

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ เป็นความสามารถของสารดูดซับ (Adsorbent) ในการดึงโมเลกุลหรือ คอลลอยด์ (Adsorbate) ที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของสารดูดซับ ซึ่งกระบวนการดูดซับนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว 2 ภูมิภาค เช่น แก๊สกับของเหลว, แก๊สกับของแข็ง, ของเหลวกับของเหลว หรือ ของเหลวกับของแข็ง โดยกระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือการดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

การดูดซับแบบนี้สามารถเกิดแบบหลายชั้น (Multilayers) บนพื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับอย่างอ่อนและไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น แต่จะดึงดูดด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) มักจะเกิดในสถานะอุณหภูมิต่ำๆ และมีพลังงานการดูดซับต่ำ นอกจากนี้การย้อนกลับของการดูดซับ สามารถเกิดขึ้นได้

2) การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

การดูดซับทางเคมีเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแล้วไม่ทำให้การจัดเรียงตัวของ โครงสร้างของแข็งเปลี่ยนไป โดยการดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับที่แข็งแรง เกิดพันธะเคมีระหว่าง ตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับและเป็นแบบเฉพาะเจาะจง คือขึ้นกับชนิดของตัวถูกดูดซับและผิวหน้า ของตัวดูดซับหลังการดูดซับชั้นของโมเลกุลที่เป็นตัวถูกดูดซับบนผิวหน้ามีเพียงชั้นเดียว (Monolayer) โดยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

2.1.1 กลไกการดูดซับ

การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากแก๊สหรือของเหลวมายัง ของแข็งหรือของเหลวการเกาะติดบนพื้นผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นเป็น 3 ระยะติดต่อกัน ดังนี้

ระยะที่ 1 การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัว ถูกดูดซับ (Adsorbate) ในน้ำจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของตัวดูดซับ

ระยะที่ 2 การแพร่ภายใน (Intraparticle Diffusion หรือ Pore Diffusion) เป็นระยะที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนของตัวดูดซับ

ระยะที่ 3 การดูดซับ (Adsorption) เป็นระยะที่เกิดการเกาะติดบนผิวในรูพรุน ระหว่างตัวถูกดูดซับและพื้นผิวของตัวดูดซับ การเกาะติดในระยะที่ 3 อาจจะเกาะติดบนผิวด้วย

แรงทางฟิสิกส์หรือเคมีหรือทั้งสองชนิดพร้อมกัน ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียการดูดซับจะพิจารณาเฉพาะการเกาะติดด้วยแรงทางฟิสิกส์มากกว่าแรงทางเคมี (สันทัต, 2549)

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ มี 2 ปัจจัยคือ คือธรรมชาติของตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

2.1.2.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับเป็นปัจจัยหลักปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับได้แก่

1) พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน พื้นที่ผิวเป็นสมบัติอย่างหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับในการดูดซับ นั่นคือความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมากขึ้น แต่พื้นที่ผิวโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับไม่เพียงพอที่จะอธิบายความสามารถในการดูดซับได้ดี โครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิวมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดซับได้การดูดซับก็จะเพิ่มขึ้น

2) ขนาดของตัวดูดซับ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับการลดขนาดของตัวดูดซับให้มีขนาดเล็กทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารที่มีขนาดใหญ่

3) เคมีที่ผิวหน้า หมู่ฟังก์ชันเฉพาะที่อยู่บนผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดซับมีสมบัติที่มีผลต่อกระบวนการดูดซับ เช่น ถ้าโมเลกุลตัวดูดซับเป็นพวกออกไซด์และมีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดความสามารถในการดูดซับจะลดลงด้วย แต่หากมีหมู่ฟังก์ชันเป็นหมู่คาร์บอนิลความสามารถดูดซับจะเพิ่มขึ้น (จุลณีย์, 2546)

2.1.2.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ ธรรมชาติของตัวดูดซับจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับดังนี้

1) ความสามารถในการละลาย ความสามารถในการละลายที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงปฏิกิริยาของตัวทำละลายและตัวถูกละลาย (Denizli et al., 2005)

2) น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุล มีผลต่อความสามารถในการดูดซับเมื่อน้ำหนักโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น (Radhika and Palanivelu, 2006)

3) ความมีขั้ว (Polarity) ของโมเลกุล นอกจากธรรมชาติของโมเลกุลของสารแล้วยังขึ้นอยู่กับตัวทำละลายและตัวดูดซับของสารด้วย ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อความมีขั้วเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มความมีขั้วจะทำได้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น

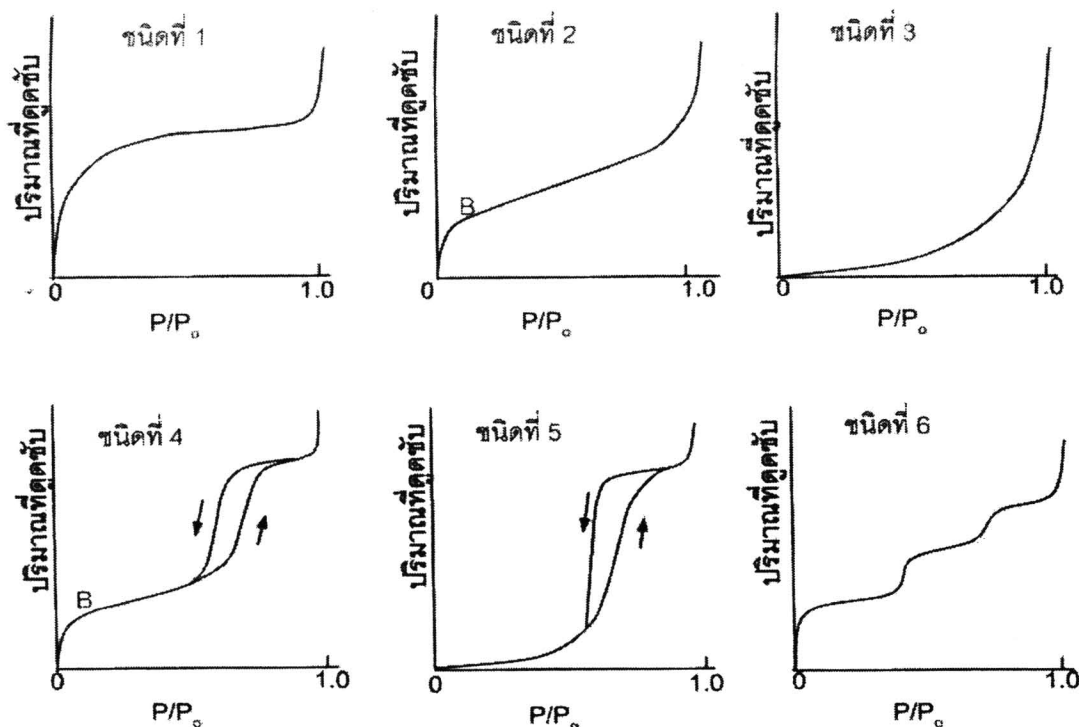
4) ผลของ $[H^+]$ หรือ pH ถ้า $[H^+]$ ลดลง อัตราการดูดซับจะเร็วและมาก เพราะเมื่อ $[H^+]$ เพิ่มขึ้นและยังสามารถเกาะติดผิวคาร์บอน (เช่น ถ่านกัมมันต์) ได้ดี ทำให้คาร์บอนมีสภาพเป็นกลางเสมอเนื่องจากคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ค่อนข้างจะมีประจุลบเล็กน้อย จึงทำให้โมเลกุลไม่มีขั้ว (Nonpolarity) ของสารในน้ำมาเกาะที่ผิวคาร์บอนได้ดี ซึ่ง pH มีผลต่อความสามารถดูด (Ruiying and Jianlong, 2007)

5) ผลของอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราเร็วของการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

2.1.2.3 ความปั่นป่วน อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film diffusion และ Porediffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับทำให้ Film diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงทำให้ Porediffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดซับ ทำให้อัตราการดูดซับเร็วขึ้น (สันทัด, 2549; Faustand and Aly, 1987)

2.1.3 สมดุลของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ จะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อย ๆ โดยสารที่ถูกดูดซับ และมีการคายการดูดซับ (Desorption) ไปพร้อมกัน (จตุพรและอนุรักษ์, 2547) ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน ที่จุดนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสถานะต่าง ๆ เช่น ในน้ำเท่ากับความเข้มข้นในสารดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ ซึ่งใช้ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของสารที่ยังเหลืออยู่ในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ แล้วนำไปเขียนกราฟลอการิทึม (Logarithm) โดยให้ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ในน้ำเป็นแกนนอนและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับไปต่อน้ำหนักสารดูดซับเป็นแกนตั้ง เส้นโค้งที่เกิดจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า Adsorption Isotherm ซึ่งมีประโยชน์มากในการหาความสามารถดูดซับของสิ่งสกปรกในน้ำเพื่อเปรียบเทียบชนิดสารดูดซับที่ดีที่สุด ซึ่งรูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมของการดูดซับในสารละลายมี 5 ชนิด คือชนิดที่ 1-5 ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ส่วนไอโซเทอมแบบที่ 6 เพิ่งเป็นแบบที่ค้นพบใหม่ ไอโซเทอมแบบที่ 1 เป็นไอโซเทอมที่การดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว (ไอโซเทอมแบบแลงค์เมียร์) ส่วนแบบอื่น ๆ เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบหลายชั้น



ภาพที่ 2.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบกายภาพ ตามการจำแนก IUPAC (จตุพร และนุรักษ์, 2547)

Adsorption Isotherm มีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีอธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ทฤษฎีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ทฤษฎีของแลงก์เมียร์ (Langmuir) และฟรอนด์ลิช (Freundlich)

2.1.3.1 Langmuir Adsorption Isotherm

สมการของ Langmuir ขึ้นกับความสมดุลระหว่างการกลืนตัว และการระเหยของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ เป็นไอโซเทอมที่ง่ายที่สุดซึ่งใช้กันมากสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว และเป็นการดูดซับทางกายภาพ ซึ่งการเกิดการดูดซับมาจากสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

- โมเลกุลจะถูกจับบนพื้นที่ที่จำกัดของผิวตัวดูดซับ
- แต่ละพื้นที่ของตัวดูดซับเหมาะกับโมเลกุลที่เป็นแบบชั้นเดียว

(Monolayer)

- พื้นที่ผิวของตัวดูดซับจะจำกัดปริมาณของโมเลกุลที่จะดูดซับ
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
- โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้จากสมมติฐานต่าง ๆ สามารถเขียนเป็นสมการ Langmuir (Weber, 1972) ได้ดังนี้

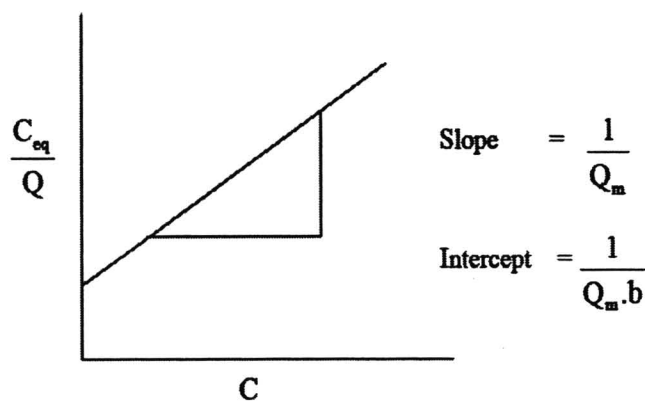
กับโมเลกุลข้างเคียงได้จากสมมติฐานต่าง ๆ สามารถเขียนเป็นสมการ Langmuir (Weber, 1972) ได้ดังนี้

โดยที่ ค่า

$$q = (q_m \cdot b \cdot C_{eq}) / (1 + (b \cdot C)) \tag{2.1}$$

C_{eq} = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/L)
 q = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 q_m = ความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (mg/g)
 b = ค่าคงที่การดูดซับแบบชั้นเดียว

นำสมการที่ (2.1) ไปเขียนกราฟ ซึ่ง b และ q_m สามารถหาได้จาก Slope และ Intercept ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 Langmuir Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง (เกรียงศักดิ์, 2546)

2.1.3.2 Freundlich Adsorption Isotherm

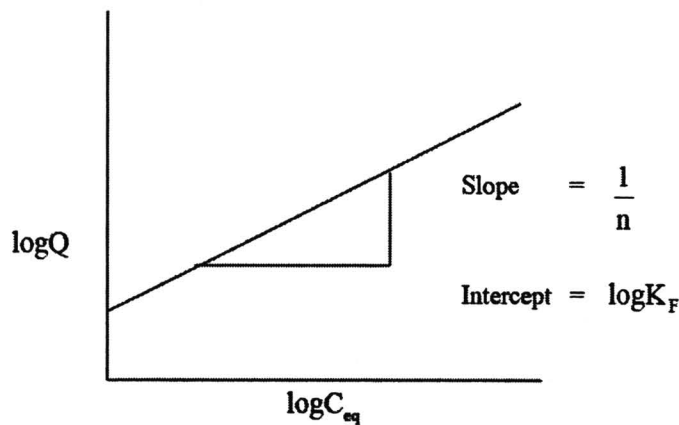
สมการของ Freundlich ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ มักอธิบายการดูดซับของสารประเภทอินทรีย์และสารอนินทรีย์บนตัวดูดซับหลายประเภท เช่น ถ่านกัม-มันต์และเรซินสังเคราะห์ ฟรุนดิชไอโซเทอม เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากแลงค์เมียร์ไอโซเทอมที่เกิดบนผิวหน้าวิวิธพันธุ์ (Heterogeneous) ซึ่งไม่เป็นเนื้อเดียว โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)สมการที่ได้จากการสังเกตและทดลองการดูดซับโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบ Multilayer แสดงดังสมการ (2.2) (Weber, 1972)

โดยที่

$$q = K \cdot C_{eq}^{(1/n)} \tag{2.2}$$

q = ความสามารถในการดูดซับ (mg/g)
 C_{eq} = ความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล (mg/L)
 K = ค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)
 n = ค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย

จากสมการ (2) นำไปเขียนกราฟเส้นตรงได้ดังภาพที่ 2.3



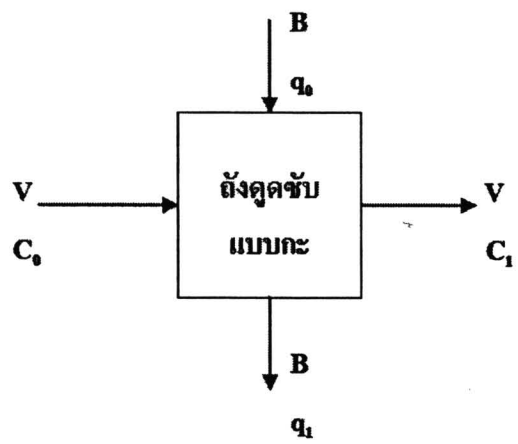
ภาพที่ 2.3 Freundlich Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง (เกรียงศักดิ์, 2546)

2.1.4 ชนิดของกระบวนการดูดซับ

2.1.4.1 กระบวนการดูดซับแบบระบบกะ (Batch Adsorption Process)

กระบวนการดูดซับแบบระบบกะ เป็นการใส่สารดูดซับดูดซับสารถูกดูดซับ (สารปนเปื้อน) ในน้ำ ในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งระยะเวลาจะยาวนานหรือสั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารปนเปื้อน ขนาดของสารดูดซับ และการสัมผัสระหว่างสารดูดซับกับสารปนเปื้อน กระบวนการดูดซับแบบ ระบบกะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) กระบวนการดูดซับแบบขั้นตอนเดียว (Single-Stage Operation) เป็นระบบการดูดซับที่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.4 และวิเคราะห์ระบบได้จาก สมการ (2.3)



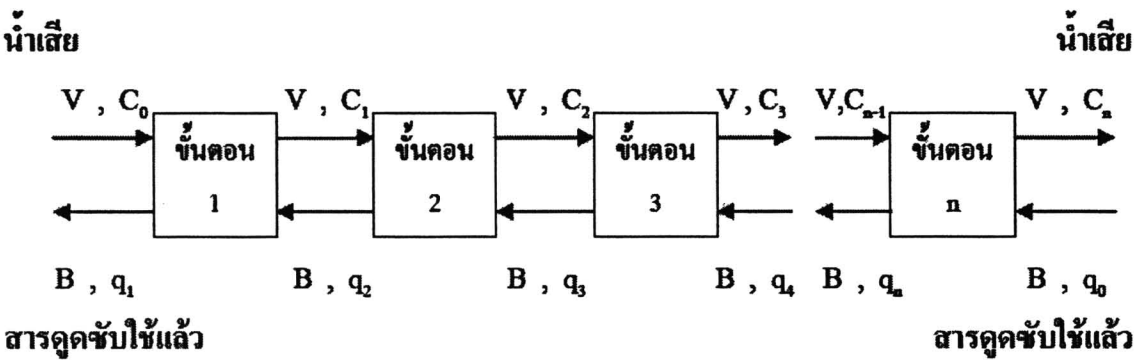
ภาพที่ 2.4 ระบบการดูดซับแบบกะขั้นตอนเดียว (เกรียงศักดิ์, 2539)

$$V*(C_0 - C_1) = B*(q_1 - q_0) \tag{2.3}$$

เมื่อ V = ปริมาณน้ำที่นำเข้าออก (L)
 C_0 = ความเข้มข้นของสารละลายเข้าระบบ (mg/L)
 C_1 = ความเข้มข้นของสารละลายออกจากระบบ (mg/L)
 B = ปริมาณของสารดูดซับ (g)
 q_0 = ความเข้มข้นของสารละลาย/ปริมาณของสารดูดซับ เมื่อเข้าระบบ (mg/g)
 q_1 = ความเข้มข้นของสารละลาย/ปริมาณของสารดูดซับ เมื่อออกจากระบบ (mg/g)

หลังจากกระบวนการดูดซับสามารถคำนวณค่าความสามารถดูดซับหรือความเข้มข้นของสารละลายต่อปริมาณของสารดูดซับ (mg/g) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับ (q_m) (mg/g) ตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ของแบบจำลองของ Langmuir และ Freundlich

2) กระบวนการดูดซับแบบไหลสวนทาง (Countercurrent Operation) เป็นระบบการดูดซับที่มีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.5 โดยมีระบบหลายขั้นตอนและวิเคราะห์ระบบได้จากสมการ (2.4-2.7)



ภาพที่ 2.5 ระบบการดูดซับแบบกะไหลสวนทาง (เกรียงศักดิ์, 2539)

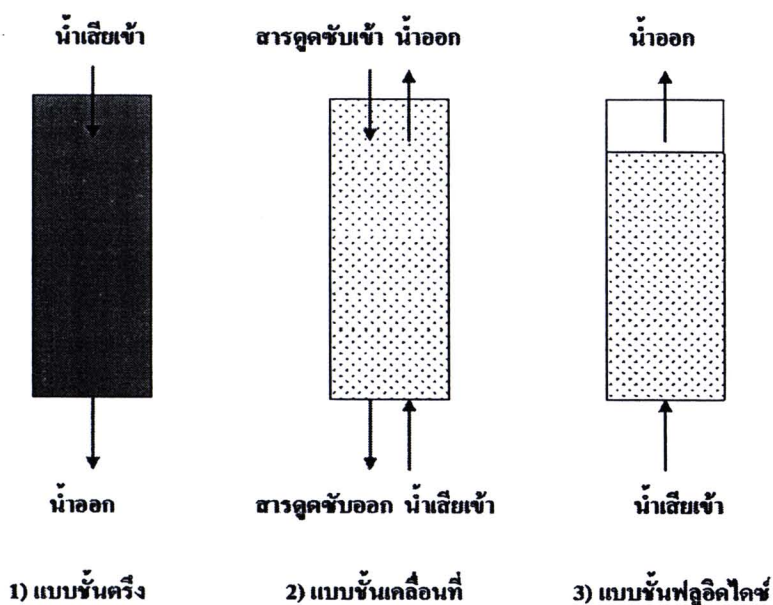
ขั้นตอนที่ 1: $V*(C_0 - C_1) = B*(q_1 - q_2)$ (2.4)
ขั้นตอนที่ 2: $V*(C_1 - C_2) = B*(q_2 - q_3)$ (2.5)
ขั้นตอนที่ 3: $V*(C_2 - C_3) = B*(q_3 - q_4)$ (2.6)
" " "
" " "



ขั้นตอนที่ n: $V^*(C_{n-1} - C_n) = B^*(q_n - q_0)$ (2.7)

2.1.4.2 กระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่อง (Continuous Adsorption Process)

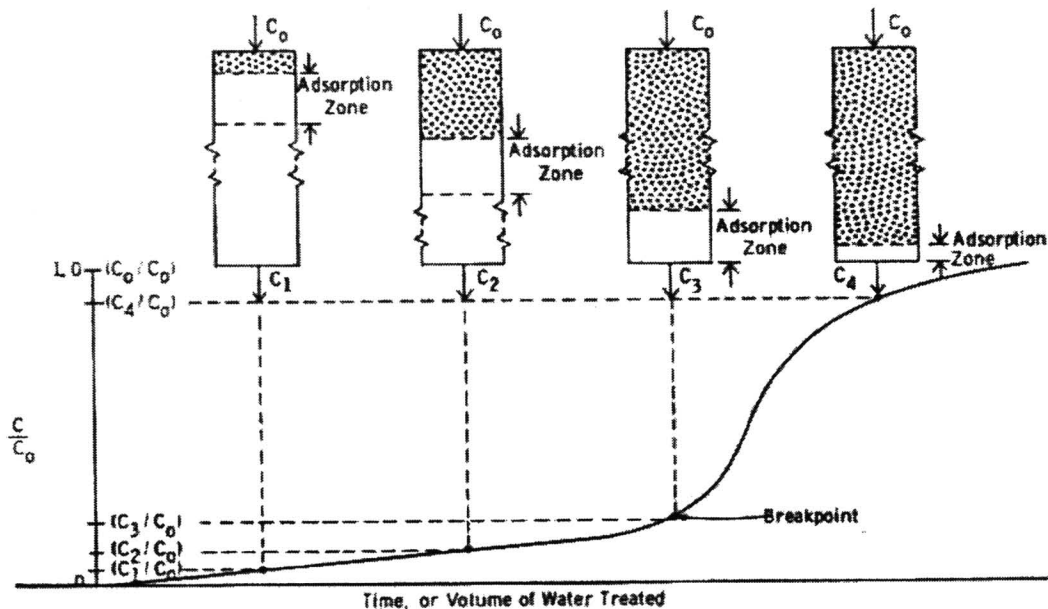
กระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่อง เป็นระบบที่นิยมใช้กันมากกว่าระบบแบบกะและใช้กับปริมาณน้ำมาก ๆ ซึ่งกระบวนการดูดซับแบบระบบต่อเนื่องสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ แบบชั้นตรึง (Fixed Bed), แบบชั้นเคลื่อนที่ (Moving Bed) และแบบชั้นฟลูอิดไดซ์ (Fluidized Bed) ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 ระบบดูดซับแบบต่อเนื่อง (เกรียงศักดิ์, 2539)

ภายหลังจากการดูดซับมวลสารด้วยสารดูดซับมีค่าลดลงจนถึงจุดอิ่มตัวที่ความเข้มข้นของมวลสารเหลือเท่ากับ 95% ของความเข้มข้นเริ่มต้น ปริมาตรของสารละลายที่เกิดการไหลผ่านดูดซับสามารถอ่านค่าได้จากกราฟ ที่ประสิทธิภาพของกระบวนการดูดซับเท่ากับ 95% แสดงภาพที่ 2.7

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดวิจัย
วันที่..... 2 พ.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 246777
เลขเรียกหนังสือ.....



ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงการดูดซับจนถึงจุดอิ่มตัว (Breakthrough Curve) (Weber, 1972)

ในงานวิจัยนี้กำหนดค่า Breakthrough เท่ากับ ค่ามาตรฐานสารประกอบฟีนอลในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่ยอมรับได้ คือ เท่ากับ 1.0 mg/L โดยนำค่าความเข้มข้นของสารประกอบฟีนอลในช่วงเริ่มต้นจนถึงค่า Breakthrough มาเขียนกราฟกับค่า BV เพื่อหาพื้นที่เหนือเส้นกราฟซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณจะเท่ากับค่าความสามารถในการดูดซับสารประกอบฟีนอลแบบระบบต่อเนื่อง (Weber, 1972)

ปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์ (Bed Volume; BV)

$$BV = (\pi * D^2 * h) / 4 \quad (2.8)$$

เมื่อ BV = ปริมาตรของตัวดูดซับในคอลัมน์ (cm³.)

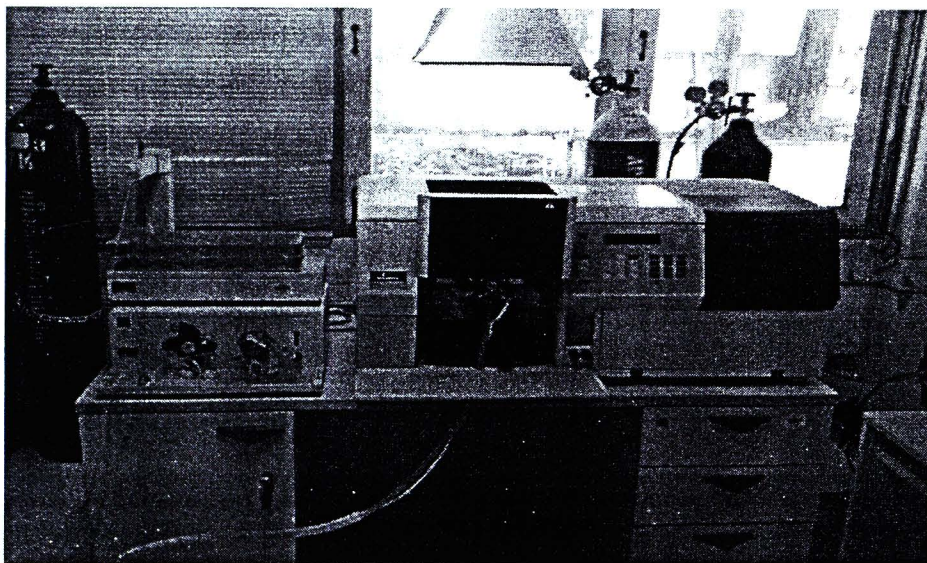
D = เส้นผ่านศูนย์กลางในคอลัมน์ (cm.)

h = ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ (cm.)

2.2 ข้อมูลและหลักการใช้งานของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer

เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer (ภาพที่ 2.8) เป็นเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์หาโลหะหนักในตัวอย่างน้ำ โดยใช้หลักการวัดการดูดกลืนของอะตอมอิสระ เทคนิคนี้สารละลายตัวอย่างเกิดเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟ เมื่อสารละลายตัวอย่างถูกพ่นเป็นละอองเข้าสู่เปลวไฟ ตัวทำละลายจะถูกระเหยออกและสารตัวอย่างจะแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงชนิดเดียวกับอะตอมของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ผ่านเข้าสู่เปลวไฟ ทำให้

อะตอมอิสระดูดกลืนแสงแล้วเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนจะแปรผันโดยตรงกับความเข้มข้น (ชาญวิช, 2547)



ภาพที่ 2.8 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

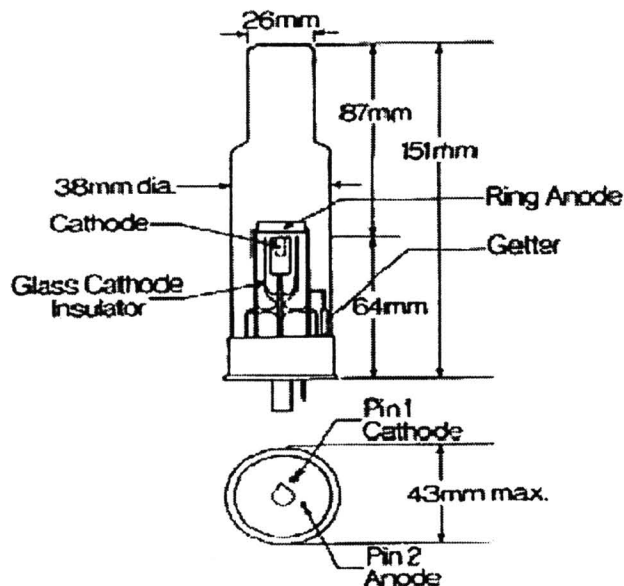
หลักการวิเคราะห์ทาง Atomic Absorption Spectrophotometer ค้นพบโดย Sir Alan Walsh ในปี ค.ศ.1950 โดยนำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณและคุณภาพของธาตุในตัวอย่าง หลักการนี้มีส่วนคล้ายคลึงกับหลักการของ Ultra-Violet Spectroscopy

Atomic Absorption Spectroscopy เป็นการวัดอะตอมที่สามารถดูดกลืนคลื่นแสง โดยสารละลายจะถูกดูดแล้วเกิดอะตอมไอให้กลายเป็นอะตอมอิสระที่เป็นไอ อะตอมอิสระในสภาวะเป็นไอจะอยู่ในสภาพ Ground State ดังนั้นเมื่อมีคลื่นจากแหล่งกำเนิดที่เหมาะสม อะตอมอิสระที่เป็นไอจะสามารถดูดกลืนพลังงานหรือปริมาณแสงไว้ ซึ่งปริมาณแสงที่ดูดกลืนจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของธาตุหรืออะตอมที่เราต้องการทราบ เป็นไปตาม Lambert-Beer's Law (ชาญวิช, 2547)

$$\text{Absorbance} = \log_{10} I_0 / I_t = a * b * c \quad (2.9)$$

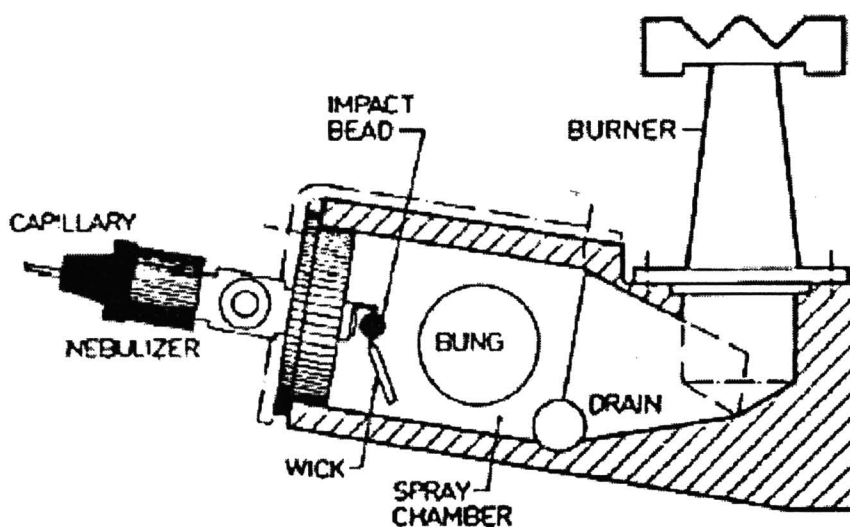
- โดย
- I_0 = ความเข้มข้นของแสงที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง
 - I_t = ความเข้มข้นของแสงที่ผ่านออกมา
 - a = ค่า Absorptivity (ค่าคงที่)
 - b = Path Length (ความยาวของแสงที่ผ่าน)
 - c = ความเข้มข้น (Concentration) ของตัวอย่าง

Hollow Cathode Lamp เป็นแหล่งกำเนิดแสงหรือพลังงาน (ภาพที่ 2.9) ทำจากหลอดแก้วกลวง ข้างในบรรจุก๊าซเฉื่อยอาร์กอน (Ar) และขั้ว Anode กับ Cathode โดยขั้ว Cathode ทำจากธาตุชนิดเดียวกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ส่วนขั้ว Anode เป็นทังสเตน



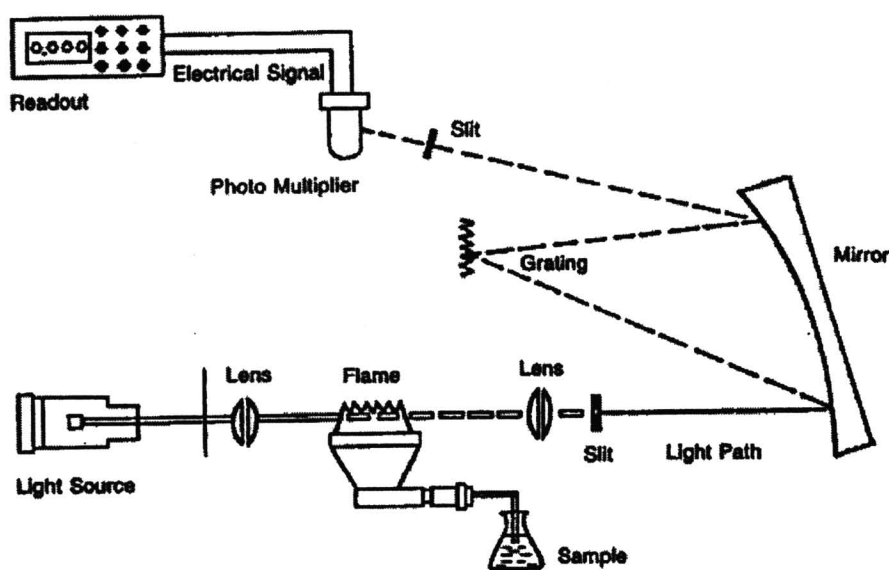
ภาพที่ 2.9 Hollow cathode Lamp (ชาญวิธ, 2547)

Nebulizer (ภาพที่ 2.10) ทำหน้าที่ดูดตัวอย่าง (ที่เป็นสารละลาย) ซึ่งตัวอย่างจะถูกส่งมาแล้วทำให้แตกเป็นละอองในส่วนของ spray chamber และส่งต่อไปยังหัว burner เพื่อทำการเผาละอองตัวอย่างให้แตกเป็นอะตอม



ภาพที่ 2.10 Nebulizer, Spray Chamber & Burner (ชาญวิธ, 2547)

ก๊าซที่ใช้ในการเผาไหม้ Burner มี 2 ประเภท ประเภทแรกคือ Air-Acetylene ประเภทที่สองคือ Nitrous Oxide acetylene การเลือกใช้ประเภทใดประเภทหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ เมื่อตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานแสงจาก Hollow Cathode Lamp เราจะวัดปริมาณแสงที่เหลือจากการดูดกลืนไปบางส่วน (Transmit) ซึ่งจะคำนวณกลับเป็นค่าการดูดกลืน (Absorbance) ได้ดังกล่าวก่อนแล้วข้างต้น (ดู Lambert-Beer's law) ส่วน Photomultiplier Tube นั้นทำหน้าที่ขยายสัญญาณ แล้วส่งต่อไปยัง Output (ภาพที่ 2.11) ค่าที่อ่านได้อาจเป็น Absorbance หรือ Transmittance ขึ้นอยู่กับผู้ใช้

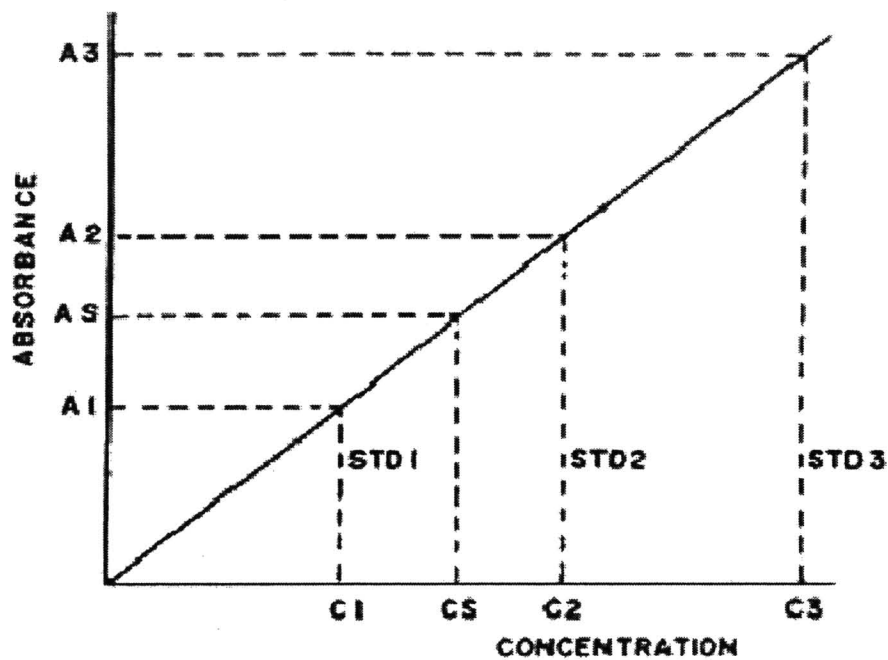


ภาพที่ 2.11 ส่วนประกอบของเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (ชาญวิช, 2547)

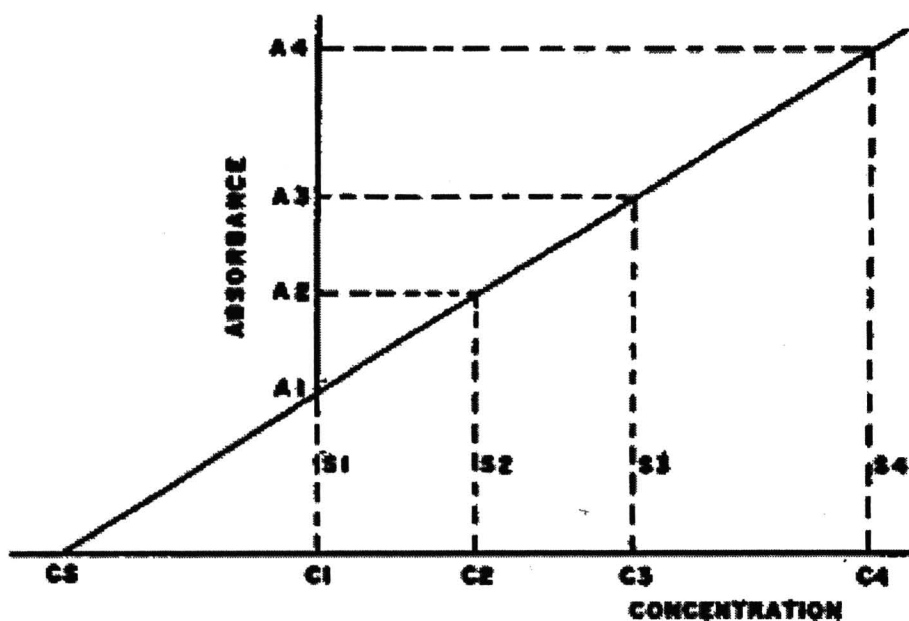
วิธีการคำนวณ (Calculation Method) โดยทั่วไปนิยมใช้จะมีอยู่ 2 วิธี ดังนี้

1. Calibration Method (ภาพที่ 2.12)
2. Standard Addition Method (ภาพที่ 2.13)

การที่จะเลือกวิธีการคำนวณวิธีไหนขึ้นอยู่กับตัวอย่างของการวิเคราะห์ ความเหมาะสมของผู้วิเคราะห์ การเตรียมสาร ฯลฯ โดยแต่ละวิธีจะมีหลักการวิเคราะห์ตามคู่มือของ Atomic Absorption



ภาพที่ 2.12 Calibration curve (ชาญวิธ, 2547)

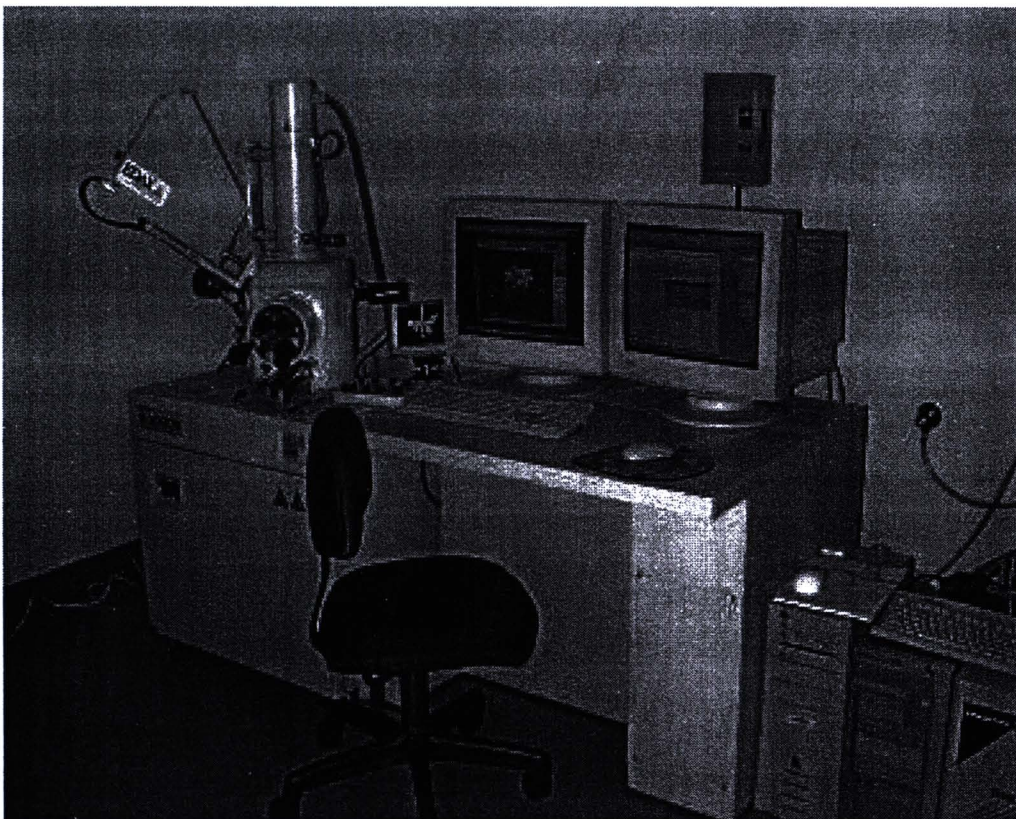


ภาพที่ 2.13 Standard Addition curve (ชาญวิธ, 2547)

2.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน SEM

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยขยายตาประเภท กล้องจุลทรรศน์ ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอน ฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการ

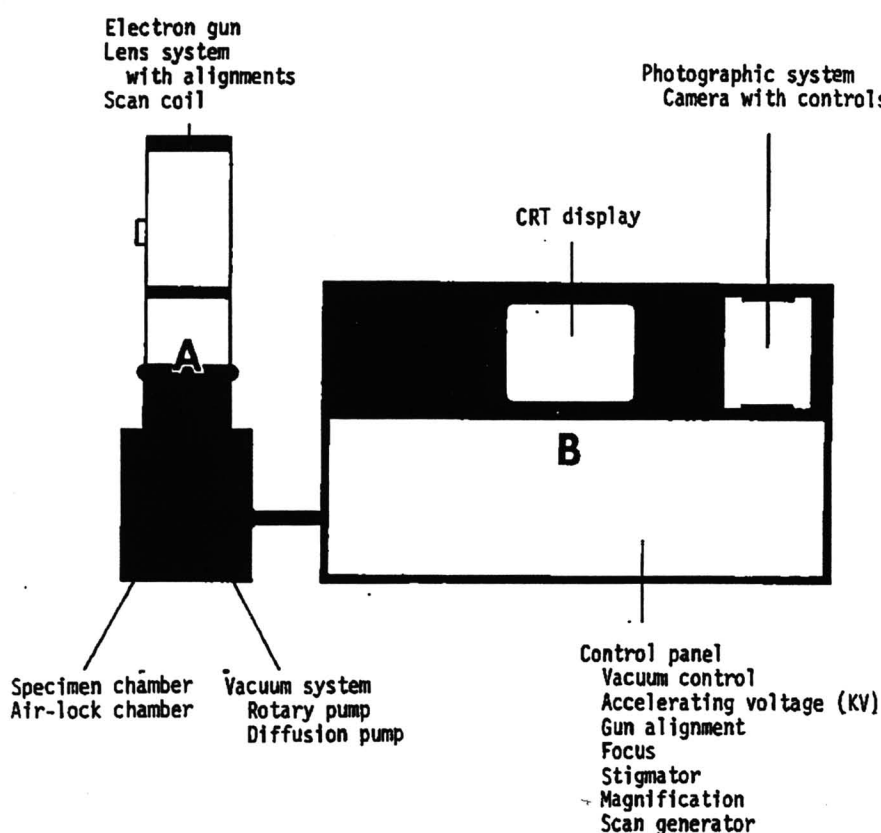
ตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็น ได้ด้วยตาเปล่า หรืออาจบันทึกภาพที่บนแผ่นฟิล์มได้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope) และโดยทั่วไปแล้วผู้ที่คุ้นเคยกับอุปกรณ์ชนิดนี้มักจะเรียกชื่อย่อว่า SEM (ภาพที่ 2.15)



ภาพที่ 2.14 Scanning Electron Microscope

SEM ทั่วไปประกอบด้วยโครงสร้างที่คล้ายคลึงกันโครงสร้างง่ายๆที่เห็นได้ชัดแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือส่วนที่มีลักษณะคล้ายปล่องภายในกลวงเรียกว่า Column และส่วนที่เป็นตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดเรียกว่า Console Unit (ภาพที่ 2.15) ทั้ง2ส่วนนี้สามารถเห็นได้ชัด เพราะเป็นลักษณะภายนอกทั่วไปของSEMจะขาดอย่างใดอย่างหนึ่งเสียมิได้ เพราะ Column ยังประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างที่วาง อยู่ภายในช่องตัวอย่างซึ่งอยู่บริเวณฐานของ Column อุปกรณ์ซึ่งรับสัญญาณที่เกิดขึ้นภายหลังอิเล็กตรอนกระทบตัวอย่างถูก จัดวางไว้อย่างเหมาะสมในบริเวณนี้เช่นกัน ส่วนภายใน Console Unit ซึ่งแผงควบคุมระบบควบคุมไฟฟ้าระบบสุญญากาศและระบบถ่ายภาพ นั้นประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบเช่นการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน ภายใน Column จำเป็นต้องใช้ปุ่มบังคับที่อยู่บนแผงควบคุมของ Console Unit นอกเหนือจาก

Column และ console unit ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็น สำหรับ SEM แล้ว SEM ยังมีส่วนประกอบที่จำเป็น คือระบบทำสุญญากาศ (Vacuum System) ระบบทำไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage Generator) และระบบทำความเย็นโดยการหมุนเวียนน้ำเย็น (Water Cooling System) ซึ่งระบบต่างๆเหล่านี้สามารถหารายละเอียดได้จากตำราหรือหนังสือที่เกี่ยวกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทั่วไปเพื่อให้เข้าใจถึงระบบการทำงาน SEM รวมทั้งการใช้และการบำรุง SEM ได้อย่างถูกต้อง ผู้ใช้หรือผู้ที่สนใจ SEM จำ ต้องศึกษาส่วนประกอบพื้นฐานต่างๆของ SEM ในรายละเอียดเพื่อให้ได้ทราบถึงทฤษฎีหรือการและเหตุผลของแต่ละส่วนที่จำเป็นสำหรับการใช้ SEM ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)



ภาพที่ 2.15 ส่วนประกอบต่างๆรวมทั้งระบบภายใน (วิสันต์ และคณะ, 2542)

2.4 ส่วนประกอบต่างๆ ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

1) แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) อยู่ด้านปลายบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากถังแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110volts หรือ 220volts เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 Kilovolts ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะ Tungsten ที่บิดเป็นรูปตัววีเรียกว่า Filament และล้อมด้วยโลหะรูปกรวย (Wehnelt Cylinder) มีรูอยู่ปลายกรวยเมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000

volts จะไปเข้ามาสู่ Filament ลวดตัวนี้ดังกล่าวก็น่าจะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจายออกมาในสภาวะสุญญากาศภายใน Column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (Anode Plate) ที่อยู่ด้านล่างของ Electron Gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงดูดผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนดคือลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุ อิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง Electron Gun ซึ่งมี Filament และ Wehnelt Cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ยับเยินได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆ ด้านนอก Electron Gun ทั้งนี้เพื่อปรับให้ Electron Gun อยู่ในแนวตรงได้ ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายใน Column ใน SEM สมัยใหม่นอกจากจะมีปั๊มหรือสกรูที่ช่วยปรับ Electron Gun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่น anode เพื่อจะช่วยให้ปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของ สนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรก ขดลวดดังกล่าวเรียกว่า Aliment Coil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับปุ่ม (Alignment Knobs) บนแผงของ Console Unit เหตุที่ต้องปรับ Electron gun ก็เพื่อให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรง กระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวหรือเขวออกไปจากศูนย์กลางหากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron)

2) เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Manacles & Scan Coils) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูปลี่เหลี่ยมจัตุรัสเลนส์แต่ละชุดมี Aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีรูขนาดต่าง ๆ กัน (50um-400um) และสามารถเปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ Aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ Aperture เหล่านี้ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร Aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อน ที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็น Aperture พิเศษเรียกว่า Objective Aperture มีไว้เพื่อกั้นกรองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวย ขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่าง ๆ บนผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กราดไปบนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ นี้เรียกว่า Scan coils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกราดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอร์รับภาพให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางและเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3) ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen Chamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปั๊มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่าง ๆ

เพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า Goniometerstage

4) อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & Scintillaor) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุ+ขนาด30-250โวลต์เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5) อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging & Photographic Devices) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอCRTก็พร้อมที่จะทำการบันทึกอุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นแสงไฟฟ้าการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภท ท่อนำแสงในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้ จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (Photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด photons นี้ไป อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพ ที่ติดตั้งไว้บนกล่องควบคุม (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

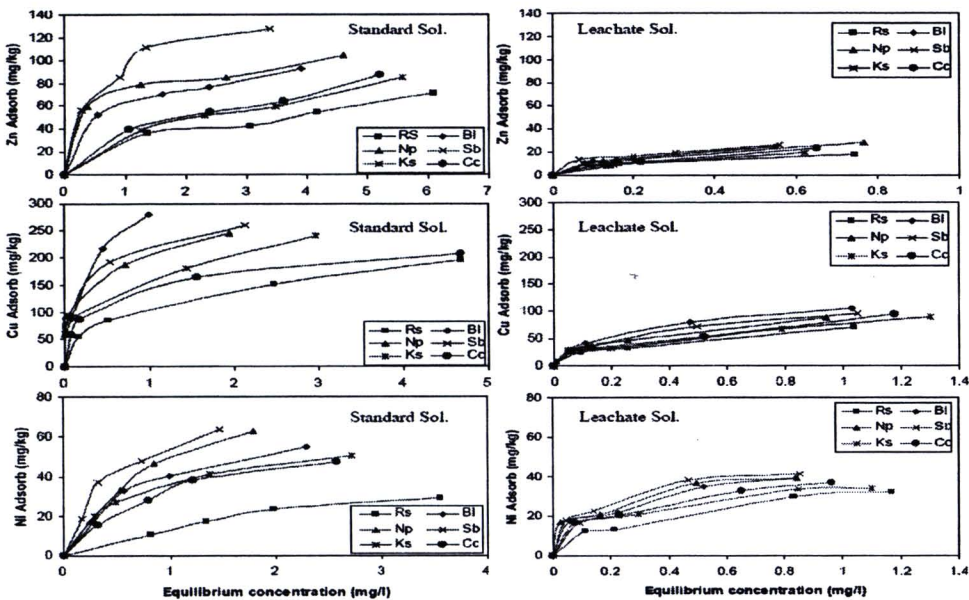
เกรียงศักดิ์และศุภเกียรติ (2549) ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับของสังกะสี ทองแดง นิเกิล ในดินตัวอย่างดินที่นำมาศึกษาประกอบด้วยตัวอย่างดินจากชุดดินต่างๆ จำนวน 6 ชุด ดังตารางที่ 2.1 ในเขตพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทยได้แก่ ชุดดินสระบุรี (Sb), ชุดดินกำแพงแสน (Ks), ชุดดินนครปฐม (Np), ชุดดินรังสิต (Rs), ชุดดินบางเลน (BI) และชุดดิน ฉะเชิงเทรา (Cc) โดยการนำดินจากชุดดินตัวอย่างต่างๆอย่างละ 1 กรัม ผสมกับน้ำชะละลายจากตะกอนน้ำเสียที่ทราบความเข้มข้นโลหะหนักชนิดต่างๆเพื่อใช้ในการศึกษาต่อไปดังเช่นภาพที่ 2.16 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่จุดสมดุล และตารางที่ 2.2 คือตารางค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของโลหะหนักในดินจากสมการฟรุนดิช



ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของตัวอย่างดินที่ใช้ในการศึกษา

พารามิเตอร์	ชุดดิน						ภาคตะกอน
	รังสิต (Rs)	บางแสน (BI)	นครปฐม (Np)	สระบุรี (Sb)	กำแพงแสน (Ks)	ละหานทราย (Cc)	
พีเอช	4.15	6.48	5.76	7.11	7.61	6.11	6.37
การนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซม.)	593	885	431	132	174	204	3845
สารอินทรีย์ (ร้อยละ)	1.75	0.77	1.32	1.06	0.70	1.16	34.08
ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (เซนติโลล/กก.)	23.42	29.87	15.58	19.34	16.71	18.25	-
สังกะสีทั้งหมด (มก./กก.)	21	57	58	67	59	96	2648
ทองแดงทั้งหมด (มก./กก.)	19	20	22	27	13	22	4894
นิกเกิลทั้งหมด (มก./กก.)	46	54	58	69	39	44	352
ดินทราย (ร้อยละ)	4	9	19	16	35	6	-
ดินร่วนปนทราย (ร้อยละ)	26	34	60	33	42	25	-
ดินเหนียว (ร้อยละ)	70	57	21	51	23	69	-

(เกรียงศักดิ์ และศุภเกียรติ, 2549)



ภาพที่ 2.16 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับและความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่จุดสมดุล (เกรียงศักดิ์และศุภเกียรติ, 2549)

ตารางที่ 2.2 ตารางค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับของโลหะหนักในดินจากสมการฟรุนดิช

สารละลายโลหะหนัก	ชุดดิน	สังกะสี			ทองแดง			นิกเกิล		
		K	n	R ²	K	n	R ²	K	n	R ²
สารละลายโลหะหนัก	Rs	29.970	2.260	0.943	111.300	2.900	0.980	13.350	1.470	0.956
	Bl	63.530	2.580	0.960	269.580	2.790	0.988	38.080	1.840	0.941
	Np	76.660	2.090	0.956	219.280	3.770	0.979	46.900	1.520	0.968
	Sb	89.640	2.930	0.952	223.660	3.790	0.971	58.220	1.780	0.956
	Ks	35.050	2.890	0.991	167.720	3.810	0.988	35.490	1.340	0.941
	Cc	37.490	2.110	0.965	136.300	3.290	0.988	30.640	1.840	0.970
น้ำชะละลายจากตะกอนน้ำเสีย	Rs	26.890	2.080	0.971	74.250	2.950	0.973	12.160	1.350	0.956
	Bl	31.330	2.280	0.971	95.360	2.330	0.984	34.080	1.910	0.961
	Np	27.250	3.130	0.943	92.810	2.320	0.941	42.560	1.560	0.948
	Sb	32.730	2.020	0.954	93.300	2.320	0.974	45.620	1.100	0.951
	Ks	26.150	3.010	0.943	74.490	2.330	0.956	32.870	1.260	0.959
	Cc	28.170	1.850	0.977	89.990	2.190	0.987	29.860	1.820	0.959

(เกรียงศักดิ์ และศุภเกียรติ, 2549)

- 1) จากการใช้สมการฟรุนดิช สามารถอธิบายการดูดซับ สังกะสี, ทองแดงและนิกเกิล ในดินได้ดีโดยมีสัมประสิทธิ์ในการดูดซับ (k) จากสารละลายโลหะหนักมาตรฐานอยู่ในช่วง 29.97-89.64 และ 13.35-58.22 ลิตร/กก. ตามลำดับ สำหรับการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะละลายจากกากตะกอนน้ำเสียพบว่ามีสัมประสิทธิ์ในการดูดซับที่น้อยกว่าโดยมีค่าอยู่ในช่วง 26.89-32.33, 74.25-93.30 และ 12.16 - 45.62 ลิตร/กก. ตามลำดับ สำหรับค่า n มีค่าอยู่ในช่วง 2.09-2.93, 2.79-3.81 และ 1.34-1.84 และ 1.85-3.13, 2.19-2.95 และ 1.10 - 1.90 ตามลำดับ
- 2) ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของดินเมื่อเรียงตามลำดับพบว่าทองแดง มากกว่าสังกะสี มากกว่า นิกเกิล และพบความแตกต่างของชุดดินที่มีผลต่อการดูดซับโดยในชุดดินที่มีค่า pH ต่ำจะทำให้โลหะอยู่ในสภาพละลายได้มากกว่าที่จะถูกดินดูดซับ โดยเฉพาะในการดูดซับสังกะสีและนิกเกิล สำหรับชุดดินที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงจะทำให้ดูดซับทองแดงได้มากกว่าชุดดินที่มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกอยู่ต่ำ

3) รูปแบบการกระจายตัวของสังกะสีและนิกเกิล ส่วนใหญ่อยู่ในรูปแลกเปลี่ยนได้ คาร์บอเนต และออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ซึ่งจะแตกต่างกับทองแดงที่พบสัดส่วนการกระจายตัวส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ โดยเฉพาะรูปแลกเปลี่ยนได้ในดินที่เหลือจากการดูดซับสารละลายโลหะหนักมาตรฐานซึ่งมีสัดส่วนสูงกว่าที่พบในดินที่เหลือจากการดูดซับน้ำชะละลายจากกากตะกอนน้ำเสีย

ธนิตและคณะ (2550) หาคณสมบัติหลายประการของดินลูกรังคองหงส์โดยเน้นที่พารามิเตอร์การเคลื่อนที่และการดูดติดผิวของโลหะหนัก ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่า ดินลูกรังเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุต่ำ และมีความเป็นกรดเล็กน้อยโดยมีค่า pH เท่ากับ 5.5 ดินลูกรังมีสีน้ำตาลแดงเนื่องจากมีปริมาณเหล็กสูง ค่าความหนาแน่นสูงสุดและความชื้นที่เหมาะสมในการบดอัดเท่ากับ 1.7 g/cm^3 และ 18% ตามลำดับ ผลการทดสอบแบบแบทช์สอดคล้องกับสมการไอโซเทอมของ Freundlich ความสามารถดูดติดผิวของดินลูกรังเมื่อทดสอบกับสารละลายโลหะหนักเรียงจากมากได้แก่ Cr^{3+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , and Cd^{2+} ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดมีค่าจาก 4.0×10^{-8} ถึง $5.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านในระยะยาวพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่านของดินลูกรังบดอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทดสอบด้วยสารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้นมากกว่า 0.001 M. Breakthrough ของสารละลายโลหะหนักจากการทดลองแบบสดมภ์มีผลสอดคล้องกับค่าความสามารถการดูดติดผิวที่ได้จากการทดสอบแบบแบทช์ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และแฟคเตอร์ความหน่วงถูกคำนวณโดยการฟิต Breakthrough curves กับสมการการเคลื่อนที่ของสารละลายในดิน และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอยได้ค่า

ค่า pH ของดินลูกรังคองหงส์มีค่าเท่ากับ 5.52 แสดงให้เห็นว่าดินมีลักษณะเป็นกรดเล็กน้อยและมีปริมาณสารอินทรีย์เล็กน้อยที่ประมาณ 4.9 % ค่าความสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกค่อนข้างต่ำสังเกตได้จากค่าประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Cation) ของดินลูกรังที่มีค่าน้อย (ตารางที่ 2.3) ผลการตรวจสอบปริมาณองค์ประกอบทางเคมีพบว่า ดินลูกรังประกอบด้วย Silica และ Alumina เป็นหลักและมีปริมาณเหล็กมากเนื่องจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีจากหินจนกลายเป็นดิน

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของดินลูกรังคองหงส์ที่นำมาทดสอบ

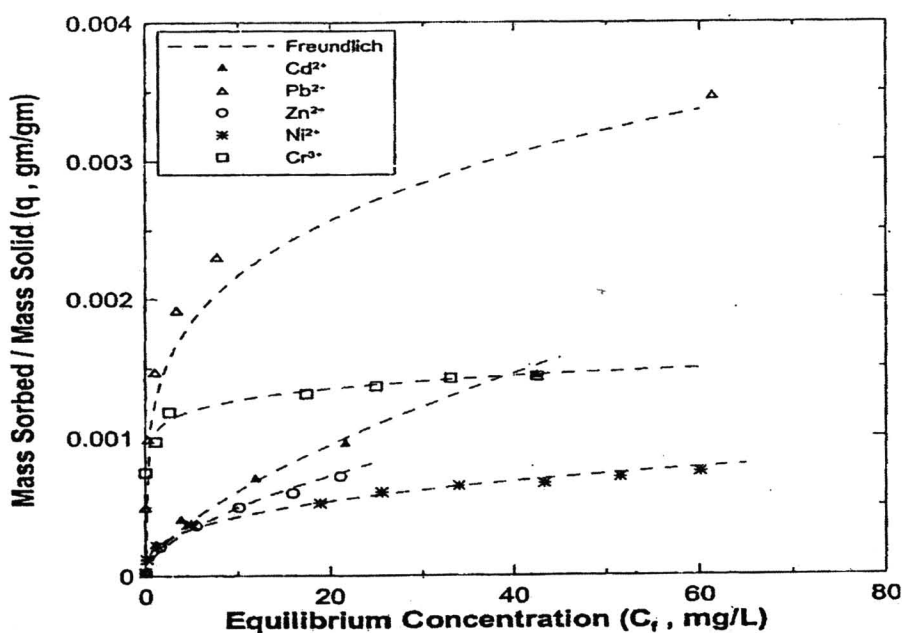
Soil Properties	
USCS Classification	CL
Color	Reddish brown
Liquid limit (L.L.) (%)	43.00
Plasticity index (P.I.) (%)	21.80
Percent passing sieve #200	56.00
Maximum dry density (g/cm ³)	1.70
Optimum water content (%)	18.00
pH	5.52
Organic content (%w/w)	4.92
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)	822.82
Cl ⁻ (mg/kg)	100.75
Exchangeable Cations	
Na ⁺ (meg/100g)	0.87
K ⁺ (meg/100g)	0.26
Ca ²⁺ (meg/100g)	3.49
Mg ²⁺ (meg/100g)	1.00
Chemical Compositions	
SiO ₂ (%)	45.37
Al ₂ O ₃ (%)	28.69
Fe ₂ O ₃ (%)	17.32
K ₂ O (%)	6.46
SO ₃ (%)	0.18
CaO (%)	0.36

(ชนิด และคณะ, 2550)

2.5.1 คุณสมบัติการดูดติดผิว

ผลการทดลองจากการทดลองแบบแบทช์ เพื่อศึกษาคุณสมบัติการดูดติดผิวของดินลูกรัง (รูปที่ 2.17) ได้แสดงไว้ในรูปของไอโซเทอม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของมวลโลหะหนักที่ถูกดูดติดผิวต่อมวลของดินลูกรังที่ใช้ในการทดสอบ (q) และความเข้มข้นสุดท้ายของสารละลายโลหะหนักเมื่อกระบวนการดูดติดผิวสมดุลแล้ว (Equilibrium Concentration, C_f) สมการไอโซเทอมของ Freundlich ถูกใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง q และ C_f ของผลการทดลองแบบแบทช์ พารามิเตอร์ของ Freundlich ที่ได้จากการฟิต อันได้แก่สัมประสิทธิ์พหุคูณของ Freundlich (K_f) และ Correction factor ($1/n$) ไอโซเทอมของดินลูกรังกับสารละลายโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด สอดคล้องอย่างดีกับสมการของ Freundlich โดยมีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.966 ถึง 0.997

สำหรับสารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นต่ำ ($C_f < 5 \text{ mg/L}$) ไอโซเทอมในส่วนนี้จะประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรง (Fetter, 1993) เมื่อฟิตไอโซเทอมส่วนนี้ด้วยสมการเส้นตรง ความชันของสมการเส้นตรงที่ได้คือ สัมประสิทธิ์พหุคูณ (K_f) ในขณะที่ค่าความสามารถในการดูดติดผิวของดินลูกรังได้แสดงไว้ในเทอมของค่า Adsorption capacity ซึ่งประมาณจากค่า q ที่สูงที่สุดในแต่ละการทดสอบค่า Adsorption capacity ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 ค่า Adsorption capacity แสดงให้เห็นว่า ความสามารถในการดูดโลหะหนักติดผิวของดินลูกรังจากมากที่สุดไปน้อยที่สุดในหน่วย $\text{meq}/100\text{g}$ ได้แก่ Cr_2 , Pb_2 , Ni_2 , Zn_2 และ Cd_2 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวด้วยดินลูกรังคองหงส์ (ธนิต และคณะ, 2550)

ตารางที่ 2.4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมของดินลูกรังคองหงส์

Heavy Metal Solution	Adsorption Isotherm				Adsorption Capacity (meq/100 g)
	Freundlich				
	K _F (L/Kg)	1/n	R ²	K _p (L/Kg)	
Cr ³⁺	1,033.95	0.09	0.9791	43.14	8.18
Cd ²⁺	147.7	0.62	0.9854	59.27	1.25
Pb ²⁺	1,238.51	0.24	0.9666	19.26	4.20
Zn ²⁺	141.93	0.55	0.9963	49.51	1.52
Ni ²⁺	199.99	0.33	0.9976	19.15	2.11

(ธนิต และคณะ, 2550)

ละออง (2549) ได้ทำการหาประสิทธิภาพของวัสดุ 4 ชนิดคือ ดินลูกรัง หินปูนฝุ่น ปูนขาว และเถ้าลอยในการดูดซับสารหนูที่ปนเปื้อนในดิน เพื่อหาชนิด ของวัสดุคลุมดินที่มี ประสิทธิภาพสูงในการดูดซับและตรึงสารหนูที่สะสมอยู่ในดินไม่ให้เคลื่อนที่ขึ้นสู่ ผิวดินและ พุ้ง กระจายออกสู่อากาศ ประกอบด้วยการทดลองแบบกะและแบบต่อเนื่อง โดยผลการชี้ได้ว่า ดินลูกรังมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดซับและตรึงสารหนู ได้ดีในสภาวะที่มีพีเอชต่ำ ส่วนเถ้า ลอยมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ดูดซับและตรึงสารหนูได้ดีใน สภาวะที่มีพีเอชสูง นอกจากนี้ ไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich สามารถนำไปใช้ในการคำนวณ ปริมาณวัสดุดูดซับดิน ที่จะใช้ในการป้องกันการฟุ้งกระจายของดินที่ปนเปื้อนสารหนูสู่อากาศได้