

## บทที่ 2

### วารสารปริทัศน์

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

ซีโอไลต์ มีรากศัพท์มาจากภาษากรีก zein แปลว่า to boil และ lithos แปลว่า stone รวมความหมายก็คือ boiling stone หรือ หินเดือด เนื่องจากเมื่อให้ความร้อนแก่ซีโอไลต์ธรรมชาติแล้วสามารถเห็นการระเหยของน้ำได้ชัดเจน ซีโอไลต์ (zeolite) เป็นผลึกของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) ของโลหะแอลคาไลน์ ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Cs}^+$ ) โลหะแอลคาไลน์เอิร์ท ( $\text{Mg}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) หรือไอออนบวกอื่นๆ เช่น  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{TMA}^+$  (tetramethylammonium ion) เป็นต้น โครงสร้างมีลักษณะเป็นรูพรุนสม่ำเสมอจำนวนมาก ซีโอไลต์สามารถนำมาใช้งานได้หลากหลาย ขึ้นกับโครงสร้างรูพรุนและสมบัติของซีโอไลต์แต่ละประเภท เช่น ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) และเป็นตัวดูดซับ (adsorbent)

#### 2.1.1 ประวัติซีโอไลต์

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

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

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

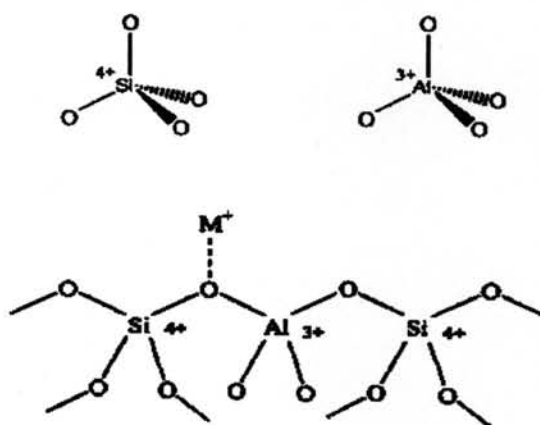
ปี ค.ศ. 1930 ได้มีการอธิบายโครงสร้าง และสมบัติของซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออน การดูดซับ และตะแกรงร่อนโมเลกุล และในปีเดียวกันนี้ R. Barrer และ J. Sameshima ได้สังเคราะห์ซีโอไลต์ขึ้นเป็นครั้งแรก และในปี ค.ศ. 1933 Dent Smith ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ Chabazite ในปี ค.ศ. 1940 Milton ได้เริ่มทำการศึกษากองสร้างซีโอไลต์เพื่อใช้ในกระบวนการแยกแก๊สและการทำอากาศให้บริ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

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

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

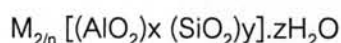
### 2.1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

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



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

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



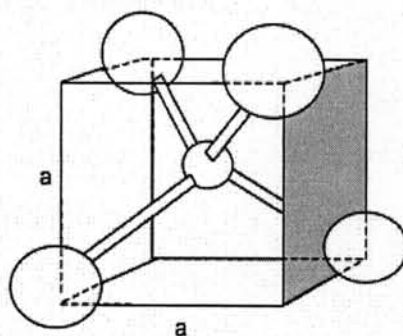
โดยที่  $n$  จำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนของไอออนบวก ( $M$ )

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

$z$  เป็นจำนวนโมลของน้ำที่มีอยู่ในผลึกของซีโอไลต์

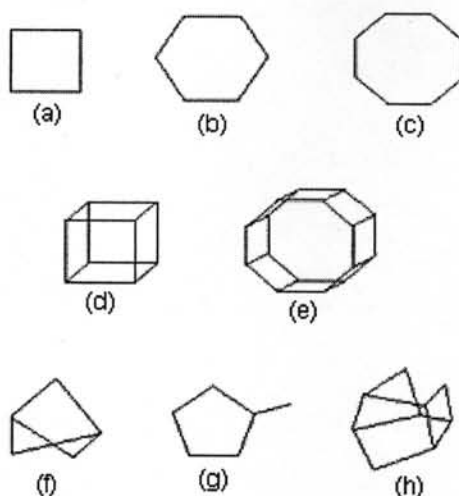
$M$  เป็นโลหะหมู่ I หรือ II ซึ่งมีประจุบวกเท่ากับ  $n$  เพื่อดุลประจุลบ ณ ตำแหน่งของอะตอมอะลูมิเนียม

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



รูปที่ 2.2 รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม

ในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ) (เลิศ, 2545)

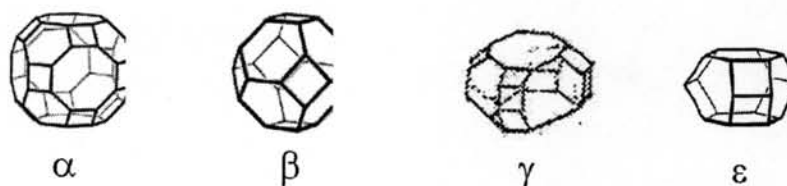


รูปที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างพหุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์

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

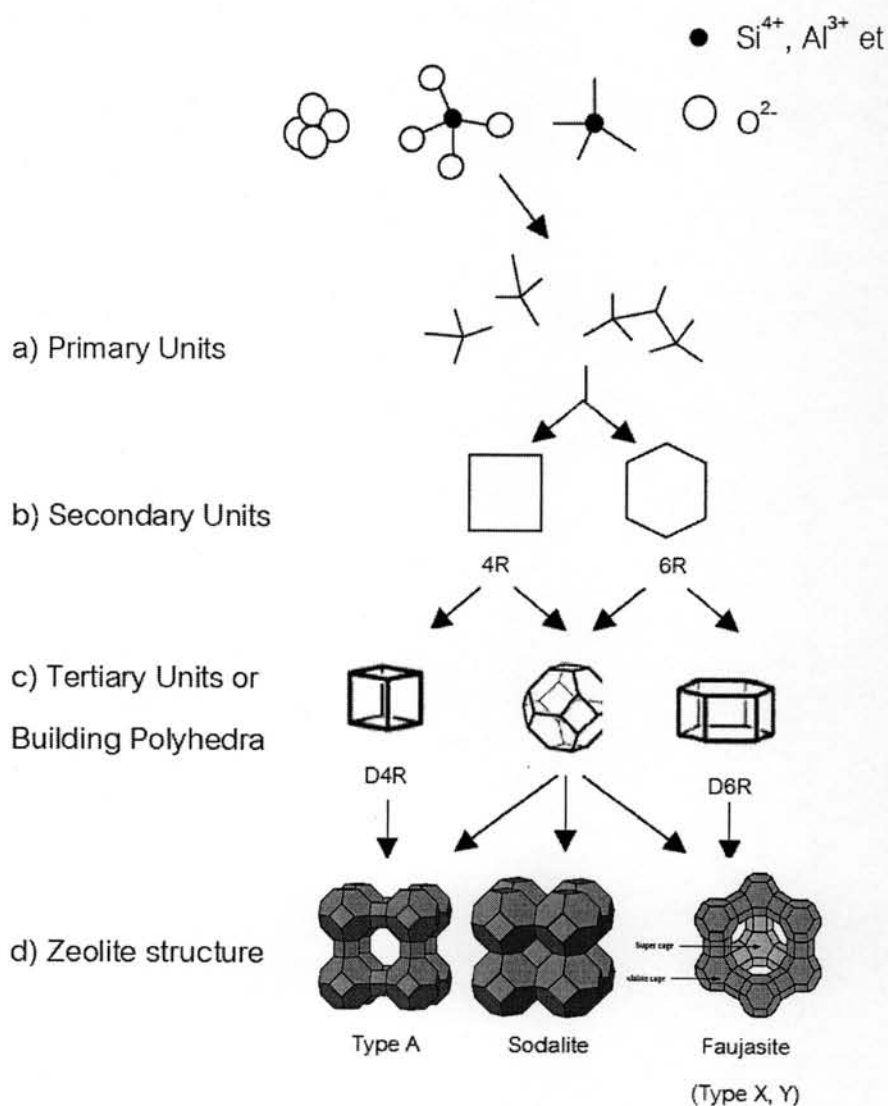
หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (polyhedral units) เป็นรูปทรงสมมาตรขนาดใหญ่ซึ่งเกิดขึ้นจากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นรูปทรงที่สลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นดังตัวอย่างในรูป 2.4

- ทรงเหลี่ยมยี่สิบหกหน้า หรือ  $\alpha$  (truncated cuboctahedron)
- ทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ  $\beta$  (truncated octahedron type)
- ทรงเหลี่ยมสิบแปดหน้า หรือ  $\gamma$  (18-hedron)
- ทรงสิบเหลี่ยมเอ็ดหน้า หรือ  $\epsilon$  (11-hedron)



รูปที่ 2.4 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์ (เลิศ, 2545)

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



รูปที่ 2.5 การเกิดโครงสร้างของผลึกแบบต่างๆ (Farrauto, 1997)

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

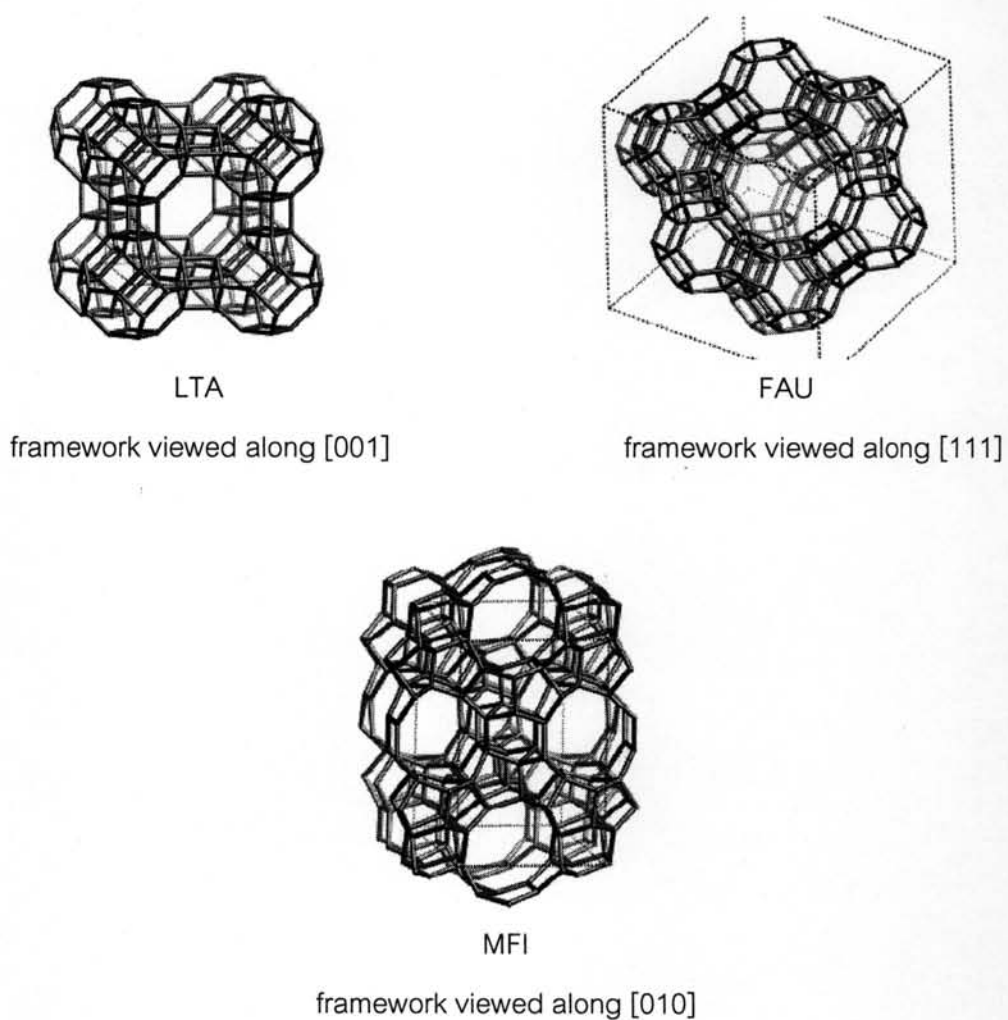
1. รูพรุนขนาดเล็ก (ขนาดรูพรุนน้อยกว่า 5 Å หรือ 8OR) เช่นซีโอไลต์ A (LTA) ที่มีโครงสร้างประกอบด้วยโพร่งสามมิติ (3-dimensional channel) เกิดจากการเชื่อมต่อกันของรูปทรงสี่หน้าของซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็นทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด ( $\beta$  or sodalite cage) ซึ่งจะเชื่อมต่อกันผ่าน D4R (double 4-rings) ดังรูปที่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

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

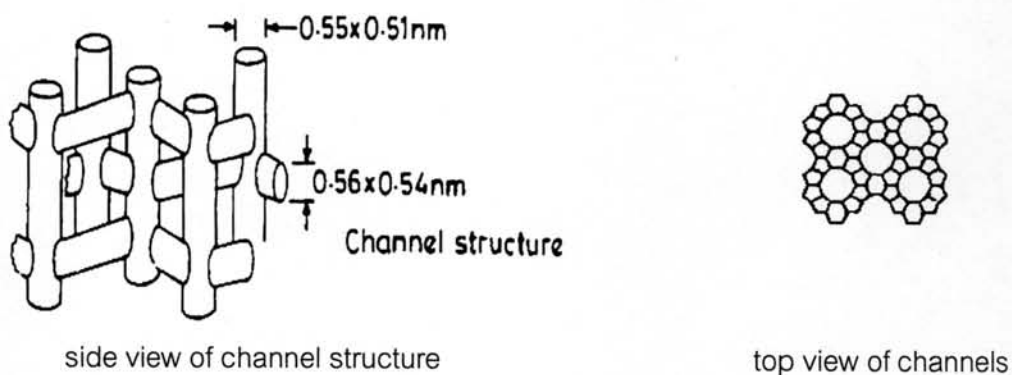
3. รูพรุนขนาดใหญ่ (ขนาดรูพรุน 7-8 Å หรือ 12OR) เช่นซีโอไลต์ Faujasite ชนิด X และ Y ช่องเปิดของซีโอไลต์กลุ่มนี้เป็นวงแหวนที่ประกอบด้วยออกซิเจนทั้งหมด 12 อะตอม โดยโครงสร้างเกิดการเชื่อมต่อกันของทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัดผ่าน D6R (double 6-ring) ทำให้เกิดโพร่งขนาดใหญ่ (supercage) หรือ  $\alpha$  cage ที่มีออกซิเจนล้อมรอบ 12 อะตอม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพร่งเท่ากับ 13 อังสตรอม

ตารางที่ 2.1 ขนาดของช่องเปิดของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ (Szostak, 1998)

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

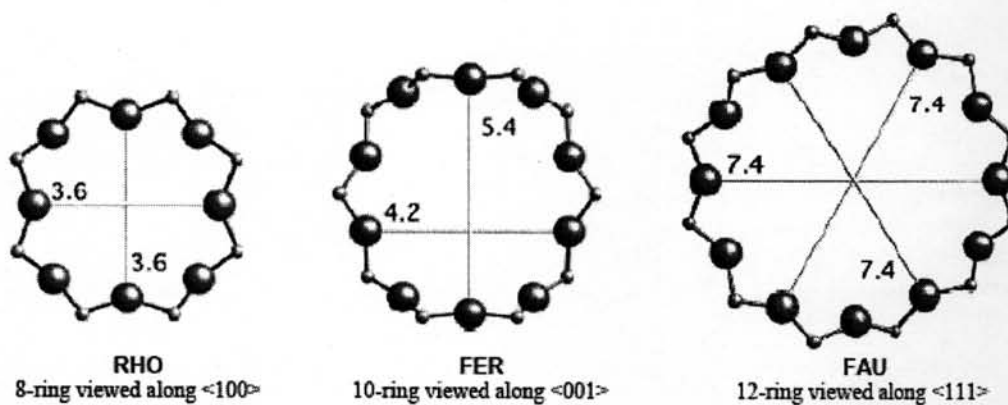


รูปที่ 2.6 โครงสร้างสามมิติของซีโอไลต์ Linde Type A (LTA)  
ซีโอไลต์ Faujasite (FAU) และซีโอไลต์ ZSM-5 (MFI) (Baerlocher Ch., 2001)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 (Bhatia, 1990)





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

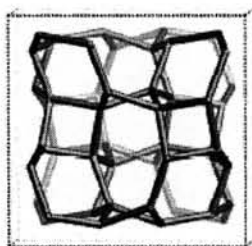
ตารางที่ 2.2 ซีโอไลต์ต่างๆ แบ่งตามลักษณะโครงสร้างและรูปทรงของวงแหวน (Szostak, 1998)

| 12-membered ring      | 10-membered ring | 8-membered ring |
|-----------------------|------------------|-----------------|
| Faujasite (Type X, Y) | ZSM-5 (Silicate) | Type A, ZK-5    |
| Mordenite             | ZSM-11           | Bikitate        |
| Cancrinite            | Dachiardite      | Brewsterite     |
| Gmelinite             | Epistilbite      | Chabazite       |
| Type L                | Ferrierite       | TMA-E (AB)      |
| Mazzite               | Laumontite       | Edingtonite     |
| Offretite             | Stilbite         | Erionite        |
| Omega                 | ZSM-23           | Gismondine      |
| ZSM-12                | Theta-1 (ZSM-22) | Heulandite      |
| Beta                  | Eu-1 (ZSM-50)    | Levyne          |
|                       | ZSM-48 (EU-2)    | Merlinoite      |
|                       |                  | Natrolite       |
|                       |                  | Phillipsite     |
|                       |                  | Paulingite      |
|                       |                  | Rho             |
|                       |                  | Thomsonite      |
|                       |                  | Yugawaralite    |

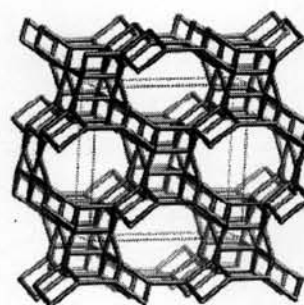
นอกจากนี้หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมต่อกันดังนี้ (Breck, 1974)

ประเภทของซีโอไลต์ที่แบ่งตามลักษณะการเชื่อมต่อของหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์ ได้แก่

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

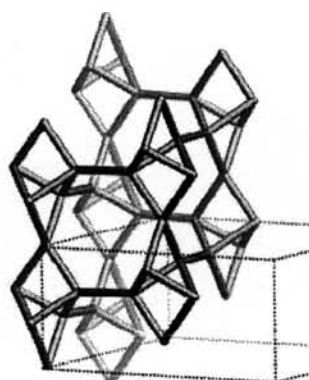


Analcite (ANA)  
cubic,  $Ia3d$

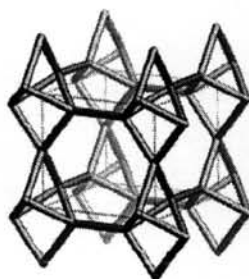


Laumontite (LAU)  
monoclinic,  $C2/m$

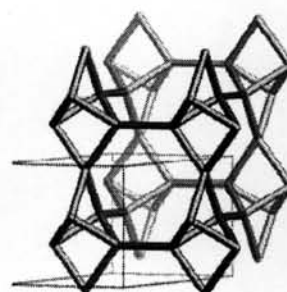
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของ Analcite Group (Baerlocher Ch., 2001)



Natrolite  
tetragonal,  $I41/amd$

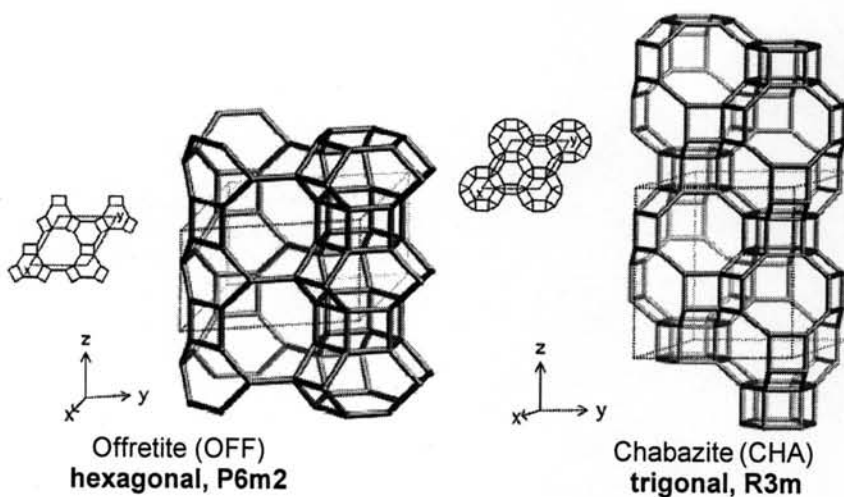


Edingtonite  
orthorhombic,  $P21212$



Thomsonite  
orthorhombic,  $Pnca$

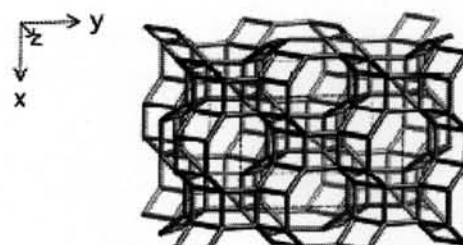
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของ Natrolite Group (Baerlocher Ch., 2001)



Offretite (OFF)  
hexagonal,  $P6m2$

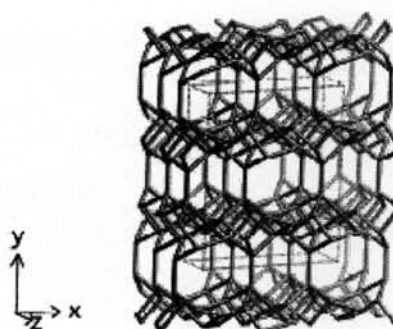
Chabazite (CHA)  
trigonal,  $R3m$

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



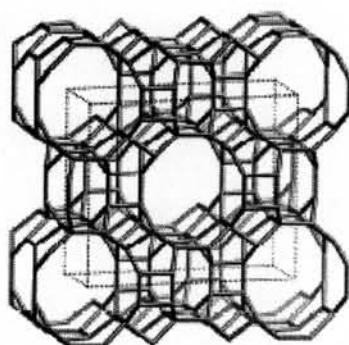
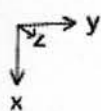
Phillipsite (PHI)  
orthorhombic,  $Cmcm$

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

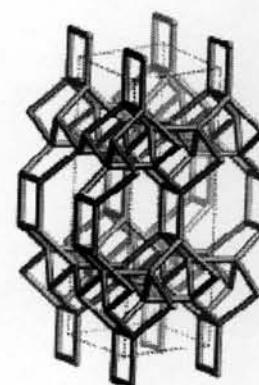


Heulandite (HEU)  
monoclinic,  $C2/m$

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

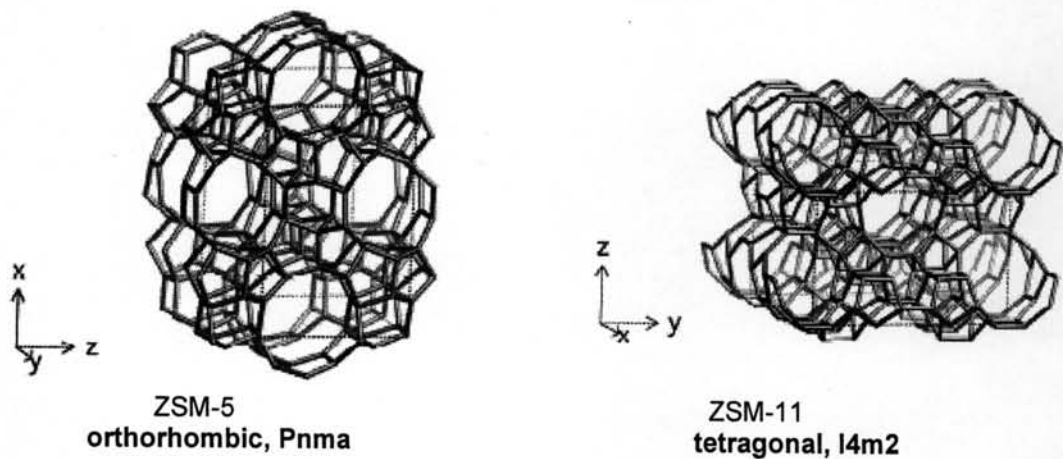
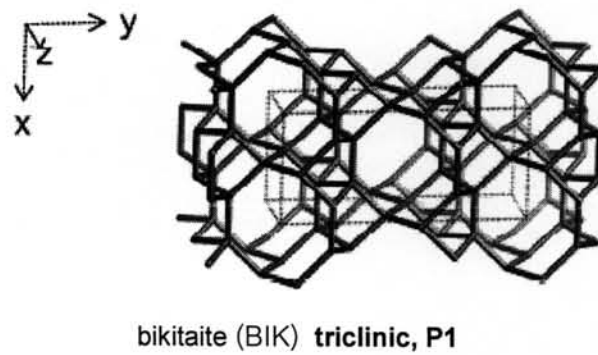
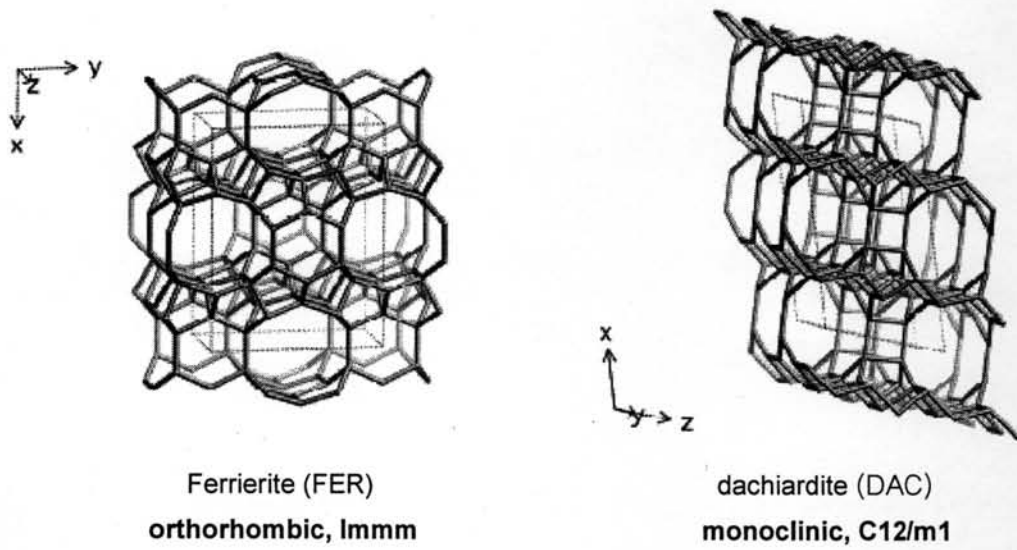


mordenite (MOR)  
orthorhombic,  $Cmcm$

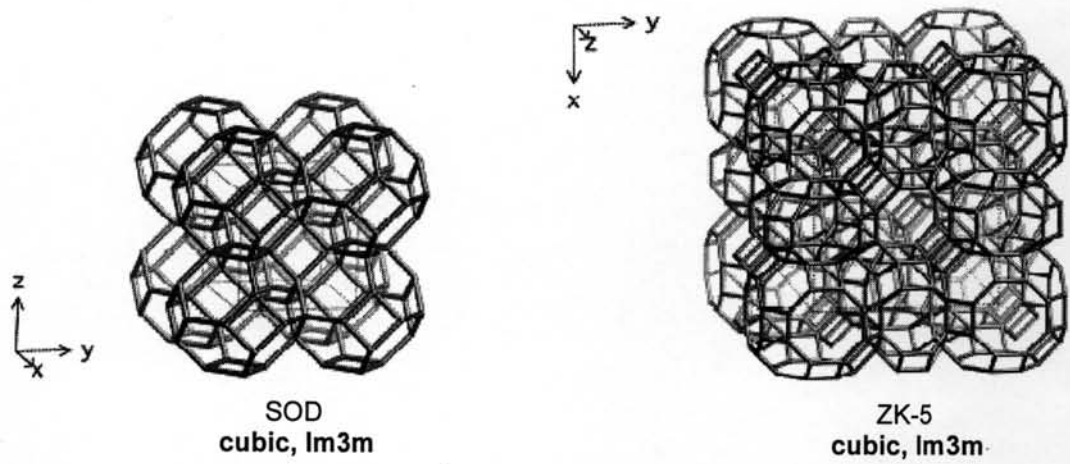


epistilbite (EPI)  
monoclinic,  $C2/m$

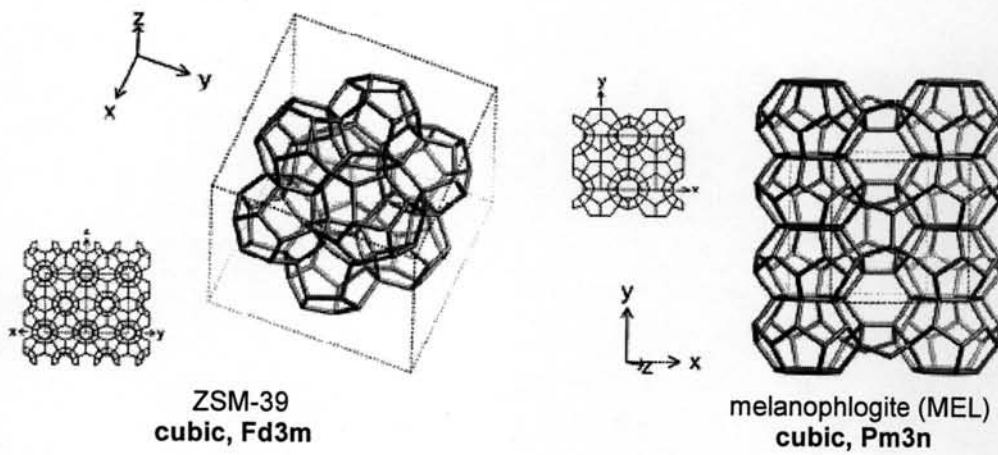
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ Mordenite Group (Baerlocher Ch., 2001)



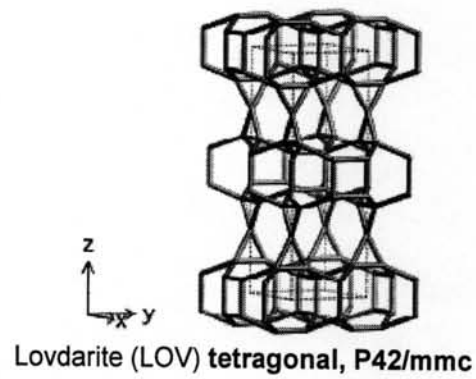
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ Mordenite Group (Baerlocher Ch., 2001) (ต่อ)



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



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



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

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

ซีโอไลต์แบ่งตามการกำเนิดได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี

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

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

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

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

องค์ประกอบหลักในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ประกอบด้วย

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



ซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

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

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

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

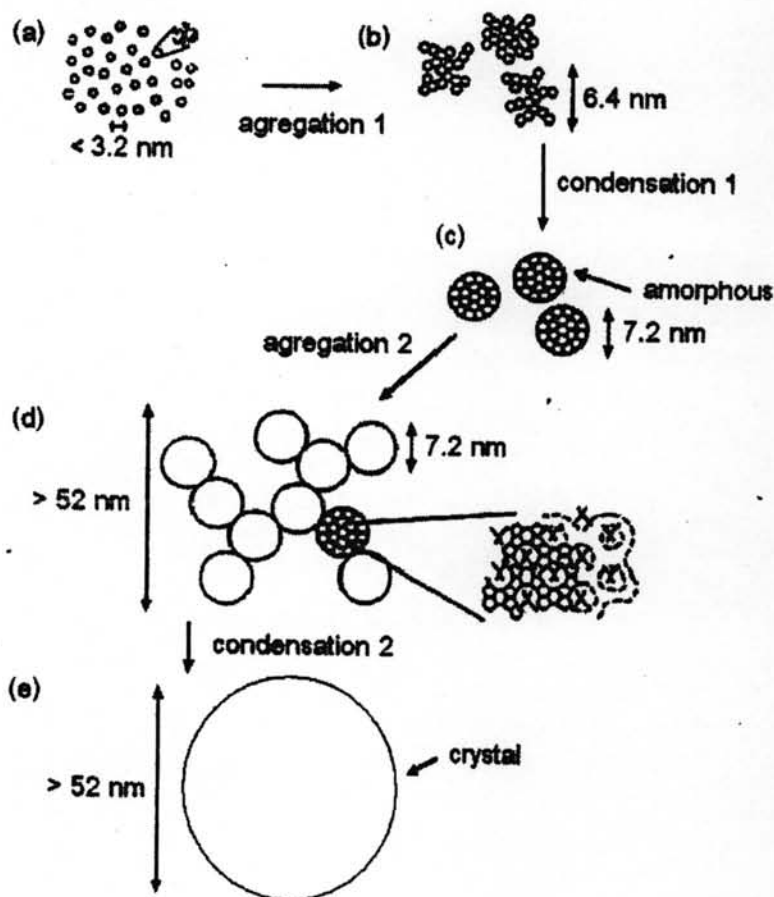
ซีโอไลต์ที่ต้องการ ได้แก่ ระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก (aging period) และกลไกการเกิดผลึก (mechanism of crystallization)

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

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

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

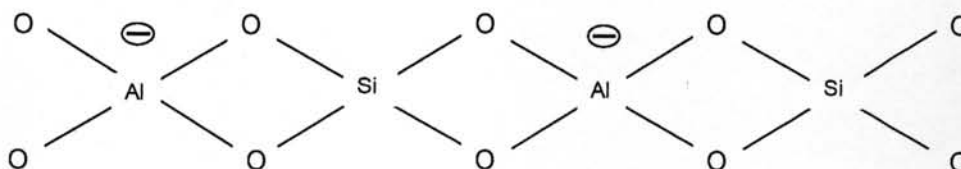
ลักษณะของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ซึ่งประกอบไปด้วยอัตราส่วนของ  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  ของสารตั้งต้น อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไป ช่วงระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราเร็วในการกวน และปริมาณของประจุบวกของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ปะปนอยู่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



รูปที่ 2.18 การเกิดซีโอไลต์จากอนุภาคของเจล (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

### 2.1.4 สมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์ (Bruce, 1991)

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



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

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

2.1.4.1 การแลกเปลี่ยนไอออน ซีโอไลต์สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของโลหะที่อยู่ในผลึกกับไอออนประจุบวกอื่นๆ ในสารละลายได้ โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุบวกนี้ผันกลับได้

2.1.4.2 การดูดซับน้ำ ซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำเข้าไปในช่องว่างบริเวณผนังด้านในของโพรงชนิดต่างๆ ได้ และสามารถกำจัดน้ำออกได้ที่อุณหภูมิสูงพอ

2.1.4.3 การคัดขนาดและรูปร่างของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ ภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงซึ่งมีทางให้โมเลกุลของสารใดๆ ผ่านเข้าออกได้เรียกว่า ปากโพรง (aperture) โดยที่โมเลกุลที่มีรูปร่างและขนาดเล็กกว่าหรือขนาดเดียวกับปากโพรง

เท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติในการกรองแยกโมเลกุล

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

### 2.1.5 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในปัจจุบัน (จรัส, 2540)

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

#### 2.1.5.1 สารลดความกระด้างของน้ำ (water softener)

เนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้นเกาะอยู่อย่างหลวมๆ จึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ โดยโลหะแอลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง นอกจากนี้ยังมีการนำซีโอไลต์มาใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอกแทนฟอสเฟต เนื่องจากฟอสเฟตเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

#### 2.1.5.2 ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin)

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

#### 2.1.5.3 ตัวดูดซับ (adsorption)

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

บริสุทธิ์หรือสารที่ต้องการแยก และน้ำในซีโอไลต์จะระเหยออกเมื่อมีการให้ความร้อน นอกจากนี้ ซีโอไลต์ยังใช้ในการดูดซับสารอื่น เช่น แก๊สไฮโดรเจน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย ซึ่งเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับเช่นเดียวกับการดูดซับน้ำ และซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น

#### 2.1.5.4 ตัวเร่งปฏิกิริยา และตัวแยกโมเลกุล (catalysis and molecular sieve)

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

#### 2.1.5.5 ประโยชน์อื่นๆ

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

## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับดินขาว (กรมทรัพยากรธรณี, 2526; นงลักษณ์, 2540)

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

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

ดินขาวจัดเป็นแร่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมเพราะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากมาย เช่น อุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมยางและอุตสาหกรรมยาปราบศัตรูพืช เป็นต้น ปัจจุบันอุตสาหกรรมเซรามิกเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ดินขาวมากที่สุดและได้พัฒนาแหล่งภายในประเทศขึ้นมาใช้กันอย่างแพร่หลายมานานแล้วซึ่งส่งผลให้อุตสาหกรรมภายในประเทศขึ้นมาใช้กันอย่างแพร่หลายมานานแล้ว ซึ่งส่งผลให้อุตสาหกรรมเซรามิกเกิดการพัฒนามากสามารถผลิตผลิตภัณฑ์เซรามิกส่งออกทำรายได้ให้แก่ประเทศปีละหลายพันล้านบาท ส่วนดินขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สี ยางและยาปราบศัตรูพืช ซึ่งมีแนวโน้มการใช้เพิ่มขึ้นตามการขยายตัวของอุตสาหกรรมดังกล่าว

## 2.2.1. การจำแนกดินขาวและแหล่งดินขาวในประเทศ

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

### 2.2.1.1 การจำแนกดินขาวจากแหล่งกำเนิดตามลักษณะทางธรณีวิทยา

จากแหล่งกำเนิดตามลักษณะทางธรณีวิทยาสามารถแบ่งดินขาวออกเป็น 3 ชนิด คือ (นงลักษณ์, 2540)

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

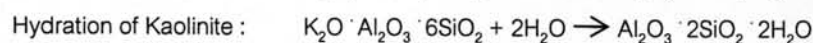
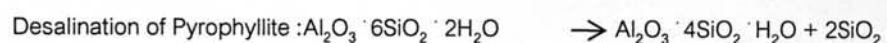


### 2.2.1.2 การจำแนกดินขาวจากความแตกต่างตามสารประกอบทางเคมี

การจำแนกดินขาวที่พบในประเทศไทยจากความแตกต่างตามสารประกอบทางเคมีที่มีองค์ประกอบหลักที่พบในประเทศไทยแบ่งได้ 2 ชนิด ดังนี้ (อายุวัฒน์, 2543)

#### 1. ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต

ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกต (รูปที่ 2.20) เกิดจากการแปรสภาพของหินแกรนิตที่ผุพังโดยบรรยากาศ และสภาพแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาวอยู่ในแหล่งเดิม กระบวนการเกิดดินขาวชนิดนี้ มีขั้นตอนของปฏิกิริยาต่างๆ ดังนี้



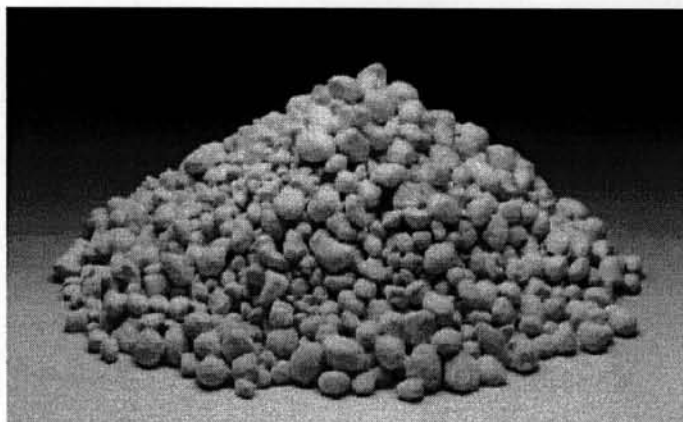
จากกระบวนการข้างต้น ทำให้ดินขาวชนิดนี้ มีสารประกอบที่เจือปนหลายชนิด ได้แก่ อะลูมินา ซิลิกา สารประกอบออกไซด์ของเหล็กออกไซด์ แคลเซียม โซเดียม และโปแทสเซียมที่ยังไม่เปลี่ยนแปลงสภาพโดยสมบูรณ์ เมื่อนำมาล้างจึงปรากฏสิ่งตกค้างบนตะแกรงที่มีเม็ดหยาบบางแห่งจะพบว่าเป็นเม็ดหิน หรือเม็ดทรายอย่างชัดเจน

ดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตแสดงดังรูปที่ 2.22 เมื่อนำมาผสมกับน้ำ จะมีความเหนียวสามารถขึ้นรูปทรงได้ และเมื่อนำมาเผาถึงอุณหภูมิตั้งแต่ 800 องศาเซลเซียสขึ้นไป จะแข็งตัวคงรูปอยู่ได้ ไม่แตกยุ่ยสามารถนำมาผสมกับวัตถุอื่น ๆ เพื่อเป็นเนื้อดินปั้น (Bodies) หรือผสมน้ำเคลือบได้ดี เราสามารถตรวจสอบดินขาวที่มีสารประกอบของอะลูมิเนียมซิลิเกตได้โดยใส่หลอดทดลองแล้วเติมโคบอลต์ไนเตรต (CoNO<sub>3</sub>) ลงไปเล็กน้อยแล้วนำไปเผาด้วยตะเกียงแอลกอฮอล์จะปรากฏสีน้ำเงินขึ้น

#### 2. ดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต

ดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต (รูปที่ 2.21) เป็นดินขาวที่เกิดจากการแปรสภาพของหินปูนที่ผุพังโดยบรรยากาศ และสภาวะแวดล้อมอื่นๆ จนกลายเป็นดินขาว ดินขาวชนิดนี้สามารถนำมาทำแบ่งผัดหน้าที่เรียกว่า "ดินสอพอง (Marl)" ทำปุ๋ย ไล่ดินไม้ เพราะมีธาตุโพแทสเซียม และโซเดียมเจือปน ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงในรูปที่ 2.20 การตรวจสอบดินขาวที่มีสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ทำโดยการหยด

กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นลงไป จะเกิดฟองแก๊สอย่างรุนแรงเนื่องจากกรดเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ



รูปที่ 2.20 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต



รูปที่ 2.21 ลักษณะของดินขาวที่มีสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต

### 2.2.1.3 แหล่งดินขาวในประเทศ

แหล่งดินขาวที่มีสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต แหล่งใหญ่ที่พบในประเทศไทย ได้แก่

#### 1. แหล่งดินขาวอำเภอแจ้ห่ม จังหวัดลำปาง

ดินขาวแหล่งนี้พบที่เขาปางค่า หรือเรียกชื่อตามพื้นบ้านว่า “ม่อนดินขาว” หรือ “ม่อนตึหิน” ที่เรียกเช่นนี้ เนื่องจากเป็นแหล่งที่มีดินขาวเกิดปะปนอยู่กับหินที่ผุพัง และมีหินดินดานค่อนข้างแข็ง ชาวบ้านแถบนั้นนำหินดินดานมาใช้ทำหินลับมีด ดินขาวแหล่งนี้ เกิดจากการผุพังการสลายตัวของหินฟันม้า ที่แปรสภาพมาจากหิน Liperite จึงทำให้มีปริมาณของหินแข็งปะปนอยู่มาก และมีการสะสมตัวอยู่บนไหล่เขาตอบนบน ความหนาไม่เกิน 5 เมตร และมีผิวดินปกปิดตอบนบนหนาประมาณ 0.5 เมตร

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

#### 2. แหล่งดินขาว ตำบลหาดส้มแป้น จังหวัดระนอง

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

#### 3. แหล่งดินขาว อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์

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

### 2.2.2. สมบัติทางกายและทางเคมีของดินขาว

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

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

3. การหดตัวหลังจากการเผา (Fired shrinkage) เกี่ยวข้องกับขนาดรูปทรงของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วดินขาวจะหดตัวหลังการเผาเฉลี่ยประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

### 2.2.3 ประโยชน์ของดินขาว (นงลักษณ์, 2540)

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

ในอุตสาหกรรมกระดาษ มักมีการเติมดินขาวในระหว่างการผลิตเพื่อเข้าไปแทรกในช่องว่างระหว่างเยื่อกระดาษ ทำให้กระดาษมีสมบัติทางกายภาพที่ดีขึ้น มีความขาว ความเรียบ และทึบแสง นอกจากนั้นดินขาวยังช่วยดูดซึมหมึก และยังช่วยเพิ่มน้ำหนักของกระดาษอีกด้วย ดินขาวที่ใช้เป็นตัวเติม (filler) ในกระดาษจัดเป็นดินขาวที่มีคุณภาพสูง คือเป็นดินขาวที่มีการขัดสีหรือมีความคมต่ำ มีความละเอียดของอนุภาคและความขาวสว่างสูง ซึ่งดินขาวที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษนี้จะช่วยเพิ่มราคาให้กับดินขาวมากกว่าอุตสาหกรรมเซรามิก 2 ถึง 3 เท่าตัว นอกจากนี้ในกระดาษที่ต้องการความขาว และมันมากๆ เช่นกระดาษปอนด์หรือกระดาษอาร์ต จะต้องใช้ดินขาวเคลือบบนกระดาษอีกชั้นหนึ่ง โดยจะต้องเป็นดินขาวที่มีความละเอียดและความขาวที่สูงกว่าดินขาวชนิดที่เป็นตัวเติมในเนื้อกระดาษ

ในอุตสาหกรรมสี ในเนื้อสีทาบ้านจะมีการเติมดินขาวเข้าไปแทนไทเทเนียมไดออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) ซึ่งมีราคาแพง นอกจากนั้นการเติมดินขาวยังเป็นการเพิ่มน้ำหนักของสี ทำให้สีมีราคาถูกลง และยังช่วยให้เนื้อสีและน้ำสีผสมเข้ากันเป็นอย่างดี และตกตะกอนช้า ในการนำดินขาวมาใช้ในอุตสาหกรรมสีต้องมีการพิจารณาสมบัติของดินขาวทางด้าน ความละเอียดและความหยาบของอนุภาค ความขาวสว่าง และการดูดซึมน้ำมัน

ในอุตสาหกรรมยาง การเติมดินขาวลงไปจะช่วยเพิ่มความแข็งแรง ลดความเปราะให้กับยาง ทำให้มีความคงทนต่อการขัดสี โดยดินขาวที่ใช้จะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 2 ไมโครเมตร และต้องมีธาตุแมงกานีสต่ำ

ในอุตสาหกรรมพลาสติก สามารถนำดินขาวไปใช้เป็นตัวเติมในเนื้อพลาสติกหุ้มสายเคเบิล เนื่องจากมีราคาถูกแล้ว ยังช่วยให้ผลิตภัณฑ์ได้มีความราบเรียบ ลดรอยร้าว และลดการหดตัวระหว่างการอบ ช่วยบดบังริ้วรอยในเนื้อพลาสติก นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มสมบัติในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด และยังช่วยในการเก็บรักษาความร้อนไว้ภายในเรือนกระจกให้กับพืชผลทางการเกษตรอีกด้วย

ประโยชน์ในทางเภสัชกรรม และเครื่องสำอางในทางเภสัชกรรม ได้มีการนำดินขาวมาใช้ผสมเป็นยารักษาโรคกระเพาะและลำไส้ เนื่องจากดินขาวสามารถดูดซับเชื้อโรคและสิ่งมีพิษเหล่านี้ได้ สำหรับยาใช้ภายนอก ดินขาวถูกใช้ในยาระงับการระคายเคืองจากไฟไหม้น้ำร้อนลวก ในส่วนของเครื่องสำอางนั้นได้มีการผสมดินขาวเข้าไปเพื่อทำให้เกิดความละเอียด นุ่มเนียน และสามารถกลมกลืนกับสารเคมีอื่นในเครื่องสำอางได้เป็นอย่างดี

ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมปุ๋ยและยาฆ่าแมลง โดยอาศัยหลักของความสามารถในการดูดซึมของดินขาว ช่วยในการยึดจับและใช้เป็นที่อยู่ของสารที่เป็นองค์ประกอบของปุ๋ยและยาฆ่าแมลงชนิดนั้นๆ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มน้ำหนักให้กับปุ๋ยและยาฆ่าแมลงให้ยึดกับพื้นที่ที่มีการใช้งาน นอกจากนี้ดินขาวยังใช้เป็นส่วนผสมในยาทารองเท้าสีขาว ผสมในซีเมนต์เพื่อป้องกันไม่ให้ห้องเสีย และยังใช้ในการทำซอล์ก เป็นต้น

## 2.3 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการดูดซับ (Eckenfelder, 1981 และ McCabe, 1993)

การดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของสารสองสถานะ ไม่ว่าจะเป็นสถานะของแข็งหรือของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่พื้นผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) ซึ่งการเกาะติดบนพื้นผิวดังกล่าวสามารถจำแนกออกเป็นการเกาะติดด้วยแรงทางกายภาพหรือด้วยพันธะเคมีซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวถูกดูดซับและสมบัติของพื้นผิวดูดซับ

### 2.3.1 กลไกการดูดซับ (Adsorption mechanism) (Eckenfelder, 1981)

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

#### 2.3.1.1 การดูดซับทางกายภาพ (physical/Van der Waals adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวหน้าของโมเลกุลของแข็งกับโมเลกุลของสารถูกดูดซับ ซึ่งเรียกว่า แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งได้แก่ แรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) และแรงกระจาย (dispersion force) ทั้งนี้แรงกระจายจะมีอยู่ทั่วไปในวัตถุทุกชนิดและเป็นแรงดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน การดูดซับจะเกิดขึ้นแบบหลายชั้น (multilayer) โดยแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลก่อนหน้า ซึ่งจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

#### 2.3.1.2 การดูดซับทางเคมี (chemical adsorptions/activated adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากตัวดูดซับกับสารถูกดูดซับยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงหรือพันธะทางเคมี ซึ่งเป็นผลจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนและการเปลี่ยนรูปของพันธะเคมีระหว่างสารถูกดูดซับกับผิวหน้าของของแข็ง เนื่องจากการดูดซับทางเคมีเกี่ยวข้องกับพันธะทางเคมีจึงมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงและมีความสัมพันธ์กับพลังงานกระตุ้น (activation energy) ดังนั้นจึงทำให้โมเลกุลที่ถูกดูดซับติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้

บนพื้นผิวดังกล่าว จึงอาจกล่าวได้ว่าการดูดซับทางเคมีเป็นปฏิกิริยาแบบไม่ย้อนกลับ และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)

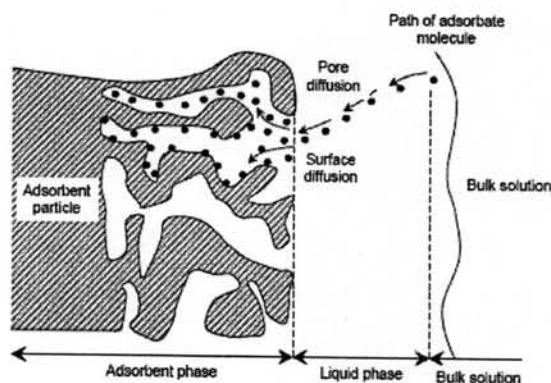
### 2.3.2 จลนศาสตร์ของการดูดซับ (Adsorption kinetic) (Eckenfelder, 1981)

อัตราเร็วในการดูดซับเกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (rate of molecule transfer) ซึ่งมีความสำคัญต่อการดูดซับ การดูดซับโมเลกุลจากสารละลายโดยตัวดูดซับที่มีรูพรุนสามารถอธิบายได้ดังนี้

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

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

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



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนของการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับที่มีรูพรุน (Montgomery, 1985)

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ (Eckenfelder, 1981)

#### 2.3.3.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ

- พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นผลของความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนพื้นผิว จึงเห็นได้ชัดว่าพื้นที่ผิวมีผลต่อความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ โดยการดูดซับสารละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับเพิ่มขึ้น

- ขนาดของอนุภาค

พื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่ไม่มีรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคลดลง อย่างไรก็ตาม สำหรับตัวดูดซับที่มีรูพรุนสูงพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในโครงสร้างของรูพรุนดังกล่าว ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค

- สภาพทางเคมีของพื้นผิว

เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของตัวดูดซับมีผลต่อความสามารถในการดูดซับโดยการเปลี่ยนแปลงของข้อประจุนผิวหน้าระหว่างการดูดซับทางเคมี ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับสารละลายหลายชนิด

#### 2.3.3.2 ธรรมชาติของตัวถูกละลาย

ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นหากสมบัติของสารถูกละลายได้แก่ ความยาวของสายโซ่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้โมเลกุลมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้นและความสามารถในการละลายได้ลดลง นอกจากนี้มวลโมเลกุลที่มีค่าสูงจะทำให้ขนาดของสารถูกละลายใหญ่ขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

#### 2.3.3.3 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วของการดูดซับจะขึ้นอยู่กับการแพร่ผ่านในชั้นฟิล์มหรือการแพร่ในรูพรุนซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มที่อยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับจะมีความหนามากทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลสารถูกละลายที่เข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงข้ามถ้าระบบมีความปั่นป่วนสูงทำให้ไม่เกิดการสะสมในชั้นฟิล์ม สารถูกละลายจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปหาตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง ทำให้กรณีนี้การเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ



#### 2.3.3.4 ผลของอุณหภูมิ

เนื่องจากกระบวนการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีเป็นปฏิกิริยาการคายความร้อน ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลง ในทางตรงกันข้ามหากอุณหภูมิลดลง ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ก็มี การดูดซับทางเคมีบางชนิดที่สามารถเกิดขึ้นได้ที่ อุณหภูมิสูง ส่วนใหญ่เป็นการดูดซับสารจำพวกโลหะ เป็นต้น

#### 2.3.4 ประเภทของสารดูดซับ

2.3.4.1 ประเภทสารอนินทรีย์ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ ถ่านกระดูก ฯลฯ สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ จับโมเลกุลคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับชนิดนี้จากสารดูดซับดินเหนียวประเภทสารอนินทรีย์มีข้อจำกัด

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

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

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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

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

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

จากการหลอมเหลวรวมกันของสารตั้งต้นกับโลหะแอลคาไลน์เพื่อสลายพันธะควอร์ตซ์ซึ่งเป็นแหล่งซิลิกาในสารตั้งต้น จากการศึกษพบว่าที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณ Na-X ในผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการรีฟลักซ์จะใช้เวลา 2.5 ชั่วโมง และที่ 90 เปอร์เซ็นต์ของ Na-X ที่สังเคราะห์ได้โดยวิธีการไฮโดรเทอร์มัลจะใช้เวลา 12 ชั่วโมง และที่ 96 ชั่วโมงของการสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลผลิตภัณฑ์ที่ได้คือไฮดรอกซิลโซดาไลต์ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทั้งสองวิธีคือซีโอไลต์ Na-X โดยที่ปริมาณผลึกของซีโอไลต์ Na-X ในผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้นกับเวลา แต่ในส่วนของซีโอไลต์ Na-A ปริมาณผลึกในผลิตภัณฑ์จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา

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

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

Thammavong S. ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาว มีตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อุณหภูมิในการเผาในช่วง 700-900 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากับ 5, 7.5 และ 10 ตามลำดับ อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากับ 2.5, 5, 7.5, 10, และ 15 ตามลำดับ มีการเติมโซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) อุณหภูมิในการเกิดผลึกของซีโอไลต์ในช่วง 80-100 องศาเซลเซียส และเวลาในการเกิดผลึก (ageing period) เป็น 1, 3 และ 5 วัน พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ คือที่ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากับ 7.5 ความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตรเท่ากับ 10 ที่เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งจะเกิดผลึกของซีโอไลต์ X ที่สมบูรณ์

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

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