

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน มีขั้นตอนการผลิตน้ำประปา [5, 8] แสดงดังรูปที่ 2.1 และมีรายละเอียดอธิบายดังต่อไปนี้

2.1.1 ระบบการสูบน้ำดิบ (Raw Water System)

โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนรับน้ำดิบสำหรับผลิตน้ำประปาโดยลำเลียงผ่านตามคลองประปา ซึ่งจะทำให้เกิดการฟอกตัวตามธรรมชาติ ทำให้น้ำดิบมีการปรับปรุงคุณภาพดีขึ้น แล้วใช้เครื่องเติมอากาศ (Aerator) เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบก่อนเข้าโรงงาน หลังจากนั้นโรงงานจะสูบน้ำดิบขึ้นมาจากคลองประปา โดยมีตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด (Coarse and Fine Screen) ทำการคัดวัสดุชิ้นหนึ่งก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตน้ำประปาโดยรับน้ำประปาจากโรงสูบน้ำดิบสำแล จังหวัดปทุมธานี มีระยะห่างจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนประมาณ 18 km ไปทางทิศเหนือ ซึ่งประกอบด้วยอาคารปั๊ม 3 หลัง ในแต่ละหลังใช้พื้นที่ $22 \times 16 \text{ m}^2$ สูง 19 m กำลังสูบสูงสุด $4.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ น้ำดิบที่สูบจากคลองประปาจะถูกปั๊มโดยสถานีสูบน้ำบางเขนเข้าสู่โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนซึ่งใช้ปั๊มสูบแบบแนวตั้งกำลังสูบ $348 \text{ m}^3/\text{min}$ จำนวน 6 เครื่องและปั๊มสูบแนวตั้ง กำลังสูบ $174 \text{ m}^3/\text{min}$ จำนวน 3 เครื่อง

2.1.2 ระบบการจ่ายสารเคมี (Chemical Feeding System)

น้ำดิบจะถูกสูบส่งไปตามท่อน้ำดิบ ซึ่งระหว่างนี้จะปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยการเติมสารเคมี คือ ปูนขาว เพื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในน้ำ เติมหัลโคเจนเพื่อกำจัดสาหร่ายเซลล์เดียวและแบคทีเรีย เติมหาร์สแม่มเพื่อทำให้น้ำดิบตกตะกอน และมีการกวนน้ำดิบในเส้นท่อน้ำดิบก่อนเข้าสู่ถังตกตะกอนเพื่อให้สารเคมี มีการกระจายผสมกับน้ำดิบอย่างทั่วถึง

2.1.3 ระบบการตกตะกอน (Clarification System)

น้ำดิบที่ผสมสารเคมีเรียบร้อยแล้วจะไหลเข้าสู่ถังตกตะกอนรูปกรวย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 58 m จำนวน 16 ถัง ซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้ในการตกตะกอนในอัตรา $200,000 \text{ m}^3/\text{min}$ ถังเหล่านี้จะแบ่งออกเป็น 2 เขต คือ เขตถังทำปฏิกิริยาและถังตกตะกอน เขตถังทำปฏิกิริยาจะอยู่ตรงกลางมีการเติมสาร

พอลิอิเล็กโตรไลต์ (Polyelectrolyte) และสารส้มโดยเขตที่เหลือเป็นถังตะกอน หากน้ำดิบมีความขุ่นมากก็จะมีสารเติมสารพอลิเมอร์ในส่วนกลางของถังตกตะกอนเพื่อช่วยเร่งให้เกิดการตกตะกอนและทำการกวาดให้ตะกอนจับตัวเพื่อรวมกับตะกอนเก่า หลังจากนั้นน้ำดิบจะถูกดันออกบริเวณส่วนล่างของถัง ตะกอนซึ่งมีน้ำหนักมาก จะตกลงในส่วนกลางของถังก่อนลงสู่เบื้องล่าง แล้วจะมีเครื่องกวาดทำหน้าที่กวาดตะกอนลงสู่กันดั้ม เมื่อปริมาณตะกอนมีมากจะถูกระบายออกไปยังบ่อกักตะกอน ส่วนน้ำใสจะถูกผลักดันเข้าสู่รางรับน้ำด้านบนเพื่อเข้าสู่ระบบการกรองน้ำต่อไป

2.1.4 ระบบการกรองน้ำ (Filtration System)

การกรองน้ำของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน เป็นการกรองแบบทรายกรองเร็ว (Rapid Sand Filtration) บ่อกรองน้ำมีทั้งหมด 44 บ่อ แต่ทางปฏิบัติจริงใช้เพียง 30-32 บ่อเท่านั้น ในแต่ละบ่อกรองมีขนาด $13 \times 69 \text{ m}^3$ สามารถกรองน้ำได้ประมาณ $75,000 \text{ m}^3/\text{day}$ โดยน้ำดิบที่ผ่านการตกตะกอนแล้วจะไหลผ่านสารกรองน้ำ 2 ชนิด คือ ชั้นถ่านแอนทราไซท์ หนา 80 cm และชั้นทรายหนา 40 cm ที่ได้สารกรองน้ำจะมีหัวกรองน้ำ เรียกว่า หัว Nozzle เมื่อประสิทธิภาพการกรองลดลงจะต้องมีการล้างสารกรอง เพื่อทำความสะอาดโดยมีการพ่นลมและน้ำ โดยการล้างย้อนขึ้นมาจากใต้บ่อกรอง เพื่อให้สารกรองเคลื่อนตัว ขยายตัว และเกิดการเสียดสีกัน ทำให้ตะกอนที่อยู่ในชั้นสารกรองไหลตามน้ำออกไป

2.1.5 ระบบการฆ่าเชื้อโรคและระบบถังเก็บน้ำใส (Filtered Water Reservoir for Infection and Clear Water Storage System)

น้ำที่ผ่านการกรองแล้วจะไหลเข้าสู่ถังเก็บน้ำใส (Reservoir) และจะมีการเติมคลอรีนในถังเก็บน้ำใสเพื่อฆ่าเชื้อโรค และเติมปูนขาวเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำดิบ โดยควบคุมให้เป็นไปตามมาตรฐานน้ำดื่มของการประปานครหลวง

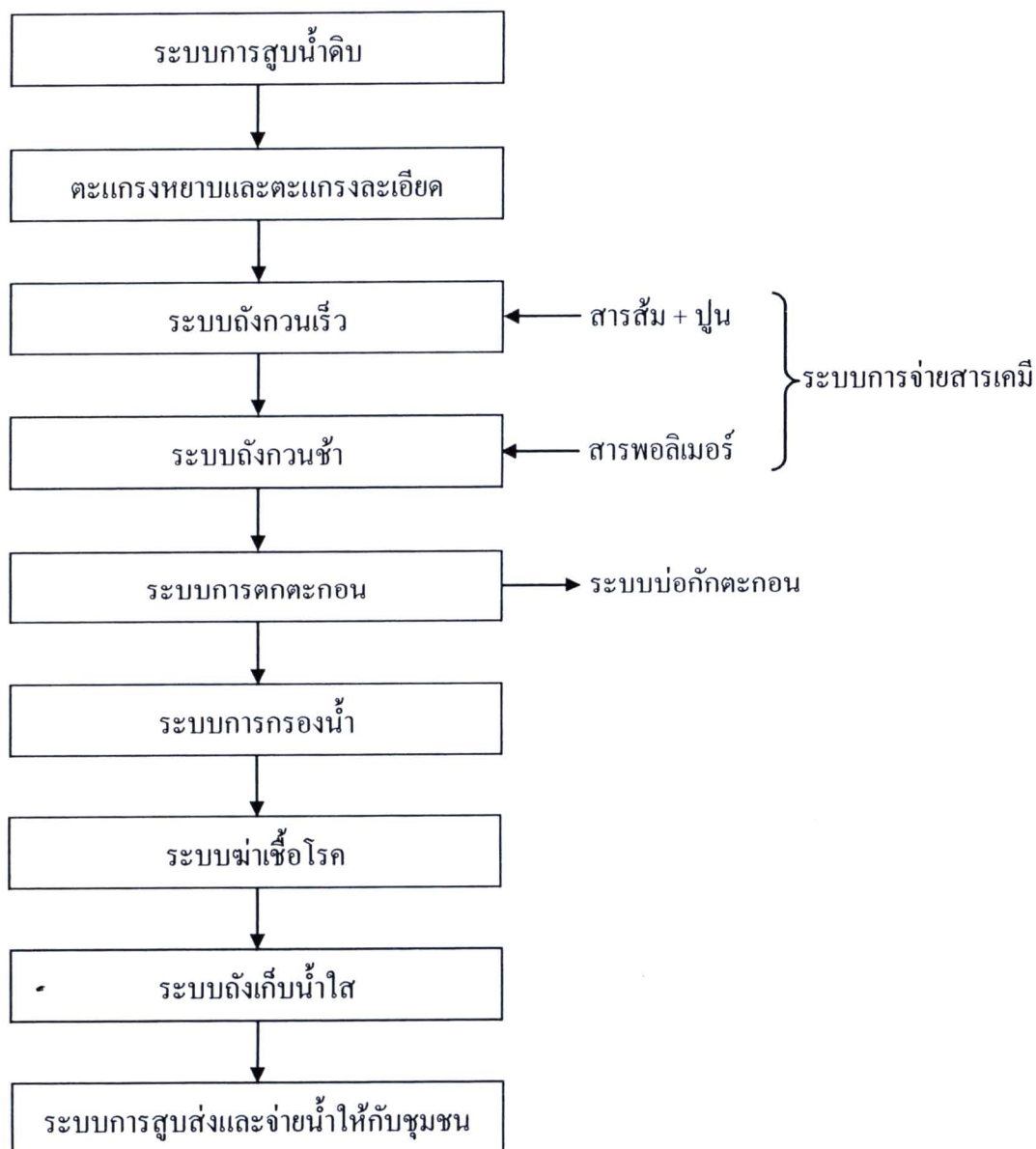
2.1.6 ระบบการสูบส่งและสูบจ่ายน้ำ (Transmission and Distribution System)

โรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน เป็นโรงงานผลิตน้ำและจ่ายน้ำหลักของการประปานครหลวง โดยสถานีสูบส่งน้ำผ่านทางท่อและอุโมงค์สูบส่งน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งสูบส่งน้ำประปาให้แก่สถานีสูบน้ำปลายทางที่กระจายน้ำไปตามสถานีปั๊มต่างๆ ผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0-3.4 m แต่ละสถานีจะมีปั๊มขนาด $13 \times 69 \text{ m}^3$ สูง 12 m ซึ่งเชื่อมกับถังเก็บน้ำใส พื้นที่การใช้งานจะแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ ชั้น Basement และชั้น Overground ชั้น Basement อยู่ลึกลงไปใต้ดิน 3 m ประกอบด้วยปั๊ม 5 ตัว ปั๊มแต่ละตัวมีอัตราการสูบน้ำ $300 \text{ m}^3/\text{min}$ ส่วนชั้น Overground อยู่สูงจากพื้นดินขึ้นไป 9 m และจะถูกสูบน้ำโดยสถานีสูบน้ำซึ่งสูบน้ำประปาให้ผู้ใช้ในพื้นที่ใกล้เคียง โรงงานผลิตน้ำประปา

บางเขน โดยโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนสามารถควบคุมกระบวนการผลิตน้ำประปา สูบส่งและสูบจ่ายด้วยระบบอัตโนมัติรวมศูนย์ที่ห้องควบคุมกลาง

2.1.7 ระบบบ่อกักตะกอน (Sludge Lagoon System)

น้ำตะกอนที่ตกตะกอนจากกระบวนการตกตะกอนและน้ำที่ใช้ล้างตัวกรองซึ่งถูกปั๊มสู่บ่อกักตะกอน จะเข้าสู่กระบวนการตากตะกอน เพื่อให้ตะกอนแห้งพอที่จะขนย้ายต่อไป โดยน้ำมีปริมาณประมาณ $30,000 \text{ m}^3/\text{day}$ จะถูกนำไปรีไซเคิล



รูปที่ 2.1 แผนผังกระบวนการผลิตน้ำประปาของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน [8]

2.2 ตะกอนหรือสลัดจ์ (Sludge)

ตะกอน หมายถึง ของแข็งส่วนเกินที่ได้จากระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการทางกายภาพ หรือกระบวนการทางเคมีและปริมาณของตะกอนจะขึ้นอยู่กับกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยตรง [9]

2.2.1 ลักษณะตะกอนของระบบผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป

ตะกอนที่แยกออกจากรวมน้ำดิบที่ได้จากระบวนการผลิตน้ำประปาเป็นตะกอนที่มาจากการตกตะกอนของสารแขวนลอยในน้ำผิวดิน จากระบวนการที่แตกต่างกันอาจมีลักษณะที่แตกต่างกันด้วย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1 ได้อธิบายเกี่ยวกับตะกอนไว้ว่า [10] ตะกอนจะมีน้ำกับของแข็งผสมอยู่ด้วยกัน โดยมากมักจะมีน้ำมากกว่าของแข็ง เช่น ตะกอนจากระบบผลิตน้ำประปา โดยมีน้ำ 98 ส่วน และของแข็งเพียง 2 ส่วน เท่านั้น ดังนั้นในการกำจัดตะกอนที่มาจากระบบผลิตน้ำประปา ต้องทำการแยกน้ำออกจากตะกอนเปียก เพื่อให้ได้ตะกอนแห้งที่สุด

ตารางที่ 2.1 ตะกอนประเภทต่างๆ จากระบบผลิตน้ำประปาโดยทั่วไป [10]

แหล่งที่เกิด	ประเภทของตะกอน	ปริมาณของแข็ง ในตะกอน	COD (mg/L)	สี
Coagulation	ตะกอนสารส้ม	0.5-2.0	30-5000	น้ำตาลเทา
Flocculation	ตะกอนเหล็ก	0.5-2.0	30-50	น้ำตาล
Chemical Precipitation	Softening Sludge	2-15	ต่ำ	ขาว
ระบบล้างเครื่องกรอง	Back Wash Wastes	0.01-0.1	100	เทา-ดำ

2.2.2 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

ตะกอนที่เกิดขึ้นจากโรงงานผลิตน้ำประปา [10] มาจากระบบต่างๆ ดังนี้

1. ระบบตกตะกอนขั้นต้นด้วยวิธีทางกายภาพ (Pre-Sedimentation)

น้ำดิบโดยทั่วไปจะมีทั้งที่มาจากทราย เศษดิน กรวดเล็กๆ และสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้ว จึงมีการแยกตะกอนต่างๆ ออกจากน้ำดิบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตน้ำประปา

2. ระบบแยกตะกอนของแข็งด้วยวิธีเคมี-กายภาพ (Chemical-Physical Sedimentation)

ตะกอนส่วนใหญ่เกิดจากปูนขาว (Ca(OH)_2) และ โซดาแอช (Na_2CO_3) โดยตะกอนที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2)

3. ระบบสร้างตะกอน-รวมตะกอน (Coagulation-Flocculation)

ตะกอนจากระบบนี้จะมาจากการเติมสารส้มหรือเกลือของเหล็กจำนวนมาก เช่น เติมสารส้มลงไปในระบบ 1 kg จะทำให้เกิดตะกอนประปาเคมี ($\text{Al(H}_2\text{O)}_3\text{(OH)}_3$) ประมาณ 0.44 kg และยังมีตะกอนแขวนลอย ตะกอนจุลินทรีย์ คาร์บอน พอลิเมอร์ และดินเหนียวเพิ่มขึ้นอีก

4. ระบบล้างเครื่องกรอง (Filter Washing System)

ตะกอนจากระบบนี้จะมีปริมาณ 2-3% ของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ระบบ ซึ่งน้ำที่จากการล้างเครื่องกรองจะมีปริมาณตะกอนแขวนลอยไม่สูงมากนัก แต่จะมีตะกอนพวกสารอินทรีย์มากกว่าที่มาจากถังตะกอน

ข้อมูลปริมาณตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำของโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน [5]

ปี (พ.ศ.)	ปริมาณน้ำผลิตจ่าย (m^3)	ปริมาณตะกอน (tons)	ปริมาณเฉลี่ยต่อวัน (tons)
2550	1,221,564,266	59,525	163.08
2549	1,218,438,463	76,519	209.64
2548	1,169,082,291	63,670	174.44
2547	1,087,716,810	83,987	213.61
2546	1,091,575,559	87,714	267.71
2545	1,088,751,325	95,824	262.53
2544	1,070,075,066	118,892	325.73
2543	1,055,192,193	110,968	303.19

2.2.3 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน

1. ผลวิเคราะห์ทางกายภาพ พบว่า มีองค์ประกอบทางกายภาพของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนโดยเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางกายภาพของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน [4]

องค์ประกอบทางกายภาพ	ปริมาณ (g/kg)	ปริมาณ (%)
ทราย	28.1	2.8
ทรายแป้ง	605.0	60.5
ดินเหนียว	366.9	36.7

2. ผลวิเคราะห์ทางเคมี พบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขนแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน [4]

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
SiO ₂	57.00
Al ₂ O ₃	24.8
Fe ₂ O ₃	8.55
CaO	2.01
MgO	1.27
K ₃ O	1.94
Na ₂ O	0.07
SO ₃	0.19
TiO ₂	0.83
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้มากที่สุด (LOI)	3.04

จะเห็นได้ว่าถ้าพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนจากโรงงานผลิตน้ำประปาบางเขน พบว่ามีสัดส่วนของ SiO₂/Al₂O₃ เท่ากับ 2.3 ซึ่งสัดส่วนดังกล่าวนี้ มีความเป็นไปได้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์

2.3 ซีโอไลต์ (Zeolite)

ซีโอไลต์ เป็นที่รู้จักกันครั้งแรกในฐานะที่เป็นกลุ่มแร่ซึ่งถูกค้นพบโดยนักธรณีวิทยาชาวสวีเดนชื่อ Baron Axel Cronstedt ในปี ค.ศ. 1756 เขาได้นิยามซีโอไลต์ว่าเป็นกลุ่มแร่ที่มีโครงสร้างที่มีความเป็นผลึกสูง มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตที่มีประจุลบ (Anionic Aluminosilicate Framework) ที่แข็งแรง มีรูพรุน (Cavities หรือ Pore) และระบบช่องว่างที่ต่อเนื่องกัน (Channel) มีขนาดเฉพาะเจาะจงมากๆ โดยภายในรูพรุนและระบบช่องว่างที่ต่อเนื่องกันนั้นจะเป็นที่อยู่ของไอออนบวกของโลหะ เช่น Na^+ และ K^+ ที่เกาะอยู่กันอย่างหลวมๆ กับโครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตที่มีประจุลบ โดยไอออนบวกเหล่านี้สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่นอกโครงสร้างของซีโอไลต์ (Exchangeable Cation)

นอกจากนี้แล้วที่ว่างภายในโครงสร้างของซีโอไลต์ยังเป็นที่อยู่ของโมเลกุลของน้ำและโมเลกุลของสารอินทรีย์อื่นๆ โดยที่โมเลกุลเหล่านี้ต่างมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนกับโมเลกุลภายนอกโครงสร้างได้ (Exchangeable Guest Molecules) เช่นกัน นอกจากนี้แล้วซีโอไลต์ยังมีสมบัติในการที่จะสูญเสียน้ำในช่องว่างของโครงสร้าง โดยที่โครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตไม่เกิดการเสียหาย ซึ่งจากสมบัติที่เกิดการสูญเสียน้ำนี้เอง พบว่า เมื่อทำการเผากลุ่มแร่นี้เกิดการเดือดคล้ายลักษณะการเดือดของน้ำจึงมีการเรียกชื่อว่า Zeolite โดยที่คำว่า Zeolite มาจากภาษากรีกสองคำ คือ Zeo แปลว่า เดือด และ Lithos แปลว่า หิน จึงเป็นที่มาความหมายว่า หินเดือด [11] นั่นเอง ซีโอไลต์สังเคราะห์ถูกนำไปใช้ประโยชน์มากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ ทั้งนี้เนื่องจากซีโอไลต์สังเคราะห์มีองค์ประกอบที่สม่ำเสมอกว่า เพราะเตรียมขึ้นจากปฏิกิริยาที่มีการควบคุมสภาวะอย่างเหมาะสมเพื่อให้เกิดผลึกจำนวนมากอย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามซีโอไลต์สังเคราะห์มีราคาค่อนข้างแพง จึงมีผู้สนใจศึกษาการปรับปรุงและพัฒนาการใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์ โดยมีการนำวัสดุเหลือทิ้งมาปรับปรุงโดยสังเคราะห์เป็นซีโอไลต์เพื่อลดต้นทุนการนำเข้าและเป็นทางเลือกในการนำซีโอไลต์สังเคราะห์ไปใช้งานให้หลากหลายรูปแบบมากยิ่งขึ้น

2.3.1 โครงสร้างของซีโอไลต์

การจัดเรียงตัวของโครงสร้างซีโอไลต์ขั้นเริ่มต้น จะเริ่มจากโครงสร้างปฐมภูมิที่มีลักษณะเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ของอะลูมิเนียมออกซิเจนเตตระฮีดรอล (AlO_4) และซิลิกอนออกซิเจนเตตระฮีดรอล (SiO_4) ซึ่งประกอบกันเป็นอะลูมิโนซิลิเกต เมื่อโครงสร้างปฐมภูมิจoinการเชื่อมต่อของออกซิเจนอะตอม การจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างทุติยภูมิ และต่อเนื่องกันไปแบบไม่สิ้นสุดเป็นโคโพลิเมอร์ (Copolymer)

สูตรอย่างง่ายของซีโอไลต์ คือ $M_{2/n}O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$

n คือ วาเลนซ์ของแคตไอออน (M) ส่วนมากจะเท่ากับ 1 หรือ 2 หรือเป็นโลหะอัลคาไลด์เอิร์ด

x คือ จำนวนโมลของ SiO_2 มักจะมีค่าเท่ากับหรือมากกว่า 2

y คือ จำนวนโมลของน้ำที่มีอยู่ในช่องว่างของผลึกซีโอไลต์

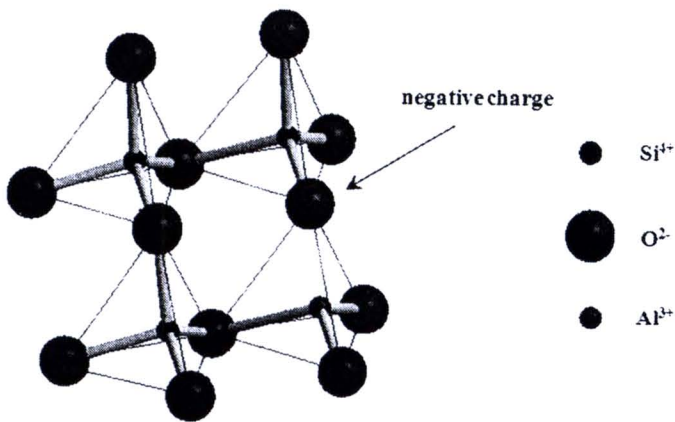
สูตรและหน่วยเซลล์ของซีโอไลต์ คือ $M_{2/n}[(AlO_2)_x \cdot (SiO_2)_y] \cdot wH_2O$

n คือ วาเลนซ์ของไอออนบวก (M)

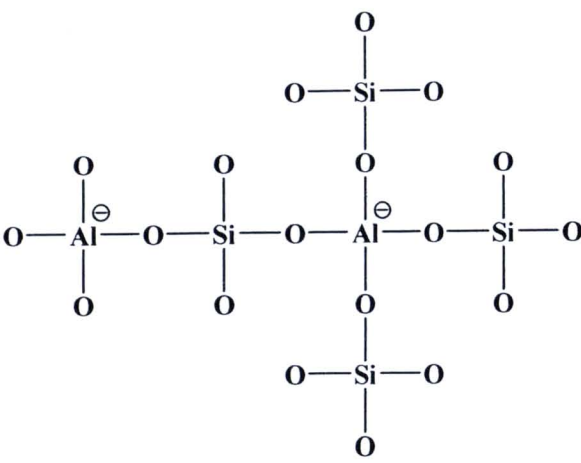
w คือ จำนวนโมลต่อหน่วยเซลล์

x+y คือ จำนวนรูปของเตตระฮีดรอลทั้งหมดของหน่วยเซลล์

y+x คือ จำนวนที่มีค่าตั้งแต่ 1-5 โดยขึ้นกับโครงสร้าง ซึ่งลักษณะโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 รูปทรงเตตระฮีดรอลของออกซิเจน โคออดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม [12]



รูปที่ 2.3 โครงสร้าง 2 มิติของอะลูมิโนซิลิเกต [12]

SiO₄ มีประจุลบสี่และ AlO₄ มีประจุลบห้า การเชื่อมต่อของ SiO₄ และ AlO₄ เป็นโครงข่ายทำให้มีประจุลบเกิดขึ้น เนื่องจาก Al³⁺ เข้าไปแทนที่ Si⁴⁺ ในโครงข่ายซึ่งถูกทำให้สมดุลจากแคตไอออนของโลหะอัลคาไลด์หรืออัลคาไลด์เอิร์ธ แสดงดังสมการที่ 2.1

$$(SiO_2)_n \longrightarrow x_{xm}(AlO_2)_x(SiO_2)_{n-x}$$

(2.1)

- เมื่อ
- m คือ แคตไอออนของโลหะที่มีไอออน ⁺M

x คือ จำนวนอะตอมของอะลูมิเนียม (Al)

n คือ จำนวนโมล SiO₂

โครงข่ายซีโอไลต์เป็นแบบเปิด ประกอบด้วยช่องว่าง (Channels) และโพรง (Interconnected Void) ที่สม่ำเสมอจำนวนมาก ซึ่งมีประจุบวกของแคตไอออน และโมเลกุลของน้ำเกาะเชื่อมอยู่ภายใน แคตไอออนนี้สามารถแลกเปลี่ยนกับแคตไอออนอื่นได้ คือ มีสมบัติเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchanger) เมื่อโมเลกุลของน้ำผ่านเข้ามาในช่องว่างทำให้ไอออนที่อยู่ในสารละลายสามารถแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในโครงข่ายได้ ซึ่งสมบัติดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในกระบวนการแก้ความกระด้างของน้ำ (Water Softening) และการปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Water Treatment) นอกจากนี้มีโลหะหนักอื่นๆ เช่น ตะกั่ว (Pb) ปรอท (Hg) แคดเมียม (Cd) ซิลเวอร์ (Ag) ไอออน ก็สามารถแลกเปลี่ยนได้เช่นกัน

ซีโอไลต์เมื่อได้รับความร้อน โมเลกุลของน้ำภายในช่องว่างจะหลุดออกมา และน้ำจะระเหยออกมาอย่างต่อเนื่อง โดยโครงสร้างของโมเลกุลไม่เปลี่ยนแปลงหรือบอบสลาย และหลังจากไล่น้ำออกไปแล้ว ช่องว่างในโมเลกุลสามารถถูกเติมด้วยน้ำได้เช่นเดิม นอกจากนี้ซีโอไลต์ได้ชื่อว่าเป็น Molecular Sieve เนื่องจากโมเลกุลของซีโอไลต์มีช่องว่างที่สม่ำเสมอจำนวนมาก สามารถแสดงสมบัติคล้ายตะแกรงร่อนในโมเลกุลซึ่งมีขนาดช่องว่างที่สม่ำเสมอ 3-10 Å ซึ่งต่างจากวัสดุดูดซับตัวอื่นๆ เช่น Activated Carbon Activated Alumina และ Silica Gel ซึ่งไม่มีโครงสร้างที่เป็นผลึก (Crystal Structure) และช่องว่างระหว่างโมเลกุลไม่สม่ำเสมอ อาจมีตั้งแต่ 20-50 Å หรือ 20-1,000 Å และซีโอไลต์แสดงสมบัติเป็นสารดูดซับ (Adsorbent) ที่ดีสามารถแยกก๊าซและไอของของผสม เช่น แอมโมเนีย ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น กระบวนการดูดซับ (Adsorption) จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างและขนาดโมเลกุลของวัสดุดูดซับหรือซีโอไลต์นั่นเอง [13]

2.3.2 ประเภทของซีโอไลต์

ซีโอไลต์ [5] สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้



2.3.2.1 ซีโอไลต์ธรรมชาติ (Natural Zeolite)

ซีโอไลต์ธรรมชาติพบทั้งที่อยู่บนผิวโลกและใต้มหาสมุทร โดยจะพบมากในโพรงหินบะซอลต์ (Basalt) และหินภูเขาไฟ (Volcanic Rock) ซีโอไลต์ที่พบตามธรรมชาติมีอยู่ประมาณ 50 ชนิด ได้มีการให้ชื่อซีโอไลต์ที่ค้นพบแต่ละชนิดตามสมบัติ เช่น โครงสร้าง และองค์ประกอบ ตัวอย่าง ซีโอไลต์สามารถแบ่งชนิดได้ตาม Hydrological System ได้ดังนี้ คือ

1. Saline, Alkaline Lakes แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ บริเวณที่แห้งแล้ง (Arid Region) และบริเวณที่มีฝนตกน้อย (Semiarid Region) การตกตะกอนนี้จะทำให้เกิดระบบ Close Resin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของวัสดุประเภทหิน (Clastic Material) และพื้นที่ขอบลุ่มน้ำ (Basin Edge) สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนที่สำคัญในการควบคุม Lake Chemistry
2. Saline, Alkaline Soil ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ เกิดการก่อตัวบริเวณที่แห้งแล้ง และบริเวณที่มีฝนตกน้อย การเกิดซีโอไลต์เกิดจากการระเหยของน้ำที่ผิวดินโดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดินแล้วจะละลายโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไคคลาร์บอเนตทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น และทำให้เกิดอะลูมิโนซิลิเกตในพื้นดิน
3. Marine Sediment เกิดจากตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้อุณหภูมิต่ำ และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เป็นกลาง
4. Open Hydrological System เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่านโพรง Pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับเถ้า Vitric

5. Hydrothermal System เกิดจากระบบที่มีอัลคาไลต์กับสารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความสามารถในการเปียกได้ของแร่หิน และลักษณะของไหลที่ไหลผ่านในส่วนต้น และเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด Mordenite และชนิด Clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด Analcime และชนิด Laumontite ซึ่งระบบนี้จะมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยกำหนดการตกตะกอนเดิมได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการทำกระดาษ และการแยกโมเลกุลในก๊าซแอมโมเนีย

6. Burial Diagenetic System ซีโอไลต์ชนิดนี้อยู่ในตะกอนจากภูเขาไฟ (Volcanolastic Sediment)

7. Magmatic System เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกระหว่างชั้นหินแมกมาที่เกิดจากปฏิกิริยาของของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างในซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟในประเทศเยอรมัน โดยช่องว่างภายในผลึกจะเต็มไปด้วยซีโอไลต์ชนิด Analcime ชนิด Clinoptilolite ชนิด Erionite ชนิด Harmotome และชนิด Phillipsite

ซีโอไลต์ธรรมชาติเดิมนำมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้าง ในทางอุตสาหกรรมกระดาษใช้เป็นสารเติมแต่ง (Filler) และใช้เป็นตัวแยกโมเลกุลในอุตสาหกรรมแยกก๊าซธรรมชาติ และแยกแอมโมเนียในขบวนการกำจัดน้ำเสีย เป็นต้น

2.3.2.2 ซีโอไลต์สังเคราะห์ (Synthetic Zeolite)

ซีโอไลต์สังเคราะห์ เกิดจากการทำปฏิกิริยาของเบสออกไซด์ต่างๆ เช่น Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O และ K_2O ในระบบที่มีน้ำเพื่อให้ได้ซีโอไลต์ที่มีน้ำในผลึก และการสังเคราะห์สามารถทำให้เกิดขึ้นได้ทั้งที่เป็นเจล (Gelation) เป็นรูพรุน (Porous) และลักษณะคล้ายเม็ดทราย (Sandlike) ซึ่งการควบคุมปัจจัยจะทำให้เกิดผลึกจำนวนมากอย่างสม่ำเสมอ [11] ซีโอไลต์สังเคราะห์มีมากกว่า 150 ชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด A ชนิด Y ชนิด L ชนิด F และชนิด M เป็นต้น ประโยชน์จากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ได้ซีโอไลต์สังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ซีโอไลต์สังเคราะห์เหมาะสมสำหรับงานวิจัย และมีประโยชน์กับอุตสาหกรรมมากกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติเนื่องจากโครงสร้างของซีโอไลต์สังเคราะห์จะเป็นแบบเดียวกันมากกว่าและยังมีความบริสุทธิ์สูงกว่า มีสารเจือปนน้อย เช่น เหล็ก ซึ่งซีโอไลต์ธรรมชาติจะมีเหล็กปนอยู่มากกว่า ซีโอไลต์สังเคราะห์สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบหลักของซิลิกา และอะลูมินา เป็นหลัก ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากสังเคราะห์ซีโอไลต์จากวัตถุดิบต่างๆ เช่น จากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษ [11] ถ้ำถ่านหิน [12; 14] ถ้ำลอยขานอ้อย [15] ตะกรันจากโรงงานหลอมโลหะ [16] และตะกรันจากกระบวนการผลิตกระดาษ [17] เป็นต้น

2.3.3 องค์ประกอบหลักของการสังเคราะห์ซีโอไลต์ [5]

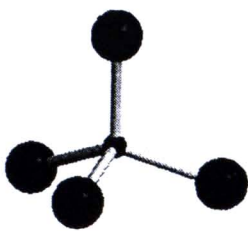
1. แหล่งของอะลูมิเนียม การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลองมักใช้ Metal Aluminates เป็นสารตั้งต้น เช่น โซเดียมอะลูมิเนต ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) หรือแหล่งแร่อะลูมิเนียมตามธรรมชาติ เช่น แก้วเฟลด์สปาร์ (Feldspar)
2. แหล่งของซิลิกอน มักใช้สารละลายของซิลิกา เช่น Sodium Metasilicates Pentahydrate ซิลิกาโซล (Silica Sols) เช่น ซิลิกา 30% โดยน้ำหนัก บางครั้งอาจใช้ซิลิกาเจล แก้วทราย หรือแร่ควอตซ์
3. แหล่งไอออนบวก ได้แก่ ไอออนโลหะหมู่ 1 และ 2 ที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์หรืออาจเป็นสารประกอบออกไซด์และเกลือโลหะหมู่ 1 และ 2
4. สารเคมีอื่นๆ เช่น สารประกอบอินทรีย์ (Organic Compound) ที่แตกตัวให้แคตไอออนซึ่งเรียกว่า สารโครงสร้าง (Template) โดยใส่ในเจลเพื่อช่วยในการตกผลึกของซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียม เตตระโพรพิลแอมโมเนียม เป็นต้น

2.3.4 การแบ่งประเภทของซีโอไลต์ [11]

2.3.4.1 การแบ่งประเภทซีโอไลต์ตามลักษณะโครงสร้าง

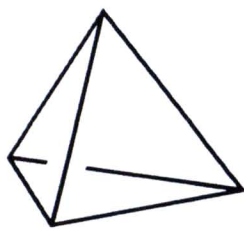
1. โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary Building Unit: PBU)

โครงสร้างปฐมภูมิ เป็นหน่วยพื้นฐานที่สุดของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโครงสร้างทรงสี่เหลี่ยมสี่หน้าของซิลิกาและอะลูมินา โดยความยาวของพันธะและมุมระหว่างพันธะของซิลิกอนกับออกซิเจนหรืออะลูมิเนียมกับออกซิเจนเป็นตัวกำหนดโครงสร้างและชนิดของซีโอไลต์ แสดงดังรูปที่ 2.4



(a)

Ball&stick Model



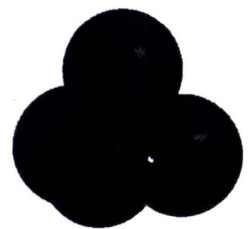
(b)

Solid Tetrahedral



(c)

Skeletal Tetrahedral



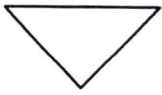
(d)

Space Filling Model

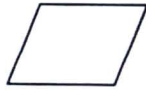
รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างปฐมภูมิ [11]

2. โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary Building Unit: SBU)

โครงสร้างทุติยภูมิ เป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนมากขึ้น โดยเกิดจากการต่อกันของโครงสร้างปฐมภูมิต่อกันเป็นสี่เหลี่ยมต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.5



Single Three-Ring
(S3R)



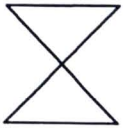
Single Four-Ring
(S4R)



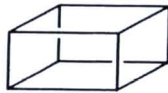
Single Six-Ring
(S6R)



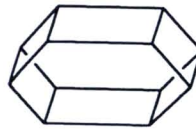
Single Eight-Ring
(S8R)



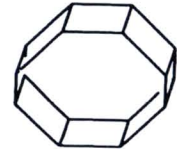
Spiro-5



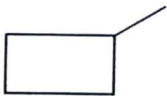
Double Four-Ring
(D4R)



Double Six-Ring
(D6R)



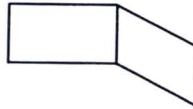
Double Eight-Ring
(D8R)



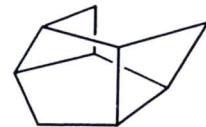
Complex 4-1



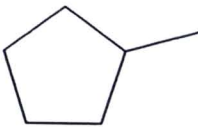
Complex 4-1



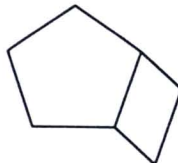
Complex 4-2



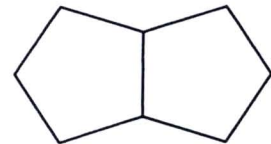
Complex 4-4 = 1



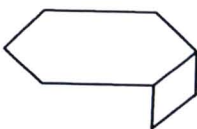
Complex 5-1



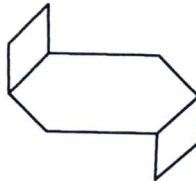
Complex 5-2



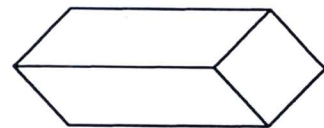
Complex 5-3



Complex 6-2



Complex 2-6-2



Complex 6-1

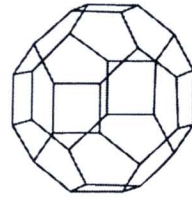
รูปที่ 2.5 ชื่อของหน่วยทุติยภูมิของซีโอไลต์แต่ละหน่วยและสัญลักษณ์ย่อ [11]

3. โครงสร้างตติยภูมิ (Tertiary Building Unit: TBU)

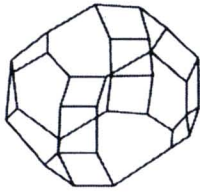
โครงสร้างตติยภูมิหรือหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า ซึ่งเป็นโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกตของซีโอไลต์ โดยทั่วไปมักเกิดจากหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปจะทำให้เกิดหน่วยย่อยของโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น รูปทรงยี่สิบหกหน้าหรือ α (Truncated Cubooctahedral) รูปทรงแปดหน้ามุมตัดหรือ β (Truncated Octahedral) รูปทรงสิบแปดหน้าหรือ γ (18-Hedron) และรูปทรงสิบเอ็ดหน้าหรือ ϵ (11-Hedron) แสดงดังรูปที่ 2.6



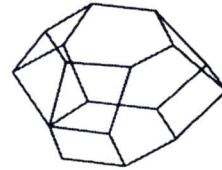
(a) α (Truncated Cubooctahedral)



(b) β (Truncated Octahedral)



(c) γ (18-Hedron)



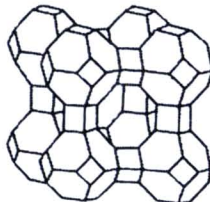
(d) ϵ (11-Hedron)

รูปที่ 2.6 ลักษณะหน่วยย่อยของโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าขนาดใหญ่ [11]

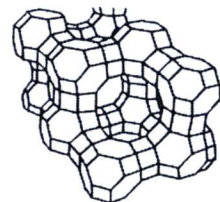
ลักษณะเป็นทรงเหลี่ยมหลายหน้า (Polyhedral) ที่มีสมมาตรสูง ซึ่งเป็นหน่วยทรงเหลี่ยมหลายหน้าชนิดทรงโซดาไลต์ (Sodalite Cage) ที่มีรูปร่างแบบทรงสี่เหลี่ยมแปดหน้าถูกัดมุมออกและเกิดเป็นทรงสี่เหลี่ยมสิบสองหน้า (Icosahedral) แสดงดังรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8



(a) Sodalite

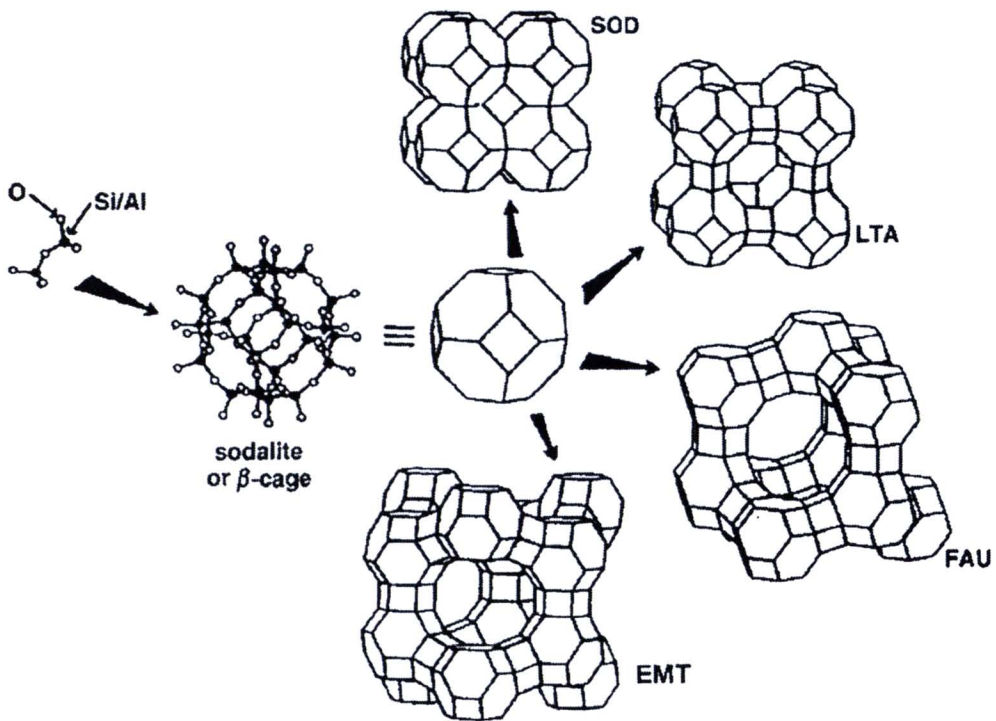


(b) Zeolite Type A



(c) Faujasite (Type XY)

รูปที่ 2.7 โครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกตของซีโอไลต์ [11]



รูปที่ 2.8 โครงข่ายอะลูมิโนซิลิเกตที่เกิดจากการเรียงตัวกันในรูปแบบต่างๆ กัน [13]

2.3.4.2 การแบ่งประเภทซีโอไลต์ตามลักษณะการเชื่อมโยงกันของโครงสร้าง [16]

1. **Analcite Group** เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-Ring กับ 6-Ring โดยจะมี 2 รูปแบบ คือ Analcite และ Laumontite
2. **Natrolite Group** มีลักษณะโครงสร้างเป็นสายโซ่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-Ring จำนวน 4 วง โดยการเชื่อมต่อกันจะมี 3 รูปแบบ คือ Natrolite Edingtonite และ Thosonite
3. **Chabazite Group** โครงสร้างประกอบไปด้วย 6-Ring ต่อขนานกัน ซึ่งเชื่อมต่อกันมาหลายรูปแบบ เช่น Offerite และ Erionite
4. **Philisite Group** โครงสร้างประกอบด้วย 4-Ring ที่ต่อขนานกันเป็นแบบ U (Up) และ D (Down) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ
5. **Heulandire Group** โครงสร้างเกิดจาก 5-Ring 4 วงต่อเชื่อมกับ 4-Ring 2 วง ซึ่งเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม ถ้าการเชื่อมโยงผ่านโครงสร้างตรงกลางรูปแบบพันธะซึ่งเมื่อเชื่อมต่อกันเป็นแบบ Brewsterite การเชื่อมต่อของบล็อกโดยผ่านโครงสร้างกลางในแนวตั้งจะทำให้เกิดโครงสร้างซึ่งเป็นส่วนประกอบของ Heulandite และ Stibite ซึ่งโครงสร้างเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่เป็น 5-Ring ในบางส่วน

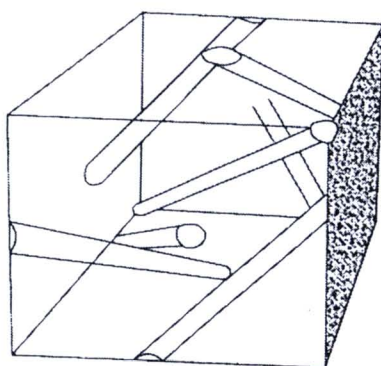
6. **Mordenite Group** โครงสร้างจะประกอบด้วย 5-Ring 4 วง ต่อเชื่อมกันเป็นโครงสร้างกลางของกลุ่ม กลุ่มนี้จะมีทั้งหมด 7 รูปแบบ คือ Mordenite Epstillbite Ferrierite Bikitaite และ Dachiardite
7. **Faujasite Group** ในกลุ่มนี้แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ซีโอไลต์ชนิด A Sodalite และ ZK-5
8. **Melanophlogite Group** ในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยซีโอไลต์ชนิด ZSM-39 และ Melanophlogite ซึ่งแต่ละหน่วยที่ประกอบเป็น Melanophlogite และ ZSM-39 จะมีหลายรูปแบบ เช่น 12-Hedron 14- Hedron และ 15-Hedron
9. **Lovdarite Group** เป็นซีโอไลต์ที่โครงสร้างเกิดจากการเชื่อมต่อกันของ 4-Ring และ 8-Ring

2.3.5 สมบัติภายในโครงสร้างของซีโอไลต์

2.3.5.1 ช่องว่างภายในโครงสร้างของซีโอไลต์

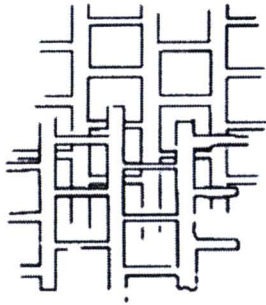
ธรรมชาติของช่องว่างที่เชื่อมต่อกันในซีโอไลต์ที่ถูกไถ่น้ำออกหมดแล้วจะเป็นตัวการสำคัญในการกำหนดสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซีโอไลต์ ซึ่งสามารถกักเก็บน้ำได้สูงและมีความหนาแน่นต่ำปริมาตรช่องว่างจะมากเมื่อถูกดึงน้ำออกจากโครงสร้าง ระบบช่องว่างในโครงสร้างมีอยู่ 3 ระบบ [11] สามารถอธิบายได้ ดังนี้

1. ระบบช่องว่างใน 1 มิติ (One-Dimensional System) ช่องว่างในระบบนี้จะไม่ตัดกันเลย เช่น ในช่องว่างใน Analcime แสดงดังรูปที่ 2.9

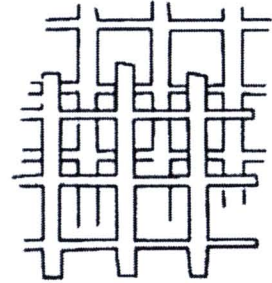


รูปที่ 2.9 ช่องว่างในโครงสร้างของ Analcime [11]

2. ระบบช่องว่างใน 2 มิติ (Two-Dimensional System) จะพบในช่องว่างแบบนี้ในซีโอไลต์ในกลุ่มที่ 5 6 และ 7 แสดงดังรูปที่ 2.10



(a) Mordenite

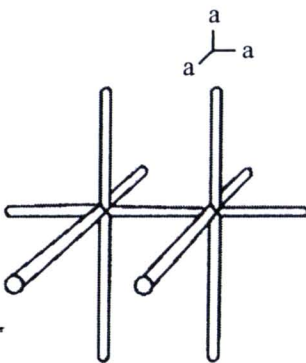


(b) Natrolite

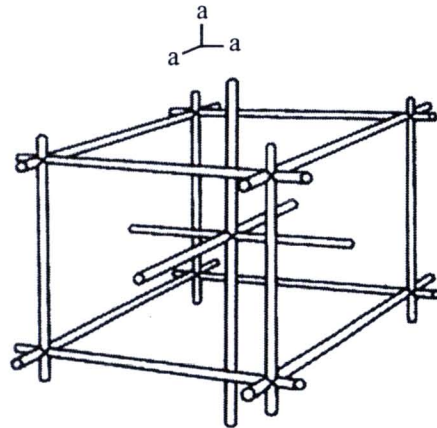
รูปที่ 2.10 ลักษณะช่องว่างในระบบ 2 มิติ [11]

3. ระบบช่องว่างใน 3 มิติ (Three-Dimensional System) ระบบนี้มีการตัดกันของช่องว่างภายในซีโอไลต์ แสดงดังรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

- (1) มีช่องว่างเท่ากันในทุกทิศทาง (Equidimensionals) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างเท่ากันหมดโดยไม่คำนึงถึงทิศทาง เช่น ซีโอไลต์ชนิด A
- (2) มีการตัดกันของช่องว่าง แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างที่เท่ากันขึ้นอยู่กับทิศทางการเกิดผลึก เช่น Gmelinite (รูปที่ 2.12 (b)) และ Levynite (รูปที่ 2.1 (d))

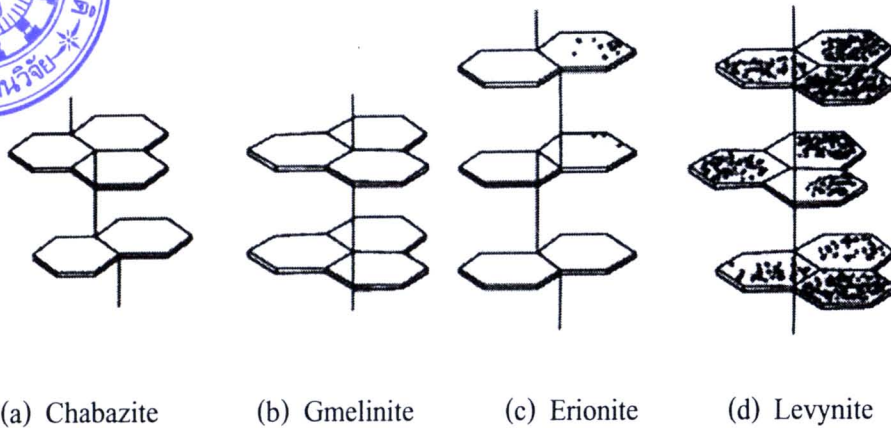


(a) ซีโอไลต์ชนิด A



(b) สองระบบที่มีขนาดเท่ากันแต่ไม่ตัดกัน

รูปที่ 2.11 ลักษณะช่องว่างในระบบ 3 มิติ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างเท่ากัน [11]



รูปที่ 2.12 ลักษณะช่องว่างในระบบ 3 มิติ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างไม่เท่ากัน [11]

2.3.6 ประโยชน์ของซีโอไลต์

การใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์จะถูกกำหนดด้วยสมบัติพื้นฐานในระดับโมเลกุลของสาร ซึ่งมีอยู่ 3 ด้านหลักๆ ด้วยกัน ได้แก่ เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysis) [18] ปัจจุบันซีโอไลต์สังเคราะห์มีประโยชน์และบทบาทในงานด้านต่างๆ [16] ดังนี้

1. ใช้ในการดูดซับ (Adsorption)

ใช้ทั้งในการทำแห้ง (Dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (Purification) และการแยกสาร (Separation) ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี เช่น กระบวนการ Drying ของก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) โดยแยกคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบซัลเฟอร์จากธรรมชาติ แยกสารที่ทำให้เกิดมลภาวะ เช่น SO_2 และ NO_2 เป็นต้น เนื่องจากสมบัติที่มีความพรุนมากในโมเลกุลของซีโอไลต์ จึงสามารถดูดซับโมเลกุลอื่นๆ ได้ดีมาก โดยอาศัยความแตกต่างของขนาดและรูปร่างของโมเลกุลในการแยกสารต่างๆ ออกจากกัน

2. ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรม (Catalyst)

ใช้เป็น Cracking Catalyst ในอุตสาหกรรมน้ำมัน โดยเป็นสารเร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนเมทานอลเป็น Gasoline และยังใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนให้มีสมบัติเฉพาะเจาะจงมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำซีโอไลต์มาเป็นตัวรีฟอร์มมิ่ง การกำจัดไขในน้ำมัน การเติมหมู่อัลคิลในเบนซีนและการเปลี่ยนไอโซเมอร์ของไซลีน

3. ใช้เป็นสารในการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

ใช้แยกสาร Radio-Isotope จากกากของเสีย กำจัดแอมโมเนียในน้ำทิ้ง กำจัดสารโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว เหล็ก พรอท เป็นต้น

4. ใช้เป็นสารลดความกระด้าง (Water Softener)

ซีโอไลต์ใช้เป็นตัวลดความกระด้างของน้ำเนื่องจากในน้ำกระด้างจะมีแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนละลายอยู่ ซึ่งซีโอไลต์สามารถแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนในโครงสร้างผลึกกับแคลเซียมไอออน และแมกนีเซียมไอออนได้

5. ใช้ทางการแพทย์ (Medical Material)

ใช้ในการแยก O_2 จากอากาศเพื่อให้ได้ออกซิเจนบริสุทธิ์ไว้ใช้ในการแพทย์

6. ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง (Construction Industry)

ซีโอไลต์เป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบที่เหมาะสมเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง โดยนำไปเป็นวัสดุปอซโซลานในงานด้านคอนกรีต

7. ใช้เป็นส่วนผสมในซักฟอก (Detergent Builders)

ซีโอไลต์มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับผสมทำผงซักฟอก คือ มีค่าความจุ (Capacity) และจลศาสตร์ (Kinetics) ทำให้การแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนเกิดขึ้นได้มากและเร็วช่วยให้ผ้าขาวสะอาด นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้แทนฟอสเฟตที่ผสมเป็นส่วนผสมในผงซักฟอกได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการช่วยลดปัญหาภาวะการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของพืชน้ำหรือสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดปัญหาในการกำจัดเมื่อมีการตายและทับถมกันมาก จะทำให้น้ำเน่าเสียและปริมาณสัตว์น้ำลดลงได้ เนื่องจากขาดออกซิเจนในการย่อยสลาย [14]

8. ใช้ด้านการเกษตรกรรม (Agricultural Material)

ซีโอไลต์มีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารและศักยภาพในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนซึ่งเป็นธาตุอาหารพืชได้หลายชนิด จึงได้มีการริเริ่มนำเอาซีโอไลต์มาผสมในการผลิตปุ๋ยเพื่อช่วยชะลอการปลดปล่อยธาตุอาหารให้กับพืชอย่างช้าๆ (Slow Release Fertilizer: SRF) โดยเฉพาะอย่างยิ่งนำมาใช้ในการตรึงไนโตรเจนที่อยู่ในปุ๋ยไม่ให้ถูกชะละลายจากดินอย่างรวดเร็ว และช่วยในการชะลอการชะละลายปุ๋ยลงสู่ผิวดินและน้ำใต้ดิน รวมทั้งการสลายตัวของหินฟอสเฟตทำให้เพิ่มระดับของฟอสฟอรัสในรูปที่พืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้เพิ่มมากขึ้น ซีโอไลต์มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมไอออนสูง การเติมซีโอไลต์ให้แก่ดินจึงเท่ากับเป็นการเพิ่มความสามารถของดินใน

การอุ้มน้ำและปลดปล่อยแร่ธาตุที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกหลายชนิด เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม เหล็ก แมงกานีส และธาตุอาหารเสริมอื่นๆ ยังมีการใช้งานซีโอไลต์ในประโยชน์ด้านอื่นๆ อีก เช่น ดูดซับสารพิษตกค้าง ลดความเป็นพิษในดินที่มีสาเหตุจากสารตกค้างของยากำจัดศัตรูพืชและช่วยให้ดินร่วนซุย ดินซึมผ่านน้ำได้ง่าย ระบายน้ำได้ดี และในแวดวงการเลี้ยงสัตว์ ได้มีการทดลองนำซีโอไลต์มาเติมในสูตรอาหารเป็นการเพิ่มสารจำพวกแร่ธาตุที่สัตว์ต้องการใช้ในการเจริญเติบโต ไม่ว่าจะเป็น โคนม โคเนื้อ หมู เกะ เป็ด และไก่ เป็นต้น ซีโอไลต์ยังสามารถดูดซับสารพิษออกจากทั้งตัวอาหารสัตว์และอวัยวะในระบบย่อยอาหาร นอกจากนั้น ซีโอไลต์ยังมีผลในการกระตุ้นให้ระบบย่อยและดูดซึมอาหารของสัตว์เหล่านั้น ทำงานได้ดีขึ้นอีกด้วย และที่สำคัญยังช่วยลดกลิ่นเหม็นของมูลสัตว์ที่ขับถ่ายออกมา

เนื่องจากซีโอไลต์มีมากมายหลายชนิดและโครงสร้างที่แตกต่างกันของซีโอไลต์แต่ละชนิด จึงทำให้ซีโอไลต์แต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกันและเหมาะในการใช้งานที่แตกต่างกัน ดังนั้น การเลือกใช้ซีโอไลต์ในด้านใด ควรศึกษาสมบัติให้เหมาะสมก่อน เพื่อให้สามารถใช้งานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.3.7 ซีโอไลต์ชนิด A

ซีโอไลต์ชนิด A จัดเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ในกลุ่มที่ 3 ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นแบบ D₄R ตามการจัดจำแนกของ Break แสดงดังตารางที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วยรูปทรงหลายเหลี่ยม 2 ชนิด [16] คือ

- 1. การจับตัวกันเป็นรูปทรงลูกบาศก์ 2 รูป ของทรงสี่หน้า หรือ D₄R
- 2. การจับตัวกันด้วย 24 รูปทรงสี่หน้าเป็นรูปทรงกรวยแปดหน้ามุมตัด หรือ β

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลของซีโอไลต์ชนิด A [16]

Structure Group: 3
Chemical Composition
Typical Oxide Formula: Na ₂ O*Al ₂ O ₃ *2SiO ₂ *4.5H ₂ O
Typical Unit Cell Contents: Na ₁₂ [(AlO ₂) ₁₂ *(SiO ₂) ₁₂ *27H ₂ O, Pseudo Cell and 8X for True Cell.
Variation: Si/Al = 0.7-1.2 ; Occlusion of NaAlO ₂ in β cages

ตารางที่ 2.5 ข้อมูลของซีโอไลต์ชนิด A [16] (ต่อ)

Crystallographic Data

Symmetry: Cubic

Density: 1.99 g/cc

Unit Cell Volume: $1,870 \text{ \AA}^3$, Pseudo Cell

Structure Properties

Framework: Cubic array of β cages linked by D_4R Units.

SBU: D_4R

Void Volume: 0.47 cc/cc

Cage Type: α , β

Framework Density: 1.27 g/cc

Hydrate-Free Apertures: At Chanel intersection coordinate to 4 H_2O and 2 Cations.

Dehydrated-

Free Apertures : 2.2 $\text{\AA}$ into β -cage and 4.2 $\text{\AA}$ into α -cage

Cation Location : 8SI on 6-rings, 4 Cation with H_2O in the 8-Rings

Effect of Dehydration : None on Framework, 4 Cation move to SII

Location of H_2O molecules : Dodecahedral arrangement in α -cage 4 molecules in β cages

Largest molecules adsorbed : C_2H_4 at RT, O_2 at -183°C

Kinetic Diameter, σ , $\text{\AA}$: 2.6

2.3.7.1 องค์ประกอบของซีโอไลต์ชนิด A

ซีโอไลต์ชนิด A ประกอบด้วย 24 รูปของทรงสี่หน้าเป็น 12 รูปของ AlO_4 และ 12 รูปของ SiO_4 และมีน้ำบรรจุอยู่ 27 โมเลกุล โดยมีการสลับกันไปของ AlO_4 และ SiO_4 ภายในโมเลกุล ทั้งนี้เพราะอัตราส่วนของ Si/Al เป็น 1:1 โดยปกติแล้วซีโอไลต์ชนิด A จะถูกสังเคราะห์อยู่ในรูปของ Na^+

2.3.7.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A

ซีโอไลต์ชนิด A ถูกเตรียมขึ้นภายใต้สภาวะไฮโดรเทอร์มอล โดยมีสารประกอบโลหะของอะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีน้ำอยู่มากหรือที่เรียกว่า เจล ซึ่งเตรียมจากสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย สารตั้งต้น และสารอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ว่องไว ซึ่งใช้ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยการตกผลึกในระบบจะ

มีสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย และต้องมีส่วนผสมทางเคมีที่เหมาะสม โดยสภาวะโดยทั่วไปของการสังเคราะห์ซีโอไลต์ มีดังนี้

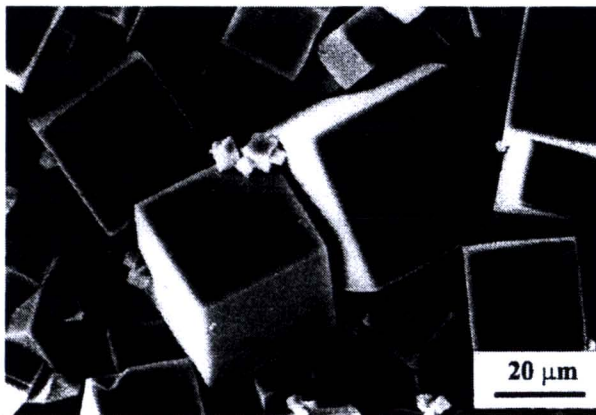
1. มีสารตั้งต้นที่ว่องไว
2. มีการทำปฏิกิริยาที่มีค่า pH สูง
3. มีอุณหภูมิ และความดันในการทำปฏิกิริยาค่ำ
4. มีส่วนประกอบของเจลที่มีความเข้มข้นอิ่มตัวยิ่งยวด เพื่อทำให้เกิดการตกผลึกได้ง่าย

โดยกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A ที่นิยมใช้ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล มี 2 วิธี คือ

1. **Hydrogel Process (Precipitation Process)** เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A ที่ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงในระยะเวลาที่กำหนดไว้
2. **Clay Conversion (Digestion Process)** เป็นการสังเคราะห์โดยการแปรสภาพดินขาว หรือเคลดิน โดยการเผาที่อุณหภูมิ 500-600° C และนำมาทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH

2.3.7.3 สมบัติทางกายภาพของซีโอไลต์ชนิด A

1. รูปร่าง (Morphology) ของผลึก โดยปกติจะเป็นแบบ Penetration Twins หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Fluorspar Twins แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ภาพถ่าย SEM ของซีโอไลต์ชนิด A [19]

2. ขนาดอนุภาค (Particle Size) มีการกระจายของอนุภาคอยู่ในช่วงระหว่าง 1-10 μm
3. ความหนาแน่น โดยทั่วไปอยู่ในช่วงระหว่าง 1.9-2.3 g/mL และจะเปลี่ยนไปตามชนิดของไอออนของโลหะและปริมาตรรูพรุน
4. ขนาดรูพรุน จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET Surface Area มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 0-4

2.3.7.4 สมบัติทางเคมีของซีโอไลต์ชนิด A

1. การทำปฏิกิริยากับเบสแก่ (Reaction With Strong Base) ซีโอไลต์ชนิด A สามารถเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์ชนิด P ที่เสถียรมากกว่าได้ โดยทำปฏิกิริยากับด่างในสภาวะที่เหมาะสม และสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้เป็นซีโอไลต์ชนิด HS ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A พบว่า มีการเกิดซีโอไลต์ชนิด P ร่วมด้วยเสมอ การสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด P ไม่สามารถเปลี่ยนกลับมาเป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด A ได้อีก แต่จะเปลี่ยนเป็นซีโอไลต์ชนิด HS หรืออาจจะพบเห็นการเกิดซีโอไลต์ชนิด A ร่วมกับซีโอไลต์ชนิด HS [20]
2. สมบัติการดูดซับ (Adsorption Capacity) เมื่อทำการไล่น้ำออกจากโมเลกุลของซีโอไลต์ โดยให้ความร้อนที่ 305-400° C เป็นระยะเวลา 2-3 h รูพรุนในโมเลกุลของซีโอไลต์ชนิด A จะว่างเปล่าและสามารถดูดซับโมเลกุลอื่นๆ ได้ จากสมบัติดังกล่าว จึงมีการนำซีโอไลต์ชนิด A ไปใช้แยกสารบางอย่างออกจากกันโดยอาศัยความแตกต่างของขนาด และรูปร่างของโมเลกุล
3. สมบัติในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์ชนิด A (Cation Exchange Property) จะเกิดการยึดเกาะอยู่ที่โครงสร้างของรูปทรงสี่หน้า โดยสามารถแลกเปลี่ยนได้ง่ายด้วยสารละลายเข้มข้นของแคตไอออนตัวอื่นๆ ซีโอไลต์ชนิด A มีค่าความจุสูง 3-4 meq/g ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของอะลูมินาในโครงร่างผลึก นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีก โดยค่าความจุของการแลกเปลี่ยนแคตไอออนนั้น จะบอกรับถึงจำนวนอะลูมิเนียมที่แทนที่ซิลิกอนในโครงสร้างของรูปทรงสี่หน้า การแลกเปลี่ยนไอออนจะทำให้สมบัติของซีโอไลต์ชนิด A เปลี่ยนไป
4. สมบัติโดยทั่วไปของซีโอไลต์ชนิด A สามารถสรุปได้ โดยแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติทั่วไปของซีโอไลต์ชนิด A [16]

Properties	Zeolite type A
Form	Free Flowing Powder
Color	White
Crystal Shape	Cubic
Mean Particle Size	4-6 μm
Bulb Density	25-30 lb/ft ³
Weight Loss At 800° C	18-22%
pH Of 1% Dispersion	10.1-11.1
Ion Exchange Capacity	5.6 meq/g Zeolite
Calcium Exchange Capacity	300 meq.CaCO ₃ /g Zeolite (Anhydrous Basis)

2.4 การดูดซับ (Adsorption)

2.4.1 นิยามการดูดซับ

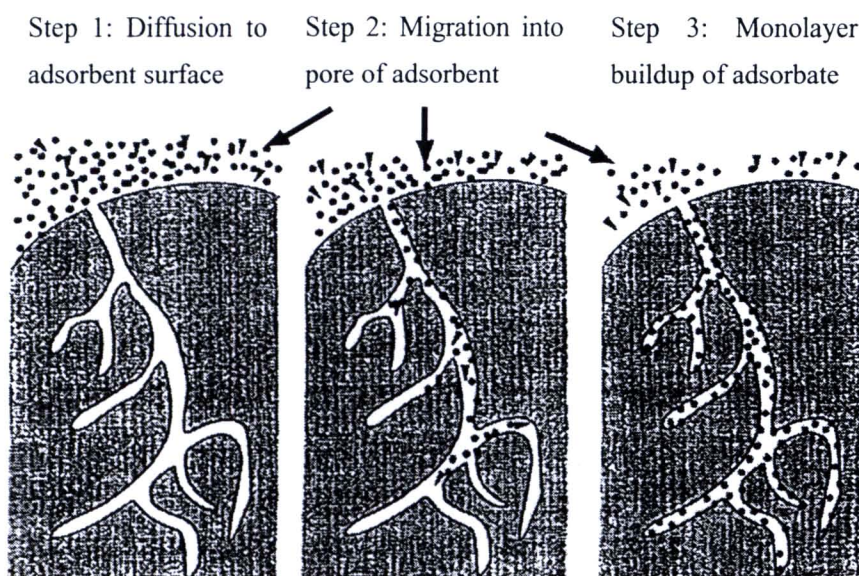
การดูดซับ เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้แยกองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายที่เป็นของเหลวหรือก๊าซ เกิดจากการที่สารสองชนิดมาสัมผัสกันทำให้โมเลกุลหรืออะตอมมีความเข้มข้นเฉพาะบริเวณระหว่างผิวสัมผัสนั้น โดยนิยามการดูดซับ อาทิเช่น

การดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 เฟส โดยเกิดที่พื้นผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับก๊าซ ของแข็งกับก๊าซ ของแข็งกับของเหลว สารที่มีพื้นผิวเกิดการดูดซับขึ้น เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) อัตราการเกิดขึ้นในการดูดซับเป็นแรงที่ไม่เจาะจง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waal's Force) หรือแรงที่มีลักษณะเฉพาะเจาะจงซึ่งเป็นแรงที่มีอยู่ในรูปพันธะเคมี [5]

การดูดซับเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลของตัวดูดซับจากสถานะที่เป็นของเหลวไปยังสถานะที่เป็นของแข็ง คือ ตัวดูดซับทำให้เกิดการสะสมของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับ การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงผลักดัน (Driving Force) หลัก 2 ชนิด คือ ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายและความชอบหรือความดึงดูด (Affinity) ของตัวถูกดูดซับที่มีต่อตัวดูดซับ [21]

2.4.2 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้สารแขวนลอยสามารถเกาะจับอยู่บนสารกรองหรือสิ่งอื่นที่จับบนสารกรองอยู่ก่อนแล้ว คอลลอยด์และสารกรองมักจะมีแอนไอออนทั้งหมด ความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ทำหน้าที่ดูดซับและตัวดูดซับที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ [5] โดยกลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน [22] แสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกการดูดซับ [5]

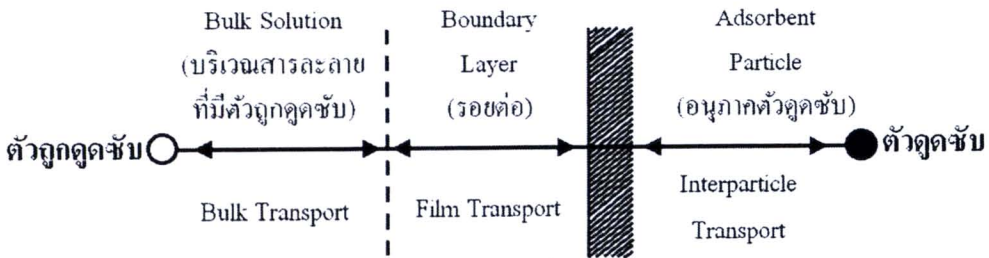
1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับถึงตัวดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าของตัวดูดซับ
2. การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ
3. ปฏิกริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกริยาพื้นผิวเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานจากปฏิกริยาพื้นผิวด้วย

2.4.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ

อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็ว อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีการต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุลซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน [22] ดังนี้

1. การขนส่งอนุภาค (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของของเหลวบางๆ หรือผิวสัมผัสน้ำที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ตัวถูกดูดซับแพร่ผ่านฟิล์มน้ำไปยังผิวของตัวดูดซับ จัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับขั้นต้นหนึ่ง

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ เรียกว่า การแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในชั้นตอนนี้ และจัดเป็นขั้นตอนที่กำหนดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของตัวถูกละลายไปยังวัสดุดูดซับ [2]

2.4.4 ตัวดูดซับ

2.4.4.1 ตัวดูดซับโดยสามารถแบ่งตามพฤติกรรมในการดูดซับ ได้ 2 กลุ่ม [5] ดังนี้

1. กลุ่มที่ได้จากพืชประเภทรูพรุน ตัวดูดซับกลุ่มนี้มีรูพรุนขนาดเล็กมากกระจายอยู่ทั่วไปตามพื้นที่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งสามารถดูดซับไว้ที่ผิวของตัวดูดซับในลักษณะเป็นชั้น (Layer) ทำให้วัสดุกลุ่มนี้สามารถใช้ในการดูดซับได้ซึ่งความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนและการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนของวัสดุดูดซับ ถ้าปริมาณคาร์บอนสูงจะดูดซับได้ดี เช่น แกลบเผา ถ่านและถ่านกัมมันต์

2. กลุ่มแร่ธาตุจากธรรมชาติ ตัวดูดซับกลุ่มนี้มีภายในของโครงสร้างซึ่งประกอบด้วยแผ่นซิลิกาเตตระฮีดรอลเชื่อมต่อกันกับแผ่นอะลูมินาออกตะฮีดรอล การดูดซับไอออนของตัวดูดซับเกิดจากการที่มีการแตกหักของพันธะเคมีภายในโครงสร้าง ทำให้เกิดไอออนตกค้างเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถดึงดูดแคตไอออนที่มีอยู่ในสภาพที่มีโมเลกุลน้ำล้อมรอบ (Hydrate) ไว้ที่ผิวได้ด้วยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต เช่น ดินขาว เกลิน เบนโทไนต์หรือซีโอไลต์ ฯลฯ

2.4.4.2 ตัวดูดซับสามารถแบ่งตามชนิด ได้ 5 ประเภท [22] ดังนี้

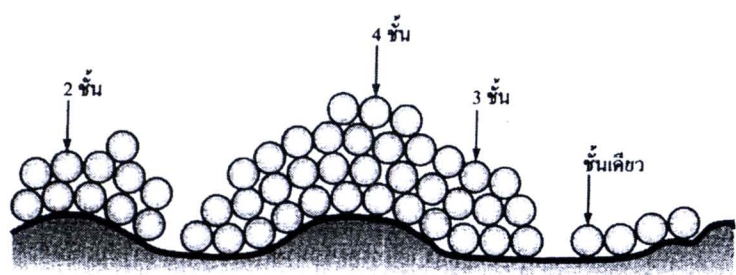
1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดูก สีนแร่จำพวกอะลูมิโนซิลิเกต เช่น Kaolinite เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ $50-200 \text{ m}^2/\text{g}$ และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับสารอนินทรีย์มีขีดจำกัด

- 2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500-1400 m²/g เป็นตัวดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ใช้ในกระบวนการฟอกสี การกำจัดกลิ่นและรส การกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น
- 3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน เช่น เรซิน (Resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 m²/g
- 4. วัสดุชีวภาพ (Biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ไคโตซาน (Chitosan) กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ เถาเกลบดำ เป็นต้น
- 5. สารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือรา สายพันธุ์ต่างๆ และสาหร่าย

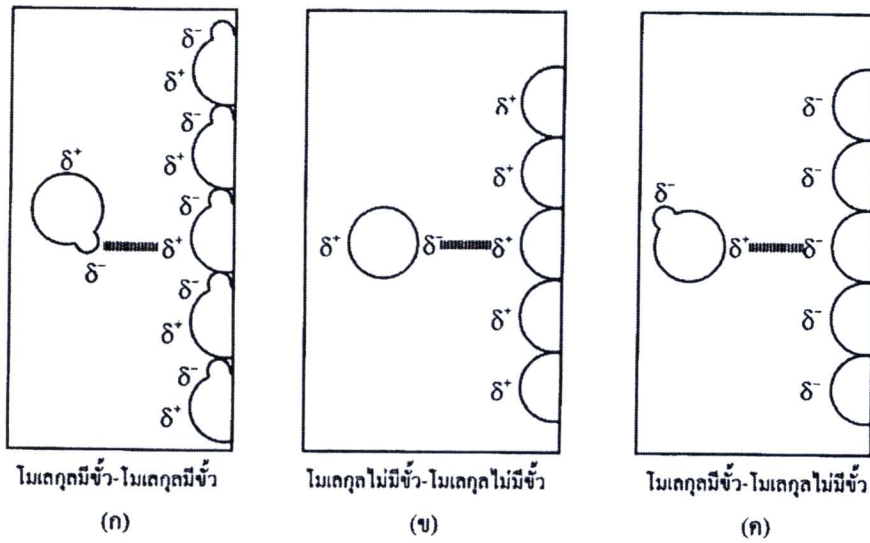
2.4.5 พฤติกรรมของการดูดซับ

พฤติกรรมของการดูดซับที่เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ [5] สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

- 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับ จัดเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อนๆ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Attraction) และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีทั้งของตัวดูดซับและ ตัวถูกดูดซับ โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวตัวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันหลายชั้น (Multilayered) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นการจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำทำให้พลังงานของระบบลดลงทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น [22] แสดงดังรูปที่ 2.16 และรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.16 การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว สองชั้น สามชั้น และสี่ชั้น [22]



รูปที่ 2.17 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ [22]

- (ก) ลักษณะการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุลมีขั้วทั้งคู่
- (ข) ลักษณะการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับต่างก็เป็น โมเลกุล ไม่มีขั้วทั้งคู่
- (ค) ลักษณะการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเป็นโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้ว

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) จะมีลักษณะเหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี กล่าวคือ จะต้องมีการสร้างพันธะเคมีของตัวถูกดูดซับกับพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (พันธะไอออนิก) หรือการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน (พันธะโคเวเลนต์) ทำให้แรงยึดเหนี่ยวค่อนข้างสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในการดูดซับทางกายภาพมีผลทำให้การดูดซับทางเคมีโดยส่วนใหญ่ผันกลับไม่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางกายภาพที่สามารถจะเกิดการผันกลับได้ภายใต้สภาวะเดียวกัน การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นในบริเวณที่จำเพาะเจาะจงเท่านั้นและโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกาะอยู่บริเวณดังกล่าวเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer) และเกิดได้ที่อุณหภูมิสูงแต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วไปบนพื้นผิวตัวดูดซับ [22] การดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำประมาณ ≤ 10 kcal/mol ตัวถูกดูดซับ ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 20-100 kcal/mol ตัวถูกดูดซับ [10]

3. การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน (Exchange Adsorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุและตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้ามหรือเกิดเนื่องจากการแทนที่ประจุที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับด้วยไอออนของตัวถูกดูดซับ

4. การดูดซับแบบเจาะจง (Specific Adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันที่อยู่บนผิว แต่ไม่ได้มีผลทำให้ตัวถูกดูดซับเปลี่ยนโครงสร้างไป มีพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและทางเคมีในการดูดซับที่เกิดขึ้น จะเป็นการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางเคมี การดูดซับแบบแลกเปลี่ยน หรือการดูดซับแบบเจาะจงขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับนั้น [5]

2.4.6 แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ (Adsorption Force)

ในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลาย เกิดการดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ และแรงทางเคมี แรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์หรือพันธะไฮโดรเจน รวมทั้งแรงไฟฟ้าเคมีจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ในช่วงสั้นๆ รวมถึงการเกิดสารประกอบสถิตย์ (Electrostatic Force) บริเวณผิวรอบนอกของสารประกอบ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน ส่วนแรงทางเคมีเชิงซ้อนบริเวณผิวด้านใน ซึ่งจะเกิดกลไกการแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (Ligand Exchange) พันธะโควาเลนต์และพันธะไฮโดรเจน

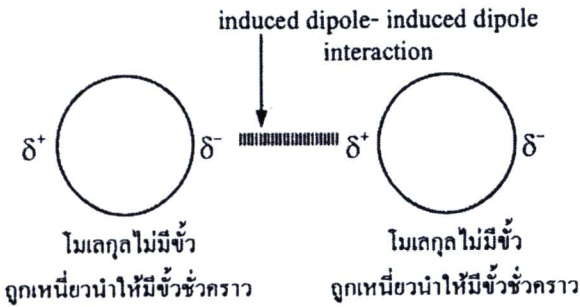
2.4.6.1 แรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพ (Physical Force)

แรงยึดเหนี่ยวทางกายภาพหรือแรงแวนเดอร์วาลส์ คือ แรงที่ยึดเหนี่ยวโมเลกุล (โคเวเลนต์) ให้อยู่ด้วยกันโดยโมเลกุล ทุกชนิดทั้งโมเลกุลมีขั้วและโมเลกุลไม่มีขั้วต่างมีแรงแวนเดอร์วาลส์ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลกับโมเลกุล เมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ มี 3 ประเภท [22] ดังนี้

1. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว เรียกว่า แรงลอนดอน (London Force) หรือแรงแผ่กระจาย (Dispersion Force) เกิดขึ้นได้เนื่องจากอิเล็กตรอนในโมเลกุลเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาในขณะใดขณะหนึ่ง กลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในโมเลกุลไม่ได้กระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอในลักษณะที่สมมาตร แต่จะเคลื่อนที่ไปหนาแน่นด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้ด้านนั้นมีอำนาจขั้วไฟฟ้าลบมากขึ้นกว่าปกติ อีกด้านก็จะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกหรือทำให้โมเลกุลนั้นกลายเป็นโมเลกุลที่มีขั้วชั่วคราว (Induced Dipole) เกิดขึ้น ขั้วของโมเลกุลที่เกิดขึ้นนี้จะไปเหนี่ยวนำโมเลกุลข้างเคียงให้มีขั้วชั่วคราวขึ้นมา ถ้าโมเลกุลมีขั้วหันขั้วบวกไปทางโมเลกุลใดก็จะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลนั้นเกิดขั้วลบขึ้นทางด้านที่ติดกัน โดยวิธีนี้โมเลกุลจะเกิดการเหนี่ยวนำกันต่อไปจนเกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ (Induced Dipole-Induced Dipole Attraction)

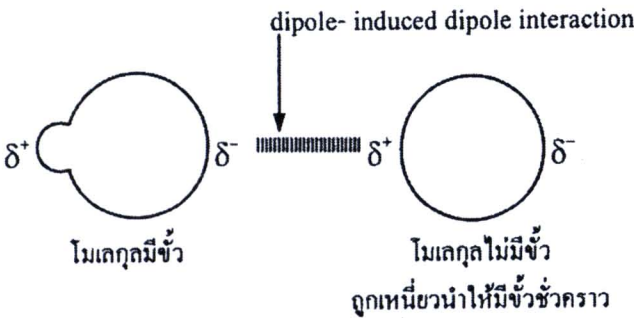
แรงแวนเดอร์วาลส์ มีค่าเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุลเพราะเมื่อโมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนย่อมเพิ่มขึ้นด้วย เมื่ออิเล็กตรอนจำนวนมากไปอยู่อย่างหนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งจะแสดงอำนาจ

ไฟฟ้าลบมาก และด้านตรงข้ามก็จะมีอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกมากด้วย แรงดึงดูดระหว่างขั้วที่เกิดจากการเหนี่ยวนำจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากจำนวนอิเล็กตรอนในโมเลกุลแล้ว รูปร่างของโมเลกุลก็มีส่วนที่จะทำให้แรงแวนเดอร์วาลส์มีความแข็งแรงมากหรือน้อย เป็นต้นว่า ถ้าโมเลกุลไม่ซับซ้อนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปอยู่หนาแน่นทางด้านใดด้านหนึ่งได้ง่าย การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วของโมเลกุลจึงเป็นไปได้ง่าย แต่ถ้าโมเลกุลมีรูปร่างซับซ้อนอิเล็กตรอนที่ถูกเหนี่ยวนำจะบดบังกันสภาพขั้วจึงน้อยทำให้แรงดึงดูดน้อยตามไปด้วย แสดงดังรูปที่ 2.18



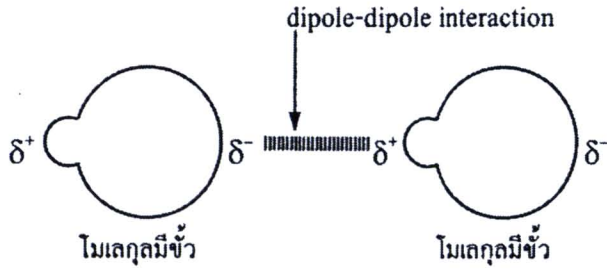
รูปที่ 2.18 แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว [22]

2. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับโมเลกุลไม่มีขั้ว กรณีเช่นนี้ เกิดจากโมเลกุลมีขั้วเข้าใกล้โมเลกุลไม่มีขั้ว จะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้โมเลกุลที่ถูกเหนี่ยวนำกลายเป็นโมเลกุลมีขั้วตามไปด้วยจึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างขั้วกับขั้ว แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้วกับ โมเลกุลไม่มีขั้ว [22]

3. แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว ด้านหนึ่งของโมเลกุลจะแสดงอำนาจขั้วไฟฟ้าบวกและอีกด้านหนึ่งแสดงขั้วไฟฟ้าลบ ขั้วไฟฟ้าบวกกับขั้วไฟฟ้าลบจึงดึงดูดกัน เรียกว่า แรงไดโพล-ไดโพล (Dipole-Dipole Attraction) แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แรงแวนเดอร์วาลส์ระหว่างโมเลกุลมีขั้ว [22]

ในกรณีที่โมเลกุลประกอบด้วยอะตอมของไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง ได้แก่ ธาตุฟลูออรีน ออกซิเจนและไนโตรเจน ทำให้เกิดพันธะมีสภาพความเป็นขั้วสูง โดยด้านไฮโดรเจนอะตอมมีสภาพขั้วบวกจะเกิดแรงดึงดูดกับอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวของอะตอมที่มีอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงในโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงแรงยึดเหนี่ยวในลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า พันธะไฮโดรเจน

แรงแวนเดอร์วาลส์เป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนักเมื่อเปรียบเทียบกับแรงชนิดอื่นๆ ซึ่งมีค่าระหว่าง 0.01-0.1 ของพันธะโคเวเลนต์ ดังนั้นการดูดซับทางกายภาพสามารถผันกลับได้ เมื่อเกิดการคาย (Desorption) เป็นแรงยึดเหนี่ยวที่ไม่แข็งแรงระหว่างตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับ

2.4.6.2 แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี (Chemical Force)

แรงยึดเหนี่ยวทางเคมี คือ การสร้างพันธะเคมีระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับซึ่งอาจเป็นพันธะไอออนิกเป็นแรงดึงดูดระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบหรือพันธะโคเวเลนต์เป็นการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันโดยเกิดสมดุลทั้งแรงดูด (อิเล็กตรอนกับโปรตอน) และแรงผลัก (อิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอน และโปรตอนกับโปรตอน) การเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับมีผลทำให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ขึ้น และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayered) ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible Process) จึงไม่เกิดการคาย ซึ่งแรงทางเคมีมีลักษณะ ดังนี้

1. เป็นพันธะเคมีซึ่งเกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกันหรือให้อิเล็กตรอนหรือเกิดจากการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนมีผลให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันแรงกว่าทางฟิสิกส์
2. ไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ (Irreversible) เพราะยึดเหนี่ยวด้วยแรงที่มากและมีการจับกันเป็นสารประกอบเคมี

2.4.7 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [22]

2.4.7.1 ธรรมชาติของตัวดูดซับ (Natural of The Adsorbent)

1. **พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน (Surface Area and Pore Structure)** พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับ เมื่อพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม พื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะบ่งบอกได้ถึงความสามารถในการดูดซับ โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ถ้าตัวดูดซับไม่มีรูพรุน พื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของตัวดูดซับมีขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุน ขนาดของตัวดูดซับจะไม่มีผลกับความสามารถในการดูดซับ
2. **ขนาดของตัวดูดซับ (Particle Size)** สารดูดซับที่ไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดลดลง ซึ่งทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ถ้าสารดูดซับมีรูพรุนมากๆ พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ที่รูพรุน เพราะฉะนั้นในกรณีนี้ความสามารถในการดูดซับจะไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ [5]

2.4.7.2 ธรรมชาติของตัวถูกดูดซับ (Natural of The Adsorbate)

1. **ความสามารถในการละลาย** โมเลกุลของตัวถูกดูดซับมีผลต่อการดูดซับซึ่งแนวโน้มของการดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับจะลดลงเมื่อโมเลกุลตัวถูกดูดซับละลายน้ำได้ดี เพราะว่าก่อนที่จะเกิดกระบวนการดูดซับจะต้องมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลของน้ำ เพื่อให้โมเลกุลตัวถูกดูดซับหลุดออกจากน้ำไปเกาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับ โมเลกุลของตัวถูกดูดซับขนาดเล็กมีความสามารถในการละลายน้ำลดลง จึงมีแนวโน้มที่จะถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับมากขึ้น [22]
2. **น้ำหนักและขนาดโมเลกุล** เมื่อน้ำหนักและขนาดของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น เช่น ถ้าโมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับเป็นสารอินทรีย์เมื่อจำนวนคาร์บอนอะตอมมากขึ้น การดูดซับก็จะมากขึ้นเพราะการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลจะเป็นผลทำให้ความสามารถในการละลายลดลง
3. **ความมีขั้วของโมเลกุล** ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อสภาพมีขั้ว (Polarity) เพิ่มขึ้นเพราะการเพิ่มสภาพมีขั้วจะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น [5]

2.4.7.3 สภาพแวดล้อม (Environment) [5]

1. **ผลของอุณหภูมิของสารละลาย (Effect of Temperature)** เนื่องจากการยึดเกาะระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับเกี่ยวข้องกับชนิดของพันธะที่ยึดเหนี่ยวกัน ดังนั้นการดูดซับจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ทดลองด้วย กล่าวคือ ถ้าปฏิกิริยาการดูดซับเป็นชนิดคายความร้อนการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่ในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนความสามารถในการดูดซับจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยไม่มีผลต่อการดูดซับ
2. **ผลของความเป็นกรดเป็นด่าง (Effect of pH)** ค่า pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับด้วย นอกจากนี้ไฮโดรไอออนเองก็เป็นไอออนที่สามารถเกิดปฏิกิริยาการดูดซับได้ และค่า pH มีผลต่อรูปแบบของโลหะ

2.4.8 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับ มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็งเมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินไปเรื่อยๆ จะมีการคายการดูดซับ (Desorption) เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน จนในที่สุดจำนวนตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับกับที่คายออกมาจะเท่ากัน ผลที่ตามมาคือ อัตราการดูดและอัตราการคายตัวจะเท่ากัน หรือระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลการดูดซับ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนผิวของของแข็งจะไม่เปลี่ยนแปลง ตำแหน่งที่เกิดสมดุลการดูดซับหนึ่งๆ จะเป็นสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ ตัวทำละลาย อุณหภูมิ และความเป็นกรด-ด่างของระบบ ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

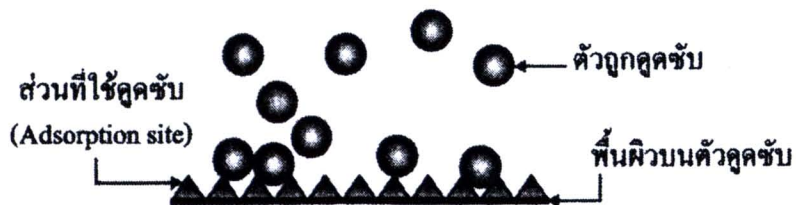
2.4.9 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_c) กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่เหลืออยู่ในสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_c) ณ อุณหภูมิคงที่

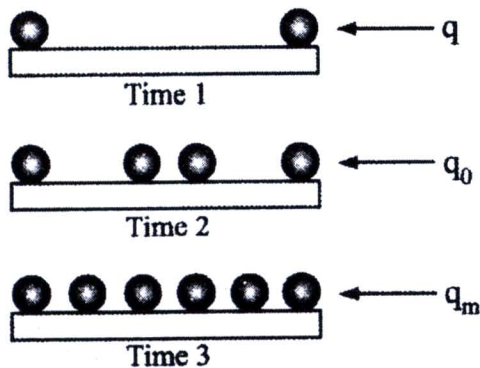
สมการไอโซเทอมการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 2 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

2.4.9.1 **ไอโซเทอมการดูดซับของสมการแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)** ถูกพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1916 โดยนักเคมีชาวอเมริกาชื่อ Irving Langmuir ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932 โดยสมมติฐานของสมการ Langmuir [22] มีดังนี้

1. การดูดซับจะเกิดบนผิวของตัวดูดซับที่เป็นแบบเดียวกันหมด (Homogeneous Adsorption Surface) มีกลไกการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว แสดงดังรูปที่ 2.21 ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวบนตัวดูดซับจะมีจำนวนจำกัด
2. การดูดซับสามารถย้อนกลับได้ [5]
3. ตัวถูกดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวถูกดูดซับอื่นบนพื้นผิวตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.22
4. พลังงานในการดูดซับจะเท่ากันในทุกพื้นที่ที่ดูดซับและไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับ [5]



รูปที่ 2.21 กลไกการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิววัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว [22]



รูปที่ 2.22 ตัวถูกดูดซับปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของวัสดุดูดซับแบบชั้นเดียว ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับสูงสุดบนพื้นผิวเท่ากับ q_m [22]

สมมุติฐานเหล่านี้ส่วนใหญ่จะไม่นำมาใช้อธิบายการดูดซับด้วยตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวเป็น Heterogeneous เช่น ดิน เพราะสมมุติฐานของสมการ Langmuir จะใช้ได้กับการดูดซับที่มีพื้นที่ผิวเป็นแบบ Homogeneous แสดงดังสมการที่ 2.2 และ 2.3



$$q_e = \frac{X_m b C_e}{(1 + b C_e)} \quad (2.2)$$

$$q_e = \frac{x}{m} \quad (2.3)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

X_m คือ ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบ Monolayer ต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g ตัวดูดซับ)

b คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับ Bonding Strength หรือเป็นค่าคงที่ของความร่อนของการดูดซับ

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับสุดท้ายที่สภาวะสมดุล (mg/L)

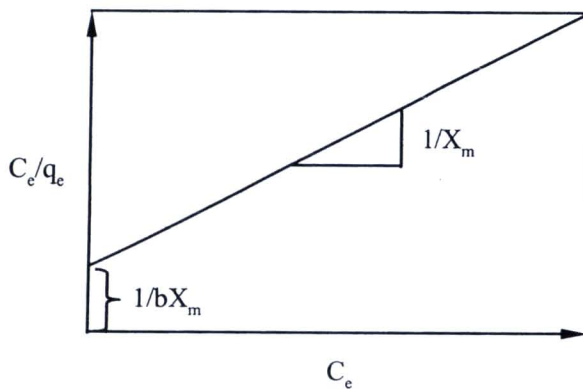
x คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ (mg)

m คือ ปริมาณของตัวดูดซับที่ถูกใช้ (mg)

จากสมการที่ 2.2 และ 2.3 เปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง แสดงดังสมการที่ 2.4

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{\left(\frac{1}{b X_m}\right)}{\left(\frac{C_e}{X_m}\right)} \quad (2.4)$$

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์โดยให้ C_e/q_e เป็นแกน y และ C_e เป็นแกน x จะได้ค่าความชันเท่ากับ $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ แสดงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งสามารถหาค่าคงที่ X_m และ b ได้จากค่าความชันและจุดตัดแกน y



รูปที่ 2.23 ลักษณะไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของสมการ Langmuir [22]

สำหรับการดูดซับจากสารละลายไปยังผิวของของแข็ง สามารถเขียนสมการ แสดงดังสมการที่ 2.5

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{M}$$

(2.5)

- เมื่อ
- C_0 คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายเริ่มต้น (mg/g)

V คือ ปริมาตรของตัวถูกละลาย (L)

M คือ น้ำหนักตัวดูดซับ (g)

ในกรณีใช้สมการการดูดซับของสมการ Langmuir ควรคำนวณหาปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สถานะสมดุล (Separation Factor or Equilibrium Parameter, R_L) ซึ่งจะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับการดูดซับ ปัจจัยของการแยกคำนวณได้จากสมการที่ 2.6 [23]

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

(2.6)

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต (mg/L)

ซึ่งค่า R_L ที่คำนวณได้สามารถแปลความหมายประกอบคำอธิบาย แสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลของปัจจัยการแยกต่อรูปร่างไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir [23]

R_L	Type of Isotherm
$R_L > 1$	Unfavorable
$R_L = 1$	Liner
$0 < R_L < 1$	Favorable
$R_L = 0$	Irrversible

2.4.9.2 ไอโซเทอมการดูดซับของสมการฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) โดยนักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ในระหว่างปี ค.ศ.1880-1941 ใช้อธิบายไอโซเทอมของการดูดซับและตัวถูกละลายในสารละลายภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเป็นแบบ Heterogeneous (พื้นที่ผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) [22] และอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นในรูปของลอการิทึม (Logarithmic) [5] แสดงดังสมการที่ 2.6

$$Q \text{ หรือ } q_c = x/m = KC_c^{1/n} \tag{2.6}$$

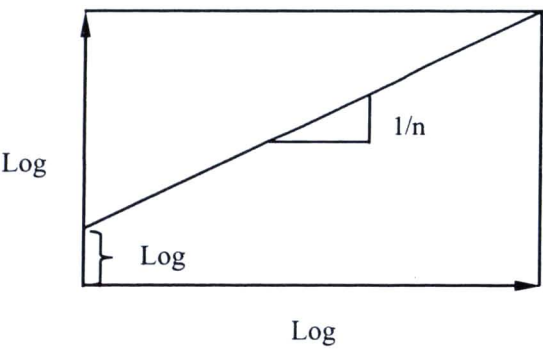
เมื่อ K คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย
 n คือ Correcting Factor

จากสมการที่ 2.5 สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง แสดงดังสมการที่ 2.7

$$\text{Log } q_c = \text{Log } K + (1/n) \text{Log } C_c \tag{2.7}$$

เมื่อ $1/n$ คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา (Adsorption Intensity)

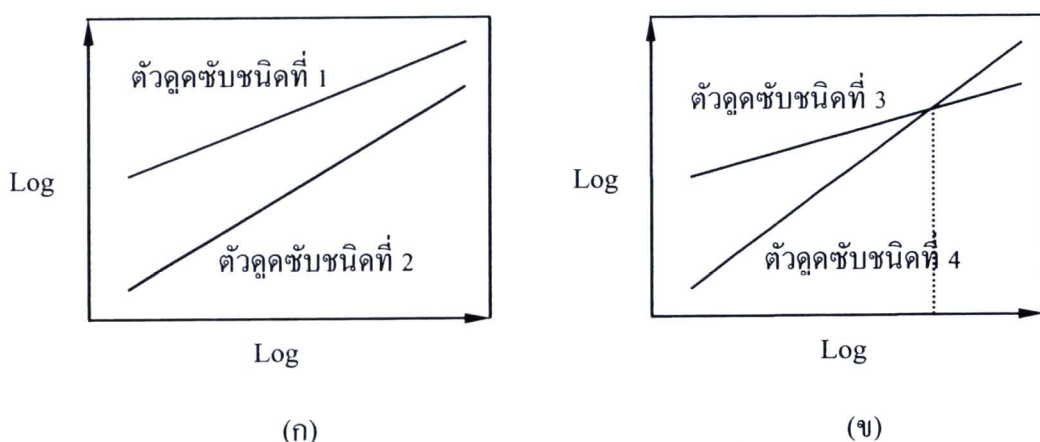
เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\text{Log } q_c$ กับ $\text{Log } C_c$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์โดยให้ $\text{Log } q_c$ เป็นแกน y และ $\text{Log } C_c$ เป็นแกน x จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\text{Log } K_f$ แสดงดังรูปที่ 2.24 เมื่อ $1/n$ มีค่าเข้าใกล้ 1 หรือมีความชันมากจะแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยจะมีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็จะต่ำและจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ $1/n \ll 1$ หรือความชันต่ำมากจนบางครั้งเกือบจะชิดกับแกน x นั้น แสดงว่าอัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำหรือสูงจะไม่แตกต่างกัน หรือการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ อย่างไรก็ตาม จากลักษณะไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Freundlich ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ ราบเท่าที่ความเข้มข้นของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายไม่สูงขึ้น ทำให้ไม่สามารถทำนายการดูดซับสูงสุดได้



รูปที่ 2.24 ลักษณะไอโซเทอมของการดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของสมการ Freundlich [22]

จากสมการ Freundlich จะใช้ได้ดีในสารละลายที่มีความเข้มข้นปานกลาง ในการพิจารณาเลือกว่าตัวดูดซับใดมีประสิทธิภาพในการดูดซับดีกว่า สามารถพิจารณาจากค่าไอโซเทอมการดูดซับ แสดงดังรูป

ที่ 2.25 (ก) จะเห็นได้ว่าไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 1 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 2 ในช่วงความเข้มข้นเดียวกัน ส่วนในรูปที่ 2.25 (ข) จะเห็นได้ว่าไอโซเทอมของตัวดูดซับชนิดที่ 3 สูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 4 ในช่วงความเข้มข้นที่ต่ำกว่า C_0 แต่ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะมีไอโซเทอมสูงกว่าตัวดูดซับชนิดที่ 3 ในช่วงความเข้มข้นที่สูงกว่า C_0 ดังนั้น จึงต้องเลือกตัวดูดซับให้เหมาะกับช่วงความเข้มข้นที่ต้องการ นอกจากนี้ในรูปที่ 2.25 (ข) ตัวดูดซับชนิดที่ 4 มีความชันมากกว่า ตัวดูดซับชนิดที่ 3 แสดงว่าถ้าต้องการดูดซับแบบต่อเนื่องแล้ว ตัวดูดซับชนิดที่ 4 จะมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้มากกว่าชนิดที่ 3



รูปที่ 2.25 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวดูดซับชนิดต่างๆ [22]

2.4.10 การศึกษาการดูดซับ [5]

เริ่มต้นโดยทำการศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ โดยการนำสารละลาย (Adsorption Solution) ซึ่งทราบองค์ประกอบ ความเข้มข้นและปริมาตรที่แน่นอน ผสมรวมกับตัวดูดซับที่ทราบปริมาณที่แน่นอน แล้วนำไปเขย่าหรือกวนด้วยความเร็วรอบคงที่ ณ อุณหภูมิและความดันคงที่ตลอดระยะเวลาที่ทำการทดลองจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับซึ่งในการทดลองการดูดซับจะต้องมีการควบคุมค่า pH และ Ionic Strength ด้วย หลังจากทำการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว นำสารละลายไปกรองแยกออกจากของแข็ง แล้วนำสารละลายส่วนที่ได้ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารละลายที่เหลืออยู่ จากการทดลองจะทำให้ทราบความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (C_e) และปริมาณของไอออนหรือโมเลกุลที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (q_e) ซึ่งสามารถนำไปสร้างกราฟไอโซเทอมของการดูดซับ เพื่อทำนายถึงความสามารถหรือพฤติกรรมของการดูดซับที่เกิดขึ้น ซึ่งก็คือระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่าเพราะถึงแม้ว่าการดูดซับต้องใช้เวลานานพอสมควรเพื่อให้เข้าสู่ระยะสมดุลการดูดซับ แต่ถ้าหากใช้เวลานานเกินไปก็อาจจะทำให้เกิดการตกตะกอนหรือเกิดการละลายขึ้นได้ ซึ่งจะทำให้การทำนายความสามารถในการดูดซับคลาดเคลื่อนไป นอกจากนี้ความแรงในการเขย่าควรมีความแรงเพียงพอที่จะทำให้การผสมกันเป็นอย่างดี เพื่อให้อนุภาคของตัวดูดซับสัมผัสกับตัวถูกดูดซับอย่างทั่วถึง

2.5 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต [24]

2.5.1 สมบัติทั่วไปของปุ๋ยยูเรีย

ยูเรีย $[CO(NH_2)_2]$ เป็นสารอินทรีย์ที่พบในปัสสาวะของคนและสัตว์ เกิดจากกระบวนการสลายกรดอะมิโนในวัฏจักรยูเรีย ในโตรเจนที่ร่างกายขับออกทางปัสสาวะนั้น ส่วนมากอยู่ในรูปของยูเรีย มีผู้แยกสารนี้จากน้ำปัสสาวะแล้วตกผลึกเพื่อศึกษาเมื่อ พ.ศ. 2316 ต่อมาใน พ.ศ. 2317 นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ Wöhler ได้สังเคราะห์ยูเรียขึ้นจากแอมโมเนียกับกรดไซยานูริก (Cyanuric Acid) แสดงดังสมการที่ 2.8



ผลงานของ Wöhler ในครั้งนั้น นอกจากจะล้มล้างความเชื่อดั้งเดิมที่ว่า สารอินทรีย์ต้องสังเคราะห์ได้โดยสิ่งมีชีวิตแล้ว ยังให้แนวทางสำหรับการสังเคราะห์ยูเรียในห้องปฏิบัติการอีกด้วย ปัจจุบันยูเรียเป็นปุ๋ยไนโตรเจนที่ได้รับความนิยมมากที่สุด สำหรับสมบัติบางประการของปุ๋ยนี้เปรียบเทียบกับแอมโมเนียซัลเฟตและแอมโมเนียไนเตรด แสดงดังตารางที่ 2.8

ในอุตสาหกรรมการผลิตปุ๋ยไนโตรเจนนั้น ยูเรียมักเป็นปุ๋ยชนิดแรกที่อยู่ในแผนการผลิตต่อเนื่องกับการผลิตแอมโมเนีย เนื่องจากสามารถนำแอมโมเนียมาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ยูเรีย

ตารางที่ 2.8 สมบัติของปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟตบริสุทธิ์ [24]

สมบัติ	ปุ๋ยยูเรีย	ปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต
น้ำหนักโมเลกุล	60.06	132.14
ไนโตรเจนทั้งหมด (% N)	46.6	21.2
สี	ขาว	ขาว
ความหนาแน่น (g/cm)	1.335	1.769
จุดหลอมเหลว (° C)	132.7	512.2
การละลายน้ำได้ (g/น้ำ 100 g)		
ที่อุณหภูมิ 0° C	66.7	70.6
ที่อุณหภูมิ 20° C	108.0	-
ที่อุณหภูมิ 40° C	167.0	-
ที่อุณหภูมิ 60° C	251.0	-

ตารางที่ 2.8 สมบัติของปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟตบริสุทธิ์ (ต่อ) [24]

สมบัติ	ปุ๋ยยูเรีย	ปุ๋ยแอมโมเนียซัลเฟต
ที่อุณหภูมิ 80° C	400.0	-
ที่อุณหภูมิ 100° C	733.0	<u>103.8</u>
ความชื้นสัมพัทธ์วิกฤต		
ที่อุณหภูมิ 20° C	81.0%	81.0%
ที่อุณหภูมิ 30° C	73.0%	81.1%

2.5.2 การผลิตปุ๋ยยูเรีย

2.5.2.1 วัตถุดิบและกระบวนการผลิตปุ๋ยยูเรีย ยูเรียผลิตจากคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย สำหรับคาร์บอนไดออกไซด์ก็เป็นผลพลอยได้จากการผลิตแอมโมเนียนั่นเอง อาจแบ่งปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. เกิดแอมโมเนียมคาร์บาเมต แสดงดังสมการที่ 2.9



2. การเสียน้ำ (Dehydration) ของแอมโมเนียมคาร์บาเมต แสดงดังสมการที่ 2.10



ปฏิกิริยาแรกเป็นแบบคายความร้อน ส่วนปฏิกิริยาที่สองเป็นแบบดูดความร้อน อัตราเร็วของปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันและโมลเรโซ (Mole Ratio) ของแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์ (NH₃ : CO₂) สำหรับสภาพการผลิตยูเรียที่เหมาะสมและใช้กันทั่วไป คือ

- (1) อุณหภูมิ 180-210° C
- (2) ความดันในถังปฏิกรณ์ (Reactor) 14.14-25.25 MPa
- (3) โมลเรโซของแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์ 3 : 1-4 : 1
- (4) ในช่วงเวลาของการทำปฏิกิริยา (Reaction Time) 20-30 min

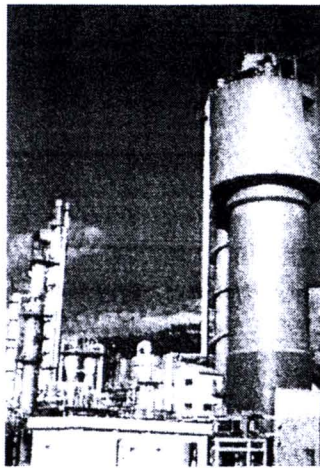
ในกระบวนการผลิตยูเรียจะมีไบยูเรต ($\text{NH}_2\text{-CO-NH-CO-NH}_2$) เกิดขึ้นจากการรวมตัวของยูเรีย 2 โมเลกุล แล้วปลดปล่อยแอมโมเนียออกมา 1 โมเลกุล แสดงดังสมการที่ 2.11



ไบยูเรตมักเกิดใน 2 ขั้นตอนของการผลิตยูเรีย คือ ระหว่างการสังเคราะห์และเมื่อนำสารละลายยูเรียมา ระเหยน้ำให้เข้มข้น เนื่องจากยูเรียที่ได้มาตรฐานต้องมีไบยูเรตต่ำกว่า 1% ดังนั้น ผู้ผลิตจึงต้องใช้ เทคโนโลยีที่เหมาะสมในการควบคุมปริมาณสารนี้ให้ต่ำกว่าเกณฑ์ ดังกล่าว

2.5.2.2 การทำให้ยูเรียเป็นเม็ด มี 2 กระบวนการ ดังนี้

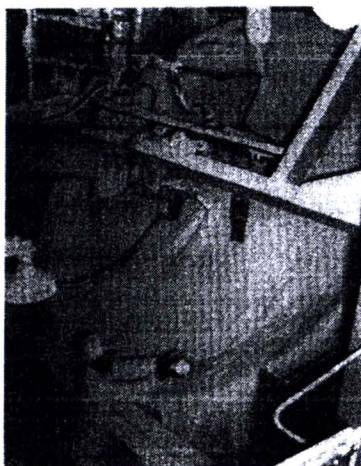
1. กระบวนการพริลลิ่ง (Prilling Process) มีขั้นตอนที่ทำให้เกิดเม็ดยูเรีย คือ ของเหลวที่ข้นมากจะถูกอัดผ่านรูเล็กๆ ของกระบอกฉีด (Nozzle) ซึ่งติดตั้งใกล้ยอดหอพริลลิ่ง (Prilling Tower) ทำให้ของเหลวขึ้นถูกอัดออกมาเป็นหยด จากนั้นหยดปุ๋ยที่มีขนาดเล็ก ก็ร่วงหล่นลงมาจากยอดหอพริลลิ่ง แต่ถูกชะลอความเร็วลงด้วยแรงพวยของลมเย็นและแห้ง ที่เป่าสวนขึ้นไปจากด้านล่าง ขณะที่ร่วงลงมานั้นหยดปุ๋ยจะค่อยๆ เย็นลงกลายเป็นปุ๋ยเม็ดแห้งเมื่อตกถึงพื้น ปุ๋ยที่ได้ เรียกว่า พริลล์ยูเรีย (Prilled Urea) หอพริลลิ่งของโรงงานผลิตปุ๋ยยูเรีย แสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 หอพริลลิ่งของโรงงานผลิตปุ๋ยยูเรีย [24]

2. กระบวนการแกรนูลേഷัน (Pan Granulator) คือ การทำให้ปุ๋ยเป็นเม็ดโดยใช้อุปกรณ์ ที่เรียกว่า แกรนูเลเตอร์ (Granulator) ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ คือ จานปั่น (Pan Granulator) และท้อปั่น (Sphereodizer หรือ Drum Granulator) ปุ๋ยที่ได้จากการผลิตทั้งสองแบบ เรียกว่า แกรนูลาร์ยูเรีย (Granular Urea)

(1) การทำเป็นเม็ดด้วยงานป่น เริ่มจากนำสารละลายยูเรียเข้มข้น 75% ไประเหยน้ำให้ได้ $\leq 99\%$ และของเหลวขุ่นมีอุณหภูมิ 141°C ต่อจากนั้นก็พ่นของเหลวนี้ให้เป็นฝอยลงบนงานป่นเม็ดซึ่งหมุนอยู่ตลอดเวลา ในขั้นต้นจะเกิดเม็ดปุ๋ยเล็กๆ ขึ้นก่อน และเคลื่อนผ่านละอองของปุ๋ยเหลวขุ่นที่ฉีดพ่นลงมาจากหัวฉีดด้านบน จึงเคลือบให้เม็ดโตขึ้นเป็นชั้นๆ ทีละเล็กทีละน้อย เป็นการเพิ่มขนาดเม็ดแบบพอกพูนมวล (Accretion) เหมือนหัวหอมที่มีเยื่อต่างๆ หุ้มเป็นชั้นๆ นั่นเอง เมื่อเม็ดปุ๋ยโตจนได้ขนาดที่กำหนดก็เคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์คัดขนาดลักษณะของงานป่นเม็ดยูเรีย แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 งานป่นเม็ดยูเรีย [24]

(2) การทำเป็นเม็ดด้วยท่อป่น สำหรับท่อป่นเม็ดปุ๋ยมีหลักการทำงาน คือ ยูเรียขุ่นจะถูกฉีดเป็นละอองภายในท่อหมุน (Rotating Drum) ซึ่งวางในแนวนอน ให้อะไหล่ของเหลวนี้ฉาบบนผิวของอนุภาคปุ๋ยซึ่งหมุนและเคลื่อนที่อยู่ในท่อ ด้วยการพอกพูนมวลขณะที่หมุนทำให้เม็ดปุ๋ยโตขึ้นตามลำดับมีทรงกลมและแน่น เมื่อเม็ดปุ๋ยโตได้ขนาดที่กำหนด ก็เคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์คัดขนาด

สำหรับเม็ดที่ออกมาจากกระบวนการพริตลิ่ง จากงานป่นหรือท่อป่น จะถูกส่งไปผ่านตะแกรงคัดขนาด แยกพวกที่มีขนาดเล็กหรือโตเกินไป เพื่อส่งกลับเข้าสู่ขั้นตอนการทำเม็ดใหม่เฉพาะเม็ดซึ่งได้ขนาดที่กำหนดไว้เท่านั้นจึงจะเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อการค้า สำหรับการทำให้เม็ดปุ๋ยชนิดอื่นๆ ก็ใช้กระบวนการพริตลิ่งหรือแกรนูลเช่นกันตามความเหมาะสม

โดยปกติกระบวนการแกรนูลจะใช้พลังงานมากกว่าแต่สามารถป่นเม็ดปุ๋ยยูเรียได้โตกว่ากระบวนการพริตลิ่ง นอกจากนั้นแกรนูลาร์ยูเรียยังมีสมบัติด้านความแข็งแรงของปุ๋ยสูงกว่าพริตล์ยูเรีย แสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สมบัติด้านความแข็งของปุ๋ย [24]

ผลิตภัณฑ์	ความต้านแรงกด (kg/grain)	ปริมาณฝุ่นจากการทดสอบ ความต้านทานการขัดถู (%)
ฟริลล์ยูเรีย	0.8-1.2	19.7
แกรนูลาร์ยูเรีย	1.5-3.5	0.2-1.7

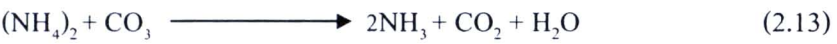
2.5.2.3 ความเปลี่ยนแปลงของปุ๋ยยูเรียในดิน

เมื่อใส่ปุ๋ยยูเรียในดินที่มีความชื้นพอประมาณ จะมีการเปลี่ยนแปลงโดยการแปรสภาพและการละลาย เนื่องจากปุ๋ยยูเรียเป็นสารที่ละลายน้ำง่าย เมื่อใส่ในดินที่มีความชื้นพอเหมาะจะละลายอย่างรวดเร็ว ต่อจากนั้นก็มีการเปลี่ยนแปลง ดังนี้

- 1. รากพืชอาจดูดโมเลกุลยูเรียจากสารละลายของดินไปใช้โดยตรง
- 2. ปุ๋ยยูเรียในดินจะถูกเอนไซม์ยูรีเอส (Urease) แปรสภาพให้เป็นแอมโมเนียคาร์บอเนต แสดงดังสมการที่ 2.12



- 3. เนื่องจากแอมโมเนียคาร์บอเนตเป็นเกลือที่ไม่มีเสถียรภาพ จึงสลายตัวต่อไป แสดงดังสมการที่ 2.13



ทั้งแอมโมเนียและคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของแอมโมเนียมคาร์บอเนต มีสถานะเป็นแก๊ส ดังนั้น ถ้าหว่านปุ๋ยยูเรียลงบนผิวดินโดยไม่พรวนกลบหรือรดน้ำ แก๊สดังกล่าวจะระเหยออกไปจากดินได้ง่าย เป็นเหตุให้ไนโตรเจนสูญหายไปจากดินมาก ดังนั้น การพรวนกลบปุ๋ยหรือรดน้ำให้ปุ๋ยละลายลงไปได้ผิวดินจะช่วยอนุรักษ์ปุ๋ยยูเรียให้เป็นประโยชน์แก่พืชมากยิ่งขึ้น

- 4. แอมโมเนียที่คงอยู่ในดินจะละลายน้ำได้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้น บริเวณรอบๆ เม็ดปุ๋ยจะเป็นด่างจัด หากใส่ปุ๋ยชิดกับเมล็ดพืชหรือรากพืช อาจเป็นพิษแก่ส่วนของพืชเหล่านั้นได้ แต่การเพิ่ม ค่า pH ของดินจะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวในบริเวณเล็กๆ ที่สัมผัสกับปุ๋ยเท่านั้น แต่ในดินกรดแอมโมเนียจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนจากดินได้แอมโมเนียมไอออน

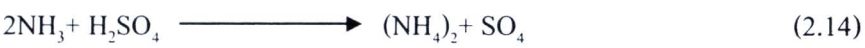
2.5.3 สมบัติทั่วไปของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต

ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต มีสมบัติเหมาะสมที่จะใช้เป็นปุ๋ยหลายประการ เช่น มีเสถียรภาพหรือไม่เปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีโดยง่าย สมบัติทางฟิสิกส์ดี มีทั้งธาตุไนโตรเจนและกำมะถัน (24%S) อย่างไรก็ตามปุ๋ยนี้มีไนโตรเจนทั้งหมดเพียง 21%N ซึ่งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของยูเรีย [24]

2.5.4 การผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต [24]

2.5.4.1 กระบวนการที่ใช้แอมโมเนียกับกรดซัลฟิวริกโดยตรง

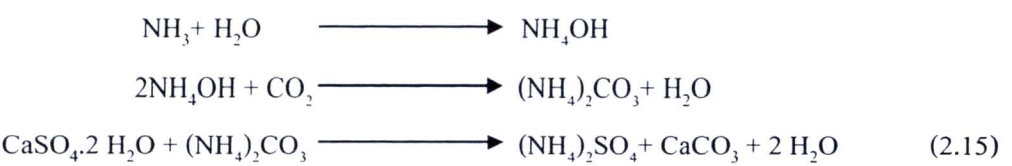
ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตผลิตได้จากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic Reaction) ดังสมการที่ 2.14



การผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตโดยกระบวนการนี้ มีขั้นตอนหลักอยู่ 5 ขั้นตอน คือ

- 1. การทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับกรดซัลฟิวริก ซึ่งให้ความร้อนสูงมาก ทำให้สารละลายร้อนจัดแล้วระเหยน้ำจนได้ของเหลวข้นของแอมโมเนียมซัลเฟต
- 2. การตกผลึก ใช้ถังตกผลึกที่ควบคุมการระเหยนํ้าด้วยสุญญากาศ
- 3. ล้างผลึกที่ได้ขนาดแล้วด้วยนํ้าหรือนํ้าแอมโมเนีย (Ammonia Liquor) เพื่อลดกรดที่เกาะบนผิวผลึก
- 4. อบแห้งในท่ออบ (Drier)
- 5. คัดขนาดโดยใช้ตะแกรงให้ได้ขนาดผลึกที่ต้องการส่วนที่เล็กเกินไปก็หมุนเวียนกลับไปตกผลึกใหม่

2.5.4.2 กระบวนการแอมโมเนียมคาร์บอเนต-ยิปซัม หลักสำคัญของกระบวนการ คือ ปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้แอมโมเนียมคาร์บอเนต ซึ่งทำปฏิกิริยาต่อไปกับยิปซัมหรือแอนไฮไดรต์ (จากธรรมชาติ หรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอื่น) ได้แอมโมเนียมซัลเฟตกับแคลเซียมคาร์บอเนต ดังสมการที่ 2.15

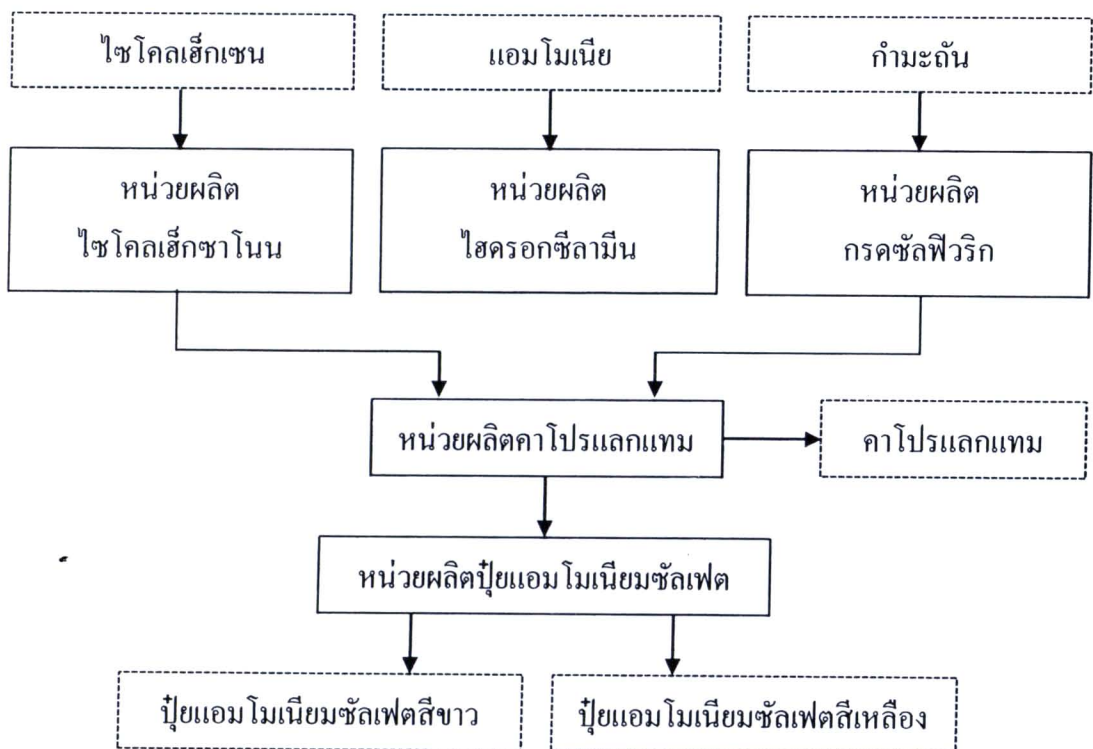


การผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตด้วยกระบวนการนี้ เหมาะสำหรับประเทศที่มีแหล่งยิปซัมหรือแอนไฮไดรต์ตามธรรมชาติหรือผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมซึ่งมีราคาไม่แพง สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตได้ กระบวนการนี้มีข้อด้อยที่สำคัญประการหนึ่ง คือ สารละลายปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตที่ได้จากปฏิกิริยาที่มีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ จึงสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำและตกผลึก

2.5.4.3 ผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตสารคาโปรแลกแทม

คาโปรแลกแทม ($\text{NH}(\text{CH}_2)_5\text{CO}$) เป็นสารที่ใช้ผลิตในลอนบางชนิดสำหรับกระบวนการผลิตมี 5 หน่วย คือ

1. หน่วยผลิตไซโคลเฮกซาโนน (Cyclohexanone) จากไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane, C_6H_{12})
2. หน่วยผลิตไฮดรอกซีลามีนจากแอมโมเนีย
3. หน่วยผลิตกรดซัลฟิวริกจากกำมะถัน
4. หน่วยผลิตคาโปรแลกแทม ใช้สารตั้งต้นซึ่งผลิตจากหน่วยที่ 1-3
5. หน่วยผลิตปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต โดยแยกออกจากหน่วยผลิตคาโปรแลกแทมมาตกผลึก แสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 กระบวนการผลิตคาโปรแลกแทม มีปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นผลพลอยได้ [24]

2.5.4.4 ความเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียมซัลเฟตในดิน

ปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต มีการเปลี่ยนแปลงในดิน ดังนี้

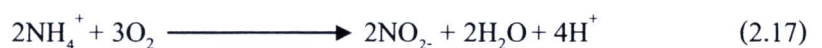
1. การละลายและการแตกตัวของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต เมื่ออยู่ในดินที่มีความชื้นเพียงพอจะละลายน้ำแล้วแตกตัวเป็นแอมโมเนียมไอออน และแอนไอออน ซึ่งองค์ประกอบของปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟต แสดงดังสมการที่ 2.16 ดังนี้



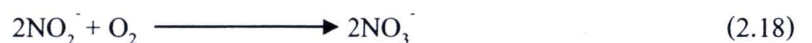
2. การดูดซับและการตรึงแอมโมเนียมไอออนส่วนมากจะถูกดูดซับอยู่กับผิวของคอลลอยด์ดิน เพียงส่วนน้อยคงอยู่ในสารละลายของดิน โดยทั้งสองรูปนี้ยังคงเป็นประโยชน์ต่อพืช แต่จะมีแอมโมเนียมไอออนส่วนหนึ่งถูกตรึงอยู่ในหลัของแร่ดินเหนียวอัลไลต์และเวอร์มิคิวไลต์ ซึ่งไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช [24]

3. ไนตริฟิเคชัน (Nitrification) ของแอมโมเนียมไอออน ในดินไร์ซึ่งมีการถ่ายเทอากาศดี แอมโมเนียมไอออนจากการแตกตัวของปุ๋ยแอมโมเนียมหรือแปรสภาพจากปุ๋ยยูเรีย จะถูกแบคทีเรียในดินออกซิไดซ์ ให้กลายเป็นไนไตรท์และไนเตรต โดยกระบวนการไนตริฟิเคชัน ดังนี้

1) Nitrosomonas spp. ออกซิไดซ์แอมโมเนียมไอออนให้กลายเป็นไนไตรท์ไอออนน้ำและไฮโดรเจนไอออน แสดงดังสมการที่ 2.17



2) Nitrobacter spp. ออกซิไดซ์ไนไตรท์ไอออนให้กลายเป็นไนเตรตไอออน แสดงดังสมการที่ 2.18



ในปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดไฮโดรเจนไอออน 4 โมล จากการออกซิไดซ์แอมโมเนียมไอออน 2 โมล ดังนั้น ปุ๋ยแอมโมเนียมและยูเรียจึงมีผลตกค้างเป็นกรดหรือเป็นปุ๋ยก่อกรด

อย่างไรก็ตามเนื่องจากดินมีความสามารถต้านทานการเปลี่ยนค่า pH หรือความจุบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) ปุ๋ยเหล่านี้จึงไม่ทำให้ค่า pH ของดินลดลงอย่างรวดเร็ว หากการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียมและยูเรีย อัตราค่อนข้างสูงและต่อเนื่องกันหลายปี จะลดค่า pH ของดินที่มีความสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่า pH ได้น้อย เช่น ดินทรายซึ่งมีอินทรีย์วัตถุต่ำ ได้เด่นชัดกว่าดินที่มีค่าดังกล่าวสูง เช่น

ดินเหนียว ดังนั้น ถ้ามีการใช้ปุ๋ยประเภทนี้เป็นประจำ ต้องวัดค่า pH ของดินปีละครั้งหรือทุกๆ สองปี เพื่อให้ทราบการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของดิน

2.7 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ขวัญศิริ ไชยลาภ (2550) [5] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกอนโรงผลิตน้ำประปาบางเขนด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ทำการบดตะกอนให้ละเอียดแล้วทำการร่อนแบบเปียกผ่านตะแกรงร่อนขนาด 325 Mesh จากนั้นนำไปเผาที่ 700° C เป็นเวลา 3 h ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 3 และ 5 M ที่อุณหภูมิ 60 และ 90° C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 6 9 12 และ 24 h พบว่า เกิดซีโอไลต์ชนิด Na-A และ Na-P1 อยู่ร่วมกัน และทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไอออน พบว่า ตัวอย่างความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 3 M ที่อุณหภูมิ 60° C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 9 h มีความสามารถในการดูดซับแอมโมเนียมไอออนสูงสุด เท่ากับ 25.9 mg/g ตัวดูดซับ

กันยารัตน์ การิสุข (2550) [11] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมกระจกด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยทำการหลอมกากของเสียของโรงงานอุตสาหกรรมกระจกกับ NaOH และ $Al(OH)_3$ อัตราส่วน 1:1.2 :1.2 ที่อุณหภูมิ 550° C เป็นระยะเวลา 1 h โดยใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 1 2 และ 3 M ที่อุณหภูมิ 60 และ 90° C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 5 และ 7 h พบว่า เกิดซีโอไลต์ชนิด HS ชนิด P (Gismondine) และชนิด A อยู่ร่วมกัน ซึ่งซีโอไลต์ที่ให้ปริมาณการเกิดผลึกมากที่สุด เท่ากับ ร้อยละ 29.58 ที่ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH 3 M อุณหภูมิ 90° C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5 h

มนตรี ทองคำ (2542) [14] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง โดยการนำเถ้าลอยถ่านหินมาเผาที่อุณหภูมิ 700° C เป็นเวลา 3 h ทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH และ KOH ความเข้มข้น 1 2 3 และ 4 M ที่อุณหภูมิ 70 100 และ 120° C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 24 48 72 96 และ 120 h และใช้ส่วนผสมของสารตัวอย่างต่อสารละลาย 0.125 g/mL พบว่าเป็นซีโอไลต์ชนิด P ชนิด Chabazite ชนิด Nepheline และ ชนิด Gismondine ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้สารละลาย NaOH และ KOH ความเข้มข้นของ 2 M ที่อุณหภูมิ 100° C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 72 h ซึ่งให้ค่า CEC เท่ากับ 6.19 meq/g ซีโอไลต์

ภัทธา เพ่งธรรมกิริติ และคณะ (2550) [18] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินของโรงไฟฟ้าแม่เมาะ โดยการนำเถ้าลอยถ่านหินไปอบที่อุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 24 h โดยการทำปฏิกิริยาด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 0.5 M และ 2 M โดยอัตราส่วนระหว่าง NaOH กับเถ้าลอยถ่านหิน เท่ากับ $10\text{ cm}^3/\text{g}$ ที่อุณหภูมิ 100°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 24 h พบว่า เกิดซีโอไลต์ชนิด Na-P1 และ ชนิด HS โดยทำปฏิกิริยาด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 2 M ที่อุณหภูมิ 100°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 24 h ซึ่งให้ค่า CEC สูงที่สุด เท่ากับ 1.88 meq/g และได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะในน้ำเสีย พบว่า สามารถกำจัดไอออนทองแดงและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ได้สูงถึง 99%

ชรศ ศรีสถิตย์ และอนรรฆอร พันธุ์ไพศาล (2551) [25] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขานอ้อย โดยนำเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อยมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นระยะเวลา 2 h จากนั้นทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 และ 325 Mesh แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700°C เป็นระยะเวลา 3 h จากนั้นนำเถ้าลอยทั้งสองชนิดมาผสมกับสารละลาย NaOH และสารละลายต่างจากกระบวนการรมด้าโลหะ (Spent Alkaline) ความเข้มข้น 2 และ 3.5 M (อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารละลาย เท่ากับ 1 : 8) ที่อุณหภูมิ 90 และ 100°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 4 และ 5 วัน พบว่า เมื่อนำเถ้าลอยถ่านหินที่ทำปฏิกิริยากับ NaOH เกิดเป็นซีโอไลต์ชนิด P1 ส่วนเถ้าลอยถ่านหินที่ทำปฏิกิริยากับ Spent Alkaline เกิดเป็นซีโอไลต์ชนิด P1 และ Unnamed Zeolite (Sodium Aluminum Silicate Hydrate) และเมื่อนำเถ้าลอยขานอ้อยที่ทำปฏิกิริยากับ NaOH และ Spent Alkaline เกิดเป็นซีโอไลต์ชนิด P1 สภาวะเหมาะสมที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ คือ ที่ความเข้มข้นของสารละลาย Spent Alkaline 2 M ที่อุณหภูมิ 90°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 5 วัน ซึ่งให้ค่า CEC เท่ากับ 4.18 และ 2.86 meq/g

Takaaki, et al. (2005) [17] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าตะกอนจากการผลิตกระดาษ โดยการทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 3 M กับความเข้มข้นของ Si ที่ 0 5 10 และ 20 L โดยเติม Diatomite เท่ากับ 0 16 32 และ 64 g ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 90°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 24 h ซึ่งเถ้าตะกอนกระดาษมีองค์ประกอบของ Si ค้า (35.9%) และ Ca ที่ใช้เป็นส่วนประกอบของ Calcite พบว่า ซีโอไลต์ที่ได้ให้ค่า CEC สูง และเมื่อนำเถ้าที่ได้จากตะกอนกระดาษมาสังเคราะห์จะได้ซีโอไลต์ชนิด HS ซึ่งให้ค่า CEC เท่ากับ 0.50 meq/g และถ้าทำการเพิ่มซิลิกาลงไป จะทำให้ได้ซีโอไลต์ชนิด Na-P1 ซึ่งให้ค่า CEC เท่ากับ 1.30 meq/g แล้วนำซีโอไลต์ชนิด Na-P1 ที่สังเคราะห์ได้ไปทำการดูดซับ พบว่ามีความสามารถในการกำจัด NH_4^+ และ PO_4^+ ในน้ำเสียที่ค่า pH ระหว่าง 5-9 ได้ดีที่สุด

Anuwattana, et al. (2009) [26] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกรัน (Cupola slag) และตะกอนอะลูมิเนียม (Aluminum Sludge) ที่ได้จากโรงงานหล่อหลอมโลหะ ส่วนที่ 1 นำตะกรันมาบดละเอียดให้อยู่ในช่วง 20-50 μm แล้วใช้แม่เหล็กในการแยกเหล็กออกจากตะกรัน จากนั้นนำตะกรันที่ผ่านการแยกเหล็กออกแล้วมาผสมรวมกับ HCl 3 M เพื่อกำจัด Ca และ H_2SO_4 4 M เพื่อกำจัดเหล็ก ในอัตราส่วน 1:1 ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 1.5 h ส่วนที่ 2 นำตะกอนอะลูมิเนียมมาทำการกำจัดสารปนเปื้อนด้วยการกัดกร่อน (Etching) ด้วย H_2SO_4 Acid 0.005 M และทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ โดยใช้อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ เท่ากับ 2.36, 4.17, 5.07, 5.46, 7.88, 35.47 และ 70.94 โดยทำปฏิกิริยากับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 3 M ที่อุณหภูมิ 90°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 1-9 h พบว่าอัตราส่วนของ $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ที่เหมาะสม เท่ากับ 4.17 และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 3 h เกิดซีโอไลต์ชนิด Na-A (64%) ซึ่งเกิดร่วมกับซีโอไลต์ชนิด Hs (3%) ซึ่งเกิดซีโอไลต์ชนิด Na-A มากที่สุด ซึ่งให้ค่า CEC เท่ากับ $442.8\text{ mg-CaCO}_3/\text{g}$ (442.8 meq/g)

Inada, et al. (2005) [27] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล กับสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 2.0 และ 3.5 M จำนวน 80 mL ผสมกับเถ้าลอย 10 g ที่อุณหภูมิ 100°C เวลาในการทำปฏิกิริยา 5 และ 24 h พบว่าเกิดเป็นซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-P1 และซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด HS โดยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-P1 เกิดเมื่อใช้เถ้าลอยที่มีซิลิกาสูง และสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-P1 ที่ได้มีค่า CEC เท่ากับ 3.00 meq/g ส่วนซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด HS เกิดเมื่อใช้สารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้นสูง

Juan, et al. (2007) [28] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าถ่านหินที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิ (150 และ 200°C) ความเข้มข้นของสารละลายต่าง เท่ากับ 0.5 1 2 และ 3 M สัดส่วนสารละลายต่อเถ้าลอย (Solution/Fly Ash) เท่ากับ 2-15 mm/g และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3-120 h พบว่าเกิดซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-P1 มากที่อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ต่ำ แต่มีระยะเวลาทำปฏิกิริยาที่นาน สำหรับซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด K-F เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ความเข้มข้นของสารละลาย KOH สูง และระยะเวลาทำปฏิกิริยาสั้น ส่วนการเกิดซีโอไลต์เคราะห์ 2 ชนิด คือ K-Chabazite และ K-Phillipsite จะเกิดขึ้นที่สภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ความเข้มข้นของ KOH ต่ำ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานาน จะให้ปริมาณซีโอไลต์มาก อย่างไรก็ตาม ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้สามารถนำไปใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุบวกในงานด้านการบำบัดน้ำเสียได้



Loiha, et al. (2009) [29] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ชนิด β (Beta) ร่วมกับซิลิกาที่ได้จากแกลบ (RHS) ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อัตราส่วนของเจล Si/Al เท่ากับ 8 13 15 20 50 100 150 และ 200 ที่อุณหภูมิ 135°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 วัน พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อัตราส่วนของเจล Si/Al ระหว่าง 8-20 เกิดซีโอไลต์ชนิด β เพียงอย่างเดียว โดยที่อัตราส่วนของเจล Si/Al เท่ากับ 13 เกิดผลึกสูงที่สุดและขนาดของผลึกใหญ่ที่สุด อนุภาคของซีโอไลต์ชนิด β มีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดประมาณ $1.5\ \mu\text{m}$ และพื้นที่ผิวโดยเฉลี่ย $670\ \text{m}^2/\text{g}$ การสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อัตราส่วนของเจล Si/Al เท่ากับ 50-200 เกิดซีโอไลต์ชนิด Beta และ ZMS-12 และการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่อัตราส่วนของเจล Si/Al ที่สูงกว่า 200 เกิดซีโอไลต์ชนิด ZMS-12 เพียงอย่างเดียว

Murayama, et al. (2002) [30] ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน โดยใช้สารละลายชนิดต่างๆ คือ NaOH Na_2CO_3 และ KOH โดยใช้แบบเดี่ยว และใช้ร่วมกันของสารละลาย ในการทำปฏิกิริยาจะผสมเถ้าลอยถ่านหิน $1.0\text{-}4.0\ \text{mol}/\text{dm}^3$ กับสารละลายต่างชนิดต่างๆ โดยกำหนดให้อัตราส่วนของ Solid/Liquid เท่ากับ $100\ \text{g}/400\ \text{cm}^3$ ที่อุณหภูมิ 120°C เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 3 และ 24 h พบว่าเกิดซีโอไลต์ชนิด P และ Chabazite เป็นส่วนใหญ่

Murayama, et al. (2008) [31] ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าถ่านหินด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยการทำปฏิกิริยากับสารละลาย KOH $3\ \text{mol}/\text{dm}^3$ ในการสังเคราะห์ใช้เถ้าลอย 50 g ต่อสารละลาย KOH $200\ \text{cm}^3$ ที่ความเร็วรอบ 500 rpm ที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาอยู่ในช่วงระหว่าง 0-12 h และอุณหภูมิระหว่าง 393-453 K ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของการเกิดซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Potassium-Chabazite (K-CHA) ร่วมกับซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Potassium Aluminum Silicate Hydrate (K-H) พบว่า เกิดซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด K-CHA ร่วมกับซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด K-H ได้ในปริมาณมากและมีลักษณะของผลึกสมบูรณ์ ที่ระยะเวลา 3 h อุณหภูมิ 433 K ได้ค่า CEC เท่ากับ $1.75\ \text{meq}/\text{g}$

Zhao, et al. (2010) [32] ได้ทำการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากแร่ Halloysite ธรรมชาติด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลเพื่อดูดซับ NH_4^+ ในน้ำเสีย โดยเตรียมแร่ Halloysite 2 g ผสมกับ NaOH 2.6 g เพาที่อุณหภูมิ 673 K เป็นเวลา 2 h แล้วนำมาผสมกับน้ำกลั่น 38 mL ทำการกวนที่ระยะเวลา 30 min จนได้เจลที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาเพื่อให้เกิดเป็นเจลอะลูมิเนียมซิลิเกตที่อุณหภูมิ 313 K เป็นระยะเวลา 2 h และที่อุณหภูมิ 363 K เป็นระยะเวลา 5 h ภายใต้สภาวะคงที่ เพื่อให้เกิดการตกผลึกเป็นซีโอไลต์ พบว่า เกิดซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A ($\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{96}\cdot\text{O}_{384216}\text{H}_2\text{O}$) แล้วนำซีโอไลต์สังเคราะห์ที่ได้มาทำการดูดซับ NH_4^+ โดยการทำศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ

ผลของค่า pH ที่เหมาะสม ความเข้มข้นของ NH_4^+ และศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir และ Freundlich พบว่า การดูดซับ NH_4^+ ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A เริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 15 min ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ มีค่าเท่ากับ 7 และ จากพฤติกรรมการดูดซับ NH_4^+ ด้วยซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A พบว่า ค่าไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir มีค่า R^2 เท่ากับ 0.960 ค่า K_L ซึ่งเป็นคงที่ของสมการ Langmuir มีค่าเท่ากับ 0.02 ค่า R_L เป็นตัวบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของการดูดซับมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.16-0.85 ซึ่งการดูดซับที่ดีต้องมีค่า R_L อยู่ในช่วงระหว่าง $0 < R_L < 1$ และค่า $Q_{\max}$ เป็นค่าการดูดซับ NH_4^+ สูงสุดบนพื้นผิวของซีโอไลต์สังเคราะห์ชนิด Na-A มีค่าเท่ากับ 44.3 mg/g และจากค่าไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Freundlich มีค่า K_F ซึ่งเป็นค่าคงที่ของสมการ Freundlich มีค่าเท่ากับ 1.57 ค่า R^2 เท่ากับ 0.990 และค่า $1/n$ มีค่าเท่ากับ 0.625 ซึ่งค่า $1/n$ เป็นค่าที่บ่งบอกเช่นเดียวกับค่า R_L ในสมการ Langmuir ซึ่งการดูดซับที่ดีต้องมีค่า $1/n$ อยู่ในช่วงระหว่าง $0 < 1/n < 1$ เช่นกัน

Hamming, et al. (2010) [33] ได้ทำการกำจัด NH_4^+ ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติ (Chende) จากประเทศจีน เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบซีโอไลต์ชนิด Heulandite Illite และ Montmorillonite เท่ากับ 46 30 และ 24% ตามลำดับ เป็นองค์ประกอบ และมีค่า CEC เท่ากับ 0.82 meq/g จากนั้นทำการเตรียมขนาดอนุภาคของซีโอไลต์โดยการบดแล้วร่อนเป็น 3 ขนาด คือ 0.0754-0.125 0.125-0.2 และ 0.2-0.3 mm ได้ทำการศึกษาผลของค่า pH ที่เหมาะสม ระยะเวลาสัมผัส (Contact Time) ความเข้มข้นของ NH_4^+ และการแลกเปลี่ยนประจุกับสารที่มีประจุบวก ได้แก่ K^+ Ca^{2+} Na^+ และ Mg^{2+} ร่วมกับ NH_4^+ และสารที่มีประจุลบ ได้แก่ Phosphate Sulfate Chloride และ Carbonate ร่วมกับ NH_4^+ จากการทดลองพบว่า ผลของค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัด NH_4^+ ด้วยซีโอไลต์ธรรมชาติจากประเทศจีน มีค่าเท่ากับ 8 และเมื่อนำซีโอไลต์ทั้ง 3 ขนาด มาทำการศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับเริ่มที่ระยะเวลา 180 min และขนาดอนุภาคของซีโอไลต์สังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด คือ 0.0754-0.125 mm แล้วนำมาหาความเข้มข้นของ NH_4^+ ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 48 g/L จากนั้นทำการกำจัด NH_4^+ โดยการเติม K^+ Ca^{2+} Na^+ และ Mg^{2+} พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด NH_4^+ โดยการเติม NH_4^+ ร่วมกับ $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ โดยประสิทธิภาพการกำจัด NH_4^+ ร่วมกับ Mg^{2+} มีค่าสูงสุด เท่ากับ 95.3% และ ประสิทธิภาพในการกำจัด NH_4^+ โดยการเติม NH_4^+ ร่วมกับ Phosphate > Sulfate > Chloride > Carbonate โดยประสิทธิภาพการกำจัด NH_4^+ ร่วมกับ Phosphate มีค่าสูงสุด เท่ากับ 95.0% จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสารที่มีประจุลบด้วยสมการ Langmuir พบว่า มีค่า R^2 อยู่ช่วงระหว่าง 0.902-0.989 และค่า $Q_{\max}$ เป็นค่าการดูดซับสูงสุดเมื่อเติม NH_4^+ ร่วมกับ Phosphate บนพื้นผิวของซีโอไลต์ มีค่าเท่ากับ 9.41 mg/g และจากค่าไอโซเทอมการดูด

ห้ของสมการ Freundlich มีค่า R^2 อยู่ช่วงระหว่าง 0.991-0.997 และค่า $1/n$ มีค่าเท่ากับ 0.46-0.66 ซึ่งการดูดซับที่ดีต้องมีค่า $1/n$ อยู่ในช่วงระหว่าง $0 < 1/n < 1$

Maranón, et al. (2006) [34] ได้ทำการกำจัด NH_4^+ ด้วยหินภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) จากประเทศโรมาเนีย เมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD พบซีโอไลต์ชนิด Clinoptilolite เป็นองค์ประกอบหลัก และมีค่า CEC เท่ากับ 1.51 meq/g แล้วทำการบดให้มีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.16-0.25 mm โดยทำศึกษาระยะเวลาเข้าสู่สมดุลการดูดซับ ผลของค่า pH ความเข้มข้นของ NH_4^+ และศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir และ Freundlich พบว่า การกำจัด NH_4^+ ด้วยหินภูเขาไฟ เริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลา 3 h ค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ มีค่าเท่ากับ 7 จากนั้นทำการดูดซับโดยใช้น้ำเสียที่มีการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าซึ่งมีองค์ประกอบของสารที่มีประจุบวกแตกต่างกัน 3 ชุด คือ ชุดที่ 1 Single Component ใช้สารละลาย $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 20-300 mgNH_4^+/L ควบคุมค่า pH เท่ากับ 7 ที่ระยะเวลา 3 h ชุดที่ 2 Three Component มีปริมาณ Cd^{2+} และ Zn^{2+} เท่ากับ 6.5 และ 3.0 mg/L ตามลำดับ เป็นองค์ประกอบใส่ในชุดที่ 1 และชุดที่ 3 Multicomponent มี Cd^{2+} Zn^{2+} Ca^{2+} และ Na^+ เท่ากับ 6.5 3.0 1,400 และ 6,300 mg/L ตามลำดับ เป็นองค์ประกอบใส่ในชุดที่ 1 จากพฤติกรรม การดูดซับ NH_4^+ ด้วยหินภูเขาไฟ จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Langmuir พบว่าค่า R^2 มีค่าอยู่ช่วงระหว่าง 0.99-1.00 ค่า K_L ซึ่งเป็นค่าคงที่ของสมการ Langmuir มีค่าอยู่ในช่วง 0.03-0.04 ซึ่งการดูดซับที่ดีต้องมีค่า R_L อยู่ในช่วงระหว่าง $0 < R_L < 1$ และค่า Q_{max} จากชุดที่ 3 เป็นค่าการดูดซับ NH_4^+ สูงสุด บนพื้นผิวของหินภูเขาไฟ มีค่าเท่ากับ 18.97 mg/g และจากค่าไอโซเทอมการดูดซับของสมการ Freundlich มีค่า K_F มีค่าอยู่ในช่วง 0.58-1.29 ค่า R^2 เท่ากับ 0.94-1.00 และค่า $1/n$ มีค่าอยู่ในช่วง 1.54-1.82 ซึ่งค่า $1/n$ มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าหินภูเขาไฟ ไม่ชอบสารละลาย NH_4^+ ซึ่งการดูดซับที่ดีต้องมีค่า $1/n$ อยู่ในช่วงระหว่าง $0 < 1/n < 1$