

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ตัวดูดซับ

ปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการแยกแก๊สผสมหรือของเหลวผสม ได้แก่ ความสามารถของตัวดูดซับในการเลือกดูดซับสารชนิดใดชนิดหนึ่งได้ดี การไม่เกิดปฏิกิริยากับสารประกอบอื่น ๆ และความยากง่ายของการฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ดังนั้นการเลือกตัวดูดซับจึงพิจารณาตามความเหมาะสม

2.1.1 ตัวดูดซับในอุตสาหกรรม

ตัวดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือตัวดูดซับชนิดถ่านที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก และตัวดูดซับชนิดสารประกอบอนินทรีย์ การประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมของตัวดูดซับแต่ละชนิดสรุปได้ในตารางที่ 2.1

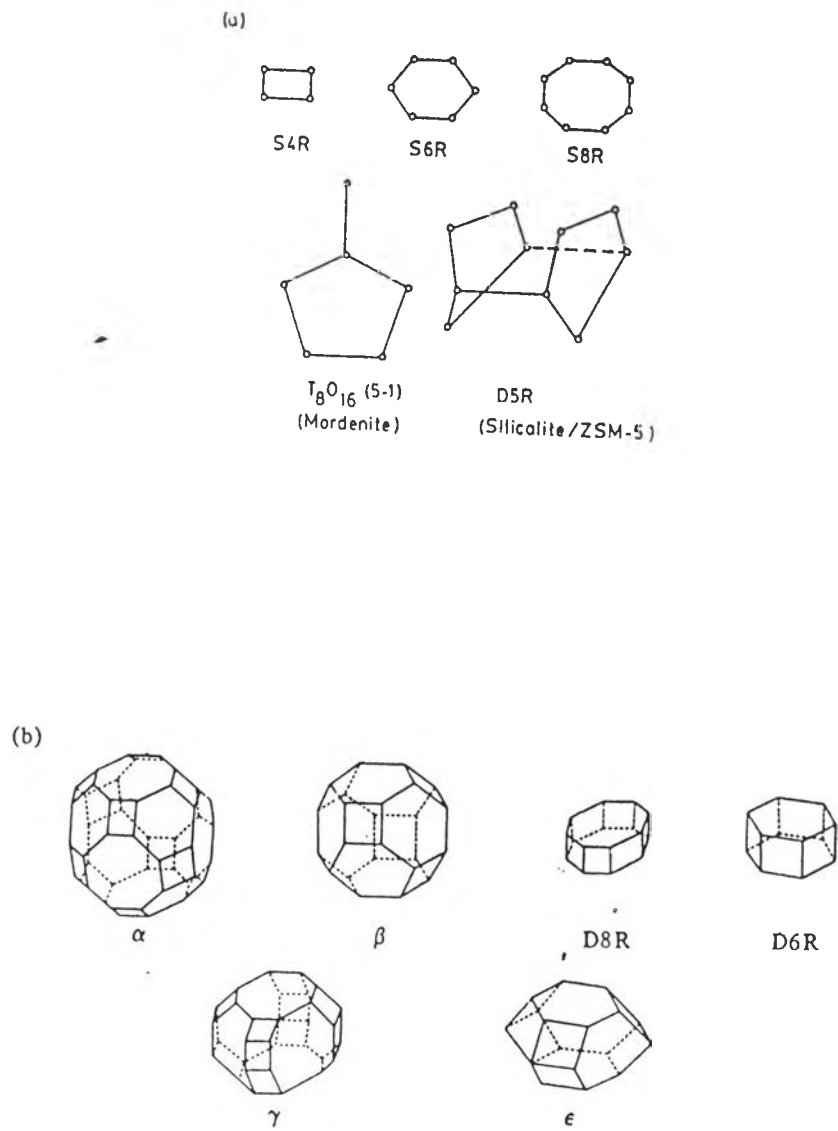
ตารางที่ 2.1 ตัวดูดซับในอุตสาหกรรม [17]

ตัวดูดซับ	การประยุกต์ใช้
ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)	ใช้ในการแยกแก๊สและสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว เช่น ตัวทำละลาย ไอของแก๊สโซลีน ใช้แยกสารมีพิษ
คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ (Carbon molecular sieves , CMS)	กระบวนการทำไฮโดรเจนให้บริสุทธิ์ กระบวนการแยกอากาศ กระบวนการทำให้อากาศบริสุทธิ์
ซีโอไลต์ (Zeolites) : สังเคราะห์ (Synthesis) ธรรมชาติ (Natural)	กำจัดความชื้น ทำไฮโดรเจนบริสุทธิ์ การทำอากาศให้บริสุทธิ์ การแยกอากาศหรือแยกสารอะโรมาติก
ซิลิกาเจล (Silica gel)	กำจัดความชื้นในแก๊สที่อุณหภูมิห้อง
อะลูมินา (Activated alumina)	กำจัดความชื้นในแก๊สที่อุณหภูมิสูง

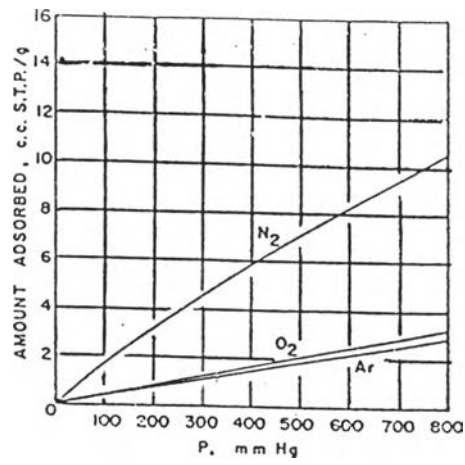
จากตารางที่ 2.1 พบว่าตัวดูดซับที่นิยมใช้ในกระบวนการแยกอากาศมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในกระบวนการแยกอากาศ [4]

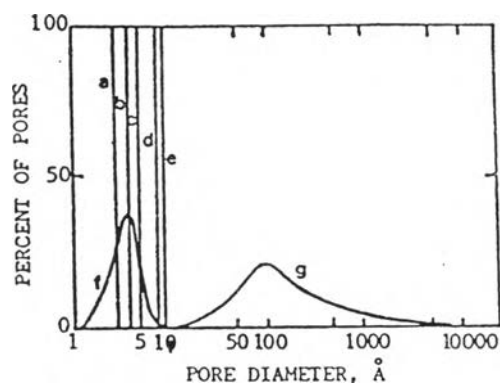
ตัวดูดซับ	การประยุกต์ใช้
1. ซีโอไลต์	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นผลึกของสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminosilicate) ของโลหะหมู่ I และหมู่ II ซีโอไลต์มีสูตรโมเลกุลทั่วไปดังนี้ $M_{x/n} [(AlO_2)_x (SiO_2)_y \cdot zH_2O]$ เมื่อ M คือ โลหะหมู่ I และหมู่ II - โครงสร้างของผลึกซีโอไลต์ประกอบด้วยผลึกทรงสี่หน้าของ SiO_4 และ AlO_4 ซึ่งแต่ละหน่วยจัดเรียงตัวต่อกันโดยการใช้ออกซิเจนร่วมกัน เกิดเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นวงของอะตอมออกซิเจน และต่อกันเป็นโครงสร้างที่เป็นรูปทรงหลายเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 - ผลึกซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของ y/x ซึ่งสัดส่วนดังกล่าวมีค่าตั้งแต่ 1 ขึ้นไป ลักษณะการจัดเรียงตัวของ SiO_4 และ AlO_4 และชนิดของโลหะประจุบวกทำให้ซีโอไลต์แบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ มากมาย - ปริมาณการดูดซับด้วยซีโอไลต์ชนิด A , X และ Y ของแก๊สไนโตรเจนสูงกว่าแก๊สออกซิเจน ประมาณ 3-4 เท่า [4] ณ สภาวะเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.2 แม้ว่าอัตราการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนจะใกล้เคียงกัน แก๊สไนโตรเจนซึ่งถูกดูดซับได้มากกว่าแก๊สออกซิเจนจะถูกแยกออกจากแก๊สออกซิเจน
2. คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ	<ul style="list-style-type: none"> - คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟเป็นถ่านชนิดพิเศษชนิดหนึ่งที่สามารถดูดซับได้มากขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวในการดูดซับถูกเพิ่มให้มากขึ้น - คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟผลิตจากวัตถุดิบได้หลายชนิดที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านโค้ก ถ่านหิน โดยผ่านขั้นตอนการทำให้เป็นถ่านและขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง และมีการกระจายขนาดของรูพรุนที่อยู่ในช่วงค่อนข้างแคบ $4-9 \text{ \AA}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 [4] - กลไกการดูดซับของคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ ขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของแต่ละโมเลกุลที่แตกต่างกัน ดังนั้นในกระบวนการแยกอากาศ แก๊สออกซิเจนจึงถูกแยกออกจากแก๊สไนโตรเจน เนื่องจากแก๊สออกซิเจนแพร่เข้าไปในรูพรุนได้เร็วกว่าแก๊สไนโตรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 [4]



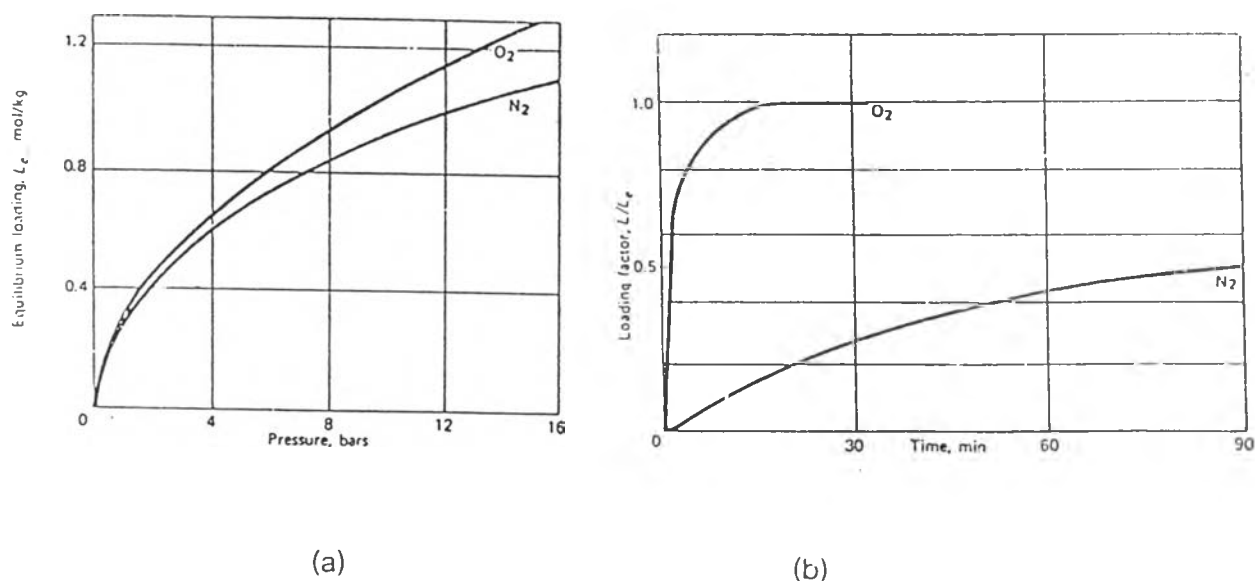
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซีโอไลต์ (a) secondary building units และ (b) polyhedral units [4]



รูปที่ 2.2 สมดุลการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สออกซิเจนด้วยซีโอไลต์ชนิด 5A [4]



รูปที่ 2.3 การกระจายขนาดรูพรุนของ (a) ซีโอไลต์ชนิด 3A (b) 4A (c) 5A (d) 10X (e) 13X (f) คาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ และ (g) ถ่านกัมมันต์ [4]



รูปที่ 2.4 (a) สมดุลการดูดซับของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจนด้วยคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟ
(b) อัตราการดูดซับด้วยคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีฟซึ่งแสดงในรูปของสัดส่วนของปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล [4]

2.1.2 ตัวดูดซับในธรรมชาติ

หินภูเขาไฟพบว่าจะมีปริมาณสารประกอบซิลิกาค่อนข้างมากประมาณร้อยละ 60 ถึง 70 โดยน้ำหนัก โดยกำเนิดแล้วหินภูเขาไฟเป็นหินกลุ่มที่เกิดจากการเย็นตัวของลาวา มีปริมาณไอน้ำและแก๊สต่าง ๆ ละลายปนอยู่มาก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการเย็นตัวดังนี้

1. หินเพอร์ไลต์ เป็นหินภูเขาไฟที่เย็นตัวขณะที่ไหลไปตามพื้นผิว
2. หินพัมมิช เป็นหินภูเขาไฟที่เย็นตัว ในขณะที่ลอยในอากาศก่อนตกถึงพื้นผิว

1) หินเพอร์ไลต์ (Perlite)

หินเพอร์ไลต์เป็นหินอัคนีที่มีส่วนประกอบคล้ายหินไรโอไลต์ (rhyolitic composition) [18] ไม่มีผลึกอยู่ภายในโครงสร้าง และมักจะมีน้ำอยู่ ทำให้หินนี้เมื่อแตกจะคล้ายกันหอยอันเกิดจากการหดตัวเมื่อหินเย็นลง องค์ประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์แสดงในตารางที่ 2.3 หินเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่มีคุณสมบัติที่ขยายตัวได้ทันทีเมื่อได้รับความร้อนอย่างฉับพลัน ทำให้หินมีคุณค่าในเชิงพาณิชย์ประมาณร้อยละ 70 ของผลผลิตเพอร์ไลต์ที่พองตัว นำไปใช้ผสมในปูนพลาส

เตอร์ อีกร้อยละ 15 นำไปใช้ทำคอนกรีตเบา และที่เหลือนำไปใช้เป็นฉนวน เครื่องกรอง ขนาดกลาง ตัวปรับสภาพดิน ตัวเติมไนลี ตัวควบคุมคุณภาพโคลนบ่อเจาะ เป็นต้น หินเพอร์ไลต์ที่พองตัวจะเบา คือ จะมีน้ำหนักประมาณ 35.7 กิโลกรัมต่อปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร แต่มักจะอ่อนและเปราะบาง ความเป็นฉนวนมักจะแปรผันไปตามความหนาแน่นของหิน กล่าวคือยิ่งมีความหนาแน่นน้อยก็ยิ่งเป็นฉนวนความร้อนได้ดี ดังนั้นจึงมักนำหินเพอร์ไลต์มาอัดแน่นเมื่อนำไปใช้ทำฉนวน [19]

1) หินพัมมิช (Pumice)

หินพัมมิชเป็นหินภูเขาไฟที่เกิดจากการเย็นตัวของลาวาในขณะที่ลอยในอากาศก่อนตกถึงพื้นผิว [18] มีลักษณะเป็นเส้นใยและช่องว่างจำนวนมาก ซึ่งช่องว่างนั้นก็คือรูพรุนที่เกิดจากการระเหยของก๊าซต่าง ๆ และไอน้ำ โดยส่วนที่เป็นเส้นใยก็คือ เนื้อหินซึ่งประกอบขึ้นด้วยแก้วภูเขาไฟที่ยังมีรูเป็นท่อขนาดเล็กอยู่ภายในเนื้อหินอีก โดยปกติหินพัมมิชจะนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น สมัยก่อนถูกนำมาใช้ทำผงขัดตัว [19] ใช้ในการดูดซับความชื้นและของเหลวต่าง ๆ เป็นต้น

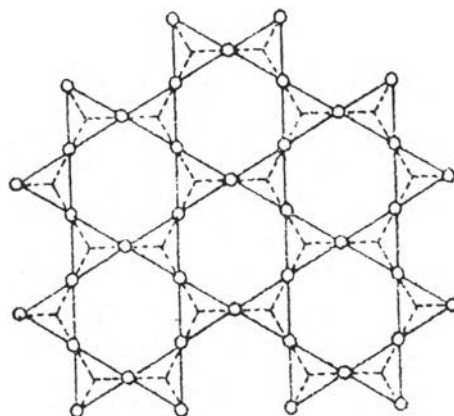
หินพัมมิช เป็นผลึกออลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ของหินภูเขาไฟ ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อแก้ว มีสีจางและมีซิลิกาสูง จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 3 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นแก้วภูเขาไฟ ส่วนที่เป็นแร่ดินเหนียว และส่วนที่เป็นแร่ซีโอไลต์ [5] หินพัมมิชจะมีส่วนที่เป็นแร่ดินเหนียว (Clay Minerals) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญ ซึ่งมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวอยู่ในกลุ่มของแรมมอนต์โมริลโลไนต์ (Montmorillonites) หินเพอร์ไลต์และหินพัมมิชเกิดขึ้นพร้อมกัน ภายหลังจากการระเบิดของภูเขาไฟ องค์ประกอบทางเคมีภายในเนื้อหินทั้ง 2 ชนิดจึงคล้ายกันดังแสดงในตารางที่ 2.3

2.1) แร่ดินเหนียว (Clay mineral group)

แร่ดินเหนียวมีองค์ประกอบทางเคมีเป็นกลุ่มไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกต (hydrous aluminous silicate) แต่มักมีไฮดรอกซิลของเหล็ก แมกนีเซียม แคลเซียม โบแทสเซียม โซเดียม เป็นต้น ประกอบอยู่ด้วย แร่ดินเหนียวส่วนใหญ่มีโครงสร้างเป็นฟิลโลซิลิเกต [7] ซึ่งมีโครงสร้างของหน่วยเซลล์เป็นแบบแผ่น เกิดจากชั้นของออกตะฮีดรอน (octahedron) 1 ชั้นแทรกอยู่ระหว่างกลางของชั้นเตตระฮีดรอน (tetrahedron) 2 ชั้นในแผ่น ยกเว้นแร่ดินเหนียวพวกออกตาปูลโกต์ จะมีลักษณะโครงสร้างเป็นไอโนซิลิเกต

โครงสร้างฟิสิกส์ซิลิเกต [20]

โครงสร้างฟิสิกส์ซิลิเกตแต่ละเตตระฮีดรอลใช้ออกซิเจนร่วมกัน 3 อะตอมกับเตตระฮีดรอลข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยมีการจับตัวกันเป็นแผ่น อัตราส่วน $\text{Si} : \text{O} = 2 : 5$ แร่มักเป็นเกล็ดหรือแผ่น มีรอยแตกที่สมบูรณ์ระหว่างแผ่นที่ยึดติดกันด้วยพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้หน่วยโครงสร้างอื่นอาจแทรกระหว่างแผ่นได้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างฟิสิกส์ซิลิเกต [7]

ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์และหินพัมมิช [6]

องค์ประกอบ (%โดยน้ำหนัก)	เพอร์ไลต์	พัมมิช
SiO_2	72.63	66.86
Al_2O_3	14.73	15.23
Fe_2O_3	1.31	1.37
TiO_2	0.05	0.17
CaO	1.58	1.17
MgO	0.27	0.91
Na_2O	2.04	1.09
K_2O	5.15	4.47
H_2O	0.49	1.97
LOI	1.80	6.32

แร่ที่มีโครงสร้างฟิลโลซิลิเกต ได้แก่

1. ทัลค์ (talc) $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$
2. เซอร์เพนทีน (serpentine) $Mg_3(Si_2O_5)(OH)_8$
3. กลุ่มแร่ไมกา
 - 3.1 มัสโคไวท์ (muscovite) $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
 - 3.2 ไบโอไทท์ (biotite) $K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
 - 3.3 ฟิโลโกปิต์ (phlogopite) $KMg_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$
 - 3.4 เลพิโดไลท์ (lepidolite) $K(Al,Al)_{2-3}(AlSi_3O_{10})(O,OH,F)_2$
4. กลุ่มแร่ดินเหนียว
 - 4.1 โครงสร้างกาอลินไนท์
 - กาอลินไนท์ (kaolinite) $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$
 - ดิสออร์เดอร์กาอลินไนท์ (disordered kaolinite) $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$
 - ดิกไคท์ (dickite) $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$
 - แฮลลอยไซต์ (halloysite) $Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O$
 - แอลโลเฟน (allophane) $Al_2SiO_5 \cdot nH_2O$
 - 4.2 โครงสร้างมอนท์โมริลโลไนท์
 - มอนท์โมริลโลไนท์ (montmorillonite) $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4$
 - ซาโปไนท์ (saponite) $(Mg,Al)_6(Si,Al)_8O_{20} \cdot (OH)_4$
 - นันโทรไนท์ (nontronite) $Fe_2(Al,Si)_4O_{10}(OH)_2Na_{0.3} \cdot 4H_2O$
 - 4.3 โครงสร้างอิลไลท์
 - อิลไลท์ (illite) $K_xAl_4(Si_{8-x}Al_x)O_{20}(OH)_4$
 - 4.4 โครงสร้างคลอไรท์
 - คลอไรท์ (chlorite) $(Mg,Fe)_3(Si,Al)_4O_{10} \cdot (OH)_2(Mg,Fe)_3(OH)_6$
 - 4.5 โครงสร้างเวอร์มิคูไลท์
 - เวอร์มิคูไลท์ (vermiculite) $(OH)_4(Mg,Ca)_x(Si_{8-x}Al_x)(Mg,Fe)_6 \cdot O_{20} \cdot yH_2O$

2.2) โครงสร้างของแร่ดินเหนียว

ดินเหนียว หมายถึง แร่ดินเหนียวที่มีเม็ดแร่ขนาดเล็กปนกับสารอินทรีย์ สารแขวนลอย (colloid) และชิ้นส่วนแร่ชนิดอื่นที่มีขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 2 ไมครอน) ได้แก่ แร่ควอทซ์ เฟลด์สปาร์ โดโลไมท์ แคลไซต์ เป็นต้น [7]

แร่ดินเหนียวจะอ่อนตัวหรือมีสภาพพลาสติก (plasticity) แต่เมื่อเผาไฟจะแข็งตัวเป็นหิน นอกจากนี้ยังหดตัวได้เมื่อนำไปเผาให้แห้ง มีจุดหลอมตัว (melting temperature) ตั้งแต่ 1,000 – 1,600 °C แร่ดินเหนียวจัดเป็นแร่ทุติยภูมิ (secondary minerals) [7] เกิดจากการสลายตัวของแร่ควอทซ์ เฟลด์สปาร์ ไมกาและคาร์บอนेट แร่ดินเหนียวเป็นแร่ประกอบหินของหินตะกอน หินดินดาน ซึ่งจะสลายตัวกลายเป็นดินต่อไป

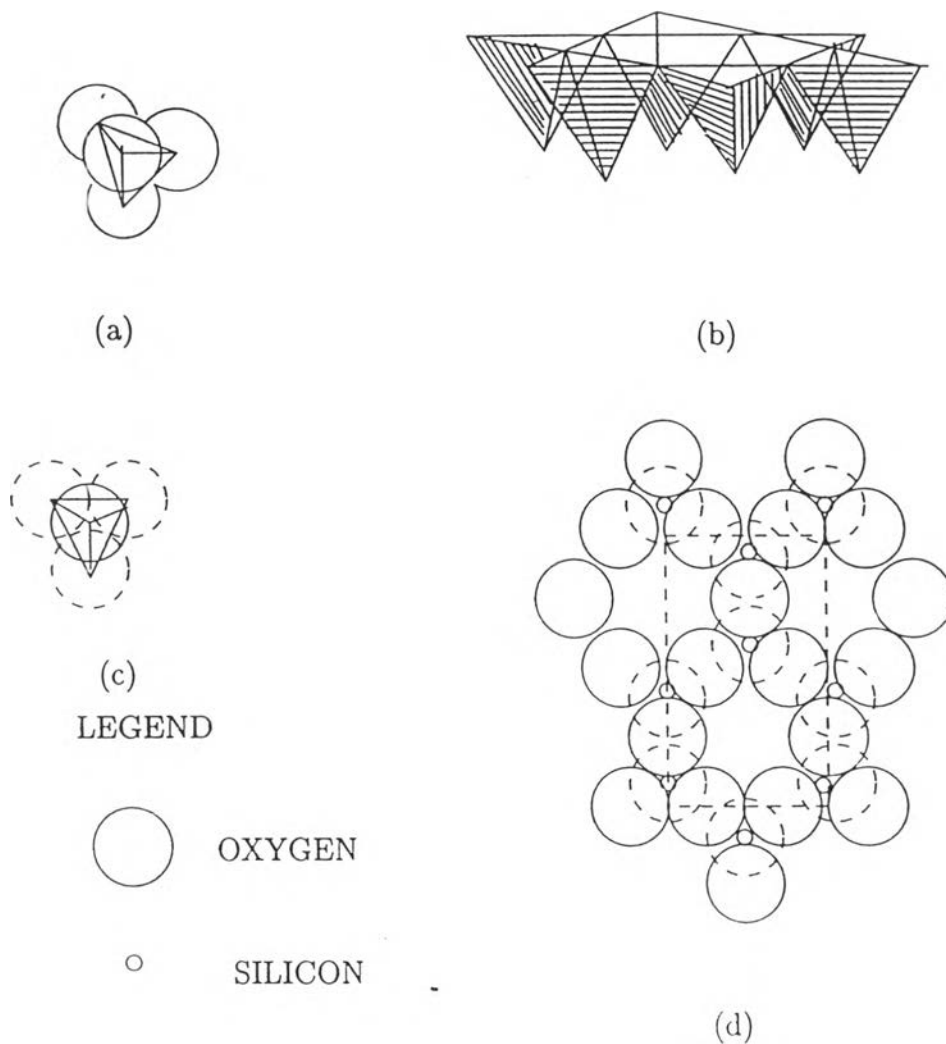
ชนิดของแร่ดินเหนียวจะแบ่งตามโครงสร้างภายในและการจัดเรียงในโครงสร้างของแร่ในแต่ละหน่วยซึ่งประกอบด้วยชั้นที่สำคัญ 2 ชั้น [20] วางตัวซ้อนกัน ได้แก่

1. ชั้นของผลึกทรงสี่หน้า (tetrahedron)

เป็นการจับตัวของซิลิกาเตตระฮีดรอน (ซึ่งประกอบด้วยไอออนของซิลิกอนกับไอออนของออกซิเจน) หลายชุดเข้าด้วยกันเป็นชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยมีการใช้ออกซิเจนร่วมกัน แต่แต่ละหน่วยของเตตระฮีดรอนในชั้นนี้ มีสูตรเคมีเป็น Si_2O_5 หรือถ้าหากมีไอออนของไฮโดรเจนอยู่ สูตรเคมีแทนแต่ละหน่วยจะเป็น $\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_2$

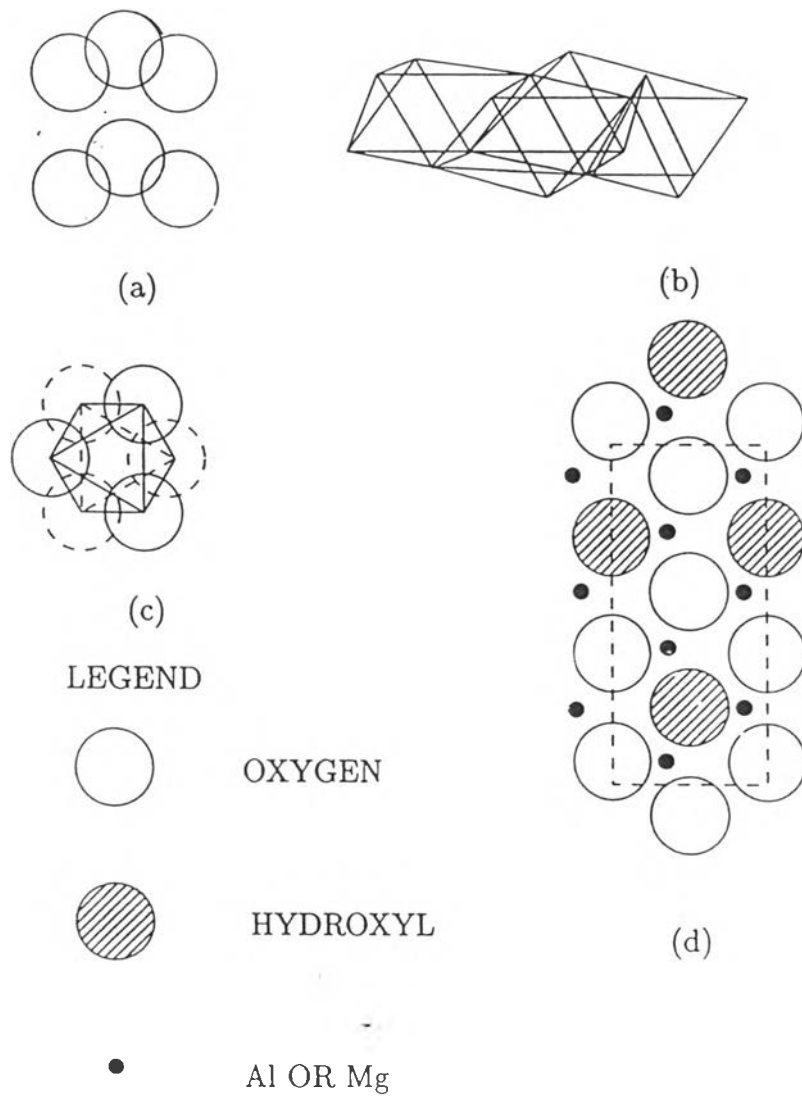
2. ชั้นของผลึกทรงแปดหน้า (octahedral)

เป็นการจับตัวของไอออนอลูมิเนียมหรือแมกนีเซียม 1 ไอออนกับไฮดรอกซิล 6 ไอออน ทำให้ได้รูปออกตะฮีดรอน (8 หน้า) แต่ละหน่วยจะจับต่อเนื่องกันเป็นชั้น โดยมีการใช้ไฮดรอกซิลร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 อนึ่งในชั้นของออกตะฮีดรอนอาจมีการแทนที่โดยไอออนที่มีขนาดใกล้เคียงกัน เช่น ไอออนของ Fe^{3+} หรือ Mg^{2+} แทนที่ Al^{3+} หน่วยของออกตะฮีดรอนในชั้นนี้ก็มีสูตรเคมีเป็น $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ หรือ $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ ถ้ามีการสลับชั้นกันในแผ่นแร่ก็จะทำให้ได้แร่ดินเหนียวต่างชนิดกันไป



- (a) Tetrahedral arrangement of Si and O
 (b) Perspective sketch of tetrahedron linking
 (c) Projection of tetrahedron on plane of sheet
 (d) Top view of tetrahedron sheet

รูปที่ 2.6 โครงสร้างของผลึกทรงสี่หน้า [20]



- (a) Octahedral arrangement of Al or Mg with O or OH
- (b) Perspective sketch of tetrahedron linking
- (c) Projection of tetrahedron on plane of sheet
- (d) Top view of tetrahedron sheet

รูปที่ 2.7 โครงสร้างของผลึกทรงแปดหน้า [20]

2.3) โครงสร้างของมอนท์โมริลโลไนท์ [20]

โครงสร้างมอนท์โมริลโลไนท์ในหน่วยผลึก ดังแสดงในรูปที่ 2.8 มีส่วนประกอบโครงสร้างดังนี้

1. มีชั้นของผลึกทรงแปดหน้า 1 ชั้น แทรกอยู่ระหว่างกลางของชั้นผลึกทรงสี่หน้า 2 ชั้น (เรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า t-o-t) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 มีได้ตรงกลางแต่ละชั้น จะยึดติดกันอย่างหลวม ๆ โดยมีโมเลกุลของน้ำเป็นตัวเชื่อมระหว่างหน่วยเซลล์ แกนของแรงจึงมีระยะทางไม่แน่นอน ระยะแกนขึ้นอยู่กับจำนวนน้ำที่เป็นตัวกลาง

2. อาจมีไอออนของแมกนีเซียมเข้าไปแทนที่อลูมิเนียม ในชั้นออกตะฮีดรอลได้บ้าง

3. แต่ละหน่วยเซลล์จะมีน้ำเป็นตัวเชื่อม ปริมาณน้ำนี้อาจเพิ่มขึ้นได้และอาจมีไอออนของแคลเซียม โซเดียม และโพแทสเซียมแทรกอยู่ระหว่างหน่วยเซลล์

แร่ที่สำคัญในกลุ่มนี้ ได้แก่ แร่มอนท์โมริลโลไนท์ ซาโปไนท์ และนัันโทรไนท์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. แร่มอนท์โมริลโลไนท์

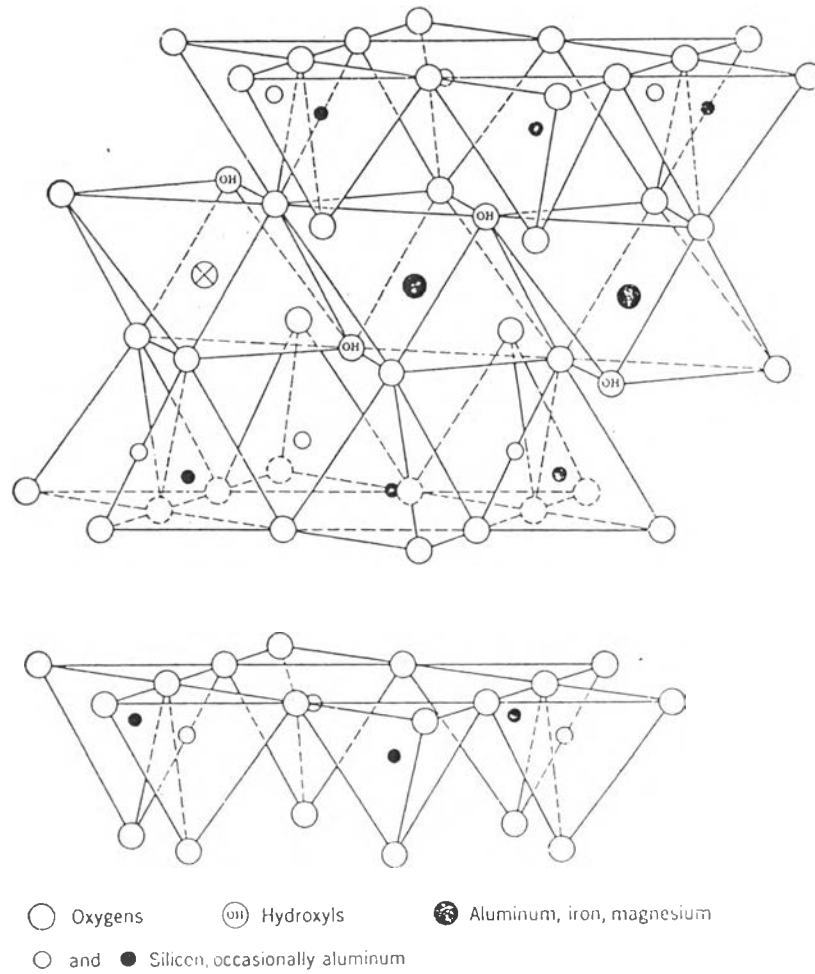
เป็นแร่ที่มีรูปผลึกในระบบโมโนคลินิก มีสูตรเคมีเป็น $Al_4Si_8O_{20}(OH)_4$ แร่มอนท์โมริลโลไนท์ เป็นแคลเซียมมอนท์โมริลโลไนท์ (Ca - montmorillonite : $Ca_{0.5}(Mg, Al)_3Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot xH_2O$) หรือเป็นโซเดียมมอนท์โมริลโลไนท์ (Na - montmorillonite : $Na_{0.5}(Mg, Al)_3Si_8O_{20}(OH)_4 \cdot xH_2O$) ทั้งนี้เพราะโลหะมีการแทนที่กันได้ เรียกว่า การแลกเปลี่ยนไอออนที่เป็นเบส (base exchange) โดยโซเดียมเข้าไปแทนที่แคลเซียม นอกจากนี้ในโครงสร้างของแร่มอนท์โมริลโลไนท์ ยังมีการแทนที่อลูมิเนียมด้วยแมกนีเซียม

2. แร่ซาโปไนท์

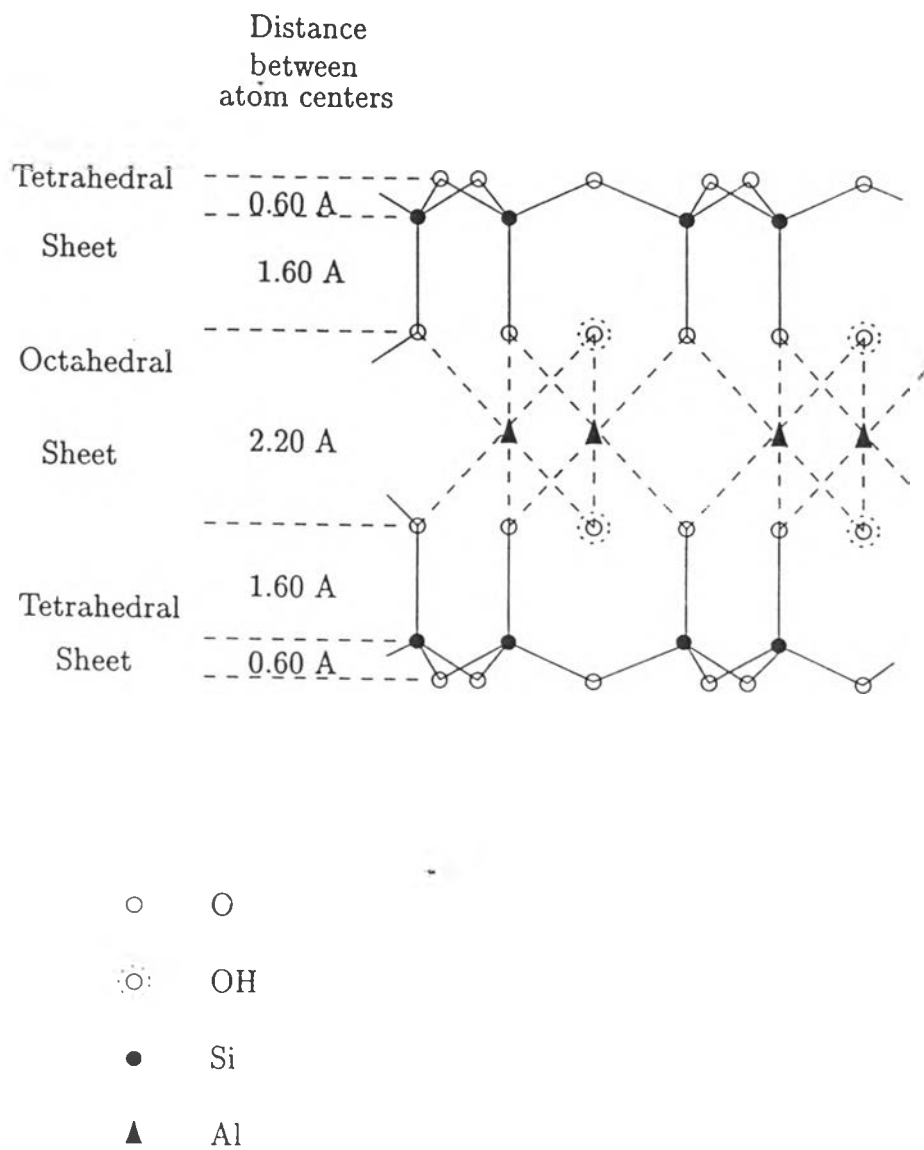
เป็นแร่ที่มีรูปผลึกอยู่ในระบบโมโนคลินิก มีสูตรเคมีเป็น $(Mg, Al)_6(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4$ แร่นี้มีโครงสร้างเหมือนแร่มอนท์โมริลโลไนท์ แต่ไอออนที่เป็นอลูมิเนียมถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียม

3. แร่นัันโทรไนท์

เป็นแร่ที่มีรูปผลึกอยู่ในระบบโมโนคลินิก มีสูตรเคมีเป็น $Fe_2(Al, Si)_4O_{10}(OH)_2Na_{0.3}(H_2O)_4$ แร่นี้มีโครงสร้างเหมือนแร่มอนท์โมริลโลไนท์ แต่ไอออนที่เป็นอลูมิเนียมถูกแทนที่ด้วยแมกนีเซียม



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของแร่มอนท์โมริลโลไนท์ [20]



รูปที่ 2.9 การจัดเรียงอะตอมในหน่วยเซลล์ของ three layer mineral [21]

2.2 ทฤษฎีการดูดซับแก๊ส

การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่ตัวที่ถูกดูดซับซึ่งเป็นโมเลกุลของสารประกอบในวัฏภาคแก๊สหรือของเหลว (Adsorbate) ยึดเกาะที่ผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ที่เป็นของแข็ง โมเลกุลของสารประกอบดังกล่าวนี้อาจยึดเกาะติดเพียง 1 ชั้นหรือมากกว่าก็ได้ [17] การดูดซับสามารถนำไปใช้ในการแยกของไหลเนื้อผสม (heterogeneous fluid) หรือของไหลเนื้อเดียว (homogeneous fluid) ที่แยกโดยวิธีอื่นได้ยาก เช่น การแยกของไหลผสมที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน เป็นต้น

การดูดซับแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี [17] โดยพิจารณาจากแรงของการดูดซับระหว่างผิวของของแข็งกับโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับยึดเกาะกับผิวของตัวดูดซับด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals Forces) ซึ่งเป็นแรงชนิดเดียวกันกับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลหรือระหว่างประจุและปริมาณที่ถูกดูดซับจะลดลงเมื่อ อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน (exothermic)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับยึดเกาะกับผิวของตัวดูดซับด้วยพันธะเคมี โดยอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการที่โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับและผิวของตัวดูดซับมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน หรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น การดูดซับชนิดนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานกระตุ้นเสมือนหนึ่งเกิดปฏิกิริยาเคมี

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการแยกด้วยการดูดซับคือ

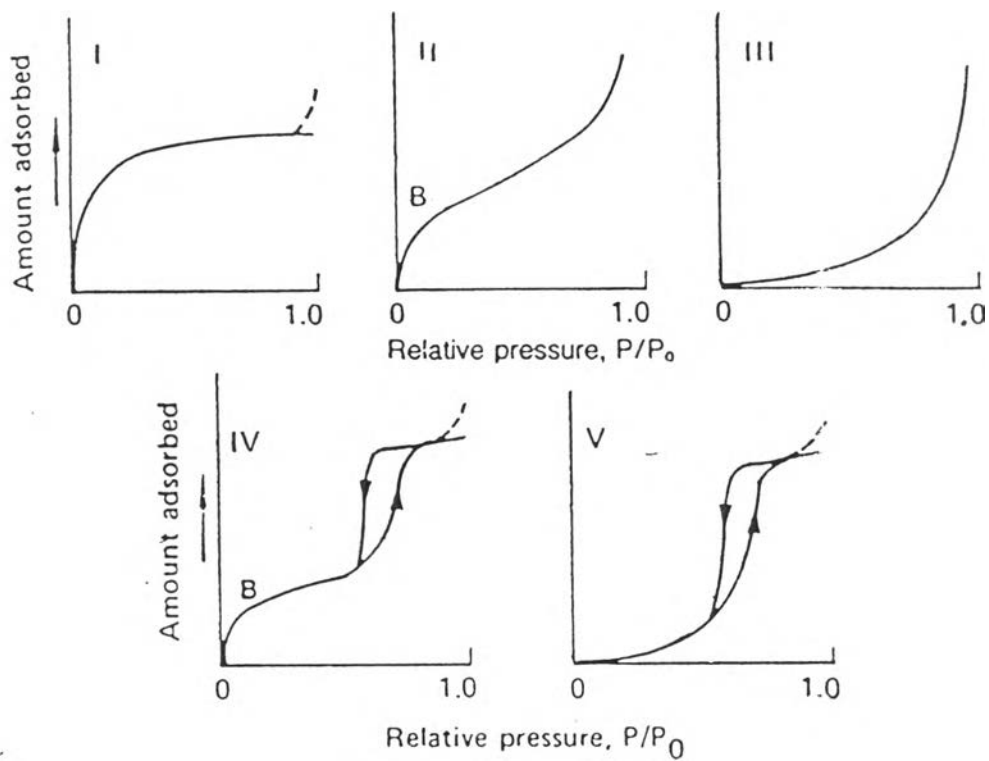
1. สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)
2. อัตราการดูดซับ (adsorption rate)

2.2.1 สมดุลการดูดซับแก๊ส

สำหรับการดูดซับสารองค์ประกอบเดียว เมื่อให้ตัวที่ถูกดูดซับสัมผัสกับตัวดูดซับในระยะเวลาที่นานเพียงพอจะเกิดสมดุลการดูดซับ ซึ่งในขณะนั้นปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไว้จะขึ้นกับอุณหภูมิ (T) และความดันย่อย (P) ของตัวที่ถูกดูดซับนั้น ดังแสดงในสมการ 2.1

$$q = f(P,T) \quad (2.1)$$

ปริมาณที่ถูกดูดซับ (q) สามารถแสดงอยู่ในหน่วยของปริมาตรการดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ โมลที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับหรือมวลที่ถูกดูดซับต่อหน่วยมวลของตัวดูดซับ ซึ่งความสัมพันธ์ของสมดุลการดูดซับมักเสนอในลักษณะของปริมาณการดูดซับในตัวดูดซับกับความดันสำหรับการดูดซับแก๊สหรือกับความเข้มข้นสำหรับการดูดซับในของเหลว ณ อุณหภูมิคงที่ สำหรับสมดุลการดูดซับแก๊ส สามารถแบ่งออกได้ 5 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.10

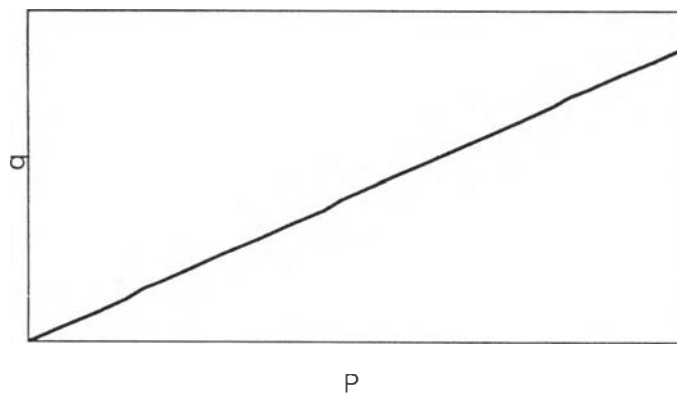


รูปที่ 2.10 ลักษณะสมดุลการดูดซับแก๊ส [4]

1) สมดุลการดูดซับของเฮนรี [17]

เมื่อปริมาณที่ถูกดูดซับ (q) มีค่าน้อย ๆ โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับไว้มีผลกระทบต่อกันค่อนข้างน้อย ลักษณะดังกล่าวมักเกิดขึ้นเมื่อตัวที่ถูกดูดซับมีความเข้มข้นต่ำ ๆ หรือมีปริมาณที่ถูกดูดซับน้อย ภายใต้สภาวะดังกล่าวพบว่า ปริมาณที่ถูกดูดซับเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันย่อยของตัวที่ถูกดูดซับดังรูปที่ 2.11 และแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ 2.2

$$q = K_H P \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.11 สมดุลการดูดซับเชิงเส้น

โดยที่ K_H คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวสอดคล้องตามกฎของเฮนรี (Henry 's Law) บางครั้งจึงเรียกว่า ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของเฮนรี

ค่าคงที่สมดุลการดูดซับจะขึ้นกับอุณหภูมิของระบบ ซึ่งสอดคล้องกับปฏิกิริยาคายความร้อน คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะลดลงตามสมการของ van't Hoff [4] ดังแสดงในสมการ 2.3

$$\frac{\partial \ln K}{\partial (1/T)} = \frac{\Delta H_{ads}}{R} \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔH_{ads} คือความร้อนของการดูดซับ ถ้าความร้อนของการดูดซับไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ล็อกการริธึมของค่าคงที่สมดุลการดูดซับ ($\ln K_H$) จะเป็นสัดส่วนส่วนกลับกับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ดังนั้นค่าความร้อนของการดูดซับหาได้จากความชันของสมการเส้นตรงระหว่างค่าคงที่สมดุลการดูดซับ ($\ln K_H$) กับส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$)

2) สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ [17]

สำหรับการดูดซับที่เกิดขึ้นเฉพาะบนพื้นผิวของตัวดูดซับเท่านั้น แม้ว่าปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นได้เมื่อความดันเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณการดูดซับจะถูกจำกัดด้วยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับที่จำกัด ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของสมดุลการดูดซับแก๊สคือ

$$\frac{q}{q_s} = \frac{K_L P}{1 + K_L P} \quad (2.4)$$

เมื่อ q_s เป็นปริมาณที่ถูกดูดซับสูงสุด และ K_L เป็นค่าคงที่ของแลงเมียร์ (Langmuir 's constant) เมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณการดูดซับจะเข้าใกล้ปริมาณการดูดซับสูงสุดแต่ความดันของระบบจะต้องต่ำกว่าความดันอิ่มตัวของแก๊สที่ถูกดูดซับ ณ อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ สมดุลการดูดซับมีลักษณะตามแบบที่ I ดังรูปที่ 2.10

3) สมดุลการดูดซับของฟรอยดลิช [17]

สำหรับการดูดซับที่ปริมาณการดูดซับไม่ถูกจำกัดด้วยพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ นั่นคือปริมาณการดูดซับยังคงเพิ่มขึ้นได้เมื่อความดันของระบบเพิ่มสูงขึ้น สมการความสัมพันธ์ของสมดุลการดูดซับคือ

$$q = K_F P^n \quad , n \neq 1 \quad (2.5)$$

โดยที่ K_F คือ ค่าคงที่สมดุลการดูดซับของฟรอยดลิช (Freundlich 's constant) และ n คือ ค่าคงที่ซึ่งไม่เท่ากับหนึ่ง ถ้า n น้อยกว่า 1 สมดุลการดูดซับมีลักษณะเดียวกับสมดุลชนิดที่ I ในรูปที่ 2.10 และถ้า n มากกว่า 1 สมดุลการดูดซับจะมีลักษณะเดียวกับสมดุลชนิดที่ III ในรูปที่ 2.10

4) สมดุลการดูดซับของ BET [17]

สำหรับการดูดซับที่เกิดชั้นบนชั้นของตัวถูกดูดซับซึ่งอยู่บนผิวของตัวดูดซับ มีผลให้ปริมาณการดูดซับไม่ถูกจำกัดด้วยพื้นผิวของตัวดูดซับ และปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความดันของระบบเข้าสู่ใกล้ความดันไอของสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งมีลักษณะคล้ายกลับสมดุลการดูดซับชนิดที่ II ในรูปที่ 2.10 สมการความสัมพันธ์ของสมดุลการดูดซับคือ

$$\frac{q}{q_s} = \frac{K_{BET}(P/P_s)}{(1 - (P/P_s) + K_{BET}(P/P_s))(1 - (P/P_s))} \quad (2.6)$$

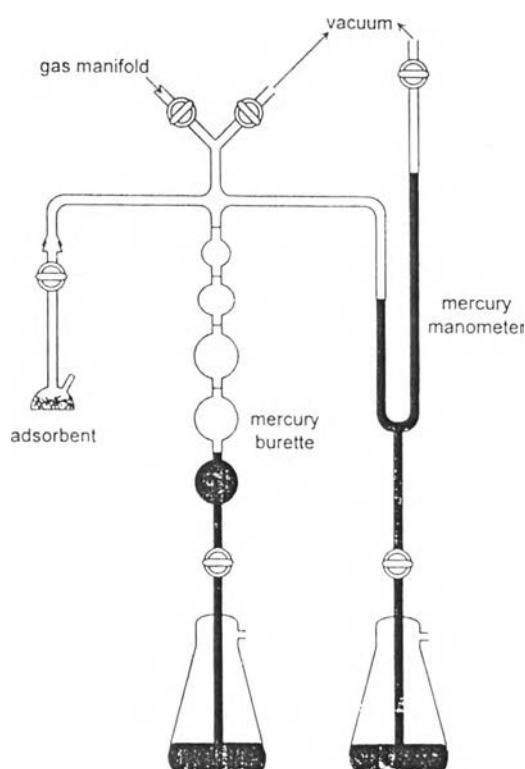
โดยที่ q_s คือปริมาณที่ถูกดูดซับเต็มพื้นผิวของตัวดูดซับหรือบนพื้นผิว 1 ชั้น P_s คือความดันไออิ่มตัวของตัวที่ถูกดูดซับได้ และ K_{BET} คือค่าคงที่ของสมดุลการดูดซับตาม BET นอกจากนี้สมดุลการดูดซับแบบนี้สามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง เมื่อความดันของระบบสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างล่างนี้

$$0.05 \leq P/P_s \leq 0.35$$

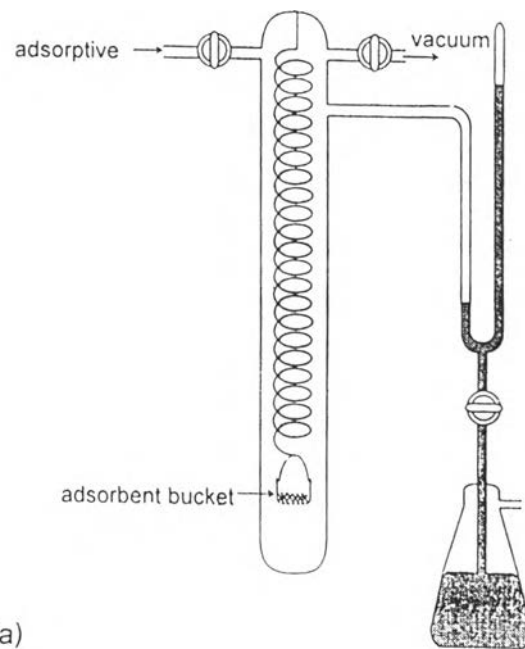
2.2.2 การวัดสมมูลการดูดซับ

การวัดสมมูลการดูดซับสำหรับแก๊สชนิดหนึ่ง ควรวัดทั้งปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับ และปริมาณแก๊สที่เหลือในระบบ ณ จุดหนุมิที่กำหนดเลือกไว้ โดยทั่วไปเพื่อให้สมมูลการดูดซับเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว การวัดสมมูลการดูดซับแก๊สจึงมักเริ่มต้นที่ความดันสูญญากาศสมบูรณ์ การวัดสมมูลการดูดซับแก๊สดังกล่าวข้างต้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ

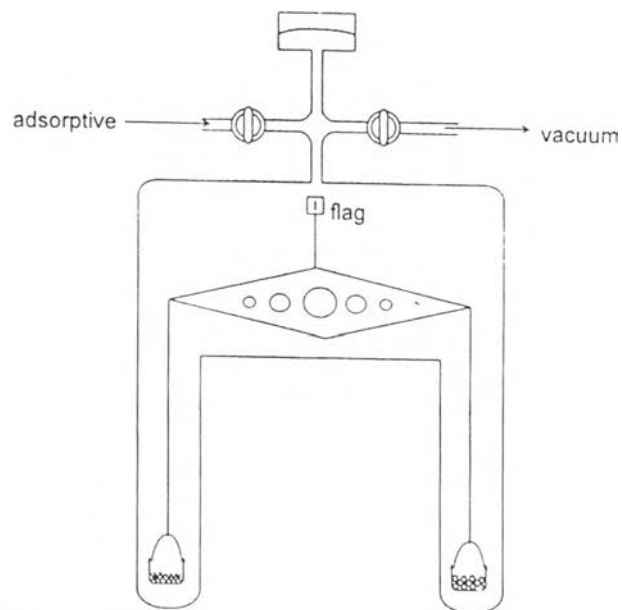
1. วัดปริมาณแก๊สที่เหลือในลักษณะของความดันของระบบที่เปลี่ยนไปและวัดปริมาณแก๊สที่เติมเข้าสู่ระบบ จากข้อมูลทั้งสองส่วนสามารถคำนวณหาปริมาณที่ถูกดูดซับได้ วิธีนี้ต้องการอุปกรณ์วัดความดันที่ละเอียดมาก และปริมาตรของระบบที่ถูกต้อง เครื่องมือวัดชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12
2. วัดปริมาณที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ ซึ่งอาศัยการวัดมวลของตัวดูดซับที่เพิ่มขึ้น และปริมาณแก๊สที่เหลือของความดันของระบบที่เปลี่ยนไป เมื่อเติมแก๊สที่ต้องการดูดซับเข้าสู่ระบบ เช่น CAHN 2000 , McBain Bark [22] ซึ่งใช้ง่ายและวัดปริมาณการดูดซับได้ถึงระดับ $0.1 \mu\text{g}$ วิธีนี้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดมวลที่มีความแม่นยำมาก ๆ และอุปกรณ์วัดความดันที่ละเอียดพอควร เครื่องมือวัดชนิดนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับด้วยวิธีเชิงปริมาตร [22]



(a)



(b)

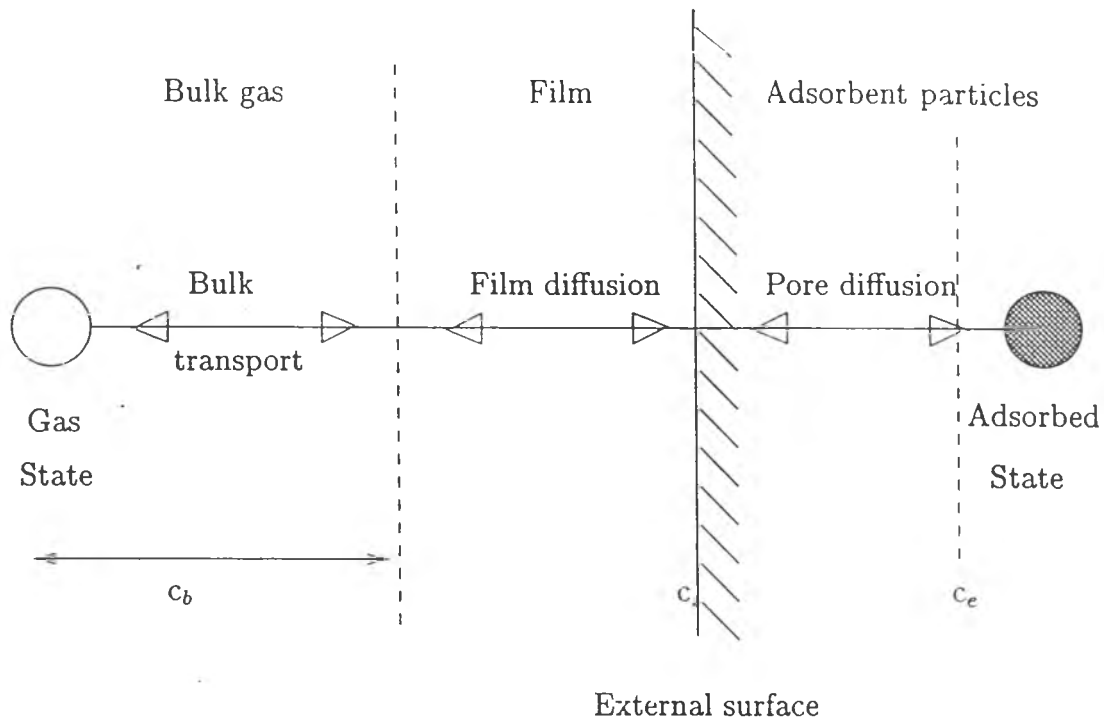
รูปที่ 2.13 ชุดอุปกรณ์วัดปริมาณแก๊สที่ถูกดูดซับด้วยวิธีวัดเชิงน้ำหนัก
 (a) McBain spring adsorption (b) adsorption microbalance [22]

ส่วนการวัดสมมูลการดูดซับ ณ ความดันบรรยากาศหรือสูงกว่า และอุณหภูมิที่กำหนด โดยให้แก๊สผสมระหว่างแก๊สที่ต้องการดูดซับกับแก๊สเฉื่อยต่อการดูดซับ ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับที่จัดเตรียมไว้ สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธีคือ

1. วิธีวัดสมมูลการดูดซับ โดยให้แก๊สผสมที่กำหนดความเข้มข้นไว้ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ จนกระทั่งแก๊สผสมที่ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับออกมามีความเข้มข้นเท่ากับแก๊สผสมที่ไหลเข้าชั้นตัวดูดซับ ปริมาณการดูดซับคำนวณได้จากผลต่างของปริมาณแก๊สดูดซับที่ไหลเข้าสู่ชั้นตัวดูดซับกับไหลออกจากชั้นตัวดูดซับ ซึ่งสมมูลกับความเข้มข้นของแก๊สผสมนี้ไหลเข้าสู่ชั้นตัวดูดซับ นอกจากนี้ชั้นตัวดูดซับต้องกว้างเพียงพอให้เกิดสมมูลการดูดซับได้
2. วิธีวัดค่าคงที่ของสมมูลการดูดซับ โดยการเติมแก๊สที่ถูกดูดซับปริมาณน้อย ๆ เข้าในแก๊สเฉื่อยที่ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ ค่าคงที่ของสมมูลการดูดซับสามารถคำนวณได้จากช่วงเวลาที่แก๊สที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่ผ่านชั้นตัวดูดซับ วิธีนี้ใช้ได้ดีเฉพาะสมมูลการดูดซับที่สอดคล้องกับสมการของเฮนรี่

2.3 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นกระบวนการที่ตัวที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่จากวัฏภาคของไหลเข้าสู่ภายในตัวดูดซับซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็ก ดังนั้นอัตราการดูดซับจึงขึ้นกับอัตราการแพร่ของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับไปบนพื้นผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นกลไกของการดูดซับจะประกอบด้วยการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มรอบตัวดูดซับ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ตัวที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่จากวัฏภาคของไหลเข้าสู่พื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับ และการแพร่ผ่านรูพรุนของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ตัวที่ถูกดูดซับเคลื่อนที่จากพื้นผิวภายนอกของตัวดูดซับผ่านรูพรุนของตัวดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ขั้นตอนที่ช้าที่สุดระหว่างการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มรอบตัวดูดซับ และการแพร่ผ่านรูพรุนของตัวดูดซับจะเป็นขั้นตอนการกำหนดอัตราการดูดซับของตัวที่ถูกดูดซับ อย่างไรก็ตามโมเลกุลของสารประกอบบางชนิดไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนเข้าไปภายในรูได้ ดังนั้นอัตราการดูดซับของโมเลกุลนั้นจึงขึ้นกับอัตราการแพร่ของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้าไปบนพื้นผิวดูดซับภายนอก



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการแพร่ของโมเลกุลของตัวดูดซับ [6]

2.3.1 การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม [17]

ถ้าอัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มรอบตัวดูดซับเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซับกับสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้ดังแสดงในสมการ 2.7

$$R_{ads} = (k_f a) \frac{\varepsilon(c_b - c_s)}{\rho_s(1 - \varepsilon)} \quad (2.7)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient, k_f) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง เรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number, Re) และชมิตดัมเบอร์ (Schmidt number, Sc) สำหรับตัวดูดซับทรงกลมที่มีรัศมี R_p ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของ Ranz และ Marshall [17] ดังแสดงในสมการ 2.8

$$k_f \frac{2R_p}{D_m} = 2.0 + 0.6Sc^{1/3} Re^{1/2} \quad (2.8)$$

$$Sc = \mu/\rho D_m$$

$$Re = 2R_p G/\mu$$

สำหรับแพ็กเบด (packed bed) ที่มีอนุภาคตัวดูดซับขนาดรัศมี R_p เดียวกันสามารถหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแพร่ผ่านชั้นฟิล์มภายนอก (mass transfer coefficient) ได้จาก Wakao และ Funazki ดังแสดงในสมการ 2.9

$$k_f \frac{2R_p}{D_m} = 2.0 + 1.1\text{Re}^{0.6} \text{Sc}^{1/3} \quad (2.9)$$

$$\text{Sc} = \mu/\rho D_m$$

$$\text{Re} = 2R_p G/\mu$$

เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynold number) อยู่ในช่วง 3 – 10,000

2.3.2 การแพร่ผ่านรูพรุน [17]

การแพร่ภายในรูพรุนของตัวดูดซับขึ้นอยู่กับความถี่ของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผนังของรูพรุน ถ้าความถี่ของการชนกันเองระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับสูงกว่าความถี่ของการชนกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผนังของรูพรุน การแพร่ผ่านรูพรุนจะเทียบเท่ากับการแพร่แบบโมเลกุล (Molecular diffusion) แต่ถ้าตรงกันข้ามการแพร่ผ่านรูพรุนจะเทียบเท่ากับการแพร่แบบน็ดเซน (Knudsen diffusion)

หลักสำคัญที่ใช้สำหรับการกำหนดลักษณะการแพร่ผ่านรูพรุนทั้งสองแบบ คือ อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ย (average pore diameter) ของตัวดูดซับกับ mean free path ของตัวที่ถูกดูดซับ ถ้าอัตราส่วนมากกว่า 10 การแพร่ผ่านรูพรุนจะเป็นการแพร่แบบโมเลกุล แต่ถ้าอัตราส่วนน้อยกว่า 0.1 จะเป็นการแพร่แบบน็ดเซน

การเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ของตัวดูดซับมีผลทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยมีแนวโน้มลดลง ดังนั้นการแพร่ผ่านรูพรุนจึงเป็นการแพร่แบบน็ดเซน สามารถเขียนความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ 2.10 [17]

$$D_K = \frac{2\sqrt{8RT}}{3\sqrt{M\pi}} R_p \quad (2.10)$$

เมื่ออัตราการแพร่ผ่านรูพรุนเป็นขั้นตอนกำหนดอัตราการดูดซับ สามารถเขียนสมการแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลแพร่ผ่านรูพรุน (pore mass transfer coefficient, k_{pore}) ดังแสดงในสมการ 2.11 [17]

$$R_{ads} = k_{pore}(c_s - c_e) \quad (2.11)$$

อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (mass transfer coefficient) อาจได้มาจากการทดลองเพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงหาอัตราการดูดซับประจักษ์ (effective rate of adsorption) แทนการหาอัตราการแพร่ภายในรูพรุน (rate of pore diffusion) ซึ่งหาได้จากสมการที่อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (overall mass transfer coefficient, k_o) ดังแสดงในสมการ 2.12 [17]

$$R_{ads} = k_o(c_b - c_e) \quad (2.12)$$

2.4 การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ

การฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ [23] คือ การนำตัวดูดซับที่ได้ดูดซับตัวที่ถูกดูดซับไว้จนเต็มปริมาณแล้วกลับมาใช้งานอีกครั้ง โดยการปล่อยตัวที่ถูกดูดซับไว้ออกจากผิวของตัวดูดซับ จนกระทั่งมีปริมาณตัวที่ถูกดูดซับไว้เหลือน้อยที่สุด หรือไม่มีสารใด ๆ ถูกดูดซับไว้เลย การฟื้นฟูสภาพสามารถดำเนินการได้ด้วยการปรับสภาวะของระบบการดูดซับให้เหมาะสมด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธี ดังนี้

1. การเปลี่ยนอุณหภูมิ เนื่องจากการดูดซับเป็นปรากฏการณ์คายความร้อน ปริมาณที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะน้อยกว่าปริมาณที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนกับระบบการดูดซับ ตัวที่ถูกดูดซับไว้จะถูกปล่อยออกมาจากผิวของตัวดูดซับ นั่นคือสามารถนำกลับมาใช้งานได้อีกครั้ง วิธีนี้สามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง แต่ต้องใช้เวลาและอาจทำให้ตัวที่ถูกดูดซับสลายตัวหรือเปลี่ยนเป็นสารอื่นเนื่องจากความร้อนได้
2. การเปลี่ยนความดัน ปริมาณที่ถูกดูดซับจะลดน้อยลงเมื่อความดันรวมของระบบการดูดซับลดต่ำลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อลดความดันลงต่ำกว่าความดันบรรยากาศ แต่มักไม่นิยมใช้ ต้องใช้อุปกรณ์มากขึ้นและมีค่าใช้จ่ายสูงชันด้วย แม้ว่าวิธีการนี้จะไม่สามารถฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับได้ทัดเทียมกับวิธีการเปลี่ยนอุณหภูมิ แต่วิธีการนี้มีช่วงเวลากการฟื้นฟูสภาพที่สั้นกว่าวิธีการเปลี่ยนอุณหภูมิมาก จึงมักนิยมใช้กับระบบที่การดูดซับไม่เหนียวแน่นมาก

3. การไล่ด้วยสารเจือย สารเจือย คือ สารที่ไม่ถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับชนิดหนึ่งที่เราเลือกไว้ ดังนั้นการไล่ด้วยสารเจือยให้ผลเทียบเท่ากับการลดความดัน แต่เป็นความดันย่อยของระบบที่เป็นแก๊ส หรือเทียบเท่ากับการลดความเข้มข้นของตัวที่ถูกดูดซับได้ของระบบที่เป็นของเหลว โดยทั่วไปการไล่ด้วยสารเจือยจะดำเนินการให้ไหลสวนทางกับการดำเนินการปกติ และเพื่อลดค่าใช้จ่ายสำหรับการลงทุนและการดำเนินการ จึงมักนิยมใช้ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เป็นสารสำหรับไล่สารที่ถูกดูดซับไว้บนผิวของตัวดูดซับ

4. การแทนที่ด้วยตัวที่ถูกดูดซับอื่น ตัวที่ถูกดูดซับอื่น ๆ สามารถเข้าไปแทนที่ตัวที่ถูกดูดซับไว้ก่อนได้ ถ้าตัวที่ถูกดูดซับอื่นนั้นสามารถเกาะบนผิวของตัวดูดซับได้ดีกว่าหรือเหนียวแน่นกว่า ดังนั้นตัวดูดซับที่ฟื้นฟูสภาพแล้วจะดูดซับตัวที่ถูกดูดซับอื่นไว้ และจะถูกแทนที่ด้วยสารที่ต้องการแยกอีกครั้งในการใช้งานตามปกติ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อื่น ๆ เพิ่มเติมสำหรับแยกของผสมของสารที่ต้องการแยกออกจากตัวที่ถูกดูดซับอื่นที่ใช้สำหรับฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ