

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

ถ่านหินลิกไนต์อยู่ในตระกูลถ่านหิน (coal) ซึ่งมีต้นกำเนิดมาจากซากพืชทับถมกันเพื่อหลายสิบล้านปีมาแล้ว ต่อมาเมื่อตะกอนดินทรายทับถมและมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวโลก รวมทั้งได้รับความร้อนจากภายในโลกเป็นเวลานาน ทำให้ซากพืชที่ทับถมกันนี้แปรสภาพไปเป็นถ่านพีต (peat) ซึ่งเป็นลำดับเริ่มต้นของการเกิดถ่านหิน เมื่อเวลาผ่านไปอีกหลายสิบล้านปีถ่านพีตก็แปรสภาพไปเป็นถ่านหิน การทับถมจนเกิดเป็นถ่านหินจะอยู่ที่ความลึก 7,000 เมตร อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และความดันประมาณ $1,500 \text{ kg/cm}^2$ ระดับของถ่านหินที่เกิดจะขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิของแหล่งกำเนิด

2.1 ประเภทของถ่านหิน (วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538)

1. แอนทราไซต์ (anthracite) เป็นถ่านหินที่มีลักษณะดำเป็นเงามัน มีความวาวสูง มีปริมาณคาร์บอน 86% ขึ้นไป มีปริมาณความชื้นต่ำ และมีค่าความร้อนสูง แต่จุดติดไฟยาก

2. บิทูมินัส (bituminous coals) เป็นถ่านหินเนื้อแน่น มีลักษณะแข็งและมักจะประกบกันด้วยชั้นถ่านหินสีดำสนิทที่มีลักษณะเป็นมันวาว มีปริมาณคาร์บอน 69-86% และมีความชื้น 1.5-7% ใช้เป็นถ่านหินเพื่อการถลุงโลหะได้

3. ซับบิทูมินัส (sub-bituminous) มีลักษณะ สีดำคล้ายขี้ผึ้ง มีปริมาณความชื้นประมาณ 10% เป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพสูงในการผลิตกระแสไฟฟ้า

4. ลิกไนต์ (lignite) เป็นถ่านหินที่มีเกรดต่ำสุด มีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูงและมีปริมาณความชื้นสูงถึง 30-70% เป็นถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง

สำหรับถ่านหินในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่เป็นถ่านหินประเภทลิกไนต์ โดยถ่านหินที่พบอยู่ในยุคเทอร์เชียรี (Tertiary period) ซึ่งมีช่วงอายุระหว่าง 1.8 ถึง 65 ล้านปีมาแล้ว และจัดเป็นถ่านหินประเภทคุณภาพต่ำที่สุดในบรรดาถ่านหินด้วยกัน สำหรับส่วนประกอบทางเคมีของถ่านหินลิกไนต์จะแตกต่างกันตามแหล่งต่างๆ แม้กระทั่งในแหล่งเดียวกันก็มีส่วนประกอบไม่เหมือนกัน โดยมีทฤษฎีการกำเนิดตามลำดับชั้นตอดังนี้ (ฝ่ายประชาชนitech, 2528)

ลำดับแรก บริเวณที่มีการสะสมตัวของถ่านหินจะมีระดับต่ำกว่าบริเวณรอบข้าง อาจจะเกิดขึ้นโดยการยุบตัวลงหรือบริเวณรอบๆยกตัวสูงขึ้น ทั้งนี้ เนื่องจากผิวโลกส่วนต่างๆ พยายาม

ปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุล บริเวณนี้ในเวลาต่อมาจะเกิดเป็นหนอง บึง แอ่งน้ำ หรือที่ขึ้นและริมแม่น้ำริมทะเล

ลำดับที่สอง บริเวณนี้มีสภาพแวดล้อมที่อำนวยให้พืชและสัตว์เกิดขึ้น และอาศัยอยู่หนาแน่น มีทั้งเกิดขึ้นล้มตายลงแล้วเกิดขึ้นใหม่ตายอีกหนติดต่อกันหรือเป็นช่วงๆ ซากต่างๆ สะสมทับถมกันเป็นจำนวนมาก มีเป็นชั้นหนาบางตามปริมาณพืชและสิ่งมีชีวิต

ลำดับที่สาม ต่อมา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก ทำให้มีตะกอนดินมาทับถมซากพืชและสิ่งมีชีวิต รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงสภาพสิ่งแวดล้อม เช่น ภาวะแห้งแล้ง น้ำท่วม การสึกกร่อนพังทลาย การเคลื่อนไหวของผิวโลก การแตกแยกของแผ่นดิน ฯลฯ ทำให้ซากต่างๆ ที่สะสมอยู่ได้รับแรงกดดัน และได้รับความร้อนจากภายในโลกส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ต่างๆ ในบริเวณดังกล่าว ทำให้ซากเหล่านี้แปรสภาพไป

ลำดับที่สี่ อิทธิพลจากทั้งแรงกดดันและความร้อนภายในโลกเป็นเวลานาน ทำให้ซากพืชและสิ่งมีชีวิตถูกอัดตัวกลายเป็นถ่านหิน ซึ่งมีคุณลักษณะแตกต่างกันในแต่ละแห่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืชพันธุ์ไม้ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเนื้อไม้ รวมทั้งการทับถมในระยะแรกเริ่มไปจนถึงการแปรเปลี่ยนจากอิทธิพลในอดีต จนกระทั่งมาเป็นเนื้อถ่านหินในระยะต่อมา

ลำดับที่ห้า ต่อมาเมื่อการสึกกร่อนพังทลายตอนบนของชั้นดิน-หิน ตอนบนของชั้นถ่านหิน ทำให้มองเห็นชั้นถ่านได้ชัดขึ้น กระบวนการทั้งหมดดังกล่าว หากเกิดขึ้นหลายครั้งหลายหนก็จะทำให้ได้ถ่านหินหลายชั้นขึ้น และหากมีการสะสมตัวของชั้นถ่านหินยิ่งนานมากจะได้ถ่านหินที่มีคุณภาพสูงขึ้นมากเท่านั้น

ถ่านหินลิกไนต์ที่ขุดได้จากเหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของกำมะถัน เถ้าและความชื้นค่อนข้างสูง และมีอายุระหว่าง 2.5 ถึง 35 ล้านปีมาแล้ว ถ่านหินลิกไนต์มีสีดำหรือสีน้ำตาล มักจะแสดงลักษณะของเนื้อไม้ให้เห็น มีความชื้นสูง เปราะแตกร่วนได้ง่ายและลุกไหม้ได้ง่ายมากเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ นอกจากนี้เมื่อเกิดการเผาไหม้จะมีกลิ่นเหม็น มีคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำมากเนื่องจากมีออกซิเจนและความชื้นสูง ถ่านหินลิกไนต์ที่ขุดได้จากเหมืองแม่เมาะ ส่วนใหญ่จะมีส่วนผสมของกำมะถัน เถ้าถ่าน และความชื้นค่อนข้างสูง

2.2 สารที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหิน (วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538; อนิรุทธ์ ธงไชย, 2538)

ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงแข็งที่ให้พลังงานจากการเผาไหม้ ซึ่งจากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบประมาณของถ่านหินจากส่วนต่างๆ ของโลกพบว่าเมื่อห้องค์ประกอบต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบแบบประมาณของถ่านหินจากที่ต่างๆ ในโลก (วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538)

ส่วนประกอบ (%)	อเมริกา	แอฟริกาใต้	โปแลนด์	แคนาดา	โคลัมเบีย	ออสเตรเลีย
คาร์บอน (Carbon)	40-49	50-56	47-53	45-67	46-48	51-52
สารที่ระเหยได้ (Volatile Substances)	20-33	23-26	30-34	18-32	30-35	24-34
เถ้า (Ash)	7-21	13-16	8-16	7-12	8-12	9-17
ความชื้น (Humidity)	7-10	6-8	7-10	7-10	7-10	7-8
ซัลเฟอร์ (Sulfur)	0.8-1	0.4-0.8	0.6-0.95	0.2-0.3	0.8-0.9	0.4-0.8

จากตารางที่ 2.1 เห็นได้ว่ามีปริมาณเถ้าตั้งแต่ 3-30 % ของถ่านหินที่ใช้ (ขึ้นอยู่กับชนิดของถ่านหิน) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสารบางชนิดจะเกิดการระเหย และมีการเปลี่ยนแปลง ระหว่างการเผาไหม้ เช่น ดินเหนียวและหินดินดาน เกิดสูญเสียน้ำไปจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) เกิดการสูญเสียคาร์บอนเนตจากการสลายตัวซึ่งทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ส่วนของไพไรต์ (pyrites) จะเปลี่ยนไปเป็นเหล็กออกไซด์ (ferric oxide) และจะให้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ออกมาซึ่งจะถูกปล่อยไปในบรรยากาศ นอกจากนี้ แคลเซียมออกไซด์อิสระมักเกิดการจับตัวใหม่เป็นคาร์บอนเนต (CO₃) ในรูปของสารแคลเซียมคาร์บอนเนต (CaCO₃) ในถ่านหิน ส่วนในเถ้าจะมีซัลเฟอร์ในรูปแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) เถ้าเหล่านี้จะประกอบไปด้วยซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) เหล็ก (Fe) และหินปูนเป็นหลัก นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ แมกนีเซียม (Mg) ไททาเนียม (Ti) โพแทสเซียม (K) ฟอสฟอรัส (P) ซัลเฟอร์ (S) และสารประกอบอัลคาไลด์ซิลิกาออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ไทเทเนียมออกไซด์ (Ti₂O₃) ที่เกิดมาจากทราย ดินเหนียว หินดินดาน และหินชนวน และเหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ที่เกิดจากจากไพไรต์ นอกจากนี้ยังมีหินปูนและแมกนีเซียมที่เกิดจากสารพวกคาร์บอนเนต และซัลเฟต เป็นต้น

2.2.1 การแบ่งประเภทของเถ้า

ขณะทำการเผาไหม้ถ่านหิน ทำให้เกิดเถ้า 3 ประเภท คือ

1. เถ้าหนัก เป็นส่วนที่อนุภาคของเถ้าหลอมมารวมกันจนหนักพอที่จะตกออกนอกเตาไอน้ำ ซึ่งขนาดอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าลอย และมีผิวหยาบกว่า มีสีอยู่ในช่วงเทาถึงดำ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมที่มีหลายมุม เนื่องจากความพรุนของผิวอนุภาค เถ้าหนักเหล่านี้สามารถจับตัวกันก่อนให้เกิดสแลก (slag) ซึ่งสแลกเหล่านี้จะมีสีดำ มีรูปร่างหลายมุม และมีสมบัติของซิลิกาด้วย

สำหรับขนาดของเก้านั้นอยู่ระหว่าง 0.03-30 มิลลิเมตร แต่โดยส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดต่ำกว่า 2 มิลลิเมตร

2. ไอ เป็นส่วนของถ่านหินที่ระเหยออกมาระหว่างเผาไหม้ บางส่วนของไอจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ และบางส่วนจะควบแน่นแล้วไปเกาะบนผิวของเก้าลอยซึ่งถูกดักจับที่เครื่องดักจับของเก้าลอย ปริมาณของไอที่เกิดขึ้นนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ ความเข้มข้น และสมบัติของสารต่างๆ ในถ่านหินนั้น

3. เก้าลอย เป็นอนุภาคของแข็งซึ่งมีขนาดเล็กมากและเบา ลอยอยู่ในก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ และลอยออกมาจากหม้อต้มไอน้ำพร้อมกับก๊าซอื่นๆ เก้าลอยส่วนใหญ่จะถูกเก็บโดยเครื่องดักจับเชิงกล (mechanical collectors) และเครื่องดักจับเชิงไฟฟ้า (electrical precipitators) ซึ่งเก้าขนาดเล็กนั้นจะถูกดักจับได้ถึงประมาณ 99% ส่วนที่เล็ดลอดออกมานั้นถูกปล่อยสู่บรรยากาศ เก้าลอยมีปริมาณ 10-85 % ของปริมาณเก้าทั้งหมดที่เกิดขึ้น และมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม โดยมากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-100 μm มีสีน้ำตาลอ่อนจนถึงสีดำซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณระดับคาร์บอนในถ่านหิน

จากการวิเคราะห์ทางธรณีวิทยาพบว่า เก้าลอยมีส่วนประกอบของซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณ 50-90 % โดยน้ำหนัก อนุภาคของเก้าลอยที่มีผิวเรียบจะมีส่วนประกอบของซิลิกอนสูงกว่าเก้าลอยที่มีลักษณะผิวหยาบกว่า ส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ อลูมินา แมกเนไซต์ เฮมาไตต์ คาร์บอน และ ควอตซ์

ข้อเด่นของเก้าลอย คือ ความเป็นอนุภาคเบาเรียกว่า Cenospheres ซึ่งมีปริมาณกว่า 20 % ของเก้าลอย อนุภาคเหล่านี้มีลักษณะเป็นทรงกลม มีส่วนประกอบของซิลิกेट ไนโตรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-200 μm เก้าเหล่านี้มีลักษณะลอยตัวทำให้เกิดปัญหาในการกำจัด ซึ่ง Cenospheres นี้สามารถใช้เป็นสารเติมในปูนซีเมนต์ ช่วยทำให้ความแข็งแรงและการรับกำลังอัด ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์อย่างหนึ่งของเก้าลอย

2.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ดักเก็บเก้า

1. เครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Precipitator) วิธีการควบคุมนี้ใช้ในโรงผลิตกระแสไฟฟ้าจากถ่านหินเป็นส่วนใหญ่ ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ก๊าซที่ได้จากการเผาไหม้จะถูกป้อนเข้าเครื่องมือดังกล่าว อนุภาคของเก้าลอยเมื่อได้รับประจุไฟฟ้าลบ จะถูกดึงดูดให้เกาะบนแผงเก็บตะกอนขั้วบวก ในทางปฏิบัติเครื่องนี้ต้องทำความสะอาดอย่างต่อเนื่องโดยการเคาะเพื่อไล่อนุภาคที่ดักเก็บได้

สำหรับการเก็บเก้าลอยเครื่องมือดักเก็บควรมีประสิทธิภาพมากกว่า 99 % เพื่อให้สามารถเก็บเก้าลอยได้ โดยไม่เล็ดลอดออกไปบริเวณอื่น อันจะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา การออกแบบและการทำงานของ Electrostatic Precipitator จะต้องเหมาะสมกับเก้าลอย

ที่ถูกดักจับ เช่น มีความต้านทานไฟฟ้า แต่คุณสมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อถ่านหินที่ใช้เปลี่ยนไป หรือเมื่อการทำงานของหม้อต้มไอน้ำมีการเปลี่ยนแปลง

2. ถุงกรอง (Baghouse) ถุงกรองทำจากผ้าที่สามารถดักจับอนุภาคซีเมนต์ได้ ซึ่งถุงนี้ มักจะใช้หลายถุงพร้อมๆ กัน ถุงนี้จะมีประสิทธิภาพดีพอๆ กับเครื่องตกตะกอนเชิงไฟฟ้าสถิต และถูกนำไปใช้ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าบางแห่ง

3. ไซโคลน (Cyclone Collector) เครื่องไซโคลนจะทำงานโดยการหมุนวนอย่างปั่นป่วนของก๊าซจนทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งทำให้เกิดการแยกของอนุภาคซีเมนต์ที่หนักออกจากก๊าซ เครื่องไซโคลนควรมีประสิทธิภาพ 70-85 % เมื่อใช้กับหม้อต้มไอน้ำที่ใช้ถ่านหินบดเป็นเชื้อเพลิง

2.3 ถังลอย (กองศูนย์ข้อมูลเชื้อเพลิงแข็ง, 2537; ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526; วารสารการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2538)

2.3.1 ชนิดของถังลอยเมื่อแยกส่วนประกอบตามธรรมชาติ

ถังลอยแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามส่วนประกอบทางธรรมชาติ คือ ถังลอยบิพูนัล และ ถังลอยลิกไนต์ ความแตกต่างระหว่างถังทั้งสองชนิดนี้ คือ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค โดยถังลอยลิกไนต์จะหยาบกว่า (มีช่วงกว้างกว่า) ค่าธรรมชาติหนักของถังลอยลิกไนต์มีค่าสูงกว่า และพบว่า ถังลอยลิกไนต์มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมกับแมกนีเซียมออกไซด์มากกว่าเฟอริกออกไซด์ ซึ่งจะตรงกันข้ามกับสมบัติของถังลอยบิพูนัล สำหรับอายุนั้นถังลอยบิพูนัลจะอยู่ในช่วงอายุไตรแอสสิกซึ่งเก่ากว่าถังลอยลิกไนต์ซึ่งอยู่ในช่วงยุคจูราสสิก

2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของถังลอย

องค์ประกอบทางเคมีของถังลอยขึ้นกับปัจจัยทางด้านธรณีวิทยาและด้านภูมิศาสตร์ที่สัมพันธ์กับการเกิดถ่านหินเป็นหลัก และอาจขึ้นอยู่กับสภาวะการเผาไหม้ ประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมมลภาวะทางอากาศ สารอนินทรีย์ที่ประกอบอยู่ในถังลอยจะเป็นไปตามชนิดของหิน และดิน คือ มีออกไซด์ของซิลิกอน อะลูมิเนียม เหล็ก และแคลเซียม คิดเป็น 95-99 % ของส่วนประกอบทั้งหมด และมีส่วนประกอบย่อยอื่นๆ ได้แก่ แมกนีเซียม ไทเทเนียม โซเดียม โพแทสเซียมซัลเฟอร์ และฟอสฟอรัส คิดเป็น 0.5-3.5 % ของส่วนประกอบทั้งหมด นอกจากนี้ถังลอยยังมีส่วนประกอบของธาตุต่างๆ ที่มีปริมาณน้อยๆ (trace element) ประมาณ 20-50 ธาตุ

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของถังลอยในประเทศต่าง ๆ นั้นมีความแตกต่างกันออกไป เป็นผลมาจากความแตกต่างของถ่านหินที่ใช้ และประสิทธิภาพของเตาเผาแต่ละแห่ง ดังได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นส่วนประกอบย่อยของเถ้าลอย (กองศูนย์ข้อมูล
เชื้อเพลิงแข็ง, 2537)

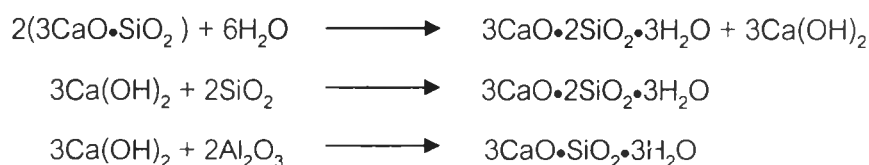
ธาตุ	ปริมาณที่มีอยู่ (ppm)
Sb	0.5-8.4
As	6-56
Be	8-24
Cd	0.3-7.6
Hg	0.04-0.75
Pb	17-408
Cu	49-270
Se	1.4-13
Te	0.01-1
Tl	0.01-0.05
Cr (VI)	0.01-5
Cr (Total)	10-188
Ba	1000-1400
Ga	5-38
Mn	50-250
Mo	5-23
Ni	60-150
Sn	0.1-10
Sr	430-460
V	260-320
Zn	60-80
Zr	150-160

ตารางที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นส่วนประกอบหลักของเถ้าลอย (กองทุนข้อมูล เชื้อเพลิงแข็ง, 2537)

สารที่เป็นองค์ประกอบ (%)	ถ่านหินจาก Poland	ถ่านหินจาก South Africa	ปริมาณขององค์ประกอบโดยทั่วไป
SiO ₂	47.50	41.44	40-57
Al ₂ O ₃	23.91	37.88	20-29
Fe ₂ O ₃	9.70	5.99	3-15
CaO	7.36	10.00	1-10
MgO	4.30	2.36	0.8-5
Na ₂ O	1.01	0.22	0.2-1
K ₂ O	2.53	0.41	0.5-3
TiO ₂	-	-	0.7-2
P ₂ O ₅	-	-	0.2-1.5
SO ₃	1.67	0.93	0.3-0.8
C (ที่ไม่เผาไหม้)	-	-	2-5

จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของของเถ้าลอยนั้นคล้ายคลึงกับของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก เพราะทั้งเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ต่างก็เป็นสารที่เกิดจากการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง

เนื่องด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเถ้าลอยจะเป็น ซิลิกา และอะลูมินา เถ้าลอยจึงสามารถรวมตัวกับปูนขาว (lime) ได้เมื่อมีน้ำอยู่ และทำให้เกิดสารเชื่อมประสาน (cementitious material) จึงถือได้ว่าเถ้าลอยเป็นวัสดุปซ์โซลัน (pozzolan) ชนิดหนึ่ง ปฏิกริยาทางเคมีที่ทำให้เกิดสารเชื่อมประสานที่แสดงโดย Mindess และ Young ดังนี้คือ



2.3.3 คุณสมบัติเชิงกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยมีลักษณะพิเศษเฉพาะ คือ มีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำ มีการกระจายขนาดของอนุภาคค่อนข้างสม่ำเสมอ และมีความชื้นเหนียว (plasticity) ค่อนข้างต่ำ

ความถ่วงจำเพาะ (specific gravity) ของถ้ำลอยจะแปรเปลี่ยนไปตามองค์ประกอบทางเคมี โดยเฉลี่ยถ้ำลอยจากถ่านหินในประเทศญี่ปุ่นมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.14 ในประเทศสหรัฐอเมริกาประมาณ 2.40 และในประเทศอังกฤษประมาณ 2.10 อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่า ค่าความถ่วงจำเพาะของถ้ำลอยนั้น ต่ำกว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดินโดยทั่วไปที่ปรกติอยู่ในช่วง 2.60-2.80 จากการสังเกตโดยใช้กล้องขยายพบว่า เม็ดถ้ำลอยมีลักษณะเป็นทรงกลม ด้านในกลวง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ถ้ำลอยมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าเม็ดดินโดยทั่วไป

เนื่องด้วยถ้ำลอยเกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินที่ถูกบด ขนาดของเม็ดถ้ำลอยจึงขึ้นอยู่กับความละเอียดของผงถ่าน และอุณหภูมิขณะทำการเผาไหม้ โดยทั่วไปพบว่าเม็ดถ้ำลอยมีขนาดอยู่ในช่วงซิลท์ขนาดกลางถึงหยาบ

ในสภาพปกติถ้ำลอยมักเป็นฝุ่นฟุ้งกระจายได้ง่ายเมื่อแห้ง และจะเป็นเลนเมื่ออิมตัวด้วยน้ำ แต่ถ้ำลอยผสมกับน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม และได้รับการบดอัดเพียงพอแล้วถ้ำลอยจะเกาะตัวเป็นก้อนแข็ง และมีกำลังอัด (unconfined compressive strength) สูง

การจัดรูปของถ้ำถ่านหินระหว่างส่วนของถ้ำลอยกับถ้ำหนักขึ้นอยู่กับ ชนิดของเตาเผา ชนิดของถ่านหิน อุณหภูมิของการหลอมถ้ำ และชนิดของก้นหม้อต้มว่าเป็นแบบขึ้นหรือแห้งเตาเผาเป็นปัจจัยแรกที่สำคัญในการเกิดการแยกส่วนของถ้ำลอย และถ้ำหนัก เตาเผาชนิด stoker จะมีการปล่อยถ้ำลอยออกมาน้อยที่สุด

สรุปคุณสมบัติเชิงวิศวกรรมของถ้ำลอยโดยทั่วไป (วิจิตอัจฉรา, 2526)

Specific gravity	1.90-2.69
Specific surface area (cm ² /g)	1220-8100
Optimum water content (% , standard compaction test)	18-45
Maximum dry unit weight (kN/m ³)	9-16

ในหน่วยไซโคลน อุณหภูมิของเครื่องจะสูงกว่าจุดหลอมเหลวของถ้ำ ถ้ำประมาณ 80-85% จะหลอม และรวมตัวเกิดเป็นสแลก (slag) ส่วนหนึ่งของถ้ำลอยปริมาณไม่มากที่เกิดจากหน่วยไซโคลนจะมีลักษณะอนุภาคละเอียด (90% ของถ้ำลอยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร) ในหน่วย pulverized coal จะมีถ้ำลอยเกิดขึ้น 65 - 80% และเกิดถ้ำหนัก 20-35% สำหรับอุณหภูมิการหลอมของถ้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง ถ้ำที่มีอุณหภูมิการหลอมต่ำมีแนวโน้มที่จะหลอมในหม้อต้มไอน้ำ และสะสมตัวออกมาในรูปถ้ำหนัก นั่นคือที่ก้นหม้อต้มจะเปียกก่อให้เกิดถ้ำหนักมากกว่าหม้อต้มไอน้ำที่ก้นแห้ง

2.3.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมบางประการที่เกิดจากเถ้าลอย

1. ผลกระทบต่อสุขภาพ สำหรับในเมืองถ่านหินนั้น จะมีซิลิกาอิสระซึ่งเรียกว่า α -quartz จากส่วนประกอบนี้อาจจะเป็นอันตรายต่อระบบการหายใจได้ หากมีการเข้าไปสะสมภายในร่างกายมากๆ อาจจะเป็นสาเหตุให้เกิดโรคปอดอักเสบ (ฝ่ายประชาชนเทศ, 2528)

2. สิ่งเจือปนในดินที่เกิดจากเถ้าลอย จะเกิดจากการนำเถ้าลอยไปปล่อยทิ้ง ซึ่งย่อมมีผลต่อคุณภาพและองค์ประกอบของดิน เนื่องจากเถ้าลอยมีสารที่ประกอบกันอยู่มากมายหลายชนิด โดยผลกระทบส่วนใหญ่ทำให้ค่า pH ในดินเปลี่ยนไป ซึ่งจะเป็นกรดหรือเบสขึ้นอยู่กับชนิดของเถ้าลอย ซึ่งถ้าเป็น alkaline ash นั้นก็จะทำให้ดินมีองค์ประกอบของ CaO และ MgO มาก ทำให้ดินมีสมบัติกลายเป็นเบส แต่ถ้าเป็น acid ash ก็จะทำให้ดินมีสภาพเป็นกรด

2.3.5 ประโยชน์ของเถ้าลอย (ธีรชาติ รื่นไกรฤกษ์, 2526; วิชาญ ภูพัฒน์, 2526)

1. การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุถม (fill material)

เมื่อผสมน้ำให้เข้ากับเถ้าลอยในอัตราส่วนที่เหมาะสม และทำการบดอัดอย่างดีแล้ว เถ้าลอยจะเป็นวัสดุที่มีความสามารถรับน้ำหนักได้สูงและเกิดการยุบตัวน้อย

กำลังอัด (unconfined compressive strength) ของเถ้าลอยนอกจากจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นจากการบดอัดแล้วยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีด้วย เถ้าลอยที่ได้จากการบดอัดแล้วจะมีน้ำหนักเบา และมีกำลังสูงเมื่อเทียบกับดินซึ่งมักจะใช้เป็นวัสดุถมโดยทั่วไป ดังนั้นความนิยมในการนำเอาเถ้าลอยไปใช้เป็นวัสดุถมในพื้นที่ที่เป็นชั้นดินอ่อนเนื่องจากข้อได้เปรียบ 2 ข้อ คือ น้ำหนักที่เบาจะช่วยลดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นดินอ่อน และการทรุดตัวที่เกิดขึ้นในชั้นเถ้าลอยเองจะน้อยมากเพราะมีกำลังอัดสูง

2. การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุในโครงสร้างถนน (วิจิตต์จรรยา สรรพกิจจานง, 2526)

ส่วนของถนนที่นิยมใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุ คือ ชั้นรองพื้นทาง (sub-base) และชั้นพื้นทาง (base) แม้ว่าเถ้าลอยที่บดอัดแล้วจะมีกำลังค่อนข้างสูงแต่ยังคงมีสมบัติบางอย่างที่ไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานโครงสร้างของถนนโดยลำพัง แต่จะสามารถนำไปใช้ได้เมื่อผสมด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาว บางครั้งอาจใช้เป็นสารสำหรับปรับปรุงสมบัติของดินให้เหมือนกับปูนซีเมนต์หรือปูนขาว

- การปรับปรุงคุณสมบัติเถ้าลอยด้วยปูนซีเมนต์ ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เหมือนกับขอยแอกกรีเกต (soil aggregate) โดยมีซีเมนต์เป็นสารเชื่อมประสาน (cementitious material)

- การปรับปรุงเถ้าลอยด้วยปูนขาว การผสมปูนขาวในเถ้าลอยจะช่วยให้กำลังอัดของเถ้าลอยเพิ่มขึ้น แต่สาเหตุการเพิ่มกำลังอัดนั้นต่างจากการผสมปูนซีเมนต์คือ ในกรณีของปูนซีเมนต์นั้นจะมีสารเชื่อมประสานเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างองค์ประกอบของซีเมนต์เอง ส่วนในกรณีของปูนขาว สารเชื่อมประสานจะเกิดจากปฏิกิริยาปัสโซลานิก (puzzolanic

reaction) ระหว่างปูนขาวกับซิลิกาในเถ้าลอย ในเกณฑ์กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันมักจะใช้ปูนขาวผสมเพิ่มในปริมาณที่มากกว่าปูนซีเมนต์

- การใช้เถ้าลอยในการปรับปรุงสมบัติของดิน ในกรณีนี้เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานช่วยให้กำลังอัดของชอยแอกกรีเกตเพิ่มขึ้น
 - การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของแอสฟัลติกคอนกรีต (asphaltic concrete) แอสฟัลติกคอนกรีต คือ ส่วนผสมระหว่างหินย่อย และยางแอสฟัลต์ ซึ่งมักใช้ปูผิวถนน
3. การใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต สามารถทำได้ 3 ลักษณะดังนี้
- ใช้เป็นสารเพิ่ม (admixture) ในส่วนผสมคอนกรีต
 - ใช้เป็นส่วนผสมปูนซีเมนต์ก่อนนำไปใช้ในงานคอนกรีต
 - ใช้เป็นส่วนหนึ่งของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์

การใช้เถ้าลอยเป็นสารเพิ่มในส่วนผสมคอนกรีต ในกรณีนี้จุดประสงค์หลักคือ ลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตลง เถ้าลอยจะทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสานแทนปูนซีเมนต์ในส่วนที่ลดไปได้ ซึ่งคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมเพิ่มจะมีสมบัติพิเศษดังนี้คือ

4. การใช้เถ้าลอยเป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์

เนื่องด้วยเถ้าลอยมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลักเหมือนกับที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ด้วยจึงสามารถนำเถ้าลอยนี้ไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์ได้

ไม่เฉพาะแต่ในงานคอนกรีตเท่านั้นที่จะสามารถใช้เถ้าลอยมาผสมทดแทนในบางส่วนของปูนซีเมนต์ได้ งานเกือบทุกประเภทที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบก็สามารถนำเถ้าลอยไปใช้ได้เช่นเดียวกัน

2.3.6 สมบัติของเถ้าลอยในประเทศไทยและการใช้งาน

ถ่านหินที่ใช้ในประเทศไทยนั้นส่วนใหญ่จะมาจากที่โรงจักรไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเป็นถ่านหินลิกไนต์ ถ่านหินชนิดนี้มีคุณภาพค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหินที่ใช้กันส่วนใหญ่ในต่างประเทศ ทำให้เถ้าลอยที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบที่แตกต่างจากประเทศอื่นๆ ซึ่งจากการวิเคราะห์พบว่ามืองค์ประกอบทางเคมีดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.4 และ 2.5

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะเป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ซึ่งเป็นถ่านหินที่เกิดตั้งแต่ยุคเทอเทียรี (tertiary) คือประมาณ 10-70 ล้านปีก่อน ปัจจุบันพบว่าถ่านหินลิกไนต์มีการสะสมตัวอยู่ภายในหุบเขาโดยได้รับอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงไป เช่นการเคลื่อนไหวของโลกจนเกิดแรงอัดทำให้การสะสมของถ่านหินจมไปอยู่ข้างล่าง จากอิทธิพลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้ทำให้คุณภาพของถ่านหิน ความหนาแน่นของชั้นหิน ขนาดหรือปริมาณของถ่านหินแต่ละที่แตกต่างกันไป ถ่านหินแม่เมาะได้ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าครั้งแรกเมื่อ พ.ศ.2507

ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของถ้ำลอยในโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กองศูนย์ข้อมูล
เชื้อเพลิงแข็ง, 2537)

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปี พ.ศ.	
	2534	2535
ความถ่วงจำเพาะ	1.99	2.51
พื้นที่ผิวจำเพาะ (m ² /kg)	270.6	295.7
% สารที่หายไประหว่างการเผาไหม้	0.64	0.69
ความหนาแน่น (kg/m ³)	1261.2	1268.1

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะ (กองศูนย์ข้อมูลเชื้อเพลิง
แข็ง, 2537)

% ส่วนประกอบทางเคมีเฉลี่ย	ปี พ.ศ.		
	2534	2535	2536
SiO ₂	42.8	40.3	54.2
Al ₂ O ₃	23.2	24.0	16.3
Fe ₂ O ₃	14.0	15.0	11.7
CaO	10.5	11.2	7.8
MgO	2.4	2.8	1.4
SO ₃	3.9	3.1	4.3
Na ₂ O	0.8	1.0	1.1
K ₂ O	2.3	2.6	-

จะเห็นได้ว่าถ้ำลอยโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะมีคุณสมบัติบางประการที่แตกต่างจากถ้ำลอย
ที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในต่างประเทศ และตามมาตรฐาน ASTM คือ

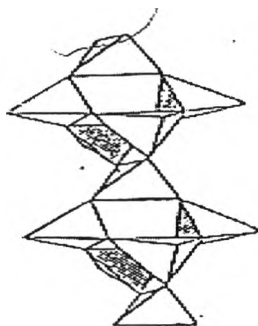
1. ปริมาณซิลิกา และอะลูมินา ของถ้ำลอยแม่เมาะนั้นค่อนข้างจะต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกับของต่างประเทศ แต่ก็ยังสูงกว่าที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ASTM เล็กน้อย
2. ปริมาณปูนขาว ของถ้ำลอยแม่เมาะนั้นสูงมากเมื่อเทียบกับของต่างประเทศ
3. ปริมาณซัลเฟต ในถ้ำลอยแม่เมาะนั้นสูงกว่าของต่างประเทศ และที่กำหนดไว้โดยมาตรฐาน ASTM

ปัจจุบันประเทศไทยมีปริมาณการใช้ถ่านหินลิกไนต์มากถึง 20 ล้านตันต่อปี ปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นหลังจากการเผาไหม้ถ่านหินคือการเหลือทิ้งของถ่านหินปริมาณมหาศาล ซึ่งส่งผลให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณชุมชนนั้น ๆ เช่น ปัญหาด้านมลภาวะทางอากาศ และปัญหาในการหาที่ทิ้งกำจัดถ่านล้อย

ถึงแม้ว่าจะมีวิธีการต่าง ๆ นำถ่านล้อยไปใช้ประโยชน์ แต่ก็ยังคงมีปัญหาของถ่านล้อยเหลือทิ้ง ทั้งนี้เนื่องจากการใช้งานของถ่านล้อยที่มีอยู่จะใช้ส่วนผสมของถ่านจำนวนน้อย นอกจากนี้ แหล่งของถ่านล้อยอยู่ห่างไกลจากโรงงาน ทำให้ไม่คุ้มค่ากับการขนส่ง และให้ผลตอบแทนทางเศรษฐกิจไม่ชัดเจนนัก ปัจจุบันนี้จึงได้มีการนำถ่านล้อยไปใช้เป็นวัสดุดิบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงและมีประโยชน์ในอุตสาหกรรมเคมีเช่น ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange) การดูดซับแก๊ส สารอาหาร น้ำ ตลอดจนโมเลกุลอินทรีย์ และการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น

2.4 ซีโอไลต์ (zeolite) (อริชา ฉายสุวรรณ, 2541; Breck D.W., 1974)

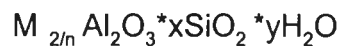
ซีโอไลต์เป็นสารที่มีความเป็นผลึก มีรูพรุนขนาดเล็กเป็นระเบียบ เป็นสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตของธาต้อัลคาไลหรืออัลคาไลน์เอิร์ธ โดยธาตุที่พบมากได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) สตรอนเซียม (Sr) และแบเรียม (Ba) ซีโอไลต์มีโครงสร้างเป็นตาข่าย (Framework structure) 3 มิติ มีรูปร่างและขนาดโพรงแตกต่างกันตามชนิดของซีโอไลต์ โครงสร้างดังกล่าวเกิดจากการต่อกันของโครงสร้างเททระฮีดรอนของซิลิกอนเททระออกไซด์ $(\text{SiO}_4)^{4-}$ และอะลูมิเนียมเททระออกไซด์ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ โดยใช้ออกซิเจนร่วมกัน ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งแต่ละหน่วยแทนหน่วยเททระฮีดรอน เส้นที่เชื่อมจุดตัดไม่ใช่พันธะเคมีแต่เป็นการแสดงระยะห่างระหว่างศูนย์กลางหน่วยเททระฮีดรอน



รูปที่ 2.1 การต่อหน่วยเททระฮีดรอนในโครงสร้างซีโอไลต์

โครงสร้างของซีโอไลต์จึงมีลักษณะเป็นรูพรุน มีโพรงและช่องว่างที่มีรูปแบบที่แน่นอน โดยขนาดของช่องเปิดของโครงผลึกขึ้นอยู่กับจำนวนออกซิเจนในวงแหวน (ring) ที่ต่อกันเป็นทรงสี่หน้า ซึ่งอาจมีจำนวนอะตอมออกซิเจนเป็น 6, 8, 10 หรือ 12 ในวงแหวน และในบางกรณีโพรงภายในอาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่ารูทางเข้าหรืออาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางสม่ำเสมอจนตลอดคล้ายท่อ (tube) สำหรับซีโอไลต์ที่มีลักษณะเป็นผลึกที่สมบูรณ์ (ideal crystal) จะมีลักษณะโครงสร้างของรูพรุนที่เป็นระเบียบและมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูต่ำสุด (aperture) ประมาณ 0.3-1.0 นาโนเมตร โดยขนาดของผลึกดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์ จำนวนแคตไอออนที่มีอยู่ และวิธีการปรับสภาพ เช่น การเผาโดยใช้ความร้อน (calcination) การชะด้วยของไหล (leaching) และการปรับสภาพทางเคมีต่างๆ

สำหรับโครงสร้างของซีโอไลต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นโครงผลึกที่ประกอบด้วย ออกซิเจน อลูมิเนียม และซิลิกอนในลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิตินั้น สามารถแสดงได้โดยสูตรทางเคมีอย่างง่าย (empirical formula) คือ



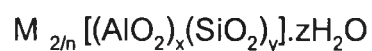
เมื่อ M คือ แคตไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน

n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนไอออนที่เกิดขึ้น ทั้งในขณะทำการสังเคราะห์หรือภายหลังการสังเคราะห์ซีโอไลต์

x คือ จำนวนโมลของ (SiO_2) โดยมากจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างภายในโครงสร้างซีโอไลต์

สูตรแสดงหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์ คือ



เมื่อ n คือ ประจุหรือเลขออกซิเดชันของแคตไอออน M

z คือ จำนวนโมลของน้ำที่อยู่ในช่องว่างภายในโครงสร้างซีโอไลต์

x+y คือ จำนวนรูปทรงสี่หน้าทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y/x มักมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง

2.4.1 ประวัติซีโอไลต์ (ตะวัน สุขน้อย, 2540; Dyer A., 1988)

ในปี 1840 ได้ค้นคว้าพบว่าเมื่อผลึกซีโอไลต์ที่มีน้ำอยู่ในโครงผลึก (Hydrated zeolite) จะสูญเสียน้ำจากการดีไฮเดรชัน (Dehydration) แล้วจะทำให้ได้ซีโอไลต์ที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนคล้ายฟองน้ำ (spongy-framework) ซึ่งสามารถดูดซับแอลกอฮอล์ เบนซิน คลอโรฟอร์ม คาร์บอนไดออกไซด์ และปรอทได้ จากนั้นในปี 1845 ได้ทำการทดลองแล้วพบว่าดินสามารถดูดซับเกลือแอมโมเนียได้เมื่อเกลือละลายของเกลือแอมโมเนียผ่านลงไปบนดิน และเมื่อทำการกรองจะได้สารละลายของแคลเซียมผ่านลงมา ส่วนเกลือแอมโมเนียจะถูกดินดูดซับเอาไว้ ต่อมา J.T. Way ได้แสดงให้เห็นว่าซิลิเกตที่มีน้ำในผลึกในดินนี้เป็นตัวทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้น

ในปี 1909 ได้ทำการทดลองการดูดซับแก๊สของซีโอไลต์ชนิดหนึ่ง คือ chabazite พบว่าสามารถดูดซับแก๊สแอมโมเนีย อากาศ ไฮโดรเจน ไอโอดีน คาร์บอนไดซัลไฟด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และโบรมีนที่อุณหภูมิสูงได้แม้แต่ไอของปรอทก็อาจถูกดูดซับได้ และในปี 1925 ค้นพบว่าซีโอไลต์มีสมบัติในการดูดซับสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กๆ และปล่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ๆออกมา ซึ่งปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้โดย Mcbain ในปี ค.ศ. 1932 โดยปรากฏการณ์ดังกล่าวเรียกว่า "Molecular sieving" ซึ่งในปี ได้ตรวจสอบโครงสร้างของซีโอไลต์ที่ชื่อ chabazite พบว่าเป็นผลึกที่มีโครงสร้างเรียงตัวแบบมีลักษณะเฉพาะตัว (framework) ต่อมา Union Carbide Corporation ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับซีโอไลต์ซึ่งนับเป็นอุตสาหกรรมแรกและได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ A ปี 1956 ได้มีรายงานเกี่ยวกับโครงสร้างที่เป็นรูปทรงเหลี่ยมลูกบาศก์ faujasite ซึ่งเกิดในธรรมชาติ และซีโอไลต์ A ที่สังเคราะห์ขึ้น

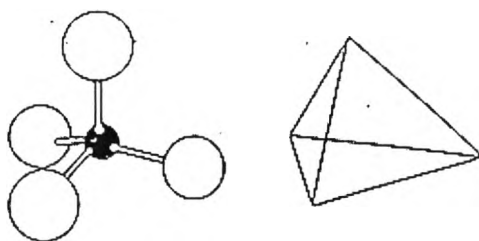
ในยุคแรกการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะทำภายใต้ภาวะที่ใช้ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำได้ซีโอไลต์ชนิดเดียวกันกับที่พบในหินบะซอลต์ ต่อมา Milton และคณะทำงาน (1959) ของบริษัท Union Carbide ได้พัฒนาเทคนิคใหม่ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อุณหภูมิต่ำโดยใช้สารที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงทำปฏิกิริยาในภาชนะปิดหรือระบบปิด ซึ่งกระบวนการและเทคนิคนี้ได้ถูกพัฒนาขยายออกไปมากขึ้นเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

เป็นที่น่าสังเกตว่าตั้งแต่ปี 1948 จนถึงปี 1972 นั้นพบว่ามีผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของซีโอไลต์ A เกิดขึ้นกว่า 7,000 เรื่อง นอกจากนี้ยังมีเอกสารสิทธิบัตรอีกกว่า 2,000 ฉบับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของซีโอไลต์ในการนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมด้านต่างๆ นอกจากนี้มีรายงานว่า การสังเคราะห์ซีโอไลต์ทำได้ตั้งแต่ปี 1862 แต่ Breck (1862) ได้ให้ความเห็นว่าสารที่สังเคราะห์ได้นั้นไม่สามารถสร้างแบบจำลองที่แน่นอนได้ด้วย ดังนั้นเขาจึงเชื่อว่าการสังเคราะห์ครั้งแรกที่สามารถพิสูจน์ได้นั้น เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด analcime โดย Barrer (1951)

ปี 1980 ได้มีการค้นพบซีโอไลต์ในธรรมชาติกว่า 40 ชนิด และซีโอไลต์กว่า 100 ชนิดได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นมา ในขณะที่มีความต้องการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์อย่างมากในเชิงพาณิชย์แต่ความต้องการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติยังคงมีอยู่อย่างจำกัด กล่าวคือจะมีการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติก็ต่อเมื่อการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ในพื้นที่นั้นไม่คุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ทั้งในด้านการทดลองและในด้านการผลิตทางอุตสาหกรรม

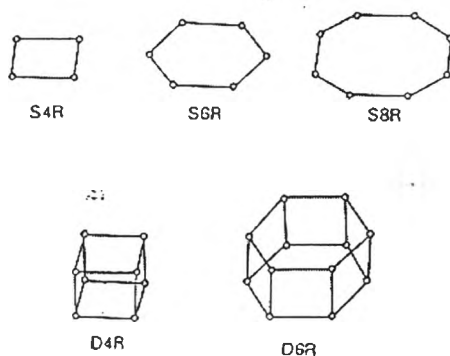
2.4.2 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง (อริชา ฉายสุวรรณ, 2541)

1. หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (primary building units) เป็นหน่วยที่เล็กที่สุด มีรูปร่างเป็น tetrahedron ของซิลิกอน tetrahedron ออกไซด์ (SiO_4)⁴⁻ หรืออะลูมิเนียม tetrahedron ออกไซด์ (AlO_4)⁵⁻ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



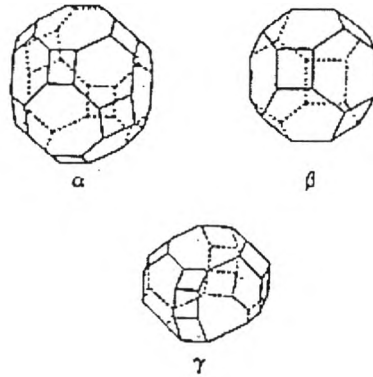
รูปที่ 2.2 หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิของซีโอไลต์

2. หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary building units) เป็นหน่วยที่เกิดจากการต่อกันของโครงสร้างปฐมภูมิให้เป็นรูปทรงที่มีเหลี่ยมต่างๆ ดังรูปที่ 2.3



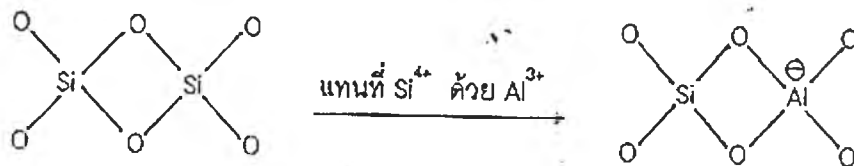
รูปที่ 2.3 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิของซีโอไลต์

3. หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (polyhedral units) ได้จากการต่อกันของโครงสร้างปฐมภูมิให้เป็นรูปทรงสมมาตร ทำให้เกิดช่องว่างหรือโพรงภายในโครงสร้างซีโอไลต์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์

เมื่อพิจารณาหน่วยปฐมภูมิเทระฮีดรอน พบว่าถ้าทุกหน่วยเป็น $(\text{SiO}_4)^{4-}$ สูตรเอมไพริคัลของสารนี้คือ SiO_2 นั่นเอง ซึ่งมีสภาพประจุเป็นกลาง แต่ถ้าแทนที่ $(\text{SiO}_4)^{4-}$ ด้วย $(\text{AlO}_4)^{5-}$ จะได้สูตรเอมไพริคัลคือ $(\text{AlO}_2)^{-}$ ดังนั้นจึงมีประจุลบสำหรับทุกหน่วยของ $(\text{AlO}_2)^{-}$ หรือ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ ดังแสดงดังรูปที่ 2.5



การต่อกันของหน่วย $(\text{SiO}_4)^{4-}$
ไม่มีประจุลบเกิดขึ้น

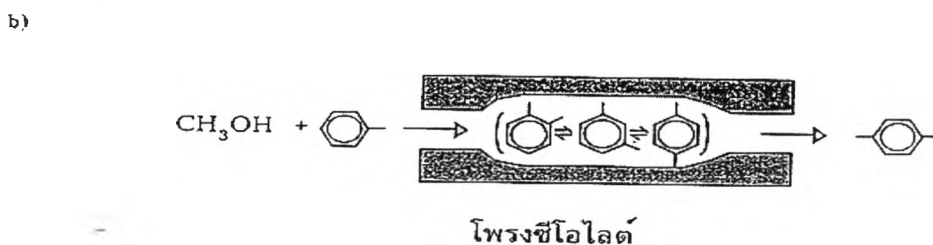
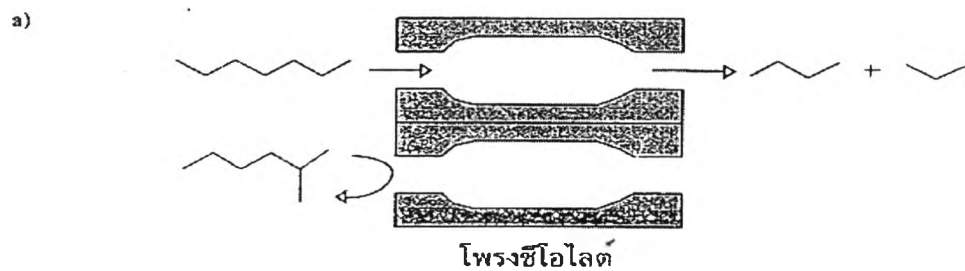
การต่อกันของหน่วย $(\text{SiO}_4)^{4-}$
และ $(\text{AlO}_4)^{5-}$ ที่มีประจุลบเกิดขึ้น

รูปที่ 2.5 ประจุในโครงสร้างตาข่ายซีโอไลต์

ตำแหน่งประจุลบที่เกิดขึ้นจะอยู่บริเวณรอบ $(AlO_2)^-$ หรือ $(AlO_4)^{5-}$ ซึ่งเป็นที่อยู่ของแคทไอออนโดยยึดเหนี่ยวกันด้วยแรงคูลอมบิก (coulombic force) เพื่อให้เกิดสมดุลทางประจุ ดังนั้นจำนวนแคทไอออนที่พบในซีโอไลต์จะขึ้นกับจำนวนของหน่วย $(AlO_4)^{5-}$ และเลขออกซิเดชันของแคทไอออน ดังนั้นซีโอไลต์จึงมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนได้

แคทไอออนและโมเลกุลของน้ำเป็นส่วนที่อยู่นอกโครงสร้างตาข่ายของซีโอไลต์ โดยปกติการแลกเปลี่ยนแคทไอออน หรือการกำจัดน้ำออกจากซีโอไลต์จะไม่ทำให้โครงสร้างของซีโอไลต์เปลี่ยนแปลงนอกจากนี้ซีโอไลต์สามารถดูดซับโมเลกุลชนิดต่างๆ ที่มีขนาดเล็กกว่าปากโพรงนั้นๆ ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งโมเลกุลที่มีขั้ว (polar molecule) ภายในโครงสร้างซีโอไลต์ประกอบด้วยโพรงขนาดต่างๆ กัน มีทางให้โมเลกุลของสารอื่นผ่านเข้าออกได้เรียกว่า ปากโพรง (aperture) โมเลกุลที่มีรูปร่างพอดีกับโพรงและปากโพรงเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านเข้าหรือออกจากโพรงของซีโอไลต์ได้ ทำให้ซีโอไลต์มีความเลือกจำเพาะต่อขนาดและรูปร่าง (shape and size selectivity) ของโมเลกุลที่ผ่านเข้าออกโพรงของซีโอไลต์ ดังรูป ที่ 2.6 นอกเหนือจากความสามารถในการแยกโมเลกุลได้ (Molecular sieve) ตามปกติของสารที่มีรูพรุนทั่วไป

นอกจากนี้ซีโอไลต์บางชนิดยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่น ซีโอไลต์ ZSM-5 และ HY ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการแตกตัวของน้ำมัน (oil cracking) ซึ่งเป็นขั้นตอนการทำให้ความยาวของโมเลกุลไฮโดรคาร์บอนสั้นลง ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิง



รูปที่ 2.6 a) การเร่งปฏิกิริยาโดยการคัดเลือกขนาดของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาในโพรงซีโอไลต์

b) การคัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาภายในโพรงซีโอไลต์

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งซีโอไลต์ออกอีกได้เป็น 9 ชนิด ตามลักษณะของโครงสร้างแบบโครงตาข่ายดังต่อไปนี้คือ

1. Analcite Group

โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-ring กับ 6-ring และมี 2 รูปแบบ คือ analcite และ laumontite ดังรูป 2.7

2. Natrolite Group

โครงสร้างมีลักษณะต่อกันเป็นสายโซ่ของ 4-ring unit จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกัน มี 3 รูปแบบคือ natrolite, edingtonite และ thomsonite ซึ่งถ้ามองในลักษณะสองมิติแล้วโครงสร้างทั้งสามรูปแบบจะเป็น 8-ring channel system ดังรูป 2.8 (ก)

3. Chabazite group

โครงสร้างประกอบด้วย 6-ring ต่อขนานกัน ซึ่งการเชื่อมต่อกันมีมากมายหลายรูปแบบ เช่น Offertite และ Reionite ดังรูปที่ 2.9

4. Phillipsite Group

โครงข่ายประกอบด้วย 4-ring ที่ต่อขนานกันแบบ U(Up) และ D(Down) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบได้แก่ Phillipsite และ Gismindite ประกอบด้วยการเชื่อมโยงของสายโซ่ UUDD ในขณะที่ Li-A(BW) และ yugawaralite จะมีการเชื่อมต่อกันด้วย single 4-ring ดังแสดงในรูปที่ 2.10

5. Heulandite Group

โครงสร้างประกอบด้วย 5-ring จำนวน 4 วง และ 4-ring จำนวน 2 วง ซึ่งเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่มเชื่อมต่อกัน โดยรูปแบบพันธะที่เชื่อมโยงกันนี้จะทำให้ได้แบบ brewsterite ดังรูป 2.8 (ข) และการเชื่อมต่อกันของ block ในแนวตั้งโดยผ่านโครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้ได้โครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ heulandite และ stibite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่เป็น 5-ring ในบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก)

6. Mordenite Group

หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ ประกอบด้วย 5-ring จำนวน 4 วง เชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ซึ่งมีรูปแบบทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ modenite, epstilbite, bikitatite, dachiardite (แสดงในรูปที่ 2.12), ZSM-5 (แสดงในรูปที่ 2.13) และ ZSM-11

7. Faujasite group

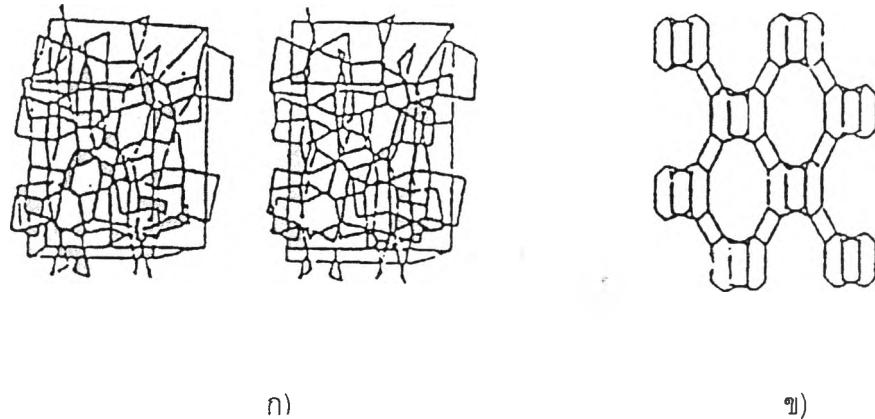
ซีโอไลต์กลุ่มนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ sodalite, A และ ZK-5 ดังแสดงในรูปที่ 2.14

8. Melanophlogite Group

โครงตาข่ายประกอบด้วย interwoven layer 12 และ 14-hedron โดยโครงสร้างจะมีลักษณะหนาแน่นและมีชั้นผิวหน้าเป็น 12-hedron และช่องเปิดในโครงสร้างจะมีจำกัดเพียง 5 และ 6 ring เท่านั้น กลุ่มนี้ประกอบไปด้วย ZEM-39 (รูปที่ 2.15) และ melanophlogite (รูปที่ 2.16)

9. Lovdarite Group

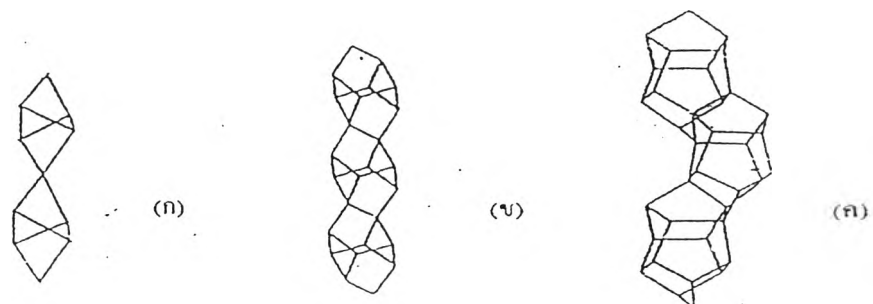
โครงข่ายประกอบด้วย 4-ring และ 8-ring เชื่อมผ่านมุมของ sharing 3-ring ซึ่งเป็นระบบที่ช่อง intersection 2 มิติ เชื่อมต่อกันโดย 9-ring ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะในโครงสร้างสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันของ

ก) analcite

ข) laumontite

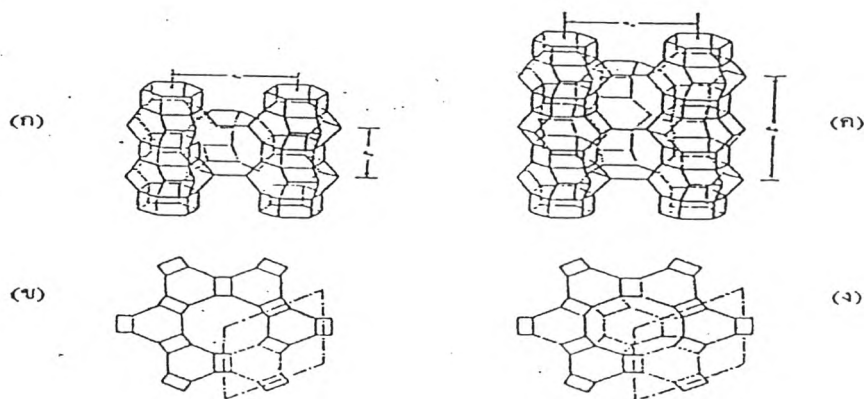


รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะสายโซ่ใน

ก) natrolite

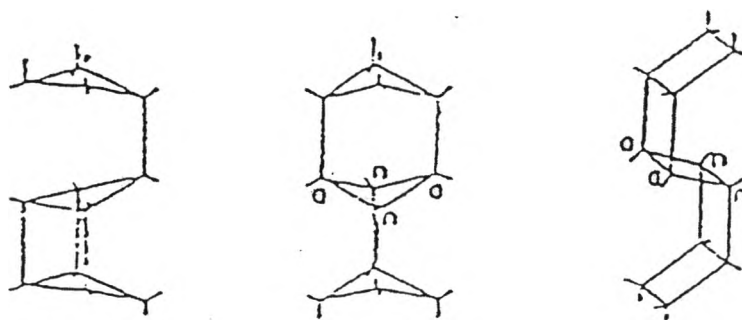
ข) brewsterite

ค) ZSM-5

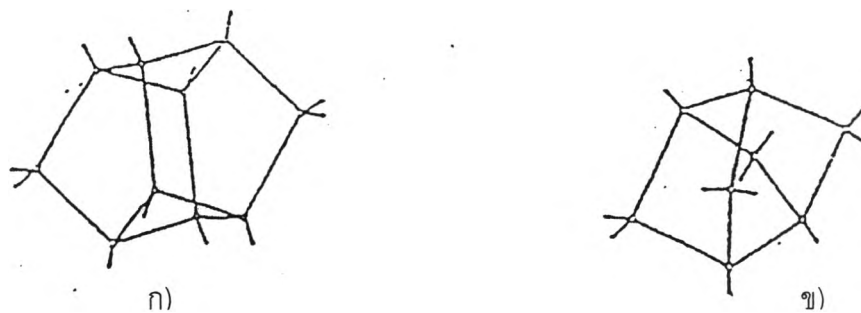


รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างของ Offretite และ Erionite

ก) Offretite ข) C-Project of Offretite ค) Erionite ง) C-Project of Erionite

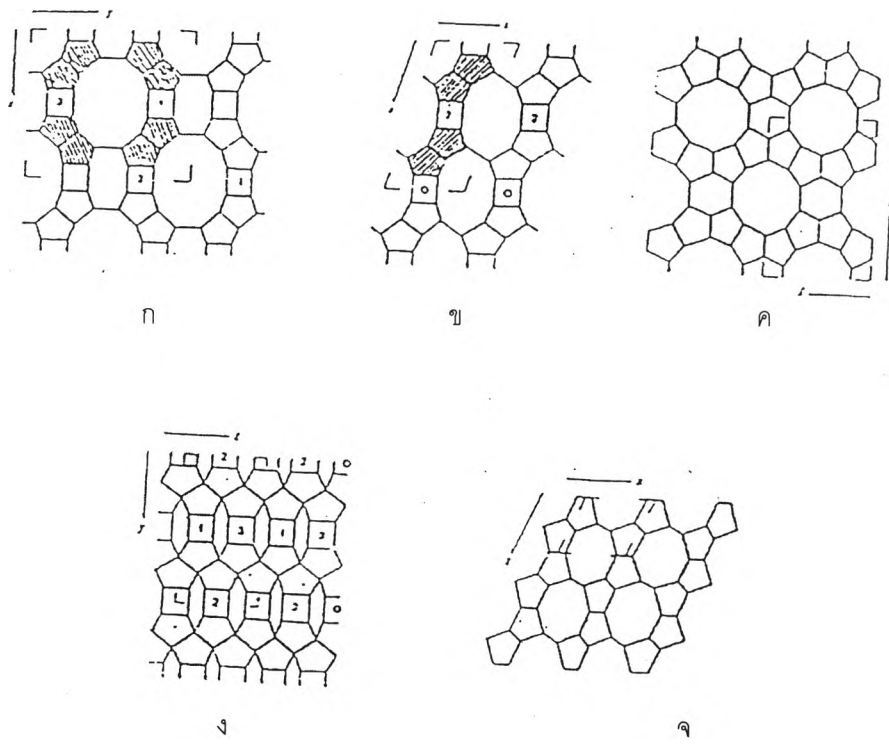


รูปที่ 2.10 แสดงสายโซ่ทั้ง 3 แบบ คือ UDD, UDUD และ UDUU

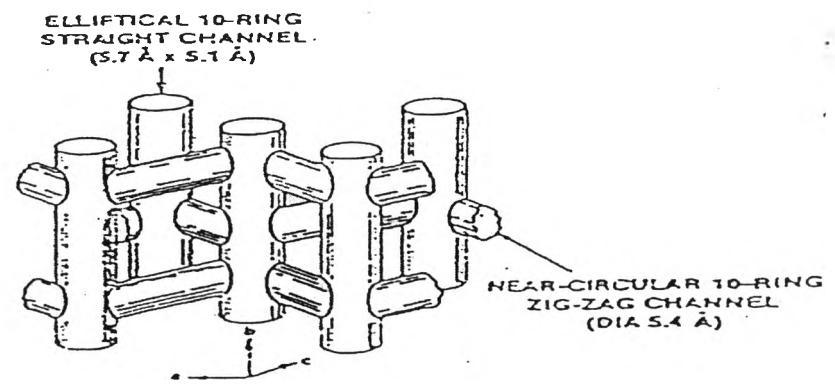


รูปที่ 2.11 แสดงหน่วยทุติยภูมิใน

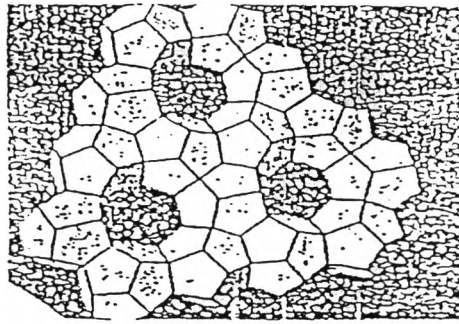
ก) Heulandite ข) Mordenite Group



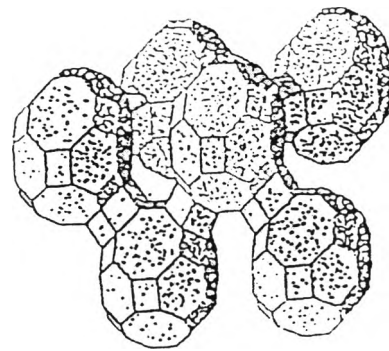
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างตามแนวโปรเจกชันหลักของ
 ก) Modenite ข) Dachiardite ค) Ferrierite ง) Epstilbite จ) Bikitaite



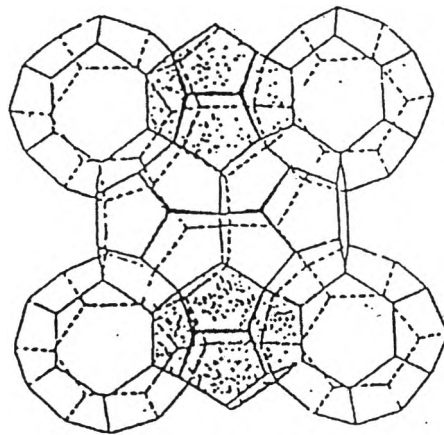
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะโครงสร้างของ ZSM-5



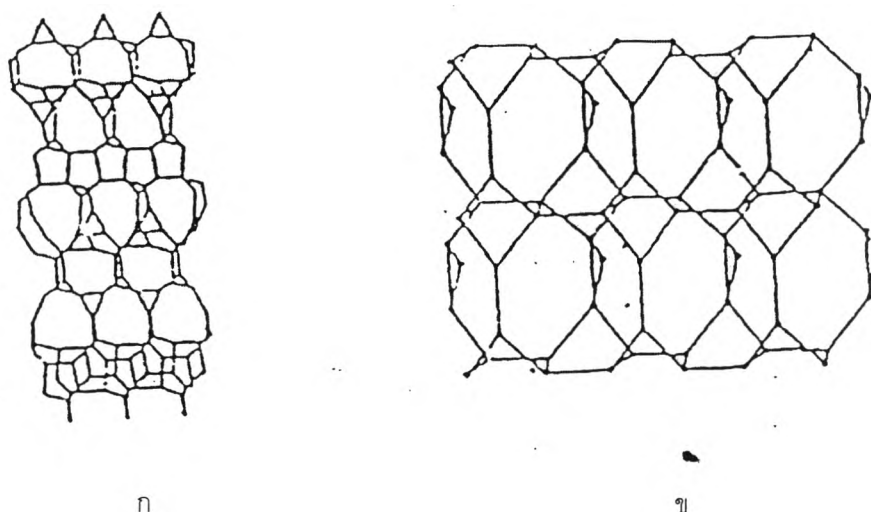
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการจัดเรียงตัวของ ZK-5



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะโครงสร้างของ ZSM-39



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างของ melanophlogite



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะโครงสร้างของ Lovdarite

ก) ตามแนวแกน a ข) ตามแนวแกน b

2.4.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ (Breck D.W.,1974; Dyer A.,1988)

ซีโอไลต์มีทั้งที่พบได้ตามธรรมชาติ (natural zeolite) และที่สังเคราะห์ขึ้น (synthesis zeolite) ซึ่งซีโอไลต์ที่พบในธรรมชาตินั้นมีอย่างน้อย 40 ชนิด ส่วนที่สังเคราะห์เองพบว่ามีมากกว่า 150 ชนิด โดยแต่ละชนิดมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน

ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นกลุ่มของผลึกอะลูมิโนซิลิเกตของมอนอหรือไดวาเลนต์เบส (mono or divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำในผลึกบ้างบางส่วน หรือทั้งหมดโดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างซีโอไลต์จากธรรมชาติได้แก่ faujasite, erionite, offretite, chabasite, gmelinite, mordenite และ heulandite เป็นต้น เราสามารถแบ่งชนิดของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติตาม hydrological system ได้ดังนี้ คือ

- Saline, Alkaline Lakes แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ arid region และ semiarid region การตกตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ close resin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนสำคัญในการควบคุม lake chemistry
- Saline, Alkaline soils ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ใน Saline, Alkaline soils การก่อตัวใน arid region และ semiarid region เกิดจากการระเหย

ของน้ำที่ผิวดินที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไดคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดิน แล้วจะละลายโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไดคาร์บอเนต ทำให้มีค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น และทำให้เกิดอะลูมิเนียมซิลิเกตในพื้นที่ดินขึ้น

- Marine Sediment ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำและค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง
- Open Hydrologic Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash
- Hydrothermal Systems ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีแอลคาไลกับสารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หินและลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ตื้นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite
- Burial diagenetic systems ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ
- Magmatic Systems เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดจากอันตรกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างใน imertitial และ globules

ในด้านการใช้งานนั้นมีการใช้งานซีโอไลต์ที่สังเคราะห์มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ เนื่องจากมีองค์ประกอบสม่ำเสมอ มีโครงสร้างที่แน่นอน และมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง โดยซีโอไลต์สังเคราะห์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโซเดียม และแทนที่ด้วยวิธีแลกเปลี่ยนไอออนกับแคทไอออน เช่น แอมโมเนียม (NH_4^+) หรือ ไอออนของไฮโดรเจน การสังเคราะห์โดยทั่วไปจะใช้วิธี hydrothermal treatment และวิธีสังเคราะห์ซิลิเกต (silicate) และปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซีโอไลต์ มักกระทำภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันไอน้ำ โดยสารตั้งต้นได้มาจาก 2 แหล่งด้วยกันคือ แหล่งของอะลูมิเนียมเช่น โซเดียมอะลูมิเนต (sodiumaluminate) หรืออะลูมิเนียมซัลเฟต (aluminiumsulfate) และแหล่งซิลิกา (SiO_2) เช่น silica sol, fumed-silica หรือ sodium waterglass และเมื่อเติมสารอัลคาไลน์ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารประกอบ quaternary ammonium จะทำให้ได้เจลเกิดขึ้นในลักษณะที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีผลึกเกิดขึ้นอย่างซ้ำๆ ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกจะอยู่ในช่วง 200 องศาเซลเซียสหรืออาจสูงกว่าและความดันเท่ากับความดันไออิ่มตัวของน้ำที่มีอยู่ขณะนั้น โดยภายใต้สภาวะดังกล่าวนี้ ซีโอไลต์ยังไม่เสถียร และมีแนวโน้มที่จะเกิดโพรงกว้าง และมีการแลกเปลี่ยนแคทไอออนเกิดขึ้น ซึ่งการควบคุมปัจจัยต่างได้แก่ องค์ประกอบในตอนเริ่มต้น สภาวะในการเกิดปฏิกิริยา เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาและการเกิดนิวเคลียส จะทำให้ได้ผลึกที่ต้องการ และภายหลังจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์แล้ว ซีโอไลต์

ที่ได้จะถูกนำไปอบและให้ความร้อนเพื่อกำจัดโมเลกุลของน้ำออกจากผลึก จากนั้นนำไปเผาในอากาศเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ออกไป ซึ่งทำให้ได้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ทั้งนี้ซีโอไลต์แต่ละชนิดที่ได้จะมีลักษณะแตกต่างกัน โดยองค์ประกอบหลักที่ทำให้ซีโอไลต์มีสมบัติที่แตกต่างกัน คือ อัตราส่วนระหว่าง Si/Al ซึ่งมีผลต่อค่าความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา และความเสถียรของโครงสร้าง ซีโอไลต์ โดยทั่วไปแล้วอัตราส่วนของ Si/Al ในซีโอไลต์ที่เตรียมได้ส่วนใหญ่มีค่ามากกว่า 1 และไม่มีพันธะชนิด Al-O-Al เนื่องจากการใช้กรดทำให้ Al_2O_3 ถูกกำจัดออกไป เช่น mordenite ซึ่งมีอัตราส่วนของ Si/Al ประมาณ 10 โดยซีโอไลต์ที่มีอัตราส่วน Si/Al สูงขึ้น มีผลทำให้โครงสร้างเสถียรมากขึ้น

2.4.4 ประโยชน์ของซีโอไลต์

1. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น ใช้ในปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) ปฏิกิริยาแอลคิเลชัน (Alkylation) ปฏิกิริยาไอโซเมอไรเซชัน (Isomerization)
2. ใช้เป็นสารดูดซับ (Sorptions agent) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของซีโอไลต์ทำให้สามารถดูดซับสารต่างๆได้ตามขนาด และโครงสร้างของซีโอไลต์แต่ละชนิด
3. สารลดความกระด้าง (Water softener)
4. ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin)
5. ใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอก (Detergent builders) เนื่องจากซีโอไลต์มีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (Capacity) และจลนพลศาสตร์สูง (Kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคทไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็ว นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตอีกด้วย

2.4.5 ตัวอย่างการนำซีโอไลต์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

1. การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำเสียของชุมชน

ในการศึกษาช่วงเริ่มต้นโดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อกำจัดแอมโมเนียในกระบวนการกำจัดน้ำเสียพบว่า สารอินทรีย์หลายชนิดมีความสามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ แต่ก็มีประสิทธิภาพในการดักจับไอออนของแอมโมเนียได้ต่ำ ทำให้กำจัดแอมโมเนียได้น้อยและเสียค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังทำให้เกิดปัญหาเรื่องน้ำเค็มตามมาด้วย

วิธีที่เหมาะสมที่ดีกว่าถูกนำเสนอเป็นรายงานโดย Ames ได้แสดงว่า ได้มีการใช้ซีโอไลต์หลายชนิดที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ และให้ผลที่ดีกว่าแบบดั้งเดิม ซีโอไลต์ชนิด clinoptilolite และ Union Carbide's 40 เป็นซีโอไลต์ที่เหมาะสมที่สุดหลังจากการทดสอบโดยใช้ในโรงงานต้นแบบ พบว่า แอมโมเนียมันถูกกำจัดออกไปได้มากถึง 95%

2. การเติมซีโอไลต์ชนิดที่ใช้ในการคัดเลือกโมเลกุลสารได้ลงในผงซักฟอก

หน้าที่หลักของฟอสเฟตที่ผสมอยู่ในผงซักฟอก คือ ลดแคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+}) ที่มีอยู่ในน้ำกระด้าง โดยใช้ซีโอไลต์ชนิดผงที่สามารถเป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนได้ไปทำการกำจัดแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนจากสารละลาย แล้วแทนที่ด้วยเกลือโซเดียม โดยที่ผงซักฟอกเหล่านี้จะรับโซเดียมจากซีโอไลต์ชนิด Linde ผงซักฟอกที่มีซีโอไลต์เป็นส่วนผสม ซึ่งลดปริมาณของฟอสเฟตที่มีอยู่ให้อยู่ในระดับต่ำ หรือไม่มีอยู่เลยนั้นสามารถหาซื้อได้ในหลายพื้นที่ของประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และสถานที่อื่นๆ นอกจากนี้การใช้ซีโอไลต์ในรูปแบบนี้ยังมีปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการสังเกตปริมาณการใช้ซีโอไลต์ในแต่ละปีพบว่ามีความต้องการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้มีการใช้ในปริมาณหลายล้านปอนด์ทั่วโลก

การนำซีโอไลต์มาประยุกต์ใช้แทนสารฟอสเฟตในผงซักฟอกนั้น ในช่วงแรกนั้นวิธีนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดยเหล่านักวิทยาศาสตร์ที่บริษัท เฮลเกล (Henkel) ในประเทศเยอรมัน และบริษัท พรอคเตอร์ แอนด์ แกมเบิล (Procter & Gamble) ในประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งปัจจุบันนี้มีการพัฒนาในเรื่องนี้อยู่มากมาย

3. การเปลี่ยนเมทานอลไปเป็นน้ำมันเบนซินโดยใช้ซีโอไลต์

เนื่องจากได้มีการตระหนักถึง เรื่องของแหล่งพลังงานทั้งหลายที่มีอยู่ในปัจจุบันที่มีโอกาสจะหมดไปในอนาคต จึงได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อเสาะหาแหล่งพลังงานใหม่ที่ไม่ใช้ปิโตรเลียม และมีศักยภาพเพียงพอที่จะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงได้ในอนาคต

เมทานอล เป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากสามารถทำการผลิตได้ปริมาณสูงในช่วงเวลาที่สั้นจากถ่านหิน และการสังเคราะห์ก๊าซโดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ทั้งโดยตรง หรือจะนำไปใช้เป็นแบบผสมกับน้ำมันเบนซินก่อนที่จะใช้กับเครื่องยนต์

กระบวนการแบบใหม่ที่ใช้ในการเปลี่ยนเมทานอลให้ไปเป็นน้ำมันเบนซิน คือ การใช้ซีโอไลต์ชนิด ZSM-5 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งกระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท โมบิลออยล์ ซึ่งได้ตั้งชื่อกระบวนการนี้ว่า กระบวนการ MTG (Methanol to Gasoline)

บริษัท โมบิลออยล์ ได้สร้างโรงงานที่ใช้กระบวนการ MTG และใช้ซีโอไลต์ ZSM-5 เป็นแห่งแรกที่ โมทูเนี่ย ประเทศนิวซีแลนด์ และเริ่มต้นทำการผลิตในปี ค.ศ. 1985 โดยที่โรงงานแห่งนี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดอยู่นิ่ง (fixed-bed) และที่ประเทศเยอรมันตะวันตกก็ได้มีการพัฒนากระบวนการ MTG เหมือนกัน แต่ต่างกันที่เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized-bed) เพื่อนำไปใช้ผลิตได้จริงในทางการค้า และสามารถประสบความสำเร็จ โดยได้มีการสร้างโรงงานต้นแบบไว้ที่เมืองเวสเซนลิง (Wesseling) กระบวนการเหล่านี้สามารถเปลี่ยนให้น้ำมันเบนซินถึง

90% และมีค่าออกเทน 90.25 กระบวนการที่ใช้ fluidized-bed ได้มีการปรับปรุงกระบวนการ MTG และทำให้สามารถนำวัตถุดิบชนิดอื่นๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติมาใช้แทนเมทานอลได้

4. การแยกและนำโลหะกลับมาใช้ใหม่

ซีโอไลต์หลายชนิดมีความสามารถในการคัดเลือกโลหะหนัก ทำให้สามารถนำโลหะที่มีค่าเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ หรือเอาไว้ใช้กำจัดโลหะหนักที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และโลหะที่ปะปนอยู่ในน้ำเสีย เนื่องจากเกิดความคุ้มค่าในการนำโลหะกลับมาใช้ใหม่ได้ ซีโอไลต์ชนิด clinoptilite และ mordenite ถูกศึกษาเพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนักโดยเฉพาะ Cd, Cu, Pb และ Zn ที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซีโอไลต์ที่มีความสามารถในการคัดเลือกโลหะได้ จะทำการเปลี่ยนไอออนของโลหะเงิน (Ag) เพื่อดึงเอาโลหะเงินออกจากน้ำเสีย

จากรายงานของ Breck แสดงให้เห็นว่า การใช้ซีโอไลต์ในการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยก Co และ Ni ได้โดยใช้ซีโอไลต์ linde แบบ A (linde A zeolite) นอกจากนี้ยังมีวิธีแยกโลหะเพื่อไม่ให้มีเหล็กอีกหลายวิธีที่สามารถนำมาใช้โดยการเลือกใช้ซีโอไลต์ชนิดที่เหมาะสม

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศ

สุนีย์ ผู้มีธรรม และวิไลรัตน์ ศิริอดุลย์ (2531) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาว ชั้นแรกได้ศึกษาภาวะต่างๆที่เหมาะสมโดยใช้สารเคมีบริสุทธิ์คือ อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ทำปฏิกิริยากันจนได้ซีโอไลต์ A จากนั้นจึงได้เตรียมจากดินขาวที่ดีซึ่งมีการปรับปรุงคุณภาพแล้วให้เป็น zeolite A โดยนำดินขาวมาเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์เมตาเคโอลิน (Metakaolin) แล้วนำไปทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 (น้ำหนัก/ปริมาตร) ที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 95°C โดยมีการคนอย่างแรงตลอดเวลา หลังจากทำปฏิกิริยากัน 30 นาที เติมน้ำอุ่นแล้วปล่อยให้ทำปฏิกิริยาต่อไปอีก 90 นาที ได้ผลึกของซีโอไลต์ A ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ผลของการเตรียมผลึกของซีโอไลต์โดยใช้เทคนิคทางอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมทรี (IR-Spectrophotometry) เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันสเปกโทรโฟโตเมทรี (X-rays Diffraction Spectrophotometry) และ อิเล็กตรอนสแกนนิ่งไมโครสโคป (Electronscanning microscope)

จิตทิน พัฒนาการ และประภากร เจริญวิภาสเจต (2535) ได้ศึกษาการสังเคราะห์จากดินขาว ซึ่งนำดินขาวมาเผาแล้วทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลในเตาปฏิกรณ์ความดันสูง (High pressure autoclave) โดยจะศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆว่ามีผล

ต่อการเกิดซีโอไลต์ ตัวแปรเหล่านี้คือ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แปรผันที่ความเข้มข้น 0.5, 2.0, 5.0, 7.5 M อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ สารก่อโครงร่างและการใช้เอซิโทน และ เอทานอล เป็นตัวทำละลาย โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีทั้งหมด 3 ชนิด เป็นสารในตระกูลซีโอไลต์ 1 ชนิดคือ Analcime ($\text{NaAl}(\text{SiO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นซีโอไลต์ที่เหมือนกับซีโอไลต์จากธรรมชาติ และสารประกอบ Sodium aluminium silicatehydrate ($\text{Na}_{14}\text{Al}_{12}\text{Si}_{13}\text{O}_{23} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ส่วนสารตัวที่สามคือ สารประกอบของ Na, Al, Si, O, H₂O ที่ยังไม่ทราบสัดส่วนแน่นอน

รุ่งระวี ยิงยวด และนิศาชล ชินพันธ์ (2536-2537) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากดินขาวที่มีในประเทศไทย ซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดผลึกซีโอไลต์ ได้แก่ค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ตัวทำละลายและอัตราส่วนเชิงโมลของ Si/Al เมื่อแปรผันค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 3, 5, 7, 9, 12 จะเกิดผลึกของซีโอไลต์ที่มีชื่อเรียกว่า Analcime ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 12 ซึ่งเป็นภาวะที่เป็นเบส และมีปริมาณโซเดียมมากที่สุด ส่วนที่ค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 3, 5, 7, 9 จะเกิดผลึกของควอต แต่ถ้าใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 12 จะเกิดผลึกของควอตและมีผลึกของสารอื่นๆปนอยู่เล็กน้อย แต่ไม่สามารถทราบได้แน่ชัดว่าเป็นสารใด นอกจากนี้ยังได้แปรผันอัตราส่วนเชิงโมลของ Si/Al ที่อัตราส่วนเท่ากับ 2.233 ได้ผลึก เป็นควอต และที่อัตราส่วนเชิงโมลเท่ากับ 40 และ 400 ได้ผลเป็นควอต และของแข็งล้วนตามลำดับ

มนตรี ทองคำ (2542) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินในประเทศไทย ซึ่งทำการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเกิดผลึกซีโอไลต์ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้นของสารละลายเบส ซึ่งจากการวิเคราะห์พบซีโอไลต์ดังนี้คือ zeolite P, chabazite, nepheline, gismondine โดยที่ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์คือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยที่ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน 619.44 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์ ซึ่งให้สมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีขึ้นจากเถ้าลอยถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้นซึ่งมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออน 52.20 มิลลิโมลต่อกิโลกรัมซีโอไลต์

2.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในต่างประเทศ

Srinivassan และ Grutzeck (1999) สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด X จากเถ้าลอยเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3 โมลต่อลิตร อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการสังเคราะห์ 1 วัน และ 3 วัน และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการสังเคราะห์เป็น 7 วัน สามารถสังเคราะห์

ซีโอไลต์ชนิด Y และ P ได้ นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นเดียวกัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด analcime และ sodalite ที่ระยะเวลาการสังเคราะห์ 3 และ 7 วัน และเมื่อนำซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากถ้ำลอยไปดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) พบว่า ซีโอไลต์ชนิด analcime และ sodalite ที่ผสมกันสามารถดูดซับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้ดีกว่า ซีโอไลต์ชนิด X, Y และ P

Hollman และคณะ (1999) สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์บริสุทธิ์ชนิด P และ X จากถ้ำลอย โดยนำถ้ำลอยผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมลต่อลิตร แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นจึงกรอง แล้วนำสารละลายที่กรองได้ไปผสมกับอะลูมินา เพื่อปรับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าเมื่อใช้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 2 สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์บริสุทธิ์ชนิด P ได้ ในขณะที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 1.8 สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์บริสุทธิ์ชนิด X ได้

Hsiao-Lan Chang and Wei-Heng Shih (1998) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยที่ได้จากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า 3 โรงงาน จากรัฐเพนซิลเวเนีย โดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยที่จะได้ผลึก faujasite เมื่อทำปฏิกิริยาที่ 38°C และได้ผลึก zeolite P เมื่อทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงกว่า 60°C ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำปฏิกิริยา โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปของแข็งที่เป็นผง โดยจะนำไปเผาพร้อมกับถ้ำลอยในอัตราส่วน 1 ต่อ 1.2 โดยน้ำหนัก จากนั้นค่อยนำมาทำให้เป็นสารละลายและทำปฏิกิริยาต่อไป จากนั้นจะทำการหาค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน โดยมีค่าระหว่าง 1.8-3.7 mequiv/g

G.C. Hollman and other (1997) ได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ความเข้มข้นของสารละลายเบส ความดัน และเวลาในการทำปฏิกิริยา จากผลการทดลองพบว่า ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นคือ ที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีเอล (zeolite Na-PI) ซีโอไลต์โซเดียม-เอกซ์ (zeolite Na-X) และโซดาไลต์ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ ที่ 90°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ให้ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง 2.0-2.5 meq/g

C. Amrhein, G. Haghnia. And others (1996) ได้ทำการศึกษสมบัติของถ้ำลอยถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้าในอเมริกา และได้ทดลองสังเคราะห์ซีโอไลต์จากถ้ำลอยโดยทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และสารผสมระหว่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ ชนิดของสารละลายต่าง ความเข้มข้นของต่าง ความดัน และ

ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ซึ่งซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จะนำไปทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน ความเสถียรของซีโอไลต์ ทดสอบการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย และวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันสเปกโทรโฟโตเมทรี (X-rays Diffraction Spectrophotometry) จากการวิเคราะห์พบว่า ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้น คือ ที่ความดันบรรยากาศเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีเอล (zeolite Na-PI) ซีโอไลต์โพแทสเซียมชาบาไซด์ (potassium chabazite) เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ ที่ 100°C เป็นเวลา 3 วันตามลำดับ ส่วนสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นั้นไม่เกิดซีโอไลต์ สำหรับที่ความดันสูงเกิดซีโอไลต์โซเดียม-พีเอล (zeolite Na-PI) ที่ 100°C ซีโอไลต์โซเดียม-ซี (zeolite Na-C) ที่ 100°C โดยได้จากการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ และซีโอไลต์เอกซ์ (zeolite X) ได้จากการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ ที่ 250°C