

การสังเคราะห์ซีไอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน



นายมนตรี ทองคำ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-332-764-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SYNTHESIS OF ZEOLITES FROM COAL FLY ASH



Mr. Montree Tongkam

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Chemical Technology

Graduate school

Chulalongkorn University


Academic Year 1999

ISBN 974-332-764-9


หัวข้อวิทยานิพนธ์      การสังเคราะห์ซีไอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน  
โดย                              นายมนตรี ทองคำ  
ภาควิชา                        เคมีเทคนิค  
อาจารย์ที่ปรึกษา            ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์

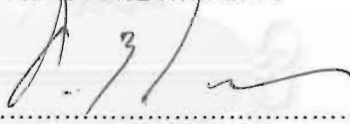
---

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

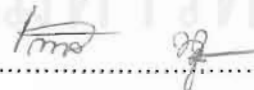
  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา กี่ระนันท์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

  
.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร)

มนตรี ทองคำ : การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน (SYNTHESIS OF ZEOLITES FROM COAL FLY ASH) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ธราพงษ์ วิฑิตศานต์ ; 104 หน้า. ISBN 974-332-764-9.

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินโดยการกระตุ้นด้วยสารละลายต่างเถ้าลอยถ่านหินที่ใช้เป็นสารตั้งต้นนี้ได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ ชนิดของสารละลายเบส (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ความเข้มข้นของสารละลาย (1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 โมลาร์) อุณหภูมิ (70, 100 และ 120 องศาเซลเซียส) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา (24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง) และใช้ส่วนผสมของสารตัวอย่างต่อสารละลาย 0.125 กรัมต่อมิลลิลิตร

การสังเคราะห์ทำในเครื่องปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิและเครื่องกวนที่ต้องมีการกวนตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRD) พบซีโอไลต์ดังนี้ Zeolite P, Chabazite, Nepheline, Gismondine นอกจากนี้ยังพบสารประกอบชนิดอื่น ๆ เช่น Sillimanite, Willhendersonite, Gehlenite ภาวะการสังเคราะห์ที่เหมาะสมคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน 619.44 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์ ซึ่งให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีขึ้นจากเถ้าลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน 52.20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... เคมีเทคนิค  
สาขาวิชา ..... เคมีเทคนิค  
ปีการศึกษา ..... 2542

ลายมือชื่อนิติ ..... มณีรัตน์ ทองคำ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 4072353523 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

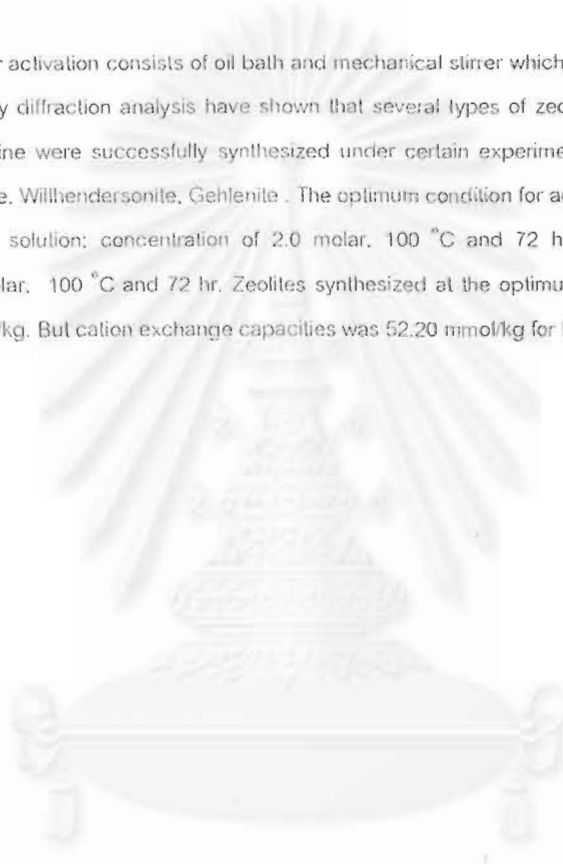
KEY WORD: FLY ASH / ALKALINE ACTIVATION / ZEOLITES / HYDROTHERMAL TREATMENT

MONTREE TONGKAM : SYNTHESIS OF ZEOLITES FROM COAL FLY ASH. THESIS ADVISOR :

ASSIST.PROF.THARAPONG VITIDSANT , 104 pp. ISBN 974-332-764-9.

Zeolites were synthesized from fly ash by alkaline hydrothermal activation. Fly ash from the power plant in Mae -- Moh was the starting material. The variables studied were; type of base solution (NaOH and KOH), concentration (1.0, 2.0, 3.0 and 4.0 M), temperature (70, 100 and 120 °C), reaction time (24, 48, 72, 96 and 120 hr) and sample concentration of 0.125 g/mL.

The reactor for activation consists of oil bath and mechanical stirrer which stirring all time in the experiment. Powder patterns of X-ray diffraction analysis have shown that several types of zeolite such as zeolite P, chabazite, nepheline and gismondine were successfully synthesized under certain experimental conditions. Other compound identified were Sillimanite, Willhendersonite, Gehlenite . The optimum condition for activation were found to be; in case of activation by NaOH solution; concentration of 2.0 molar, 100 °C and 72 hr. If activation by KOH solution; concentration of 2.0 molar, 100 °C and 72 hr. Zeolites synthesized at the optimum condition had cation exchange capacities 619.44 mmol/kg. But cation exchange capacities was 52.20 mmol/kg for fly ash.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....เคมีอนินทรีย์

สาขาวิชา.....เคมีอนินทรีย์

นายเอ็งจันสิต..... มนต์ธี ทองคำ

งานวิจัยและสารคดีที่.....



## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตตานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.อิธิชา นายสุวรรณ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตักเตือน และช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้ให้ลุล่วงด้วยดีตลอด ตั้งแต่แรกเริ่มจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่กรุณาเอื้อเฟื้อสถานที่วัสดุอุปกรณ์ให้ใช้ในการงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่และบุคลากรทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณสังข์ ชมชื่น และ คุณสมพร เอี่ยมสำอางค์ ที่ช่วยสร้างซ่อมแซมอุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้จนสามารถดำเนินงานวิจัยได้ดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ บุคลากรในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้การสนับสนุนช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ทุนในงานวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัยจึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความช่วยเหลือ เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ณ
สัญลักษณ์และคำย่อ .....	ต
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	3
1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 วารสารปริทัศน์.....	5
2.1 ถ้ำลอยถ่านหิน.....	5
2.1.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน.....	5
2.1.2 การจัดรูปของถ้ำลอยขณะทำการเผาไหม้.....	6
2.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บถ้ำลอยถ่านหิน.....	7
2.1.4 ชนิดของถ้ำลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ.....	8
2.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน.....	8
2.1.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยถ่านหิน.....	9
2.1.7 ประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหิน.....	10
2.1.8 ถ้ำลอยโรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะ.....	13
2.2 ซีโอไลต์.....	16
2.2.1 ประวัติซีโอไลต์.....	16
2.2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์.....	17
2.2.3 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์.....	22
2.2.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	31
2.2.5 ประโยชน์ของซีโอไลต์.....	33

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่

	หน้า
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	36
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ.....	36
2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ.....	37
3. การดำเนินงานทดลอง.....	39
3.1 รูปแบบการศึกษา.....	39
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	39
3.3 ขั้นตอนดำเนินงานทดลอง.....	42
4. ผลการวิจัย.....	43
4.1 ผลการวิเคราะห์หาสมบัติของเก้าอี้ล้อย่านหินที่ใช้ในการทดลอง.....	43
4.1.1 สมบัติพื้นฐานของเก้าอี้ล้อย่านหิน.....	43
4.1.2 สมบัติทางกายภาพของเก้าอี้ล้อย่านหิน.....	43
4.1.3 สมบัติทางเคมีของเก้าอี้ล้อย่านหิน.....	44
4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	45
4.3 ผลจากการแปรความเข้มข้นของสารละลายเบสที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	48
4.4 ผลจากการแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	50
4.5 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	52
4.6 รูปลักษณะโครงสร้างผลึกของเก้าอี้ล้อย่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้....	57
4.7 รูปลักษณะโครงสร้างผลึกของเก้าอี้ล้อย่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้....	63
5. อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	66
5.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	66
5.1.1 ผลของความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	66
5.1.2 ผลของชนิดของสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	67
5.1.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	68
5.1.4 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา.....	69



สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5.2 การนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้งาน .....	72
6. สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	74
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	74
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	75
6.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย.....	75
รายการอ้างอิง .....	76
ภาคผนวก .....	80
ประวัติผู้เขียน .....	104



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สมบัติทางกายภาพของถ้ำลอยโรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะ.....	13
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหินแหล่งต่าง ๆ.....	14
2.3	การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ของ Breck ตามโครงสร้างทุดิยภูมิ.....	22
2.4	สรุปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภทต่างๆ .....	32
2.5	ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์..	33
4.1	องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยลิกไนต์ .....	44
4.2	ภาวะการทดลองที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลของถ้ำลอยถ่านหิน.....	45
4.3	ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ .....	48
4.4	ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ .....	50
4.5	ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นในระยะเวลาต่าง ๆ ที่ อุณหภูมิ 70, 100 และ 120 °C .....	52
4.6	อัตราการเกิดของซีโอไลต์หลังจากการทำปฏิกิริยาที่ภาวะต่าง ๆ .....	57
5.1	เปรียบเทียบผลงานวิจัยการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหิน .....	71
5.2	ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง ประเทศไทย .....	72

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ภาพถ่ายถ้ำลอยลิกไนต์จากเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM) ....	14
2.2	รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม ในหน่วยเล็กๆ (sub unit) ของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ) .....	19
2.3	โครงสร้าง 2 มิติ ของอะลูมิเนียมซิลิเกต .....	19
2.4	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ .....	23
2.5	ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่ .....	23
2.6	โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ analcite และ laumontite .....	24
2.7	โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ natrolite, Brewsterite และ ZSM-5 .....	25
2.8	ลักษณะโครงสร้างของ Offretite และ Erionite .....	25
2.9	สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UUDD, UDUD และ UDUU .....	26
2.10	หน่วยทุติยภูมิใน Heulandite Group และ Mordenite Group .....	26
2.11	ลักษณะโครงสร้างตามแนวโปรเจกชันหลักของ Mordenite, dachardite, ferrierite, epstilbite, bikitaite .....	27
2.12	ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-5 และภาพร่างพื้นที่ผิวของ ZSM-5 .....	28
2.13	การจัดเรียงตัวของ ZK-5 .....	28
2.14	หน่วยพอลิฮีดรอลต่างๆ ในโครงสร้างของ Melanophlogite และ ZSM-39 .....	29
2.15	ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39 .....	29
2.16	ลักษณะโครงสร้างของ Melanophlogite .....	30
2.17	ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite .....	30
3.1	เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ .....	40
3.2	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์ .....	40
3.3	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอย	41
3.4	เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปที่ใช้ดูรูปร่างผลึกของซีโอไลต์.....	41
4.1	ตัวอย่างถ้ำลอยลิกไนต์ที่ใช้ในการทดลองและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ .....	43

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ผลจากการแปรความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M อุณหภูมิ 100 °C .....	49
4.3 ผลจากการแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M ระยะเวลา 72 hr .....	51
4.4 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M อุณหภูมิ 70 °C .....	54
4.5 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M อุณหภูมิ 100 °C .....	54
4.6 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M อุณหภูมิ 120 °C .....	55
4.7 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 100 °C.....	55
4.8 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 100 °C .....	56
4.9 อัตราการเกิด Zeolite P และสารประกอบอื่นๆ จากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 70 °C .....	59
4.10 อัตราการเกิด Zeolite P และสารประกอบอื่น ๆ จากถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 100 °C .....	59

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 อัตราการเกิด Zeolite P และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหินที่ผ่าน กระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 120 °C .....	60
4.12 อัตราการเกิด Gismondine และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหิน ที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 70 °C .....	60
4.13 อัตราการเกิด Chabazite ,Nepheline และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอย ถ่านหินที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 100 °C .....	61
4.14 อัตราการเกิด Gismondine และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหิน ที่ผ่านกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 120 °C .....	61
4.15 อัตราการเกิด Zeolite P ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 100 °C .....	62
4.16 พื้นผิวของแก้วลอยถ่านหินกำลังขยาย 7,000 เท่า .....	63
4.17 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 70 °C 72 hr กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	63
4.18 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 70 °C 120 hr กำลังขยาย 7,000 เท่า .....	63
4.19 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 100 °C 72 hr กำลังขยาย 7,000 เท่า .....	63
4.20 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 100 °C 120 hr กำลังขยาย 10,000 เท่า .....	64
4.21 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 120 °C 7 hr กำลังขยาย 7,000 เท่า.....	64
4.22 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 70 °C 120 hr กำลังขยาย 7,000 เท่า .....	64
4.23 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 100 °C 72 hr กำลังขยาย 10,000 เท่า .....	64

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	พื้นผิวของเก้าอี้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 120 °C 7 hr กำลังขยาย 1,000 เท่า .....	65
4.25	พื้นผิวของเก้าอี้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 0.2NaOH+0.8KOH 2.0 M 100 °C 72 hr กำลังขยาย 3,500 เท่า .....	65
4.26	พื้นผิวของเก้าอี้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 0.5NaOH+0.5KOH 2.0 M 100 °C 72 hr กำลังขยาย 5,500 เท่า .....	65
4.27	พื้นผิวของเก้าอี้ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 0.8NaOH+0.2KOH 2.0 M 100 °C 72 hr กำลังขยาย 10,000 เท่า .....	65



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สัญลักษณ์และคำย่อ

SBU = หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Unit)

XRD = เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

XRF = เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์

SEM = สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป

CEC = ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ



ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทยในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงจักรไฟฟ้าพลังไอน้ำของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งต้องใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงประมาณ 30,400 ตันต่อวัน เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าประมาณ 2,625 เมกะวัตต์ ให้เพียงพอแก่ความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าของประชาชน

โดยปกติการผลิตไอน้ำเพื่อปั่นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงนั้นจะทำให้เกิดเถ้าลอยถ่านหิน ซึ่งเป็นกากของเหลือจากการเผาไหม้ของถ่านหินเป็นปริมาณร้อยละ 20-30 โดยน้ำหนักของปริมาณถ่านหินที่ใช้ทั้งหมด โดยที่ถ่านหินที่ใช้จะผ่านขั้นตอนการบดให้เป็นผงก่อนที่จะถูกนำเข้าสู่เตาเผา ผงถ่านหินจะถูกเป่าเข้าไปในเตาเผาโดยลมร้อนที่เคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงและจะเกิดการเผาไหม้ทันทีในขณะที่ยังลอยอยู่ อุณหภูมิขณะเกิดการเผาไหม้จะอยู่ในช่วง 900-1,200 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าจุดหลอมตัวของแร่ธาตุส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในถ่านหิน และมีผลทำให้แร่ธาตุเหล่านี้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่างๆ ทั้งทางเคมีและทางกายภาพ

ส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 75-85 ของเถ้าลอยเป็นเม็ดค่อนข้างละเอียด และจะลอยติดไปกับควันจากการเผาไหม้ออกจากเตาเผาไปทางปล่องควัน เถ้าส่วนนี้เรียกว่า "เถ้าลอย (fly ash)" สำหรับเถ้าอีกส่วนที่มีลักษณะเป็นเม็ดหยาบกว่าจะตกลงสู่ด้านล่างของเตาเผาจึงเรียกว่า "บอตทอมแอส (bottom ash)" สำหรับส่วนที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเถ้าส่วนที่เป็นเถ้าลอย

เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหามลภาวะเนื่องจากเถ้าลอยลอยปะปนไปในบรรยากาศ เถ้าลอยจะถูกแยกออกจากควันที่เกิดจากการเผาไหม้ด้วยเครื่องดักเก็บเถ้าก่อนที่ควันจะลอยออกทางปล่องไฟ เถ้าลอยซึ่งถูกดักเก็บแล้วจะถูกลำเลียงไปเก็บรวบรวมไว้ในไซโลกลางโดยใช้ท่อลมหรือเครื่องมือกลแบบต่างๆ เถ้าลอยที่เก็บอยู่ในไซโลกลางจะอยู่ในสภาพที่แห้ง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้



## 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ

ประเทศไทยได้มีความพยายามในการที่จะนำถ่านล่อยนี้ไปใช้ประโยชน์ ดังเช่นประเทศอุตสาหกรรมหลายประเทศในยุโรป และอเมริกาเพื่อเป็นการช่วยบรรเทาปัญหาการขจัดกากของเหลือ นอกจากนี้ปัญหามลภาวะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมยังเป็นปัญหาที่ทุกประเทศกำลังหาทางแก้ไขและป้องกันกันอยู่ในขณะนี้ ตัวอย่างเช่น ปัญหามลภาวะทางน้ำที่เกิดจากการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชนมากขึ้น ปัญหามลภาวะทางอากาศอันเนื่องมาจากไอเสียรถยนต์จากสภาพปัญหาการจราจรและจากโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวได้มีการศึกษาสมบัติและความสามารถต่างๆของซีโอไลต์กันมากขึ้น ซึ่งลักษณะทางกายภาพของซีโอไลต์ที่สำคัญคือ โครงสร้างมีรูพรุนมากมายจึงมีพื้นที่ผิวมาก ทำให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดี นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน จากสมบัติเหล่านี้ทำให้ซีโอไลต์มีประโยชน์มากในทางอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นสารกรองแยกโมเลกุล ใช้ลดความกระด้างของน้ำ ใช้จับโลหะหนักหรือสารกัมมันตรังสีในน้ำทิ้ง ใช้เป็นสารดูดความชื้นและแก๊สพิษ รวมทั้งใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในปฏิกิริยาไฮโดรแครกกิง (Hydrocracking) และไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization) เป็นต้น จึงได้มีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาอย่างมากมาย แต่ต้นทุนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ได้มานั้นยังสูง จึงได้มีความพยายามหาวัตถุดิบใหม่ๆที่ช่วยลดต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ลง ถ่านล่อยถ่านหินนับเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ได้อีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจ สำหรับในประเทศไทยแม้ว่าจะได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับแนวทางการใช้ประโยชน์จากถ่านล่อยถ่านหินไปบ้างแล้ว แต่ก็ยังไม่มีการนำเอาถ่านล่อยนี้ไปใช้ประโยชน์อย่างจริงจังเนื่องจาก ทำเลที่ตั้งอยู่ห่างไกลจากเขตชุมชนมาก ทำให้การขจัดของเหลือไม่จัดเป็นปัญหาใหญ่ นอกจากนี้ปริมาณถ่านล่อยที่มีอยู่ในปัจจุบันมีปริมาณน้อยไม่คุ้มต่อการลงทุนที่จะนำถ่านล่อยไปใช้ให้เกิดประโยชน์ แต่เนื่องด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในปัจจุบัน ถ่านล่อยจึงจะนำไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่านี้ งานวิจัยฉบับนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาถ่านล่อยให้แปรเปลี่ยนไปเป็นซีโอไลต์ ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ดูลักษณะโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมีของถ่านล่อยแล้วพบว่าถ่านล่อยนั้นประกอบไปด้วยสารประกอบของซิลิกอน(Si) และอะลูมิเนียม(Al) พอเหมาะที่จะนำมาทำการทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ จึงเป็นมูลเหตุที่ควรศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมเกี่ยวกับเวลา อุณหภูมิ ชนิดของเบส และความเข้มข้นที่ใช้และศึกษาสมบัติการดูดซับของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ อันจะก่อประโยชน์ต่อต้นทุนในการผลิตที่ต่ำและได้ผลผลิตมีคุณสมบัติเท่าเทียมกับท้องตลาด อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาหาวิธีการการสังเคราะห์ใหม่ๆเพื่อเป็นทางเลือกในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยถ่านหินที่ได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
2. ศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อสมบัติของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ รวมทั้งหาภาวะที่เหมาะสมของตัวแปร เช่น เวลา อุณหภูมิ ชนิดของเบส และความเข้มข้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่ให้สมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี

## ขอบเขตการวิจัย

1. เป็นการศึกษาเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ที่อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของสารละลายเบสต่างๆ
3. นำซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ ณ ภาวะที่เหมาะสมมาศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

## ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. เตรียมเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยถ่านหิน
4. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งใช้สารละลายเบสดังนี้คือ NaOH, KOH และ สารละลายผสมระหว่าง NaOH และ KOH โดยแปรความเข้มข้น 1.0, 2.0, 3.0, และ 4.0 M อุณหภูมิ 70, 100, 120 °C ใช้เวลาดังนี้ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง
5. ศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ได้แก่
  - ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน
  - วิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เครื่องเอกซ-เรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโทรโฟโตเมทรี (XRD)
  - วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM)
6. วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการสังเคราะห์ซีไอไลต์ในระดับอุตสาหกรรม
2. เป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้ง (ถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์) มาสังเคราะห์เป็นซีไอไลต์ เพื่อเพิ่มมูลค่าและก่อให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากยิ่งขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

ถ่านหินลิกไนต์อยู่ในตระกูลถ่านหิน (Coal) ซึ่งมีกำเนิดมาจากซากพืชทับถมกันเมื่อหลายสิบล้านปีมาแล้ว ต่อมาเมื่อตะกอนดินทรายทับถมและมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลกรวมทั้งได้รับความร้อนจากภายในโลกเป็นเวลานาน ทำให้ซากพืชที่ทับถมกันนี้แปรสภาพไปเป็นถ่านพีต (Peat) ซึ่งเป็นลำดับเริ่มต้นของการเกิดถ่านหิน เมื่อเวลาผ่านไปอีกหลายร้อยล้านปีถ่านพีตก็แปรสภาพเป็นถ่านหิน การทับถมจนเกิดเป็นถ่านหินจะอยู่ที่ความลึก 7,000 เมตร อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และความดัน 1,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ระดับของถ่านหินที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความดัน และอุณหภูมิของแหล่งกำเนิด

สำหรับถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทยส่วนใหญ่ที่พบจะเกิดในยุคเทอร์เชียรี (Tertiary Period) ที่มีช่วงอายุระหว่าง 1.8 ถึง 65 ล้านปีมาแล้ว และจัดเป็นถ่านหินประเภทคุณภาพต่ำสุดในบรรดาถ่านหินด้วยกัน ถ่านหินลิกไนต์ที่ขุดได้จากเหมืองแม่เมาะส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของกำมะถัน เถ้าถ่าน และความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งมีอายุระหว่าง 2.5 ถึง 35 ล้านปีมาแล้ว (วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538)

2.1 เถ้าลอยถ่านหิน (Fly Ash) (วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538; อนิรุทธ์ ธงไชย, 2528)

เถ้าลอยถ่านหินเกิดจากการนำถ่านหินมาบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอยถ่านหินเป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน และถูกจับไว้โดยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) ในแต่ละปีการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินลิกไนต์ ที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ทำให้เกิดเถ้าลอยถ่านหินเป็นปริมาณมากถึงปีละ 10 ล้านตัน

#### 2.1.1 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน

สารที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินจะประกอบไปด้วยแร่อนินทรีย์ที่อยู่ในถ่านหิน และสารอินทรีย์ที่ถูกเผาไหม้ไม่หมด แร่อนินทรีย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเถ้าลอย ซึ่งจากการเผาถ่านหินจะเกิดเถ้าลอยประมาณร้อยละ 3-30 ของปริมาณถ่านหินที่ใช้ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางส่วนจะเกิดการระเหยและมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆระหว่างการเผาไหม้ เช่น ดินเหนียวและหินดินดานจะ

สูญเสียน้ำไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนเนตจากการสลายตัวซึ่งจะให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ออกมา เหล็กไพไรต์ (iron pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (iron oxide) และจะให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์อิสระจะเกิดการจับตัวใหม่เกิดเป็นคาร์บอนเนต ( $\text{CO}_3$ ) ในถ่านหินจะมีสารแคลเซียมคาร์บอนเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ส่วนในถ่านลอยถ่านหินจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียมซัลเฟต ( $\text{CaSO}_4$ ) ถ่านลอยเหล่านี้ประกอบไปด้วยซิลิกา (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก เช่น แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบแอลคาไล นอกจากนี้ยังมีหินปูนกับแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอนเนตและซัลเฟต

ระดับปริมาณถ่านลอยในถ่านหินจะมีช่วงปริมาณที่กว้างมาก โดยจะแปรเปลี่ยนไปตามสถานที่ต่างๆ กันในโลก หรืออาจต่างกันเนื่องจากระดับชั้นของพื้นผิวในพื้นที่เดียวกัน หรือมีความต่างกันในเรื่องที่ต่างกัน

### 2.1.2 การจัดรูปของถ่านลอยขณะทำการเผาไหม้

ขณะทำการเผาไหม้ ถ่านลอยจะเกิดการจับตัวออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. ถ่านหนัก เป็นส่วนที่อนุภาคของถ่านลอมมารวมกันจนหนักพอที่จะตกออกนอกเตาไอน้ำ ซึ่งมีอนุภาคใหญ่กว่าถ่านลอย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีหลายมุมเนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค ถ่านหนักเหล่านี้สามารถจับตัวกันก่อให้เกิดสแลก (Slag) ซึ่งสแลกเหล่านี้จะมีสีดำ มีรูปร่างหลายมุม

2. ไร เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกระหว่างการเผาไหม้ บางส่วนของไรนี้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของถ่านลอยซึ่งจะถูกดักจับที่เครื่องดักจับถ่านลอย ปริมาณของไรที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ความเข้มข้น และสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

3. ถ่านลอย เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งลอยอยู่ในแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ และลอยออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับแก๊สอื่นๆ ถ่านลอยส่วนใหญ่จะถูกเก็บโดยเครื่องดักทางกล (Mechanical collectors) หรือ เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของถ่านลอยจะผ่านเครื่องดักจับ และถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศไป ถ่านลอยจะมีปริมาณร้อยละ 10-85 ของปริมาณถ่านทั้งหมด และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม โดยมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 – 100 ไมครอน มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณระดับคาร์บอนในถ่านหิน

จากการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยาพบว่าถ้ำลอยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อนุภาคของถ้ำลอยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบของซิลิกอนสูงกว่าถ้ำลอยที่มีผิวหยาบกว่า ส่วนประกอบอื่นๆ นั้นได้แก่ แมกเนไทต์ เฮมาไทต์ คาร์บอน มุลไลต์และควอต

สิ่งที่น่าสนใจของถ้ำลอย คือ ความเป็นอนุภาคเบาที่เรียกว่า เซโนสเฟียร์ (cenospheres) ซึ่งมีปริมาณกว่าร้อยละ 20 ของถ้ำลอย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลม มีส่วนประกอบของซิลิกเกต ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 20-200 ไมครอน ถ้ำเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการขจัด สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของเซโนสเฟียร์จะคล้ายกับถ้ำลอยดังที่จะกล่าวต่อไป

### 2.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บถ้ำลอยถ่านหิน

1. เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatics Precipitators) วิธีการควบคุมนี้ใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าส่วนใหญ่ซึ่งประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วระหว่างแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ผ่านอนุภาคของถ้ำลอยจะได้รับประจุไฟฟ้าลบ และจะถูกดึงดูดให้เกาะบนขั้วบวก ในทางปฏิบัติเครื่องนี้จะต้องทำความสะอาดอย่างต่อเนื่องโดยการเคาะเพื่อไล่อนุภาคที่ดักเก็บได้

สำหรับการเก็บถ้ำลอย เครื่องมือที่ดักเก็บควรมีประสิทธิภาพมากกว่าร้อยละ 99 เนื่องจากคุณภาพของถ่านหินที่ใช้ในโรงไฟฟ้าจะมีคุณภาพแย่งเพราะมีปริมาณถ้ำมากขึ้น และถ้ำนี้จะมีส่วนประกอบเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เพราะฉะนั้นความสามารถในการทำงานของเครื่องตกตะกอนจะต้องเหมาะสมกับถ้ำลอยที่ถูกดักเก็บ เช่น มีความต้านทานไฟฟ้า แต่สมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถ่านหินที่ใช้ หรือการทำงานของหม้อไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

2. ถุงกรอง (Baghouse) ถุงนี้จะทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคถ้ำลอยได้ ซึ่งถุงนี้มักจะใช้หลายถุงในโครงสร้างหนึ่งจึงเรียกว่า Baghouse ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพดีพอๆกับเครื่องตกตะกอน และถูกนำไปใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าบางแห่ง

3. ไซโคลน (Cyclone collector) เครื่องไซโคลนจะทำงานโดยการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของแก๊สจนทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้เกิดการแยกของอนุภาคถ้ำลอยที่หนักออกจากแก๊ส เครื่องไซโคลนควรมีประสิทธิภาพร้อยละ 70-85 เมื่อใช้กับหม้อไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง เครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์ (Cyclone-Fired Boiler) จะทำให้เกิดถ้ำที่มีขนาดเล็กจำนวนมากกว่าหน่วยที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นเครื่องไซโคลนจะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเครื่องไซโคลนไฟบอยเลอร์

#### 2.1.4 ชนิดของเถ้าลอยถ่านหินเมื่อแยกตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ

เถ้าลอยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ คือ เถ้าลอยบิทูมินัส และ เถ้าลอยลิกไนต์ ความแตกต่างของเถ้าลอยทั้งสองชนิดคือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ จะหยาบกว่า คือ มีช่วงกว้างกว่า ค่าดัชนีหักเหของเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าสูงกว่า และพวกเถ้าลอยลิกไนต์จะมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มากกว่า เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ในทางตรงกันข้ามสำหรับเถ้าลอยบิทูมินัสจะมีปริมาณเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มากกว่าปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทบิทูมินัสจะเป็นถ่านหินยุคเก่าซึ่งอยู่ในช่วงอายุไตรแอสสิก ส่วนถ่านหินที่มีเถ้าลอยประเภทลิกไนต์จะเป็นถ่านหินยุคใหม่จะอยู่ในช่วงอายุจูราสสิก

#### 2.1.5 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจะขึ้นกับปัจจัยทางด้านธรณีวิทยา และด้านภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ่านหินเป็นหลัก แต่อาจขึ้นอยู่กับภาวะการเผาไหม้ และประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลภาวะทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในเถ้าลอยจะเป็นไปตามชนิดของหินและดิน คือ มีออกไซด์ของซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และแคลเซียม (Ca) คิดเป็นร้อยละ 95-99 ของส่วนประกอบทั้งหมด และมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) ไทเทเนียม (Ti) โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) ซัลเฟอร์ (S) และฟอสฟอรัส (P) คิดเป็นร้อยละ 0.5-3.5 ของส่วนประกอบทั้งหมด นอกจากนี้เถ้าลอยจะมีส่วนประกอบของธาตุต่างๆที่มีปริมาณน้อยๆ (trace element) ประมาณ 20-50 ธาตุ

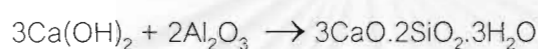
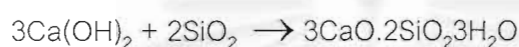
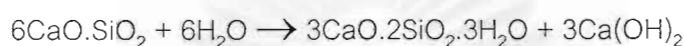
องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยในประเทศต่างๆตามที่ได้รวบรวมและสรุปไว้ พบว่า องค์ประกอบของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ จะแตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นผลจากความแตกต่างระหว่างถ่านหินที่ใช้ และประสิทธิภาพของเตาเผาที่ใช้ในแต่ละแหล่ง โดยเฉลี่ยแล้วเถ้าลอยจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญดังต่อไปนี้

- Silica (SiO<sub>2</sub>) ร้อยละ 41 – 58 โดยน้ำหนัก
- Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ร้อยละ 21 – 27 โดยน้ำหนัก
- Iron Oxide (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ร้อยละ 4 – 17 โดยน้ำหนัก
- Lime (CaO) ร้อยละ 4 – 6 โดยน้ำหนัก

ที่เหลือเป็นออกไซด์ของแร่ชนิดต่างๆ ที่ผสมอยู่ในถ่านหิน เช่น MgO, SO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O และ

$K_2O$  เป็นต้น จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยนั้นจะคล้ายคลึงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก ทั้งนี้เพราะว่าทั้งเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

เนื่องด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่คือ ซิลิกา ( $SiO_2$ ) และอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) เถ้าลอยจึงสามารถรวมตัวกับปูนขาว (Lime) จึงถือได้ว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุปัวโซลาน (pozzolan) ชนิดหนึ่ง ปฏิกิริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานแสดงได้ดังนี้คือ



#### 2.1.6 สมบัติเชิงวิศวกรรมของเถ้าลอยถ่านหิน (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526)

เถ้าลอยถ่านหินมีลักษณะพิเศษเฉพาะ คือ มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ มีการกระจายของขนาดอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีความข้นเหนียว (plasticity) ต่ำ

ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉลี่ยเถ้าลอยในประเทศญี่ปุ่นมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.14 ในประเทศอเมริกามีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.40 และในประเทศอังกฤษประมาณ 2.10 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยนั้นต่ำกว่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินโดยทั่วไปที่ปรกติอยู่ในช่วง 2.60–2.80 จากการสังเกตโดยใช้กล้องขยายพบว่าเม็ดเถ้าลอยมีลักษณะเป็นเม็ดกลม และมีหลักฐานที่ทำให้เชื่อว่าเม็ดกลมเหล่านี้ด้านในจะกลวง ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เถ้าลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเม็ดดินโดยทั่วไป

เนื่องด้วยเถ้าลอยเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกบด ขนาดของเม็ดเถ้าลอยจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่านหิน และอุณหภูมิขณะเกิดการเผาไหม้ ในสภาพปกติเถ้าลอยจะเป็นฝุ่นฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อแห้ง และจะและเป็นเลนเมื่ออิมตัวด้วยไอน้ำ แต่ถ้าผสมน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม และได้รับการบดอัดที่เพียงพอแล้วเถ้าลอยจะเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง และมีกำลังอัด (unconfined compressive strength) สูง

การจัดรูปของเถ้าถ่านหินระหว่างส่วนของเถ้าลอยกับเถ้าหนักจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของเตาเผา ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิของการหลอมเถ้า และชนิดของหม้อต้ม เตาเผาเป็นปัจจัยแรกที่



สำคัญในการเกิดการแยกส่วนของถ้ำลอย และถ้ำหนัก เช่น เตาเผาชนิดสโตเกอร์ (Stoker) จะมีการปล่อยถ้ำลอยออกมาน้อยที่สุด

#### สรุปสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยโดยทั่วไป

Specific Gravity	1.90 – 2.69
Specific Surface Area (cm <sup>2</sup> /g)	1220 – 8100
Optimum Water Content (% , standard compaction test)	18 – 45
Maximum Dry Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	9 – 16

ในหน่วยไซโคลนอุณหภูมิของเครื่องจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของถ้ำ ประมาณร้อยละ 80-85 ของถ้ำที่จะหลอม และรวมตัวกับเกิดเป็นสแลก ส่วนหนึ่งของถ้ำลอยปริมาณไม่มากที่เกิดจากหน่วยไซโคลนจะมีลักษณะอนุภาคละเอียด (เล็กกว่า 10 ไมครอน) ในหน่วยพัลเวไรซ์ (Pulverized coal) มีถ้ำลอยเกิดขึ้นร้อยละ 65-80 และเกิดถ้ำหนักร้อยละ 20-35 สำหรับอุณหภูมิการหลอมของถ้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ถ้ำที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำมีแนวโน้มที่จะหลอมในหม้อต้มไอน้ำ และสะสมตัวออกมาในรูปของถ้ำหนักนั่นคือหม้อต้มไอน้ำที่กันเปือกจะก่อให้เกิดถ้ำหนักมากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่กันแห้ง

#### 2.1.7 ประโยชน์ของถ้ำลอยถ่านหิน (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526; วิชาญ ภูพัฒน์, 2526)

##### 1. การใช้ถ้ำลอยเป็นวัสดุถม (Fill Material)

เมื่อผสมน้ำให้เข้ากับถ้ำลอยในอัตราส่วนที่เหมาะสม และทำการบดอัดอย่างดีแล้ว ถ้ำลอยจะเป็นวัสดุถมที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงและเกิดการยุบตัวน้อย ค่าสัดส่วนของน้ำหนักสูงสุดที่ถ้ำลอยสามารถรับได้ในการบดอัดถ้ำลอยในห้องปฏิบัติการ โดยวิธีบดอัดมาตรฐาน (standard compaction) จะอยู่ในช่วงร้อยละ 18-45 และค่าความหนาแน่นสูงสุด (maximum dry unit weight) จะอยู่ในช่วง 9-16 kN/m<sup>3</sup> แต่ในสนามเป็นการยากที่จะบดอัดถ้ำลอยให้ได้ความหนาแน่นสูงสุด โดยปกติมักจะกำหนดให้บดอัดได้ที่ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่าร้อยละ 90 ของความหนาแน่นสูงสุด

กำลังอัด (unconfined compressive strength) ของถ้ำลอยนอกจากจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นจากการบดอัดแล้วยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีด้วย ถ้ำลอยที่ได้จากการบดอัดแล้วจะมีน้ำหนักเบา และมีกำลังอัดสูงเมื่อเทียบกับดินซึ่งมักจะใช้เป็นวัสดุถมโดยทั่วไป ดังนั้นความนิยมในการนำเอาถ้ำลอยไปใช้เป็นวัสดุถมในพื้นที่ที่เป็นชั้นดินอ่อนเนื่องจากข้อได้เปรียบ



ผสมอยู่ด้วยเพื่อแทรกภายในช่องว่างระหว่างเม็ดหินย่อยเพื่อเป็นการช่วยลดปริมาณยางแอสฟัลต์ที่จะต้องใช้ และทำให้ส่วนผสมมีความหนาแน่นสูงเมื่อได้รับการบดอัด ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันคือฝุ่นที่เกิดจากการโม่หินปูน (lime stone dust) ผลงานวิจัยในหลายประเทศได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าลอยเป็นฟิลเลอร์แทนหินปูนได้

3. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้คือ

- ใช้เป็นส่วนเพิ่ม (Admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้ในงานคอนกรีต
- ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือ ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นส่วนเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้ ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่มจะมีสมบัติพิเศษดังนี้ คือ

- ข้อดี
- มีสภาพการใช้งาน (Workability) ดี
  - มีความต้านทานต่อการแยกกลุ่ม (Segregation) ดี
  - มีค่าความซึมได้ของน้ำ (Permeability) ดี
  - มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต (Sulphate resistance) ดี
  - เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ช้าทำให้ปริมาณความร้อนที่ระบายนอกในขณะที่คอนกรีตแข็งตัวมีค่าน้อย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในกรณีการเทคอนกรีต

- ข้อเสีย
- อัตราการเพิ่มของกำลังอัดช้า
  - สมบัติของเถ้าลอยแปรปรวนไม่แน่นอน ทำให้การควบคุมคุณภาพทำได้ยาก

การใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ (วิชาญ ภูพัฒน์, 2526)

เนื่องด้วยเถ้าลอยมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ด้วยจึงสามารถนำเถ้าลอยนี้ไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ได้

ไม่เฉพาะแต่งานคอนกรีตเท่านั้นที่จะสามารถใช้เถ้าลอยมาผสมทดแทนในบางส่วนของปูนซีเมนต์ได้ งานเกือบทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบก็สามารถนำเถ้าลอยไปใช้ด้วย

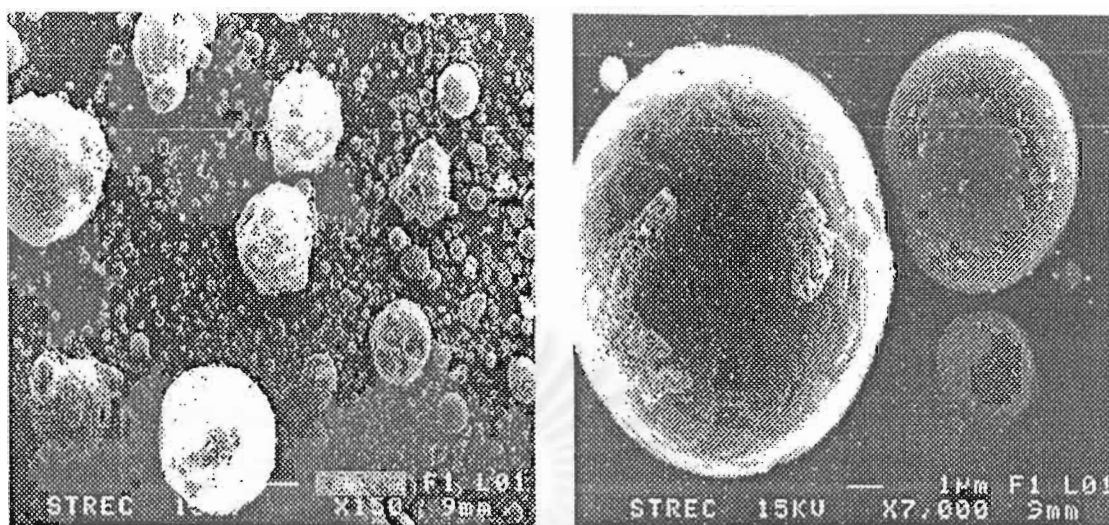
ได้เช่นเดียวกัน ตัวอย่างเช่น การผลิตคอนกรีตบดค การใช้ในการผลิตซีเมนต์กราวด์ (cement grouting) เป็นต้น การนำไปใช้อีกอย่างหนึ่งที่แตกต่างไปจากแนวทางที่กล่าวมาในข้างต้นคือ ใช้ทำมวลรวมเบา (light weight aggregate) ในกรณีนี้ถ้าล้อยจะถูกนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000 – 1,200 °C ซึ่งจะทำให้เม็ดถ้าล้อยเกาะตัวเป็นก้อนที่แข็งมาก และสามารถใช้เป็นมวลรวมแทนหินย้อยได้ มวลรวมนี้จะเบาว่าหินย้อยธรรมดาามากซึ่งเป็นข้อได้เปรียบเมื่อใช้เป็นมวลรวมในคอนกรีตสำหรับงานอาคาร

2.1.8 ถ้าล้อยโรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะ (วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538; ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526; วิชาญ ภูพัฒน์, 2526 และ อนิรุทธ์ ธงไชย, 2528)

ถ่านหินที่ใช้ในโรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะเป็นถ่านหินลิกไนต์ที่มีคุณภาพค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินที่ใช้กันส่วนใหญ่ในต่างประเทศ ทำให้ถ้าล้อยที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบที่แตกต่างจากประเทศอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 และ ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพของถ้าล้อยโรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะ

สมบัติทางกายภาพ	ปีพุทธศักราช	
	2534	2535
ความถ่วงจำเพาะ	1.99	2.51
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m <sup>2</sup> /kg)	270.6	295.7
ร้อยละสารที่หายไปในการเผาไหม้	0.64	0.69
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	1261.2	1268.1



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.1 ภาพถ่ายเถ้าลอยลึกลงในดิ่งจากเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM)

(ก) กำลังขยาย 150 เท่า

(ข) กำลังขยาย 7,000 เท่า

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยถ่านหินแหล่งต่าง ๆ (Querol and Other, 1997)

ร้อยละส่วนประกอบ ทางเคมีเฉลี่ย	แหล่งเถ้าลอยถ่านหิน		
	แม่เมาะ ประเทศไทย	Compostilla ประเทศสเปน	Teruel ประเทศสเปน
SiO <sub>2</sub>	42.7	49.8	47.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.6	26.1	25.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.5	8.4	16.6
CaO	13.1	2.7	5.6
MgO	2.2	2.4	1.2
SO <sub>3</sub>	3.0	0.3	0.6
Na <sub>2</sub> O	1.2	0.8	0.2
K <sub>2</sub> O	2.7	4.3	1.6
TiO <sub>2</sub>	0.3	1.0	0.8

จะเห็นได้ว่าถ้ำลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีสมบัติบางประการที่แตกต่างจากถ้ำลอยที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในต่างประเทศ คือ

1. ปริมาณซิลิกาและอะลูมินาของถ้ำลอยแม่เมาะนั้นค่อนข้างจะต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับของต่างประเทศ
2. ปริมาณปูนขาว (CaO) ของถ้ำลอยแม่เมาะนั้นสูงมากเมื่อเทียบกับของต่างประเทศ
3. ปริมาณซัลเฟต (SO<sub>2</sub>) ในถ้ำลอยแม่เมาะสูงกว่าของต่างประเทศ

ซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาปัสโซลานิก การที่ถ้ำลอยแม่เมาะมีส่วนประกอบส่วนนี้น้อยกว่าปรกตินั้นจะเป็นสาเหตุทำให้ไม่สามารถใช้ผสมกับซีเมนต์ได้มากนักในการนำไปใช้ในงานคอนกรีตเพราะจะทำให้กำลังอัดลดลง

มาตรฐาน ASTM ได้กำหนดไม่ให้มีปริมาณซัลเฟตเกินร้อยละ 5 ในส่วนผสมคอนกรีตโดยทั่วไป เพราะซัลเฟตในปริมาณมากจะทำให้คอนกรีตหดและขยายตัวได้มากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นในคอนกรีตซึ่งอาจจะเป็นเหตุให้เกิดรอยร้าวจากการหดตัว (shrinkage crack) ได้ จะเห็นได้ว่าถ้ำลอยแม่เมาะมีปริมาณซัลเฟตสูงมาก ดังนั้นก่อนที่จะมีการนำไปใช้ในงานคอนกรีตอย่างจริงจังจำเป็นต้องการศึกษาถึงอิทธิพลของซัลเฟตนี้ให้แน่ชัดเสียก่อน

สำหรับถ้ำลอยโดยทั่วไปเมื่อใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติ (stabilizer) สำหรับขอยแอกกรีเกต มักจะต้องใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์และปูนขาวเพราะ โดยลำพังถ้ำลอยจะมีปฏิกิริยาปัสโซลานิกเกิดขึ้นน้อย แต่จะเห็นได้ว่าถ้ำลอยแม่เมาะมีปูนขาวเป็นส่วนประกอบในอัตราค่อนข้างสูง ดังนั้นอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ร่วมกับปูนขาวหรือปูนซีเมนต์อีก จากการศึกษากำลังอัดของดินทรายปนซิลต์ (silty sand) เมื่อผสมกับถ้ำลอย และปูนขาวแล้วบดอัดให้แน่นพบว่า ตัวอย่างที่ผสมด้วย ถ้ำลอยร้อยละ 27 และปูนขาวร้อยละ 3 ให้กำลังอัดเฉลี่ย 9181 kN/m<sup>2</sup> ตัวอย่างที่ผสมด้วยถ้ำลอยร้อยละ 27 อย่างเดียวให้กำลังอัดเฉลี่ย 9913 kN/m<sup>2</sup> ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปูนขาวร้อยละ 3 ไม่ได้ช่วยให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นเลย ในทางตรงกันข้ามกลับทำให้กำลังอัดลดลง

ด้วยเหตุผลข้างต้นถ้ำลอยแม่เมาะเมื่อมีการบดอัดแล้วปล่อยให้จะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นได้ด้วยตัวเอง จึงสามารถนำไปใช้ในชั้นรองพื้นทางของถนนได้โดยไม่ต้องใช้ปูนขาวหรือปูนซีเมนต์เป็นสารผสมเพิ่ม

การใช้ประโยชน์ถ้ำลอยแม่เมาะที่น่าจะเป็นไปได้มากที่สุดในปัจจุบัน คือ ใช้เป็นสารปรับปรุงสมบัติขอยแอกกรีเกตให้แข็งแรงพอที่จะใช้แทนหินคลุกในชั้นพื้นทางของถนนลาดยาง วิธีการใช้สามารถใช้หลักการเดียวกันกับการใช้ปูนซีเมนต์ในการปรับปรุงสมบัติดินลูกรัง สำหรับการนำ

ไปใช้ในงานคอนกรีตนั้นถ้าลอมแม่เมาะมีสมบัติบางอย่างที่ไม่ได้มาตรฐาน ASTM จึงอาจทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพของคอนกรีต

## 2.2 ซีโอไลต์ (Zeolite) (วิภายู บุญเจริญสุข, 2537; Breck D.W., 1974; Dyer, A., 1988)

### 2.2.1 ประวัติซีโอไลต์

คำว่า "ซีโอไลต์" มาจากภาษากรีกสองคำคือ ζεῖν แปลว่า ต้ม (to boil) และ λίθος แปลว่า หิน (a stone) เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกแล้วจะเกิดฟอง และไอน้ำออกมาจากก้อนผลึก แรกกลุ่มนี้ประกอบไปด้วยอะลูมิโนซิลิเกตของแอลคาไล หรือแอลคาไลเอิร์ทที่มีน้ำอยู่ในโครงผลึก ซีโอไลต์ที่ค้นพบขณะนั้น คือ Stibite

A. Damour (1840) ได้ค้นพบว่าเมื่อผลึกซีโอไลต์ที่มีน้ำอยู่ในโครงผลึก (hydrated zeolites) จะสูญเสียน้ำจากการดีไฮเดรชัน (Dehydration) แล้วจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (spongy-framework) ซึ่งสามารถดูดซับแอลกอฮอล์ เบนซีน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดออกไซด์ และปรอทได้

H.S. Thomson (1845) ได้ทำการทดลองแล้วพบว่าดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้ เมื่อเทสารละลายของเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อทำการกรองจะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียจะถูกดินดูดซับเอาไว้ ต่อมา J.T. Way ได้แสดงให้เห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำในผลึกในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

F. Grandjean (1909) ได้ทำการทดลองการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง คือ chabazite พบว่าสามารถดูดซับแก๊สแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน ไอโอดีน คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และโบรมีนที่อุณหภูมิสูงได้แม้แต่ไอของปรอทก็อาจถูกดูดซับได้

Weigel และ Steinhof (1925) ค้นพบว่าซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกดูดซับสารอินทรีย์ โมเลกุลเล็กๆ และปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ๆ ออกมา ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดย McBain ในปี ค.ศ. 1932 โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า "Molecular sieving"

Dent Smith (1933) ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ชื่อ chabazite

Union Carbide Corporation (1948) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซีโอไลต์ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมแรกและได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอขึ้นมาโดย Reed และ Breck (1956)

ปี 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ของ faujasite ซึ่งเกิดในธรรมชาติ และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ขึ้น

ในยุคแรกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะทำภายใต้ภาวะที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำได้ซีโอไลต์ชนิดเดียวกันกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมา Milton และคณะทำงาน (1959) ของบริษัท Union Carbide ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้สารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงทำปฏิกิริยาในภาชนะปิด หรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการ และเทคนิคนี้ได้ถูกพัฒนาขยายออกไปมากขึ้นเพื่อใช้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์

เป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี 1948 จนถึงปี 1972 นั้นพบว่ามีผลงานวิจัยเกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของซีโอไลต์เกิดขึ้นกว่า 7,000 เรื่อง นอกจากนี้ยังมีเอกสารสิทธิบัตรอีกกว่า 2,000 ฉบับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลต์ในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ นอกจากนี้มีรายงานว่ามีการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำได้ตั้งแต่ปี 1862 แต่ Breck (1862) ได้ให้ความเห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้ในขณะนั้นไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน และสารบางตัวยังไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่แน่นอนได้ด้วย ดังนั้นเขาจึงเชื่อว่าการสังเคราะห์ครั้งแรกที่สามารถพิสูจน์ได้ เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด analcime โดย Barrer (1951)

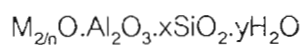
ปี 1980 ได้มีการค้นพบซีโอไลต์ในธรรมชาติกว่า 40 ชนิด และซีโอไลต์กว่า 100 ชนิดได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา ในขณะที่มีความต้องการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์อย่างมากในเชิงพาณิชย์แต่ความต้องการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติยังคงมีอยู่อย่างจำกัด กล่าวคือ จะมีการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติก็ต่อเมื่อการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ในพื้นที่นั้นไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ทั้งในด้านการทดลอง และในด้านอุตสาหกรรม

### 2.2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ คือ ผลึกของอะลูมิโนซิลิเกตที่มีน้ำผลึกของโลหะแอลคาไล หรือแอลคาไลเอิร์ทซึ่งโดยมากจะเป็นโลหะโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเทียม (Sr) และแบเรียม (Ba) โดยโครงสร้างของซีโอไลต์จะมีลักษณะเป็นโครงร่าง 3 มิติของอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{AlO}_4$ ) และซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{SiO}_4$ ) ซึ่งประกอบกันเป็นอะลูมิโนซิลิเกตโดยการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอมแบบไม่สิ้นสุดคือเป็นโคพอลิเมอร์ (copolymer)



สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ



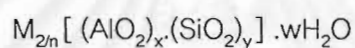
n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) ส่วนมากมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 2 ของโลหะ

แอลคาไล หรือแอลคาไลเอิร์ท

x คือ จำนวนโมลของ  $SiO_2$  โดยมากจะมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์

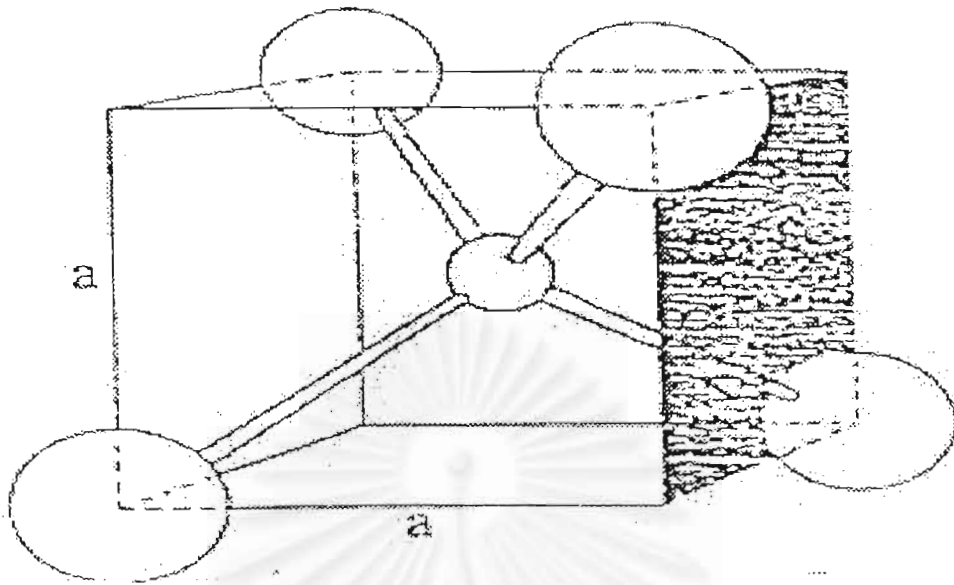


n คือ วาเลนซ์ของไอออนบวก (M)

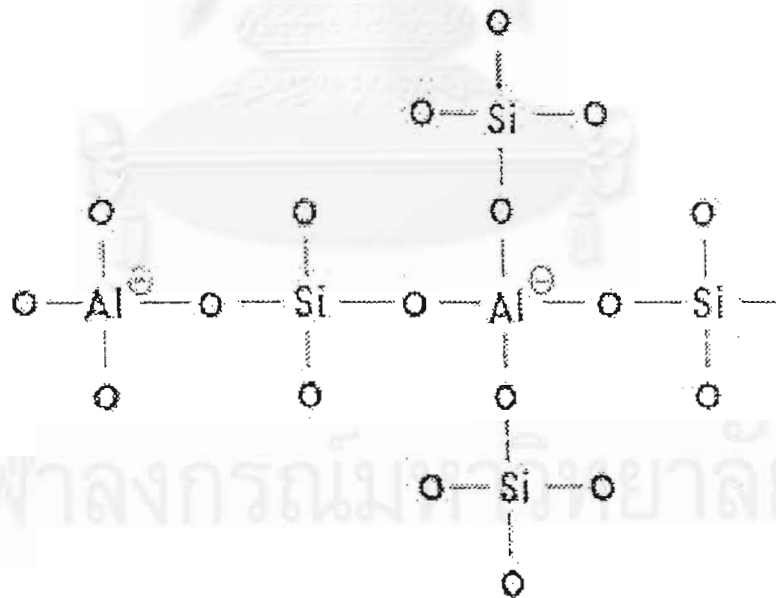
w คือ จำนวนโมลของน้ำต่อหน่วยเซลล์

x+y คือ จำนวนรูปทรงเตตระฮีดรอลทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x มักจะมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง



รูปที่ 2.2 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม  
ในหน่วยเล็กๆ (sub unit) ของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ)



รูปที่ 2.3 โครงสร้าง 2 มิติ ของอะลูมิโนซิลิเกต

ซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{SiO}_4$ ) จะมีประจุเป็นลบสี่ และอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $\text{AlO}_4$ ) มีประจุเป็นลบห้า

การเชื่อมต่อกันของซิลิกอน-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลกับอะลูมิเนียม-ออกซิเจนเตตระฮีดรอลเป็นโครงร่างตาข่ายนั้นทำให้มีประจุลบเกิดขึ้น เนื่องจาก  $\text{Al}^{3+}$  เข้าไปแทนที่  $\text{Si}^{4+}$  ในโครงสร้างซึ่งถูกทำให้สมดุลโดยประจุบวกจากแคตไอออนของโลหะแอลคาไล หรือแอลคาไลเอิร์ท ดังสมการ



M คือ แคตไอออนของโลหะที่มีประจุ +m

x คือ จำนวนอะตอมของอะลูมิเนียม (Al)

n คือ จำนวนโมลของ  $\text{SiO}_2$

ซีโอไลต์สามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ

1. ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (Mineral Zeolites or Naturally Occuring Zeolites) ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิเนียมซิลิเกตของมอนอหรือไดวาเลนต์เบส (mono-or divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำในผลึกบ้างบางส่วน หรือทั้งหมดโดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างซีโอไลต์จากธรรมชาติได้แก่ faujasite, erionite, offretite, chabazite, gmelinite, mordenite และ heulandite เป็นต้น

เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตาม Hydrological system ได้ดังนี้ คือ

1.1 Saline, Alkaline Lakes แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ arid region และ semiarid region การตกตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ close basin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการควบคุม lake chemistry

1.2 Saline, Alkaline soils ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ใน Saline, Alkaline soils การก่อตัวใน arid region และ semiarid region เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวดิน ที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไดคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดิน แล้วจะ

ละลายโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไดคาร์บอเนต ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น และทำให้เกิดอลูมิโนซิลิเกตในพื้นที่ดินขึ้น

1.3 Marine Sediments ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำ และค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง

1.4 Open Hydrologic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

1.5 Hydrothermal Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีแอลคาไลกับสายละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หินและลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ตื้นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite

1.6 Burial Diagenetic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)

1.7 Magmatic Systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างใน interstitial และ globules

1.8 เป็นซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟในประเทศเยอรมัน ช่องว่างภายในผลึกจะเต็มไปด้วย analcime, clinoptilolite, erionite, harmotome และ phillipsite

## 2. ซีโอไลต์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี (Synthetic Zeolites)

ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสิกออกไซด์ต่างๆ เช่น  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  และ  $K_2O$  ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำในผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล (gelation) เป็นรูพรุน (porous) และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย (sandlike) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่จะได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมีวิธีการเรียกชื่อได้หลายวิธี เช่น วิธีการเรียกชื่อที่คล้ายระบบของ IUPAC โดยเรียกชื่อเป็นสารประกอบเชิงซ้อน 1 หน่วยเซลล์ เช่น

- analcime ( $Na_{16}(AlO_2)_{15}(SiO_2)_{32}16H_2O$ ) เรียกว่า โซเดียม-16-อะลูมิโน-32-ซิลิเกต-16-น้ำ
- Jadeite ( $Na_4Al_4Si_8O_{24}$ ) เรียกว่า โซเดียม-4-อะลูมิโน-8-ซิลิเกต

- Zeolite A ( $\text{Na}_{12}(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12} \cdot 27\text{H}_2\text{O}$ ) เรียกว่า โซเดียม-12-อะลูมิโน-12-ซิลิเกต-27-น้ำ

การเรียกชื่อดังกล่าวต้องมีความรู้เกี่ยวกับหน่วยเซลล์ สำหรับวิธีอื่นๆ เช่น การใช้ตัวอักษรหรือกลุ่มอักษร และตัวเลข เป็นต้น ซึ่งวิธีหลังจะเป็นที่นิยมกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์จากธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่าและยังมีความบริสุทธิ์สูงกว่า ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับงานอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่เหมือนกันทุกครั้งโดยเฉพาะสารเจือปนที่อยู่ในซีโอไลต์ธรรมชาติ เช่นปริมาณเหล็กเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้เกิดความเสียหายในปฏิกิริยา heterogeneous catalyst

### 2.2.3 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์

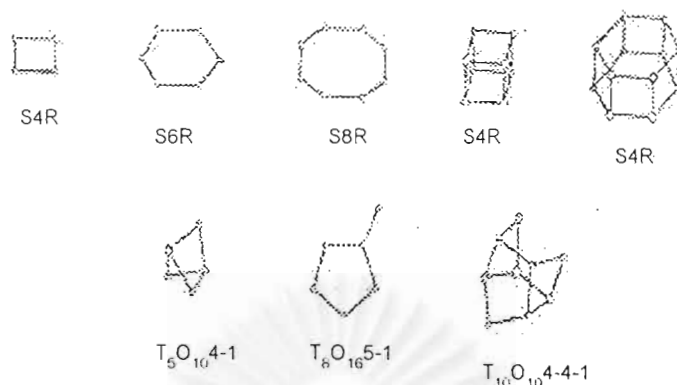
1. หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Units) ซึ่งเป็นหน่วยเล็กๆ ที่มีลักษณะคล้ายกันคือเป็นรูปทรงเตตระฮีดรอลของ  $\text{AlO}_4$  และ  $\text{SiO}_4$

2. หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units) เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิต่อกันเป็นวงรูปเหลี่ยมต่างๆ เป็นวงเดี่ยว เช่น  $\text{S}_4\text{R}$ ,  $\text{S}_6\text{R}$ , หรือต่อเป็นวงคู่ เช่น  $\text{D}_4\text{R}$ ,  $\text{D}_6\text{R}$  ดังรูปที่ 2.4

Breck (1974) แบ่งชนิดของซีโอไลต์ตามโครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Units : SBU) ได้ 8 ชนิดในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 การแบ่งชนิดของซีโอไลต์ของ Breck (1974) ตามโครงสร้างทุติยภูมิ

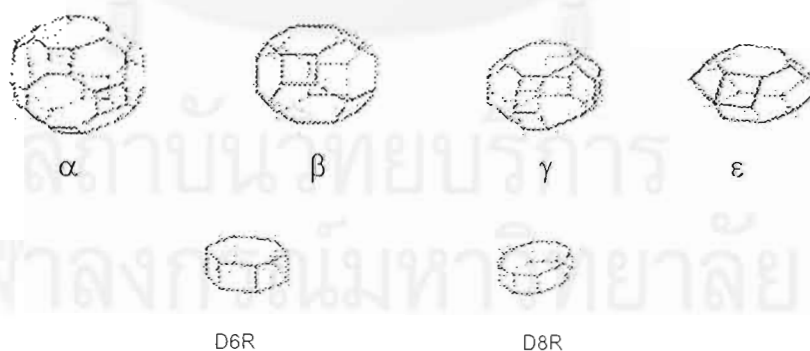
ชนิด	ลักษณะหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ
1	วงเดี่ยว 4 มุม (single 4-ring, $\text{S}_4\text{R}$ )
2	วงเดี่ยว 6 มุม (single 6-ring, $\text{S}_6\text{R}$ )
3	วงเดี่ยว 8 มุม (single 8-ring, $\text{S}_8\text{R}$ )
4	วงคู่ 4 มุม (Double 4-ring, $\text{D}_4\text{R}$ )
5	วงคู่ 6 มุม (Double 6-ring, $\text{D}_6\text{R}$ )
6	วงเชิงซ้อน 4-1 (Complex 4-1, $\text{T}_5\text{O}_{10}$ 4-1)
7	วงเชิงซ้อน 5-1 (Complex 5-1, $\text{T}_5\text{O}_{10}$ 5-1)
8	วงเชิงซ้อน 4-1-1 (Complex 4-1-1, $\text{T}_{10}\text{O}_{20}$ 4-1-1)



รูปที่ 2.4 ลักษณะหน่วยโครงสร้างพหุติยภูมิ

3. หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (Polyhedral units) เป็นรูปทรงขนาดใหญ่ที่สมมาตรได้จากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นทรงที่สลับซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น

- รูปทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ  $\beta$  (truncated octahedral type)
- รูปทรงยี่สิบหกหน้า หรือ  $\alpha$  (truncate cubooctahedron)
- รูปทรงสิบแปดหน้า หรือ  $\gamma$  (18-hedron)
- รูปทรงสิบเอ็ดหน้า หรือ  $\epsilon$  (11-hedron)      ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่

นอกจากนี้อาจแบ่งซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมต่อกันของโครงสร้าง 8 ชนิด ข้างต้นดังนี้

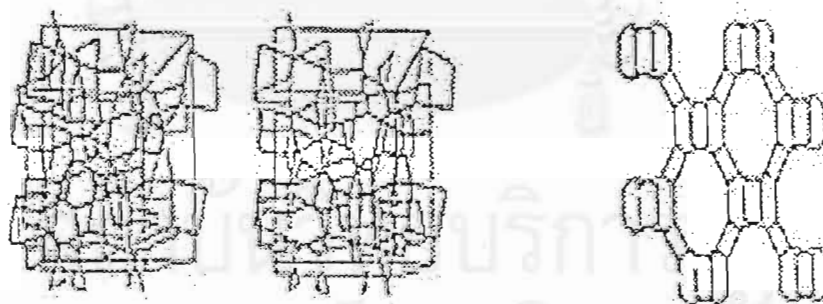
1. Analcite Group เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring โดยจะมี 2 รูปแบบ คือ Analcite และ Laumonite ดังรูปที่ 2.6

2. Natrolite Group มีลักษณะโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกันจะมี 3 รูปแบบคือ Natrolite, Edingtonite และ Thosonite ดังรูปที่ 2.7 (ก)

3. Chabazite Group โครงสร้างประกอบไปด้วย 6-ring ต่อขนานกัน ซึ่งมีการต่อเชื่อมกันมากมายหลายรูปแบบ เช่น แบบ Offretite และ Reionite ดังรูปที่ 2.8

4. Phillipsite Group โครงสร้างประกอบด้วย 4-ring ที่ต่อขนานกันแบบ U (up) และ D (down) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 2.9

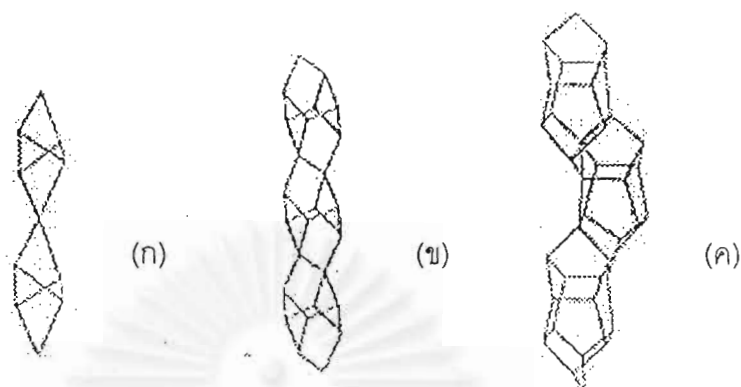
5. Heulandire Group โครงสร้างเกิดจาก 5-ring 4 วงต่อเชื่อมกับ 4-ring 2 วง ซึ่งจะเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ถ้าการเชื่อมโยงผ่านโครงสร้างตรงกลางรูปแบบพันธะก็จะเป็นแบบในรูปที่ 2.7 (ข) ซึ่งเมื่อเชื่อมโยงต่อกันจะทำให้เป็นแบบ Brewsterite การเชื่อมต่อของบล็อกโดยผ่านโครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้เกิดโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ heulandite และ stibite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่เป็น 5-ring ในบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก)



(ก)

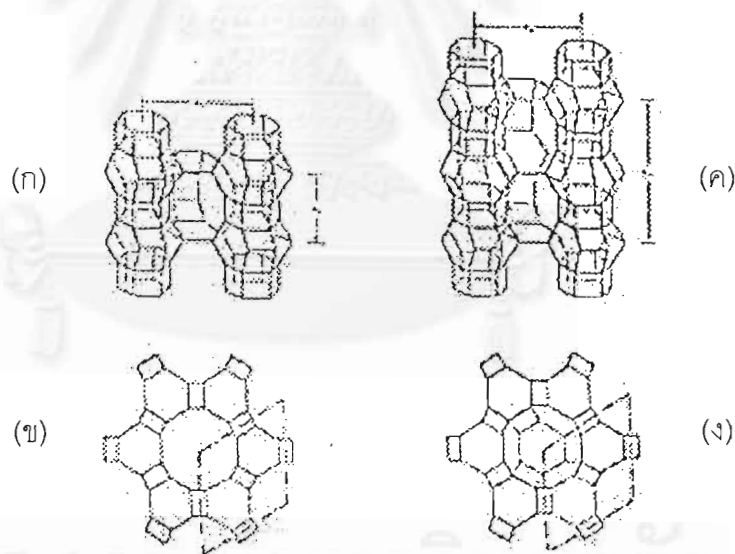
(ข)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ (ก) analcite (ข) laumonite



รูปที่ 2.7 โครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ

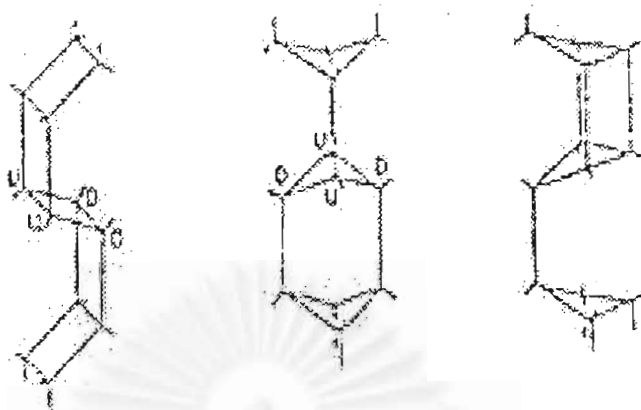
(ก) natrolite (ข) Brewsterite (ค) ZSM-5



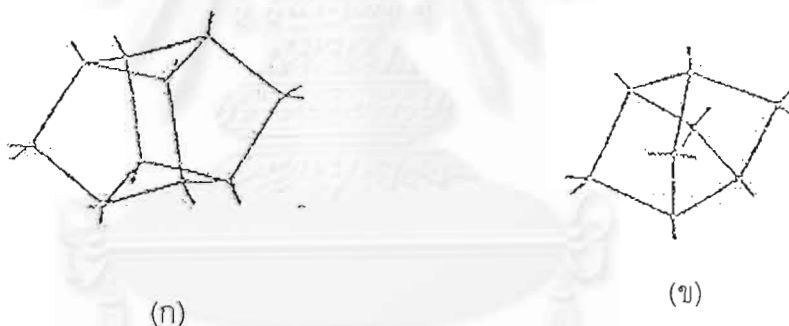
รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างของ Offretite และ Erionite

(ก) Offretite (ข) c-projection of offretite (ค) erionite (ง) c-projection of erionite





รูปที่ 2.9 สายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UUDD, UDUD และ UDUU



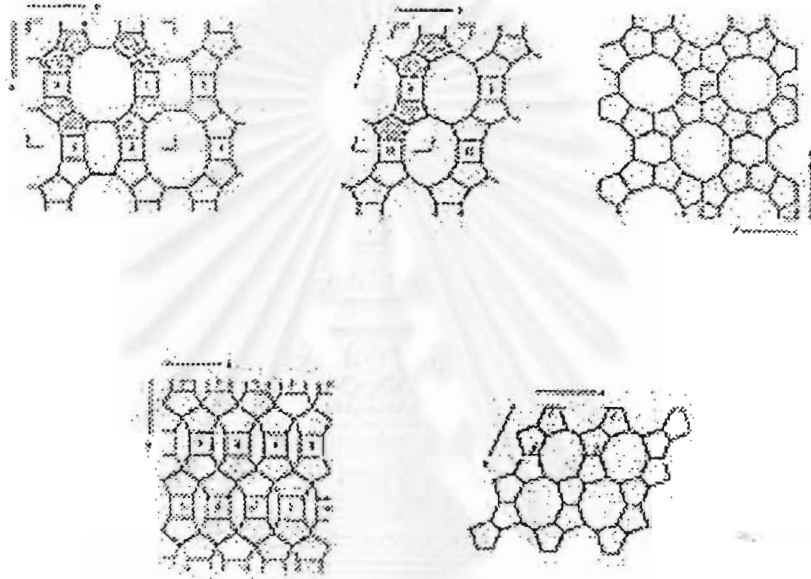
รูปที่ 2.10 หน่วยทุติยภูมิใน (ก) Heulandite Group (ข) Mordenite Group

6. Mordenite Group โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring 4 วงต่อเชื่อมกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม กลุ่มนี้จะมีทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ mordenite, epstilbite, ferrierite, bikitaite, dachiardite (แสดงในรูปที่ 2.11), ZSM-5 (แสดงในรูปที่ 2.12) และ ZSM-11

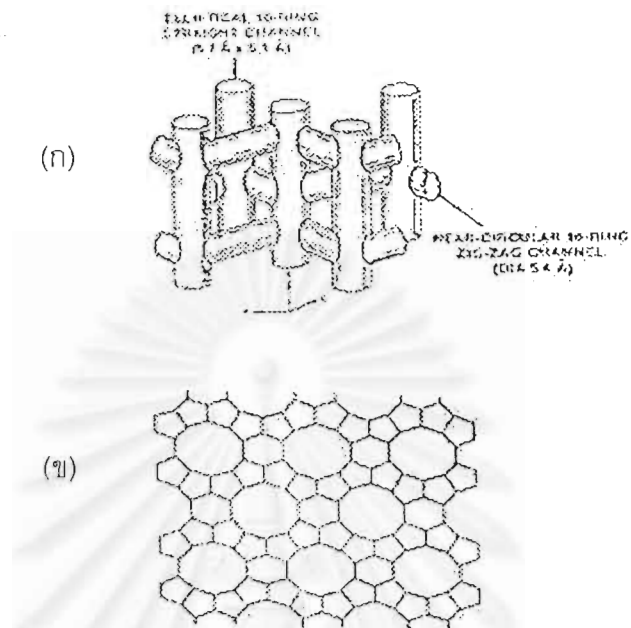
7. Faujasite Group ซีโอไลต์กลุ่มนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ Sodalite, A, ZK-5 ดังแสดงในรูปที่ 2.13

8. Melanophlogite Group ในกลุ่มนี้ประกอบไปด้วย ZSM-39 และ melanophlogite ซึ่งแต่ละหน่วยที่ประกอบเป็น Melanophlogite และ ZSM-39 จะมีหลายรูปแบบเช่น 12-hedron, 14-hedron, 15-hedron และ 16-hedron ดังแสดงในรูปที่ 2.14, 2.15 และ 2.16

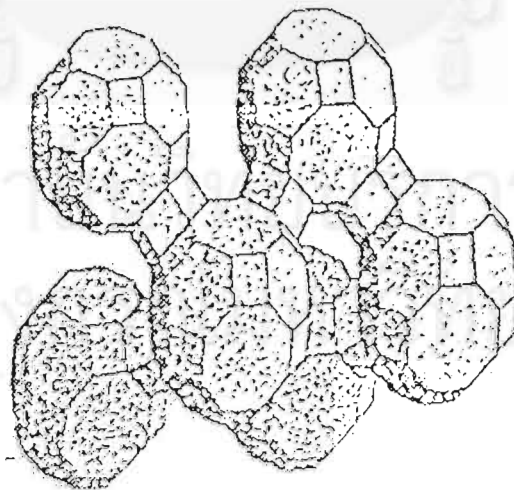
9. Lovdarite Group เป็นซีโอไลต์ที่โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring และ 8-ring ดังแสดงในรูปที่ 2.17



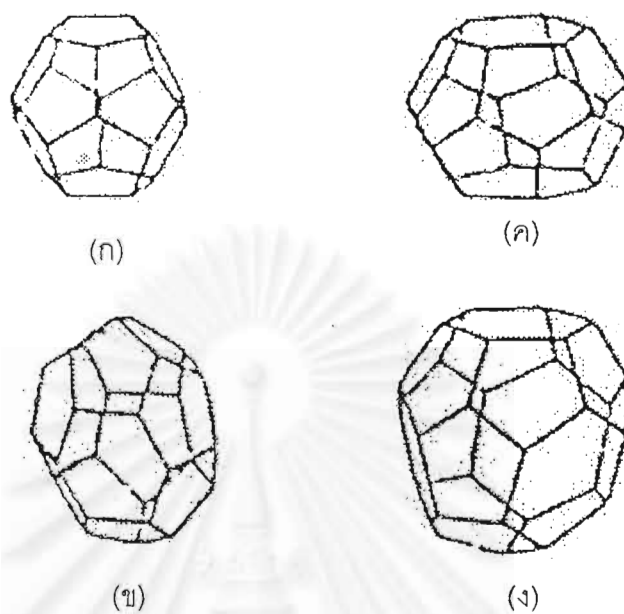
รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างตามแนวโปรเจกชันหลักของ modenite, dachiardite, ferrierite, epstilbite, bikitaite



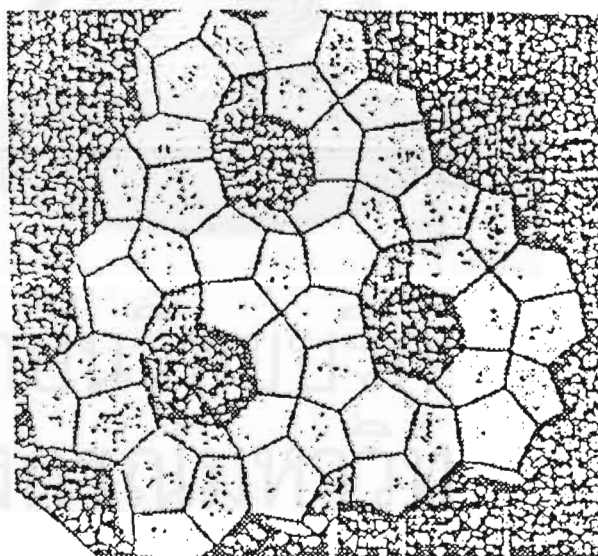
รูปที่ 2.12 (ก) ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-5 (ข) ภาพร่างพื้นที่ผิวของ ZSM-5



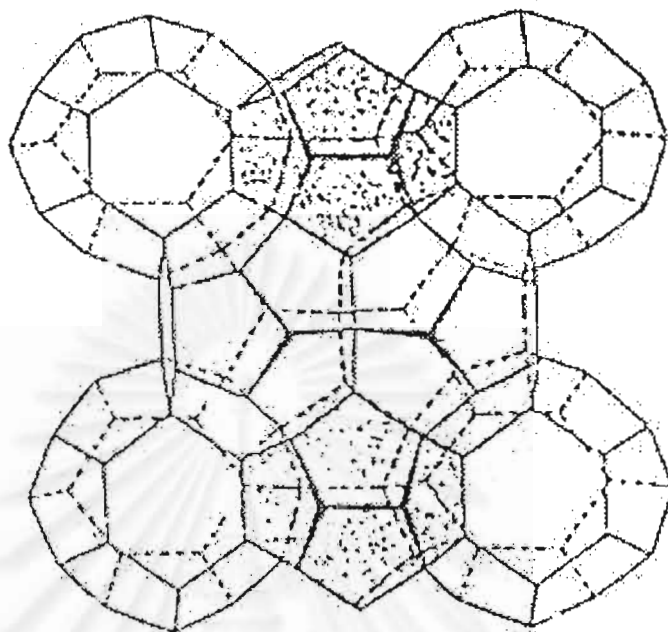
รูปที่ 2.13 การจัดเรียงตัวของ ZK-5



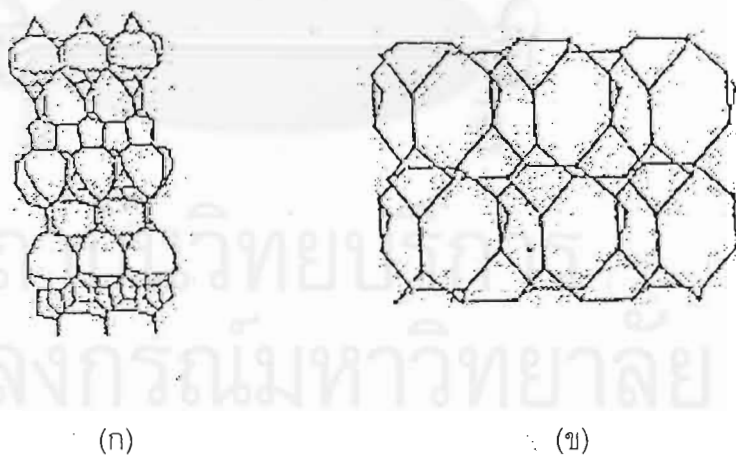
รูปที่ 2.14 หน่วยพอลิฮีดรอนต่างๆ ในโครงสร้างของ Melanophlogite และ ZSM-39  
 (ก) 12-hedron (ข) 14-hedron (ค) 15-hedron (ง) 16-hedron



รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39



รูปที่ 2.16 ลักษณะโครงสร้างของ Melanophlogite



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.17 ลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite

#### 2.2.4 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

การสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยทั่วไปจะใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Treatment) และวิธีสังเคราะห์ซิลิเกต (silicate) ในช่วงเวลากว่า 100 ปีที่ผ่านมา มีการค้นพบวิธีการสังเคราะห์ขึ้นได้หลายวิธีดังแสดงในตารางที่ 2.4 ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล นั้นเราจะทำให้แหล่งของอลูมินา ซิลิกา และแอลคาไล รวมตัวกันเป็นเจลที่มีลักษณะไม่เป็นสารเนื้อเดียวกัน และจะก่อตัวขึ้นเป็นผลึกอย่างช้าๆ ภายในช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยา อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วง 150 °C หรือสูงกว่านั้นที่ความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น ในบางครั้งอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์ได้มากกว่าหนึ่งชนิด

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ท้ายสุดจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์หลายอย่างซึ่งประกอบไปด้วย อัตราส่วนของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ของสารตั้งต้น อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของไอออนบวกของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่ โดยปกติการก่อตัวของซีโอไลต์มีความสลับซับซ้อนมาก แต่แนวความคิดหลักนั้นอยู่ที่ว่า ไอออนบวกที่มีอยู่นั้นจะช่วยทำให้เกิดแรงกระทำต่อแม่แบบ (templating action) ได้ดีขนาดไหน ซึ่งเป็นการนำสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์มาใช้เป็นแม่แบบ หรือแม่พิมพ์ เพื่อให้อะตอมของสารที่ต้องการให้เกิดผลึกเข้ามาเกาะทำให้โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะโครงสร้างเหมือนโครงสร้างของแม่แบบนั้นๆ ในขั้นตอนสุดท้ายของการสังเคราะห์นั้นสารที่นำมาเป็นแม่แบบจะถูกกำจัดออกไปเหลือแต่โครงสร้างผลึกของสารที่ต้องการเท่านั้น ตัวอย่างของสารอินทรีย์ที่เรานำมาเป็นแม่แบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ 4 ชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 สรุปการสังเคราะห์ซีโอไลต์ประเภทต่างๆ (Breck D.W. 1974)

ค.ศ.	ซีโอไลต์	Hydrothermal Method	ผู้ค้นพบ
1862	Leynite	K silicate + Na aluminate, 170 °C	St. Claire Deville
1880	Analcime	Na silicate + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> glass, 180 °C	A. de Scheulten
1882	Analcime	Na silicate + Na aluminate, 180 °C	A. de Scheulten
1883	Analcime	SiO <sub>2</sub> , NaOH solution. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 400 °C	C.Friedel, E. Sarasin
1885	Analcime	Conversion of chabazite, 200 °C	J. Lamberg
1887	Analcime	Kaolin + Na silicate, 200-220 °C	J. Lamberg
	Analcime	Feldspars + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ,200 °C	
	Natrolite	Scolecite + NaCl	
	Chabazite	Feldspars + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ,100 °C	
1890	Chabazite	Recrystallization, 150-170 °C	C. Doelter
	Heulandite	Anorthite + H <sub>2</sub> O + CO <sub>2</sub> , 200 °C	
	Analcime	Na <sub>2</sub> O+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O,100-200 °C	
	Seolecite	Recrystallization	
1894	Natrolite	Anorthite , 174-177 °C	St. J. Thugutt
1896	Thomsonite	Muscovite + NaOH, 200 °C	C. Friedel
1906	Analcime	Nepheline + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O, 200 °C	C. Doelter
	Natrolite	Na <sub>2</sub> O, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , 90 °C	
1916	Analcime	Aduraria + NaAlO <sub>2</sub> , 280 °C	E. A. Stephenson
1918	Analcime	Na <sub>2</sub> O, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , 300 °C	W. J. Muller
1927	Mordenite	Feldspars+Carbonate,400 °C insteam	R. J. Leonard
	Phillipsite	At low pressure.	
1929	Natrolite	Paragonite + NaOH, 400 °C	E. Gruner
1936	Analcime	Na silicate + Na aluminate, 282 °C	F. G. Straub

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นแบบในการก่อตัวเป็นโครงสร้างของผลึกซีโอไลต์

ZSM-5 type	$\Omega$ type	Femirite type	ALPO 4-5 type
Na	TMA	Na + K	TEAOH
TPA	Pyrrolidine	Sr	TPAOH
TDA	DABCO	Li+Sr(Ba)+seed	Choline hydroxide
Propylamine		Choline	Et3N
EDA		Pyridine	Pr3N
Ethanolamine		Ethylenediamine	(CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH) <sub>3</sub> N
Methylquinuclidine		1,3-Diaminopropane	Cyhexylamine
NH <sub>3</sub> + alcohol		1,4-Diaminobutane	N.N' –
			Dimethylbenzylamine
Alcohol		2,4-Pentanedione	Diethylethanolamine
Glycerol		N-methylpyridimium	Amino
			Diethylethanolamine

### 2.2.5 ประโยชน์ของซีโอไลต์

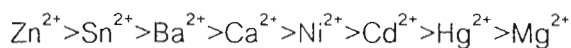
จากลักษณะพิเศษของซีโอไลต์ได้มีผู้นำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมายซึ่งพอจะรวบรวมได้ดังนี้ คือ

1. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (Alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน
2. ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorpton agent) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆ ได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
3. สารลดความกระด้าง (Water softener) ซีโอไลต์ใช้เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำได้ เนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในโครงร่างผลึกกับแคลเซียมไอออน หรือแมกนีเซียมไอออน
4. ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) จากสมบัติการแลกเปลี่ยน



แคตไอออนของซีโอไลต์ทำให้สามารถนำไปใช้เป็นเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนของไดวาเลนต์ (divalent) ได้

สำหรับแคตไอออนที่เป็นไดวาเลนต์ (divalent) มีดังนี้



การแลกเปลี่ยนไอออนจะขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของแคตไอออน
- อุณหภูมิที่ใช้
- ความเข้มข้นของแคตไอออนในสารละลาย
- ชนิดของแอนไอออนที่รวมตัวกับแคตไอออนในสารละลาย
- ตัวทำละลาย(การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน Aqueous Solution)
- ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์

5. ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (Capacity) และจลนพลศาสตร์สูง(Kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคตไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตได้อีกด้วยเนื่องจากฟอสเฟตที่ผสมในผงซักฟอกถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหามลภาวะได้ คือ ฟอสเฟตจะทำให้พีชน้ำ หรือพวกสิ่งมีชีวิตเล็กๆ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัดเมื่อมีการตาย และเมื่อทับถมกันมากเข้าจะทำให้แม่น้ำเน่าเสีย นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณสัตว์น้ำลดลงได้เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย

ตัวอย่างการนำสารซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ

#### 1. การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสียของชุมชน

ในการศึกษาช่วงเริ่มต้นโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อกำจัดแอมโมเนียมในกระบวนการกำจัดน้ำเสียพบว่า สารอินทรีย์หลายชนิดมีความสามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดักจับไอออนของแอมโมเนียมได้ต่ำ ทำให้กำจัดแอมโมเนียมได้น้อยและเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำเค็มตามมาด้วย

วิธีที่เหมาะสมที่ดีกว่าถูกนำเสนอเป็นรายงานโดย Ames ได้แสดงให้เห็นว่าได้มีการใช้ซีโอไลต์หลายชนิดที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ และให้ผลดีกว่าแบบดั้งเดิม ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite และ Union Carbide's 400 เป็นซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดหลังจากการทดสอบโดยใช้ในโรงงานต้นแบบพบว่าแอมโมเนียมนั้นถูกกำจัดออกไปได้มากถึงร้อยละ 95

## 2. การเติมซีโอไลต์ชนิดที่ใช้ในการคัดเลือกโมเลกุลสารได้ลงในผงซักฟอก

หน้าที่หลักของฟอสเฟตที่ผสมอยู่ในผงซักฟอก คือ ลดแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ที่มีอยู่ในน้ำกระด้างโดยใช้ซีโอไลต์ชนิดผงที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ไปทำการกำจัดแคลเซียมไอออน ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียมไอออน ( $\text{Mg}^{2+}$ ) จากสารละลายแล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม โดยที่ผงซักฟอกเหล่านั้นจะรับโซเดียมจากซีโอไลต์ชนิด Linde ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสมซึ่งลดปริมาณของฟอสเฟตที่มีอยู่ให้อยู่ในระดับต่ำ หรือไม่มีอยู่เลยนั้นสามารถหาซื้อได้ในหลายพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และในสถานที่อื่นๆ นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบนี้มีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการสังเกตปริมาณการใช้ซีโอไลต์ในแต่ละปีพบว่ามีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้มีการใช้กันอย่างมากมายแล้วทั่วโลก

การนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้แทนสารฟอสเฟตในผงซักฟอกนั้น ในช่วงแรกนั้นวิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยเหล่านักวิทยาศาสตร์ที่บริษัท เฮลเกด (Henkel) ในประเทศเยอรมัน และบริษัท พรอคเตอร์ แอนด์ แกมเบิล (Procter & Gamble) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งในปัจจุบันมีการพัฒนาในเรื่องนี้อยู่มากมาย

## 3. การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซินโดยใช้ซีโอไลต์

เนื่องจากได้มีการตระหนักถึงเรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคต จึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่มีใช้ปิโตรเลียมและมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้ในอนาคต

เมทานอลเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ปริมาณสูงในช่วงเวลาที่สั้นจากถ่านหิน และการสังเคราะห์แก๊สโดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งโดยตรง หรือจะนำไปใช้เป็นแบบผสมกับน้ำมันเบนซินก่อนที่จะใช้กับเครื่องยนต์

กระบวนการแบบใหม่ที่ใช้ในการเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซิน คือ การใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท โมบิลออยล์ ซึ่งได้ตั้งชื่อกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ MTG (Method To Gasoline)

บริษัท โมบิล ออยล์ ได้สร้างโรงงานที่ใช้กระบวนการ MTG และได้ใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นแห่งแรกที่ โมทูเนีย ประเทศนิวซีแลนด์ และเริ่มต้นทำการผลิตในปี ค.ศ. 1985 โดยที่โรงงานแห่งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอยู่นิ่ง (fixed bed) และที่ประเทศเยอรมันก็ได้มีการพัฒนากระบวนการ MTG เหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) เพื่อนำไปใช้ผลิตได้จริงในทางการค้า และก็สามารถประสบความสำเร็จ โดยได้มีการสร้างโรงงานต้น

แบบไว้ที่เมืองเวสเซลิง (Wesseling) กระบวนการเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้ได้น้ำมันเบนซินถึงร้อยละ 90 และมีค่าออกเทน 90.25 กระบวนการที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิด์เบดได้มีการปรับปรุงกระบวนการ MTG และทำให้สามารถนำวัตถุดิบอื่นๆ เช่น แก๊สธรรมชาติ มาใช้แทนเมธทานอลได้

#### 4. การแยก กำจัด และนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

ซีโอไลต์หลายตัวมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก ทำให้สามารถนำโลหะที่มีค่าเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่ หรือเอาไว้ใช้กำจัดโลหะหนักที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และโลหะที่ปะปนอยู่ในน้ำเสียเพราะว่าเกิดความคั่งทึนในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ ซีโอไลต์ชนิด Clinoptilite และ Mordenite ถูกศึกษาเพื่อใช้กำจัดโลหะหนัก (โดยเฉพาะ Cd, Cu, Pb และ Zn) ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะได้จะทำการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะเงิน เพื่อดึงเอาโลหะเงินออกจากน้ำเสีย

### 2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

สุนีย์ ผู้มีธรรม และวิไลรัตน์ ศิริอดุลย์ (2531) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาว ชั้นแรกได้ศึกษาหาภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมเสียก่อน โดยใช้สารเคมีบริสุทธิ์คือ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) และโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ทำปฏิกิริยากันจนได้ซีโอไลต์เอ จากนั้นจึงได้เตรียมจากดินขาวที่ดีซึ่งได้มีการปรับปรุงคุณภาพแล้วให้เป็น zeolite A โดยนำดินขาวมาเผาที่อุณหภูมิ  $700^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์เมตาเคโอลิน (Metakaolin) แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 (น้ำหนัก / ปริมาตร) ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่  $95^\circ\text{C}$  โดยมีการคนอย่างแรงตลอดเวลา หลังจากทำปฏิกิริยากัน 30 นาที เติมน้ำอุ่นแล้วปล่อยให้ทำปฏิกิริยาต่อไปอีก 90 นาที ได้ผลึกของซีโอไลต์เอ ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ผลของการเตรียมผลึกของซีโอไลต์โดยใช้เทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมทรี (IR-Spectrophotometry) เอกซ์-เรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโทรโฟโตเมทรี (X-rays Diffraction Spectrophotometry) และอิเล็กตรอนสแกนนิ่งไมโครสโคป (Electronscanning microscope)

จิตทิน พัฒนาการ และประภากร เจริญวิภาสเจต (2535) ได้ศึกษาการสังเคราะห์จากดินขาว ซึ่งนำดินขาวมาเผาแล้วทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในเตาปฏิกรณ์ความดันสูง (High pressure autoclave) โดยจะศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ว่ามีผลต่อการเกิดซีโอไลต์ ตัวแปรเหล่านี้ คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แปรผันที่ความเข้มข้น 0.5, 2.0, 5.0, 7.5 M อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ สารก่อโครงร่างและการใช้แอสซิโตน และเอธานอลเป็นตัวทำละลาย โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีทั้งหมด 3 ชนิด เป็นสารในตระกูลซีโอไลต์ 1 ชนิด คือ Analcime ( $\text{NaAl}(\text{SiO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งเป็นซีโอไลต์ที่เหมือนกับซีโอไลต์จากธรรมชาติ (Zeolite minerals) และสารประกอบ Sodium aluminium silicate hydrate ( $\text{Na}_{14}\text{Al}_{12}\text{Si}_{13}\text{O}_{23} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ส่วนสารตัวที่สามคือ สารประกอบของ Na, Al, Si, O,  $\text{H}_2\text{O}$  ที่ยังไม่ทราบ สัดส่วนที่แน่นอน

รุ่งระวี ยิ่งยวด และนิศาชล ชินพันธ์ (2536 - 2537) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาวที่มีในประเทศไทย ซึ่งทำการสังเคราะห์โดยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal) และได้ศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดผลึกซีโอไลต์ ได้แก่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ตัวทำละลาย และอัตราส่วนเชิงโมลของ Si/Al เมื่อแปรผันค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3, 5, 7, 9, 12 โดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดผลึกของซีโอไลต์ชนิดที่มีชื่อว่า Analcime ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 12 ซึ่งเป็นภาวะที่เป็นเบส และมีปริมาณโซเดียมมากที่สุด ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3, 5, 7, 9 จะเกิดผลึกของควอต แต่ถ้าใช้เอธานอลเป็นตัวทำละลายที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 12 จะเกิดผลึกของควอต และมีผลึกของสารอื่นปะปนอยู่เล็กน้อย แต่ไม่สามารถทราบได้แน่ชัดว่าเป็นสารใด ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-เบส 3, 5, 7, 9 จะเกิดผลึกของควอต นอกจากนี้ยังได้แปรผันอัตราส่วนเชิงโมลของ Si/Al ที่อัตราส่วนเท่ากับ 2.233 ได้ผลึกเป็นควอต และ ที่อัตราส่วนเชิงโมลเท่ากับ 40 และ 400 ได้ผลเป็นควอต และของแข็งอสัณฐานตามลำดับ

### 2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

G.G. Hollman and Other (1997) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากแก้วลอยโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ ความเข้มข้นของสารละลายเบส ความดัน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ที่

เกิดขึ้น คือ ที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (zeolite Na-PI) ซีโอไลต์โซเดียม-เอกซ์ (zeolite Na-X) และ โซดาไลต์ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลาร์ ที่ 90 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง 2.0 – 2.5 meq/g

C. Amrhein, G. Haghnia, and others (1996) ได้ทำการศึกษาสมบัติของถ้ำลอย ถ่านหินจากโรงไฟฟ้าในอเมริกา และได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยโดยทำปฏิกิริยากับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH), สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และสารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของสารละลายต่าง ความเข้มข้นของต่าง ความดัน และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ความเสถียรของซีโอไลต์ ทดสอบการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย และวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซ์-เรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโตรโฟโตเมตรี จากผลการวิเคราะห์พบว่า ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือ ที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (zeolite Na-PI) และ ซีโอไลต์โพแทสเซียมคาร์บาไซด์ (potassium chabazite) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลาร์ ที่ 100 °C เป็นเวลา 3 วันตามลำดับ ส่วนสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่เกิดซีโอไลต์ สำหรับที่ความดันสูงเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีแอล (zeolite Na-PI) ที่ 100 °C , ซีโอไลต์โซเดียม-ซี (zeolite Na-C) ที่ 100 °C โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ และซีโอไลต์เอกซ์ (zeolite X) ได้จากการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ ที่ 250 °C

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การดำเนินการทดลอง

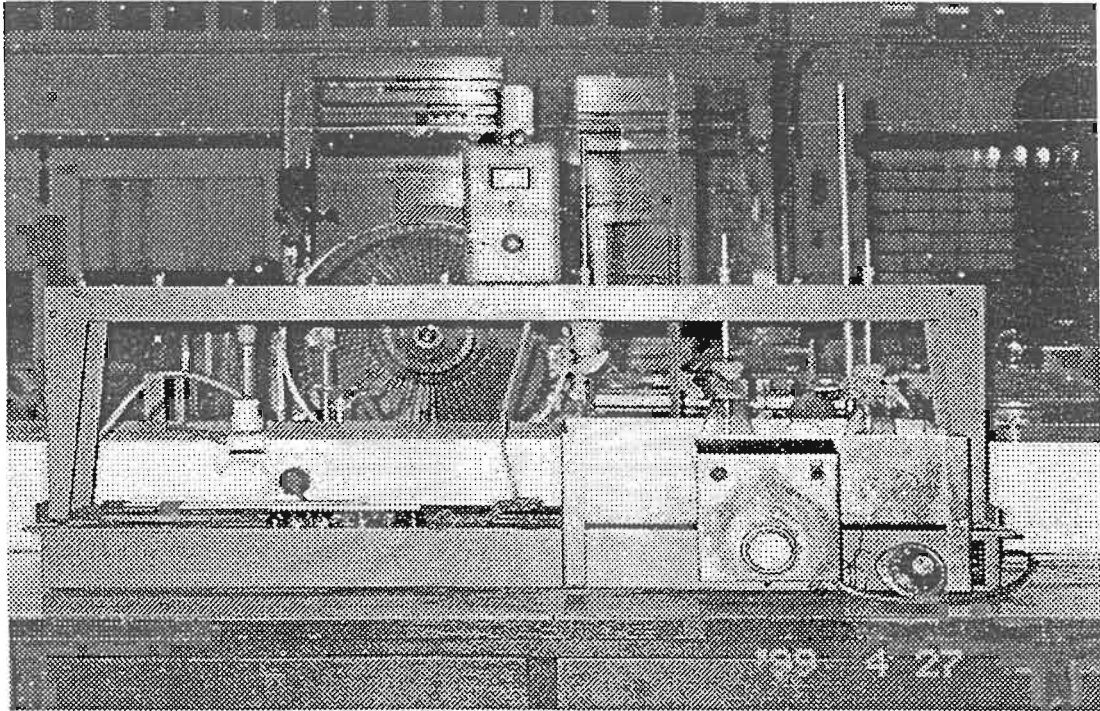
##### 3.1 รูปแบบการศึกษา

เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ที่อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของสารละลายเบสต่างๆ และนำซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์มาศึกษาสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ และนำมาเป็นข้อมูลสำหรับการสังเคราะห์และใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสมต่อไป

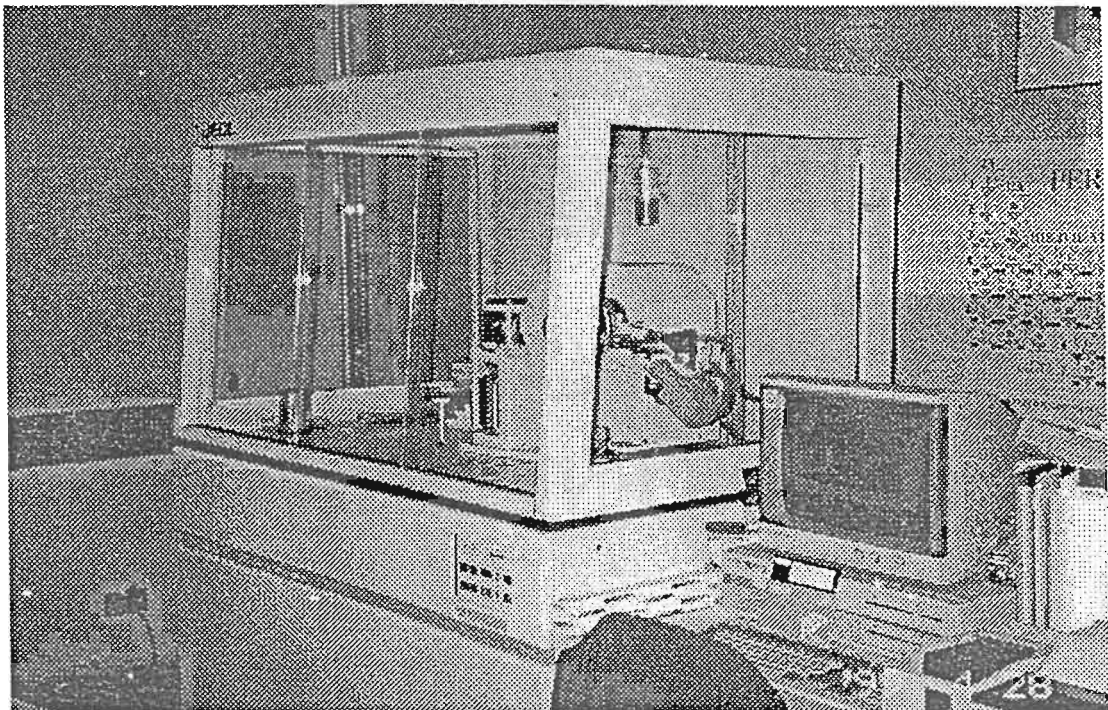
##### 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องชั่งละเอียด 0.1 mg Sartorius รุ่น 1702 MP8 หมายเลข 35090125
2. เครื่องชั่งหยาบ 0.1 mg Mettler รุ่น PG5002 หมายเลข 66268110
3. เตาเผาไฟฟ้า (Muffle Furnace) ของ Cabolite 0 – 1,200 °F
4. ตู้อบ (Oven) ของ WT binder ช่วงอุณหภูมิ 0 – 250 °C
5. ครุชิลเบลพอร์ชเลน ความจุ 20 มิลลิลิตร พร้อมฝา
6. เทอร์โมมิเตอร์ ช่วงอุณหภูมิ 0 – 250 °C
7. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และ เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร
8. ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง
9. ชุดเครื่องกวน (Stirrer)
10. ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Oil Bath)
11. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge)
12. ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
13. หม้อดูดความชื้น (Desiccator)
14. Scanning Electron Microscopy (SEM) JOEL รุ่น JSM-6400
15. X-rays Diffraction Spectroscopy JOEL รุ่น JDX-8030, JAPAN
16. X-rays Fluorescences Spectroscopy JOEL รุ่น PW 2400 PHILIPS, JAPAN
17. เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นขวดแก้วรูปทรงขนาด 250 ml

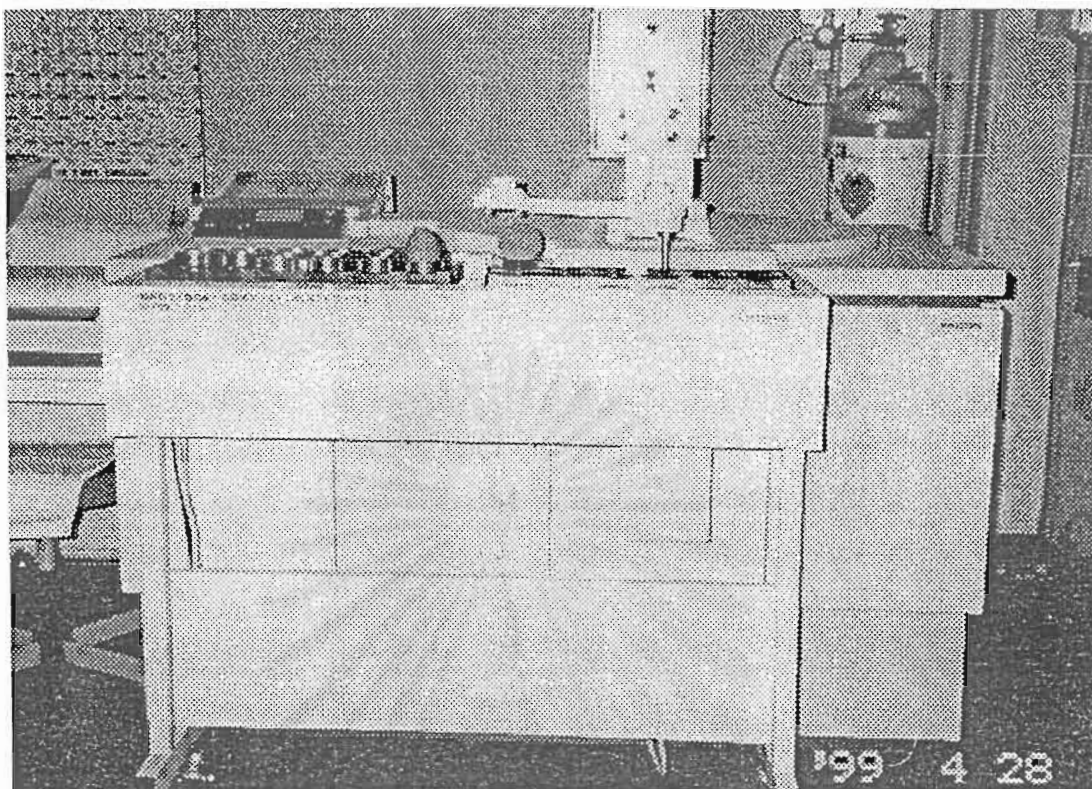




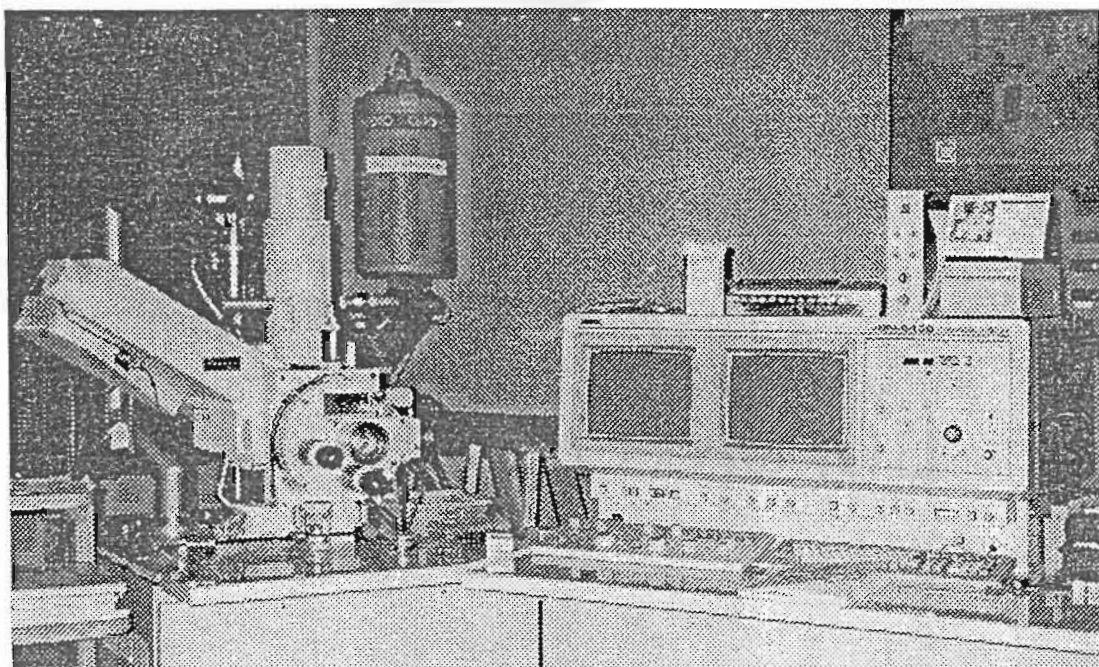
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์



รูปที่ 3.2 เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์โครงสร้างของซีโอไลต์



รูปที่ 3.3 เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยถ่านหิน



รูปที่ 3.4 เครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคปที่ใช้ดูรูปร่างผลึกของซีโอไลต์



### 3.3 ขั้นตอนดำเนินการทดลอง

#### 3.3.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยโดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

- ปริมาณซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เป็นต้น

#### 3.3.2 การเตรียมสารตั้งต้น

การเตรียมแก้วลอยถ่านหิน

นำแก้วลอยที่ได้มาจากโรงงานผลิตไฟฟ้าแม่เมาะมาเผาที่อุณหภูมิ  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (สาเหตุที่ต้องเผาเพราะว่าต้องการกระตุ้นให้แก้วลอยถ่านหินอยู่ในสภาพพร้อมคือเป็นสารประกอบของควอตและมุลไลต์ที่จะทำปฏิกิริยา) หลังจากนั้นปล่อยให้แก้วลอยทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น

การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 4 โมลาร์

#### 3.3.3 การทำปฏิกิริยา

- นำแก้วลอยถ่านหินที่เผาแล้วมาชั่งประมาณ 15.00 กรัม (เทคนิค 2 ตำแหน่ง) และนำสารละลายที่เตรียมไว้มาเทลงในขวดที่ชั่งแก้วลอยปริมาตร 120 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วนำไปประกอบเข้ากับชุดของเครื่องปฏิกิริยาที่ใช้ทำปฏิกิริยาพร้อมที่จะทำการทดลอง โดยศึกษาตัวแปรต่าง ๆ คือ

- เวลาที่ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง
- อุณหภูมิที่ 30, 70, 100 และ 120 องศาเซลเซียส
- สารละลายที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

เมื่อทำปฏิกิริยาตามภาวะต่าง ๆ เสร็จแล้ว นำแก้วลอยที่ผ่านการทำปฏิกิริยามากรองแยกแก้วลอยโดยล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง หลังจากนั้นนำ แก้วลอยมาอบให้แห้ง

- ความเข้มข้นของสารละลายที่ 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 โมลาร์

เมื่อทำปฏิกิริยาตามภาวะต่าง ๆ เสร็จแล้ว นำแก้วลอยที่ผ่านการทำปฏิกิริยามากรองแยกแก้วลอยโดยล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง หลังจากนั้นนำ แก้วลอยมาอบให้แห้ง

วิเคราะห์สมบัติของแก้วลอยที่ผ่านการทำปฏิกิริยาแล้ว ดังต่อไปนี้

ทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (CEC)

วิเคราะห์โครงสร้างโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโทรโฟโตเมทรี

วิเคราะห์การเกิดรูปทรงผลึกโดยใช้สแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำเสนอและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ในรูปแบบของตารางและกราฟเรียงตามลำดับดังนี้

#### 4.1 สมบัติของวัตุดิบ

##### 4.1.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์เกิดจากการนำถ่านหินลิกไนต์มาเผาให้ละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน และถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์

##### 4.1.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์ที่ออกจากเตาเผาใหม่ๆ จะมีสีเทาอมแดงเมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้นดังรูปที่ 4.1 จากการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 100 เท่า พบว่ารูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะค่อนข้างกลมและกลม (Sub-round to round) และมีขนาดตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.42 มิลลิเมตร จากการหาค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยลิกไนต์ พบว่าความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.23 – 2.48



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างเถ้าลอยลิกไนต์ก่อนนำไปใช้ในการทดลองและซีโอโลไต์ที่สังเคราะห์ได้

#### 4.1.3 สมบัติทางเคมีของแก้วลอยลิกไนต์

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของแก้วลอยลิกไนต์ โดยวิธีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ได้ผลวิเคราะห์ตามตารางดังนี้

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแก้วลอยลิกไนต์

Contents (% by wt.)									
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
42.77	24.65	13.11	9.53	3.07	2.73	2.23	1.21	0.37	0.17

สารประกอบที่พบในแก้วลอยถ่านหินคือ สารประกอบควอต และมูลไลต์ เป็นสารประกอบเริ่มต้นที่สำคัญมากในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะควอตจะประกอบไปด้วย SiO<sub>2</sub> ส่วนมูลไลต์จะประกอบไปด้วย Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีความสำคัญมากในการเกิดซีโอไลต์

#### 4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ผลจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลของแก้วลอยถ่านหินด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1, 2, 3 และ 4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 70, 100 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบว่าที่ภาวะต่าง ๆ เกิดซีโอไลต์ต่างชนิดกัน ดังตารางที่ 4.2 นี้

ตารางที่ 4.2 ภาวะการทดลองที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลของแก้วลอยถ่านหิน

ภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ชนิดซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น	สารประกอบที่พบในผลิตภัณฑ์
สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (hr)		
NaOH 2.0 M	70	24	P	Un, Mu, Q
		48	P	Un, Mu, Q
		72	P	Un, Q, Mu
		96	P	Un, Q, Mu
		120	P	Un, Q, Mu
NaOH 2.0 M	100	24	P	Mu, Un, Q
		48	P	Mu, Un, Q
		72	P	Un, Q, Mu
		96	P	Un, Q, Mu
		120	P	Mu
NaOH 2.0 M	120	1	-	Q, Mu
		2	-	Q, Mu
		3	P	Un, Q, Mu
		5	P	Un, Q, Mu
		7	P	Un, Q, Mu

ตารางที่ 4.2(ต่อ) ภาวะการทดลองที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลของแก้วลอยถ่านหิน

ภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ชนิดซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น	สารประกอบที่พบในผลิตภัณฑ์
สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (hr)		
KOH 2.0 M	70	24	Gis	UN ,Q ,Mu
		48	Gis	UN ,Q ,Mu
		72	Gis	UN ,Q ,Mu
		96	Gis	Will ,Un
		120	Gis	Will ,Un
KOH 2.0 M	100	24	Cha ,Nep	UN ,Q ,Mu
		48	Cha ,Nep	Un ,Q ,Mu
		72	Cha ,Nep	Will ,Un
		96	Cha ,Nep	Will ,Un
		120	Cha ,Nep	Will ,Un
KOH 2.0 M	120	1	-	UN ,Q ,Mu
		2	-	UN ,Q ,Mu
		3	Gis	UN ,Q ,Mu
		5	Gis	Will ,Un
		7	Gis	Will ,Un
0.1NaOH + 0.9KOH 2.0 M	100	72	Cha ,Nep	Mu ,Un
0.2NaOH + 0.8KOH 2.0 M	100	72	Cha ,Nep	Mu ,Un
0.3NaOH + 0.7KOH 2.0 M	100	72	Cha ,Nep	Mu ,Un
0.4NaOH + 0.6KOH 2.0 M	100	72	Cha	Mu ,Un

ตารางที่ 4.2(ต่อ) ภาวะการทดลองที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการทำปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอลของแก้วลอยถ่านหิน

ภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา			ชนิดซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น	สารประกอบที่พบในผลิตภัณฑ์
สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (hr)		
0.5NaOH + 0.5KOH 2.0 M	100	72	Cha	Mu ,Un
0.6NaOH + 0.4KOH 2.0 M	100	72	Cha ,P	Un ,Mu
0.7NaOH + 0.3KOH 2.0 M	100	72	P	Un ,Mu
0.8NaOH + 0.2KOH 2.0 M	100	72	P	Un ,Mu
0.9NaOH + 0.1KOH 2.0 M	100	72	P	Un ,Mu
NaOH 1.0 M	100	72	P	Un
NaOH 3.0 M	100	72	-	Un ,Ge
NaOH 4.0 M	100	72	-	Un ,Ge
KOH 1.0 M	100	72	-	-
KOH 3.0 M	100	72	Cha ,Nep	Un
KOH 4.0 M	100	72	Cha ,Nep	Un

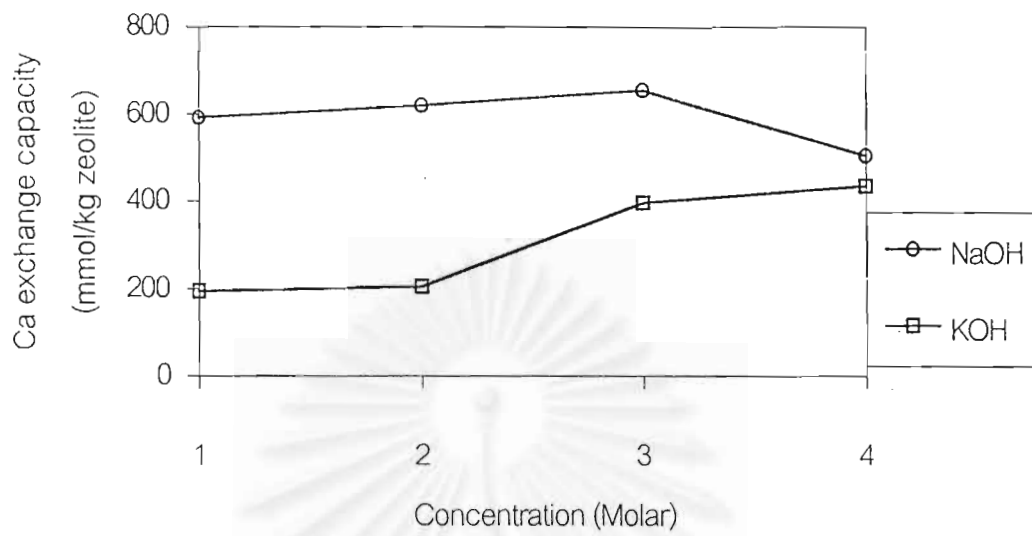
หมายเหตุ : P = Zeolite P ;Cha = Chabazite ;Nep = Nepheline ;Gis = Gismondine ;Q = Quartz ;Mu = Mullite ;Sil = Sillimanite ;Wil = Willhendersonite ;Un = Unknown ; Ge = Gehlenite

#### 4.3 ผลจากการแปรความเข้มข้นของสารละลายเบสที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

ความเข้มข้นของสารละลายเบสที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นภาวะหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ในขั้นตอนนี้แปรความเข้มข้นของสารละลายเบสตั้งแต่ 1.0, 2.0, 3.0 และ 4.0 โมลาร์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติเพื่อหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.3 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเบสกับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ดังแสดงในรูปกราฟที่ 4.2

ตารางที่ 4.3 ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (hr)	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม ไอออน (mmol/kg zeolite)
NaOH 1.0 M	100	72	590.97
NaOH 2.0 M	100	72	619.44
NaOH 3.0 M	100	72	653.61
NaOH 4.0 M	100	72	505.61
KOH 1.0 M	100	72	192.93
KOH 2.0 M	100	72	204.22
KOH 3.0 M	100	72	395.74
KOH 4.0 M	100	72	434.71



รูปที่ 4.2 ผลจากการแปรความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่อุณหภูมิ 100 °C, 72 hr

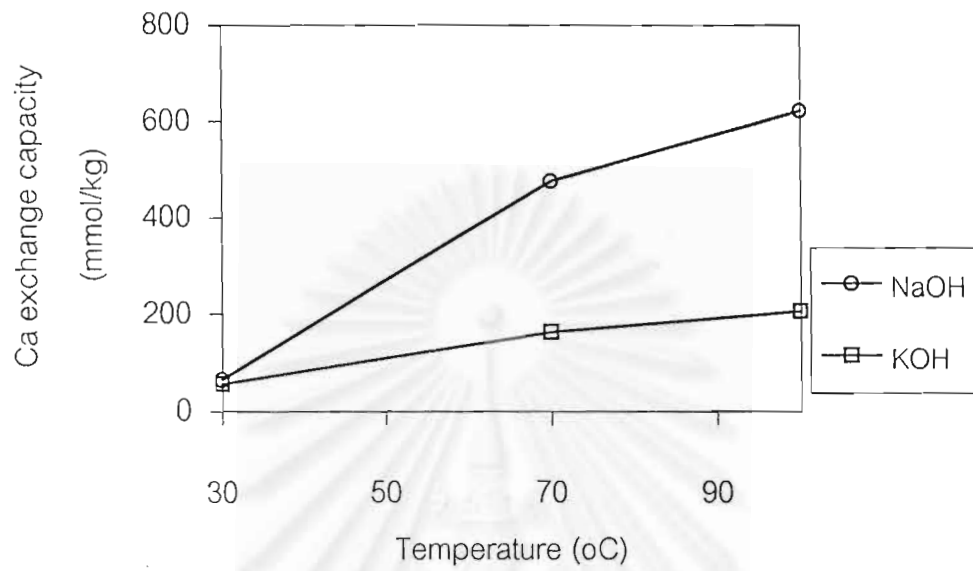


#### 4.4 ผลจากการแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (ที่ภาวะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์) จากขั้นตอนที่ 4.3 นำภาวะที่ได้มาศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ โดยมีตัวแปรดังนี้ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่เวลา 72 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30, 70, 100 และ 120 องศาเซลเซียส แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติเพื่อหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.4 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ดังแสดงในรูปกราฟที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (hr)	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม ไอออน (mmol/kg zeolite)
NaOH 2.0 M	30	72	65.52
	70	72	475.47
	100	72	619.44
	120	7	420.47
KOH 2.0 M	30	72	55.79
	70	72	163.15
	100	72	204.22
	120	7	202.20



รูปที่ 4.3 ผลจากการแปรอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M ระยะเวลา 72 hr

#### 4.5 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

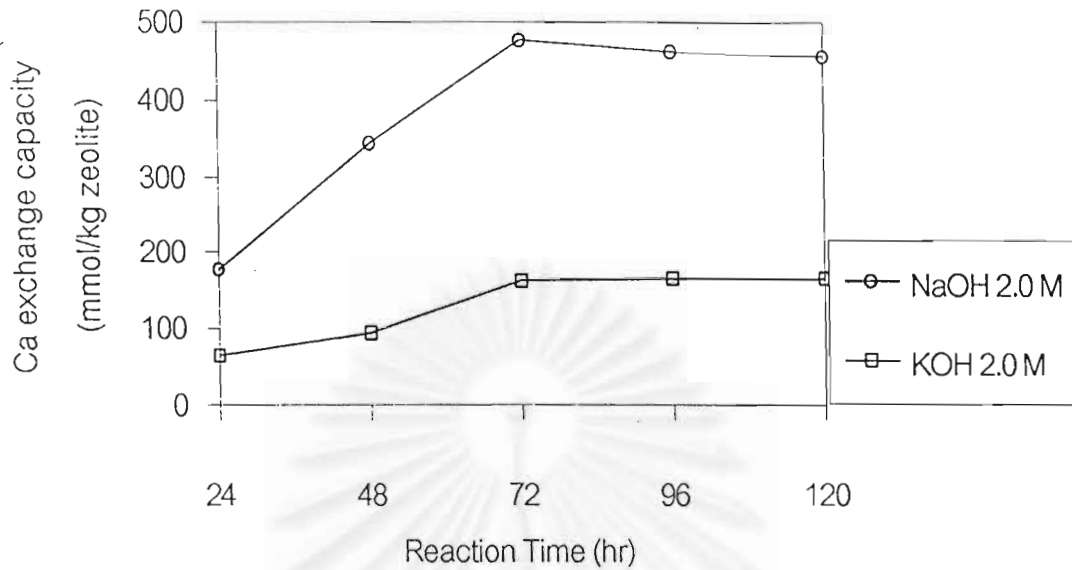
เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ (ภาวะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส) จากขั้นตอนที่ 4.3 และ 4.4 นำภาวะที่ได้มาศึกษาถึงผลของระยะเวลาตั้งแต่ 24, 48, 72, 96 และ 120 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์สมบัติเพื่อหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.5 นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน ดังแสดงในรูปกราฟที่ 4.4 ถึง 4.6

ตารางที่ 4.5 ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของถ้ำลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นในระยะเวลาต่าง ๆ ที่ อุณหภูมิ 70 °C

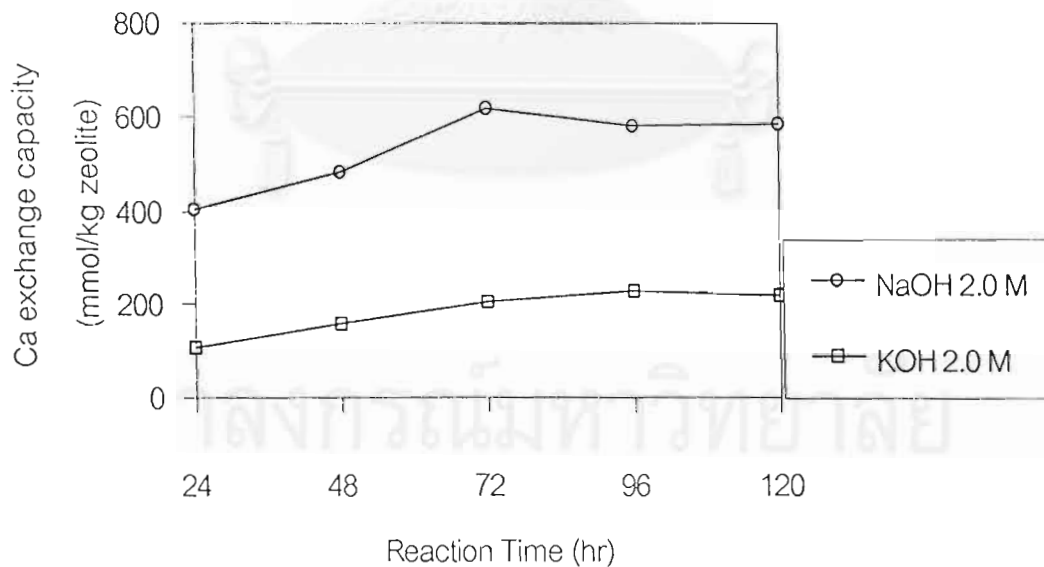
สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (hr)	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (mmol/kg zeolite)
NaOH 2.0 M	70	24	177.34
		48	344.39
		72	475.47
		96	462.88
		120	455.99
KOH 2.0 M	70	24	66.44
		48	94.02
		72	163.15
		96	164.25
		120	165.15

ตารางที่ 4.5(ต่อ) ค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนของแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นในระยะเวลาต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 °C และ 120 °C

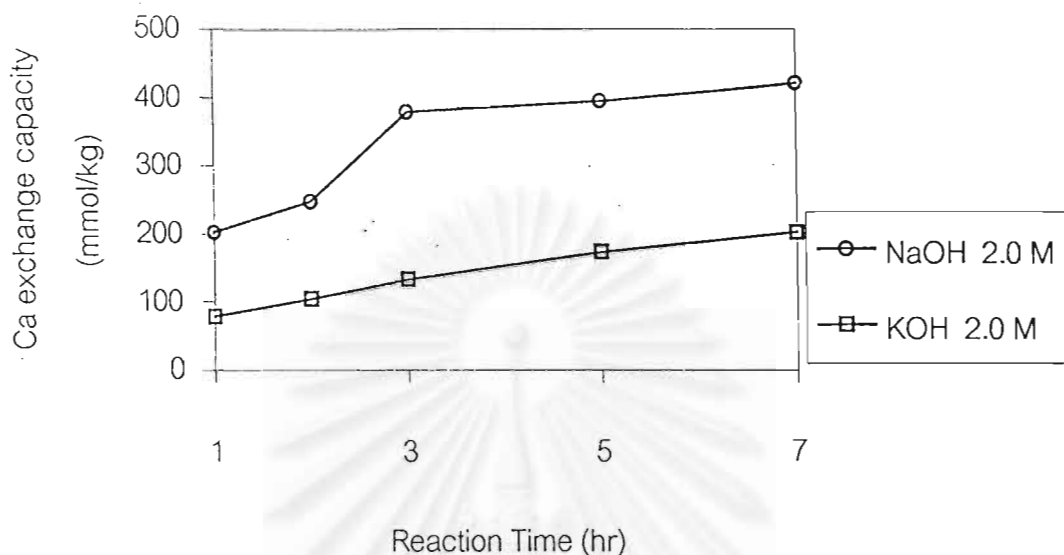
สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (hr)	ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน (mmol/kg zeolite)
NaOH 2.0 M	100	24	402.74
		48	482.47
		72	619.44
		96	581.98
		120	584.97
KOH 2.0 M	100	24	109.80
		48	157.26
		72	204.22
		96	229.19
		120	221.30
NaOH 2.0 M	120	1	201.52
		2	247.18
		3	378.76
		5	394.84
		7	420.52
KOH 2.0 M	120	1	78.63
		2	104.81
		3	133.28
		5	173.24
		7	202.02



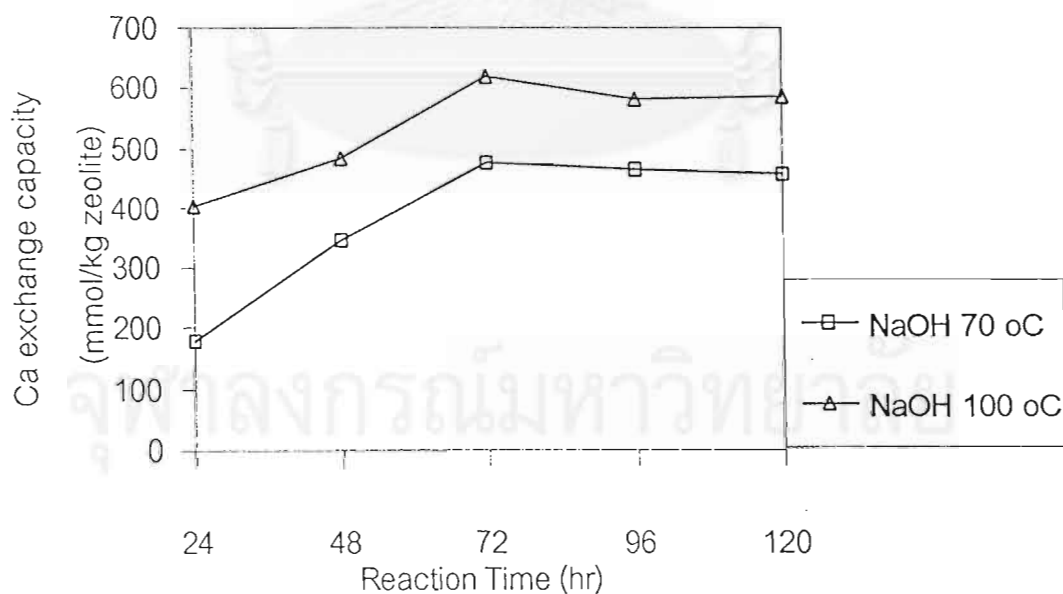
รูปที่ 4.4 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M อุณหภูมิ 70 °C



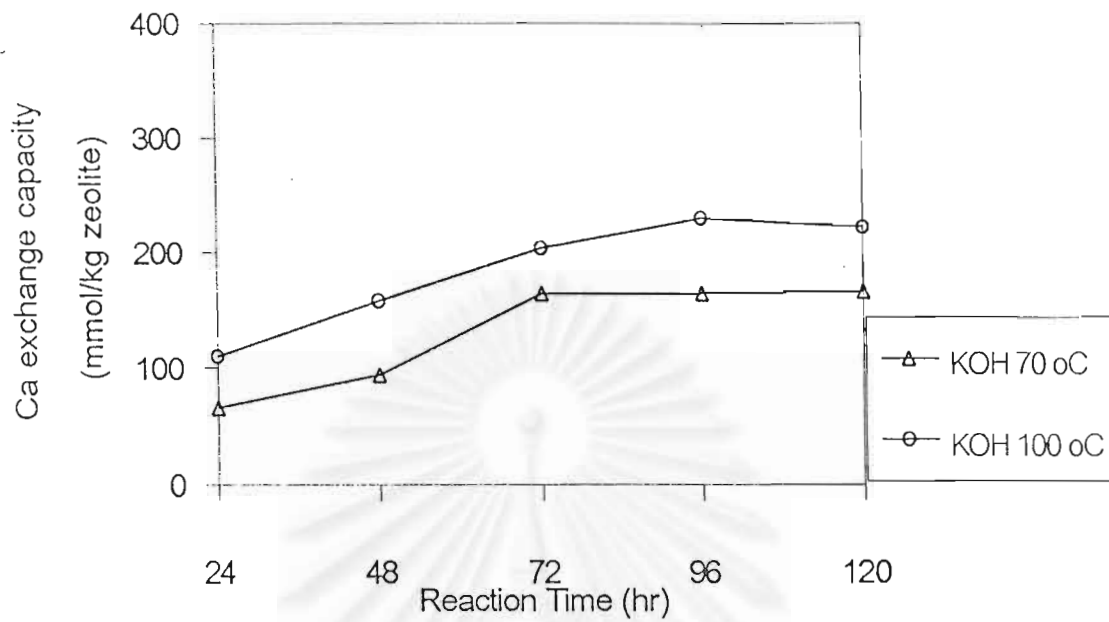
รูปที่ 4.5 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M อุณหภูมิ 100 °C



รูปที่ 4.6 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH และ KOH ที่ความเข้มข้น 2.0 M อุณหภูมิ 120 °C



รูปที่ 4.7 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 100 °C



รูปที่ 4.8 ผลจากการแปรระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน โดยการกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 100 °C

4.6 รูปลักษณะโครงสร้างผลึกของแก้วลอยถ่านหินที่ได้จากการกระตุ้นที่ภาวะต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (XRDS)

จากการนำแก้วลอยถ่านหินที่มีองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงในตารางที่ 4.1 มาผ่านการกระตุ้นที่ภาวะต่าง ๆ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน สามารถตรวจพบซีโอไลต์ 4 ชนิด คือ Zeolite P, Chabazite, Nepheline และ Gismondine นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอื่น ๆ อีก

ตารางที่ 4.6 อัตราการเกิดของซีโอไลต์หลังจากการทำปฏิกิริยาที่ภาวะต่าง ๆ

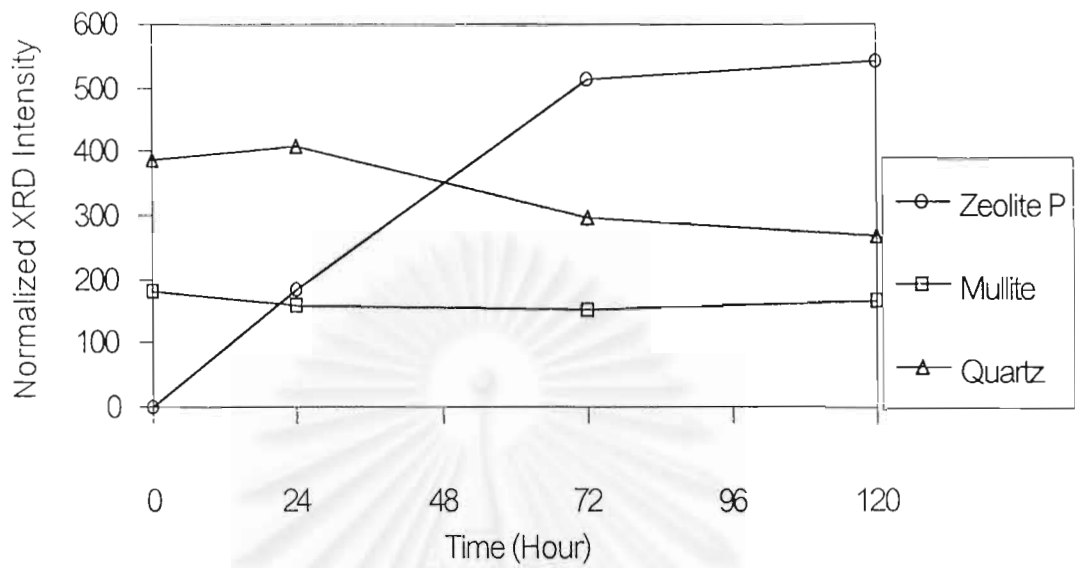
สารละลาย	ซีโอไลต์และสารประกอบอื่น ๆ ที่เกิดขึ้น	XRD INTENSITY(counts/second)			
		0 hr	24 hr	72 hr	120 hr
NaOH 2.0 M 70 °C	Zeolite P	0	186	512	542
	Mullite	182	158	153	168
	Quartz	385	410	298	268
NaOH 2.0 M 100 °C	Zeolite P	0	571	680	716
	Mullite	182	154	159	151
	Quartz	385	244	163	0
KOH 2.0 M 70 °C	Gismondine	0	241	155	180
	Mullite	182	142	158	159
	Quartz	385	349	351	346
KOH 2.0 M 100 °C	Chabazite	0	206	654	630
	Nepheline	0	163	194	270
	Mullite	182	159	145	136
	Quartz	385	378	243	184



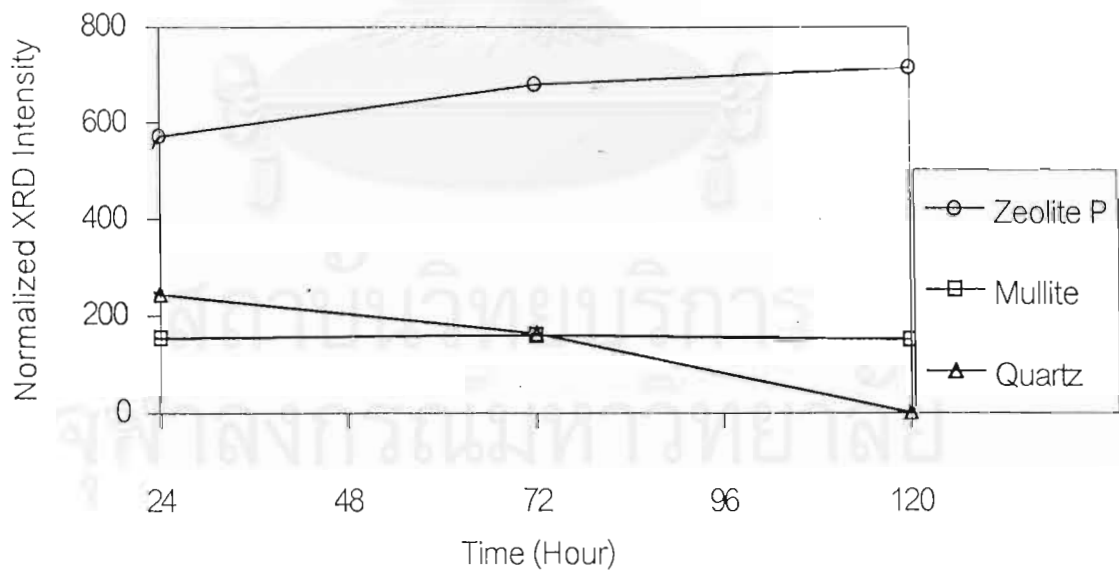
ตารางที่ 4.6 (ต่อ) อัตราการเกิดของซีโอไลต์หลังจากการทำปฏิกิริยาที่ภาวะต่าง ๆ

สารละลาย	ซีโอไลต์และ สารประกอบอื่น ๆ ที่ เกิดขึ้น	XRD INTENSITY(counts/second)			
		0 hr	1 hr	3 hr	7 hr
NaOH 2.0 M 120 °C	Zeolite P	0	0	301	418
	Mullite	182	157	150	142
	Quartz	385	317	329	237
KOH 2.0 M 120 °C	Gismondine	0	173	164	153
	Mullite	182	161	157	163
	Quartz	385	359	355	279

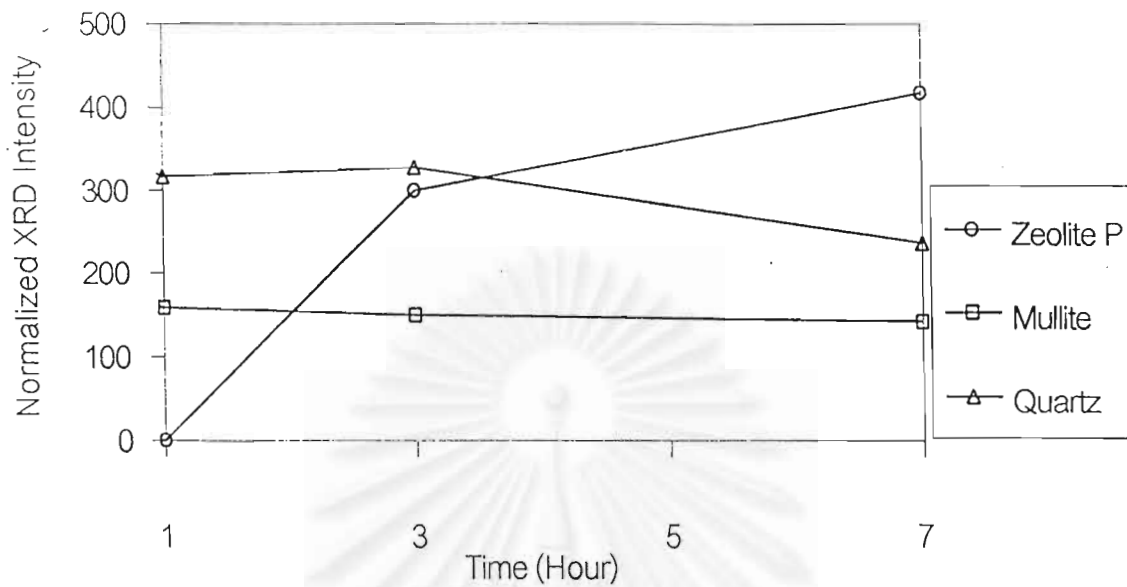
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



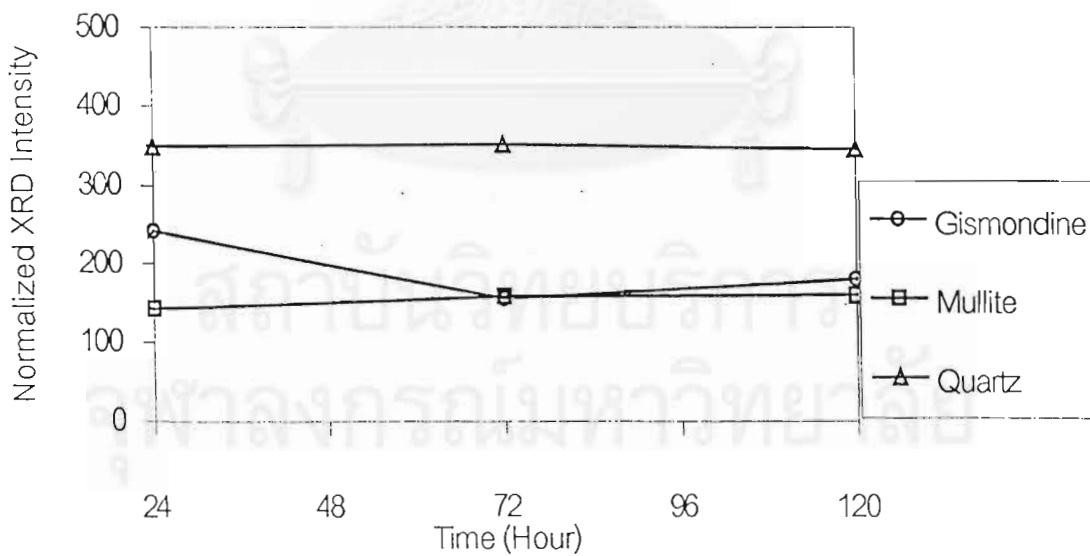
รูปที่ 4.9 อัตราการเกิด Zeolite P และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 70 °C



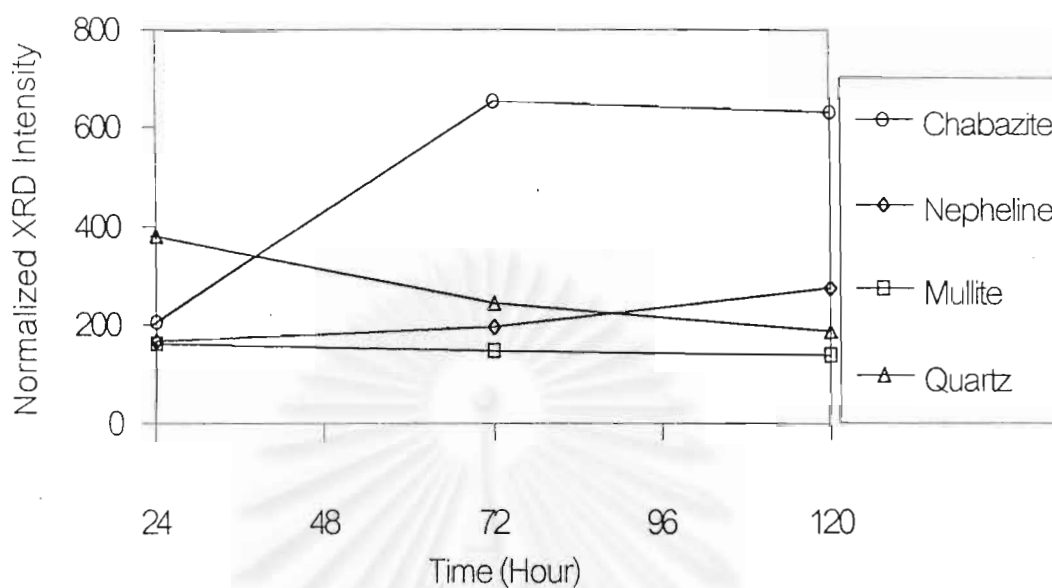
รูปที่ 4.10 อัตราการเกิด Zeolite P และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 100 °C



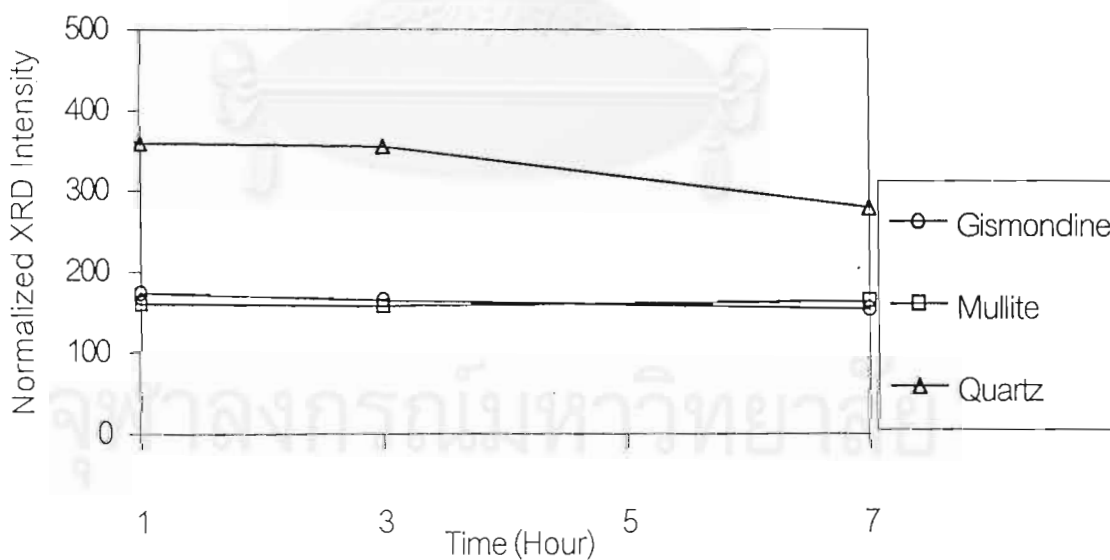
รูปที่ 4.11 อัตราการเกิด Zeolite P และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 120 °C



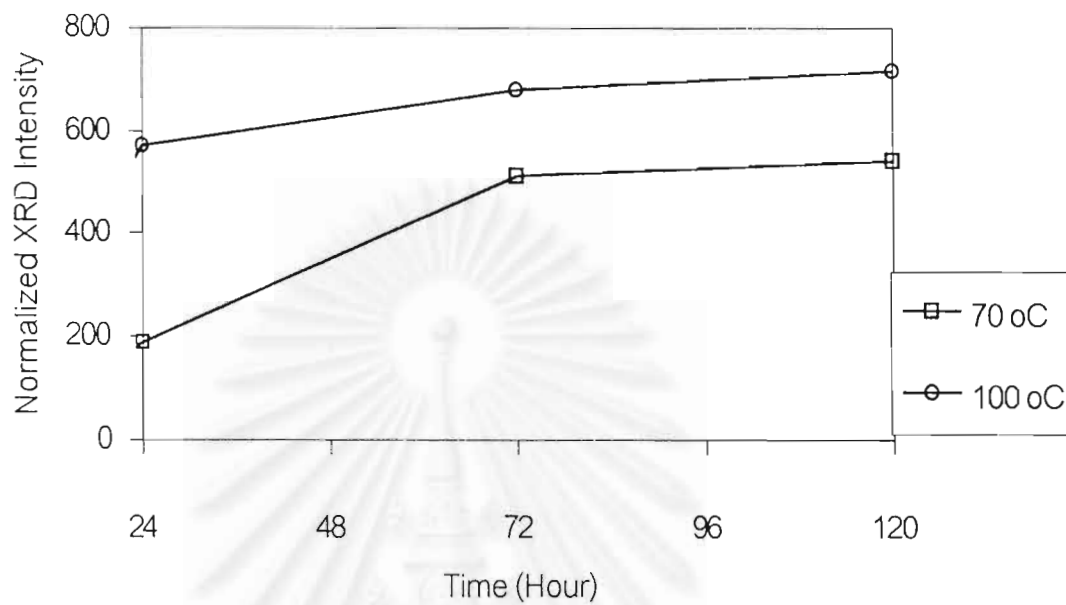
รูปที่ 4.12 อัตราการเกิด Gismondine และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 70 °C



รูปที่ 4.13 อัตราการเกิด Chabazite ,Nepheline และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 100 °C

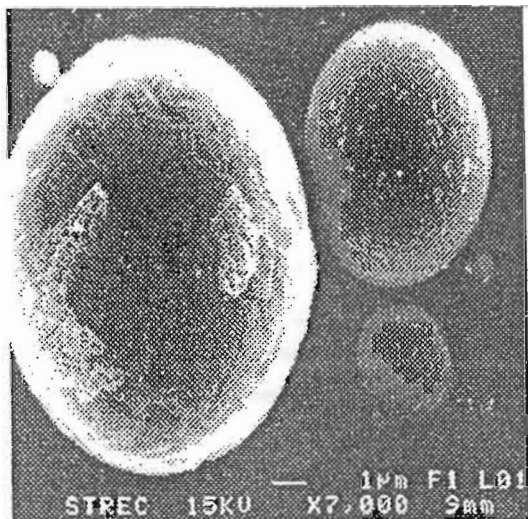


รูปที่ 4.14 อัตราการเกิด Gismondine และสารประกอบอื่น ๆ จากแก้วลอยถ่านหินที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 120 °C

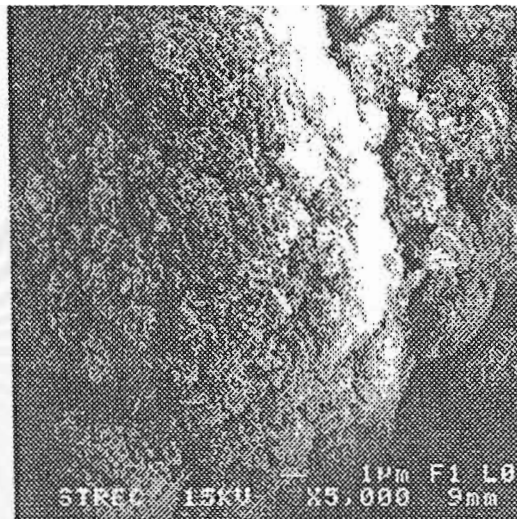


รูปที่ 4.15 อัตราการเกิด Zeolite P ที่ผ่านการกระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M ที่อุณหภูมิ 70 °C และ 100 °C

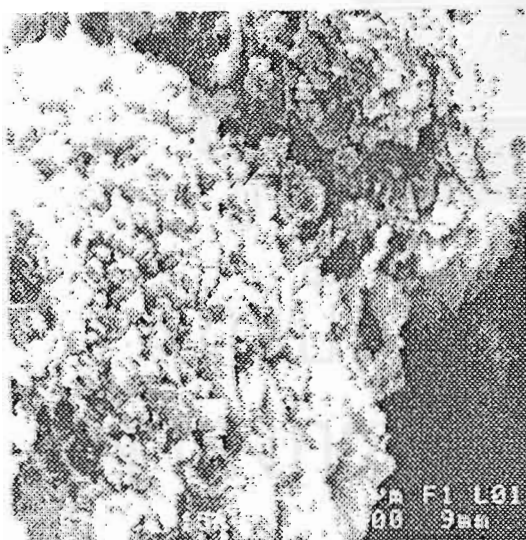
4.7 รูปลักษณะพื้นผิวของแก้วลอยถ่านหินและซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากการกระตุ้นที่  
ภาวะต่าง ๆ โดยใช้กล้องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป (SEM)



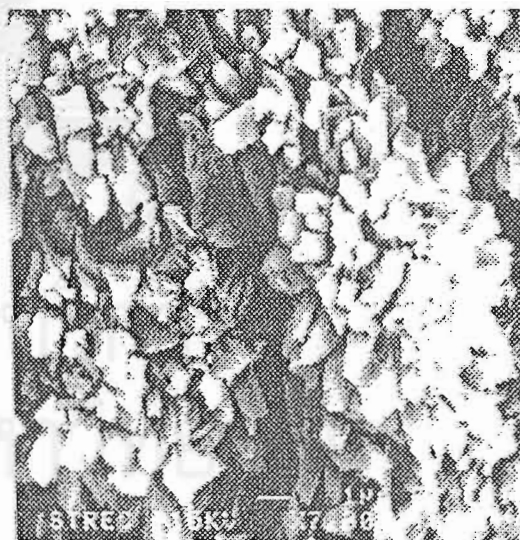
รูปที่ 4.16 พื้นผิวของแก้วลอยถ่านหิน  
กำลังขยาย 7,000 เท่า



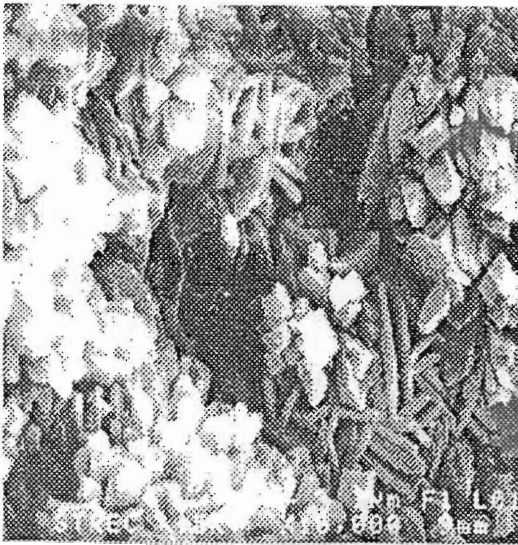
รูปที่ 4.17 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 70 °C 72 hr  
กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 4.18 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 70 °C 120 hr  
กำลังขยาย 7,000 เท่า



รูปที่ 4.19 พื้นผิวของแก้วลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 100 °C 72 hr  
กำลังขยาย 7,000 เท่า



รูปที่ 4.20 พื้นผิวของเถ่าลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 100 °C 120 hr  
กำลังขยาย 10,000 เท่า



รูปที่ 4.21 พื้นผิวของเถ่าลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 120 °C 7 hr  
กำลังขยาย 7,000 เท่า

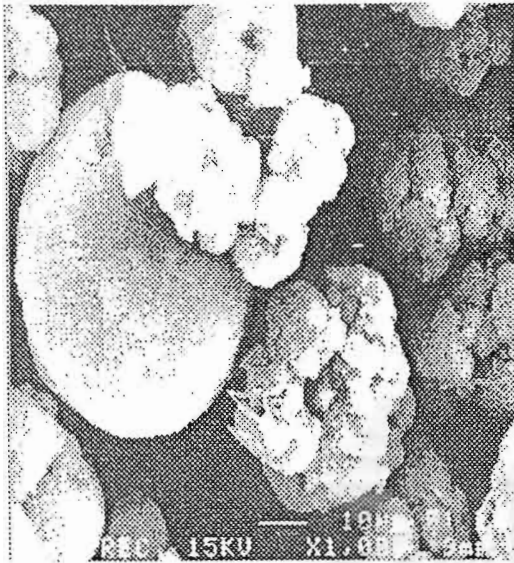


รูปที่ 4.22 พื้นผิวของเถ่าลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 70 °C 120 hr  
กำลังขยาย 7,000 เท่า

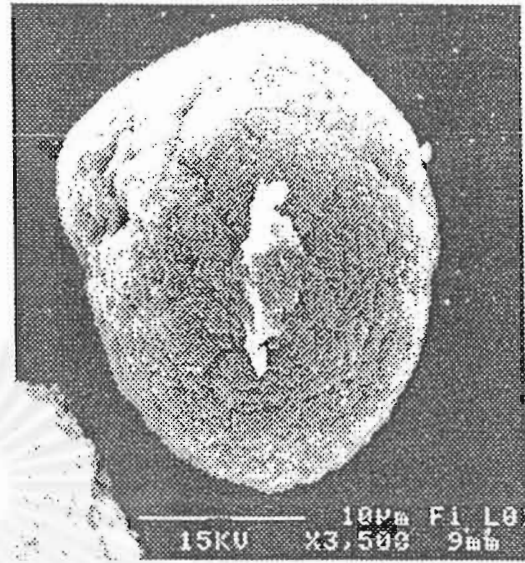


รูปที่ 4.23 พื้นผิวของเถ่าลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 100 °C 72 hr  
กำลังขยาย 10,000 เท่า





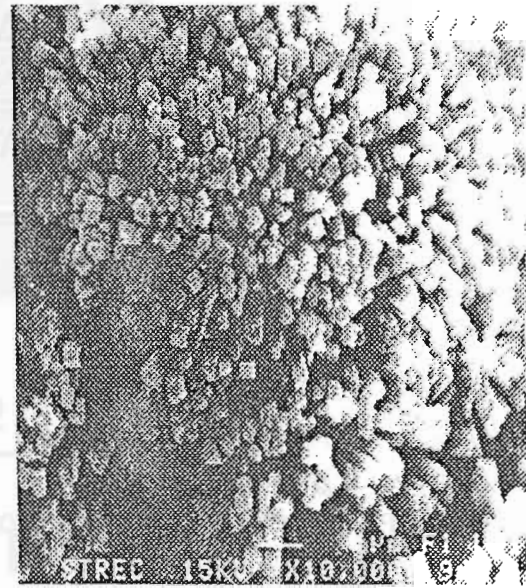
รูปที่ 4.24 พื้นผิวของเก้าลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย KOH 2.0 M 120 °C 7 hr  
กำลังขยาย 1,000 เท่า



รูปที่ 4.25 พื้นผิวของเก้าลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย 0.2NaOH+0.8KOH 2.0 M  
100 °C 72 hr กำลังขยาย 3,500 เท่า



รูปที่ 4.26 พื้นผิวของเก้าลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย 0.5NaOH+0.5KOH 2.0 M  
100 °C 72 hr กำลังขยาย 5,500 เท่า



รูปที่ 4.27 พื้นผิวของเก้าลอยที่ผ่านการ  
กระตุ้นด้วย 0.8NaOH+0.2KOH 2.0 M  
100 °C 72 hr กำลังขยาย 10,000 เท่า



อภิปรายและวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 ผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ตัวแปรที่ใช้ศึกษาคือ ความเข้มข้น ชนิดของสารละลาย อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งมีผลต่อสมบัติของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้คือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน

5.1.1 ผลของความเข้มข้นสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

สารละลายต่างที่ใช้ในการทดลองคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้น 1.0 และ 2.0 โมลาร์ จากผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (ภาคผนวก ข รูปที่ 5, 6) พบผลึกซีโอไลต์เกิดขึ้นคือ Zeolite P เมื่อนำผลิตภัณฑ์นี้ไปวิเคราะห์หาความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนแล้วมีค่าสูงขึ้นกว่าถ้ำลอยที่ยังไม่ได้รับการกระตุ้น แต่ที่ความเข้มข้น 3.0 และ 4.0 โมลาร์ จากผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันไม่พบผลึกซีโอไลต์เกิดขึ้นเลย พบสารประกอบชนิดอื่นคือ Unknown, Mullite และ Gehlenite (ภาคผนวก ข รูปที่ 7, 8) สารประกอบเหล่านี้ไม่ใช่ซีโอไลต์ เมื่อนำผลิตภัณฑ์นี้ไปวิเคราะห์หาความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนแล้ว ปรากฏว่าที่ความเข้มข้น 3.0 โมลาร์ ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงขึ้น (ดังแสดงในตารางที่ 4.3) ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเกิดจากสารประกอบ Unknown ที่เกิดขึ้นมาที่ภาวะนี้มีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Amrhein C. and Other (1996) ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 1.0 – 2.0 โมลาร์เหมาะสมที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์มากที่สุด เพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะไปย่อยสารประกอบควอตและมุลไลต์ในถ้ำลอยถ่านหินจนได้สารประกอบอะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และซิลิกาออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ออกมา นอกจากนี้ โซเดียมไอออน ( $Na^+$ ) ยังทำให้โครงสร้างที่ประกอบไปด้วยโมเลกุลของ ซิลิกาออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $SiO_4$ ) และ อะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล ( $AlO_4$ ) อยู่ในสภาพเสถียรยิ่งขึ้น ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากกว่า 2.0 โมลาร์ ขึ้นไปไม่เหมาะที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะที่ความเข้มข้นสูง ๆ นั้น สารประกอบควอตและมุลไลต์ในถ้ำลอยถ่านหินจะถูกย่อย

มากจนทำให้เกิดโครงสร้างของผลึกที่หนาแน่นมาก (Dense Material) เช่น Mullite และ Gehlenite ซึ่งเป็นสารประกอบชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์ เพราะว่าซีโอไลต์มีโครงสร้างที่อยู่กันอย่างหลวม ๆ (Loose Material)

สำหรับการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้น 2.0, 3.0 และ 4.0 โมลาร์ จากผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (ภาคผนวก ข รูปที่ 11, 12 และ 13) พบผลึกซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นคือ Chabazite และ Nepheline เป็นผลทำให้ผลึกภัณฑ์ที่ได้มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงขึ้น เพราะว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ ด้วยเหตุนี้ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในช่วงนี้ (มากกว่า 1.0 โมลาร์) จึงเหมาะที่จะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์ เพราะสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะไปย่อยสารประกอบควอตและมุลไลต์ในแก้วลอยถ่านหินจนได้สารประกอบอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ออกมาและเมื่อทำปฏิกิริยาในภาวะที่เหมาะสมทำให้เกิดผลึกซีโอไลต์ขึ้น

แต่ที่ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ จากผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (ภาคผนวก ข รูปที่ 10) พบว่ายังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากลักษณะโครงสร้างเดิมของแก้วลอยถ่านหินเลยคือมีลักษณะโครงสร้างเป็นควอตและมุลไลต์อยู่สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าสารละลายมีความเข้มข้นไม่สูงพอที่จะย่อยควอตและมุลไลต์ให้ได้ สารประกอบอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ออกมาทำปฏิกิริยาได้ จึงยังไม่ก่อให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ขึ้นมา เป็นผลทำให้ผลึกภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่ภาวะนี้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้น้อย

#### 5.1.2 ผลของชนิดสารละลายที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

จากการทดลองพบว่า การกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ผลึกภัณฑ์ที่เกิดเป็นซีโอไลต์ที่ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงกว่าซีโอไลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ภาวะเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คือ zeolite P นั้นมีค่าสัดส่วน  $\text{Si}/\text{Al} = 1.1 - 2.5$  ส่วน Chabazite ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าสัดส่วน  $\text{Si}/\text{Al} = 2.3 - 2.5$  เห็นได้ว่า zeolite P มีค่าสัดส่วน  $\text{Si}/\text{Al}$  ต่ำกว่า Chabazite กล่าวคือ ซีโอไลต์ที่มีค่าสัดส่วน  $\text{Si}/\text{Al}$  ต่ำแล้ว ซีโอไลต์นั้นมีปริมาณอะลูมินาไอออน ( $\text{AlO}_2^-$ ) อยู่ปริมาณมาก เมื่อมีประจุลบอยู่มากจึงสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ดี จึงเป็นผลทำให้ zeolite P มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนดีกว่า Chabazite

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าที่ภาวะเดียวกันคือ สารละลายความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (zeolite P) มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 619.44 mmol/kg ส่วนซีโอไลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Chabazite & Nepheline) มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 204.22 mmol/kg เห็นได้ว่าซีโอไลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้มากกว่าซีโอไลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์อีกด้วยสาเหตุนี้เอง

### 5.1.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา

จากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 70, 100 และ 120 °C จากผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบผลึกซีโอไลต์เกิดขึ้นคือ Zeolite P ทุกภาวะอุณหภูมิ แต่ที่อุณหภูมิ 100 °C ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงที่สุด เพราะถ้าอุณหภูมิสูงกว่า (120 °C) ทำให้ภาวะในการเกิดซีโอไลต์เปลี่ยนไปทำให้เกิดเป็นสารประกอบอื่น ๆ ที่อาจจะไม่ใช่ซีโอไลต์ ในทำนองเดียวกันถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า (70 °C) เป็นภาวะที่ยังไม่เหมาะสมสำหรับการเกิดซีโอไลต์ได้ดีที่สุด เพราะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนยังไม่ดี จากการทดลองเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสามภาวะมาทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 100 °C (zeolite P) ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5 สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 70 – 120 °C เป็นช่วงที่สามารถสังเคราะห์ Zeolite P ได้ แต่ที่ภาวะอุณหภูมิ 100 °C นั้นจะเหมาะที่นำมาสังเคราะห์มากที่สุด

ส่วนการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 70, 100 และ 120 °C จากผลการวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันพบผลึกซีโอไลต์เกิดขึ้นคือ Gismondine เมื่อกระตุ้นที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C ส่วน Chabazite & Nepheline เกิดขึ้นจากการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 100 °C จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 100 °C ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงที่สุด เพราะถ้าอุณหภูมิสูงกว่า (120 °C) ทำให้ภาวะในการเกิดซีโอไลต์แปรเปลี่ยนไปทำให้เกิดซีโอไลต์ Gismondine ในปริมาณที่ยังต่ำ เพราะยังมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนต่ำ ในทำนองเดียวกันถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า

(70 °C) เป็นภาวะที่ไม่เหมาะสำหรับการเกิดซีโอไลต์ได้ดีที่สุด จากการทดลองเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากทั้งสามภาวะมาทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 100 °C (Chabazite & Nepheline) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงที่สุด (ดังแสดงในตารางที่ 4.4) สรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในช่วง 70 – 120 °C เป็นช่วงที่สามารถสังเคราะห์ ซีโอไลต์ได้ กล่าวคือ ถ้ากระตุ้นที่อุณหภูมิ 70 และ 120 °C จะเกิดซีโอไลต์ Gismondine ขึ้นแต่เกิดขึ้นในปริมาณไม่มาก ซึ่งทราบได้จากผลการวิเคราะห์หาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนที่ได้ไม่สูง ส่วนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 100 °C จะเกิดซีโอไลต์ 2 ชนิด คือ Chabazite และ Nepheline ที่ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้ดีกว่า

#### 5.1.4 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

จากการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น การเกิดผลึกซีโอไลต์จะสูงตามไปด้วย เพราะโอกาสในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแก้วลอยถ่านหิน (ควอตและมุลไลต์) ที่เป็นของแข็งอสังฐานไปเป็นโครงสร้างที่เป็นผลึกย่อมมีมากขึ้นด้วย จากผลการทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิ 70 °C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่กระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (ภาคผนวก ข รูปที่ 1) พบว่ายังไม่เกิดเป็นผลึกซีโอไลต์เกิดขึ้นเลย แต่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแก้วลอยถ่านหินขึ้นคือมีโครงสร้างของโซเดียมอลูมิโนซิลิเกตเกิดขึ้นแต่ยังไม่ใช่ผลึกซีโอไลต์ เราสามารถติดตามดูการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกนี้ได้จากผลการวิเคราะห์จากเครื่องสแกนนิ่งอิเล็กตรอนไมโครสโคป ดังรูปที่ 4.16 – 4.27 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงการเกิดผลึกขึ้น สำหรับงานวิจัยนี้ถ้าระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามากขึ้น โอกาสที่จะเกิดผลึกซีโอไลต์จะสูงขึ้นด้วย ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Amrhein C. and Other (1996) และเมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้จากภาวะต่าง ๆ มาทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลา 72 ชั่วโมง (Zeolite P) ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงที่สุดเท่ากับ 619.44 mmol/kg ส่วนผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลา 96 ชั่วโมง (Chabazite และ Nepheline) ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้สูงที่สุดเท่ากับ 229.19 mmol/kg ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.5 และ รูปที่ 4.5

เห็นได้ว่าเมื่อพิจารณาซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้แล้ว ภาวะที่เหมาะสมที่สุดใน การสังเคราะห์ซีโอไลต์ ที่นอกจากจะพิจารณาจากสมบัติของซีโอไลต์คือความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนแล้ว เราจะนำความประหยัดในด้านพลังงาน มาพิจารณาควบคู่ไปด้วย พบว่า ซีโอไลต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสารละลายไฮดรอกไซด์ควรใช้ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 °C ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 619.44 mmol/kg ส่วนซีโอไลต์ที่ได้จากการกระตุ้นด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ควรใช้ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 °C ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนได้เท่ากับ 204.22 mmol/kg เพราะค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนไม่ต่างจากค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนที่ภาวะความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 °C ที่ระยะเวลา 96 ชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 229.19 mmol/kg ถ้าพิจารณาถึงความประหยัดด้านพลังงานด้วย

เห็นได้ว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้นี้ให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่า ถ้ำลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 52.20 mmol/kg จึงนับได้ว่างานวิจัยนี้เป็นการนำเอาถ้ำลอยถ่านหิน (วัสดุเหลือทิ้ง) ที่ส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการฝังกลบหรือถมที่ดินมาปรับปรุงโดยการทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสตามวิธีไฮโดรเทอร์มอลจนเกิดเป็น ซีโอไลต์ขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้งานที่เกิดประโยชน์สูงสุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลงานวิจัยการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน

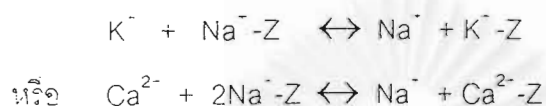
Amrhein C. and Other (1996)	มนตรี ทองคำ (1999)
<p>วัตถุดิบ : เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าใน แถบอเมริกาตะวันตก</p> <p>วิธีการสังเคราะห์ : Hydrothermal Treatment</p> <p>ภาวะในการทดลอง : NaOH &amp; KOH, Temp. 40, 60, 100 , 250 °C Time 24–240 hr Pressure 1 atm and pressure bomb</p> <p>ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ : Na-Pl, Chabazite zeolite P, zeolite X</p> <p>ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม ไอออนของซีโอไลต์ที่กระตุ้นด้วย NaOH 3.5 M 150 °C 72 hr เท่ากับ 640 mmol/kg</p>	<p>วัตถุดิบ : เถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้า แม่เมาะ ประเทศไทย</p> <p>วิธีการสังเคราะห์ : Hydrothermal Treatment</p> <p>ภาวะในการทดลอง : NaOH &amp; KOH, Temp. 70, 100 and 120 °C, Time 24 – 120 hr Pressure 1 atm</p> <p>ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ : zeolite P, Chabazite Nepheline Gismondine</p> <p>ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม ไอออนของซีโอไลต์ที่กระตุ้นด้วย NaOH 2.0 M 100 °C 72 hr เท่ากับ 619.44 mmol/kg</p>

ตารางที่ 5.1 เป็นการเปรียบเทียบผลงานวิจัยเกี่ยวกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน ซึ่งในประเทศไทยยังมีการศึกษาค้นคว้าและทำวิจัยกันน้อยอยู่ ส่วนใหญ่จะเป็นงานวิจัยจากต่างประเทศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 5.2 การนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ไปใช้งาน

การใช้งานของซีโอไลต์ส่วนใหญ่จะใช้งานในลักษณะที่เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cationic ion exchange) โดยมีหลักการสำคัญคือ Nonframework Cation จะสามารถถูกแทนที่ได้ด้วยไอออนบวกชนิดอื่น ๆ ได้ ดังสมการ



โดยการแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ โดยให้ประจุที่เข้าและออกจากโครงสร้างเท่ากัน ซึ่งโดยปกติการแลกเปลี่ยนไอออนจะขึ้นอยู่กับ

- ธรรมชาติของไอออนบวก
- อุณหภูมิที่ใช้
- ความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลาย
- ชนิดของไอออนลบที่รวมตัวกับไอออนบวกในสารละลาย
- ตัวทำละลาย(การแลกเปลี่ยนส่วนมากเกิดขึ้นได้ดีใน Aqueous Solution)
- ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์

จากผลงานวิจัยนี้สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ กันได้จากเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทยได้ตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ประเทศไทย

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้	สูตรทั่วไปของซีโอไลต์
Zeolite P	$Na_6[(AlO_2)_6(SiO_2)_{10}]15H_2O$
Chabazite	$Ca_2[(AlO_2)_4(SiO_2)_6]13H_2O$
Nepheline	$Na_2[(AlO_2)_2(SiO_2)_2]H_2O$
Gismondine	$Ca_4[(AlO_2)_8(SiO_2)_8]16H_2O$

การนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากเถ้าลอยถ่านหินไปใช้งานส่วนใหญ่จะนำไปใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยอาศัยสมบัติของการแลกเปลี่ยนไอออนของซีโอไลต์มากำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียและการลดปริมาณแก๊สเสีย ดังเช่น

งานวิจัยของ Patane G and Other. (1996) นำ zeolite A และ zeolite P ที่ได้มาจากการสังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมากำจัดทองแดงและสังกะสีออกจากน้ำเสีย

งานวิจัยของ Atkins M and Other. (1995) นำ zeolite P ที่ได้มาจากการสังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมากำจัดทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) และสังกะสี ( $\text{Zn}^{2+}$ ) ออกจากน้ำเสีย

งานวิจัยของ Singer A. and Bergaut V. (1995) นำ zeolite P ที่ได้มาจากการสังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมากำจัดตะกั่ว ( $\text{Pb}^{2+}$ ) และสังกะสี ( $\text{Zn}^{2+}$ ) ออกจากน้ำเสีย

งานวิจัยของ Lopez Salinas E. and other. (1997) นำซีโอไลต์ที่ได้มาจากการสังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินมาลดปริมาณไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}$ ) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลงานวิจัย

##### 6.1.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอยลิกไนต์

เถ้าลอยลิกไนต์เกิดจากการนำถ่านหินลิกไนต์มาบดให้ละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาที่มีอากาศพอเพียง โดยเถ้าลอย (Fly Ash) เป็นเถ้าที่ถูกแยกออกจากลมร้อนที่พัดออกจากปล่องควัน และถูกจับไว้ด้วยเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต จะมีสีเทาอมแดงเมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้น จากการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์จากแม่เมาะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 100 เท่า พบว่ารูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะค่อนข้างกลมและกลม (Sub-round to round) และมีขนาดตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.42 มิลลิเมตร

##### 6.1.2 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ มีองค์ประกอบทางเคมี ดังนี้

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
42.77	24.65	13.11	9.53	3.07	2.73	2.23	1.21	0.37	0.17

##### 6.1.3 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลองนี้คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 °C ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 619.44 mmol/kg และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.0 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 °C ที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมงจะให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 204.22 mmol/kg ที่ภาวะดังกล่าวนี้สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาได้และให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าเถ้าลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเท่ากับ 52.20 mmol/kg จึงนับได้ว่างานวิจัยนี้เป็นการนำเอาเถ้าลอยถ่านหิน (วัสดุเหลือทิ้ง) มาพัฒนาปรับปรุงโดยการทำปฏิกิริยา

กับสารละลายเบสตามวิธีไฮโดรเทอร์มอลจนเกิดเป็นซีโอไลต์ขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้งานที่เกิดประโยชน์สูงสุด

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยใช้วัตถุดิบอื่น ๆ ที่เป็นของเหลือทิ้งมาเปรียบเทียบผล เช่น หินบดจากภูเขา หรือแกลบที่เหลือทิ้งจากการสีข้าว เป็นต้น หรือใช้เถ้าลอยถ่านหินจากแหล่งอื่น ๆ มาใช้เป็นวัตถุดิบ เพราะจากผลงานวิจัยของ Querol X. and Other.(1996) แสดงให้เห็นว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากแหล่งที่ต่างกันหรือวัตถุดิบที่แตกต่างกันจะได้ซีโอไลต์ต่างชนิดกัน และมีสมบัติที่ไม่เหมือนกัน เนื่องจากความแตกต่างกันทางองค์ประกอบของวัตถุดิบ

2. ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสชนิดอื่น ๆ บ้าง เช่น  $Al(OH)_3$ ,  $LiOH$  เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยนี้ เพราะสารละลายเบสที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ จะให้ซีโอไลต์ต่างชนิดกัน

3. ควรจะมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่โดยระบุชนิดของซีโอไลต์ที่ต้องการสังเคราะห์ เช่น zeolite X, ZSM-5, zeolite Y เป็นต้น โดยศึกษาแผนภูมิวัฏภาคของการเกิดซีโอไลต์เหล่านี้ว่าภาวะการเกิดอยู่ในช่วงใดจาก หนังสือ Zeolite Molecular Sieve (Breck) ซึ่งถ้าสังเคราะห์ซีโอไลต์เหล่านี้ได้จะสามารถเพิ่มแนวทางการสังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นมาได้ เพราะว่าวัตถุดิบที่ใช้สังเคราะห์สามารถหาได้ในประเทศ

## 6.3 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เป็นเครื่องมือที่ออกแบบขึ้นมาจากอุปกรณ์ที่มีในห้องปฏิบัติการ ฉะนั้นเวลาใช้ทำการทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จะมีข้อจำกัดเมื่อเราต้องการแปรอุณหภูมิ ถ้าต้องการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิสูงกว่า  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีปัญหาเรื่องสารละลายเบสระเหยรั่วออกจากเครื่องปฏิกรณ์ได้ จึงเป็นข้อจำกัดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

จิตทิน พัฒนาการณ์ และ ประภากร เจริญวิภาสเจต. การสังเคราะห์ซีโอไลท์จากดินขาว. รายงาน  
โครงการเกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2535.

ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์. ซีโอไลท์ลอยกับงานอุตสาหกรรม. ประโยชน์ของกากของเสียจากโรงงานไฟฟ้า.  
กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2526.

รุ่งระวี ยิ่งยวด และ นิตาชล ชินพันธ์. การสังเคราะห์ซีโอไลท์จากดินขาว. รายงานโครงการ  
เกษตรศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2536-2537.

วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. ถ้ำลอยลิกไนต์. กรุงเทพมหานคร: 2538.

วิชาญ ภูพัฒน์. การใช้ซีโอไลท์ลอยในงานผลิตปูนซีเมนต์. อุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์.  
กรุงเทพมหานคร: การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2526.

วิภายู บุญเจริญสุข. รายงานปัญหาพิเศษ เรื่อง ซีโอไลท์. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย  
เกษตรศาสตร์, 2537.

สุนีย์ ผู้มีธรรม และ วิไลรัตน์ ศิริอดุลย์. การสังเคราะห์ซีโอไลท์จากดินขาว. รายงานโครงการ.  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. ซีโอไลท์สำหรับอุตสาหกรรมสารซักฟอก. สำนักงานมาตรฐาน  
ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

อนิรุทธิ์ ธงไชย. การใช้ประโยชน์ซีโอไลท์ลอยในงานวิศวกรรม. เอกสารการประชุมวิชาการครั้งที่ 3  
เทคโนโลยีสำหรับการพัฒนาชนบท. ขอนแก่น, 2528.

### ภาษาอังกฤษ

Amrhein C, Haghnia GH, Kim TS, Mosher PA, Amanios and Delta Torre L. Synthesis and  
Properties of Zeolites from Coal Fly ash. Environmental Science & Technology 30  
(1996): 735-742.

Atkins M, Glasser FP and JACK JJ. Zeolite-P in Cements – Its Potential for Immobilizing  
Toxic and Radioactive-waste species. Waste Management 15 (1995): 127-135.

Berggaut V, Singer A. High capacity cation exchanger by hydrothermal zeolitization of  
Coal fly ash. Applied Clay Science 10 (1996): 369-378.

- Breck D.W. Zeolite Molecular Sieve : Structure, Chemistry and Use. Newyork: Wiley 1974.
- Breck D.W. Crystalline Molecular Sieves. J. Chem. Educ. 41 (1964)
- Catalfamo P, Corigliano F, Primerano P and Dipasquale S. Study of the precrystallization stage of hydrothermally treated amount aluminosilicates through the composition of the aqueous phase. Journal of the Chemical Society-Faraday transactions 89 (1993): 171-175.
- Charles N. Satterfield. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice second Edition ,McGraw-Hill, 226-259.
- Dyer,A.,An Introduction to Zeolite Molecular Sieves. New York: John Wiley & Sons (1988): 69-97.
- Flannigen , E.M.,Khatami,H.and Szymanski,H.A.,Molecular Sieve Zeolite I. Washington D.C.: Gould,R.F.,Ed.American Chemcal Society (1971): 201-219.
- Grutzeck MW and Siemer DD. Zeolites synthesized from class F fly ash and sodium aluminate slurry. Journal of the American Ceramic Society 80 (1997): 2449-2453.
- Henmi T. Synthesis of hydroxy-sodalite ("ZEOLITE") from waste coal ash. Soil. Sci. Plant Nutr 33 (1987): 517-521.
- Hollman GG, Steenbruggen G and Janssen-Jurkovicova M. A two-step process for the synthesis of zeolites from coal fly ash. Fuel 78 (1999): 1225-1230.
- Katz A. Microscopic study of alkaline-activated fly ash. Cement and Concrete Research 28 (1998):197-208.
- Lin CF, His HC. Resource recovery of waste fly-ash – synthesis of zeolite-like material. Environmental Science & Technology 29 (1995): 1109-1117.
- Lin CF, Lo SS, Lin HY and Lee YC. Stabilization of Cadmium contaminated soils using synthesized zeolite. Journal of Hazardous Materials 60 (1998): 217-226.
- LopezSalins E, Salas P, Schifter I, Moran M, Castillo S and Mogica E. Reduction of NO by CO using a zeolite catalyst obtained from fly ash. Studies in Surface Science and Catalyst 105 (1997): 1565-1570.
-

- Mavros P, Zouboulis AI and Lazaridis NK. Removal of Metal-Ions from Wastewater – The case of Nickel. *Environmental Technology* 14 (1993): 83-91.
- Ma WP, Brown PW and Komarneni S. Characterization and cation exchange properties of zeolite synthesized from fly ashes. *Journal of Materials Research* 13 (1998): 3-7.
- Patane G, DiPasquale S, Corigliano F and Mavilia L. Use of Zeolitised waste material in the removal of Copper(II) and Zinc(II) from waste water. *Annali. Di. Chmica.* 86 (1996): 87-98
- Querol X, Alastuey A, Fernandezturriel JL and Lopezsoles A. Synthesis of Zeolites by Alkaline Activation of Ferro-Aluminous Fly Ash. *Fuel* 74 (1995): 1226-1231.
- Querol X, Plana F, Alastuey A and Lopezsoles A. Synthesis of Na-zeolites from fly ash. *Fuel* 76 (1997): 793-799.
- Querol X, Plana F, Alastuey A, Lopezsoles A, Andres JM, Juan R, Ferrer P and Ruiz CR. A fast method for recycling fly ash: Microwave-assisted zeolite synthesis. *Environmental Science & Technology* 9 (1997): 2527-2533.
- Shigemoto N, Hayashi H, Miyaura K. Selective formation of Na-X zeolites from coal fly ash by fusion with sodium-hydroxide prior to hydrothermal reaction. *Journal of Materials Science* 28 (1993): 4781-4786.
- Shigemoto N, Sugiyama S, Hayashi H, Miyaura K. Characterization of Na-X, NA-A and Coal fly ash zeolites and their amorphous precursors by IR, MAS and XPS. *Journal of Materials Science* 30 (1995): 5777-5783.
- Shih WH, Chang HL. Conversion of fly ash into zeolites for ion-exchange applications. *Materials Letters* 28 (1996): 263-268.
- Singer A, Berggaut V. Cation-Exchange properties of hydrothermally treated coal fly-ash. *Environmental Science & Technology* 29 (1995): 1748-1753.
- Smith, I.V. Molecular Sieve Zeolite I. Washinton D.C.: Gould, R.F., Ed., American Chemical Society (1971): 172-179.

- Steenbruggen G and Hollman GG. The synthesis of zeolites from fly ash and the properties of the zeolite products. *Journal of Geochemical Exploration* 62 (1998): 305-309.
- Suyama Y, Katayama K and Meguro M.  $\text{NH}_4^+$ -adsorption characteristic of zeolites synthesized from fly ash. *Nippon Kagaku Kaishi* 2 (1996):136-140.
- Yang GCC and Yang TY. Synthesis of zeolites from municipal incinerator fly ash. *Journal of Hazardous Materials* 62 (1998): 75-78.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม

วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม มีรายละเอียดของการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

#### เครื่องมือที่ใช้

1. เครื่องกวนไฟฟ้าพร้อมแท่งแม่เหล็ก
2. นาฬิกาจับเวลา
3. กระบอกชั่งตวง (ปราศจากเข็มฉีดยา) ขนาด 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร
4. เครื่องกรองสุญญากาศ
5. กระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 42
6. ขวดรูปชมพู่
7. ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

#### วิธีเตรียมสารละลาย

1. สารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม(calcium exchange solution) 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ซึ่งแคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต 2.938 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอน ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตรขนาด 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปรับความเป็นกรด-เบสของสารละลายให้ได้ 10.0 ด้วยสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก) และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตรขนาด 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

## 3. ไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์

## 4. สารละลายบัฟเฟอร์

ละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 67.5 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 300 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์(ร้อยละ 28 โดยน้ำหนัก) 570 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตรขนาด 1000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

## 5. สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ 0.005 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

ซิงอีดีทีเอไดโซเดียมไดไฮเดรต (disodium ethylenediaminetetraacetate dihydrate) 3.743 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอน ละลายด้วยน้ำกลั่น ถ่ายใส่ขวดแก้วปริมาตรขนาด 2000 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร

สอบเทียบความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอโดยซิงแคลเซียมคาร์บอเนต (ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์) ประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอนถึง 0.000 1 กรัม ใส่ลงในขวดแก้วปริมาตรขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ละลายด้วยกรดไฮดรอกลอริกเข้มข้น (ความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดปริมาตร ใช้ปิเปตต์ดูดสารละลายนี้ 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดแก้วรูปกรวยขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายบัฟเฟอร์ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอจนถึงจุดยุติเมื่อสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน คำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ จากสูตร

$$\text{สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ} = \frac{m}{\text{โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร} \times V \times 100.09 \times 50}$$

เมื่อ m คือ มวลของแคลเซียมคาร์บอเนต เป็น มิลลิกรัม

V คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร



### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัมในครุชิลเบลพร้อมฝา ให้ทราบมวลแน่นอน แล้วนำครุชิลเบลและฝาไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปิดฝาครุชิลเบลนำออกจากเตาเผา ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์จนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วชั่ง คำนวณหาน้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา จากสูตร

$$\text{น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา ร้อยละ} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

เมื่อ  $m_1$  คือ มวลตัวอย่างก่อนเผา เป็นกรัม

$m_2$  คือ มวลตัวอย่างหลังเผา เป็นกรัม

2. ถ่ายสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 400 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่แท่งแม่เหล็ก ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระดาษฟิวส์ ซึ่งตั้งอยู่บนเครื่องกวนไฟฟ้า เปิดเครื่องกวนไฟฟ้าให้หมุนด้วยความเร็วเกิน 600 รอบต่อนาที เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 15 นาที

3. ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ให้ทราบมวลแน่นอน แล้วถ่ายใส่ลงในสารละลายแลกเปลี่ยนแคลเซียม (ข้อ 2) อย่างรวดเร็วพร้อมกับจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลาทันที เมื่อครบเวลา 15 นาที ใช้กระบอกชั่งยาดูดสารละลายแขวนลอย 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร กรองอย่างรวดเร็ว โดยใช้เวลาไม่เกิน 15 วินาที ด้วยเครื่องกรองสูญญากาศและกระดาษกรองวัดแมน เบอร์ 42 สารละลายที่กรองได้ต้องใส ถ้าไม่ใสให้ปฏิบัติใหม่ตั้งแต่ข้อ (1) จนถึงเมื่อสารละลายที่กรองได้ต้องใส

4. ใช้ปิเปตต์ดูดสารละลายส่วนใสที่กรองได้ 10.0 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดแก้วรูปกรวยขนาด 125 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร สารละลายบัพเฟอร์ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร และไฮดรอกซีแนฟทอลบลูอินดิเคเตอร์ 0.1 กรัม นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอดีทีเอจนถึงจุดยุติเมื่อสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีน้ำเงิน

5. ทำแบลนด์เปรียบเทียบ ถ้าปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอดีทีเอที่ใช้ในการไทเทรต 2 ครั้ง ต่างกันเกิน 0.10 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้ทำแบลนด์เปรียบเทียบใหม่

## การคำนวณ

คำนวณหาความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม จากสูตร

$$\text{ความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียม} = \frac{(V_2 - V_1) \times c \times 100.09 \times 25}{m} \times \frac{100}{(100 - L)}$$

มิลลิกรัมแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมซีไอไลต์

เมื่อ  $V_1$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ ที่ใช้ในการไทเทรตกับสารละลายตัวอย่าง เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

$V_2$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ ที่ใช้ในการไทเทรตกับแบลนด์ เป็นลูกบาศก์เซนติเมตร

$c$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ เป็นโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

100.09 คือ มวลโมเลกุลของแคลเซียมคาร์บอเนต

$m$  คือ มวลของตัวอย่าง เป็นกรัม

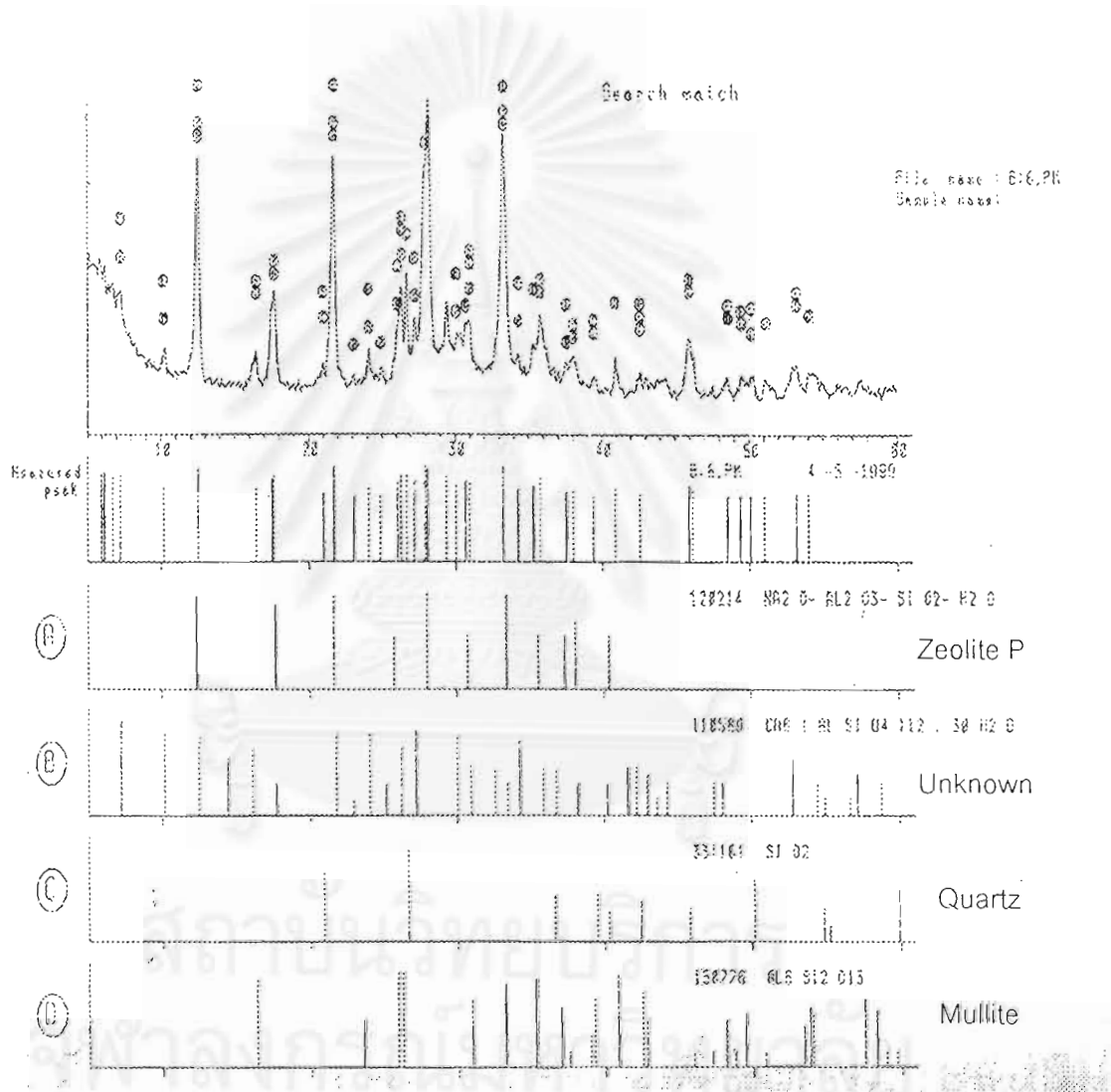
$L$  คือ น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา เป็นร้อยละ

หมายเหตุ : ตัวอย่างที่ใช้ก่อนนำมาวิเคราะห์ ต้องเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (ที่ปราศจากซิลิกาเจล) ที่มีภาชนะบรรจุสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน ก่อนนำไปวิเคราะห์

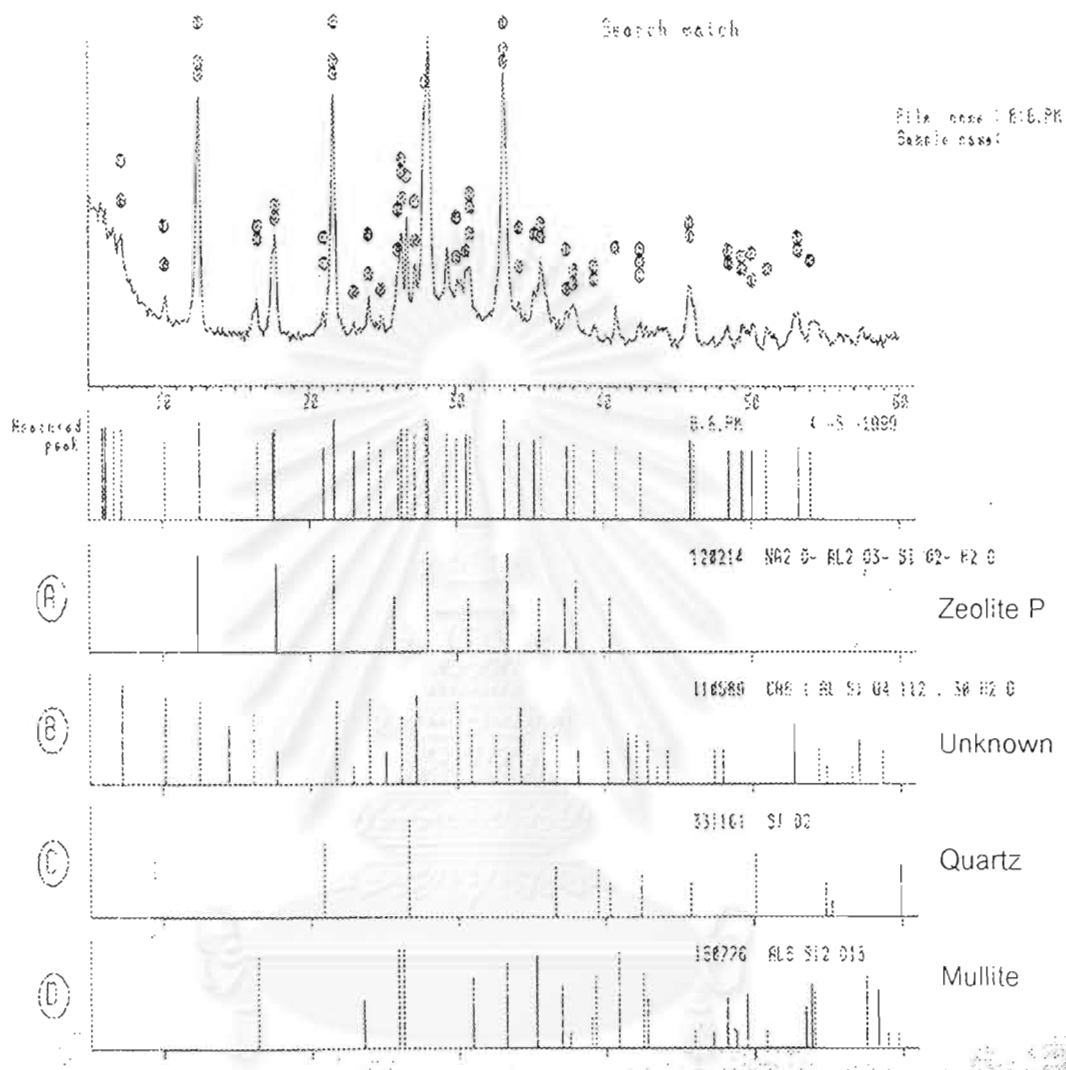
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

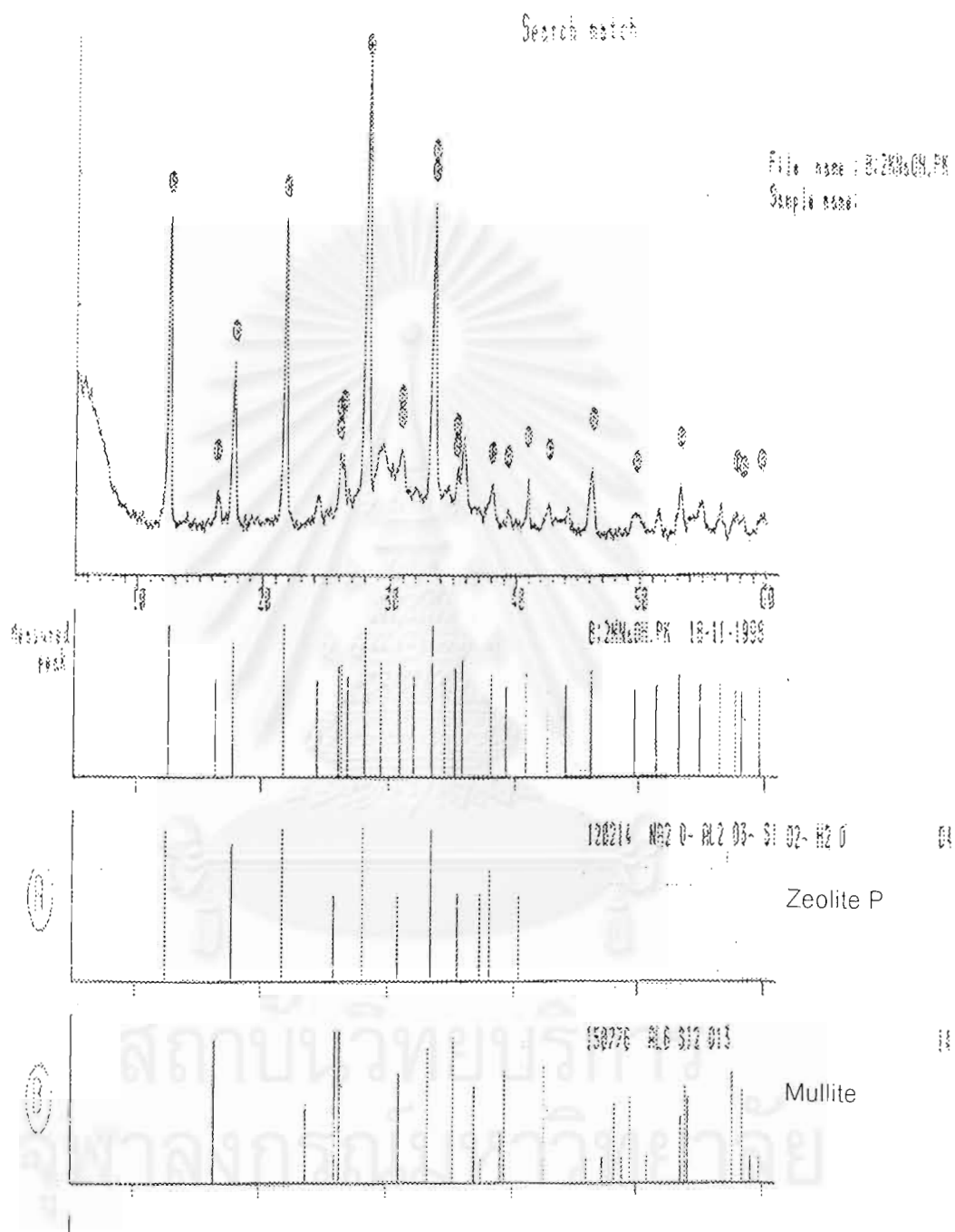
ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน



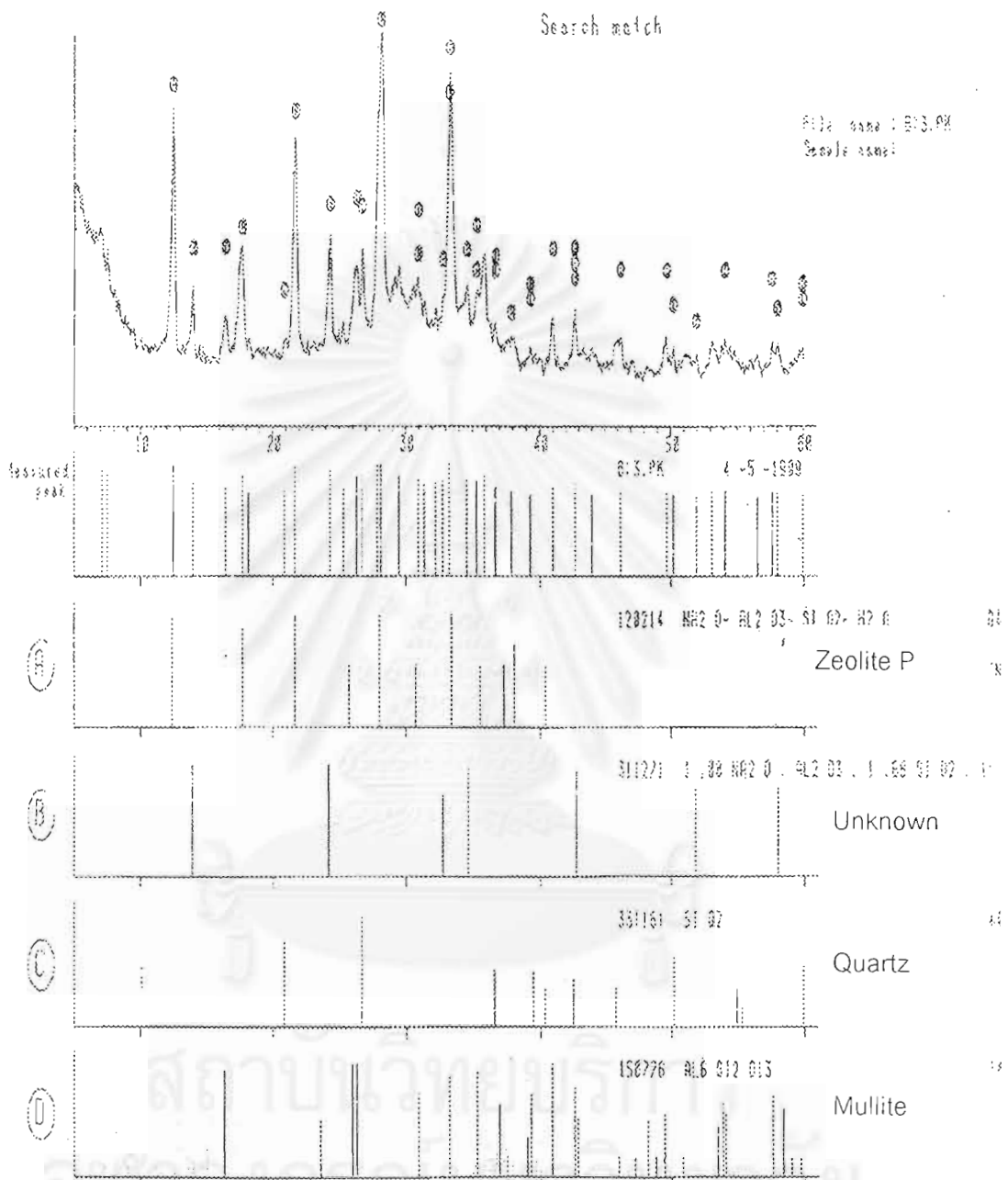
รูปที่ 1. ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 2.0 M 70 °C 24 ชั่วโมง



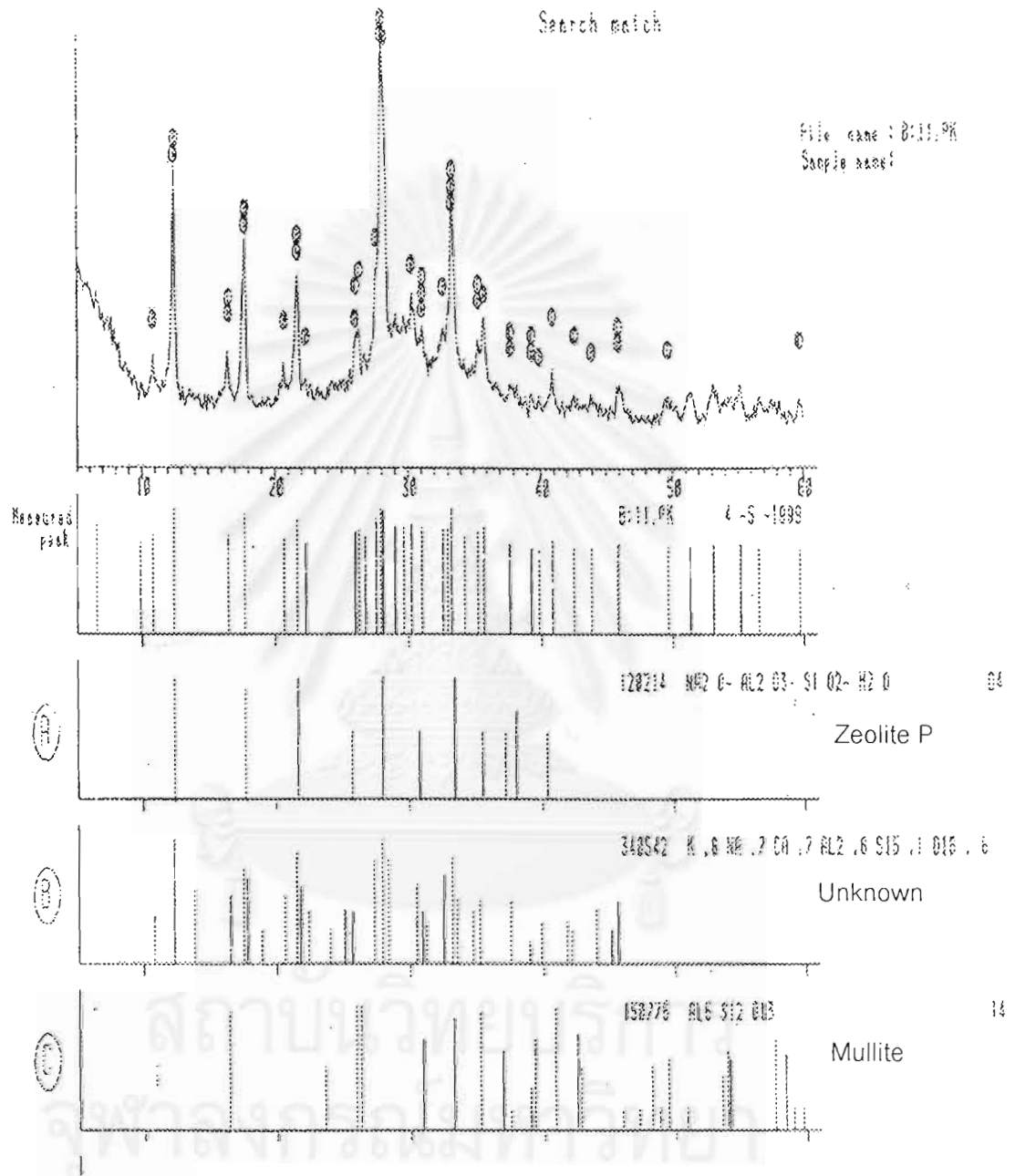
รูปที่ 2 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 2.0 M 70 °C 72 ชั่วโมง



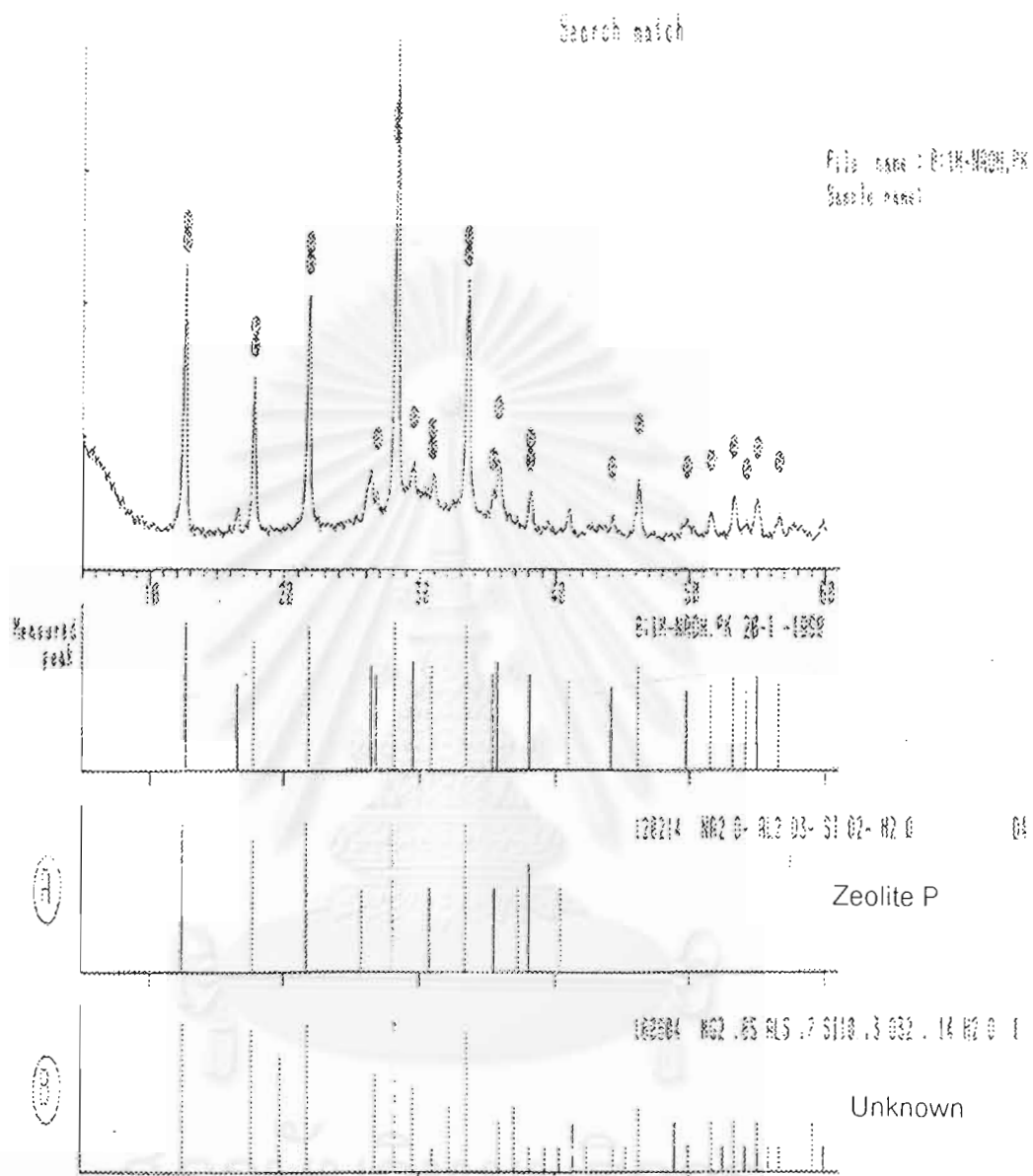
รูปที่ 3 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยหินผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 2.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 2.0 M 120 °C 7 ชั่วโมง

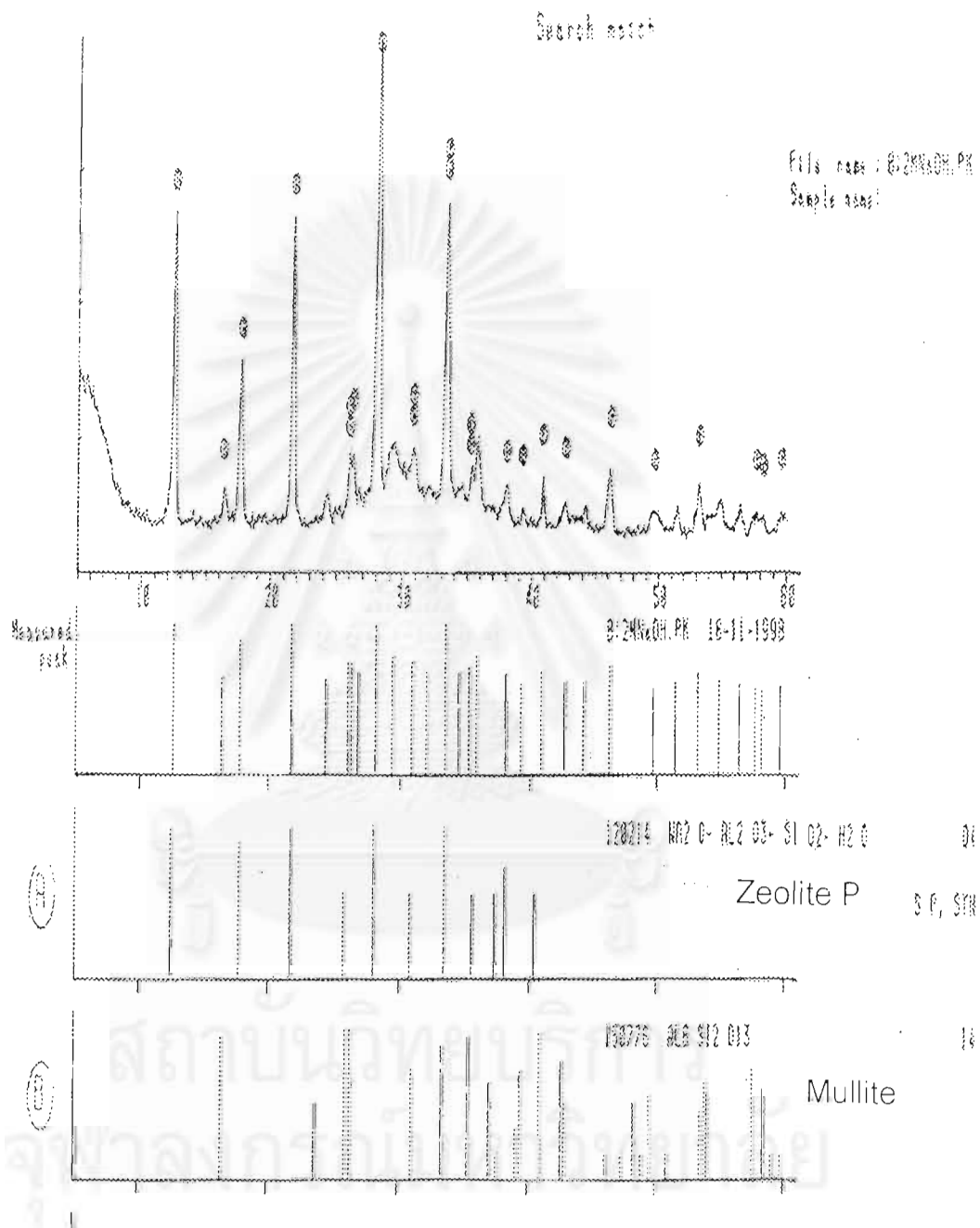


รูปที่ 5 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย  
 $0.8\text{NaOH} + 0.2\text{KOH}$  2.0 M  $100^\circ\text{C}$  72 ชั่วโมง

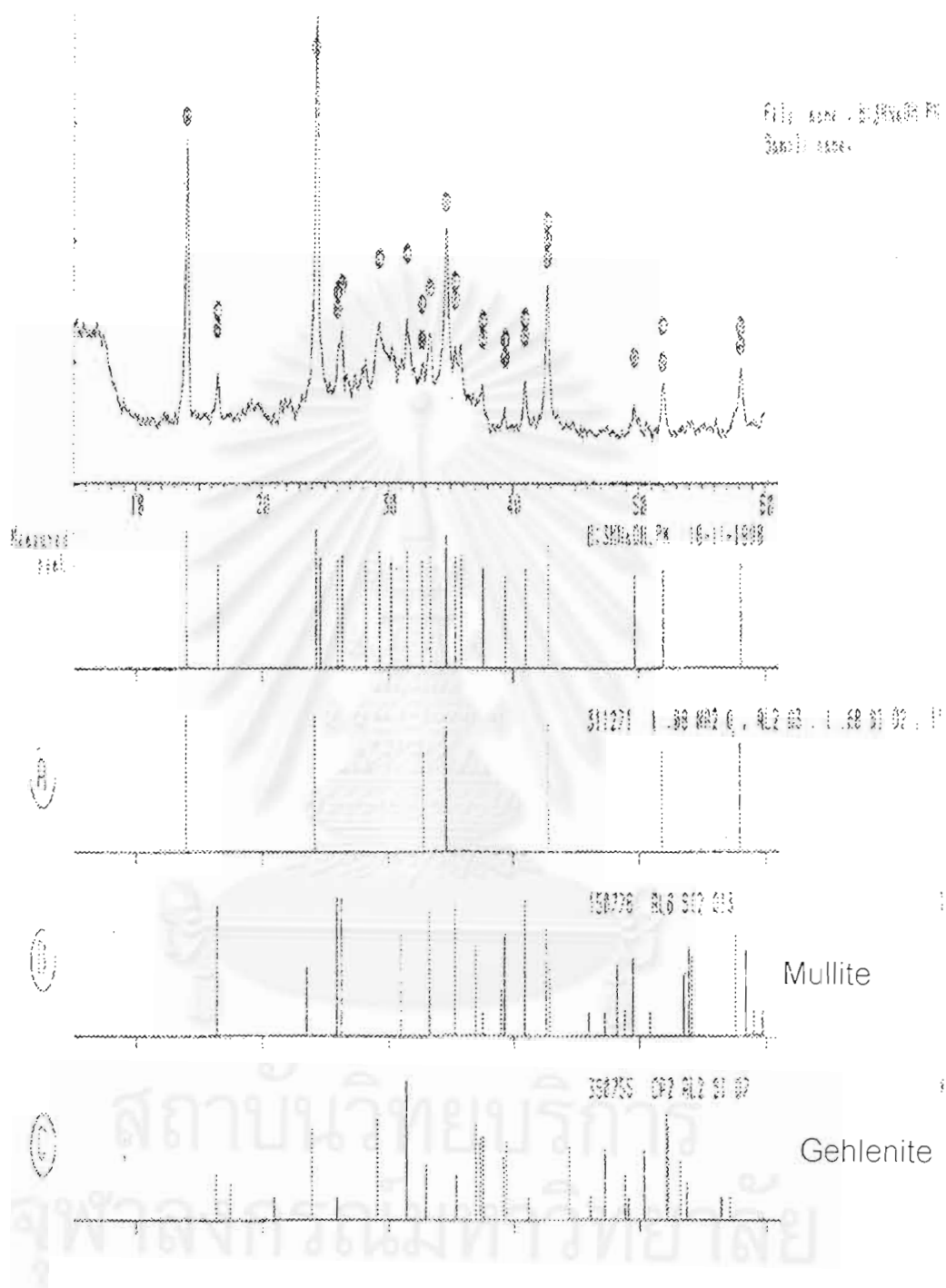


รูปที่ 6 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 1.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง

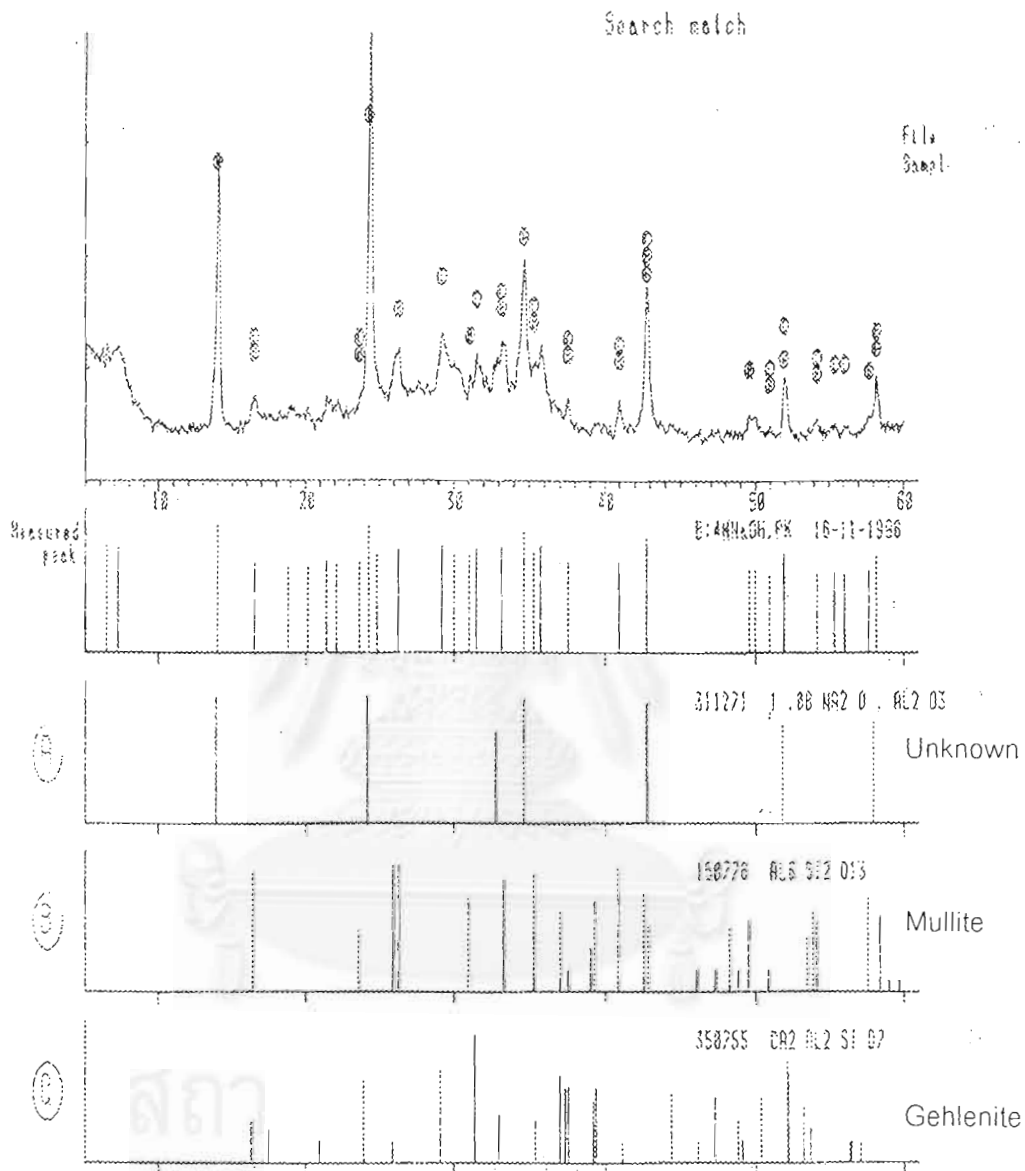




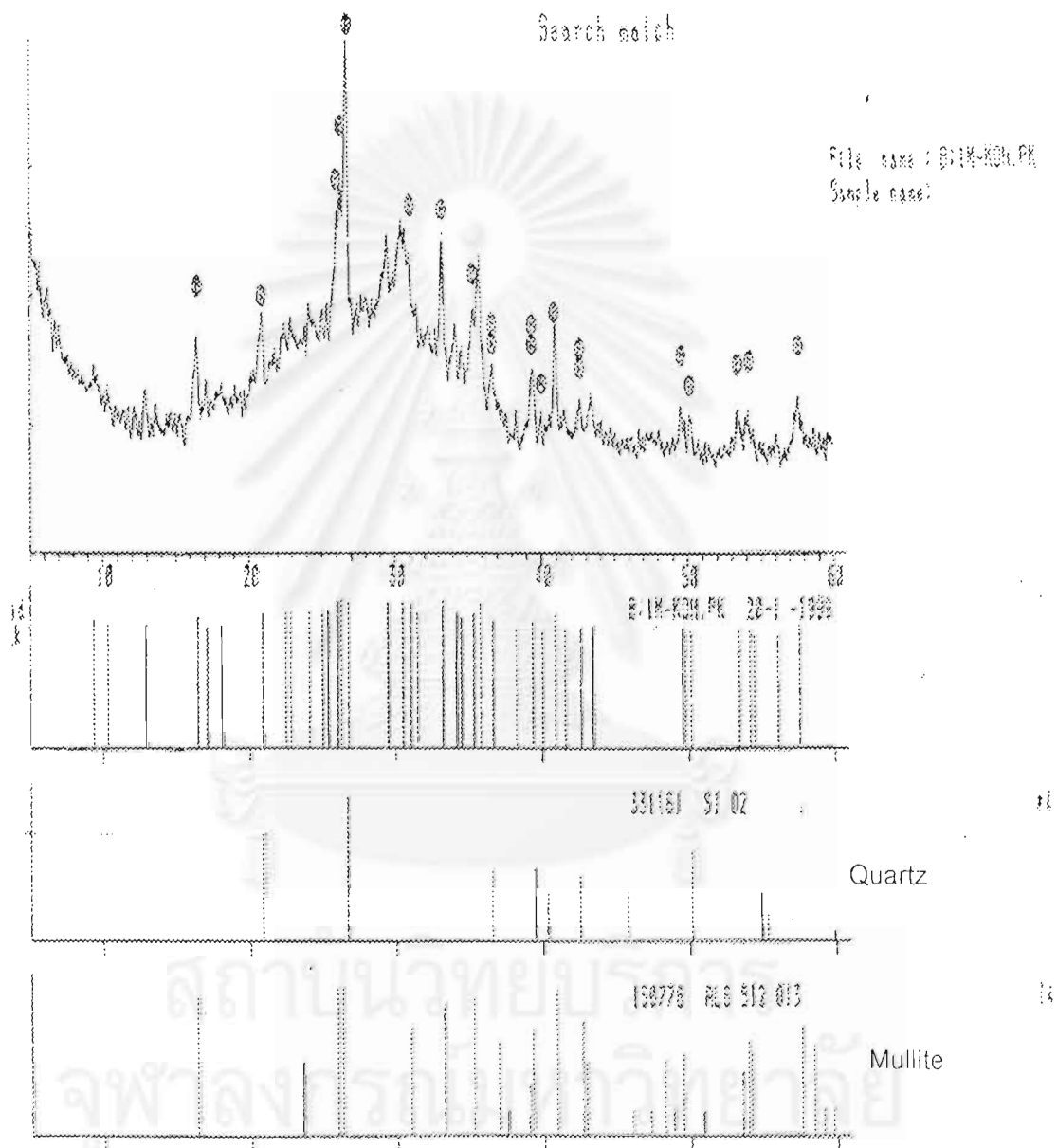
รูปที่ 7 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยที่ผ่านกรรกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 2.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง



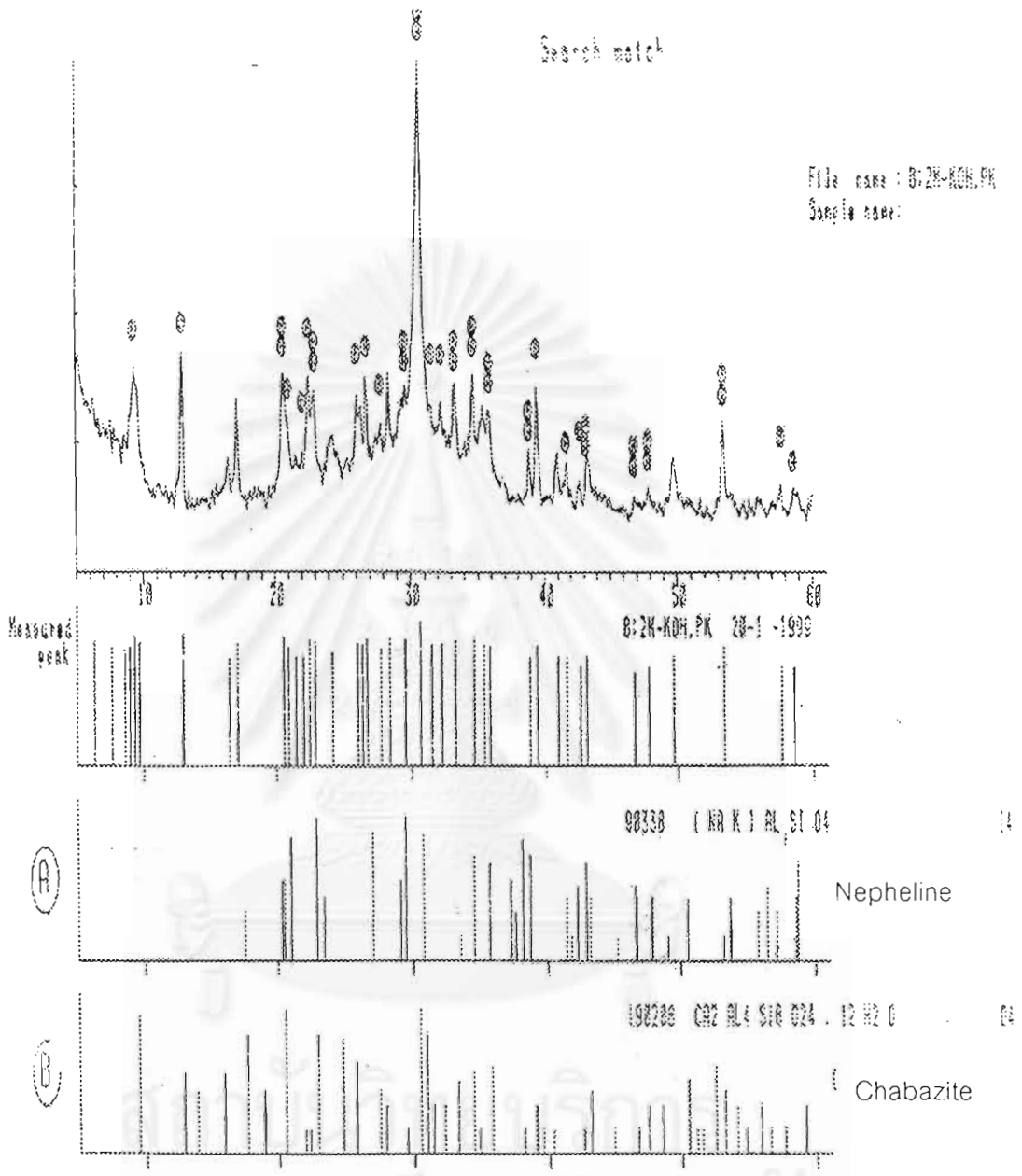
รูปที่ 8 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 3.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง



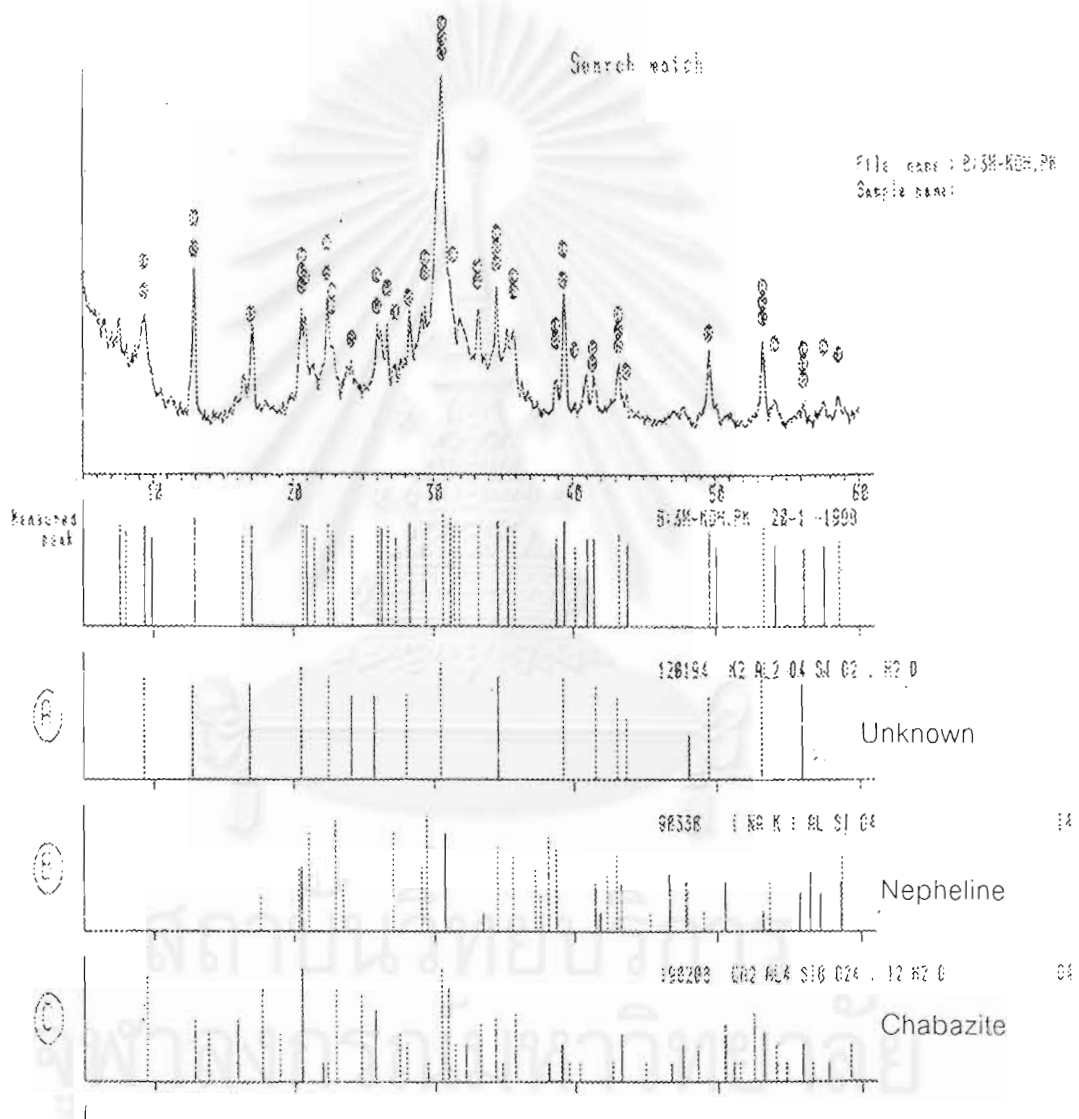
รูปที่ 9 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย NaOH 4.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง



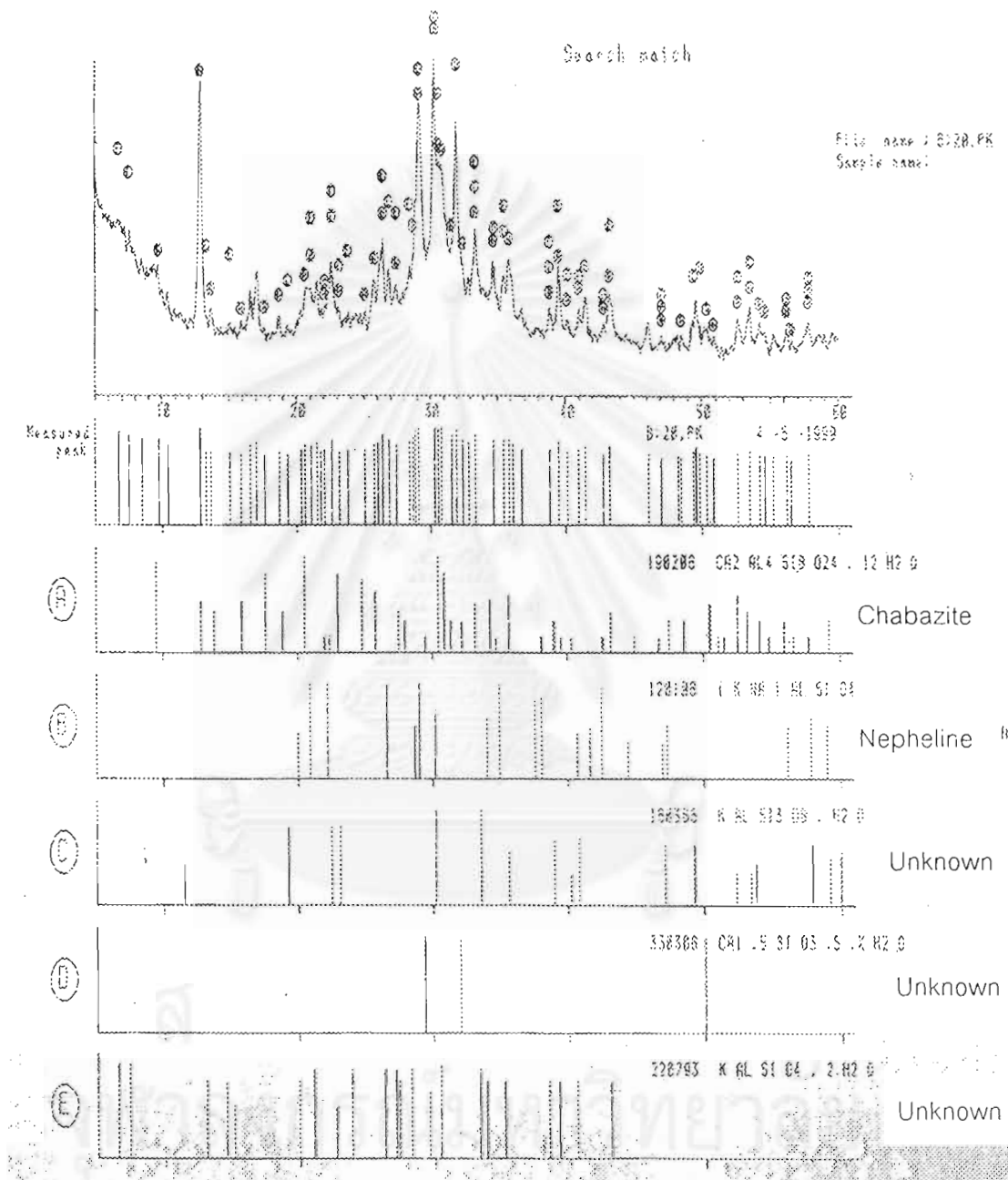
รูปที่ 10 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย KOH 1.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง



รูปที่ 11 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย KOH 2.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง



รูปที่ 12 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย KOH 3.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง



รูปที่ 13 ผลวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลาย KOH 4.0 M 100 °C 72 ชั่วโมง

ภาคผนวก ค

X-RAY DIFFRACTION DATA

1. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันของแก้วลอยถ่านหิน

$2\theta$ (°)	D (Å)	I (counts)	I/I <sub>0</sub>
13.20	6.702	117	30
14.04	6.303	110	31
16.48	5.375	182	47
16.68	5.248	136	35
20.52	4.325	169	44
20.88	4.251	198	51
25.56	3.482	377	98
26.04	3.419	310	81
26.32	3.383	337	88
26.60	3.348	385	100
28.60	3.119	205	53
29.44	3.031	221	57
30.28	2.949	210	57
31.08	2.875	203	53
31.48	2.840	222	58
31.92	2.801	181	47
32.36	2.764	162	47
33.28	2.690	227	59
34.28	2.614	149	39
35.36	2.536	197	51
35.72	2.512	259	67
35.98	2.495	208	54
38.76	2.321	127	33
39.32	2.290	137	36
40.96	2.202	191	50
42.60	2.121	121	31
43.40	2.083	140	36
46.76	1.941	106	28
47.24	1.922	107	28
48.84	1.863	116	30
49.96	1.824	111	29
52.32	1.747	102	26
53.96	1.698	113	29



2. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 2.0 M NaOH 70 °C 72 hr

$2\theta$ (°)	$D$ (Å°)	$I$ (counts)	$I/I_0$
5.88	15.018	319	52
6.16	14.336	311	51
6.68	13.221	280	46
7.24	12.200	269	44
10.20	8.665	161	26
12.44	7.109	512	83
16.44	5.388	153	25
17.52	5.058	136	38
17.84	5.024	269	44
20.92	4.243	133	22
21.54	4.103	513	83
23.04	3.852	111	18
24.04	3.699	158	26
24.84	3.581	124	20
25.96	3.429	203	33
26.24	3.393	270	44
26.64	3.343	298	48
27.16	3.281	213	35
27.92	3.193	505	82
28.12	3.171	615	100
29.48	3.035	245	40
30.04	2.972	186	30
30.64	2.915	206	33
30.88	2.893	208	34
33.20	2.696	555	90
34.20	2.620	149	24
35.24	2.545	189	27
35.88	2.514	225	37
37.48	2.398	134	22
37.92	2.371	146	24
39.36	2.287	108	18
40.64	2.208	142	23
42.56	2.122	113	16
45.64	1.978	178	29
46.16	1.965	143	23
46.44	1.878	106	17
49.40	1.843	109	18
50.06	1.820	110	18

3. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 2.0 M NaOH 100 °C 72 hr

$2\theta$ (°)	$d$ (Å)	$I$ (counts)	$I/I_0$
12.44	7.109	880	67
16.32	5.427	159	16
17.68	5.012	399	39
21.68	4.096	672	66
24.32	3.057	149	15
26.04	3.419	224	22
28.28	3.388	225	22
28.68	3.338	183	16
29.08	3.175	1014	100
29.36	3.040	258	25
30.84	2.897	233	23
31.92	2.801	187	16
33.36	2.684	703	69
34.44	2.602	166	16
35.28	2.542	202	20
35.78	2.509	262	26
38.04	2.364	171	17
39.24	2.294	125	12
40.88	2.206	162	16
42.60	2.121	136	13
44.20	2.047	132	13
46.12	1.967	194	19
49.68	1.634	117	12
51.44	1.778	127	13
53.16	1.721	170	17
54.84	1.673	139	14
56.44	1.629	128	13
57.64	1.596	116	11
58.16	1.985	107	11
59.56	1.951	115	11

## 4. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 2.0 M NaOH 120 °C 7 hr

$2\theta$ (°)	D (Å°)	I (counts)	I/I <sub>0</sub>
7.08	12.475	254	49
7.48	11.809	232	45
12.44	7.109	418	81
13.96	6.339	184	38
16.48	5.375	142	27
17.68	5.012	231	45
18.16	4.681	115	22
20.54	4.259	116	22
21.64	4.103	383	74
24.26	3.683	250	48
25.24	3.528	136	27
26.24	3.393	211	41
26.64	3.343	237	46
27.60	3.206	388	75
20.08	3.175	517	100
29.44	3.031	211	41
30.08	2.893	196	38
31.40	2.847	165	32
32.20	2.778	156	30
32.72	2.735	169	33
33.24	2.693	185	36
34.48	2.599	182	35
35.24	2.545	177	34
35.84	2.503	222	43
36.60	2.453	135	26
37.80	2.378	119	23
39.24	2.294	105	20
40.92	2.204	145	28
42.60	2.121	145	28
44.00	2.056	105	20
46.20	1.963	118	23
49.60	1.836	115	22
50.16	1.817	104	20
51.92	1.768	97	19
53.12	1.723	112	22
54.04	1.696	115	22
56.44	1.629	93	18
57.60	1.599	109	21

5. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของเส้นใยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 2.0 M KOH 70 °C 72 hr

$2\theta$ (°)	D (Å)	I (counts)	I/I <sub>0</sub>
5.96	14.817	212	80
6.52	13.545	194	55
11.84	7.468	118	33
16.32	5.427	124	35
16.48	5.375	158	45
20.80	4.267	155	44
26.04	3.419	228	65
26.28	3.388	284	81
26.72	3.334	351	100
27.12	3.285	187	53
27.84	3.202	183	52
29.44	3.031	221	63
30.40	2.930	186	54
31.26	2.857	172	49
33.26	2.690	220	65
35.44	2.531	163	46
35.76	2.500	204	58
37.44	2.400	106	31
39.36	2.287	121	34
40.08	2.206	135	38
42.64	2.119	110	31
43.16	2.094	100	28
43.92	2.060	101	29
47.36	1.918	87	25
49.56	1.838	93	26
50.04	1.821	98	27
54.20	1.691	96	27
54.80	1.674	81	23
57.52	1.601	99	28

6. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 2.0 M KOH 100 °C 72 hr

$2\theta$ (°)	D (Å)	I (counts)	I/I <sub>0</sub>
6.24	14.152	222	34
7.56	11.684	193	30
8.56	10.321	172	26
8.96	9.861	197	30
9.32	9.481	257	39
9.60	9.205	216	33
12.92	6.848	275	42
16.44	5.388	145	22
17.12	5.175	218	33
20.60	4.309	253	39
20.92	4.243	194	30
21.48	4.133	149	23
22.00	4.037	153	23
22.48	3.952	248	38
22.92	3.677	221	34
24.16	3.661	175	27
26.00	3.424	219	33
26.32	3.363	212	32
26.72	3.334	243	37
27.76	3.211	168	29
28.36	3.144	254	39
29.56	3.019	236	36
30.89	2.919	654	100
31.44	2.843	212	32
32.20	2.778	218	33
33.20	2.969	236	36
34.60	2.590	252	39
35.32	2.539	211	32
35.76	2.509	201	31
38.76	2.321	150	23
39.36	2.207	234	36
40.92	2.204	150	23
41.64	2.167	130	21
42.60	2.121	115	18
43.16	2.094	149	23
46.76	1.941	93	15
47.60	1.901	107	16
49.64	1.635	145	22

7. ข้อมูลเอกซเรย์ดิฟแฟรกชันของแก้วลอยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย 2.0 M KOH 120 °C 7 hr

$2\theta$ (°)	D (Å)	I (counts)	I/I <sub>0</sub>
16.48	5.375	163	37
20.80	4.267	153	35
22.32	3.980	149	34
25.24	3.526	182	41
26.00	3.424	236	54
26.32	3.383	270	64
26.72	3.334	439	100
29.48	3.027	217	49
30.56	3.923	166	42
31.08	3.875	179	41
33.28	3.690	214	49
34.16	3.623	147	33
35.38	3.536	166	38
38.72	3.512	198	45
39.32	3.290	101	23
40.96	3.202	142	32
42.62	3.121	104	24
43.20	3.089	104	24
47.28	1.921	95	22
48.56	1.873	92	21
49.60	1.836	96	22
50.24	1.814	95	22
54.12	1.693	102	23
57.64	1.598	107	24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียน

นายมนตรี ทองคำ เกิดวันที่ 27 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2517 ที่จังหวัดพิษณุโลก สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมและเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทคนิคกรุงเทพฯ ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2540



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย