าว คือประมาณ ร้อยละ 95.80

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

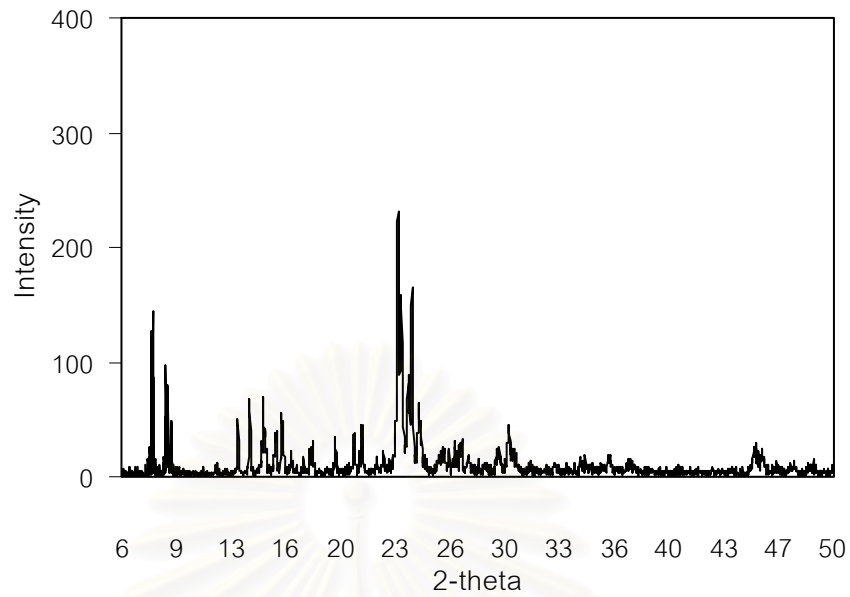
ภาคผนวก ค

รูปแบบ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่ภาวะในการทดลองต่างๆ

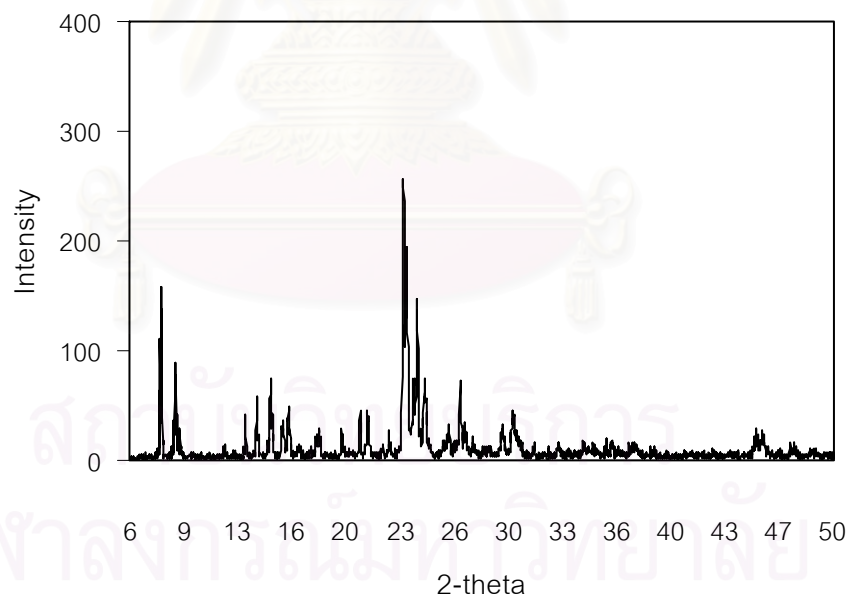
ภาคผนวก ค แสดงรูปแบบ XRD ของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากดินขาวธรรมชาติ ที่ภาวะต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ปริมาณสารก่อโครงร่าง เวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล ที่ค่าความเป็นกรด-เบสของเจลคงที่ในช่วง 10-11 โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง X-ray Diffractometer ปรากฏรูปแบบ XRD ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้



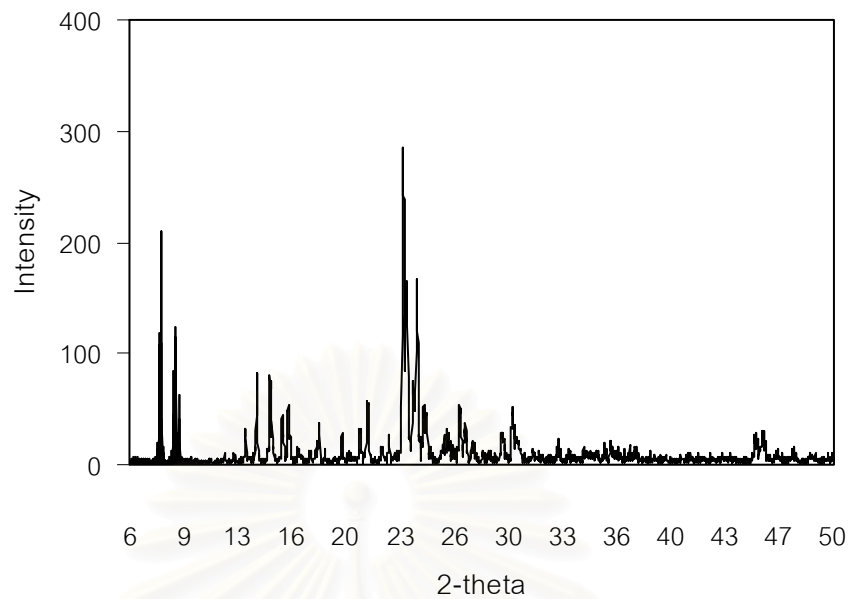
รูป ค1 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 20 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



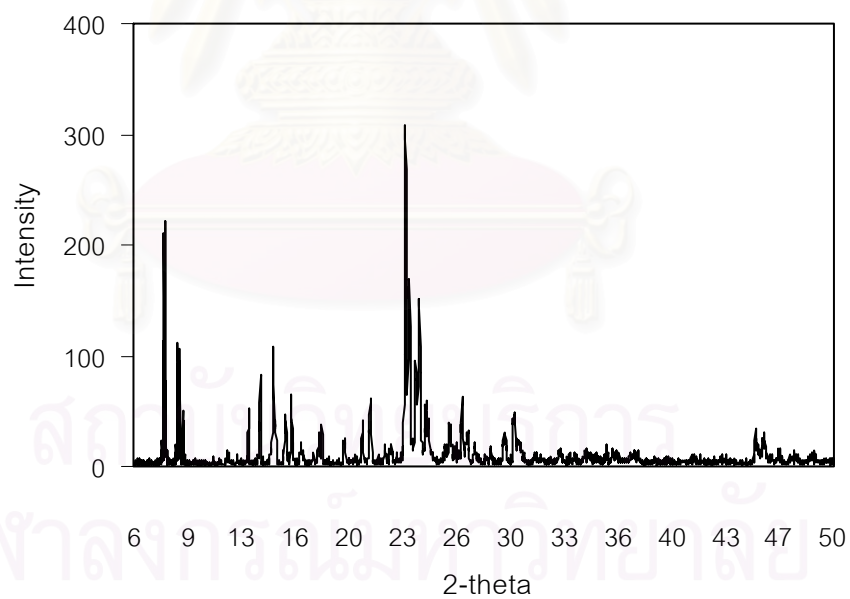
รูป ค2 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลเท่ากับ 40 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



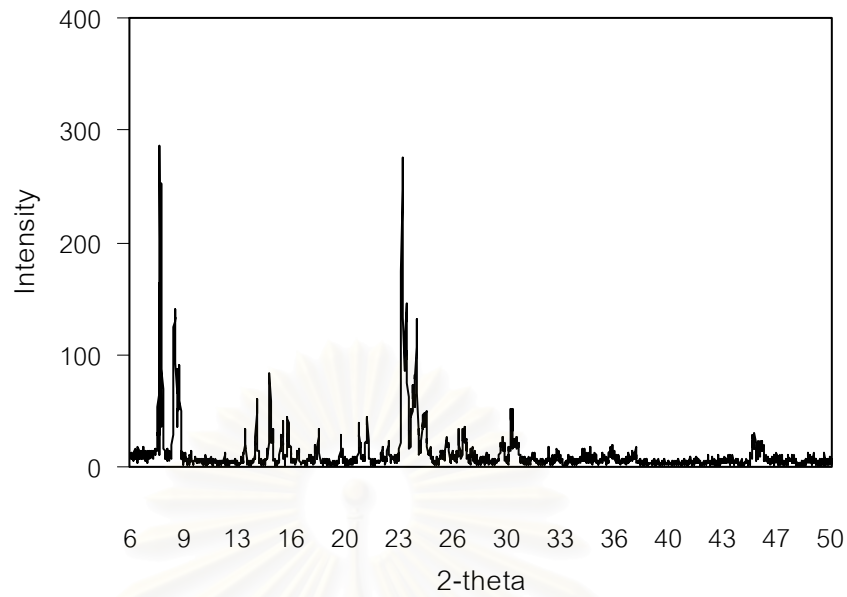
รูป ค3 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลเท่ากับ 60 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



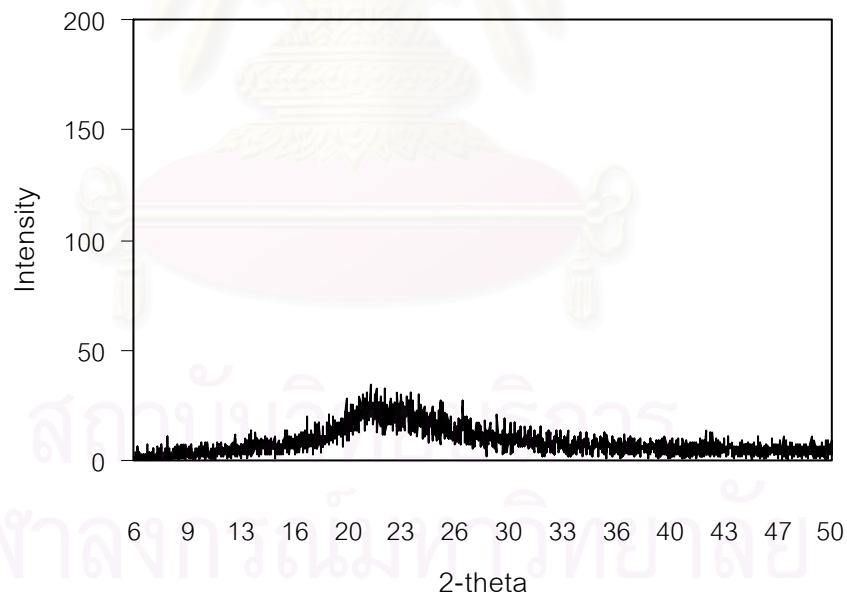
รูป ค4 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลเท่ากับ 80 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



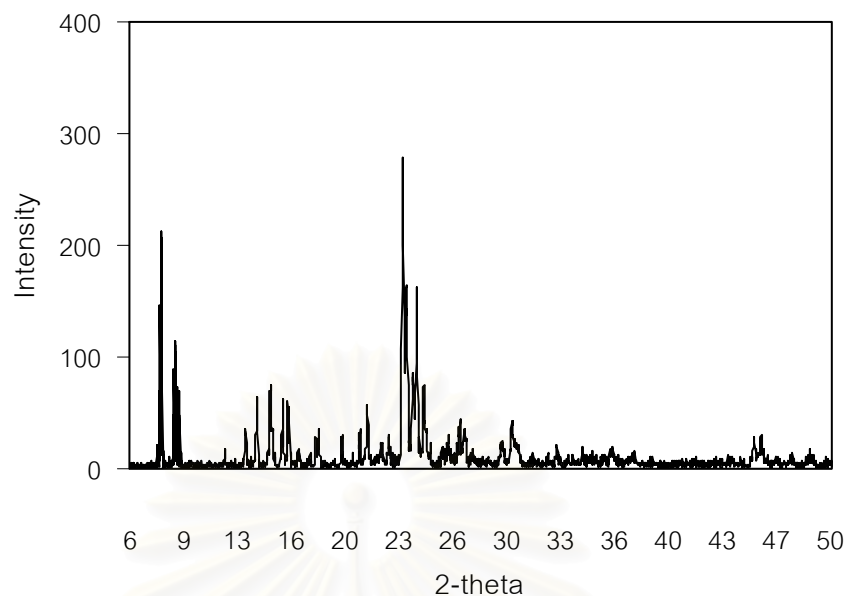
รูป ค5 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลเท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



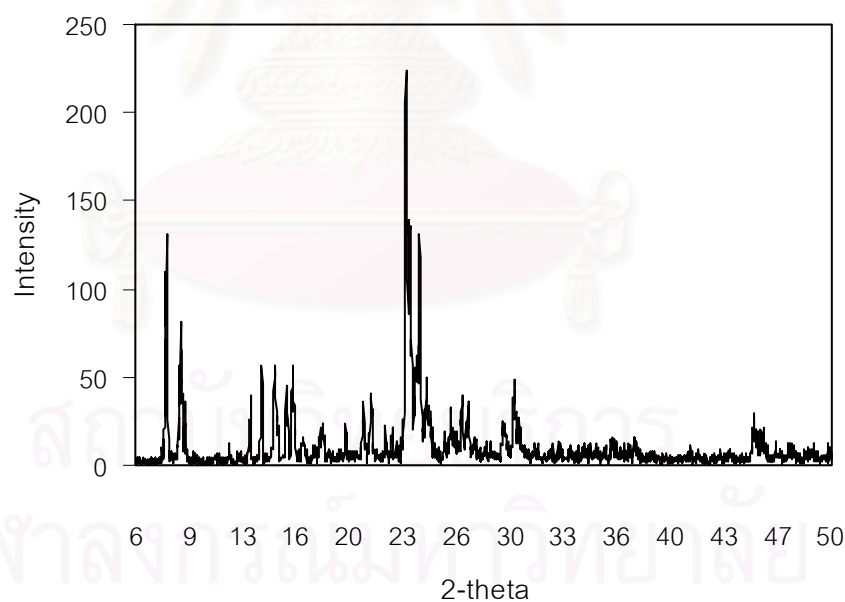
รูป ค6 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลเท่ากับ 200 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



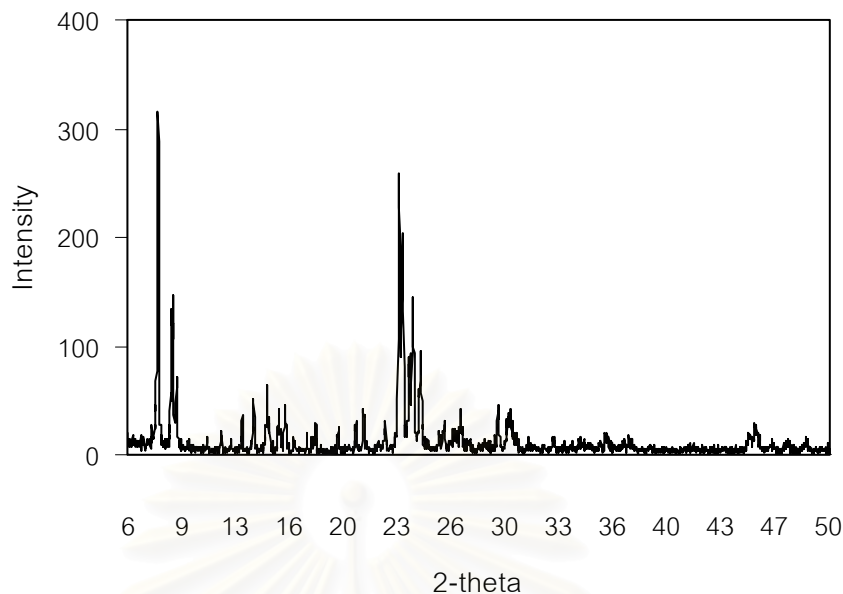
รูป ค7 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลเท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 4 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



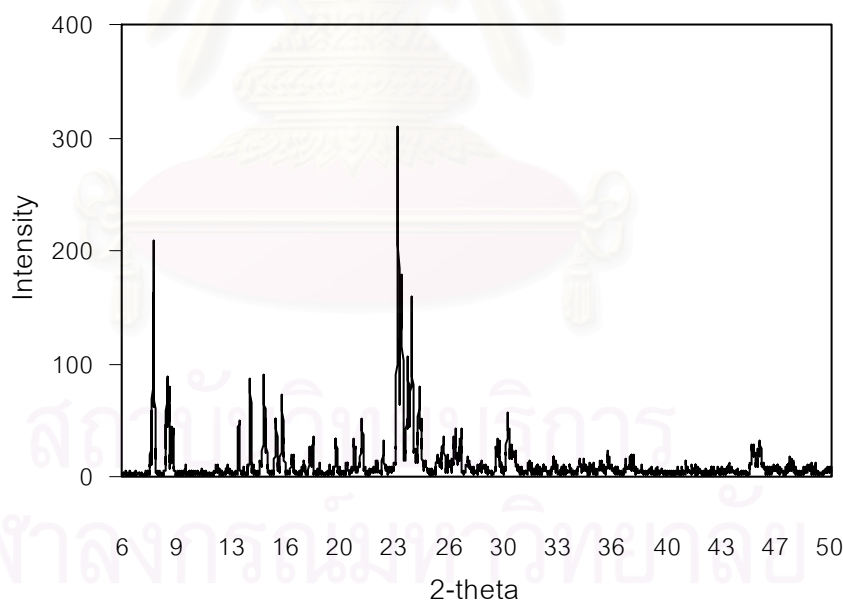
รูป ค8 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลเท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 15 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



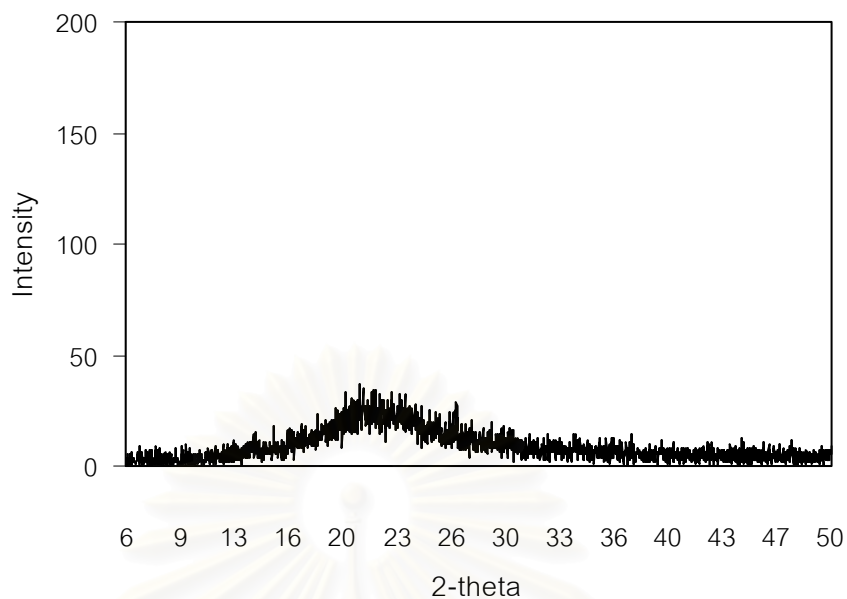
รูป ค9 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลเท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 20 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



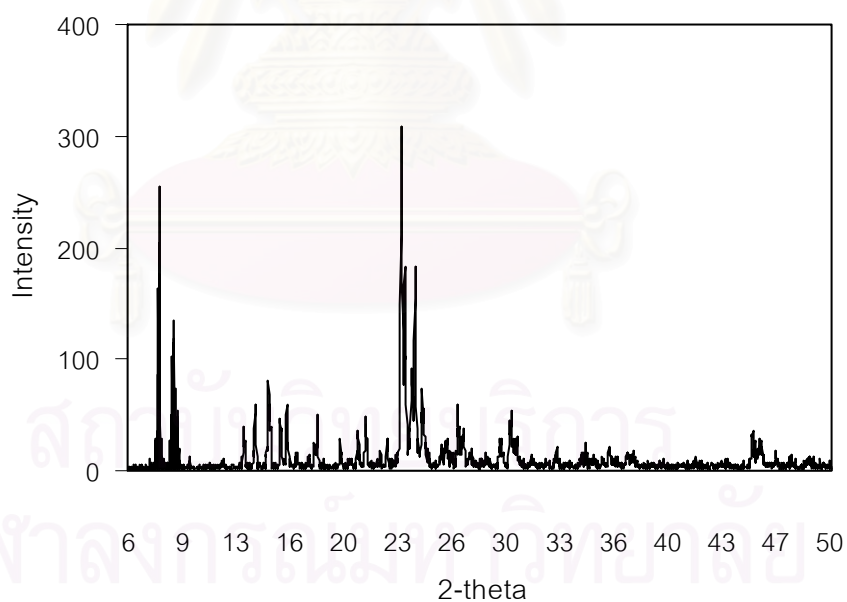
รูป ค10 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



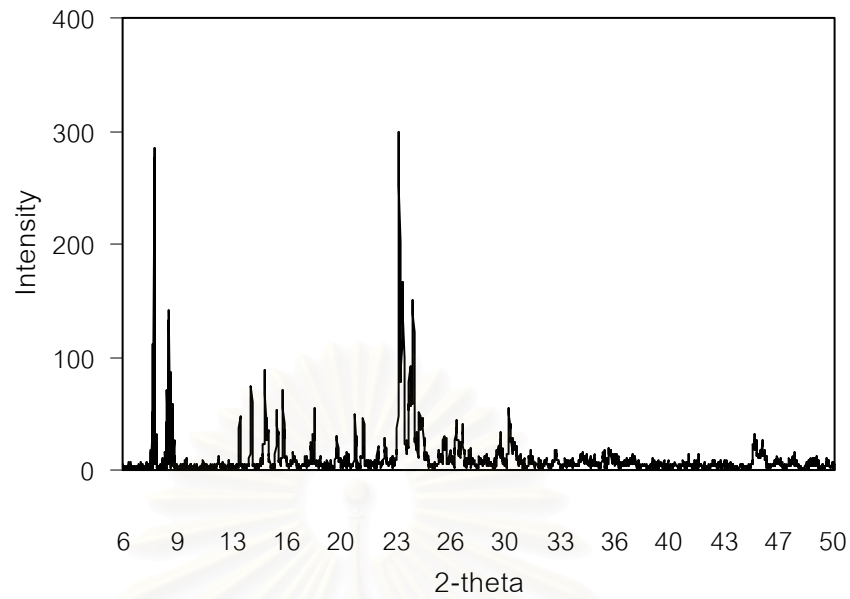
รูป ค11 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 30 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



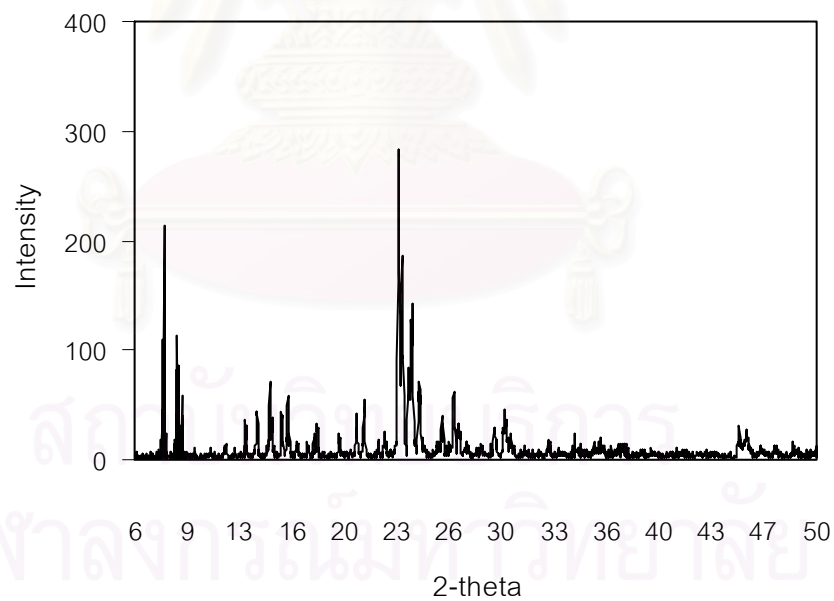
รูป ค12 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



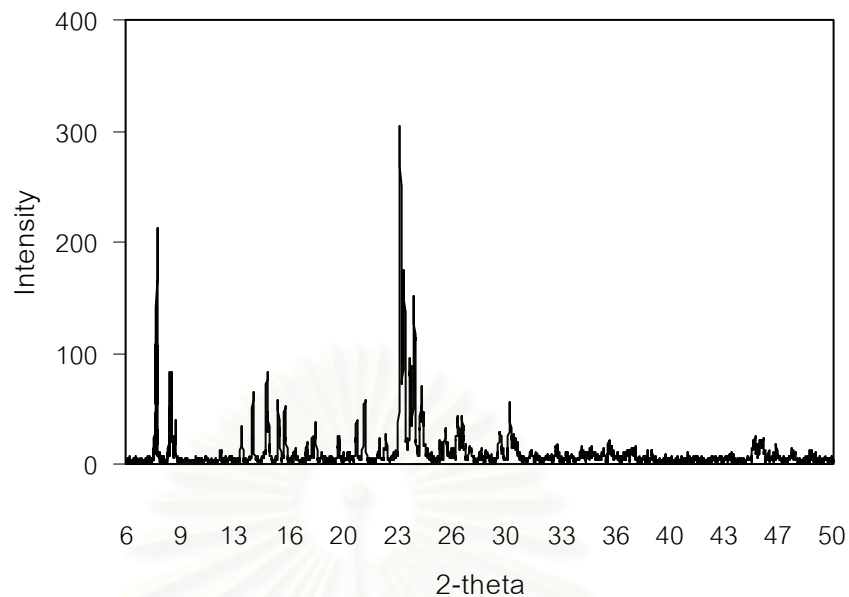
รูป ค13 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



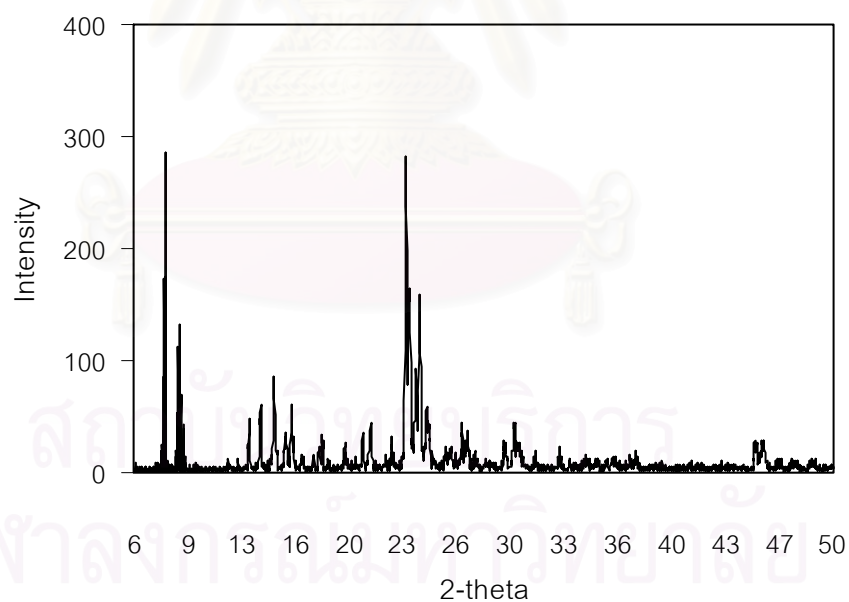
รูป ค14 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



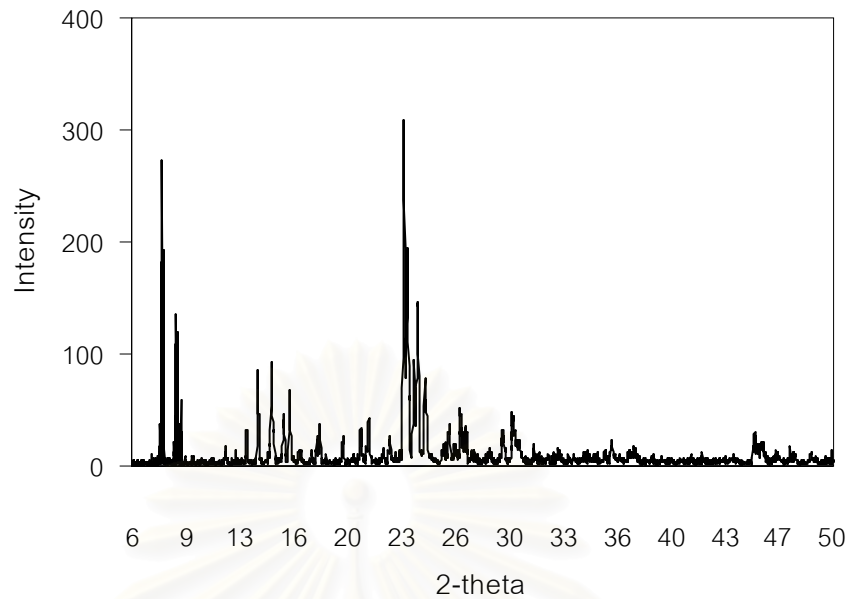
รูป ค15 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.07



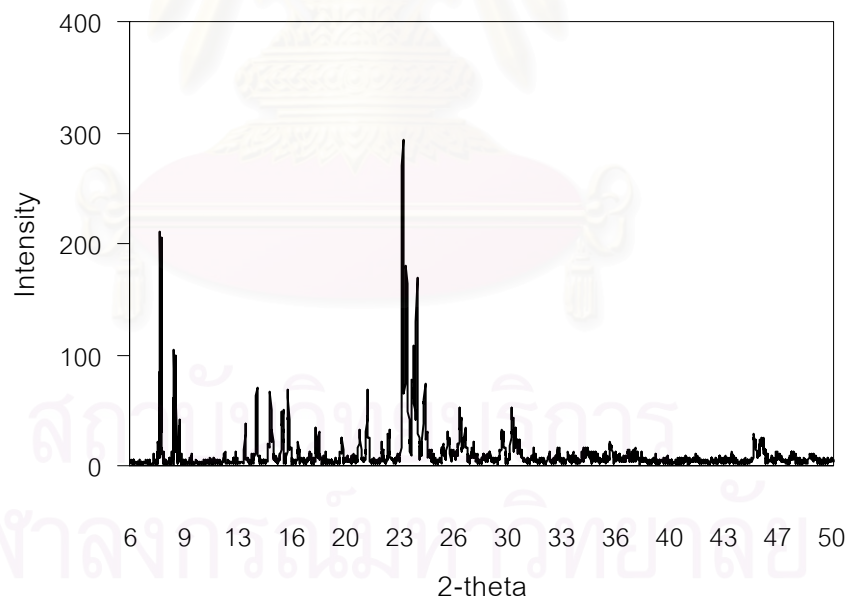
รูป ค16 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.04



รูป ค17 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.06



รูป ค18 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.09



รูป ค19 รูปแบบ XRD ของซีโอไลต์ ZSM-5 ที่สังเคราะห์ได้ที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา ของเจล เท่ากับ 100 เวลาในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล 24 ชั่วโมง อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนของ TPA ต่อซิลิกา เท่ากับ 0.10

ภาคผนวก ง

ตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยา [จตุพร และนุรักษ์, 2547; วิทยา, 2547] คือ สารที่เพิ่มอัตราเร็วของปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นโดยไม่ถูกใช้อย่างถาวรในปฏิกิริยา แม้ว่าอาจมีส่วนร่วมในบางขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา แต่ในที่สุดจะเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปเดิมหลังจากปฏิกิริยาลิ้นสุดแล้ว การทำงานของตัวเร่งปฏิกิริยามักจะเกิดขึ้นโดยการเกิดพันธะเคมีกับสารตั้งต้นอย่างน้อยหนึ่งชนิด

ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาแบ่งตามสถานะเทียบกับสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ มี 2 ประเภท คือ

1. **ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์** (homogeneous catalysts) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะเดียวกับสารที่ทำปฏิกิริยา ไม่ว่าจะเป็นแก๊สหรือของเหลว ส่วนใหญ่มักเป็นสารละลายที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาและสารตั้งต้นละลายอยู่ด้วยกัน ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์มักเป็นโมเลกุลที่มีตำแหน่งสำหรับเร่งปฏิกิริยาชัดเจน แต่มีข้อเสีย คือ มักสลายตัวหรือเสียสภาพในสภาวะที่ใช้ความร้อนหรือความดันสูง

ปฏิกิริยาเอกพันธ์ได้รับความสนใจมาก เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่มีความสามารถในการเลือกทำปฏิกิริยาสูงและไวต่อปฏิกิริยา โดยเฉพาะปฏิกิริยาที่คายความร้อน เนื่องจากสามารถกำจัดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าในระบบปฏิกิริยาวิวิพันธ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง แต่มีข้อเสียคือการแยกสารผลิตภัณฑ์และตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากกันทำได้ยาก

2. **ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์** (heterogeneous catalysts) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะแตกต่างจากสารที่ทำปฏิกิริยา เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของแข็ง สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สหรือของเหลว ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้สามารถแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือได้ง่ายกว่าระบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์ มีความแข็งแรงเชิงกล ทนทานต่อความดันและอุณหภูมิสูง ตารางที่ ง1 เป็นการเปรียบเทียบสมบัติ และปัจจัยต่างๆของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์และวิวิพันธ์ เนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์อยู่ในวัฏภาคเดียวกับสารตั้งต้น จึงมีข้อดีคือประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาสูง และสามารถเลือกให้เร่งปฏิกิริยาที่ต้องการได้ง่ายกว่า อีกทั้งสภาวะการทดลองที่ใช้ไม่รุนแรง แต่ข้อเสียคือการแยกตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก วิธีการที่ใช้ส่วนใหญ่คือ การกลั่น หรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย และการนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้ใหม่ทำได้ยากกว่า และอายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยาเอกพันธ์สั้นกว่า

ข้อดีของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์คือ สามารถแยกสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ออกจากตัวเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย สามารถใช้ได้ในสภาวะที่มีอุณหภูมิ และ/หรือ ความดันสูงได้ ตัวเร่งปฏิกิริยามีอายุการใช้งานที่ยาวนานและอาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่า

ตารางที่ ๑ การเปรียบเทียบปัจจัยในการเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์และวิวิธพันธุ์ [จตุพร และ นุรักษ์, 2547]

ปัจจัย	การเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธุ์	การเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธุ์
กัมมันตภาพเมื่อเทียบปริมาณโลหะที่เท่ากัน	สูง	แปรค่าได้
สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา	สูง	แปรค่าได้
ภาวะของปฏิกิริยา	ไม่รุนแรง	รุนแรง
อายุการใช้งานของตัวเร่งปฏิกิริยา	แปรค่าได้	นาน
ความไวของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการเป็นพิษ	ต่ำ	สูง
ปัญหาจากการแพร่	ไม่มี	อาจมีผล
การนำตัวเร่งปฏิกิริยากลับมาใช้งาน	ทำไม่ได้	ราคาแพง
การปรับสมบัติเชิงโมเลกุลของตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการเปลี่ยนอะตอมที่เป็นองค์ประกอบ	ทำไม่ได้	อาจทำได้

องค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์

ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ องค์ประกอบที่ว่องไวที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา (active component) และตัวรองรับ (support) หรือตัวพา (carrier) มักเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เพื่อให้การกระจายตัวของสารว่องไวง่าย ต่อการเกิดปฏิกิริยา แต่บางตัวเร่งปฏิกิริยาอาจมีเพียงสารว่องไวเพียงอย่างเดียว

ตัวเร่งปฏิกิริยาบางตัวอาจมีองค์ประกอบที่ช่วยส่งเสริมการเร่งปฏิกิริยาให้ดีขึ้นเรียกว่า โปรโมเตอร์ (promoter) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารที่ใส่ลงไปในปริมาณน้อยๆ เพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีหรือกายภาพของสารว่องไวหรือตัวรองรับ ซึ่งอาจเพิ่มความว่องไว (activity) สัดส่วนการเลือกทำปฏิกิริยา (selectivity) และเสถียรภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ ๖2 ตัวอย่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธุ์ที่มีความสำคัญเชิงอุตสาหกรรม [จตุพร และ นุรักษ์, 2547]

ปฏิกิริยา	ตัวเร่งปฏิกิริยา
<u>ปฏิกิริยาการดึงไฮโดรเจนออก</u>	
(dehydrogenation)	
$C_4H_{10} \rightarrow C_4H_8$	$Cr_2O_3 \bullet Al_2O_3$
$C_4H_8 \rightarrow C_4H_6$	Fe_2O_3 โปรโมตด้วย Cr_2O_3 และ K_2CO_3
$C_6H_5C_2H_5 \rightarrow C_6H_5CH=CH_2$	Fe_2O_3 โปรโมตด้วย Cr_2O_3 และ K_2CO_3
<u>ปฏิกิริยาสตรีมรีฟอร์มมิง (stream reforming)</u>	
CH_4 หรือ hydrocarbons + $H_2O \rightarrow CO + H_2$	Ni บนตัวรองรับ
$(CH_3)CHOH \rightarrow CH_3COCH_3 + H_2$	ZnO
$CH_3CH(OH)C_2H_5 \rightarrow CH_3COC_2H_5$	ZnO
<u>ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation)</u>	
การเติมไฮโดรเจนในน้ำมันและไขมันสำหรับ บริโภค	Ni บนตัวรองรับ
การเติมไฮโดรเจนในสารอินทรีย์	Pd หรือ Pt บนตัวรองรับ
$C_6H_6 + 3H_2 \rightarrow C_6H_{12}$	Ni หรือ โลหะมีตระกูลบนตัวรองรับ
$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$	Fe โปรโมตด้วย Al_2O_3 , K_2O , CaO และ MgO
<u>ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation)</u>	
$SO_2 + 1/2O_2 \rightarrow SO_3$	V_2O_5 และ K_2SO_4 บนซิลิกา
$2NH_3 + 5/2O_2 \rightarrow 2NO + 3H_2O$	90%Pt-10%Rh wire gauze
$NH_3 + CH_4 + air \rightarrow HCN$	90%Pt-10%Rh wire gauze
(Andrussow process)	
$C_{10}H_8 + O_2 \rightarrow C_6H_4(CO)_2O$	V_2O_5 บนไททาเนีย (TiO_2)
$1,2-C_6H_4(CH_3)_2 + O_2 \rightarrow C_6H_4(CO)_2O$	V_2O_5 บนไททาเนีย (TiO_2)
$CH_3OH + O_2 \rightarrow CH_2O + H_2$ และ/หรือ H_2O	Ag หรือ $Fe_2(MoO_4)_3$
การออกซิเดชันมลพิษทางอากาศ ได้แก่ CO และ สารประกอบไฮโดรคาร์บอน	Pt หรือ Pd หรือทั้งสองตัวบนตัวรองรับ เซรามิกส์
การกำจัด No_x และ So_x จากการเผาไหม้	เวเนเดียมหรือไทเทเนียมที่มีการเติม NH_3

ตารางที่ ๖2 ตัวอย่างการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยารวบรวมที่มีความสำคัญเชิงอุตสาหกรรม (ต่อ)

ปฏิกิริยา	ตัวเร่งปฏิกิริยา
<u>ปฏิกิริยาของซินแก๊ส</u> (syngas reaction)	
$\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$	Cu-ZnO โปรโมตด้วย Al_2O_3
$\text{CO} + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	Ni บนตัวรองรับ
$\text{CO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{paraffins, etc.}$ (ปฏิกิริยา Fischer-Tropsch)	Fe หรือ Co กับตัวโปรโมเตอร์
<u>ปฏิกิริยาที่เร่งด้วยกรด</u>	
ปฏิกิริยาแตกกิ่ง (cracking)	ซีโอไลต์ในเมตริกซ์ $\text{SiO}_2 \bullet \text{Al}_2\text{O}_3$ และส่วนประกอบอื่นๆ
ปฏิกิริยาไฮโดรแตกกิ่ง (hydrocracking)	Pd บนซีโอไลต์บนเมตริกซ์ที่เป็นอสังฐาน และ NiMo บนซิลิกา-อะลูมินา
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของพาราฟิน	Pt บนซีโอไลต์ชนิด H-modenite ในเมตริกซ์ อะลูมินา
ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน	H_3PO_4 บนดิน
ปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจนของโพรพิลีน ไปเป็น ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	กรดหรือ cation exchange resins
$\text{CH}_3\text{OH} + \text{I-C}_4\text{H}_8 \rightarrow \text{MTBE}$ (Methyl Tertiary Butyl Ether)	cation exchange resins

ภาคผนวก จ

สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติของสารละลายโซเดียมซิลิเกต

ชื่อทางเคมี (Chemical Name)	Sodium Silicate neutral solution
สูตรทางเคมี (Formula)	Na_2SiO_3
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)	122.07
ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Color and Odor)	เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น
จุดเดือด (Boiling Point)	100.6 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	-0.6 องศาเซลเซียส
ความดันไอ (Vapor Pressure)	14 มิลลิเมตรปรอท ที่ 20 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่นไอ (Vapor Density)	0.7 กิโลกรัมต่อตารางเมตร
อัตราการระเหย (Evaporating Rate)	มากกว่า 1 (อีเธอร์=1)
การละลายน้ำ (Solubility in Water)	ละลายน้ำได้สมบูรณ์
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	1.3 – 1.5
ความเป็นกรดต่าง (pH-Value)	11.2
คุณสมบัติอื่นๆ (Other properties)	-
จุดวาบไฟ (Flash Point)	
ขีดจำกัดการติดไฟ (Flammable limits)	- ค่าต่ำสุด (LEL) - ค่าสูงสุด (UEL)
อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง (Autoignition Temperature)	
เสถียรภาพ (Stability)	มีความเสถียรที่อุณหภูมิห้อง
สภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง (Conditions to Avoid)	
สารที่ต้องหลีกเลี่ยง (Materials to Avoid)	กรดอินทรีย์ กรดอนินทรีย์ ฟลูออรีน
การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity)	การเกิดปฏิกิริยาอาจก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน
การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness)	มีสมบัติกัดกร่อนต่อโลหะบางชนิด

สมบัติของกรดซัลฟูริก

ชื่อทางเคมี (Chemical Name)	Sulfuric acid, reagent acs 96%
สูตรทางเคมี (Formula)	H ₂ SO 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)	น้อยกว่า 1 (อีเธอร์=1)
การละลายน้ำ (Solubility in Water)	ละลายน้ำได้ที่ 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)	น้ำ แอมโมเนีย ด่าง กรด โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ โลหะแอลคาไลน์ สารประกอบของโลหะแอลคาไลน์ สารประกอบของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ โลหะ โลหะผสม ฟอสฟอรัสออกไซด์ ฟอสฟอรัส ไฮไดรด์ สารประกอบของฮาโลเจน สารประกอบจำพวก ออกซีฮาโลเจน เปอร์แมงกาเนต ไนเตรต คาร์ไบด์ สารที่ไหม้ไฟได้ ตัวทำละลายอินทรีย์ อะเซทิลิดีน ไนไตรล สารอินทรีย์จำพวกไนโตร อะนิลีน เปอร์ออกไซด์ พิคเครต ไนไตรด์ ลิเทียม
การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity)	ปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิด อาจเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง เป็นอันตรายเมื่อทำปฏิกิริยากับ โลหะและเนื้อเยื่อของสัตว์หรือพืช
การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness)	มีฤทธิ์กัดกร่อน

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)	โลหะแอลคาไลน์ สารประกอบของโลหะแอลคาไลน์ น้ำ แอมโมเนีย โลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ ต่าง กรด สารประกอบของโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ โลหะ โลหะผสม ฟอสฟอรัสออกไซด์ ฟอสฟอรัส ไฮไดรด์ สารประกอบของฮาโลเจน สารประกอบจำพวกออกซีฮาโลเจน เปอร์แมงกาเนต ไนเตรต คาร์ไบด์ สารที่ไหม้ไฟได้ ตัวทำละลายอินทรีย์ อะเซทิลีน ไนไตรล สารอินทรีย์จำพวกไนโตร อะนินีน เปอร์ออกไซด์ ไนไตรต์ ลิเทียม
การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity)	ปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิด อาจเกิดปฏิกิริยาที่รุนแรง เป็นอันตรายเมื่อทำปฏิกิริยากับ โลหะและเนื้อเยื่อของสัตว์หรือพืช
การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness)	มีฤทธิ์กัดกร่อน

สมบัติของโซเดียมไฮดรอกไซด์

ชื่อทางเคมี (Chemical Name)	Sodium hydroxide
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
ความเป็นกรดต่าง (pH-Value)	13 -14
คุณสมบัติอื่นๆ (Other properties)	ไม่ติดไฟ
เสถียรภาพ (Stability)	มีความเสถียร
ภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง (Conditions to Avoid)	อย่าให้น้ำเข้าภาชนะเพราะจะเกิดปฏิกิริยา
สารที่ต้องหลีกเลี่ยง (Materials to Avoid)	ตัวออกซิไดซ์แรง, กรดแก่, สารอินทรีย์, น้ำ, ของเหลวไวไฟ, สารประกอบอินทรีย์ของฮาโลเจน โดยเฉพาะไตรคลอโรเอทิลีน
การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity)	อาจก่อให้เกิดไฟ หรือการระเบิด การสัมผัสไนโตรมีเทนและสารประกอบไนโตรทำให้เกิดแก๊สที่ไวต่อการกระแทก
การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness)	สารกัดกร่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมบัติของแอมโมเนียมไนเตรต

ชื่อทางเคมี (Chemical Name)	Ammonium nitrate
สูตรทางเคมี (Formula)	NH_4NO_3
น้ำหนักโมเลกุล (Molecular Weight)	80
ลักษณะสีและกลิ่น (Appearance Color and Odor)	เป็นผลึกโปร่งแสง หรือผงสีขาว ไม่มีกลิ่น
จุดเดือด (Boiling Point)	210 องศาเซลเซียส
จุดหลอมเหลว (Melting Point)	169.6 องศาเซลเซียส
ความดันไอ (Vapor Pressure)	190 มิลลิเมตรปรอท ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่นไอ (Vapor Density)	-
อัตราการระเหย (Evaporating Rate)	-
การละลายน้ำ (Solubility in Water)	ละลายน้ำได้
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	1.725
ความเป็นกรดต่าง (pH-Value)	4.5 – 6.0
จุดวาบไฟ (Flash Point)	93.3 องศาเซลเซียส
ขีดจำกัดการติดไฟ (Flammable limits) - ค่าต่ำสุด (LEL)	-
- ค่าสูงสุด (UEL)	-
อุณหภูมิสามารถติดไฟได้เอง (Autoignition Temperature)	300 องศาเซลเซียส
เสถียรภาพ (Stability)	มีความเสถียร
ภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง (Conditions to Avoid)	-
สารที่ต้องหลีกเลี่ยง (Materials to Avoid)	วัสดุติดไฟได้ สารอินทรีย์ โลหะแอลคาไลน์ โลหะ กรดอะซิติก แอมโมเนียมคลอไรด์ โซเดียมเปอร์คลอเรต โพแทสเซียมซัลเฟต แอมโมเนียมซัลเฟต โซเดียมไฮโปคลอไรด์ และโซเดียม-โพแทสเซียมแอลลอยด์
การเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical Reactivity)	เป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง เมื่อสัมผัสกับวัสดุที่ติดไฟได้ และวัสดุอินทรีย์อาจเกิดการเผาไหม้
การกัดกร่อนของสารเคมี (Corrosiveness)	ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศุภลักษณ์ วรรณครัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2548 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย