

บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การดูดซับ (ADSORPTION)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์การสะสมของอนุภาคที่มีองค์ประกอบหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งอนุภาคบนพื้นผิวของสารที่ทำการดูดซับซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารที่มีลักษณะของรูพรุน องค์ประกอบของการดูดซับประกอบด้วย

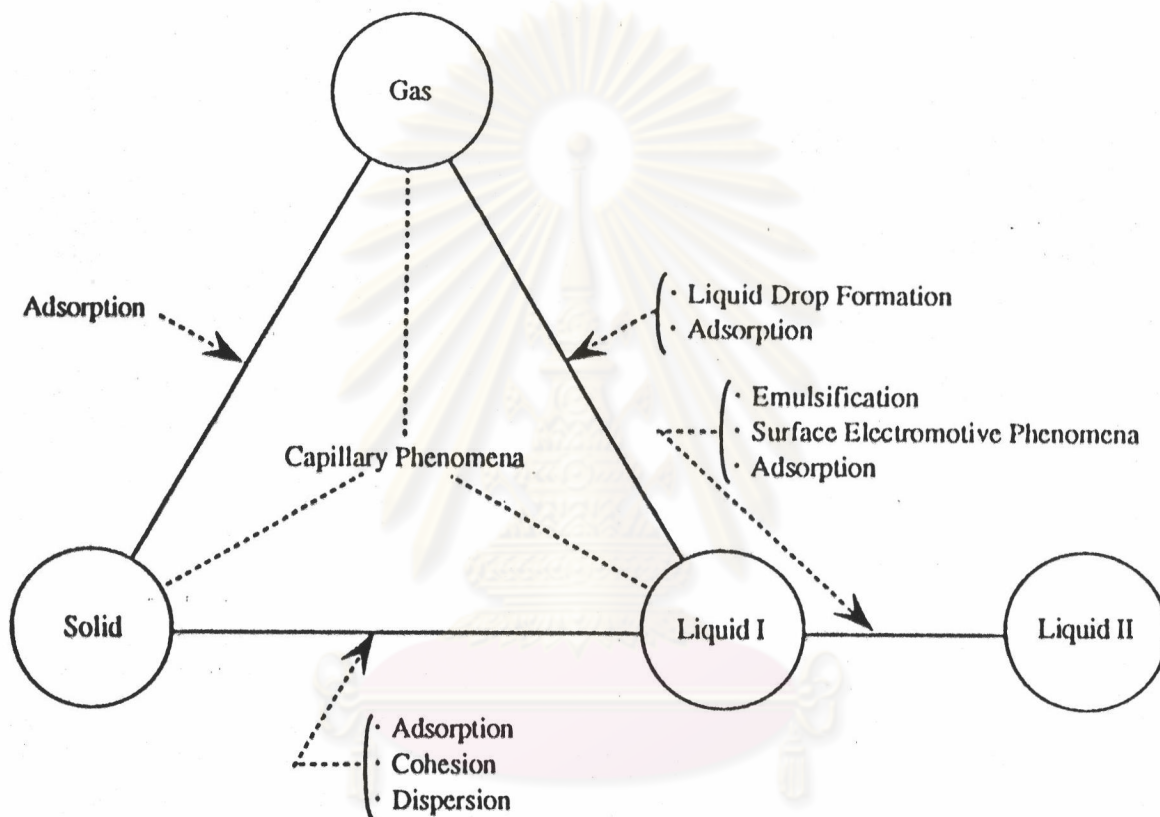
1. สารดูดซับ (Adsorbent) เป็นวัตถุที่จัดเก็บสารที่จะถูกดูดซับเอาไว้ที่พื้นผิว สารดูดซับจะมีลักษณะเป็นรูพรุน ปกติมีอยู่ตามธรรมชาติแต่ปัจจุบันสามารถสังเคราะห์สารดูดซับตามคุณสมบัติที่ต้องการได้

2. สารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) เป็นสารที่จะเข้าไปยึดติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งของแข็ง ของเหลวและก๊าซ โดยมีขนาดของอนุภาคเล็กกว่าขนาดของรูพรุนในสารดูดซับ

3. สารผสมระหว่างสารที่ถูกดูดซับกับสารอื่น (Mixture) เป็นสารผสมที่มีสารที่จะถูกดูดซับผสมรวมอยู่กับสารอื่น

จากองค์ประกอบข้างต้นจะเห็นว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้เนื่องจากเกิดความแตกต่างในเฟสเดียวกันหรือระหว่างเฟสตั้งแต่สองเฟสขึ้นไป เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้นบนตำแหน่งต่างๆ ที่พยายามปรับสภาพให้ความเข้มข้นของสองเฟสเข้าสู่สมดุล จึงเกิดการยึดเกาะของเฟสที่มีความเข้มข้นมากไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นน้อย การดูดซับจึงเป็นปรากฏการณ์ของการปรับ

สภาวะระหว่างเฟส ซึ่งเกิดได้ทั้งสามเฟส ดังแสดงรูปความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของการดูดซับ (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟสของการดูดซับ
(Takeuchi, 1994)

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่าก๊าซและของเหลวจะเกิดการดูดซับได้กับสารดูดซับที่เป็นของแข็ง โดยก๊าซและของเหลวยังสามารถเกิดการดูดซับซึ่งกันและกันนอกจากปรากฏการณ์ที่เกิดได้ตามธรรมชาติอื่นๆ เช่น การเกิดหยดน้ำและระหว่างของเหลวด้วยกัน สามารถที่จะเกิดการดูดซับได้ในเฟสของของเหลว

การดูดซับ อาจจำแนกได้ตามลักษณะการเกิดได้ 2 ประเภท (Vermeulen, T. 1973) คือ

1. การดูดซับเชิงกายภาพ (Physical Adsorption)

อาจเรียกได้ว่าเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างเพสหรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อน, พลังงานจากสนามแม่เหล็ก หรือ สนามไฟฟ้า ตลอดจนการดูดซับที่เกิดขึ้นจากผลของการกลายเป็นไอ หรือการควบแน่น อันเป็นผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ, ความดัน หรือตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์อื่นๆ

2. การดูดซับเชิงเคมี (Chemical Adsorption)

เป็นการดูดซับเนื่องมาจากการเกิดหรือการทำลายพันธะทางเคมีในองค์ประกอบของโมเลกุล อันเกิดจากการให้ความร้อนหรือสารตัวเร่งหรือตัว - ชัดขวางปฏิกิริยาระหว่างเพส

การดูดซับจะเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าสารดูดซับจะอิ่มตัวด้วยสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งอาจจะทำการนำเอาสารที่ถูกดูดซับออกมาจากสารดูดซับ เพื่อให้สามารถนำเอาสารดูดซับไปใช้ซ้ำได้ใหม่ ปฏิกิริยาที่ย้อนกลับจากการดูดซับ เรียกว่า การรีเจนเนอเรชั่น (Regeneration Processing) ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.2

สมการแสดงกระบวนการดูดซับ (Adsorption Processing)

Adsorbent + Mixture \longrightarrow Adsorbent + Adsorbate ...2.1

สมการแสดงกระบวนการรีเจนเนอเรชั่น

(Regeneration Processing)

Adsorbent + Adsorbate $\xrightarrow{\text{Heat}}$ Adsorbent (Free Adsorbate) ..2.2

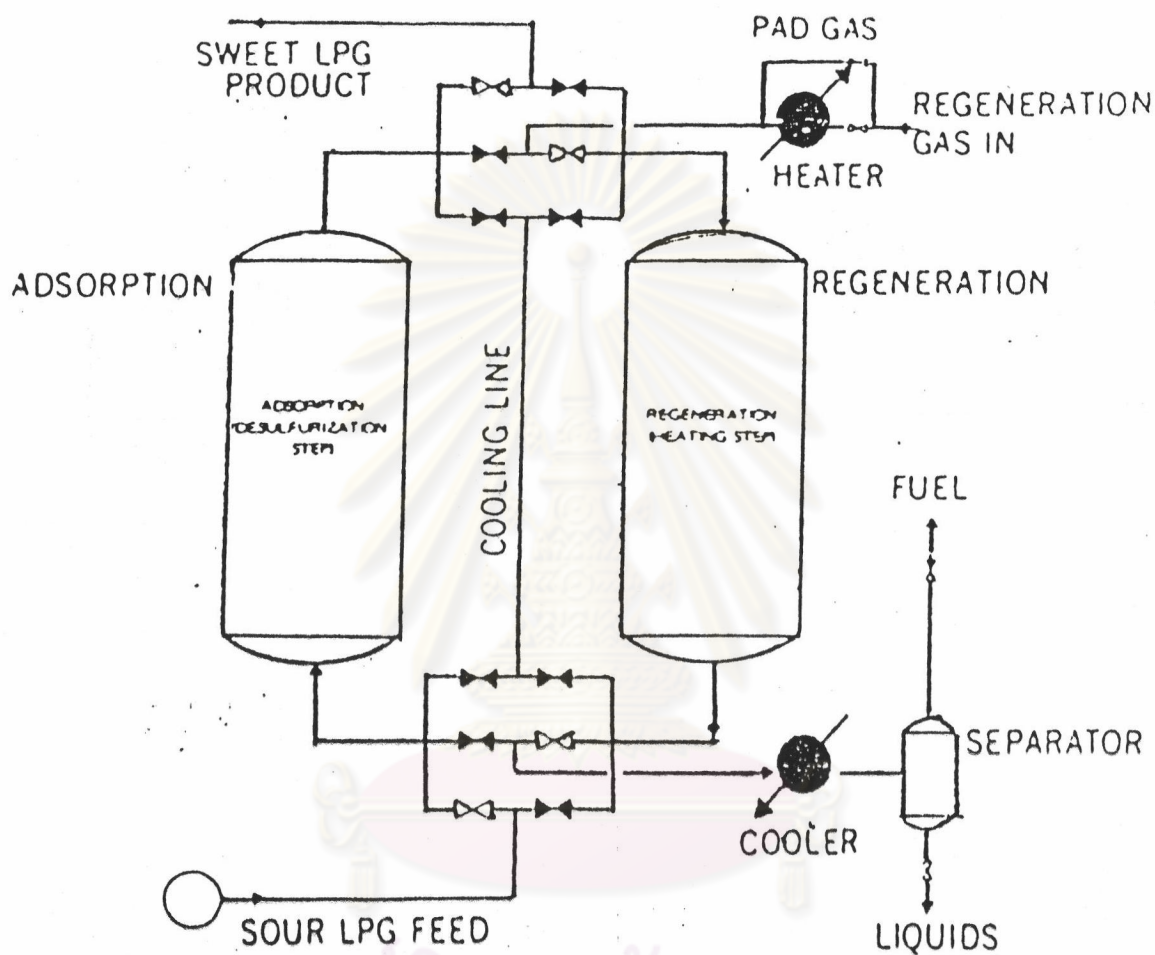
การรีเจนเนอเรชั่นอาจกระทำได้โดยการใช้ความร้อน (Thermal Swing Regeneration) หรือความดัน (Pressure Swing Regeneration) นำสารที่ถูกดูดซับเอาไว้ออกมา แต่เทคโนโลยีการรีเจนเนอเรชั่นได้พัฒนาต่อไป โดยปัจจุบันได้ศึกษาถึงการใส่สารเคมีเข้าไปผลักไล่ (Concentration Swing Regeneration) สารที่ถูกดูดซับออกจากสารดูดซับ

ปรากฏการณ์ที่เกิดการสะสมระหว่างเฟส อาจจะได้ทั้งสภาวะเฟสที่เป็นของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง ก๊าซกับของแข็ง และก๊าซกับของเหลว โดยอาจนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดของเสียจากอากาศและน้ำ การทำให้สารบริสุทธิ์ (Purification) หรือการทำให้สารนำกลับมาใช้ใหม่ (Reprocess & Recovery Processing) เมื่อเกิดการประยุกต์ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง จึงทำให้เกิดการศึกษาถึงคุณสมบัติของสารดูดซับที่มีขึ้นเองอยู่แล้วตามธรรมชาติ โดยงานยุคต้นๆของการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับปรากฏการณ์ดูดซับ มักจะตั้งคำถามพื้นฐานว่า (Collins, J. 1968)

1. สารที่จะถูกดูดซับจะสะสมในสารดูดซับมากเท่าไร จึงจะเกิดการอิ่มตัว
2. ระยะเวลายาวนานเท่าไรการดูดซับที่อิ่มตัวจึงจะเกิดขึ้น

จากคำถามพื้นฐานดังกล่าวทำให้เกิดการศึกษาวิจัยเพื่อให้ได้คำตอบเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งาน การศึกษาวิจัยจะได้สภาวะของการเข้าสู่สมดุลการดูดซับและความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นเริ่มแรกของสารที่จะถูกดูดซับกับเวลาและระยะทางขณะที่ปรากฏดูดซับดำเนินไป ต่อมาได้ศึกษาถึงลักษณะที่ใช้บรรจุสารดูดซับซึ่งได้รับการออกแบบในลักษณะของวัตตุดรทรงกระบอก เมื่อบรรจุสารดูดซับแล้วตั้งสารดูดซับไว้กับที่ เรียกว่า การบรรจุสารดูดซับแบบเบตนิ่ง (Fixed beds Adsorption Column) และการบรรจุสารดูดซับให้เคลื่อนที่ได้ (Moving or Fluidized beds Adsorption Column) ได้พัฒนาขึ้นในภายหลังแต่เนื่องจากทำงานเฉพาะจึงไม่เป็นที่แพร่หลาย

หอดูดซับแบบเบตนิ่ง เป็นการบรรจุสารดูดซับลงในหอดูดซับตามระยะความสูงของหอ เพื่อให้เกิดการดูดซับเป็นระยะที่ต่อเนื่องกันจากตำแหน่งที่สารจะถูกดูดซับสัมผัสกับสารดูดซับ จนกระทั่งเหลือเฉพาะสารที่ไม่ถูกดูดซับเท่านั้นที่จะออกจากหอดูดซับไปทางด้านหนึ่งของหอ หอดูดซับแบบเบตนิ่งเป็นที่นิยมใช้ทั้งสภาวะการดูดซับแบบก๊าซและของเหลว ในอุตสาหกรรมหอดูดซับจะถูกประกอบเข้ากับอุปกรณ์ส่งเสริมการดูดซับ เช่น น้ำหล่อเย็น และอุปกรณ์ส่งเสริมการรีเจนเนอเรชั่นอื่นๆ เช่น ชุดทำความร้อนหรือถึงก๊าซ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.2



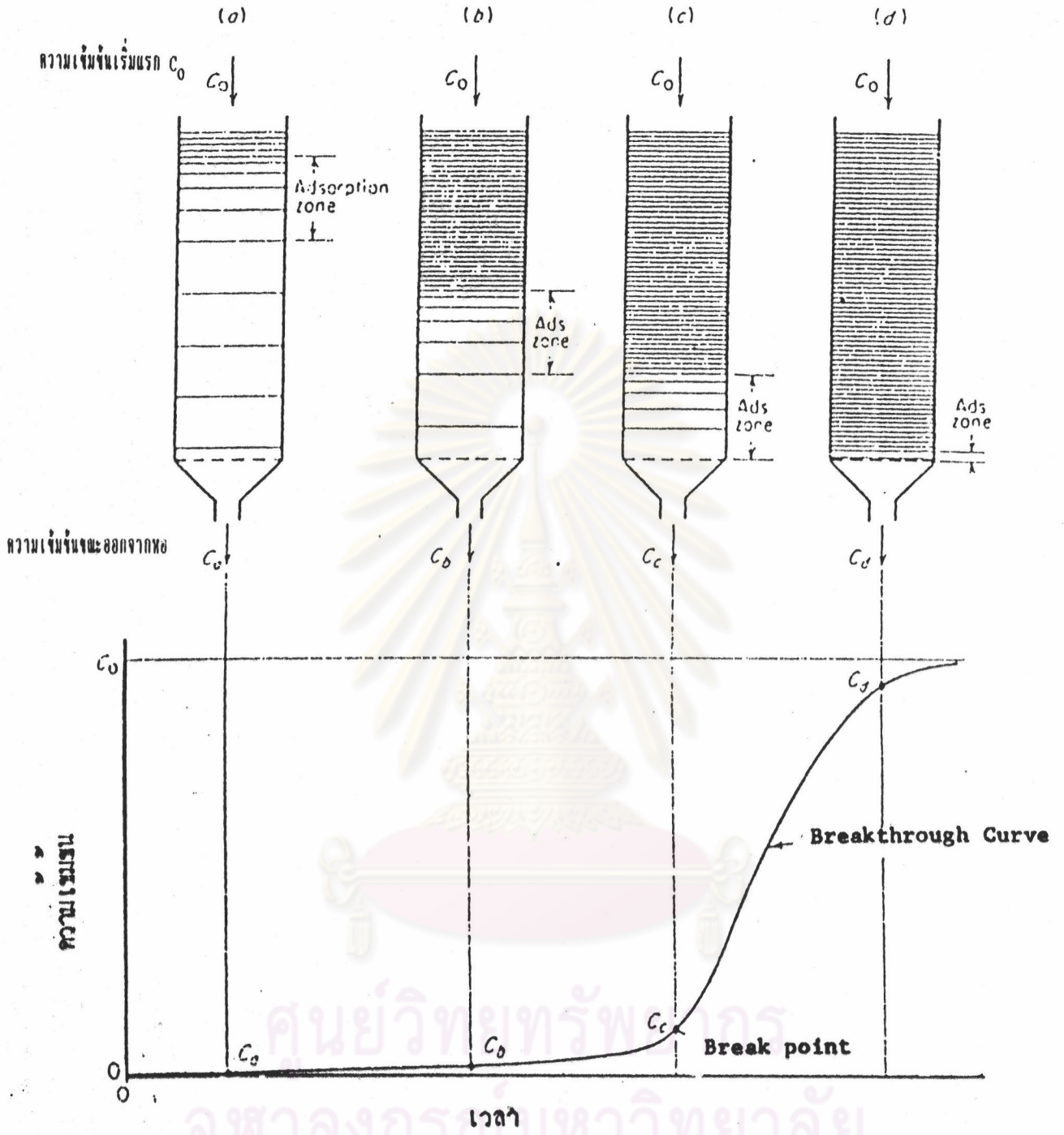
รูปที่ 2.2 แสดงหน่วยปฏิบัติการดูดซับด้วย หอดูดซับแบบเบดนิ่ง เพื่อแยกเอซัลเฟอร์ออกจากกาซแอลพีจี (Reynold, T. 1982)

จากรูปที่ 2.2 ประกอบด้วยหอดูดซับแบบเบตต์หนึ่งสองหอ โดยจะผ่านสารที่จะทำการดูดซับซึ่งปะปนอยู่กับของผสมอื่นๆ รวมเรียกว่า ของไหลดิบ (Crude Fluid) ในรูปเป็นกระบวนการแยกเอาซัลเฟอร์ออกจากกาซแอลพีจี โดยของไหลดิบที่ผ่านเป็นแอลพีจีที่มีซัลเฟอร์ปะปนอันเกิดจากการเตรียมแอลพีจีและได้ซัลเฟอร์เป็นสารพลอยได้ปะปนมากับแอลพีจี รวมเรียกว่า Sour LPG ของไหลดิบจะผ่านเข้าทางด้านล่างของหอและออกทางด้านบน ภายในหอดูดซับจะบรรจุสารดูดซับที่ดูดซับเฉพาะซัลเฟอร์และปล่อยผ่านแอลพีจีออกทางด้านบน กระบวนการดังกล่าว เป็นกระบวนการส่วนหนึ่งของการผลิตแอลพีจี โดยอาศัยหลักการการดูดซับ เรียกว่า กระบวนการนำซัลเฟอร์ออก (Desulfurization) ในขณะที่เกิดการดูดซับจะเกิดความร้อนขึ้นปริมาณหนึ่ง เรียกว่า พลังงานของการดูดซับ (Heat of Adsorption) ออกมา ในทางปฏิบัตินอกจากจะเพื่อความปลอดภัยแล้ว การให้สารหล่อเย็นรอบๆ หอดูดซับยังช่วยส่งเสริมการดูดซับ เมื่อการดูดซับเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์แล้ว ต้องทำการไล่สารที่ถูกดูดซับเอาไว้ออกมา คือ การรีเจนเนอเรชั่น สารที่ปล่อยเข้าหอดูดซับเพื่อทำการไล่สารที่ถูกดูดซับเอาไว้ออกมา เรียกว่า สารไหลเพื่อการรีเจนเนอเรชั่น (Regeneration Fluid) ซึ่งเป็นสารไหลที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่ถูกดูดซับและไม่เป็นพิษ หรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการดูดซับของสารดูดซับ เช่น กาซไนโตรเจนหรือลมที่สะอาด (Pure cleaning compressor Air) การรีเจนเนอเรชั่นด้วยสารไหลที่ร้อน เรียกว่า การรีเจนเนอเรชั่นด้วยความร้อนผลัดใส่ (Thermal Swing Regeneration) จึงต้องติดตั้งเครื่องทำความร้อนเข้ากับหน่วยปฏิบัติการ

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าได้ติดตั้งเครื่องทำความร้อนไว้ด้านบนของหอดูดซับและผ่านกาซเข้าเครื่องทำความร้อน กาซที่ได้จะร้อนนำมาผ่านเข้าหอดูดซับ ความร้อนจะพาเอาสารที่ถูกดูดซับออกมาจากหอดูดซับ โดยซัลเฟอร์ที่ถูกดูดซับเอาไว้จะผ่านมาพร้อมกับกาซร้อน เมื่อผ่านออกมาจากหอดูดซับแล้ว นำมาผ่านเข้าเครื่องทำความเย็นเพื่อให้ซัลเฟอร์เกิดการควบแน่น ผ่านเข้าเครื่องแยกแยกเอาซัลเฟอร์ส่วนที่ควบแน่นออกมาเป็นของเหลว สำหรับกาซที่เหลือรวมทั้งสารตกค้างอื่นๆในหอดูดซับ ที่อุณหภูมิของเครื่องทำความเย็นยังไม่ต่ำพอให้เกิดการควบแน่น และผ่านออกจากเครื่องแยกทางด้านบน ซึ่งสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงได้

2.2 เขตของการถ่ายเทมวลสาร (MASS TRANSFER ZONE)

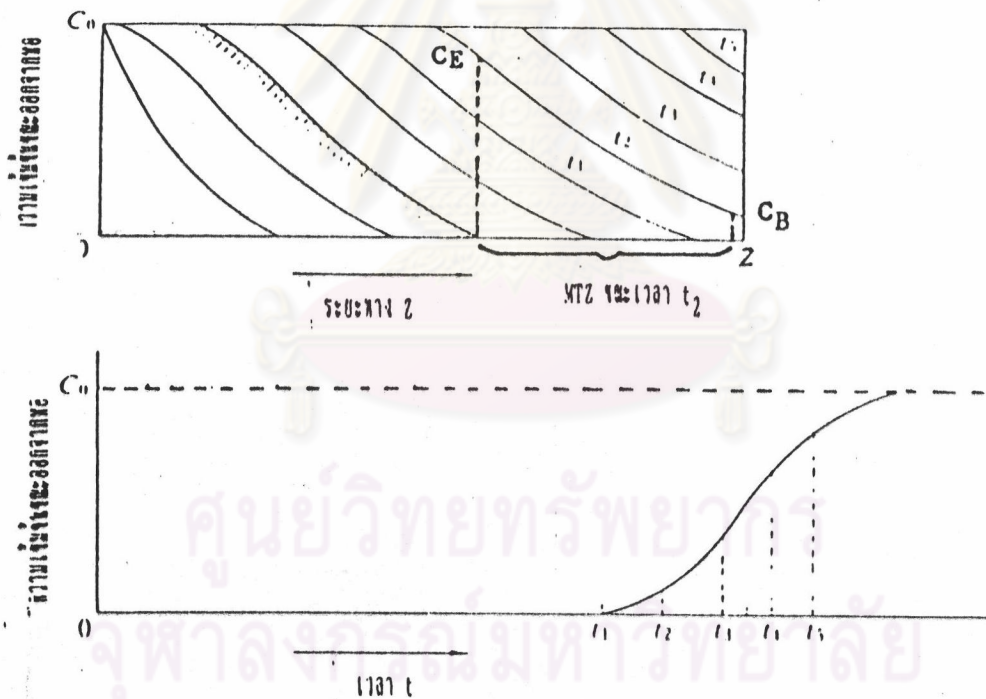
ในทางอุตสาหกรรมจะสลับการปฏิบัติการดูดซับกับการรีเจนเนอเรชั่นทีละหอ เพื่อให้การผลิตดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อสารผสมที่มีสารที่ต้องการดูดซับผ่านมาด้วยและเข้าสัมผัสกับสารดูดซับแล้ว สารดูดซับบริเวณแรกสัมผัสจะเข้าสู่การอิ่มตัวของการดูดซับก่อน และจะแพร่ขยายบริเวณการดูดซับไปด้านข้างในแนวนอนและแนวตั้งตามความสูงของหอดูดซับทำให้เป็นเขตของการอิ่มตัวของการดูดซับ เขตที่มีการอิ่มตัวในการดูดซับ จะเป็นชั้นที่ไม่เกิดการดูดซับแล้ว ในขณะที่เขตต่อจากเขตที่มีการอิ่มตัวยังเกิดการดูดซับอยู่ได้อย่างต่อเนื่องจนกว่าจะอิ่มตัว เขตของการดูดซับได้ เรียกว่า เขตของการถ่ายเทมวลสาร (Mass Transfer Zone) หรือเขตเอมทีแเขต (MTZ) การเคลื่อนที่ของเขตของการถ่ายเทมวลสารจะเพิ่มขึ้นตามระยะทางการดูดซับจนกว่าจะสมดุล เขตของการถ่ายเทมวลสารสามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการบรรจุสารดูดซับหรือเวลาที่ของผสมที่มีสารที่จะถูกดูดซับผสมอยู่ผ่านหอดูดซับเทียบกับสัดส่วนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับขณะนั้นๆกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเริ่มต้นก่อนถูกดูดซับ จากกราฟ(รูปที่ 2.3 และ 2.4) กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวเรียกว่า Breakthrough Curves จากรูปที่ 2.3 จะพบว่าเขตของการอิ่มตัวจะอยู่เหนือเขตของการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งจะเพิ่มขึ้นตามระยะความสูงของหอดูดซับในกรณีที่ป้อนสารผสมทางด้านบนหอดูดซับ จากกราฟในช่วงเริ่มป้อนสารผสมจะเกิดการดูดซับได้ดีทำให้ปล่อยสารที่จะถูกดูดซับออกมาน้อยและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปหรือระยะการดูดซับที่เปลี่ยนไป กราฟจะแสดงเป็นลักษณะรูปตัวเอส (S) กราฟรูปตัวเอสจะคงที่เมื่อสารที่จะถูกดูดซับผ่านหอดูดซับและออกจากหอมาโดยไม่ผ่านการดูดซับเอาไว้เลย เพราะเขตของ



รูปที่ 2.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับสัดส่วนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับขณะเวลานั้นๆกับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเริ่มต้นก่อนถูกดูดซับ (Breakthrough Curve) (Sherwood, T. 1975)

การอิ่มตัวได้เกิดขึ้นตลอดทั้งหอดูดซับแล้ว ทำให้ไม่เกิดการดูดซับอีก

การปฏิบัติการดูดซับในทางอุตสาหกรรมจะกำหนดเขตของการอิ่มตัวเอาไว้ที่ระดับต่ำสุดค่าหนึ่ง แต่ไม่เสมอไปที่ระยะการบรรจุสารดูดซับทั้งหมดในหอดูดซับ เขตของการอิ่มตัวต่ำสุดจะเป็นตำแหน่งบังคับซึ่งถึงความต้องการรีเจนเนอเรชั่นสารดูดซับเพื่อใส่สารที่ถูกดูดซับเอาไว้ออกไป และนำสารดูดซับมาทำการดูดซับใหม่ แต่ในการดูดซับความชื้นออกจากสารตัวทำละลายหรือการทำกาษาให้แห้งมักกำหนดปริมาณความชื้นเท่าที่ต้องการไว้ภายหลังที่ผ่านการดูดซับแล้ว และเมื่อความชื้นออกจากหอดูดซับมาเกินความต้องการ จึงต้องทำการนำความชื้นออกโดยการรีเจนเนอเรชั่นสารดูดซับ ดังนั้นการกำหนดการรีเจนเนอเรชั่นสารดูดซับจึงขึ้นอยู่กับความต้องการผลิตภัณฑ์ภายหลังการดูดซับด้วย



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและระยะทางการดูดซับกับสัดส่วนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับขณะเวลานั้นๆ กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับเริ่มต้นก่อนถูกดูดซับ (Breakthrough Curve) (Suzuki, M. 1990)

การดำเนินไปของเขตของการถ่ายเทมวลสารขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการดังต่อไปนี้

1. จลนพลศาสตร์ของสารที่ถูกดูดซับในการแพร่เข้าไปสัมผัสพื้นผิวานรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งอัตราการแพร่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ

1.1 ชนิด, ลักษณะรูพรอง, การกระจายตัวของขนาดรูพรองและขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ สารดูดซับที่มีอยู่ตามธรรมชาติเป็นการเกิดขึ้นเองจะมีรูปแบบของลักษณะรูพรองและคุณสมบัติอื่นๆคงตัว ทำให้เกิดการดูดซับได้จำกัดชนิดสารที่จะถูกดูดซับและปริมาณการดูดซับ ปัจจุบันสารดูดซับสามารถทำการสังเคราะห์ขึ้นมาให้ได้คุณสมบัติตามต้องการได้ ทำให้เกิดการศึกษาดังคุณสมบัติในการดูดซับในพื้นผิวลักษณะ เพื่อที่จะได้สังเคราะห์สารดูดซับตามต้องการ

1.2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารที่ถูกดูดซับก่อนการดูดซับ สารดูดซับบางชนิดมีความสามารถในการดูดซับอย่างจำกัดที่ความเข้มข้นหนึ่งๆ ดังนั้นถ้าความเข้มข้นเริ่มต้นมีปริมาณที่มากเกินไป อาจจะทำให้ไม่เหมาะสมที่จะใช้สารดูดซับนั้นมาดูดซับ

1.3 สารปนเปื้อนที่ต่อต้านการดูดซับ การสังเคราะห์สารดูดซับเป็นปฏิกิริยาเคมี อาจเกิดสารพลอยได้ในปฏิกิริยา และสารพลอยได้ดังกล่าวอาจจะเป็นสารปนเปื้อน ซึ่งอาจจะทำปฏิกิริยากับสารที่จะถูกดูดซับได้ อันอาจจะทำให้สารดูดซับเปลี่ยนคุณสมบัติการดูดซับไป

1.4 อัตราการป้อนสารที่ถูกดูดซับ อัตราการป้อนสารที่ถูกดูดซับเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถควบคุมได้ขณะทำการดูดซับ ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงผลของอัตราการป้อนต่อการดูดซับในหลอดดูดซับ

2. คุณสมบัติและสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ขณะ เกิดการดูดซับ

2.1 อุณหภูมิ กระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อน ปริมาณความร้อนเนื่องจากการดูดซับจะถูกปล่อยออกมาทำให้มีผลต่อการดูดซับ ไรดยการดูดซับเกิดขึ้นน้อยลง

2.2 ความดัน การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความดันรวมของสารผสม มีผลให้ความดันย่อยของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

2.3 สารดูดซับโมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดเอ (The A Type Molecular Sieve)

สารดูดซับมีหลายประเภททั้งที่มีอยู่ตามธรรมชาติและการสังเคราะห์ขึ้น จึงเกิดการเลือกมาใช้ประโยชน์ได้ตามต้องการ การสังเคราะห์สารดูดซับเป็นวิธีการเลือกสารดูดซับให้ใกล้เคียงกับสารดูดซับที่ต้องการมากที่สุด ทำให้เกิดการศึกษาวิจัยเพื่อทำการสังเคราะห์สารดูดซับ และเกิดการแข่งขันการสังเคราะห์สารดูดซับไปข้างหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยส่วนใหญ่มักประยุกต์สารดูดซับไปใช้ในเรื่องของความเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารดูดซับที่นิยมใช้เช่น แอทธิเวทคาร์บอน เป็นสารดูดซับที่พื้นที่ผิวในการดูดซับมาก นิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายๆประเภท โดยมักจะใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์ เช่น ในอุตสาหกรรมอาหารและยา อุตสาหกรรมเครื่องสำอางค์และเคมีภัณฑ์ นอกจากนี้ยังนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสารดูดซับที่เป็นที่นิยมอีกประเภทหนึ่งคือ ซิโรไลต์ ซึ่งปัจจุบันสามารถสังเคราะห์ได้หลายลักษณะและคุณสมบัติ ดังจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

2.3.1 ซิโรไลต์ (Zeolite) เป็นสารดูดซับที่มีองค์ประกอบของสารออลูมิโนซิลิเกต ลักษณะเป็นผลึกโมเลกุล พบได้ตามธรรมชาติกว่าสามสิบชนิดและยังสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้อีกจากปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Reaction) ปัจจุบันสังเคราะห์ขึ้นหลายชนิดให้ชื่อตามอักษรภาษาอังกฤษ คือ ชนิดเอ, ชนิดบี, ..., ชนิดแซด โดยคุณสมบัติแตกต่างกันไป โดยแต่ละชนิดถ้าจะนำไปจำหน่ายทางการค้า ต้องผ่านกระบวนการผลิตพิเศษอีกหลายขั้นตอน ดังจะได้กล่าวโดยละเอียดในส่วนของการผลิตในหัวข้อ 2.4 การผลิตซิโรไลต์โมเลกูลาร์ ซีฟ สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญของซิโรไลต์ (Breck, D. 1974) ประกอบด้วย

1. องค์ประกอบหลัก (Major Component) องค์ประกอบหลักของซิโรไลต์ คือ อลูมินาและซิลิกา แต่ละชนิดจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบหลักแตกต่างกันไป นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบย่อยที่อาจแตกต่างกันชนิดและสัดส่วนของผสมานชนิดของซิโรไลต์นั้นๆ

2. การกระจายของขนาดรูพรุน (Pore-size Distribution) รูพรุนที่เกิดขึ้นบนผิวของสารดูดซับจะมีขนาดใกล้เคียงกัน อยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน ระบบรูพรุนในสารดูดซับแบ่งออกได้ 3 ชนิดตามขนาดของรูพรุน คือ

- 2.1 Micropores มีขนาดของรูพรุนน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
- 2.2 Mesopores มีขนาดของรูพรุนตั้งแต่ 2 ถึง 50 นาโนเมตร
- 2.3 Macropores มีขนาดของรูพรุนมากกว่า 50 นาโนเมตร

โดยส่วนใหญการระบุขนาดของรูพรุนมักจะระบุในหน่วยของปริมาตรของรูพรุนต่อน้ำหนักสารดูดซับ

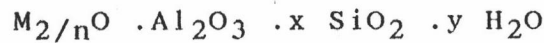
3. พื้นผิวจำเพาะ (Specific surfaces) คุณสมบัติของพื้นผิวจำเพาะมาจากขนาดของรูพรุนของสารดูดซับ โดยเป็นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับทั้งหมด สำหรับซีโรไลท์จะมีค่าประมาณ 200 ถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม

4. ความจุความร้อนจำเพาะและค่าการนำความร้อน (Specific heat capacity and Thermal conductivity) เป็นค่าที่มีความสำคัญต่อสภาวะการดูดซับ ซึ่งปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกมามีผลต่อความสามารถในการดูดซับ ตลอดจนการนำความร้อนขณะรีเจนเนอเรชั่น

5. การคงตัวในความร้อน (Thermal stability) เป็นค่าความร้อนที่ทนทานต่อการรีเจนเนอเรชั่น ซีโรไลท์ที่สังเคราะห์ชนิดเอ สามารถทนต่ออุณหภูมิขณะทำการรีเจนเนอเรชั่นได้ถึง 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

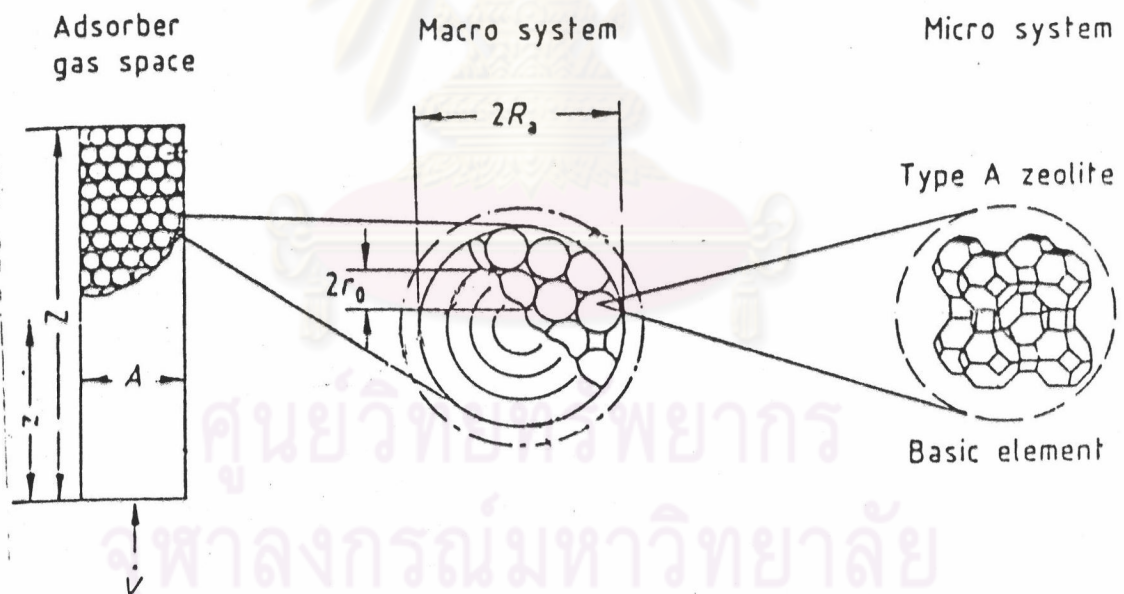
6. การทนต่อสารเคมี (Chemical resistance) ซีโรไลท์สังเคราะห์มาจากสารเคมี จึงมีข้อจำกัดในการทนทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากสารเคมี โดยซีโรไลท์จะทนสารเคมีได้ระหว่างค่าพีเอชของระบบ ตั้งแต่ 5 ถึง

ซีโรไลต์ ยังเป็นสารประกอบที่มีธาตุโลหะประกอบอยู่ด้วยโดยส่วนใหญ่เป็นธาตุหมู่หนึ่งหรือหมู่สอง เช่น โซเดียม, โพแทสเซียม, แมกนีเซียม, แคลเซียม, สตรอนเทียม, แบเรียม โดยมีสูตรทั่วไปว่า



โดยที่ M เป็นสัญลักษณ์แทนธาตุโลหะ, n เป็นค่าแสดงประจุของไอออนของธาตุโลหะ, x มักมีค่ามากกว่า 2 และ y เป็นค่าเฉพาะของปริมาณน้ำตามชนิดของซีโรไลต์

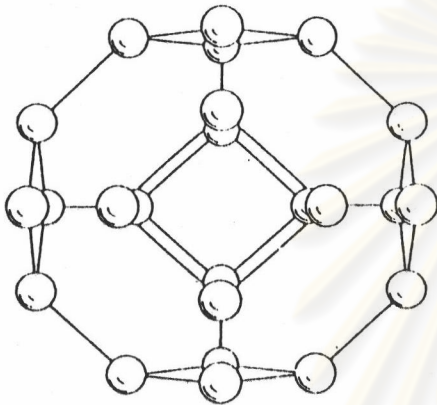
ถ้าพิจารณาสารดูดซับในหนึ่งชิ้นจากหอดูดซับ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5 จะพบว่าสามารถแบ่งพิจารณาออกเป็นระบบส่วนใหญ่ (Macro system) อันประกอบด้วยซีโรไลต์หลายหน่วยมากมาย และระบบส่วนย่อย (Micro system) คือพิจารณาเฉพาะแต่ซีโรไลต์เท่านั้น



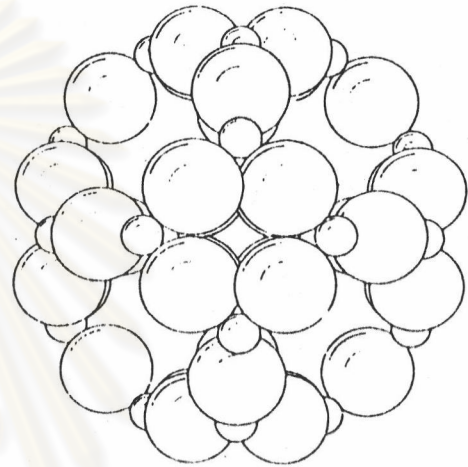
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะระบบรูพรุนและโครงสร้างการจัดตัวของสารดูดซับ

โครงสร้างของผลึกซีโรไลต์เป็นลักษณะของเตตระฮีดรอล (Tetrahedral units) อะตอมกลางเป็นซิลิคอนและออกซิเจนรอบ 4 อะตอม เมื่อหลายๆหน่วยย่อยมารวมกันจะเกิดเป็นหน่วยขั้นที่สอง (Secondary units) การจัดตัวของหน่วยขั้นที่สองเป็นรูปแบบโครงสร้าง ดังรูปที่ 2.6

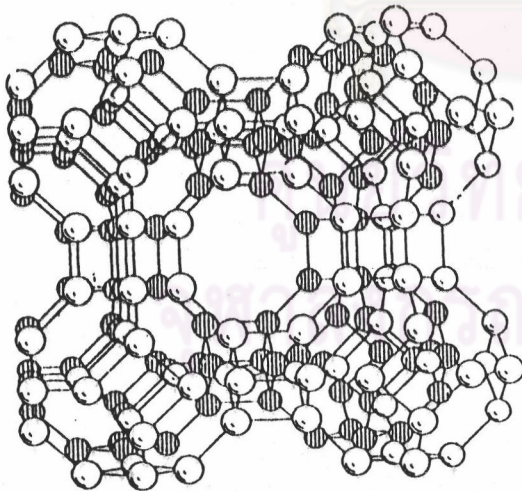
หน่วยชั้นที่สองเกิดจากการเกิดพันธะของหน่วยย่อยเคจ (Cage) สองหน่วย คือ แอลฟาเคจ จะเป็นหน่วยที่ใหญ่ที่สุดที่จะเป็นช่องว่างสำหรับการบรรจุสารที่จะถูก ดูดซับ และหน่วยย่อยโรซดาลีทหรือเบต้าเคจ จะมีขนาดเล็กกว่า ดังแสดงไว้ในรูป ที่ 2.6 และแสดงการจัดเรียงตัวเป็นหน่วยชั้นที่สองในรูปที่ 2.7 (Suzuki, M. 1990)



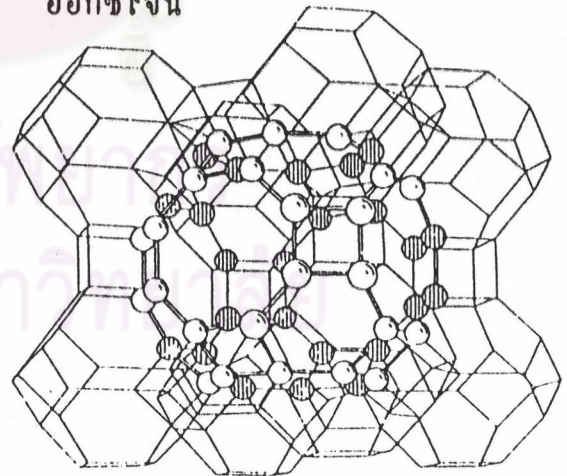
รูปที่ 2.6 ก. แสดงหน่วยย่อยโรซดาลีท ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกาและอลูมินา



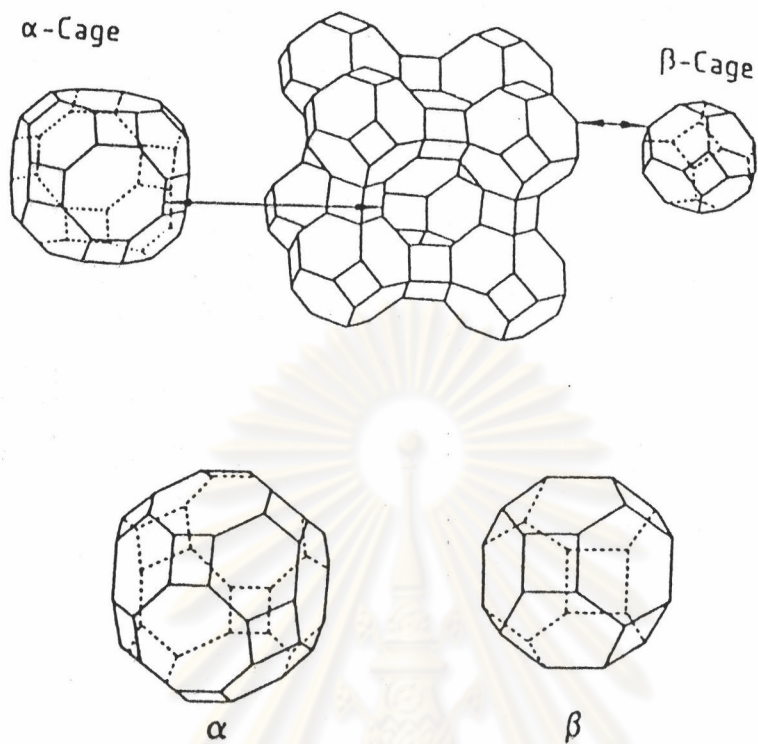
รูปที่ 2.6 ข. แสดงหน่วยย่อยโรซดาลีทที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจน



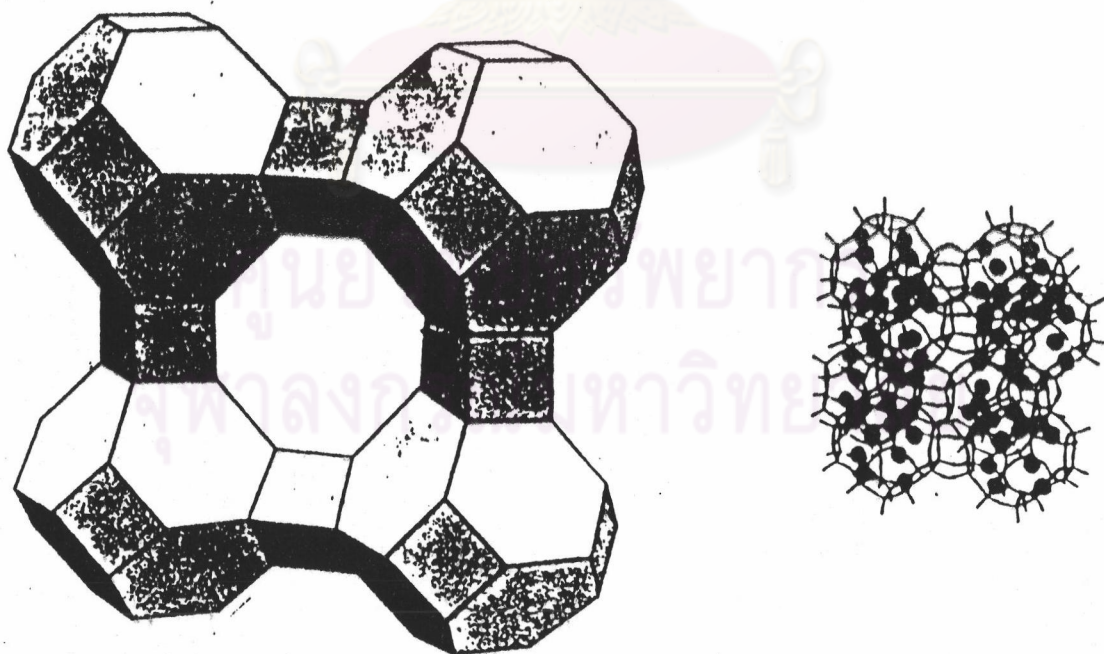
รูปที่ 2.7 ก. แสดงการจัดเรียงตัวของหน่วยย่อยชั้นที่สองของหน่วยย่อยโรซดาลีทแบบหน่วย



รูปที่ 2.7 ข. แสดงหน่วยชั้นที่สองเฉพาะหน่วยย่อยแอลฟา



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของหน่วยย่อยแอลฟาและหน่วยย่อยโรซดาลีท



รูปที่ 2.9 แสดงการจัดเรียงตัวของหน่วยย่อยแอลฟาและหน่วยย่อยโรซดาลีท
ในหน่วยขั้นที่สอง (Collins, J. 1968)



Type A zeolite photograph

รูปที่ 2.10 แสดงรูปถ่ายของผลึกของซีโรไลต์ รมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดเอ
(Elf Atochem, 1994)

2.3.2 ซิโรไลต์ รมเลกุลาร์ ซีฟ ชนิดเอ

ซิโรไลต์ รมเลกุลาร์ ซีฟ ชนิดเอ จะประกอบด้วยหน่วยย่อยสองหน่วย คือ หน่วยย่อยแอลฟาและหน่วยย่อยซิคดาลิทหรือหน่วยย่อยเบต้าเคจ โดยหน่วยย่อยแอลฟาจะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.14 นาโนเมตร ในขณะที่หน่วยย่อยซิคดาลิทมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.66 นาโนเมตร จำนวน 8 อนุภาค เกาะที่มุมดังแสดงไว้ในรูป 2.7 ก.

ในหน่วยย่อย (Unit cell) ของซิโรไลต์ชนิดเอ จะประกอบด้วยรูปทรงเตตระฮีดรอลอยู่ 24 หน่วย เป็นอลูมินา 12 หน่วยและซิลิกา 12 หน่วย รมเลกุลของน้ำสูงสุดประกอบได้ 27 รมเลกุล โดยในการเตรียมครั้งแรกจะได้ซิโรไลต์ในรูปสารประกอบของเกลือโซเดียมแล้วนำมาแลกเปลี่ยนไอออนกับแคลเซียมไอออนอื่นๆ ในสภาพของสารละลาย ทำให้โครงร่างผลึกและความหนาแน่นต่างไป โดยความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อมวลรมเลกุลของแคลเซียมไอออนเพิ่มขึ้น เช่นซิโรไลต์ ชนิดเอ ที่มีแคลเซียมไอออนเป็นแคลเซียมไอออน มีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างประมาณ 0.44 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับชนิดอื่นๆ จะให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างที่ใหญ่กว่า เช่น ซิโรไลต์ ชนิดเอ็กซ์ ที่มีแคลเซียมไอออนเป็นแคลเซียมไอออน มีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างประมาณ 0.80 นาโนเมตร และเนื่องจากขนาดของไอออนและเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างจะเป็นที่บรรจุของรมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าผ่านเข้าและกักเก็บเอาไว้ได้ จึงได้ชื่อว่าเป็น "ซิโรไลต์ รมเลกุลาร์ ซีฟ" (Zeolite molecular sieve)

ซิโรไลต์ รมเลกุลาร์ ซีฟ ชนิดเอ ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ

1. ซิโรไลต์ รมเลกุลาร์ ซีฟ ชนิดสามเอ

เป็นซิโรไลต์ที่มีแคลเซียมไอออนเป็น รมเลกุลาร์ ซีฟ มีสูตรเคมีที่ทั่วไปว่า $K_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}]$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างประมาณ

0.44 นาโนเมตร

การประยุกต์ใช้งาน เช่น การทำให้ก๊าซหรือสารตัวทาละลายปราศจากความชื้น , การแยกแอมโมเนีย

2. ซิโรไลต์ รมเลกุลาร์ ซีฟ ชนิดสี่เอ

เป็นซิโรไลต์ที่มีแคโทไอออนเป็น โซเดียมไอออน มีสูตรเคมีทั่วไปว่า $\text{Na}_{12}[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างประมาณ 0.38 นาโนเมตร

การประยุกต์ใช้งาน เช่น การแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซธรรมชาติ

3. ซิโรไลต์ รมเลกุลาร์ ซีฟ ชนิดห้าเอ

เป็นซิโรไลต์ที่มีแคโทไอออนเป็น แคลเซียมและโซเดียมไอออน มีสูตรเคมีทั่วไปว่า $\text{Ca}_5\text{Na}_2[(\text{AlO}_2)_{12}(\text{SiO}_2)_{12}]$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างประมาณ 0.44 นาโนเมตร

การประยุกต์ใช้งาน เช่น การแยกอัลเคนรมเลกุลเส้นตรง , การแยกก๊าซส่วนผสมในอากาศ

สำหรับก๊าซหรือสารประกอบอื่นๆอาจแยกได้ด้วยซิโรไลต์ รมเลกุลาร์ ซีฟ ชนิดอื่นๆอีก จึงได้แสดงรายการไว้ในตารางที่ 2.2 เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับก๊าซหรือสารประกอบอื่นๆ ซึ่งมีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง รมเลกุลแตกต่างกันไป

Industrially important zeolites and their effective channel diameters

Framework	Cationic form	Formula of typical unit cell	Window	Effective channel diameter, nm	Application
A	Na ⁺	Na ₁₂ [(AlO ₂) ₁₂ (SiO ₂) ₁₂]	8-ring (obstructed)	0.38	desiccant, CO ₂ removal from natural gas linear alkane separation, air separation drying of cracked gas containing C ₂ H ₄ , etc.
	Ca ²⁺	Ca ₃ Na ₉ [(AlO ₂) ₁₂ (SiO ₂) ₁₂]	8-ring (free)	0.44	
	K ⁺	K ₁₂ [(AlO ₂) ₁₂ (SiO ₂) ₁₂]	8-ring (obstructed)	0.29	
X	Na ⁺	Na ₈₀ [(AlO ₂) ₈₀ (SiO ₂) ₁₀₀]	12-ring	0.84	pressure-swing H ₂ purification removal of mercaptans from natural gas xylene separation
	Ca ²⁺	Ca ₄₀ Na ₄₀ [(AlO ₂) ₈₀ (SiO ₂) ₁₀₀]	12-ring	0.80	
	Sr ²⁺ , *Ba ²⁺	Sr ₂₁ Ba ₂₂ [(AlO ₂) ₈₆ (SiO ₂) ₁₀₆]	12-ring	0.80	
Y	Na ⁺	Na ₅₆ [(AlO ₂) ₅₆ (SiO ₂) ₁₃₆]	12-ring	0.80	xylene separation xylene separation
	K ⁺	K ₅₆ [(AlO ₂) ₅₆ (SiO ₂) ₁₃₆]	12-ring	0.80	
Mordenite	Ag ⁺	Ag ₈ [(AlO ₂) ₈ (SiO ₂) ₄₀]	12-ring	0.70	iodine and krypton removal from nuclear off-gases
	H ⁺	H ₈ [(AlO ₂) ₈ (SiO ₂) ₄₀]			
Silicalite		(SiO ₂) ₉₆	10-ring	0.60	removal of organic chemicals from water
ZSM-5	Na ⁺	Na ₁ [(AlO ₂) ₁ (SiO ₂) ₁₃]	10-ring	0.60	xylene separation

* also K · BaX, where X = zeolite anion

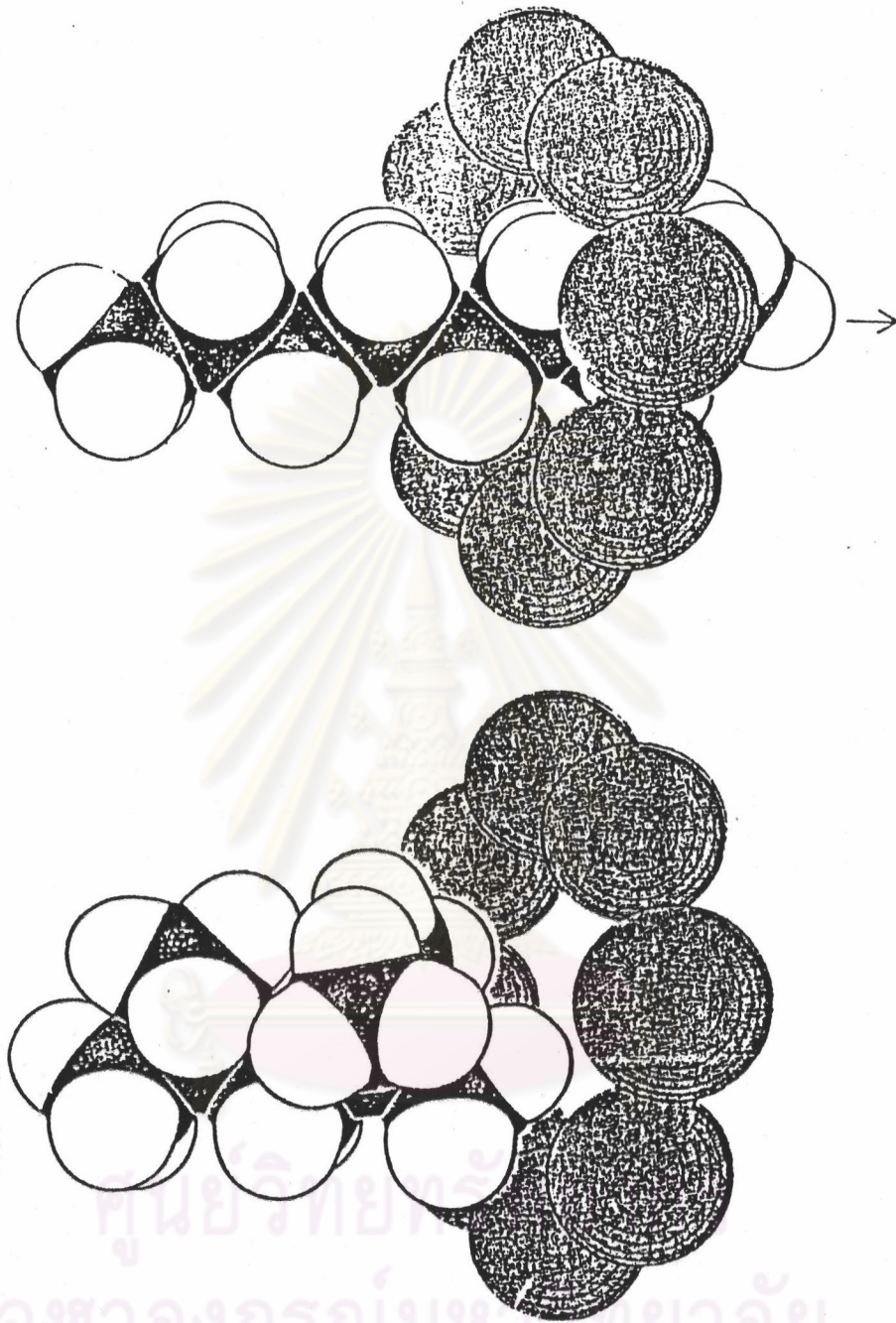
ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของซีโรไลต์ วมเลกุลาร์ ซีฟ , สูตรโมเลกุล และการประยุกต์ใช้งาน (Levenspiel, O. 1963)

Critical molecular diameters and molecular sieves suitable for adsorption on the basis of pore size:

Molecule	Critical diameter, nm	Adsorption by			
		3A	4A	5A	10X or 13X
He	0.2	x	x	x	x
Ne	0.32		x	x	x
Ar	0.38		x	x	x
Kr	0.39		?	x	x
Xe	0.47			x	x
H ₂	0.24	x	x	x	x
O ₂	0.28	x	x	x	x
N ₂	0.30	x	x	x	x
Cl ₂	0.82				x
Br ₂	0.39		?	x	x
H ₂ O	0.26	x	x	x	x
CO	0.32 (0.28)		x	x	x
CO ₂	0.28		x	x	x
NH ₃	0.38	(x)*	x	x	x
H ₂ S			x	x	x
SO ₂			x	x	x
CH ₄	0.40		x	x	x
C ₂ H ₆	0.44		x	x	x
C ₃ H ₈ and higher n-alkanes	0.49			x	x
C ₂ H ₂	0.22 (0.24)	x	x	x	x
C ₂ H ₄	0.43		x	x	x
C ₂ H ₆	0.50		x	x	x
C ₃ H ₈	0.51			x	x
C ₄ and higher isoalkanes	0.56				x
Cyclopropane	0.48			x	x
Cyclopentane, cyclohexane	0.61				x
Benzene	0.57				x
CH ₃ OH	0.30		x	x	x
C ₂ H ₅ OH			x	x	x
n-C ₃ H ₇ OH			(x)*	x	x
CCl ₄	0.69				x
CS ₂				x	x

* (x) = suitable

ตารางที่ 2.2 แสดงความสามารถในการดูดซับในสารและสารประกอบต่างๆ (Levenspiel, O. 1963)



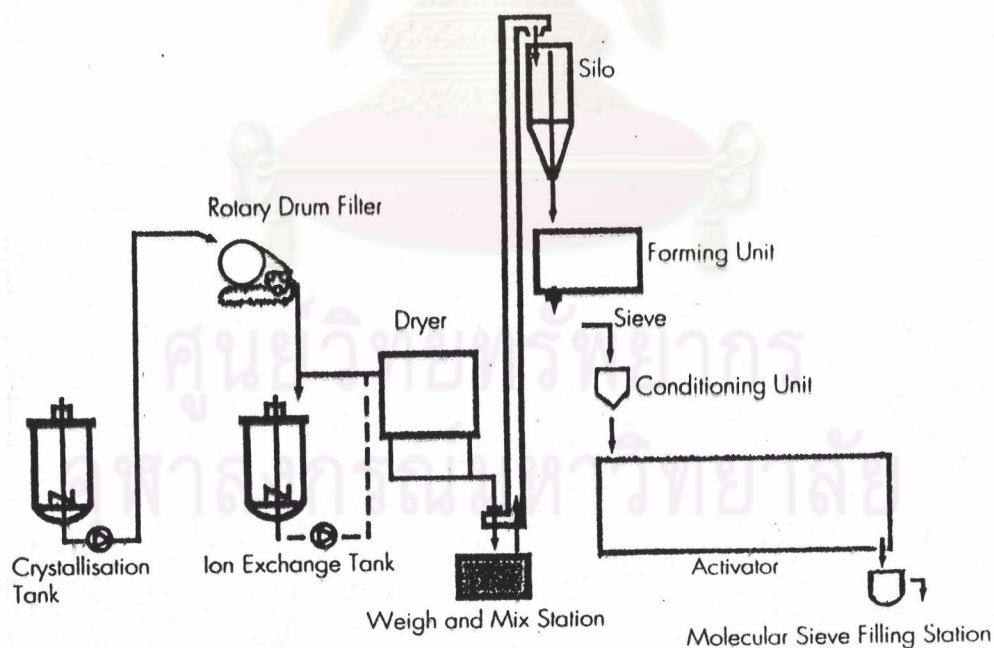
รูปที่ 2.11 แสดงการเลือกดูดซับในสารต่างชนิดกัน ที่มีขนาดของโมเลกุลที่สามารถเข้าสู่ช่องของรูพรุนได้ ก็จะเกิดการดูดซับ ในขณะที่สารบางชนิดการจัดเรียงตัวในโมเลกุลใหญ่เกินกว่าช่องรูพรุนของสารดูดซับ ก็จะไม่เกิดการดูดซับ

2.4 การผลิตซีโรไลท์ รมเลกุลาร์ ซีฟ

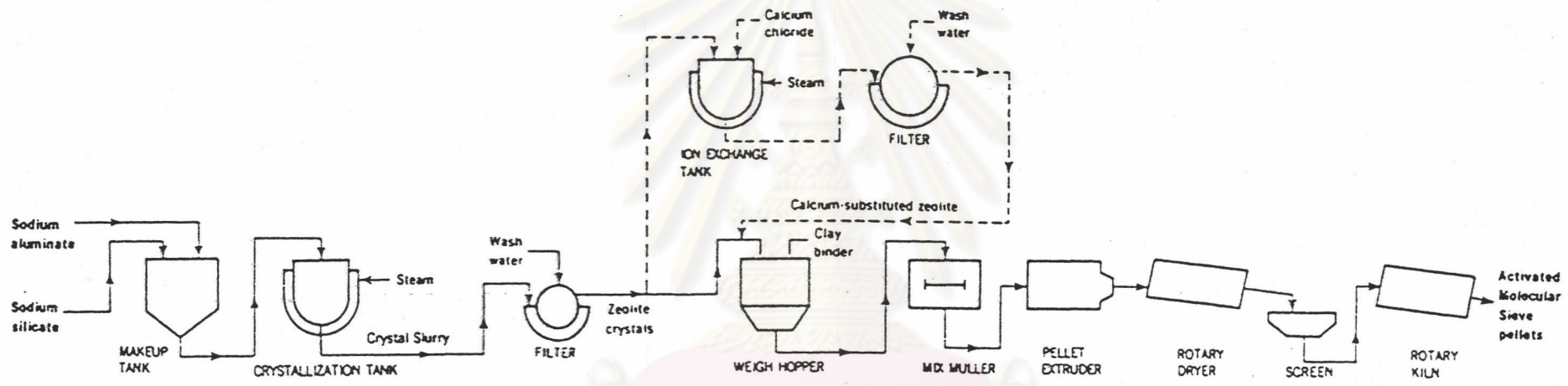
ปัจจุบันการผลิตและจำหน่ายซีโรไลท์ รมเลกุลาร์ ซีฟได้พัฒนาจนเป็นที่แข่งขันกันภายในบริษัทที่จำหน่ายเคมีภัณฑ์ชั้นนำทั่วโลก งานแข่งการค้นคว้าวิจัยเพื่อสังเคราะห์ ซีโรไลท์เพื่อให้ได้สารดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีขึ้นแล้ว ยังสังเคราะห์เพื่อใช้ในการดูดซับสารหรือองค์ประกอบชนิดพิเศษที่สารดูดซับที่มีในปัจจุบันไม่สามารถดูดซับได้หรือไม่สามารถหาวิธีการอื่นแยกได้ ดังนั้นซีโรไลท์ รมเลกุลาร์ ซีฟจึงเป็นทางเลือกและหนทางหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับเรื่องของการแยกสาร เนื่องจากกระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่ไม่สิ้นเปลืองพลังงาน ทว่าหันนอกจากจะเกิดการแข่งขันกันในเรื่องของการค้นคว้าวิจัยเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่แล้ว ยังมีการแข่งขันกันในการจัดจำหน่ายเชิงพาณิชย์ ผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ง. กระบวนการผลิตในแต่ละบริษัทแตกต่างกันที่ขั้นตอนการผลิตและส่วนผสม

การผลิตซีโรไลท์ รมเลกุลาร์ ซีฟ อาศัยหลักการสังเคราะห์สารเคมี โดยเริ่มจากการเตรียมสารละลายที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตซีโรไลท์ที่เรียกว่า เจล (Gel) ซึ่งเป็นสารละลายส่วนประกอบของโลหะแคตาไอออนกับส่วนผสมของอลูมิเนียมซิลิเกต โดยเตรียมจากสารละลายของส่วนผสมที่ต้องการได้ เช่น จากสารละลายโซเดียมอลูมิเนต, สารละลายโซเดียมซิลิเกต และโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิการเตรียม 200 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ การเตรียมจะต้องควบคุมตามเวลาที่กำหนด ตรวจสอบสภาพการกลายเป็นเนื้อเดียวกันของสารละลาย โครงสร้างของเจลจะเกิดจากกระบวนการโพลีเมอไรเซชันของไอออนของอลูมิเนตและซิลิกา (Alumina-Silica Polymerization) โดยมีปัจจัยหลักที่ทำให้เจลของซีโรไลท์ต่างชนิดกันไป คือ ขนาดและโครงสร้างของหน่วยย่อยที่ทำการโพลีเมอไรเซชัน (Polymerizing species) องค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบตั้งต้นการกระจายตัวของมวลรมเลกุลของสารตั้งต้นเจลที่ได้จะนำมาทำการตกผลึกในเครื่องปฏิกรณ์ที่ควบคุมความร้อนด้วยไอน้ำ ไอออนของอลูมิเนตและซิลิเกตจะจัดเรียงตัวเพื่อกลายเป็นโครงสร้างของผลึก ความร้อนและไอออนของไฮดรอกไซด์จะทำให้โพลีเมอร์ของเจลแตกออกเป็นหน่วยย่อยๆ (Nuclei)

ที่จะจัดรูปกันเป็นผลึกเล็กๆ และมีขนาดของผลึกใหญ่ขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการตกผลึก ผลึกที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนมากขึ้นจะรวมตัวกันเป็นผงโคลนของผลึกที่ผงโคลนของผลึกที่นี้จะถูกนำมากรองและล้างด้วยน้ำที่ควบคุมค่าความเป็นกรดและด่าง ผลึกที่ได้จะนำมาทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกจากเครื่องตรวจรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction) ผลึกซีโรไลท์ที่ได้จะทำการแลกเปลี่ยนแคทไอออน จนได้รับแคทไอออนในผลึกที่เป็นไปตามความต้องการแล้ว จะทำการล้างผลึกด้วยน้ำที่ควบคุมค่าความเป็นกรดและด่างอีกครั้ง ซีโรไลท์ที่ได้จะนำมาผ่านเข้าเครื่องผสมกับดิน Clay หลังจากผ่านการผสมจะนำมาอัดเม็ด (Pellet) ทำที่แห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary dryer) ผ่านเครื่องคัดขนาด เครื่องเผาและแอกทิเวทซีโรไลท์ จนได้ซีโรไลท์ลักษณะเม็ด (Pellet) ทำการบรรจุด้วยเครื่องมือที่ปราศจากความชื้น กระบวนการผลิตดังกล่าวแสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตซีโรไลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟของบริษัท เกรซ ซีเอ็มพีเอช และรูปที่ 2.13 ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตซีโรไลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟของบริษัท ยูเนี่ยน คาร์ไบ



รูปที่ 2.12 แสดงการผลิตซีโรไลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟ ของบริษัทเกรซ ซีเอ็มพีเอช



รูปที่ 2.13 แสดงการผลิตซีโรไลท์ รมเลกุลาร์ ซีฟ ของบริษัทยูเนี่ยน คาร์บ

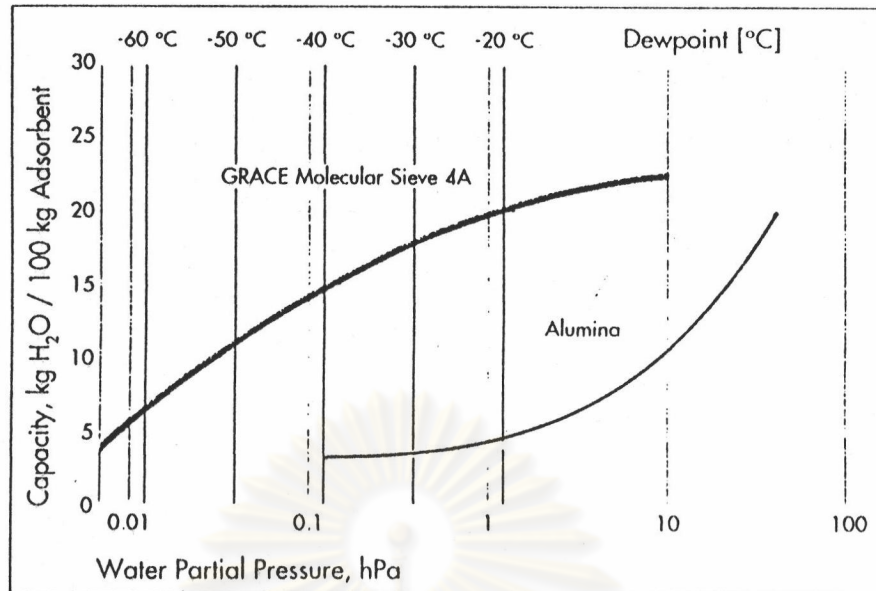
2.5 การดูดซับความชื้นด้วยสารดูดซับซีโรโลท์ โรมเลกูลาร์ ซีฟ

ซีโรโลท์ โรมเลกูลาร์ ซีฟ นามมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น การทำให้ก๊าซและของเหลวบริสุทธิ์ (Gas and liquid purification) การปรับสภาพก๊าซธรรมชาติ (Natural gas treatment) การทำให้อากาศบริสุทธิ์ (Air purification) ความชื้นที่มีปะปนในสารประกอบทั้งในรูปของก๊าซ (Vapor) และของเหลว (Liquid) เป็นปัญหาต่อปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นหลัก จนถึง การส่งเสริมทำให้เกิดการกัดกร่อน (Corrosion) ความชื้นในรูปของก๊าซ ถ้ามีปริมาณมากจนเกิดการอิมตัว (Dew point) และกลายสภาพเป็นหยดน้ำแล้ว อาจมีหลายวิธีที่แยกออก โดยที่นิยมและเป็นพื้นฐานการแยกของเหลว คือ การกลั่นแยก แต่ความชื้นที่มีปริมาณน้อยและยากแก่การกลั่นแยก จึงต้องใช้วิธีการดูดซับด้วยสารดูดซับ ซึ่งสารดูดซับที่ใช้มีหลายชนิด ซีโรโลท์ โรมเลกูลาร์ ซีฟ เป็นทางเลือกหนึ่ง

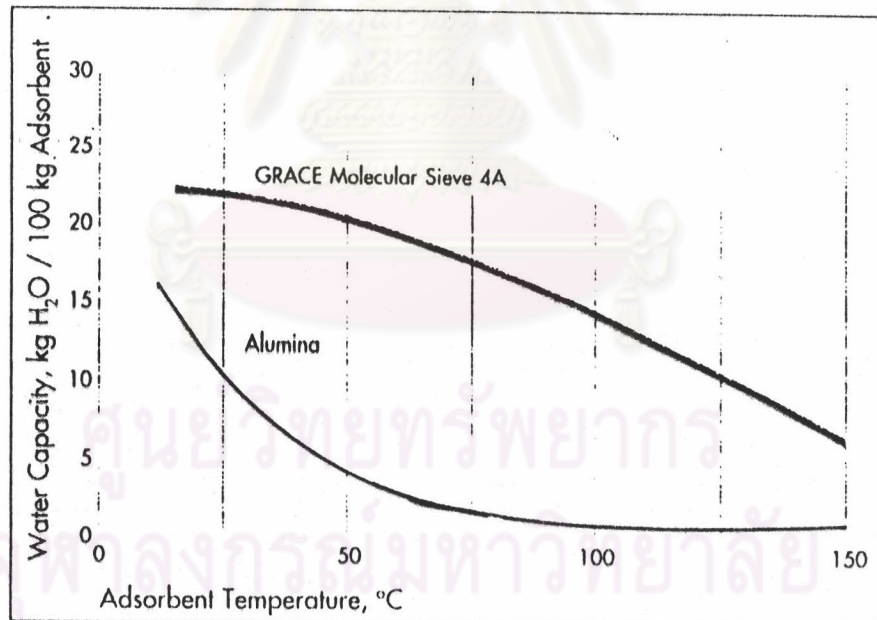
ซีโรโลท์ โรมเลกูลาร์ ซีฟ เป็นสารดูดซับที่ทำการสังเคราะห์มาเพื่อให้มีคุณสมบัติในการเลือกดูดซับเฉพาะสารที่ต้องการดูดซับเท่านั้น จึงมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของกลไกการดูดซับความชื้นด้วยสารดูดซับซีโรโลท์ โรมเลกูลาร์ ซีฟ จากตารางที่ 2.3 จะพบว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของโรมเลกูลของน้ำ (Critical molecular diameter) มีค่าเป็น 2.8 อังสตรอม ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุดที่สามารถถูกสารดูดซับโรมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสามเอทัวไบดูดซับเอาไว้ จากรูปที่ 2.14 เป็นกราฟที่พบว่าเมื่อใช้สารดูดซับซีโรโลท์ โรมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสี่เอของ บริษัท เกรซ ทำการดูดซับความชื้นในอากาศ เปรียบเทียบกับการใช้อลูมินาดูดซับความชื้น จะพบว่า เมื่อความดันย่อยของความชื้นเพิ่มขึ้น หรือที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก -60 องศาเซลเซียส จะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น ซึ่งจะสูงกว่าการดูดซับด้วยอลูมินาที่ความดันย่อยและอุณหภูมิเดียวกัน

Molecules	Critical diameter in Å
Helium	2,0
Hydrogen, acetylene	2,4
Water, oxygen, carbon monoxide and dioxide	2,8
Nitrogen	3,0
Ammonia, hydrogen sulphide	3,6
Argon	3,8
Methane	4,0
Ethylene, ethylene monoxide	4,2
Ethane, methanol, ethanol	4,4
Methyl-mercaptan	4,5
Propane, nC ₄ to nC ₂₂	4,9
Propylene	5,0
Ethyl-mercaptan, butene 1, butene 2 trans	5,1
Difluochloromethane (R 22)	5,3
Iso C ₂₂	5,6
Cyclohexane	6,1
Toluene, paraxylene	6,7
Benzene	6,8
Carbon tetrachloride	6,9
Metaxylene	7,1
Tri-ethylamine	8,4

ตารางที่ 2.3 แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของสารและสารประกอบชนิดต่างๆ
(GRACE , 1988)



รูปที่ 2.14 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นด้วยสารดูดซับอลูมินา เปรียบเทียบกับซีโรโลท รัมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสี่เอของเกรซที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2.15 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นด้วยสารดูดซับอลูมินา เปรียบเทียบกับซีโรโลท รัมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสี่เอของเกรซที่ความดันย่อย 10 เฮกซะปาสคาล

และจากรูปที่ 2.15 เป็นกราฟเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นที่ความดันย่อยคงที่ที่ 10 เฮกซะปาสคาล ซิโรโลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดเอ ก็ยังดูดซับความชื้นด้วยความสามารถในการดูดซับที่มากกว่าอลูมินา ซึ่งความสามารถในการดูดซับความชื้นต่ำมากและคงที่ที่อุณหภูมิมากกว่า 75 องศาเซลเซียส

ความชื้นที่มีปะปนในก๊าซธรรมชาติหรือสารตัวทำละลาย เป็นความชื้นที่ปะปนมาในระหว่างกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติและกระบวนการกลั่นเป็นรูปตัวทำละลายสำหรับความชื้นในสารตัวทำละลาย การกำจัดความชื้นโดยใช้สารดูดซับความชื้น มักนิยมใช้หอดูดซับแบบเบตต์นิงทำการดูดซับ เนื่องจากสะดวก และง่ายต่อการควบคุมการปฏิบัติการ สิ่งที่สำคัญเริ่มแรกคือ การเลือกใช้สารดูดซับ เช่น การเลือกใช้สารดูดซับซิโรโลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟ หลักการพิจารณาจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของสารผสมที่ป้อนเข้าสู่หอดูดซับ เพราะอาจเกิดการดูดซับสารตัวอื่นที่ไม่เป็นที่ต้องการ ซึ่งอัตราการดูดซับสารนั้นๆอาจเร็วกว่าสารที่ต้องการที่จะให้ถูกดูดซับจริง จึงต้องเลือกชนิดของสารดูดซับซิโรโลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟชนิดที่ดูดซับเอาเฉพาะสารที่ต้องการให้ถูกดูดซับให้มากที่สุด โดยอาจพิจารณาจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางวิกฤตของสารที่ต้องการให้ถูกดูดซับเปรียบเทียบกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของสารดูดซับซิโรโลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟชนิดนั้นๆ และประการสำคัญที่ต้องพิจารณาถึงสภาพของสารผสมที่ปะปนขณะทำการดูดซับต้องไม่ก่อให้เกิดพิษ เช่นการทำปฏิกิริยากับสารบางสารในสารดูดซับ หรือทำให้คุณสมบัติในการดูดซับของสารดูดซับเปลี่ยนแปลงไป จนถึงการสูญเสียลักษณะของการดูดซับ ประการสุดท้ายที่ต้องคำนึงถึงคือ การเลือกชนิดของสารดูดซับซิโรโลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟ ให้เหมาะสมกับสภาพของสารที่จะถูกดูดซับ ตัวอย่างเช่น ถ้าพบวาระบบมีความชื้นที่ความดันย่อย 1 เฮกซะปาสคาล อุณหภูมิขณะทำการดูดซับ 25 องศาเซลเซียส จากกราฟเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับความชื้นด้วยสารดูดซับซิโรโลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสามเอ, สี่เอ และสิบเอ ในกราฟรูปที่ 2.16, 2.17, 2.18 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความสามารถในการดูดซับความชื้นที่ความดันย่อย 1 เฮกซะปาสคาล อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสของสารดูดซับซิโรโลท์ รมเลกูลาร์ ซีฟ ทั้งสามชนิด

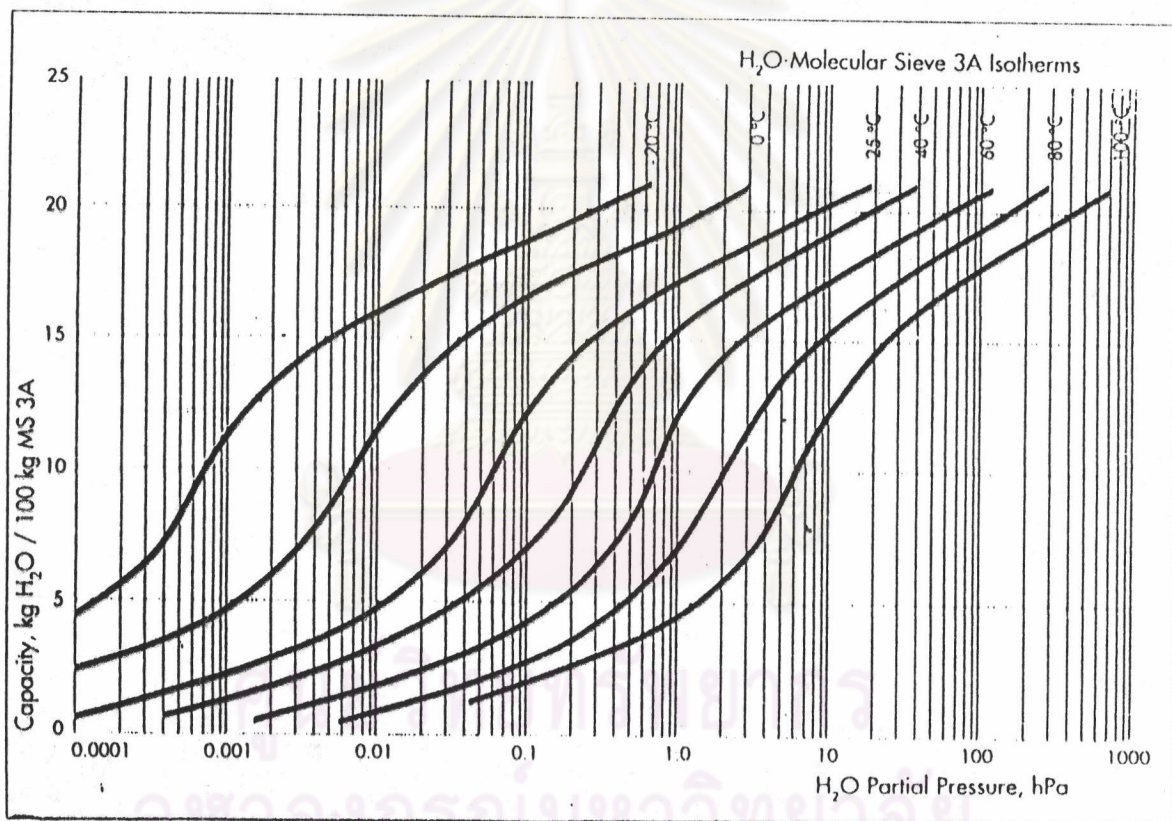
เป็นดังนี้

ชนิดสามเอ ทว่าการดูดซับได้ 17.0 กก. ความชื้นต่อ 100 กก. ของสารดูดซับ

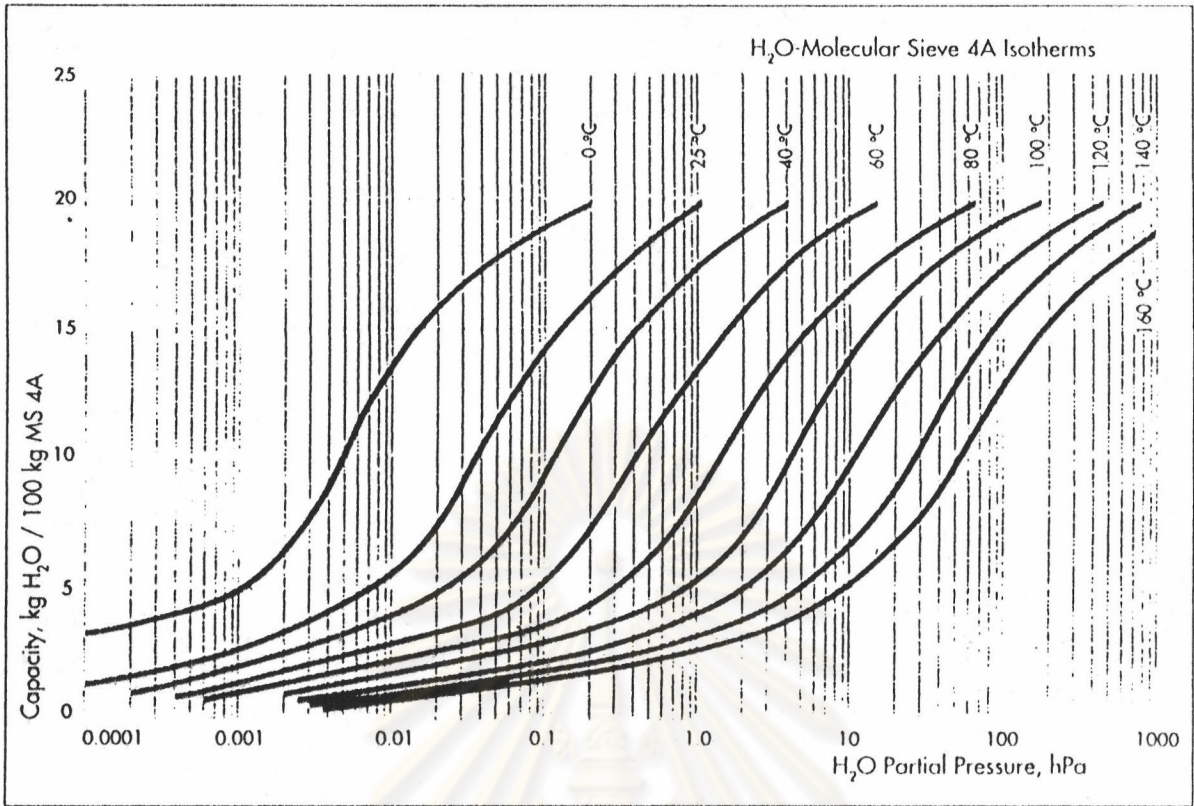
ชนิดสี่เอ ทว่าการดูดซับได้ 19.5 กก. ความชื้นต่อ 100 กก. ของสารดูดซับ

ชนิดสิบเอ ทว่าการดูดซับได้ 20.5 กก. ความชื้นต่อ 100 กก. ของสารดูดซับ

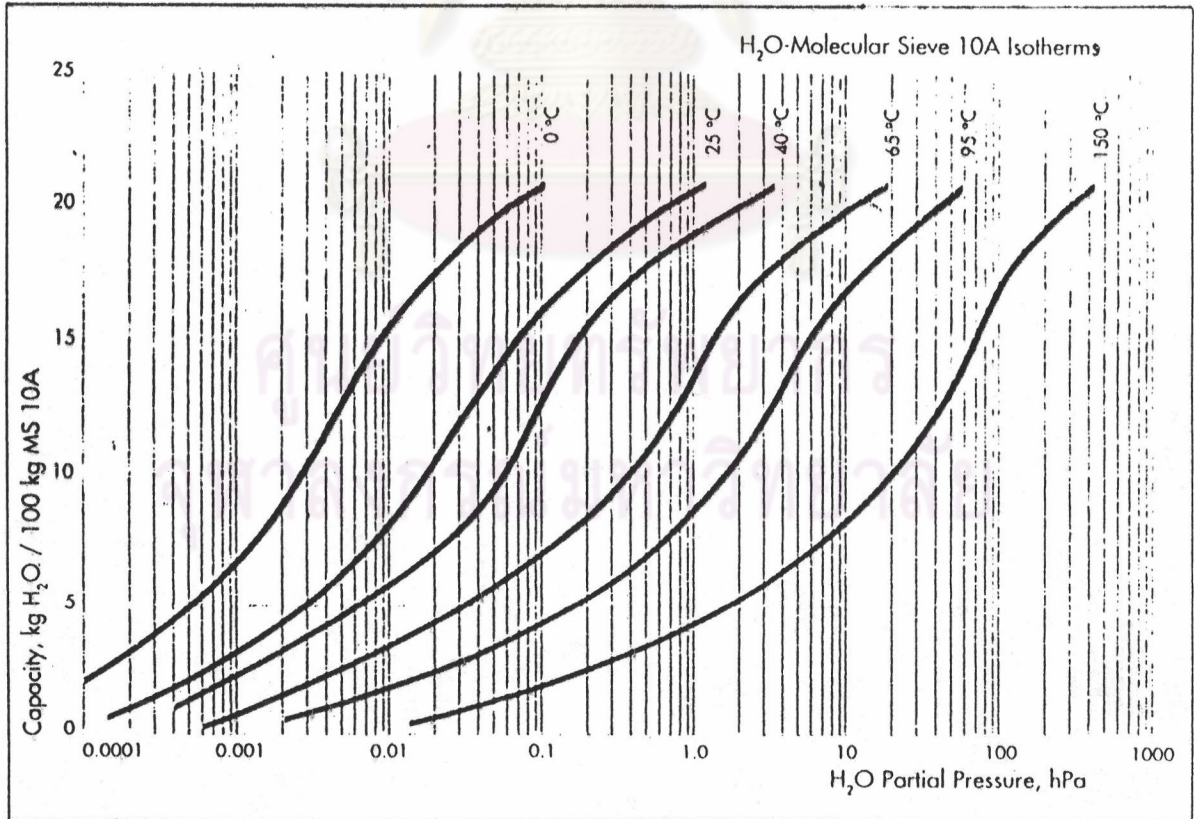
จะพบว่าถ้าใช้สารดูดซับโรโมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสิบเอ มีความสามารถในการดูดซับความชื้นได้สูงกว่าชนิดอื่นๆ ที่น้ำหนักของสารดูดซับเท่ากัน



รูปที่ 2.16 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นด้วยสารดูดซับซีโรไลท์โรโมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสามเอของเกษตรกรที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.17 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นด้วยสารดูดซับซีโรไลท์
รโมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสี่เอของเกรซที่อุณหภูมิต่างๆ

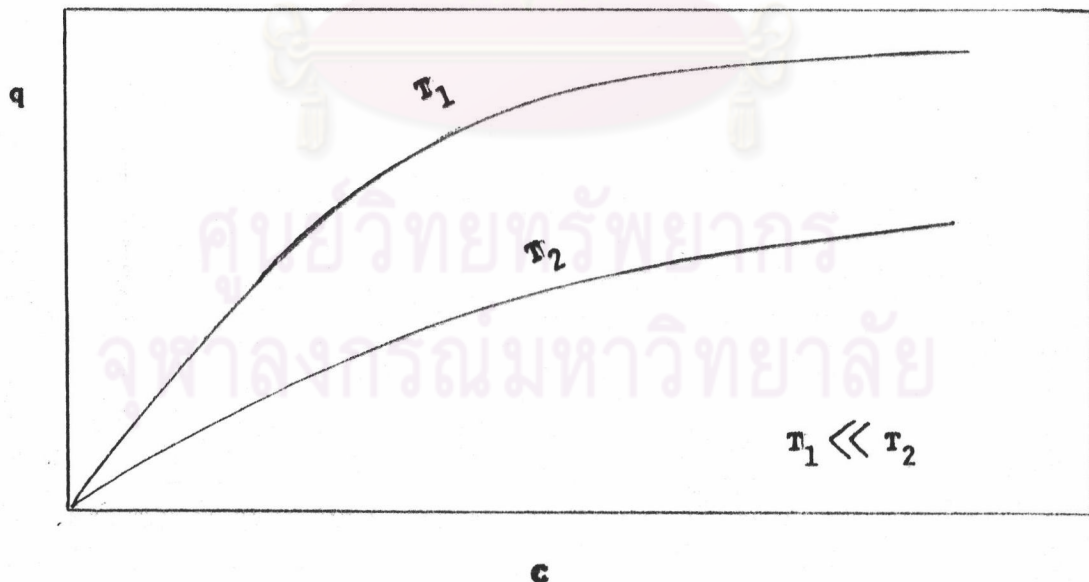


รูปที่ 2.18 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับความชื้นด้วยสารดูดซับซีโรไลท์
รโมเลกูลาร์ ซีฟ ชนิดสิบเอของเกรซที่อุณหภูมิต่างๆ

2.6 สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium)

เมื่อสารดูดซับทำการสัมผัสกับสารที่จะถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับได้เริ่มขึ้นและดำเนินไปเพื่อที่จะสิ้นสุดที่สภาวะหนึ่ง ซึ่งเป็นสภาวะที่อัตราการดูดซับ (Adsorption) เท่ากับอัตราการปลดปล่อย (Desorption) ที่สภาวะดังกล่าว เรียกว่า สมดุลการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ความสัมพันธ์ของการดำเนินไปเพื่อเข้าสู่สมดุลการดูดซับ อาจแสดงได้ในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับ q (Amount adsorbed) และความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับ C อาจกำหนดสภาวะที่อุณหภูมิหรือความดันค่าคงที่ค่าหนึ่งๆ ภายใต้อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟความสัมพันธ์ที่เรียกว่า ไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับ (The adsorption isotherm) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นสมการความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 2.3

$$q = q(C) \text{ ที่อุณหภูมิ } T \text{ คงที่} \quad \dots (2.3)$$



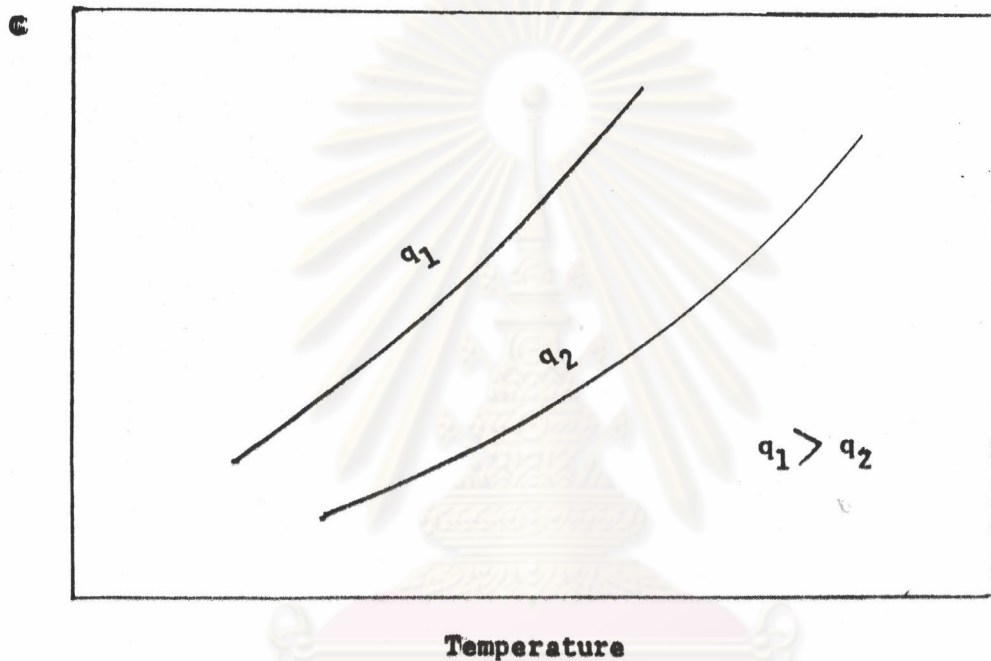
รูปที่ 2.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับ

(Suzuki, M. 1990)

และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่ทำการดูดซับ จะได้ค่าการดูดซับ เป็นไปตามสมการที่ 2.4

$$C = C(T) \text{ ที่อุณหภูมิ } q \text{ คงที่} \quad \dots (2.4)$$

กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ดังสมการดังกล่าว เรียกว่า ไอโซสเทียร์ ของสมดุลการดูดซับ (The adsorption isostere) ดังกราฟรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของไอโซสเทียร์ของสมดุลการดูดซับ
(Suzuki, M. 1990)

สมดุลการดูดซับจะแสดงค่าสมการทางคณิตศาสตร์ โดยเป็นค่าสมการที่ได้จากการแปลความหมายจากกราฟของไอโซเทอร์ม ซึ่งกราฟที่ได้ก็มาจากการจัดการนำเสนอข้อมูลการทดลอง ซึ่งการพิจารณาหาไอโซเทอร์มขึ้นอยู่กับ การพิจารณาศึกษาสมดุลที่ตำแหน่งใดของสารดูดซับ จึงอาจแบ่งการพิจารณาหาไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับ จากตำแหน่งที่ศึกษา ได้ 2 ประเภท คือ

- ก. การดูดซับที่รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore adsorption)
- ข. การดูดซับที่พื้นผิว (Surface adsorption)

2.7 การดูดซับที่รูพรุนขนาดเล็ก (Micropore adsorption)

ขนาดของรูพรุนขนาดเล็กที่ถูกดูดซับจะมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนขนาดเล็กของสารดูดซับ จึงทำให้เกิดการบรรจุรูพรุนขนาดเล็กของสารที่ถูกดูดซับในสารดูดซับด้วยแรงดึงดูด (Attractive force) ระหว่างกันของผนังภายในรูพรุนขนาดเล็กกับรูพรุนของสารที่ถูกดูดซับ ปปรากฏการณ์ดังกล่าวคล้ายคลึงกับปรากฏการณ์ควบแน่น (Capillary condensation) ที่เกิดขึ้นในรูพรุนขนาดใหญ่ที่ความดันย่อยสูง ที่แตกต่างกันก็เนื่องจากรูพรุนขนาดเล็กเป็นอิทธิพลของสนามแรงดึงดูดของผนังในรูพรุน

สมมูลการดูดซับที่พิจารณาที่รูพรุนขนาดเล็กจึงเป็นสมการของศักยภาพในการดูดซับ A (Adsorption potential) ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของพลังงานอิสระระหว่างเฟสของการดูดซับและภาวะความอิ่มตัวของสารที่ถูกดูดซับ ตัวอย่างการหาค่าศักยภาพในการดูดซับในสภาวะของก๊าซ เป็นไปตามสมการที่ 2.5

$$A = -RT \ln (p/p_s) \quad \dots (2.5)$$

A แทนค่าของ ศักยภาพในการดูดซับ

R แทนค่าของ ค่าคงที่ของก๊าซ

T แทนค่าของ อุณหภูมิ (K)

p แทนค่าของ ความดันย่อยขณะเวลาใดเวลาหนึ่ง

p_s แทนค่าของ ความดันย่อยที่อิ่มตัว

โดยสมมูลการดูดซับจะพิจารณาจากปริมาตรของการบรรจุรูพรุนขนาดเล็กของสารที่ถูกดูดซับในรูพรุนขนาดเล็กของสารดูดซับ ซึ่งแทนค่าด้วยสัญลักษณ์ w โดยที่เป็นสมการที่ขึ้นอยู่กับศักยภาพในการดูดซับ ดังสมการที่ 2.6

$$w = W(A) \quad \dots (2.6)$$

ดังตัวอย่างการศึกษาของ Dubinin, 1960 ได้ทำการทดลองหาความสัมพันธ์ของสมมูลการดูดซับกับศักยภาพในการดูดซับเป็นไปตามสมการของ Dubinin-Radushkevich equation แสดงได้ตามสมการที่ 2.7

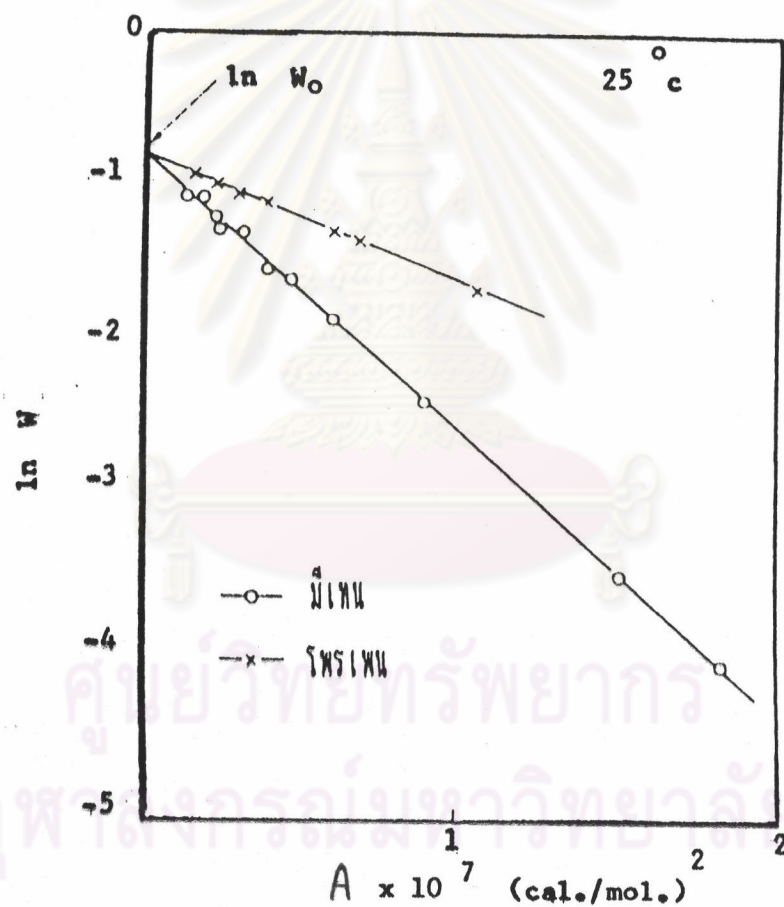
$$W = W_0 \exp(-kA^2) \quad \dots (2.7)$$

W แทนค่าของ ปริมาณการดูดซับตามสมการของ Dubinin

A แทนค่าของ ศักยภาพในการดูดซับ

k แทนค่าของ ค่าคงที่ของสมการดูดซับตามสมการของ Dubinin

กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.7 ในการศึกษาการดูดซับมีเทนและโพรเพน ด้วยแอททิวทคาร์บอน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นไปตามที่ได้แสดงในกราฟ



รูปที่ 2.21 แสดงสมการดูดซับของมีเทนและโพรเพนด้วยแอททิวทคาร์บอน เป็นไปตามสมการที่ 2.7 (Suzuki, M. 1990)

2.8 การดูดซับที่พื้นผิว (Surface adsorption)

การศึกษาสภาวะการดูดซับที่พื้นผิวยังตำแหน่งที่จะเหมาะสมต่อการดูดซับ (Active site) ได้พิจารณาให้บนพื้นผิวมีพลังงานไม่แตกต่างกันตลอดทั้งตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการดูดซับ โดยปราศจากปฏิกิริยาที่มีต่อกันระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับลงไปยังพื้นผิวใกล้เคียงกัน กำหนดให้ปริมาณการดูดซับยังตำแหน่งของการดูดซับเป็น q และความเข้มข้นที่ถูกดูดซับที่ตำแหน่งดังกล่าวเป็น C เมื่อการดูดซับเกิดขึ้น อัตราการดูดซับเป็นไปตามสมการที่ 2.8

$$\text{อัตราการดูดซับ} = k_a C (1-Y) \quad \dots (2.8)$$

โดยที่ k_a เป็นค่าคงที่การดูดซับ และ Y เป็นสัดส่วนของปริมาณการดูดซับที่สภาวะที่กำลังศึกษาเปรียบเทียบกับปริมาณการดูดซับที่อิ่มตัว (q/q_s)

ขณะเดียวกันอัตราการปลดปล่อย (Desorption) ได้เกิดขึ้นและสมมติให้เป็นการเกิดปฏิกิริยาแบบอันดับหนึ่ง (First order kinetics) อัตราการปลดปล่อยเป็นไปตามสมการที่ 2.9

$$\text{อัตราการปลดปล่อย} = k_d Y \quad \dots (2.9)$$

จากสมการที่ 2.8 และ 2.9 สามารถรวมกันเป็นสมการไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับที่เรียกว่า สมการของแลงเมียร์ (Langmuir equation : 1918) แสดงไว้ในสมการที่ 2.10

$$Y = KC/(1+KC) \quad \dots (2.10)$$

โดยค่าของ $K = k_a/k_d$ เรียกว่าค่าคงที่สมดุลการดูดซับ (The adsorption equilibrium constant)

สมการของแลงเมียร์ที่สภาวะความเข้มข้นต่ำๆ

$$[(1-KC) \rightarrow 1]$$

จะทำให้เกิดการลดรูปสมการได้สมการที่ 2.11

$$Y = KC \quad \dots (2.11)$$

สมการที่ 2.11 เป็นสมการของเฮนรี ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับและความเข้มข้นเป็นกราฟเส้นตรง จึงเรียกสมการแลงเมียร์ที่ความเข้มข้นต่ำๆ มีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของเฮนรี ว่า ไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับแบบเส้นตรง (Linear adsorption isotherm) ส่วนของความเข้มข้นที่สูงขึ้นทำให้กราฟความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการที่ 2.10 ซึ่งจะไม่ได้กราฟเส้นตรง ทำให้พฤติกรรมการดำเนินไปสู่สมดุลไม่สอดคล้องกับกฎของเฮนรี จึงเรียกว่า ไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับแบบไม่เป็นเส้นตรง (Nonlinear adsorption isotherm) ซึ่งอาจสรุปได้ว่าที่ไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับแบบเส้นตรง

$$C \rightarrow 0, q \rightarrow 0 \quad \dots \text{Henry's Law.}$$

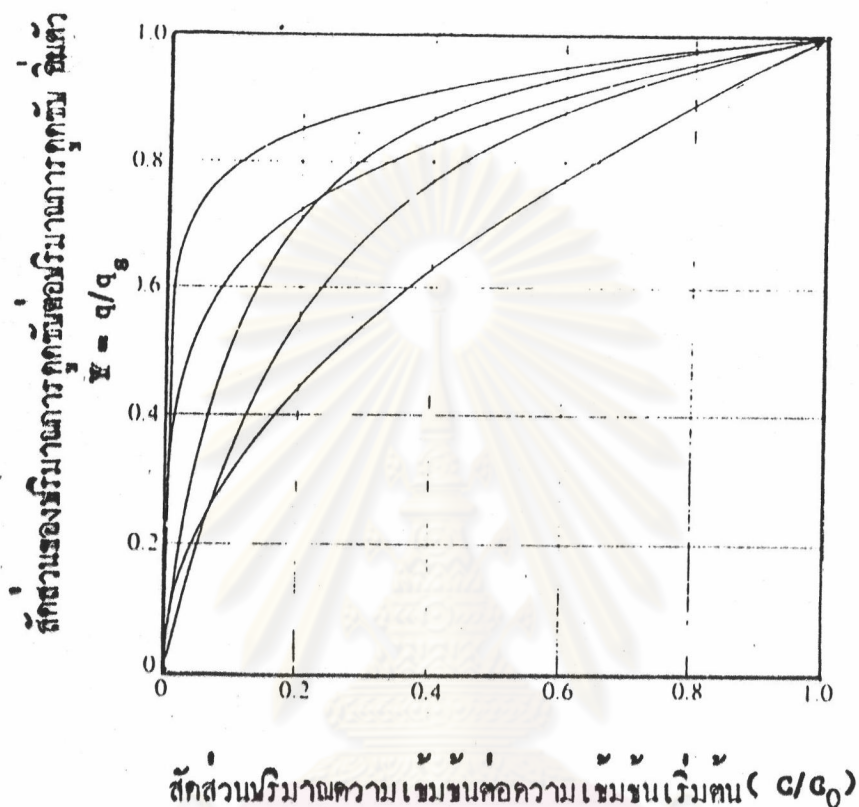
ที่ไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับแบบไม่เป็นเส้นตรง

$$C \rightarrow \infty, q \rightarrow q_s$$

กราฟแสดงไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับแบบไม่เป็นเส้นตรง แสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 2.22

หากพิจารณาการดูดซับที่แต่ละโรมเลกุลอาจเกิดการดูดซับได้มากกว่าหนึ่งบริเวณที่เหมาะสมแก่การดูดซับ โดยกำหนดให้สภาวะที่จะใช้สมการสมดุลการดูดซับเป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว ที่พลังงานการดูดซับเท่ากันหมด และแต่ละโรมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้แล้วนั้นไม่มีปฏิริยาต่อกันและพื้นผิวที่ทำการดูดซับไม่สม่ำเสมอ ดังสมมติฐานของฟรอนด์ลิช (Freundlich, 1926) แสดงเป็นสมการไอโซเทอร์มของสมดุลการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich equation) ดังสมการที่ 2.12

$$q = K_f C^{1/n} \quad \dots (2.12)$$

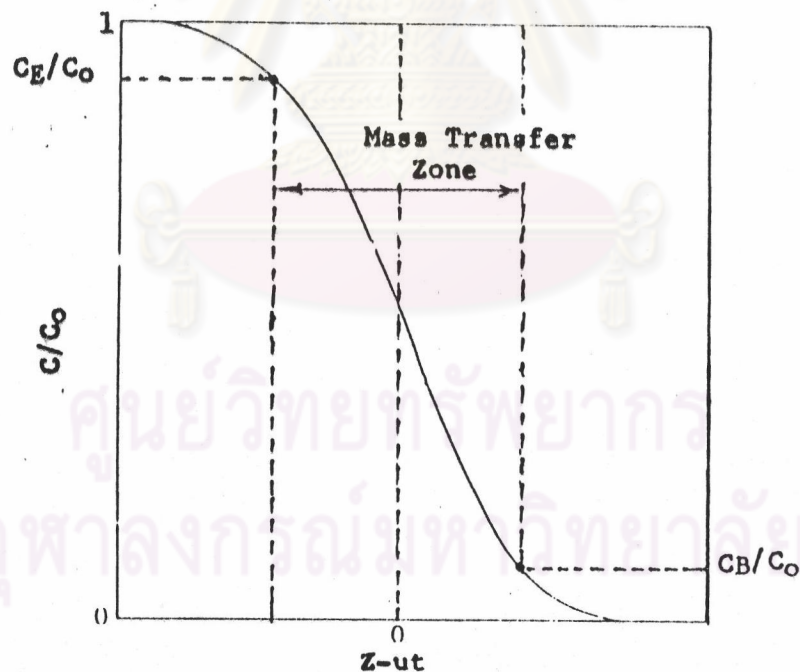


รูปที่ 2.22 แสดงสถานะสมดุลการดูดซับแบบไม่เป็นเส้นตรง
(Suzuki, M. 1990)

สมการเชิงเอกรูปเนนเซียลของฟรุนดลิชจะแสดงพฤติกรรมของกฏของเฮนรี เมื่อค่าของค่าคงที่ n มีค่าเท่ากับหนึ่ง นอกเหนือจากกฏของเฮนรีแล้ว จะมีพฤติกรรมคล้ายสมการของแลงเมียร์ นั่นคือที่ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับสูงขึ้นค่าการดูดซับก็จะเข้าใกล้ค่าอนันต์ ลักษณะกราฟความสัมพันธ์เป็นไปเหมือนกราฟความสัมพันธ์อันเกิดจากสมการความสัมพันธ์ของแลงเมียร์

2.9 พลศาสตร์กลไกการดูดซับภายในหอดูดซับ (Dynamic mechanism in adsorption column)

ภาวะการดูดซับในหอดูดซับที่แท้จริงเกิดขึ้นได้ด้วยปัจจัยที่ควบคุมหลายปัจจัย แต่ปัจจัยสำคัญ คือ สารดูดซับ, สารที่ถูกดูดซับ และสภาวะแวดล้อมที่เอื้ออำนวยหรือต่อต้านการดูดซับ การดูดซับเกิดขึ้นได้ทันทีที่เกิดการสัมผัสของปัจจัยสำคัญข้างต้นได้อย่างเหมาะสม ตั้งแต่การป้อนเข้าสู่หอดูดซับและดำเนินต่อจนออกจากหอบุ ซึ่งพลศาสตร์กลไกของการดูดซับในหอดูดซับจึงพิจารณาศึกษาการดำเนินไปของการดูดซับ ครอบคลุมได้จากเขตของการถ่ายเทมวลสารซึ่งเป็นเขตที่ดำเนินไปในขณะที่เขตอ้อมตัวในหอดูดซับดำเนินตามมาและปรากฏการณ์ทั้งหมดทำให้ข้อมูลการดำเนินไปของการดูดซับ จะแสดงผลของการกระจายความเข้มข้นตามระยะของหอดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงรูปแบบของการกระจายความเข้มข้นตามระยะหอดูดซับ (Suzuki, M. 1990)

จากรูปที่ 2.23 จะพบว่าขณะที่เกิดการดำเนินการดูดซับไปตามระยะทางของหอดูดซับและเวลาที่ทำการดูดซับอยู่นั้น ระยะของเขตของการถ่ายเทมวลสารเป็นช่วงระยะหนึ่งของระยะหอดูดซับทั้งหมด โดยเริ่มพิจารณาจากความเข้มข้นที่ตำแหน่งนั้นเป็นค่า C_E ($C_E = 0.9C_0$) จนถึงความเข้มข้นที่ตำแหน่งค่า C_B ($C_B = 0.1C_0$) การดำเนินการไปของเขตของการถ่ายเทมวลสารต่อเวลา สามารถหาได้จากการทดลองเก็บตัวอย่างของสารที่ผ่านออกจากหอดูดซับ หรือเก็บตัวอย่างขณะตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งตามระยะของหอดูดซับ และยังอาจจะพยากรณ์เขตของการถ่ายเทมวลสารได้จากสมการทางคณิตศาสตร์ ดังจะได้กล่าวต่อไป

เมื่อกำหนดให้ความเร็วของเขตของการถ่ายเทมวลสารเป็น $v(C)$ ซึ่งเป็นค่าเขตของการถ่ายเทมวลสารขณะความเข้มข้นคงที่ ดุลมวลสารรอบระบบของระยะการดูดซับช่วงหนึ่งของหอดูดซับเป็นไปตามสมการที่ 2.13

$$u \frac{dC}{dz} + p_b \frac{dq}{dt} = 0 \quad \dots 2.13$$

ในสมการที่ 2.13 จะไม่พิจารณาการดูดซับที่เกิดจากการกระจายตัวในแนวรัศมี (axial dispersion) ดังนั้นความเร็วของเขตของการถ่ายเทมวลสาร จึงเป็นไปตามสมการที่ 2.14

$$v(C) = \left| \frac{dz}{dt} \right|_C = (u/p_b) \left| \frac{dC}{dq} \right|_C \quad \dots 2.14$$

จากสมการที่ 2.13 ถ้าหาคำตอบจากสมมติฐานของลักษณะการเคลื่อนที่ที่คงที่ด้วยแรงผลักดันที่คงที่ด้วยความเข้มข้น ซึ่งเป็นแบบการคำนวณพื้นฐานที่เกิดขึ้นระหว่างการเกิดกันแลกเปลี่ยนกันระหว่างสองเฟส เมื่อกำหนดให้ C^* เป็นความเข้มข้นที่สมดุลที่ปริมาณการดูดซับ q อัตราการถ่ายเทมวลสารทั้งหมดขึ้นอยู่กับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสารรวม $K_f a_v$ (The overall mass transfer coefficient) สมการรูปแบบของการผลักดันแบบเส้นตรงด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังสมการที่ 2.15

$$p_b \frac{dq}{dt} = K_f a_v (C - C^*) \quad \dots 2.15$$

จากสมการที่ 2.13 จะแปลงสมการที่ 2.15 ให้สัมพันธ์กันเรียกว่า อัตราการถ่ายเทมวลสารไปยังช่วงหนึ่งที่เกิดขึ้นในระยะของการดูดซับ ได้เป็นสมการที่ 2.16

$$-u \, dC/dz = K_F a_V (C - C^*) \quad \dots 2.16$$

เมื่อจัดรูปสมการที่ 2.16 ให้เป็นสมการที่ 2.17

$$-u \, (dC)/(C - C^*) = K_F a_V \, dz \quad \dots 2.17$$

ทำการอินทิเกรตจากความเข้มข้น C_B ถึงความเข้มข้น C_E และระยะทางจาก Z_B ถึงระยะทางที่ Z_E เรียกระยะทางในช่วงนี้ว่าเป็นความยาวของเขตของการถ่ายเทมวลสาร (Length of mass transfer zone) แทนด้วยสัญลักษณ์ Z_a

$$Z_a = Z_E - Z_B \quad \dots 2.18$$

ผลการอินทิเกรตสมการที่ 2.17 ทำให้ได้คำตอบออกเป็นสองชุด ซึ่งเป็นค่าคำตอบเพื่อใช้คำนวณหาความยาวของเขตของการถ่ายเทมวลสาร คือ

1. ความสูงของหน่วยการถ่ายเท (High of transfer unit)

$$HTU = V(C)/K_F a_V \quad \dots 2.19$$

2. จำนวนของหน่วยการถ่ายเท (Number of transfer unit)

$$NTU = \int_{C_B}^{C_E} dC/(C - C^*) \quad \dots 2.20$$

2.10 ความยาวของเขตของการถ่ายเทมวลสาร (Length of Mass Transfer zone)

ความยาวของเขตของการถ่ายเทมวลสารตามความสูงของระยหอดูดซับ กล่าวไว้ข้างแล้วในหัวข้อ 2.9 ซึ่งพอสรุปว่า ถ้าจะคำนวณหาความยาวของเขตของการถ่ายเทมวลสารอาจหาได้จากผลคูณของสมการที่ 2.19 และ 2.20 ดังแสดงไว้ในสมการที่ 2.21

$$Z_a = (HTU)(NTU) \quad \dots 2.21$$

สมการที่ 2.21 เป็นการพิจารณาความยาวของเขตของการถ่ายเทมวลสารที่ระยะความสูงเริ่มจากความเข้มข้นขณะ ณ. ตำแหน่งนั้นเป็น 0.9 เท่าของความเข้มข้นเริ่มต้นไปจนถึงตำแหน่งที่ความเข้มข้นเป็น 0.1 เท่าของความเข้มข้นเริ่มต้น สำหรับจำนวนของหน่วยการถ่ายเท ในกรณีที่สมการสมดุลการดูดซับเป็นสมการของแลงเมียร์ (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข.) อาจคำนวณค่าได้จากสมการที่ 2.22

$$NTU = [(1+r)/(1-r)] \ln 9 \quad \dots 2.22$$

โดยที่ r เป็นค่า adsorption parameter [$r = 1/(1 + KC_0)$]

ค่าที่คำนวณได้ดังสมการที่ 2.22 แสดงที่มาไว้ในภาคผนวก ค.

เวลาของเขตของการถ่ายเทมวลสารเป็นเวลาที่มีความยาวของเขตของการถ่ายเทมวลสารเคลื่อนไปด้วยความเร็วของเขตของการถ่ายเทมวลสาร ดังนั้นอาจคำนวณได้จากสมการที่ 2.23

$$t_E - t_B = Z_a/v(C) \quad \dots 2.23$$

โดยที่ค่า $v(C)$ จากสมการที่ 2.14 อาจหาค่าได้จากสมการที่ 2.24

$$\text{จาก } v(C) = \left. \frac{dz}{dt} \right|_C = (u/p_b) \left. \frac{dC}{dq} \right|_C \quad \dots 2.14$$

$$v(C) = (u/p_b) [C_0/q_0] \quad \dots 2.24$$