

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ อาทิ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (interface) โดยที่มีภูมิภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นภูมิภาคคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

#### การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดขึ้นกันได้หลายชั้น (multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

## การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรงแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

### ตารางที่ 2.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

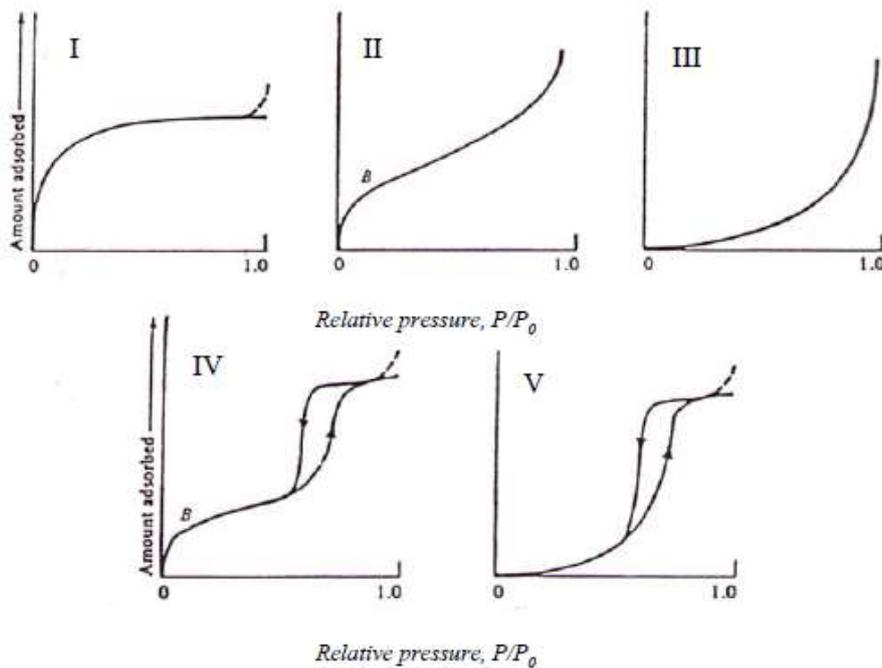
การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 50-400 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อน ๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)

นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้ว ยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและเคมี

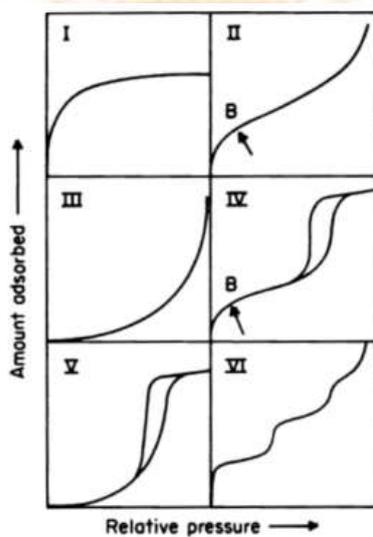
## สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ โดยการแสดงด้วยรูปกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ในปี ค.ศ.1940 ได้มีการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับของสมดุลวัฏภาคแก๊สกับของแข็งขึ้นโดย Brunauer, Deming, Deming และ Teller เรียกว่า BDDT ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมการดูดซับออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2.1 (Wang et al., 2012) ซึ่งการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT ได้เป็นหลักในการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC และปัจจุบันได้มีการเสนอประเภทไอโซเทอมการดูดซับเพิ่มอีก 1 ประเภท ซึ่งทำให้ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC สมบูรณ์ เป็น 6 ประเภท ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด (Wang et al., 2012)



รูปที่ 2.2 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC (IUPAC, 1985)

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแต่ละประเภทอธิบายได้ดังนี้

- แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm (microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (concave) หากแกน  $P/P_0$  สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรู

พอร์ขนาดเล็กลงได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กลงของสารดูดซับนี้ได้อย่างสมบูรณ์ และมีการอึดตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm

- แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพอร์ (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพอร์ขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมา จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูง ๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm)
- แบบ III เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน  $P/P_0$  จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัด ซึ่งเป็นแบบพิเศษ
- แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมใน รูพอร์อีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่น ภายในรูพอร์ของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์
- แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพอร์ในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III และแบบ V นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์
- แบบ VI เป็นการดูดซับแบบ multilayer เป็นชั้น ๆ ขึ้นบนผิวของ nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้น ๆ

## ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ

### 1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุดโดยมีสมมติฐานคือ

- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
  - 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
  - 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
  - 4) โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะขยายขามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้
- สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots(2.1)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่า หรือค่าการดูดซับที่สมดุล

$q_m$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

$b$  คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ 2.2 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

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

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 2.3) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  ค่า  $q_m$  และ  $b$  หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter,  $R_L$ ) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad \dots\dots(2.3)$$

เมื่อ  $C_0$  คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า  $R_L$  จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า  $R_L > 1$  การดูดซับไม่ดี (unfavorable),  $R_L = 1$  การดูดซับเป็นเส้นตรง (linear),  $0 < R_L < 1$  การดูดซับดี (favorable) และ  $R_L = 0$  การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

## 2) ไอโซเทอมแบบ Freundlich (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad \dots\dots(2.4)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad \dots\dots(2.5)$$

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

$q_e$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

$K_F$  คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

$n$  คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K_F$  จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง  $\log C_e$  กับ  $\log q_e$  โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า  $n$  น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า  $1/n$  อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่า

มากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

### ทฤษฎีการดูดซับของ BET

ในปี ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Langmuir เพื่อให้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น เรียกว่า สมการของ BET สมมติฐานเบื้องต้นของสมการนี้คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อ ๆ ไป ดังนั้นโมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของการดูดซับ จึงเหมือนอยู่ในภาวะอิมตัวของของเหลว แตกต่างจากในชั้นแรกที่โมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง

$$\frac{1}{W\left(\frac{P_0}{P}\right)^{-1}} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1\left(\frac{P_0}{P}\right)}{W_m C} \quad \dots(2.6)$$

เมื่อ P คือความดันของการดูดซับ

$P_0$  คือความดันอิ่มตัว

W คือน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ

$W_m$  คือน้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง

C คือค่าคงที่

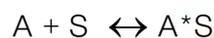
ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นผิวเต็มหนึ่งชั้น คูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดไปหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่นำมาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับนั้น สมการ BET นี้ใช้ได้ดีในช่วงความดันสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.2 การหาพื้นที่ผิว (surface area) โดยวิธี BET เป็นการวัดพื้นที่ผิวโดยการคำนวณการดูดซับของแก๊ส คือการสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ สภาวะที่เกิดการดูดซับทางกายภาพ โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ เส้นไอโซเทอมของการดูดซับจะเป็นเส้นตรงความชันและจุดตัดบนแกนจะให้ปริมาณของแก๊สซึ่งใช้เพื่อจัดโมโนเลเยอร์ เมื่อรู้พื้นที่ของแต่ละโมเลกุลสามารถคำนวณพื้นที่ของการดูดซับได้

## จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และอันดับสอง (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย

### 1) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

จากสมมุติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (adsorbent) และ A·S คือสารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \dots(2.7)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที่<sup>-1</sup>)

$q_t$  คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

$q_e$  คือค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.7) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t=0$  จนถึง  $t=t$  และตั้งแต่  $q_t=0$  จนถึง  $q_t=q_t$  จะได้สมการคือ

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots(2.8)$$

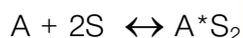
จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots(2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log(q_e - q_t)$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-k_1/2.303$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $\log q_e$

## 2) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองสามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad \text{.....(2.10)}$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที่<sup>-1</sup>)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.10) โดยมีขอบเขตตั้งแต่  $t=0$  จนถึง  $t=t$  และตั้งแต่  $q_t=0$  จนถึง  $q_t=t$  จะได้สมการคือ

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad \text{.....(2.11)}$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{.....(2.12)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q_t$  กับ  $t$  จะได้ความชันเท่ากับ  $1/q_e$  และได้จุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/k_2 q_e^2$

## 3) การแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion)

จลนพลศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจจะสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$q_t = k_1 t^{0.5} + C \quad \text{.....(2.13)}$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน ( $\text{mg/g min}$ ) เมื่อเขียนระหว่าง  $q_t$  กับ  $t^{0.5}$  จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ  $k_p$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $C$  ซึ่งค่า  $C$  จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า  $C$  มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

## โลหะตะกั่ว

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึงโลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า  $5 \text{ g/cm}^3$  โลหะตะกั่ว (lead) สัญลักษณ์ธาตุคือ Pb เป็นธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติที่จัดอยู่ในหมู่ที่ IV ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.19 จุดหลอมเหลว (melting point)  $3,640^\circ\text{C}$  จุดเดือด (boiling point)  $1,749^\circ\text{C}$  ตะกั่วมีสมบัติทางกายภาพและเคมีคล้ายดีบุก นำมาทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ทนต่อการผุกร่อนได้ดี ละลายน้ำได้น้อย ในธรรมชาติตะกั่วมีกำเนิดจากหินอัคนีและหินแปรมีประมาณ 10–20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบในรูปของสารประกอบตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วซัลเฟต ตัวอย่างแร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แร่ galena หรือ galena ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว แร่ cerussite ( $\text{PbCO}_3$ ), anglesite ( $\text{PbSO}_4$ ), pyromorphit ( $\text{PbCl}_2 \cdot 3\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ ), minium ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ), wulfenite ( $\text{PbMnO}_4$ ), crocote ( $\text{PbCrO}_4$ ), ZnS และ pyrite

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีลักษณะอ่อนทำให้หลอมเหลวได้ง่ายและสามารถพิมพ์แบบออกมาเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ดี จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย มีการนำตะกั่วมาใช้ตั้งแต่สมัยโบราณ ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้ตะกั่วในงานต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ภาวะตะกั่วเป็นพิษเป็นโรคที่พบได้บ่อยในประเทศไทย อาการของตะกั่วเป็นพิษเป็นอาการที่เกิดขึ้นกับอวัยวะหลายระบบและคล้ายกับอาการของโรคอื่น ๆ

ตะกั่วเป็นสารที่พบปนเปื้อนทั่วไป ในสมัยอดีตเด็กเป็นโรคพิษตะกั่วจากการรับประทานสีทาบ้าน หรือใช้มือจับของที่ติดสีดังกล่าว ในปัจจุบันสีทาด้วยตะกั่วมีน้อยลง แหล่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดพิษสำหรับผู้ใหญ่คือจากอุตสาหกรรม ได้แก่ โรงงานทำแบตเตอรี่และโรงงานอื่น ๆ ที่มีการใช้ตะกั่วอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ สำหรับประชาชนโดยทั่วไปอาจได้รับตะกั่วจากอากาศ ซึ่งมักมีตะกั่วปนเปื้อนจากการใช้เตตระเอทิลเลด (tetraethyl lead) ในน้ำมันรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่นๆ อีกจำนวนมากที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกั่วเป็นพิษ ได้แก่ หัวกระสุนตะกั่วที่ตกค้างในร่างกาย การทำงานในสนามยิงปืน ยาสูบไซร่ หมึก แป้งทาตัวเด็ก (จ๊วยจ๊วย) ภาชนะเซรามิกส์ ที่มีตะกั่ว ท่อประปาที่ทำด้วยตะกั่ว ผลิตภัณฑ์จากแบตเตอรี่และอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อน เหล้าไวน์ เครื่องยนต์ที่ใช้ตะกั่วเป็นส่วนประกอบ การเจียรไนพลอยที่ใช้จานตะกั่ว ตะกั่วที่ใช้เป็นตัวพิมพ์หนังสือ ตะกั่วถ่วงน้ำหนักม่าน สีที่ทาของใช้ของเด็ก เป็นต้น

ตะกั่วเป็นธาตุที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั่ว ๆ ไป ปกติผู้ใหญ่จะรับประทานอาหารโดยมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ด้วยประมาณวันละ 150 ไมโครกรัม อาหารเด็กอาจมีตะกั่วปนประมาณวันละ 100 ไมโครกรัมและรับตะกั่วในน้ำดื่มประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อวัน นอกจากนี้คนเรายังรับตะกั่วทางการหายใจ โดยทั่วไปอากาศอาจจะมีปริมาณตะกั่ว 1-2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ประมาณกันว่าถ้าปริมาณตะกั่วในอากาศ 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะทำให้ตะกั่วในเลือดสูงขึ้น 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์ลิตร โดยสรุปคนหนึ่งอาจรับตะกั่วเข้าไปในร่างกายวันละ 0.1-2 มิลลิกรัม ในจำนวนนี้ประมาณ ร้อยละ 75 เข้าทางทางเดินอาหารและร้อยละ 25 เข้าทางการหายใจ การดูดซึมตะกั่วไปทางเดินอาหาร ผู้ใหญ่จะดูดซึมเข้าไปในร่างกายประมาณร้อยละ 10 ส่วนเด็กจะดูดซึมมากกว่าถึงร้อยละ 40 ดังนั้นเด็กที่รับประทานสารที่ปนเปื้อนตะกั่วทางปากอาจจะมีอาการเป็นพิษมากกว่า ส่วนตะกั่วที่เข้าไปในทางเดินหายใจ ถ้าขนาดของผงฝุ่นที่มีตะกั่วยิ่งเล็กลงการดูดซึมนก็ยิ่งมาก ผงฝุ่นตะกั่วที่เล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร ร่างกายสามารถดูดซึมได้ถึงร้อยละ 90 การกระจายของตะกั่วในร่างกายเนื่องจากปกติตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกกำจัดออกไปช้า ๆ ผลทำให้ตะกั่วมีการสะสมขึ้น ในคนทั่วไปตะกั่วอาจจะสะสมในร่างกายประมาณ 200 มิลลิกรัม ส่วนในคนงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารตะกั่วอาจจะสะสมถึง 500 มิลลิกรัม

### อิฐมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาหรืออิฐมวลเบาเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบันเนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นและยังเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้ที่ต้องการลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วยเนื่องจากอิฐมวลเบา มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากอิฐชนิดอื่น ๆ อิฐมวลเบา มีการใช้มานานในต่างประเทศ แต่ยังเป็นวัสดุก่อสร้างแบบใหม่ในประเทศไทย อิฐมวลเบาได้รับการพัฒนาจากอิฐแดงหรืออิฐมอญ ซึ่งอิฐมอญ (brick) เป็นวัสดุที่นำมาใช้ด้านงานก่อสร้างเป็นเวลาช้านานมาแล้ว เป็นวัสดุก่อสร้างที่ผลิตจากทรายและดินเหนียว หรือทรายและหิน แฉียงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ขึ้นอยู่กับสัดส่วนและชนิดของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ วิธีใช้และการผลิต เวลาและอุณหภูมิในการเผา เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น อิฐจะมีสีคล้ำความพรุนจะลดลงและความแข็งแรงของอิฐจะเพิ่มขึ้น

อิฐมวลเบาเป็นวัสดุที่ผลิตมาจากปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซัม น้ำ และผงอลูมิเนียม ในส่วนผสมจะมีฟองอากาศอยู่ปริมาณมาก ประมาณ 75% จึงทำให้อิฐเบา (ลอยน้ำได้) ฟองอากาศจะเป็นลักษณะ closed cell ไม่ดูดซึมน้ำ (ดูดซึมน้ำน้อยกว่าอิฐมอญ 4 เท่า) ความเบาของอิฐก็จะทำให้โครงสร้างประหยัด เป็นฉนวนความร้อน ค่าการต้านทานความร้อนของอิฐมวลเบา จะดีกว่าคอนกรีตบล็อกถึง 4 เท่า และดีกว่าอิฐมอญ 6-8 เท่า ที่สำคัญไม่สะสมความร้อน ไม่ติดไฟ ทนไฟ ประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส ได้นานถึง 4 ชม. กันเสียงได้ดีมาก เมื่อมีการฉาบจะมีการแตกร้าวน้อยกว่าการ

ก่ออิฐฉาบปูนทั่วไป เนื่องจากตัวบล็อกกับปูนฉาบนั้นมีส่วนผสมที่ใกล้เคียงและในการก่อผนังก็จะรับน้ำหนักได้ ประมาณ 80 กก./ตร.ม.

ข้อมูลจากกรมส่งเสริมอุตสาหกรรมพบว่าลักษณะของอิฐมวลเบาที่มีทั้งชนิดเสริมเหล็ก คือพวกแผ่นผนัง/พื้น/หลังคา และแบบไม่เสริมเหล็กคือบล็อกสำหรับก่อผนัง เลื่อยตัดได้เหมือนไม้ ทนแรงกด 30-80 กก. ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน มีความหนา 7.5 ซม., 10 ซม., 12.5 ซม., 15 ซม., 20 ซม. ความกว้าง 20 ซม. และความยาว 60 ซม. สำหรับชั้นคุณภาพ 2 ชนิด 0.5 มีความหนาแน่นแห้ง ไม่เกิน 500 กก./ลบ.ม. และค่ารับกำลังแรงอัด ไม่น้อยกว่า 30 กก./ตร.ซม. ตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 สำหรับชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7 มีความหนาแน่นแห้ง ไม่เกิน 700 กก./ลบ.ม.และค่ารับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 50 กก./ตร.ซม. ตามมาตรฐาน มอก.1505-25

### คุณสมบัติของอิฐมวลเบา

อิฐมวลเบาที่ใช้ระบบการผลิตแบบ AAC (autoclaved aerated concrete) เป็นระบบการผลิตโดยใช้การอบไอน้ำภายใต้แรงดัน เป็นเทคโนโลยีการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่เน้นคุณสมบัติพิเศษคือมีน้ำหนักเบา ขนาดก้อนได้มาตรฐานเท่ากันทุกก้อน ทนไฟ ป้องกันความร้อน ป้องกันเสียง ตัดแต่งเข้ารูปง่ายใช้งานได้เกือบ 100% ที่สำคัญคือรวดเร็ว สะอาด ลดระยะเวลาในการก่อสร้างและประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาชนิดที่ใช้ระบบการผลิตแบบ AAC นี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แก้วกลบหรือทราย โดยส่วนมากใช้วัสดุที่มีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงและผงอะลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็นสารก่อให้เกิดการขยายตัว อัตราการใช้ประมาณ 5-8% โดยปริมาตร

### ส่วนประกอบของอิฐมวลเบา

การผลิตอิฐมวลเบาที่มีวัตถุประสงค์ในการผลิตคือ ทรายละเอียด (สัดส่วน 50%) ยิปซัม (สัดส่วน 9%) ปูนขาว (สัดส่วน 9%) ปูนซีเมนต์ (สัดส่วน 30%) ผงอะลูมิเนียม (สัดส่วน 2%) โดยนำส่วนผสมมาทำให้แข็งด้วยการอบไอน้ำภายใต้ความดัน และ อุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส มีฟองอากาศมากประมาณ 75% ทำให้เบา (ลอยน้ำได้) ฟองอากาศเป็น closed cell ไม่ดูดซึมน้ำ (ดูดซึมน้ำน้อยกว่าอิฐมอญ 4 เท่า) ความเบาจะทำให้ประหยัดโครงสร้างและสารเคมีที่กระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ ผ่านการอบไอน้ำ ภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sari et al. (2007) ได้ใช้ดินเหนียวจากเมือง Celtek ประเทศตุรกี ซึ่งเป็นดินที่ใช้ทำอิฐก่อสร้าง ดินเหนียว Celtek เป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียมโดยวิธีแบทช์ ปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ คือปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ที่ pH 6 ระยะเวลาในการกวนที่ 30 นาที พบว่าพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมของ Langmuir ดีกว่าไอโซเทอมของ Freundlich พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (maximum monolayer adsorption capacity,  $q_m$ ) สำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 18.08 mg/g สอดคล้องกับรายงานของ Ozdes et al. (2011) ใช้ดินเหนียวแร่อิลไลต์ (illite clay) ประเทศตุรกีสำหรับดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียม พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 53.76 mg/g ในสภาวะปริมาณดิน 1.0 g/L pH เท่ากับ 4 และระยะเวลาการกวน 240 นาที

ดินเหนียวแร่ kaolinite ได้นำมาใช้กำจัดไอออนตะกั่วโดยวิธีการดูดซับ Gupta et al. (2005) พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 11.52 mg/g Jiang et al. (2009) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วระหว่างดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติกับดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิว พบว่าดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนตะกั่วดีกว่าประมาณ 4.5 เท่า พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 4.73 mg/g และ 32.2 mg/g สำหรับดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติ และดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิว ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Jiang et al. (2010) ที่ทดสอบดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติ ประเทศจีน ดูดซับไอออนตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิลและทองแดง พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 2.35 mg/g