

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การสังเคราะห์ซีไอไลต์จากถ้ำลอยซานอ้อย



ส.พ.  
พ.ค.ค  
2550

เลขที่.....  
เลขทะเบียน.....**83198**  
วัน,เดือน,ปี.....**6 ส.ค. 2551**

b.....**119 62622**  
i.....

**ปริญญาโท** เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

**สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์**

**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**

**ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SYNTHESIS OF ZEOLITE A FROM BAGASSE FLY ASH



**A REPORT SUMMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2007**

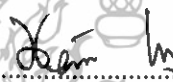
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

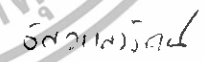
หัวข้อปริญญาบัตร การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยชานอ้อย  
นักศึกษา นางสาวพันธ์ทิพย์ กิ่งช้าง รหัสนักศึกษา 47010507  
นางสาววาสนา ขจรศักดิ์ รหัสนักศึกษา 47010695  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขา วิศวกรรมเคมี  
พ.ศ. 2550  
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร ดร.สุธาสิณี เนรมิตคกพงศ์

ปริญญาบัตรนี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาบัตร

  
.....ประธานกรรมการ  
(ดร.สุธาสิณี เนรมิตคกพงศ์)

  
.....กรรมการ  
(ดร.นริศรา ทองบุญ)

  
.....กรรมการ  
(ดร.พรสวรรค์ อัสวแสงรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาานิพนธ์	การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อย
นักศึกษา	นางสาวพันธ์ทิพย์ กิ่งช้าง รหัสนักศึกษา 47010507
	นางสาววาสนา ขจรศักดิ์ รหัสนักศึกษา 47010695
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมเคมี
พ.ศ.	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ดร. สุชาลินี เนรมิตตกพงศ์

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยขานอ้อยมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์เอ โดยนำเถ้าลอยขานอ้อยมาสกัดซิลิกาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ได้ซิลิกาบริสุทธิ์ 88.3% นำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์เอโดยการทำให้เป็นเจลโดยการผสมซิลิกาและโซเดียมอะลูมิเนตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นทำการตกผลึกอย่างช้า ๆ โดยศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาการตกผลึกในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้อยู่ในช่วง 80-100 องศาเซลเซียส และเวลาในช่วง 2-6 ชั่วโมง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการตกผลึกของการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ คือ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคในช่วง 0.5-1  $\mu\text{m}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	Synthesis of zeolite A from bagasse fly ash		
Student	Miss Pantip Kingchang	ID.NO.	47010507
	Miss Wassana Khajornsakda	ID.NO.	47010695
Degree	Bachelor of Engineering		
Programme	Chemical Engineering		
Year	2007		
Advisor	Dr. Sutasinee Neramittagapong		

### ABSTRACT

This project is to study on potential use of bagasse fly ash for synthesis of zeolite A. Silica with 88.3% purity was obtained from extraction of bagasse fly ash using 1M NaOH. The zeolite A was formed by gelation of silica and sodium aluminate in presence of sodium hydroxide, followed by slow crystallization. The effect of crystallization temperature and time on zeolite A synthesis were investigated at range of 80-100°C and 2-6 h, respectively. The results showed that the suitable condition were 100°C for 2 h. The particle size of prepared zeolite A are 0.5-1  $\mu$  m.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี จากความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน และผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ ดร.สุธาสิณี เนรมิตตกพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจน ตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญานิพนธ์ ผู้ศึกษารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ โครงการส่งเสริมและสนับสนุนผลิตภัณฑ์ชีวเคมีที่ใช้ย่อยเป็นวัตถุดิบต้นน้ำ ปี 2550 ที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนในการทำงานวิจัยนี้ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้มีพระคุณสูงสุดในชีวิต และอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ช่วยให้กำลังใจและคำแนะนำเวลาที่ประสบปัญหาระหว่างการดำเนินงานวิจัยตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านหากมีสิ่งผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาขออภัยและขออภัยมา ณ ที่ด้วย

พันธ์ทิพย์ กิ่งช้าง  
วาสนา ขจรศักดิ์  
ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ซีไอไลต์.....	3
2.2 ชนิดของซีไอไลต์.....	7
2.3 ซีไอไลต์เอ.....	10
2.4 ขั้นตอนการเกิดซีไอไลต์.....	10
2.5 การสังเคราะห์ซีไอไลต์.....	11
2.5.1 อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา.....	11
2.5.2 ความเป็นกรด-เบส.....	11
2.5.3 อุณหภูมิของการตกผลึก.....	11
2.5.4 ระยะเวลาของการตกผลึก.....	13
2.5.5 สารเคมีกำหนดโครงสร้าง.....	14
2.6 สมบัติของซีไอไลต์.....	14
2.6.1 โครงสร้างเป็นผลึกและมีรูพรุนอยู่ใน.....	14
2.6.2 สมบัติในการเลือกสารเข้าออกเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมี.....	14
2.6.3 ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เร็วขึ้น.....	15
2.6.4 ปรับเปลี่ยนสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.5 ทนต่อความร้อน และการเปลี่ยนแปลงความดัน.....	16
2.7 ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานของซีโอไลต์.....	16
2.7.1 สารคัดแยกโมเลกุล.....	16
2.7.2 แลกเปลี่ยนประจุ.....	17
2.7.3 ตัวดูดซับ.....	17
2.7.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา.....	17
2.8 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.8.1 องค์ประกอบของสารตั้งต้นในปฏิกิริยา.....	18
2.8.2 อุณหภูมิของการตกผลึก.....	18
2.8.3 ความดันของการตกผลึก.....	18
2.8.4 ระยะเวลาของการตกผลึก.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วัตถุประสงค์และสารตั้งต้น.....	20
3.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขานอ้อย.....	20
3.2.1 การสกัดซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าลอยของขานอ้อย.....	20
3.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	22
3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี.....	24
บทที่ 4 ผลการทดลอง และ การวิเคราะห์ข้อมูล.....	25
4.1 การสกัดซิลิกาจากเถ้าลอยขานอ้อย.....	25
4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	26
4.2.1 ผลของเวลาในการตกผลึก.....	26
4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการตกผลึก.....	30
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	33
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	33
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	34
ภาคผนวก.....	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ.....	6
ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบวงออกซิเจนเดี่ยว.....	7
ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบวงออกซิเจนคู่.....	8
ตารางที่ 2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 4-1.....	8
ตารางที่ 2.5 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 5-1.....	9
ตารางที่ 2.6 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 4-4-1.....	9
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยขานอ้อยและซิลิกาที่สกัดจาก ถ้ำลอยขานอ้อยจากการวิเคราะห์ด้วย XRF.....	25
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยขานอ้อยและซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ ที่เวลาตกผลึกต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วย XRF.....	27
ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ด้วยเวลาในการตกผลึกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วย BET.....	29
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยขานอ้อยและซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ ที่อุณหภูมิในการตกผลึกต่าง ๆ ที่เวลา 2 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย XRF.....	30
ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ด้วยอุณหภูมิในการตกผลึก ต่างกัน ที่เวลา 2 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย BET.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์	
	(ก) โครงสร้างเตตระฮีดรอลของ $[\text{SiO}_4]^+$ และ $[\text{AlO}_4]^-$	
	(ข) การเชื่อมต่อแต่ละหน่วยของเตตระฮีดรอล.....	3
รูปที่ 2.2	โครงข่ายเตตระฮีดรอลเชื่อมต่อกันในลักษณะต่าง ๆ.....	4
รูปที่ 2.3	โครงสร้างของซีโอไลต์เอ.....	5
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5.....	5
รูปที่ 2.5	โครงสร้างของซีโอไลต์ฟูจาไซต์.....	5
รูปที่ 2.6	ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์.....	10
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ของปริมาณค่า อะลูมินาและซิลิกาในรูปเจล กับอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	12
รูปที่ 2.8	ความสัมพันธ์ของการโตขึ้นของผลึกกับเวลาในการสังเคราะห์ ซีโอไลต์ NaY เมื่อใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์แตกต่างกัน.....	12
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณและชนิดของซีโอไลต์ กับระยะเวลาในการเกิดผลึกของซีโอไลต์ที่เปลี่ยนไป.....	13
รูปที่ 2.10	สมบัติในการเลือกสารที่เข้าทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์.....	15
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการสกัดซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าลอยชานอ้อย.....	21
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	23
รูปที่ 4.1	(ก) เถ้าลอยชานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาล (ข) ซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าลอยชานอ้อย.....	25
รูปที่ 4.2	(ก) XRD ของเถ้าลอยชานอ้อย (ข) XRD ของซิลิกาที่สกัดได้จากเถ้าลอยชานอ้อย.....	26
รูปที่ 4.3	XRD ของซีโอไลต์เอที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยเวลาในการตกผลึกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6 ชั่วโมง.....	28
รูปที่ 4.4	XRD Pattern ของซีโอไลต์เอมาตรฐาน.....	28
รูปที่ 4.5	ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์เอที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยเวลาในการตกผลึกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6 ชั่วโมง (กำลังขยาย 5,000 เท่า) .....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

- รูปที่ 4.6 XRD ของซีโอไลต์เอที่ได้จากการสังเคราะห์  
ด้วยอุณหภูมิในการตกผลึกต่างกัน ที่เวลา 2 ชั่วโมง  
(ก) 80 องศาเซลเซียส (ข) 90 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส.....31
- รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์เอที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยอุณหภูมิในการ  
ตกผลึกต่างกัน ที่เวลา 2 ชั่วโมง (ก) 80 องศาเซลเซียส  
(ข) 90 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส (กำลังขยาย 5,000 เท่า) .....32



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม และเป็นประเทศผู้ส่งออกน้ำตาลมากเป็นอันดับสามของโลก รองจากบราซิล และสหภาพยุโรป [1] ทำให้มีขานอ้อยเหลือเป็นจำนวนมาก เพื่อทำให้เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า จึงมีการใช้ประโยชน์จากขานอ้อยในการผลิตเชื้อกระดาษ เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตไอน้ำ เพื่อเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่เกิดจากการใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิง ได้แก่ ฝุ่นละออยที่เกิดจากการเผาขานอ้อยที่มีเป็นจำนวนมาก จึงต้องทำการบำบัดโดยการฝังกลบ หากสามารถนำเถ้าลอยของขานอ้อยที่เป็นกากของเสียทางการเกษตรมาใช้เป็นสารตั้งต้น ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งเป็นสารที่มีประโยชน์ และมีมูลค่าสูงในอุตสาหกรรมเคมีได้ จะเป็นการเพิ่มมูลค่าและลดปัญหาการกำจัดอีกทางหนึ่ง อีกทั้งหากสามารถผลิตซีโอไลต์เป็นการผลิตเชิงพาณิชย์จะช่วยลดการนำเข้าจากต่างประเทศได้

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีคนนำเถ้าลอยขานอ้อยมาใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น ใช้ในกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล การใช้เถ้าลอยขานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน และมีการนำมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์ ซึ่งเป็นสารที่มีความสำคัญในด้านการเกษตร อุตสาหกรรม รวมทั้งในด้านสิ่งแวดล้อม งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ มาใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ เช่น แกลบ เถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งซีโอไลต์ที่สามารถสังเคราะห์ได้มีหลายชนิดด้วยกัน และนำมาใช้ประโยชน์ในหลายๆ ด้าน เช่น มีการนำซีโอไลต์ 3A มาใช้ในการดูดซับน้ำออกจากเอทานอลเพื่อทำให้บริสุทธิ์มากขึ้น การนำซีโอไลต์เอมาใช้เป็นสารกรองความกระด้างของน้ำ เนื่องจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอไม่ต้องใช้สารเคมีกำหนดโครงสร้าง (Template) ในการสังเคราะห์ ซึ่งไม่สิ้นเปลืองสารเคมี และการสังเคราะห์สามารถทำได้ง่าย มีค่าใช้จ่ายต่ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำเถ้าลอยของขานอ้อยมาใช้เป็นวัตถุดิบต้นน้ำในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาผลของการนำเถ้าลอยของขานอ้อยที่ มาเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ ซีโอไลต์เอ
- 2) ศึกษาผลของเวลาและอุณหภูมิในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากเถ้าลอยขานอ้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1) ใช้ถ้ำลอยของชานอ้อยที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล
- 2) สังเคราะห์ซีโอไลต์เองจากซิลิกาที่สกัดจากถ้ำลอยชานอ้อย
- 3) ศึกษาเวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง
- 4) ศึกษาอุณหภูมิในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

- 1) สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เองจากถ้ำลอยชานอ้อย ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับถ้ำลอยจากชานอ้อย อีกทั้งยังเป็นการลดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม และภาวะการฝังกลบถ้ำลอยจากชานอ้อย
- 2) การพัฒนากระบวนการผลิตซีโอไลต์เองขึ้นเองภายในประเทศ ซึ่งเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ



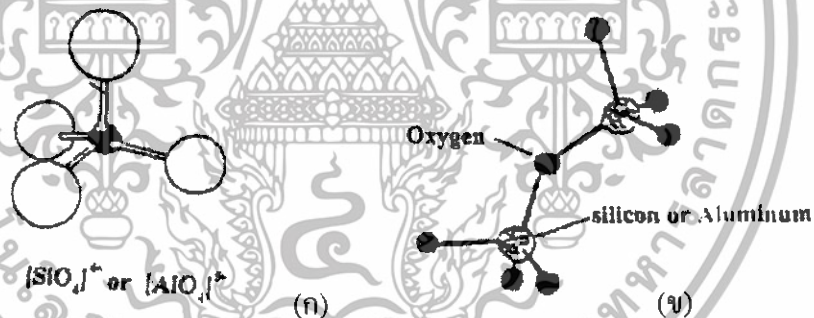
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

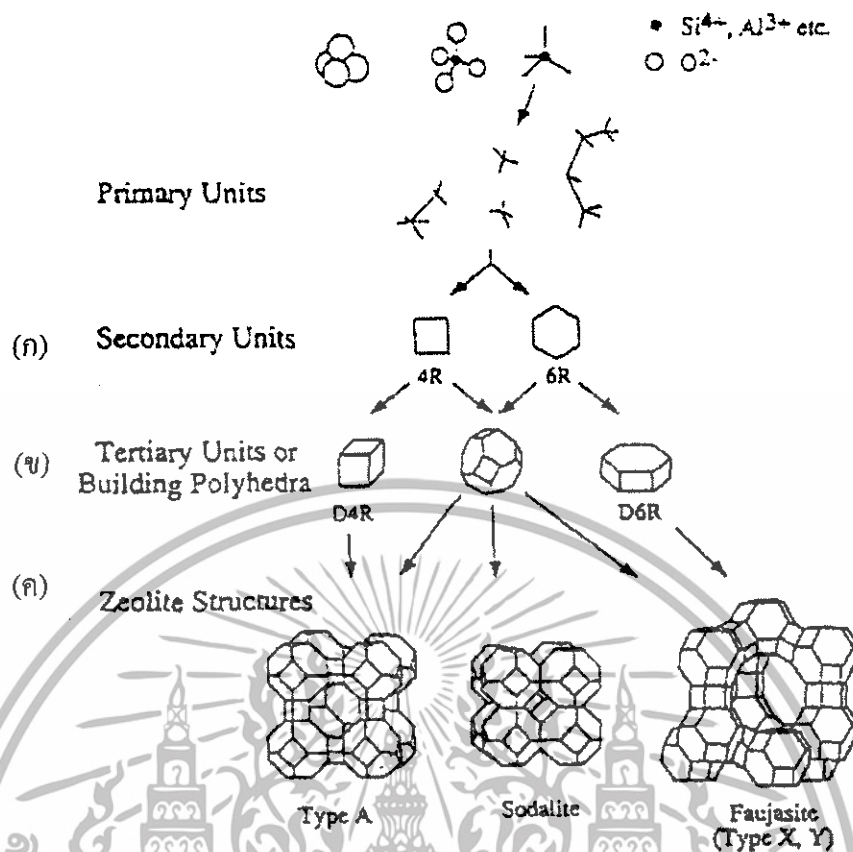
### 2.1 ซีโอไลต์ [2]

ซีโอไลต์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วย โมเลกุลที่มีรูปทรงเป็นเตตระฮีดรัลของ  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  และ  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  ดังรูปที่ 2.1 จำนวนมาก โดยแต่ละหน่วยจะเชื่อมต่อกันด้วยอะตอมของออกซิเจนเป็น Primary unit ดังรูปที่ 2.1 (ก) และ (ข) เมื่อ Primary unit เชื่อมต่อกันเป็น Framework ได้เป็น Secondary building unit ในรูปแบบต่างๆ กัน ดังรูปที่ 2.2 (ก) และ Framework แบบ Polyhedral รูปที่ 2.2 (ข) เมื่อเกิดการรวมกันของ Polyhedral ในลักษณะต่างๆ จนได้เป็นโครงสร้างสามมิติที่มีรูปทรงแน่นอนในหลายรูปแบบที่แตกต่างกัน ซีโอไลต์เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กมีความพรุนสูง โครงสร้างของซีโอไลต์มีขนาดของรูพรุนหรือช่องว่างที่สม่ำเสมอ และมีระเบียบจำนวนมาก ขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ  $1 \times 10^{-10}$  เมตร)



รูปที่ 2.1 โครงสร้างพื้นฐานของซีโอไลต์ (ก) โครงสร้างเตตระฮีดรัลของ  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  และ  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  (ข) การเชื่อมต่อแต่ละหน่วยของเตตระฮีดรัล [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

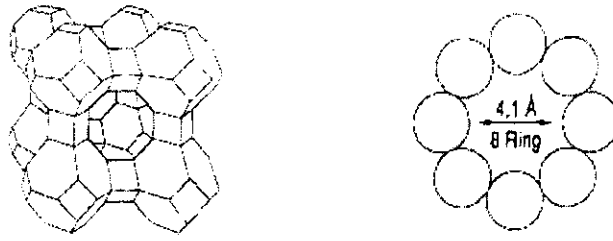


รูปที่ 2.2 โครงข่ายเตตระฮีดรัลเชื่อมต่อกันในลักษณะต่าง ๆ [3]

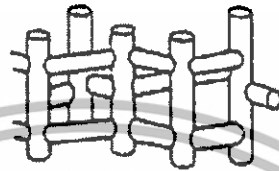
ผลึกของซีโอไลต์มีรูพรุนหรือช่องว่างที่ประกอบไปด้วยออกซิเจนเป็นวง ซึ่งขนาดของวงแทนด้วยอะตอมของออกซิเจน และแทนด้วยสัญลักษณ์  $n\text{OR}$  โดย  $n$  คือจำนวนของออกซิเจนที่ต่อกันอยู่ ตัวอย่างเช่น  $10\text{OR}$  คือ วงที่ประกอบไปด้วยอะตอมของออกซิเจน 10 อะตอม เนื่องจากขนาดอะตอมของออกซิเจนใหญ่กว่าอะตอมของไฮโดรเจน ซึ่งอาจเป็น  $\text{Si}^{4+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  หรือ  $\text{Ga}^{3+}$  เป็นต้น ดังนั้นผิวภายในของซีโอไลต์จึงประกอบไปด้วยอะตอมของออกซิเจนเกือบทั้งหมด ขนาดรูพรุนของซีโอไลต์แบ่งได้เป็น 3 ขนาด คือ [3]

- 1) รูพรุนขนาดเล็ก ที่มีขนาดของรูพรุนน้อยกว่า 5 อังสตรอม ซึ่งเป็นขนาดของ  $8\text{OR}$  ดังเช่น รูพรุนของซีโอไลต์เอ (รูปที่ 2.3)
- 2) รูพรุนขนาดกลาง ที่มีขนาดรูพรุน 5-6 อังสตรอม ซึ่งเป็นขนาดของ  $10\text{OR}$  ดังเช่น รูพรุนของ ซีโอไลต์ ZSM-5 (รูปที่ 2.4)
- 3) รูพรุนขนาดใหญ่ ที่มีขนาดรูพรุน 7-8 อังสตรอม ซึ่งเป็นขนาดของ  $12\text{OR}$  ดังเช่น รูพรุนของซีโอไลต์ฟูจาไซต์ (รูปที่ 2.5)

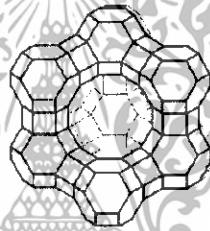
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์เอ [2]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์ ZSM-5 [2]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีโอไลต์ฟาจายต์ [2]

รูพรุนของซีโอไลต์มีขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์ ตัวอย่างขนาดรูพรุนของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ [4]

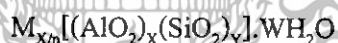
ชนิดซีโอไลต์	ขนาด (อังสตรอม)
Chabazite	3.6×3.7
RHO	3.6
ZK-5	3.9
SAPO-11	3.9×6.3
Partheite	3.5×6.9
Laumontite	4.0×5.3
Zeolite A	4.1
Ferrierite	4.2×5.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ขนาดของรูพรุนของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ (ต่อ)

ชนิดซีโอไลต์	ขนาด (อังสตรอม)
ZSM-23	4.5×5.2
NU-87	4.7×6.0
ZSM-5	5.1×5.5 , 5.4×5.6
ZSM-11	5.1×5.5
ZSM-48	5.3×5.4
Mordenite	6.7×7.0
MCM-22	7.1
Faujasite	7.4
Beta	7.6×6.4

ในโครงสร้างของซีโอไลต์จะมีช่องว่างซึ่งภายใน จะมีน้ำและประจุบวก และเมื่อทำการไล่น้ำออกหมดทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติทางเคมี ทางกายภาพในการดูดซับที่แตกต่างกันในซีโอไลต์แต่ละชนิด โดยลักษณะของน้ำในผลึกซีโอไลต์ จะแปรผันตามขนาดของช่องว่างภายในรูพรุนของโครงสร้างผลึก ซึ่งปกติจะมีมากถึงร้อยละ 50 ของปริมาณผลึกทั้งหมด เมื่อไล่น้ำออกทำให้เกิดช่องว่างซึ่งสามารถดูดซับสารอื่น ๆ ได้อีก และสูตรโครงสร้างของซีโอไลต์ มีดังนี้



โดยที่ M คือ ไอออนที่มีประจุบวก n

W คือ โมเลกุลของน้ำ

Y/X ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผลึกลักษณะต่าง ๆ

X+Y เป็นจำนวนของทรงสี่หน้าทั้งหมดในหน่วยเซลล์

สำหรับปริมาณและตำแหน่งของน้ำใน โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ขึ้นอยู่กับ

- 1) ลักษณะของโครงสร้างแต่ละโมเลกุลของซีโอไลต์ เช่น ขนาดของรูพรุน รูปร่างรูพรุน
- 2) จำนวนและธรรมชาติของไอออนประจุบวก ที่อยู่ในรูพรุนของโครงสร้างผลึกซีโอไลต์

## 2.2 ชนิดของซีโอไลต์

ซีโอไลต์มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของของ Secondary building unit และ Tertiary building unit ของโครงสร้างซีโอไลต์นั้น ๆ ซึ่งโครงสร้างของซีโอไลต์แบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม คือ

- 1) โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบวงออกซิเจนเดี่ยว แสดงในตารางที่ 2.2
- 2) โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบวงออกซิเจนคู่ แสดงในตารางที่ 2.3
- 3) โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 4-1 แสดงในตารางที่ 2.4
- 4) โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 5-1 แสดงในตารางที่ 2.5
- 5) โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 4-4-1 แสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบวงออกซิเจนเดี่ยว [5]

Secondary building unit	ชนิดโครงสร้าง	ชนิดซีโอไลต์	สูตรโครงสร้าง
S4R	ANA	Analcime	$\text{Na}_{16}\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	ANA	Wairakite	$\text{Ca}_8\text{Al}_{16}\text{Si}_{32}\text{O}_{96}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Gismondine	$\text{Ca}_4\text{Al}_9\text{Si}_8\text{O}_{32}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Amicite	$\text{K}_4\text{Na}_4\text{Al}_8\text{SiO}_{32}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Garronite	$\text{NaCa}_{2.5}\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 14\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Gobbinsit	$\text{Na}_5\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}\cdot 11\text{H}_2\text{O}$
	GIS	Zeolite NaP-1	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	LAU	Laumontite	$\text{Ca}_4\text{Al}_8\text{Si}_{16}\text{O}_{46}\cdot 16\text{H}_2\text{O}$
	MER	Merlionite	$\text{K}_5\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{23}\text{O}_{64}\cdot 24\text{H}_2\text{O}$
	PAU	Paulingite	$(\text{K}_2,\text{Na}_2,\text{Ca},\text{Ba})_{76}\text{Al}_{152}\text{Si}_{520}\text{O}_{1344}\cdot 700\text{H}_2\text{O}$
	PHI	Phillipsite	$\text{K}_2\text{Ca}_{1.5}\text{NaAl}_6\text{Si}_{10}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	PHI	Harmotome	$\text{Ba}_2\text{Ca}_{0.5}\text{Al}_5\text{Si}_{11}\text{O}_{32}\cdot 12\text{H}_2\text{O}$
	YUG	Yuhawaralite	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_{12}\text{O}_{32}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$
	CAN	Cancrinite hydrate	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบวงออกซิเจนเดี่ยว (ต่อ)

Secondary building unit	ชนิดโครงสร้าง	ชนิดซีโอไลต์	สูตรโครงสร้าง
S6R	ERI	Erionite	$\text{Na}_2\text{K}_2\text{Mg}_{0.5}\text{Ca}_2\text{Al}_9\text{Si}_{27}\text{O}_{72}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$
	LEV	Levynite	$\text{NaCa}_3\text{Al}_7\text{Si}_{11}\text{O}_{36}\cdot 18\text{H}_2\text{O}$
	LTL	Zeolite L	$\text{K}_6\text{Na}_3\text{Al}_7\text{Si}_{11}\text{O}_{72}\cdot 21\text{H}_2\text{O}$
	LOS	Zeolite Losod	$\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 19\text{H}_2\text{O}$
	MAX	Mazzite	$\text{Mg}_2\text{K}_3\text{Ca}_{1.5}\text{Al}_{10}\text{Si}_{26}\text{O}_{72}\cdot 28\text{H}_2\text{O}$
	OFF	Offretite	$\text{KCa}_2\text{Al}_5\text{Si}_{13}\text{O}_{36}\cdot 15\text{H}_2\text{O}$
	SOD	Sodalite hydrate	$\text{Na}_6\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\cdot 8\text{H}_2\text{O}$

ตารางที่ 2.3 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบวงออกซิเจนคู่ [5]

Secondary building unit	ชนิดโครงสร้าง	ชนิดซีโอไลต์	สูตรโครงสร้าง
D4R	LTA	Zeolite A	$\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$
D6R	CHA	Chabazite	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}\cdot 13\text{H}_2\text{O}$
	CHA	Wilhendersonite	$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\cdot 10\text{H}_2\text{O}$
	FAU	Faujasite	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11}\text{Al}_{58}\text{Si}_{134}\text{O}_{384}\cdot 235\text{H}_2\text{O}$
	FAU	Zeolite X	$\text{Na}_{88}\text{Al}_{88}\text{Si}_{104}\text{O}_{384}\cdot 220\text{H}_2\text{O}$
	GME	Gmelinite	$\text{Na}_8\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192}\cdot 98\text{H}_2\text{O}$
	DFI	Zeolite ZK-5	$\text{Na}_{30}\text{Al}_{30}\text{Si}_{66}\text{O}_{192}\cdot 98\text{H}_2\text{O}$
	RHO	Zeolite Rho	$(\text{Na,Cs})_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{36}\text{O}_{96}\cdot 46\text{H}_2\text{O}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 4-1 [5]

Secondary building unit	ชนิดโครงสร้าง	ชนิดซีโอไลต์	สูตรโครงสร้าง
4-1	EDI	Edingtonite	$Ba_2Al_4Si_6O_{20} \cdot 8H_2O$
	NAT	Natrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{30} \cdot 16H_2O$
	NAT	Tetranatrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{30} \cdot 16H_2O$
	NAT	Paranatrolite	$Na_{16}Al_{16}Si_{24}O_{30} \cdot 16H_2O$
	NAT	Mesolite	$Na_{16}Ca_{16}Al_{48}Si_{72}O_{240} \cdot 64H_2O$
	NAT	Scolacite	$Ca_8Al_{16}Si_{24}O_{80} \cdot 24H_2O$
	THO	Thomsonite	$Na_4Ca_8Al_{20}Si_{20}O_{80} \cdot 24H_2O$
	THO	Gonnardite	$Na_5Ca_2Al_9Si_{11}O_{40} \cdot 14H_2O$

ตารางที่ 2.5 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 5-1 [5]

Secondary building unit	ชนิดโครงสร้าง	ชนิดซีโอไลต์	สูตรโครงสร้าง
5-1	BIK	Bikitaite	$Li_2Al_2Si_4O_{12} \cdot 2H_2O$
	DAC	Dachiardite	$Na_5Al_5Si_{19}O_{48} \cdot 12H_2O$
	EPI	Epistilbite	$Ca_3Al_6Si_{18}O_{48} \cdot 16H_2O$
	FER	Ferrierite	$NaCa_{0.5}Mg_2Al_6Si_{30}O_{72} \cdot 20H_2O$
	MFI	Zeolite ZSM-5	$Na_nAl_nSi_{96-n}O_{192} \cdot 16H_2O (n \sim 3)$
	MOR	Mordenite	$Na_8Al_8Si_{40}O_{96} \cdot 24H_2O$

ตารางที่ 2.6 โครงสร้างของซีโอไลต์ที่เกิดจาก Secondary building unit แบบ 4-4-1 [5]

Secondary building unit	ชนิดโครงสร้าง	ชนิดซีโอไลต์	สูตรโครงสร้าง
4-4-1	BRE	Brewsterite	$Sr_2Al_4Si_{12}O_{32} \cdot 10H_2O$
	HEU	Heulandite	$Ca_4Al_8Si_{28}O_{72} \cdot 24H_2O$
	HEU	Clinoptilolite	$Na_6Al_6Si_{30}O_{72} \cdot 24H_2O$
	STI	Stilbite	$Na_2Ca_4Al_{10}Si_{26}O_{72} \cdot 34H_2O$
	STI	Stellerite	$Ca_4Al_{28}O_{72} \cdot 28H_2O$
	STI	Barrerite	$Na_8Al_8Si_{28}O_{72} \cdot 26H_2O$

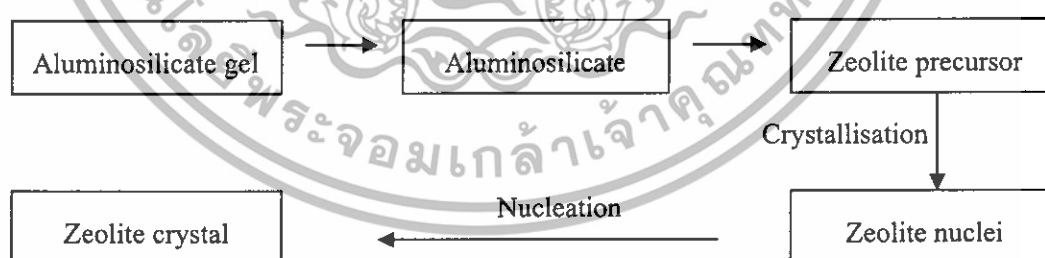
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ซีโอไลต์เอ

ซีโอไลต์เอ มีโครงสร้างที่เกิดจาก Polyhedral 2 ชนิด ประกอบกันขึ้นเป็นโครงสร้างซีโอไลต์เอ ชนิดแรกคือ สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ เกิดจากการจัดตัวของเตตระฮีดรอล  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  และ  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  8 โมเลกุล และ Polyhedral ชนิดที่สอง คือ ออกเตดรัลเกิดจากการจัดตัวของเตตระฮีดรอล 24 โมเลกุล ซึ่งเรียกว่า  $\beta$ -cage ที่มีขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.6 อังสตรอม และ  $\alpha$ -cage มีขนาดใหญ่ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.4 อังสตรอม ทำให้มีช่องเปิดขนาด 4.1 อังสตรอม ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็น  $\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$

## 2.4 ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์ [6]

การเกิดซีโอไลต์เริ่มจากสารประกอบของซิลิกอนและอะลูมิเนียมที่อยู่ในสถานะของแข็งละลายในสารละลายที่เบส โดยการที่ซิลิกอนจะละลายออกมาเป็นสารละลายได้จะต้องใช้สภาวะที่มีค่าความเป็นเบสสูงได้เป็นผลของอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate gel) จากนั้นซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมที่เป็นสารละลายอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ซึ่งมีความไม่เสถียรจะจับตัวเป็นโครงสร้างที่เสถียรที่สุดเท่าที่จะทำได้ซึ่งเป็นสื่อของซีโอไลต์ (Zeolite precursor) เมื่อนำไปตกผลึกสื่อซีโอไลต์จะเกิดการรวมตัวเป็นนิวเคลียสของซีโอไลต์เล็ก ๆ (Zeolite nuclei) ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกันกับซีโอไลต์ เหล่านี้จะประกอบไปด้วยเซลล์หน่วยของซีโอไลต์ซึ่งมีโครงสร้างเดียวกันกับซีโอไลต์ที่จะสังเคราะห์ จากนั้นจะเป็นช่วงที่เกิดการโตของผลึก (Zeolite crystal) ทำให้ผลึกของซีโอไลต์มีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ [6]

ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะอย่างไรขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ คือ

- 1) อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา
- 2) ความเป็นกรด-เบส
- 3) อุณหภูมิของการตกผลึก
- 4) ระยะเวลาของการตกผลึก
- 5) สารเคมีกำหนดโครงสร้าง

### 2.5.1 อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา

อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินามีผลต่อขนาดและโครงสร้างของซีโอไลต์ กล่าวคือ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเป็นตัวกำหนดโครงสร้างซีโอไลต์ คือ ถ้าปริมาณของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูงมากจะเป็นผลให้เกิดโครงสร้างที่เป็นช่อง (Channels structure) เช่น มอร์เตไนต์ แต่ถ้ามีปริมาณของอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาดำ มักจะเป็นผลให้เกิดโครงสร้างแบบโพรง (Cage structure) เช่น ซีโอไลต์เอ และซีโอไลต์เอ็กซ์ เป็นต้น

นอกจากนั้นอัตราการเกิดผลึกยังขึ้นกับอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาอีกด้วย กล่าวคือ ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาของเจลต่ำ จะมีอัตราในการตกผลึกเร็ว เนื่องจากอะลูมิเนียมในโครงสร้างเป็นทรงเหลี่ยมสี่หน้าจะแสดงประจุลบ จึงถูกเหนี่ยวนำโดยไอออนบวกที่ใช้สังเคราะห์ให้เกิดเป็นนิวเคลียสของซีโอไลต์ได้ง่ายกว่าเจลที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูง

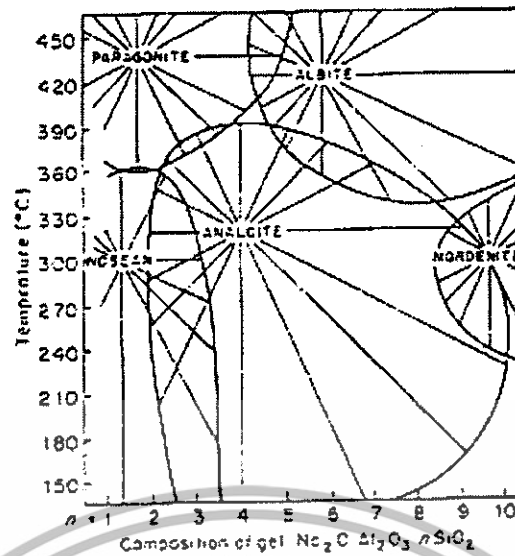
### 2.5.2 ความเป็นกรด-เบส

ซิลิกอนสามารถละลายได้ดีที่ค่าความเป็นเบสของสารละลายสูง ๆ ดังนั้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จึงต้องใช้สารละลายที่มีค่าความเป็นพีเอชสูง เพราะจะทำให้ซิลิกอนที่อยู่ในสถานะของแข็งละลายออกมาเป็นสารละลายได้ดี เมื่อซิลิกอนละลายออกมาเป็นสารละลายก็จะเกิดการตกผลึกของซีโอไลต์ แต่สารละลายไม่ควรมีความเป็นเบสสูงเกินไป เพราะทำให้ซิลิกอนที่อยู่ในรูปสารละลายไม่สามารถตกผลึกเป็นซีโอไลต์ได้

### 2.5.3 อุณหภูมิของการตกผลึก

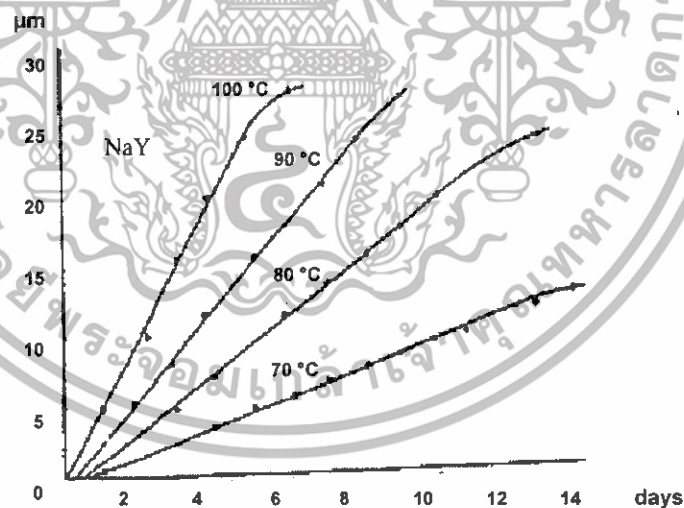
อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยพบว่าที่อุณหภูมิและความดันต่างกันมีผลทำให้ผลึกซีโอไลต์ที่ได้ต่างกันดังรูปที่ 2.7 พบว่าที่องค์ประกอบเจล (Gel composition) เดียวกัน เมื่อทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่างกันจะทำให้ได้ซีโอไลต์ ที่ต่างชนิดกัน เช่น ที่องค์ประกอบของเจล n เท่ากับ 6 สามารถสังเคราะห์ Analcite ได้ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส จะได้ Albite

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ของปริมาณค่า อะลูมินาและซิลิกาในรูปเจล กับอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ [6]

นอกจากนี้อุณหภูมิที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์ยังเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการตกผลึก โดยที่อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่สูงจะมีผลให้ระยะเวลาสั้นกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

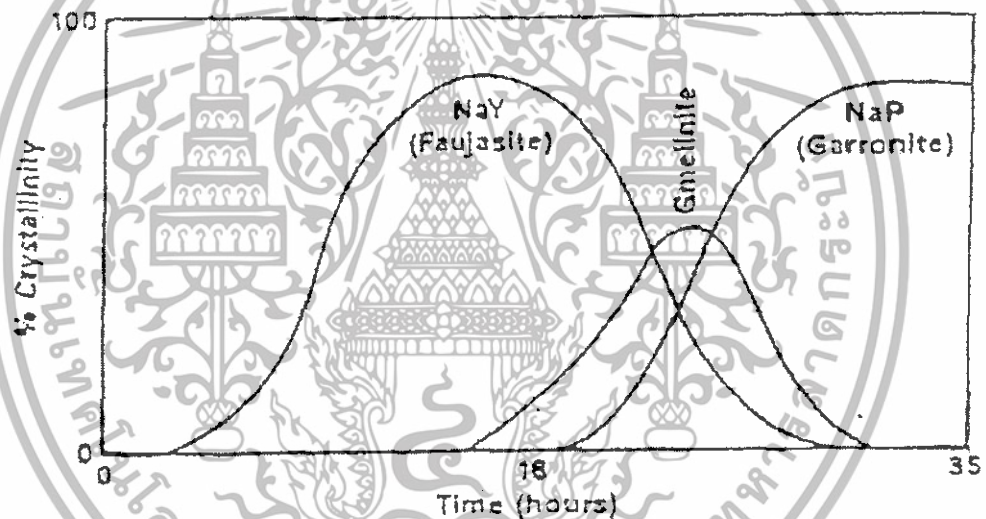


รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของการโตขึ้นของผลึกกับเวลาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ NaY เมื่อใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์แตกต่างกัน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.4 ระยะเวลาของการตกผลึก

ระยะเวลาในการตกผลึกของซีโอไลต์ต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่สภาวะหนึ่ง ๆ ระยะเวลาจะเป็นตัวกำหนดปริมาณและชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น กล่าวคือ มีช่วงหนึ่งเท่านั้นที่เกิดเป็นผลึกที่ต้องการและได้ปริมาณผลึกสูงสุด ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ผลึกของซีโอไลต์ในปริมาณมาก โดยระยะเวลาในการตกผลึกมีผลทำให้ปริมาณของซิลิกาและอะลูมินาในเจล สารละลายและผลึกเปลี่ยนแปลงไป นอกจากนี้เมื่อใช้เวลาในการสังเคราะห์นานเกินไปจะเกิดซีโอไลต์ชนิดอื่น ๆ ขึ้น ดังรูปที่ 2.9 เช่น ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ NaY มีจุดเกิดผลึกที่มากที่สุดที่เวลา 18 ชั่วโมง จะทำให้เกิดซีโอไลต์อีกชนิดหนึ่ง คือ Gmelinite แล้วเกิดเป็นซีโอไลต์ NaP ตามลำดับ หรือ ถ้าเลือกระยะเวลาไม่เหมาะสมอาจเกิดของผสมของซีโอไลต์ทั้ง 3 ชนิด ซึ่งการเกิดซีโอไลต์หลายชนิดในเวลาเดียวกัน เรียกว่า Multiphase crystallization



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณและชนิดของซีโอไลต์กับระยะเวลาในการเกิดผลึกของซีโอไลต์ที่เปลี่ยนไป [6]

ระยะเวลาที่ใช้สังเคราะห์ซีโอไลต์แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ

1) ช่วงเหนี่ยวนำ (Induction period) เป็นช่วงเวลาที่ทำให้ของผสมเกิดเป็นนิวเคลียสของผลึกหรือเกิดกระบวนการนิวเคลียสชัน (Nucleation) ในช่วงเวลานี้เป็นตัวกำหนดโครงสร้างของซีโอไลต์ โดยการเกิดนิวเคลียสจะมีการดึงเอาสี่เหลี่ยมของซีโอไลต์ และ Secondary building unit จากสารละลายเข้ามารวมกันเป็นนิวเคลียส ถ้านิวเคลียสไม่มีความเสถียรจะละลายกลับไปเป็นสารละลายเช่นเดิม เจลที่ใช้สังเคราะห์มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูงจะมีช่วงเวลานี้นานกว่า เจลที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำ เนื่องจากมีอัตราส่วนก่อนนิวเคลียสต่ำ การกวนของผสมไว้ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิห้องก่อนการสังเคราะห์เป็นการทำให้ได้อายุ (Aging) จะช่วยลดเวลาในการเหนียวนำได้ ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาของการตกผลึก จากการศึกษาถึงอิทธิพลของการกวนของผสมก่อนทำการตกผลึกซีโอไลต์ NaA พบว่าที่ปริมาณผลึกขนาดเดียวกัน เจลที่ทำการกวนใช้เวลาในการสังเคราะห์เร็วขึ้น

2) ช่วงก่อผลึก (Crystal growth) ช่วงเวลานี้เป็นช่วงที่เกิดต่อจากช่วงเหนียวนำโดยผลึกจะต้องมีขนาดวิกฤตจึงจะเกิดการก่อตัวของผลึกต่อไป ช่วงอุณหภูมิและความเป็นเบสที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราการก่อผลึกเพิ่มขึ้นด้วย

### 2.5.5 สารเคมีกำหนดโครงสร้าง

ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่กำหนดโครงสร้างของซีโอไลต์ได้โดยตรงอีกประการหนึ่งคือ สารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ในเจลที่สังเคราะห์ เรียกว่า สารเคมีกำหนดโครงสร้าง โดยสารเคมีกำหนดโครงสร้างสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- 1) สารประกอบอินทรีย์ (Organic template) จุดเด่นของสารเคมีกำหนดโครงสร้างอินทรีย์คือ เมื่อทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ตามต้องการ สามารถทำการเผาให้สลายตัวได้
- 2) สารประกอบอนินทรีย์ (Inorganic template) พบอยู่ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์อยู่แล้ว เช่น ไอออนของโซเดียม ซึ่งเชื่อว่ามีความสัมพันธ์กับสารเคมีกำหนดโครงสร้างอินทรีย์

## 2.6 สมบัติของซีโอไลต์ [7]

สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์มีดังต่อไปนี้

### 2.6.1 โครงสร้างเป็นผลึกและมีรูพรุนอยู่ภายใน

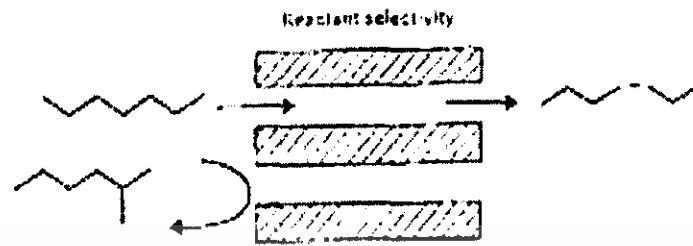
การที่โครงสร้างเป็นผลึกและมีรูพรุนอยู่ภายใน ทำให้มีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารมาก นอกจากนั้นรูพรุนขนาดเล็กยังทำหน้าที่คล้ายหม้อปฏิกรณ์ระดับโมเลกุลซึ่งทำให้เกิดแรงกระทำที่รุนแรงกับโมเลกุลของสาร

### 2.6.2 สมบัติในการเลือกสารเข้าออกเพื่อทำปฏิกิริยาทางเคมี

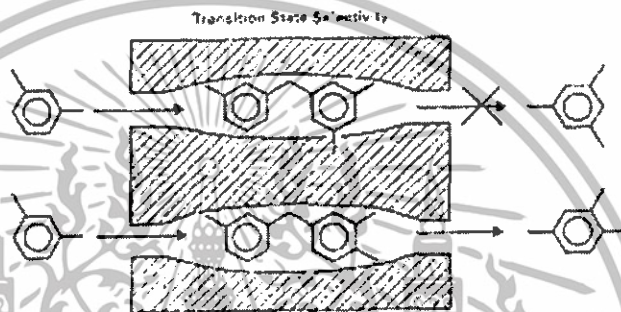
ซีโอไลต์ที่มีขนาดรูพรุนขนาดหนึ่งจะสามารถเลือกทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารที่มีขนาดเหมาะสมเท่านั้น โมเลกุลที่มีขนาดไม่เหมาะสมจะไม่สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ การที่ซีโอไลต์มีขนาดและรูปร่างของรูพรุนที่เป็นลักษณะเฉพาะตัวทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติพิเศษในการเร่งปฏิกิริยาเคมี คือสามารถเลือกสารตั้งต้นให้เข้ามาทำปฏิกิริยาได้ ถ้าสารตั้งต้นมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนจะไม่สามารถจับพื้นที่ช่องไว้ได้ การเลือกโมเลกุลดังกล่าวสามารถเลือกได้ทั้งสารตั้งต้น สารมัธยันตร์ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.10 นอกจากนี้รูปร่างของผลิตภัณฑ์ก็มีผลต่อปฏิกิริยาเช่นกัน รูปที่ 2.10 (ก)-(ค) แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดสารผลิตภัณฑ์แล้ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมืออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุญาตเห็นชอบจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

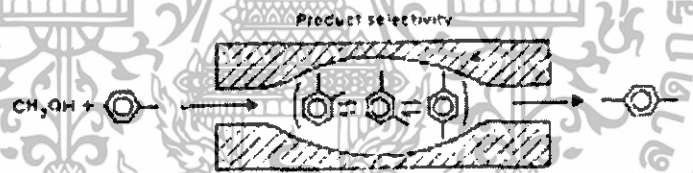
สารที่มีรูปร่างเหมาะสมเท่านั้นจึงสามารถผ่านออกมาจากรูพรุนของซีโอไลต์ได้ ส่วนสารที่มีกิ่งก้านมากจะติดอยู่ภายในรูพรุน



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 2.10 สมบัติในการเลือกสารที่เข้าทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ [8]

(ก) ความเฉพาะเจาะจงกับสารตั้งต้น (Reactant selectivity)

(ข) ความเฉพาะเจาะจงกับสารผลิตภัณฑ์

(ค) ความเฉพาะเจาะจงกับสารมัธยันตร์

### 2.6.3 ช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เร็วขึ้น

ซีโอไลต์สามารถช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น เนื่องจากซีโอไลต์มีรูพรุนอยู่ภายใน ทำให้มีตำแหน่งว่องไว (Active site) บนพื้นผิวสูงในการทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารมาก และสารตั้งต้นที่ใช้ทำปฏิกิริยาสามารถเข้าไปถึงตำแหน่งที่ว่องไวได้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.4 ปรับเปลี่ยนสมบัติในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้

ซีโอไลต์สามารถปรับเปลี่ยนให้มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้หลายประเภท เช่น

- 1) ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเป็นกรด (Acid zeolite)
- 2) ซีโอไลต์ที่มีสมบัติเป็นเบส (Basic zeolite)
- 3) ซีโอไลต์ที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชันอยู่ภายใน

## 2.6.5 ทนต่อความร้อน และการเปลี่ยนแปลงความดัน

เนื่องจากซีโอไลต์มีลักษณะเป็น โครงข่ายสามมิติและมีโครงสร้างรูพรุนที่หนาแน่น ทำให้สามารถทนต่อความร้อน โดยเฉพาะซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาสูงจะมีความเสถียรต่อความร้อนสูงกว่าซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาค่า

## 2.7 ประโยชน์และการประยุกต์ใช้งานของซีโอไลต์

### 2.7.1 สารคัดแยกโมเลกุล [9-10]

จากโครงสร้างของซีโอไลต์ มีขนาดของรูพรุนหรือช่องว่างที่สม่ำเสมอและมีระเบียบจำนวนมาก จึงทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติเป็นสารคัดแยกโมเลกุล หรือ Molecular sieve ซึ่งแตกต่างจากสารดูดซับตัวอื่นที่มีขนาดรูพรุนไม่สม่ำเสมอ เช่น ซิลิกาเจล ถ่านกัมมันต์ และอะลูมินา เป็นต้น จะมีขนาดรูพรุน 3.8-10 อังสตรอมขึ้นอยู่กับชนิดของแคตไอออน และโครงสร้างผลึก รูพรุนดังกล่าวจะทำหน้าที่กักกรอง โดยยอมให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าผ่านไป เมื่อเปรียบเทียบกับสารดูดซับอื่นแล้วซีโอไลต์จะมีคุณสมบัติเฉพาะ ที่เลือกให้โมเลกุลบางขนาดเท่านั้นผ่านไป เพราะทุก ๆ ช่องเปิดมีขนาดเดียวกันหมดและดูดซับโมเลกุลอื่น ๆ ได้ คุณสมบัตินี้สามารถนำไปใช้ในการแยกสารบางอย่างออกจากกันได้ โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างโมเลกุลจากสมบัติที่เป็น Molecular sieve และสารดูดซับ ซีโอไลต์จึงถูกนำมาใช้ในการคัดแยกและทำให้บริสุทธิ์ในอุตสาหกรรมเคมี

ลักษณะการใช้งานของสารดูดซับ เรามักจะบรรจุสารดูดซับเป็น Bed หนาในหอดูดซับ แล้วให้ของไหลที่ประกอบด้วยสารผสมเอทานอล-น้ำที่มีความเข้มข้นสม่ำเสมอไหลเข้าทางด้านบน และไหลออกทางด้านล่างของหอดูดซับด้วยอัตราความเร็วคงที่ ก่อนการใช้งาน Molecular sieves ทั้งหอดูดซับจะมีความไวต่อการดูดซับน้ำสูง เมื่อของไหลไหลผ่านหอน้ำจะถูกดูดซับเข้าไปใน Molecular sieves จนถึงระยะเวลาหนึ่งที่ Molecular sieves ไม่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้อีก แสดงว่า Molecular sieves ในหอดูดซับอิ่มตัว จำเป็นต้องทำการฟื้นฟูสภาพสาร Molecular sieves (Regeneration) โดยการให้ความร้อนเพื่อไล่น้ำที่ถูกดูดซับเข้าไปและนำ Molecular sieves กลับมาใช้ใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.7.2 แลกเปลี่ยนประจุ**

เนื่องจากในโครงสร้างของซีโอไลต์มีประจุบวกของโลหะเกาะอยู่อย่างหลวม ๆ จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นที่อยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ เช่น ในอุตสาหกรรมการซักฟอก โดยโลหะอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์ จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำ ที่เป็นสาเหตุทำให้น้ำกระด้าง ทำให้เป็นการลดแรงตึงผิวของน้ำ นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือสามารถใช้ในการกำจัดโลหะต่าง ๆ น้ำมัน แอมโมเนียมไอออน

**2.7.3 ตัวดูดซับ [7]**

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับนั้น สามารถใช้ได้ทั้งในกระบวนการทำให้แห้งการทำให้บริสุทธิ์ และการแยกสาร ซึ่งซีโอไลต์นั้นมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างอันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้ดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการทำให้แห้งนั้น เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดซับน้ำได้ดี และสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ กล่าวคือเมื่อมีการให้ความร้อน น้ำก็จะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้งก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก จากสมบัตินี้จึงนำซีโอไลต์มาใช้สำหรับเป็น

- 1) Drying agent เช่น ในการผลิตตู้เย็นจะใช้ซีโอไลต์ในการทำให้สารทำความเย็นประเภทฮาโลคาร์บอนแห้ง หรือ ใช้ในการกำจัดน้ำออกจากไฮโดรเจนและออกซิเจน
- 2) Gas purification โดยทำการไล่สารปนเปื้อนออกจากแก๊ส ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ออกจาก LPG และใช้ในการบำบัดอากาศให้บริสุทธิ์ โดยซีโอไลต์จะเข้าไปจับปรอท ซัลเฟอร์ ไดออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจนไดออกไซด์

**2.7.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา**

ประโยชน์ของซีโอไลต์ในแง่ที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจัดว่ามีมูลค่ามหาศาล โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น ในปฏิกิริยาการเติมไฮโดรเจน การเกิดอะโรแมติก การเปลี่ยนไอโซเมอร์ เป็นต้น ในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมีปีละกว่าพันล้านบาท และกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของตัวเร่งปฏิกิริยานี้คือ ซีโอไลต์ ด้วยเหตุที่ข้อดีของซีโอไลต์คือ เป็นของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวสูง ทำให้มีความคงทนสูง และนำกลับมาใช้ได้ง่ายกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปของเหลวหรือแก๊ส

## 2.8 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการวัดคุณสมบัติต่าง ๆ มาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ โดยจากงานวิจัยพบว่า มีการใช้ปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ดังนี้

### 2.8.1 องค์ประกอบของสารตั้งต้นในปฏิกิริยา

1) ความเข้มข้นของค่าต่าง โดยมีงานวิจัยของกาญจนา และคณะ [11] พบว่า สภาวะการกระตุ้นที่เหมาะสมคือการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้ได้ผลผลิตของซีโอไลต์ชนิด NaP เป็นองค์ประกอบหลัก หรืองานวิจัยของ Kalapathy และคณะ [12] ได้มีการสกัดซิลิกาออกจากแคลบโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์

2) แหล่งของซิลิกา งานวิจัยของ สิริินทร์ และคณะ [13] สังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเพอร์ไลต์ และแคลบโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลโดยใช้เตตระโพรพิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เป็นสารเคมีกำหนดโครงสร้าง หรืองานวิจัยของ Prasetyoko และคณะ [14] ที่สังเคราะห์ซีโอไลต์บีตาจากเถ้าแคลบโดยใช้เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีกำหนดโครงสร้างและตกผลึกโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน หรืองานวิจัยของกาญจนา และคณะ [11] ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินลิกไนต์ หรืองานวิจัยของนิรุติ [15] ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากดินขาวโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส

### 2.8.2 อุณหภูมิของการตกผลึก

งานวิจัยของ Hui และคณะ [16] ที่พบว่า การเปลี่ยนอุณหภูมิ ขณะที่ทำปฏิกิริยาสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ โดยอุณหภูมิแรกที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่สอง 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

### 2.8.4 ความดันของการตกผลึก

งานวิจัยของนิรุติ [15] ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากดินขาว ที่ความดันต่าง ๆ ในช่วง 1-5 บรรยากาศ พบว่า ความดันไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์ผลที่ได้ของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 แต่พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรโดยรวมของรูพรุนเพิ่มขึ้นตามความดันที่สูงขึ้นเมื่อความดันเริ่มต้นมีค่าสูงขึ้น

### 2.8.3 ระยะเวลาของการตกผลึก

งานวิจัยของ Prasetyoko และคณะ [14] สังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าแกลบพบว่า ได้ซีโอไลต์ปีตาหลังจากเวลาการตกผลึกทางไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสผ่านไป 12 ชั่วโมง และการตกผลึกที่สมบูรณ์จะเกิดหลังจากเวลาผ่านไป 2 วัน และงานวิจัยของ Alfaro และคณะ [17] พบว่าเวลาในการตกผลึกมีผลต่อขนาดของซีโอไลต์ โดยที่เวลาการตกผลึกระหว่าง 72-144 ชั่วโมง จะได้ผลึกของซีโอไลต์เอ ขนาด 200-500 นาโนเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 วัตถุดิบและสารตั้งต้น

- 1) เถ้าลอยของชานอ้อยจากโรงงานผลิตน้ำตาล
- 2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Analytical grade, Merck)
- 3) โซเดียมอะลูมิเนต (Wako)
- 4) กรดไฮโดรคลอริก (Ajax Finechem)

### 3.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอกจากเถ้าลอยชานอ้อย

#### 3.2.1 การสกัดซิลิกาบริสุทธิ์จากเถ้าลอยของชานอ้อย

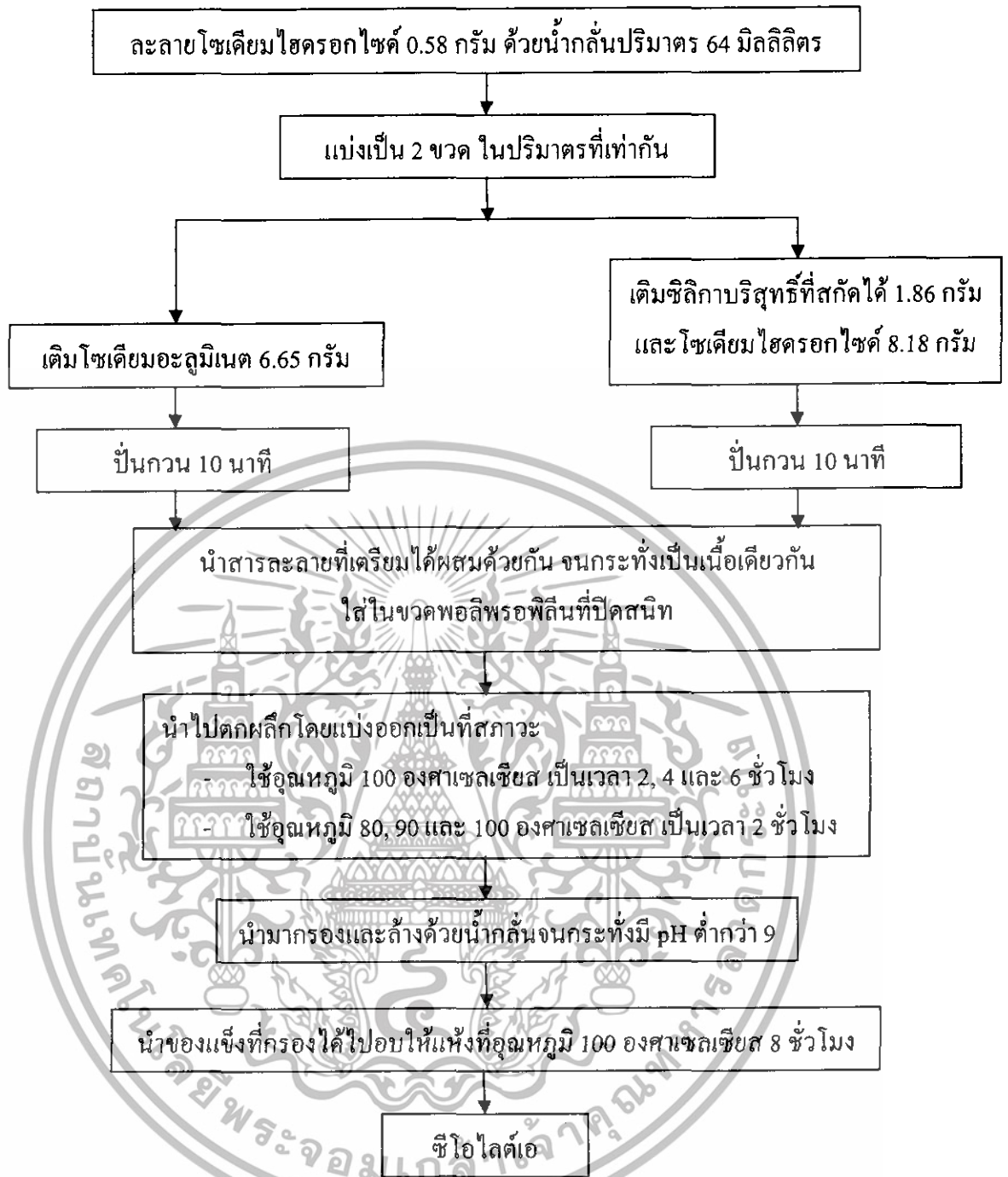
นำเถ้าลอยของชานอ้อย 10 กรัม ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 60 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิในช่วง 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรอง (Whatman No. 41) และล้างเถ้าลอยของชานอ้อยด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เพื่อล้างเกลือออก ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 โมลาร์ จนกระทั่งมี pH เท่ากับ 7 ทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 18 ชั่วโมง เกิดเป็นซิลิกาเจล จากนั้นเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง แล้วนำไปเข้าเครื่องอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่ออบให้แห้ง ได้เป็นซิลิกา หลังจากนั้นนำของแข็งมาบดให้ละเอียด และกรองพร้อมกับล้างด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปอบให้แห้งอีกครั้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงดังรูปที่ 3.1



### 3.2.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอคือ อุณหภูมิ และเวลาในการตกผลึก ดังนั้นจึงได้มีการปรับเปลี่ยนสภาวะการตกผลึก ที่อุณหภูมิในการตกผลึกเป็น 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการตกผลึกเป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ ดังนี้

- 1) ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.58 กรัม ด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 64 มิลลิลิตร แบ่งเป็น 2 ขวด ในปริมาตรที่เท่ากัน
- 2) ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากข้อ (1) กับ โซเดียมอะลูมิเนต 6.65 กรัม พร้อมทั้งนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
- 3) ผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อีกขวดที่เหลือจากข้อ (1) กับซิลิกาบริสุทธิ์ ที่สกัดได้ 1.86 กรัม และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.18 กรัม พร้อมทั้งนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 10 นาที
- 4) ผสมสารละลายที่เตรียมได้จากข้อ (2) และข้อ (3) จนกระทั่งเป็นเนื้อเดียวกัน โดยใส่ในขวดพอลิพรอพิลีนที่ปิดสนิท
- 5) นำไปตกผลึกโดยแบ่งออกเป็น 3 สภาวะ
  - ใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2, 4 และ 6 ชั่วโมง
  - ใช้อุณหภูมิ 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 6) นำสารที่ได้ออกมาตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่งมี pH ต่ำกว่า 9
- 7) นำของแข็งที่กรองได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 8 ชั่วโมง ดังแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

ตัวอย่างซิลิกาที่สกัดจากเถาของขาน้อยถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง XRF (X-Ray fluorescence spectroscopy, Siemens รุ่น SRS3400) โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ด้วยเครื่อง XRD (X-Ray diffraction, Siemens รุ่น D8 Advance) หลอดกำเนิดรังสีชนิด Cu หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดเซรามิก โดยใช้กระแส 30 กิโลโวลต์ และความต่างศักย์ 30 มิลลิแอมป์ โครงสร้างของผลึกด้วยเครื่อง SEM (Scanning electron microscope, LEO รุ่น 1455 VP) ดักจับสัญญาณด้วย Backscattered electron detector และหาพื้นที่ผิวโดยใช้ Autosorb quantachrome (BET) โดยใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



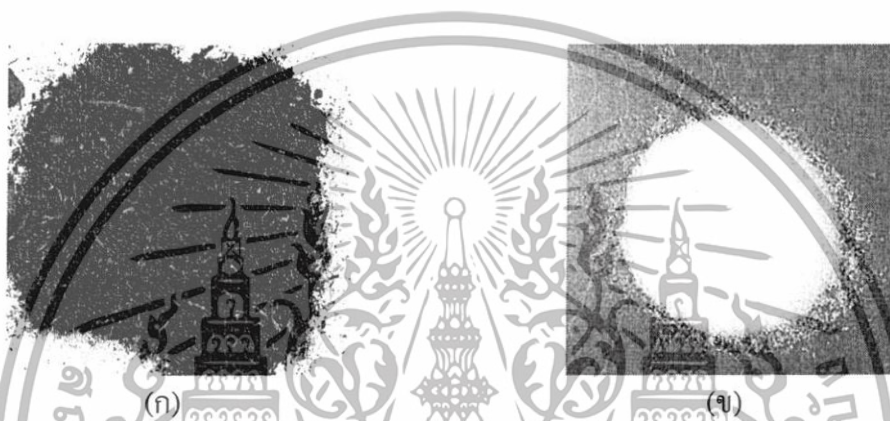
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 การสกัดซิลิกาจากถ้ำลอยขานอ้อย

ถ้ำลอยขานอ้อย ซึ่งมีลักษณะเป็นผงสีดำดังรูป 4.1 (ก) เมื่อนำมาสกัดซิลิกาบริสุทธิ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาวดังรูปที่ 4.1 (ข)



รูปที่ 4.1 (ก) ถ้ำลอยขานอ้อยที่ได้จากโรงงานน้ำตาล (ข) ซิลิกาที่สกัดได้จากถ้ำลอยขานอ้อย

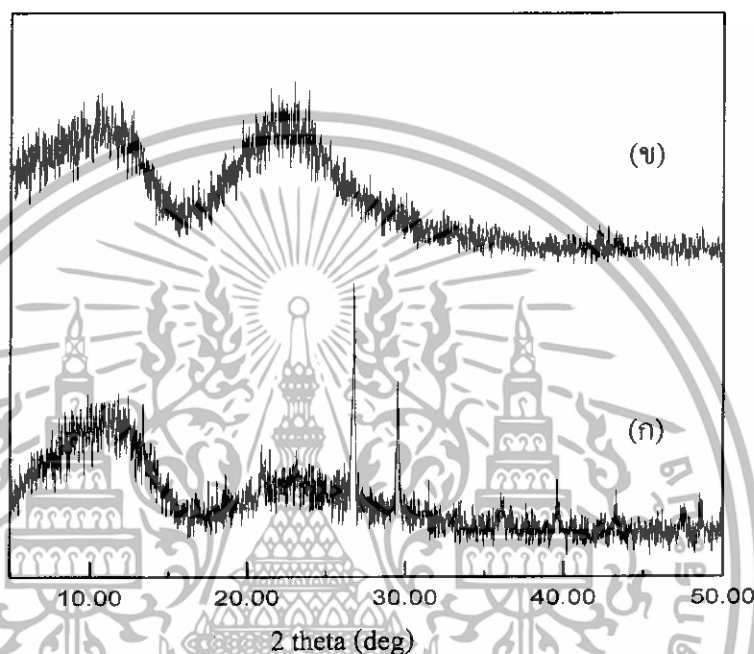
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยขานอ้อยและซิลิกาที่สกัดจากถ้ำลอยขานอ้อย ด้วยเครื่อง XRF พบว่ามีปริมาณของซิลิกอนในถ้ำลอยขานอ้อย และซิลิกาที่สกัดได้มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 54.31 และ 88.32 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และพบสารเจือปนอื่น ๆ เช่น Fe, Cu, Pd ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยขานอ้อยและซิลิกาที่สกัดจากถ้ำลอยขานอ้อย  
จากการวิเคราะห์ด้วย XRF

ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ถ้ำลอยขานอ้อย	ซิลิกาที่สกัดจากถ้ำลอยขานอ้อย
Si	54.31	88.32
Fe	6.61	1.80
Cu	0.76	4.33
Pd	0.53	5.16
อื่น ๆ	37.79	0.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของถ้ำลอยซานอ้อยและซิลิกาที่สกัดได้ด้วยเครื่อง XRD ซึ่งผลจาก XRD ของถ้ำลอยซานอ้อย แสดงดังรูปที่ 4.2 (ก) ปรากฏตำแหน่งจุดสูงสุดของซิลิกาที่ 2 $\theta$  เท่ากับ 22.1 และพบองค์ประกอบอื่น ๆ เจือปน เช่น ควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ แคลไซต์ ( $\text{CaCO}_3$ ) ดังแสดงในตำแหน่งปรากฏที่ 2 $\theta$  เท่ากับ 26.5 และ 29.5 องศา ตามลำดับ และผลจาก XRD ของซิลิกาที่สกัดได้ในรูป 4.2 (ข) พบว่ามีตำแหน่งสูงสุดที่ 2 $\theta$  เท่ากับ 22.1 เพียงตำแหน่งเดียว แสดงว่าซิลิกาที่สกัดได้ มีความความบริสุทธิ์มากขึ้น และองค์ประกอบอื่นที่เจือปนลดลง



รูปที่ 4.2 (ก) XRD ของถ้ำลอยซานอ้อย (ข) XRD ของซิลิกาที่สกัดได้จากถ้ำลอยซานอ้อย

## 4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

### 4.2.1 ผลของเวลาในการตกผลึก

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แล้วนำซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง XRF ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่าองค์ประกอบของถ้ำลอยซานอ้อยมีปริมาณของซิลิการ้อยละ 62.80 โดยน้ำหนัก และมีสารประกอบอื่น ๆ เจือปน เช่น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$  และ  $\text{CaO}$  และภายหลังจากการนำซิลิกาที่สกัดได้จากถ้ำลอยซานอ้อยมาสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์เอ พบว่ามี Fe และ Cu เจือปนอยู่ในรูปสารประกอบออกไซด์ โดยเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 4 ชั่วโมง จะพบ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  และ  $\text{CuO}$  เจือปนอยู่ในปริมาณร้อยละ โดยน้ำหนักน้อยกว่าเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 2 และ 6 ชั่วโมง และพบว่าสัดส่วน โมลของ Si/Al ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จะมีค่าประมาณ 1

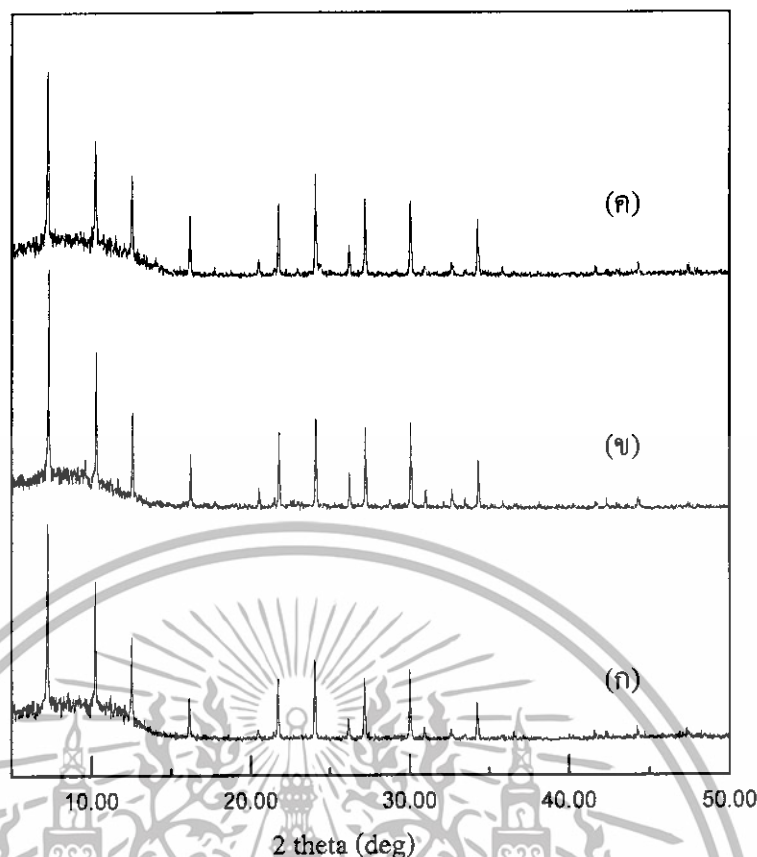
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งตรงกับสูตรโครงสร้างของซีโอไลต์เอ ดังนี้  $\text{Na}_{12}\text{Al}_{12}\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$  ที่มีสัดส่วนโมลของ Si/Al เท่ากับ 1

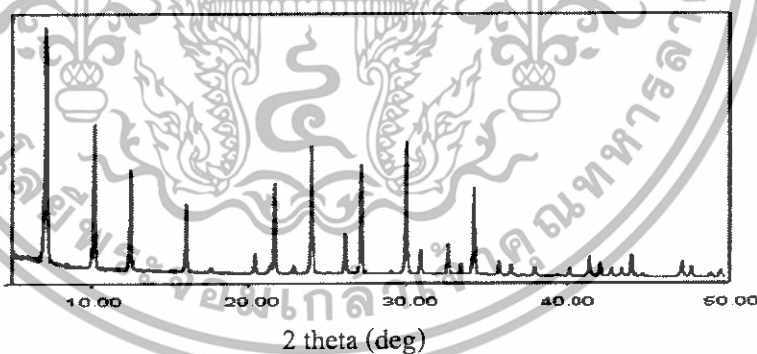
ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยซานอ้อยและซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ที่ เวลาตกผลึกต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วย XRF

ร้อยละโดย น้ำหนัก	ถ้ำลอยซานอ้อย	ซีโอไลต์เอที่เวลาการตกผลึก		
		2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
SiO <sub>2</sub>	62.80	29.70	28.60	31.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.23	27.90	24.10	28.80
Na <sub>2</sub> O	-	37.80	39.30	35.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.12	0.42	0.17	0.47
CuO	0.52	1.49	0.77	1.54
CaO	15.60	-	-	-
อื่น ๆ	9.73	2.69	7.16	2.29
Si/Al mole ratio	8.57	0.91	1.01	0.92

จากการวิเคราะห์ด้วย XRD ในช่วง 2θ จาก 5 ถึง 50 องศา พบว่าตำแหน่งสูงสุดของกราฟทั้ง 3 มีลักษณะตรงกัน และมีลักษณะของกราฟเหมือนกัน ดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ เวลาในการตกผลึกเป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิในการตกผลึก 100 องศาเซลเซียส สามารถ สังเคราะห์ ซีโอไลต์เอได้เช่นเดียวกัน และ XRD ของกราฟทั้ง 3 มีลักษณะตรงกับ XRD ของกราฟ ซีโอไลต์เอมาตรฐาน ดังรูปที่ 4.4



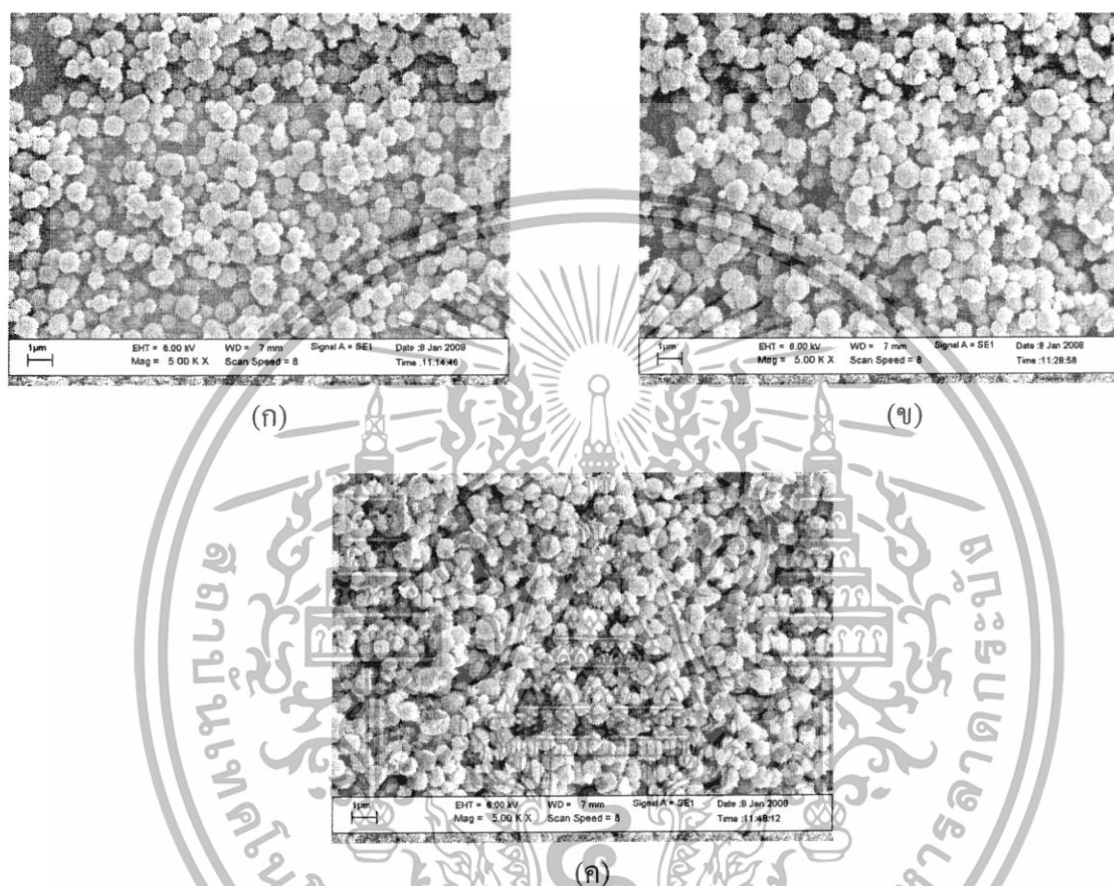
รูปที่ 4.3 XRD ของซีโอไลต์เอที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยเวลาในการตกผลึกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6 ชั่วโมง



รูปที่ 4.4 XRD Pattern ของซีโอไลต์เอมาตรฐาน [18]

จากการวิเคราะห์รูปร่างของผลึกด้วยเครื่อง SEM ดังรูปที่ 4.5 พบว่า ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะรูปร่างกลม ผิวเรียบ โดยขนาดของอนุภาคจะอยู่ในช่วง 0.5-1  $\mu\text{m}$  โดยที่เมื่อใช้เวลาในการตกผลึกเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง จะพบผลึกที่มีขนาดเล็กกว่าผลึกของซีโอไลต์เอที่ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นสารชนิดใดเจือปนอยู่ ซึ่งอาจจะเป็นผลึกของสารชนิดอื่นที่ไม่ใช่ซีโอไลต์เอ หรืออาจจะเป็นผลึกของซีโอไลต์เอที่มีการตกผลึกที่ไม่สมบูรณ์ และมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตกผลึก และอาจส่งผลให้พื้นที่ผิวของซีโอไลต์เพิ่มขึ้น เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วย BET พบว่า ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวเป็น 384.9, 415.6 และ 509.8  $\text{m}^2/\text{g}$  เมื่อใช้เวลาในการตกผลึก เป็น 2, 4 และ 6 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเวลาในการตกผลึกมากขึ้น พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์เอที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยเวลาในการตกผลึกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (ก) 2 ชั่วโมง (ข) 4 ชั่วโมง (ค) 6 ชั่วโมง (กำลังขยาย 5,000 เท่า)

ตารางที่ 4.3 พื้นที่ผิวของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ด้วยเวลาในการตกผลึกต่างกัน

ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วย BET

ซีโอไลต์เอที่เวลาการตกผลึก	พื้นที่ผิว ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
2 ชั่วโมง	384.9
4 ชั่วโมง	415.6
6 ชั่วโมง	509.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ผลของอุณหภูมิในการตกผลึก

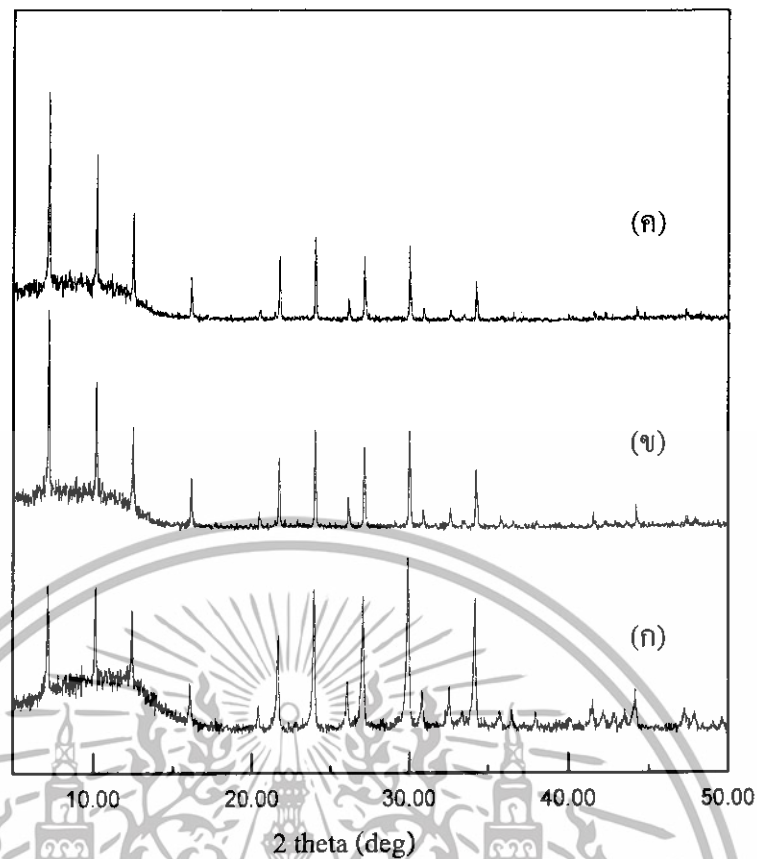
จากการศึกษาผลของเวลาในการตกผลึกที่ 2, 4 และ 6 ชั่วโมงที่อุณหภูมิในการตกผลึก 100 องศาเซลเซียส พบว่าที่เวลาการตกผลึก 2 ชั่วโมงสามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ โดยที่รูปทรงของอนุภาคมีขนาดสม่ำเสมอและไม่พบลักษณะผลึกที่มีขนาดเล็กกว่าผลึกของซีโอไลต์เอเจือปนอยู่ จึงได้มีการนำเอาเวลาในการตกผลึก 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่ใช้ในการเกิดซีโอไลต์เอที่น้อยที่สุด มาศึกษาอุณหภูมิในการตกผลึกของสารผลิตภัณฑ์เป็น 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส ที่เวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ด้วยเครื่อง XRF ผลที่ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าสัดส่วนโมลของ Si/Al ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จะมีค่าประมาณ 1 ซึ่งตรงกับสูตรโครงสร้างของซีโอไลต์เอ ดังนี้  $\text{Na}_{12}\text{Al}_2\text{Si}_{12}\text{O}_{48}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$  ที่มีสัดส่วนโมลของ Si/Al เท่ากับ 1

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยขานอ้อยและซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิในการตกผลึกต่าง ๆ ที่เวลา 2 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย XRF

ร้อยละ โดยน้ำหนัก	ซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิการตกผลึก			
	ถ้ำลอยขานอ้อย	80 องศาเซลเซียส	90 องศาเซลเซียส	100 องศาเซลเซียส
SiO <sub>2</sub>	62.80	30.60	29.70	29.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.23	26.10	27.20	27.90
Na <sub>2</sub> O	-	39.90	39.10	37.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.12	0.52	0.70	0.42
CuO	0.52	1.27	1.49	1.49
CaO	15.60	-	-	-
อื่น ๆ	9.73	1.61	1.81	2.69
Si/Al mole ratio	8.57	1.00	0.93	0.91

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการตกผลึกเป็น 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการตกผลึก 2 ชั่วโมง พบว่า XRD ของซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิ 90 และ 100 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.6 (ข) และ (ค) มีลักษณะของกราฟที่เหมือนกัน แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 90 และ 100 องศาเซลเซียส ที่เวลาในการตกผลึกเป็น 2 ชั่วโมง ก็สามารถสังเคราะห์ ซีโอไลต์เอได้เช่นเดียวกัน แต่เมื่ออุณหภูมิในการตกผลึกเป็น 80 องศาเซลเซียส พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะของกราฟ XRD ดังรูปที่ 4.6 (ก) บางส่วนไม่ตรงกับกราฟ XRD ของซีโอไลต์เอมาตรฐาน มีลักษณะของการเกิดผลึกที่เป็นอสัณฐานเกิดขึ้น จึงอาจสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซีโอไลต์เอมีการเกิดผลึกที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น

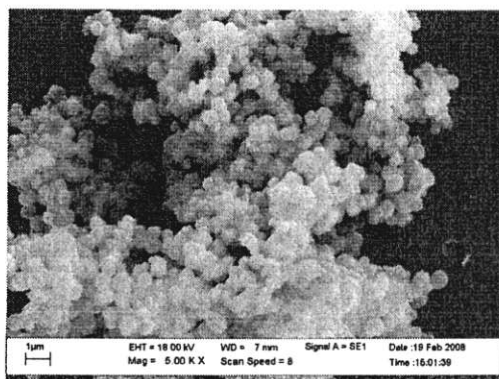
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



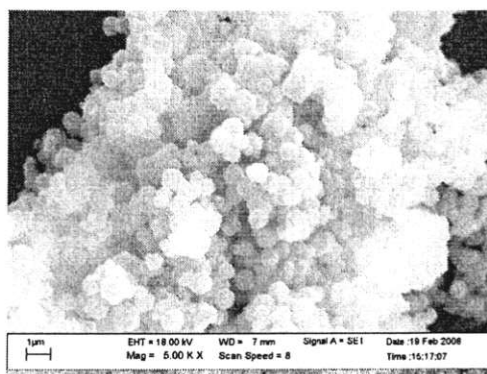
รูปที่ 4.6 XRD ของซีโอไลต์เอที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยอุณหภูมิในการตกผลึกต่างกัน ที่เวลา 2 ชั่วโมง (ก) 80 องศาเซลเซียส (ข) 90 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์รูปร่างของผลึกด้วยเครื่อง SEM พบว่าซีโอไลต์เอที่ได้จากสภาวะในการตกผลึก 2 ชั่วโมง โดยปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกเป็น 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการตกผลึก 80 และ 90 องศาเซลเซียส ลักษณะของอนุภาค ดังรูปที่ 4.7 (ก) และ (ข) มีลักษณะเป็นผลึกขนาดเล็กเกาะกลุ่มกัน และมีอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคที่ได้จากการตกผลึกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.7 (ค) เมื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วย BET พบว่า ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวเป็น 368.0, 338.4 และ 384.9  $\text{m}^2/\text{g}$  เมื่อใช้อุณหภูมิในการตกผลึกเป็น 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียสตามลำดับ จะเห็นว่า ซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิในการตกผลึก 80 และ 90 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวน้อยกว่าซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิในการตกผลึก 100 องศาเซลเซียส อาจเป็นผลเนื่องจากอนุภาคมีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ทำให้มีพื้นที่ผิวน้อยลง และซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิในการตกผลึก 80 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวมากกว่าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส อาจเป็นผลมาจากการที่ผลึกยังมีการโตไม่เต็มที่ ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กกว่าพื้นที่ผิวจึงมากกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4.5

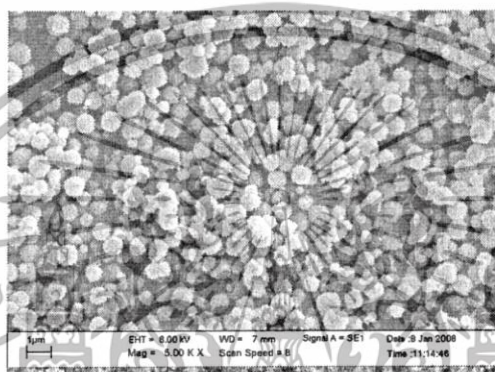
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์เอทีที่ได้จากการสังเคราะห์ ด้วยอุณหภูมิในการตกผลึกต่างกัน ที่เวลา 2 ชั่วโมง (ก) 80 องศาเซลเซียส (ข) 90 องศาเซลเซียส (ค) 100 องศาเซลเซียส (กำลังขยาย 5,000 เท่า)

ตารางที่ 4.5 พื้นที่ผิวของซีโอไลต์เอทีที่สังเคราะห์ได้ด้วยอุณหภูมิในการตกผลึกต่างกัน ที่เวลา 2 ชั่วโมง จากการวิเคราะห์ด้วย BET

ซีโอไลต์เอทีอุณหภูมิการตกผลึก	พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )
80 องศาเซลเซียส	368.0
90 องศาเซลเซียส	338.4
100 องศาเซลเซียส	384.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ถ้ำลอยซานอ้อยสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอได้ โดยซิลิกาที่สกัดได้จากถ้ำลอยซานอ้อยมีปริมาณซิลิกอนร้อยละ 88.32 โดยน้ำหนัก
2. ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากถ้ำลอยซานอ้อย พบว่า เมื่อใช้เวลาในการตกผลึกเพียง 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสก็สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์เอได้
3. สภาพที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ คือ ที่อุณหภูมิในการตกผลึก 100 องศาเซลเซียส เวลาการตกผลึก 2 ชั่วโมง
4. ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ มีขนาดอนุภาคในช่วง  $0.5 - 1 \mu m$

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาพที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอที่ประหยัดต้นทุนในการผลิตมากที่สุด จึงนำเวลาในการตกผลึกที่ 2 ชั่วโมงไปปรับเปลี่ยนอุณหภูมิในการตกผลึกเป็น 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส ดังนั้นควรศึกษาเวลาที่ใช้ในการตกผลึกเป็น 4 และ 6 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 และ 90 องศาเซลเซียส เพิ่มเติม เพื่อให้ครอบคลุมในช่วงอุณหภูมิและเวลาในการตกผลึกที่ศึกษา
2. ศึกษาผลของการนำซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยซานอ้อยไปประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ใช้ในการเป็นสารกักเก็บโมเลกุลระหว่างน้ำกับเอทานอล เพื่อดูประสิทธิภาพของการดูดซับของซีโอไลต์เอ ทั้งนี้เพื่อนำไปเป็นข้อมูลในการปรับปรุงประสิทธิภาพของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยซานอ้อยต่อไปในอนาคต

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชรรณวิทย์ เทอดอุดมธรรม. 2547. “มองมุมใหม่.” หนังสือพิมพ์กรุงเทพธุรกิจ.
- [2] กุลวดี รังษิวัฒนานนท์. 2545. “การสังเคราะห์และศึกษาสมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์เอ เพื่อเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนเจาะจง.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [3] จตุพร วิทยาคณ และนุรักษ์ กฤษดาบุรุษย์. 2547. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [4] N.Y. Chen Willium, E. Garwood and F.G. Dwyer. 1996. *Shape selective catalysis in industrial applications. 2<sup>nd</sup> : revised & expanded.*
- [5] เกศนที น้อยปิ่น, ประเสริฐ ชื้อสัตตาศิลป์ และปริญญา วรณวานิชชัย. 2539. “การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบอินทรีย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาซีโอไลต์ชนิด FAU และ EMT.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] เจษฎาภรณ์ ม่วงท่า และสุภัค ตรีการฤกษ์. 2544. “การแตกสลายของควิมีนไฮโดรเปอร์ออกไซด์ในสถานะก๊าซโดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] ชันชรรัตน์ หิรัญชนะโชค และจตุพร ธีระกุล. 2541. “การสังเคราะห์สารอินทรีย์โดยใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] สถาบันพัฒนาและฝึกอบรมโรงงานต้นแบบมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. รายงานโครงการประเมินเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลจากผลผลิตทางการเกษตร.
- [9] สารคดีวิทยาศาสตร์. ซีโอไลต์เคมีที่ไม่ธรรมดา. [Online]. Available : <http://update.se-ed.com/192/zeolite.htm>.
- [10] อุษณีย์ รูปหอม. “ผลของอนุภาคและขนาดอัตราส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมต่อความเสถียรทางความร้อนและความชื้นของซีโอไลต์เบต้า พอลิคริสตัลไลน์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- [11] กาญจนา คุณาทัช, วีราภรณ์ การมณี และภัทรา เฟ่งธรรมกิตติ. “การผลิตซีโอไลต์จากเถ้าลอยและการใช้ประโยชน์เพื่อนำบำบัดน้ำเสีย.” คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Kalpathy, U., Proctor, A. and Shultz, J. "A simple method for production of pure silica from rice hull ash." **Bioresource technology**. 2000(73) : 257-262.
- [13] สิริพันธ์รักษ์ จำปาน้อย และไพศาล คงคาอุษณาย. "การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากเพอร์ไลต์และเถ้าแกลบ." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [14] Prasetyoko, D., Ramli, Z., Endud, S., Hamdan, H. and Sulikowski, B. "Conversion of rice husk ash to zeolite beta." **Waste Management**. 2006(26) : 1173-1179
- [15] นิรุต วานิชกิจ. 2546. "การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 จากดินขาว." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [16] Hui, K.S. and Chao, C.Y.H. "Effect of step-change of synthesis temperature on synthesis of zeolite 4A from coal fly ash." **Microporous and mesoporous materials**. 2006(26) : 145-151.
- [17] Alfaro, S., Rodríguez, C., Valenzuela, M.A. and Bosch, P. "Aging time effect on the synthesis of small-crystal LTA zeolites in the absence of organic template." **Materials Letters**. 2007(61) : 4655-4658.
- [18] IZA synthesis commission. LTA. [Online]. Available : <http://iza-online.org>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### ตัวอย่างการคำนวณ

จากข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยซานฮ้อยและซีโอดีเอที่สังเคราะห์ได้ที่เวลาตกผลึกต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วย XRF ในตารางที่ 4.2 นำมาคำนวณสัดส่วนโมลของ Si/Al

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยซานฮ้อยและซีโอดีเอที่สังเคราะห์ได้ที่เวลาตกผลึกต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ด้วย XRF

ร้อยละโดยน้ำหนัก	ถ้ำลอยซานฮ้อย	ซีโอดีเอที่เวลาการตกผลึก		
		2 ชั่วโมง	4 ชั่วโมง	6 ชั่วโมง
SiO <sub>2</sub>	62.80	29.70	28.60	31.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.23	27.90	24.10	28.80
Na <sub>2</sub> O	-	37.80	39.30	35.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.12	0.42	0.17	0.47
CuO	0.52	1.49	0.77	1.54
CaO	15.60	-	-	-
อื่น ๆ	9.73	2.69	7.16	2.29
Si/Al mole ratio	8.57	0.91	1.01	0.92

ตัวอย่างการคำนวณจากข้อมูลองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยซานฮ้อย

- จำนวนโมลที่มีอยู่ของ Si คำนวณจากสมการ

$$\begin{aligned}\text{จำนวนโมลที่มีอยู่ของ Si} &= \frac{\text{ร้อยละโดยน้ำหนักของ SiO}_2 \times \text{จำนวนโมล Si ใน SiO}_2}{\text{มวลโมเลกุลของ SiO}_2} \\ &= \frac{62.80 \text{ กรัม} \times 1 \text{ โมล}}{60 \text{ กรัม}} \\ &= 1.0466 \text{ โมล}\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จำนวน โมลที่มีอยู่ของ Al คำนวณจากสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวน โมลที่มีอยู่ของ Al} &= \frac{\text{ร้อยละโดยน้ำหนักของ Al}_2\text{O}_3 \times \text{จำนวน โมล Al ใน Al}_2\text{O}_3}{\text{มวลโมเลกุลของ Al}_2\text{O}_3} \\
 &= \frac{6.23 \text{ กรัม} \times 2 \text{ โมล}}{102 \text{ กรัม}} \\
 &= 0.1221 \text{ โมล}
 \end{aligned}$$

- สัดส่วน โมลของ Si/Al คำนวณจากสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{สัดส่วน โมลของ Si/Al} &= \frac{\text{จำนวน โมลที่มีอยู่ของ Si}}{\text{จำนวน โมลที่มีอยู่ของ Al}} \\
 &= \frac{1.0466 \text{ โมล}}{0.1221 \text{ โมล}} \\
 &= 8.57
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้