

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร



2.1 ซิลิกา เจล (Silica Gel)

2.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ซิลิกา เจล คือซิลิกาในรูปแบบที่สังเคราะห์ขึ้นในรูปของ ซิลิกอน ไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นของแข็งอสัณฐานที่มีรูพรุน มีพื้นที่ผิว (specific surface area) มากกว่า $5 \text{ m}^2/\text{g}$ มีตั้งแต่เป็นก้อนแข็งจนถึงเป็นผงละเอียดภายในมีรูพรุนขนาดตั้งแต่ $5 \text{ \AA} - 3000 \text{ \AA}$ ซึ่งอาจจัดแบ่งขนาดของรูพรุนจากกระบวนการผลิตได้ 2 ประเภทคือ ซิลิกา เจลที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (narrow pore silica gels) มีขนาดของรูโดยเฉลี่ยประมาณ 20 \AA และซิลิกา เจลที่มีรูพรุนกว้าง (wide pore silica gels) มีขนาดของรูเฉลี่ย 110 \AA หรือมากกว่าซิลิกา เจลมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ของซิลิกาที่ต่อกันเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ที่เกิดจากการโพลิเมอร์ไรซ์ของกรดซิลิซิก มีสูตรทั่วไปคือ $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ โดยซิลิกา เจลที่มีอนุภาคขนาดเล็กหรือมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยเรียกว่า ซิลิกา พาวเดอร์ ซึ่งมีความแข็งน้อยกว่าซิลิกา เจล

ซิลิกา เจลเป็นสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) ทำให้ไม่บวมเมื่อสัมผัสกับสารละลายและยังคงโครงสร้างเดิมไว้ได้ การเปลี่ยนซิลิกา เจลที่ไม่มีน้ำ (anhydrous silica gel) ไปเป็น ซิลิกา เจลที่มีน้ำ (soft gel) ต้องใช้น้ำ 100 ส่วนต่อซิลิกา เจล 1 ส่วน แต่ความคงตัวของซิลิกา เจลยังต้องขึ้นกับปัจจัยของความเป็นกรดเป็นด่างของสารละลายด้วยเช่นกัน โดยซิลิกา เจลสามารถละลายได้ที่ pH สูงกว่า 7 โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อ pH สูงกว่า 7.5 และที่ pH ต่ำกว่า 2 ซึ่งซิลิกา เจล จะละลายเพิ่มขึ้นได้อย่างรวดเร็ว การดูดซับบนซิลิกา เจลโดยทั่วไปเป็นการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) เกิดจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals interactions) และแรงจากการรวมตัวกันของน้ำ (capillary condensation) ที่ความชื้นสัมพัทธ์สูง

2.1.2 ลักษณะพื้นผิวของซิลิกา เจล แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

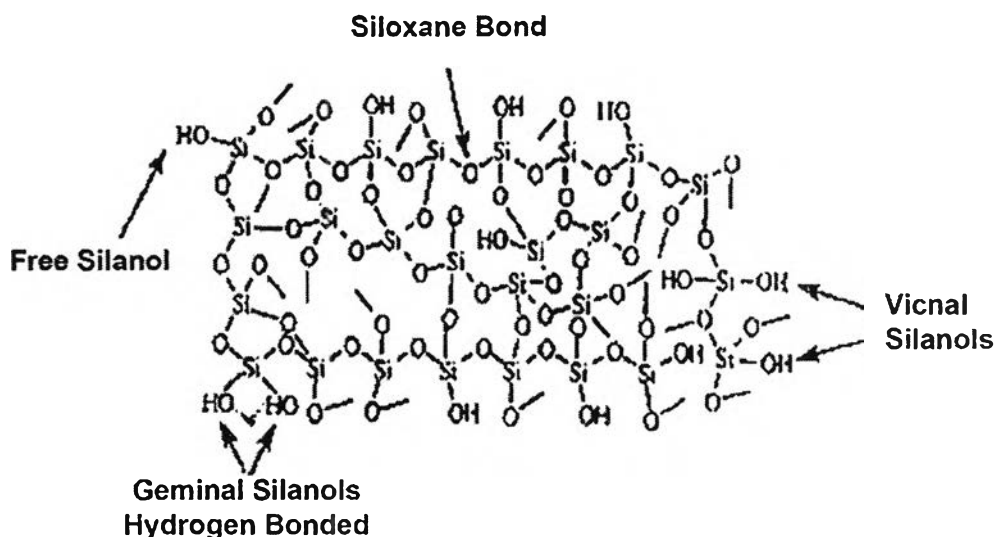
(1) พื้นผิวไฮดรอกซิลเลต (hydroxylated surface) ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (Si-OH) ที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ทันทีและการทำให้ซิลิกา เจลแห้งต้องได้รับความร้อนอย่างน้อย 150°C โดยหมู่ไฮดรอกซิลแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ free silanol, geminal silanol และ vicinal silanol ดังรูปที่ 2.2

- * Free silanol คือหมู่ไฮดรอกซิลที่แยกตัวอยู่เดี่ยวๆ บนพื้นผิวของซิลิกา เจล
- * Geminal silanol คือหมู่ไฮดรอกซิลสองหมู่ที่ต่ออยู่บนซิลิกอนอะตอมเดียวกัน
- * Vicinal silanol คือหมู่ไฮดรอกซิลสองหมู่ที่ต่ออยู่บนซิลิกอนที่เชื่อมต่อกัน

(2) พื้นผิวไซลอกเซน (siloxane surface) มีหมู่ไซลอกเซน (Si-O-Si) ที่เกิดจากการสูญเสียน้ำออกจากหมู่ไฮดรอกซิล เมื่อได้รับอุณหภูมิ 1000°C

(3) พื้นผิวออร์แกนิก (organic surface) เกิดเมื่อมีแรงยึดเหนี่ยวทางเคมี หรือฟิสิกส์ของพื้นผิวซิลิกา กับโมเลกุล หรืออนุภาคต่างๆ โดยคุณสมบัติของพื้นผิวชนิดนี้อาจเป็น

- * ไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) เมื่อพื้นผิวซิลิกาเกิดพันธะกับสารไฮโดรคาร์บอน
- * ไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) เมื่อพื้นผิวซิลิกาเกิดพันธะกับอะตอมที่มีสภาพขั้วสูง
- * ไฮโดรโฟบิก และไฮโดรฟิลิก เมื่อพื้นผิวซิลิกาเกิดพันธะกับฟลูออโรคาร์บอน



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกา เจล (Thurman และ Mills, 1998)

2.1.3 ประโยชน์ของซิลิกา เจล

ซิลิกา เจล หรือ ซิลิกาอสัณฐาน (amorphous silica) ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย เนื่องจากมีลักษณะเด่นทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิว โดยเฉพาะพื้นผิวของซิลิกาที่มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ซึ่งลักษณะของการนำไปใช้ประโยชน์นั้นขึ้นอยู่กับรูปแบบและความบริสุทธิ์ที่ผลิตได้ ประโยชน์ของซิลิกา เจล มีดังนี้

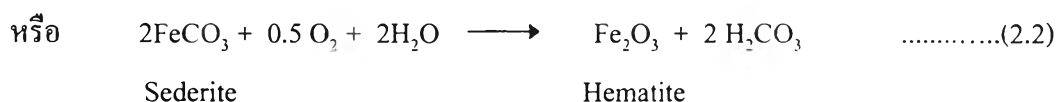
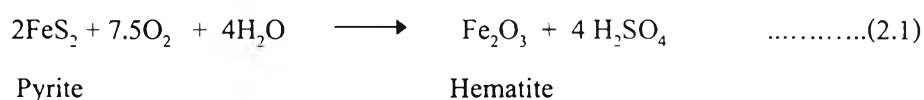
- (1) เป็นสารเพิ่มความแข็งแรง และความหนาแน่นแก่สารอื่น เช่น ยางพลาสติก และสารโพลีเมอร์ เป็นต้น
- (2) เป็นสารลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของของแข็ง เช่น เป็นตัวกันการเกาะกันเป็นก้อน (anticracking) ในเครื่องสำอางและทางเภสัชกรรม
- (3) เป็นสารเพิ่มแรงยึด โดยเฉพาะในกาบ และเพิ่มความหนืดในของเหลว เช่น จาระบี สี หมึก ยา และเครื่องสำอาง เป็นต้น
- (4) เป็นสารเพิ่มความเงา (optical effects)
- (5) เป็นสารลดแรงตึงผิว เช่น สารป้องกันการเกิดโฟม
- (6) เป็นสารเพิ่มช่วยกันน้ำ (hydrophobing, water-repellent)
- (7) เป็นตัวดูดซับ (adsorbent)
- (8) เป็นตัวคะตะลิสต์ และตัวพาคะตะลิสต์ (catalyst carrier)
- (9) เป็นสารตั้งต้นในการทำให้เกิดเมฆ (cloud seeding)
- (10) ใช้บรรจุคอลัมน์เพื่อการวิเคราะห์ทางโครมาโตกราฟี (chromatography column packing) สำหรับซิลิกา เจล ที่ใช้ในงานวิทยาศาสตร์นั้น ส่วนมากจะใช้เป็นตัวพาคะตะลิสต์ (catalyst carrier) และใช้เพื่อการวิเคราะห์ทางโครมาโตกราฟี เป็นหลัก

2.2 เหล็ก (Iron)

2.2.1 เหล็กในสิ่งแวดล้อม

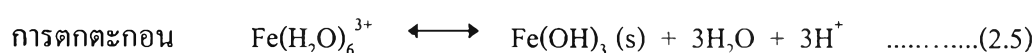
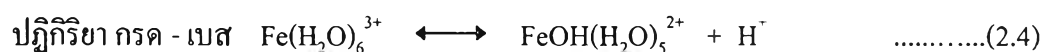
เหล็กเป็นโลหะที่มีอยู่บนผิวโลกมากเป็นอันดับสองรองจากอะลูมิเนียม พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งบนดินและในน้ำ อยู่ในรูปของสารประกอบของเหล็กและออกซิเจน หรือเรียกโดยรวมว่า เหล็กออกไซด์ (iron oxide) นอกจากนี้ยังมีไอรอนซัลไฟด์ หรือไพไรต์ (FeS_2) ซึ่งเป็นสินแร่ชนิดหนึ่งที่ไม่เสถียรเมื่ออากาศชื้นและถูกออกซิไดส์ได้ง่าย

เหล็กออกไซด์ มีอยู่ 2 รูปแบบ ขึ้นอยู่กับจำนวนของออกซิเจนที่เกาะอยู่กับเหล็กว่ามากน้อยเพียงใด โดยอยู่ในรูปของสารประกอบเฟอร์รัส (Fe^{2+}) มีสีเขียวเทา หรือน้ำเงิน และสารประกอบเฟอร์ริก (Fe^{3+}) มีสีเหลือง แดง หรือน้ำตาล ในดินส่วนใหญ่พบอยู่ในรูปของสินแร่ที่เรียกว่าฮีมาไทต์ (hematite, Fe_2O_3) และเกอร์ไทต์ (goethite, FeOOH) ซึ่งมีสีเหลืองส้ม โดยเกอร์ไทต์เกิดมาจากการสลายตัวของแร่ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ ไพไรต์ (pyrite) และซิเดอไรต์ (siderite) โดยอาศัยแบคทีเรียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดออกซิเดชันจาก Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} ดังสมการที่ (2.1) ถึง (2.3)



ปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ในธรรมชาติ โดยสารประกอบของเหล็กเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของดิน และส่งผลอย่างมากกับสีของดินที่ปรากฏ

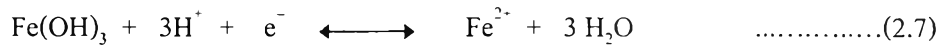
ส่วนเหล็กที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติมีได้หลายรูปแบบ ได้แก่ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งเป็นไอออนอิสระที่สามารถสร้างพันธะโคออดิเนตกับไอออนหรือโมเลกุลต่างๆ ในน้ำได้ และปรากฏอยู่ในรูปของไอออนที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบ (hydrate ion) หรือ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_x^{n+}$ โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับว่าเป็นเหล็กที่อยู่ในรูป (species) ใด ตัวอย่างเช่น



รวมทั้งอาจเกิดปฏิกิริยาได้กับแอนไอออนของสารอินทรีย์หรือกับสารอินทรีย์เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (metal complex) หรือสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างคาร์บอนกับโลหะ (organometallic compound) ได้อีกด้วย

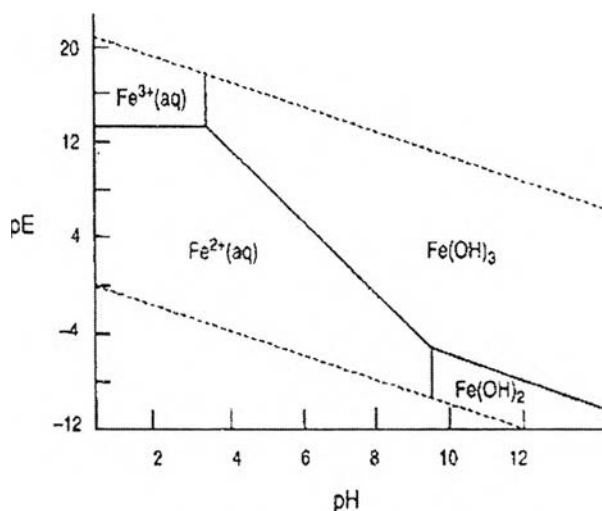
2.2.2 ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของเหล็ก

ปฏิกิริยาเคมีที่มีความสำคัญต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติหรือน้ำเสีย คือปฏิกิริยารีดอกซ์ เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เหล็กในรูปของเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนเป็นเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ไอออนที่ละลายน้ำได้เหล็กจึงถูกปลดปล่อยและเกิดการปนเปื้อนในน้ำได้ ดังสมการ (2.7)



โดยในการอธิบายถึงระบบที่มีความซับซ้อนและมีตัวแปรหลายตัวเกิดขึ้นพร้อมกัน การสร้างไดอะแกรมแบบสองตัวแปร (two-variable diagram) เพื่อใช้ศึกษาจึงมีความแม่นยำกว่าพิจารณาได้จาก pE/pH ไดอะแกรม ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตี (electron activity : a_e) และค่าไฮโดรเจนแอกติวิตี (hydrogen activity : pH) ที่สามารถบอกถึงสภาวะออกซิไดซ์และสภาวะรีดิวซ์ของระบบได้ แต่เนื่องจากระดับของอิเล็กตรอนแอกติวิตีของน้ำแปรผันได้ในช่วงกว้างมาก จึงนิยมให้ pE เป็นตัวแทนในการแสดงค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตี โดย $pE = -\log a_e$ ดังนั้นเมื่อ pE มีค่าเป็นลบ แสดงว่าสารละลายมีค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตีสูง ระบบจึงอยู่ในสภาวะรีดิวซ์ ในขณะที่เมื่อค่า pE เป็นบวก นั่นคือในสารละลายมีค่าอิเล็กตรอนแอกติวิตีต่ำ ระบบจึงอยู่ในสภาวะออกซิไดซ์ โดย pE ของน้ำมีค่าอยู่ในช่วง -12 ถึง 25 ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะช่วยให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลง และรูปแบบหลัก (dominant species) ของไอออนของเหล็กที่เกิดขึ้นได้ ดังรูปที่ 2.2





รูปที่ 2.2 pE/pH ไดอะแกรมของเหล็ก (Vanloon และ Duffy, 2000)

นอกจากนี้ ความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ยังแตกต่างกันแม้ที่ระดับพีเอชเท่ากัน เกิดจากค่าคงที่ของการละลาย (K_{sp}) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงความสามารถในการละลายที่ต่างกัน โดยสารที่มีค่าคงที่ของการละลายมาก หมายถึงสามารถละลายได้มากและการตกตะกอนเกิดขึ้นได้ยากกว่าสารที่มีค่าคงที่ของการละลายต่ำ ดังตารางที่ 2.1 ที่แสดงค่าคงที่การละลายของสารประกอบของเหล็กที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ในการละลายของสารประกอบของเหล็ก (Ghosh, 1965)

ปฏิกิริยา	K_{sp} ที่ 25°C
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2 \text{OH}^-$	8.00×10^{-16}
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s}) \rightleftharpoons \text{FeOH}^+ + \text{OH}^-$	4.00×10^{-10}
$\text{FeCO}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$	2.11×10^{-11}
$\text{FeCO}_3(\text{s}) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{FeOH}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	5.05×10^{-16}
$\text{Fe(OH)}_2(\text{s}) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_3^-$	8.30×10^{-6}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+} + 3\text{OH}^-$	4.00×10^{-38}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_2^+ + \text{OH}^-$	5.13×10^{-17}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}^{2+} + 2\text{OH}^-$	2.57×10^{-26}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) + \text{OH}^- \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_4^-$	1.00×10^{-5}
$\text{Fe(OH)}_3(\text{s}) \rightleftharpoons \text{Fe(OH)}_3(\text{d})^{**}$	2.90×10^{-7}

* $\text{Fe(OH)}_2(\text{s})$ หมายถึงเฟอร์ริสไฮดรอกไซด์ในสถานะของแข็ง

** $\text{Fe(OH)}_3(\text{d})$ หมายถึงเฟอร์ริคไฮดรอกไซด์ที่ไม่แตกตัวในสารละลาย

2.2.3 เหล็กออกไซด์ (Iron Oxides)

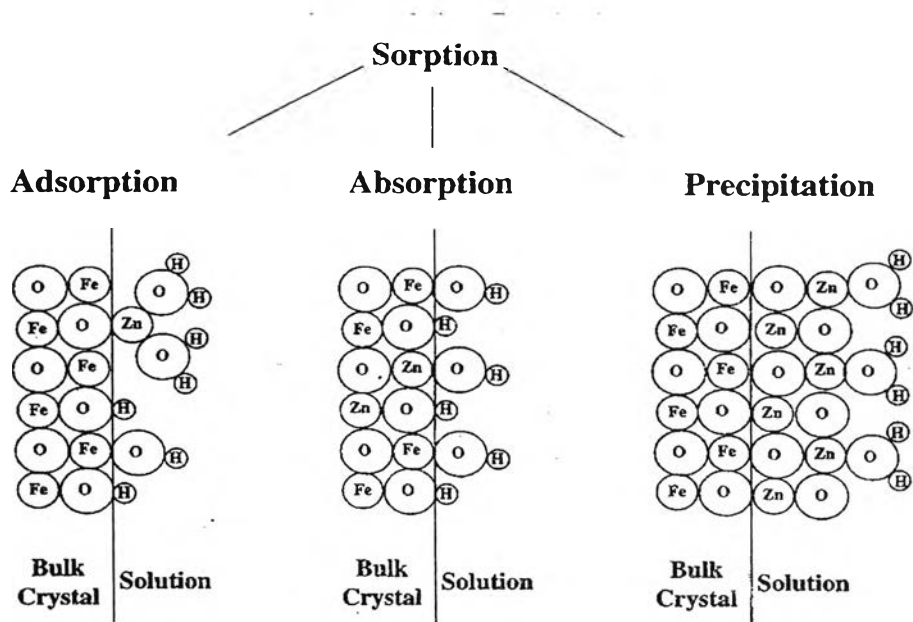
เหล็กออกไซด์เป็นไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ (hydrous metal oxide) เนื่องจากเป็นของแข็งที่มีส่วนประกอบของไอออนบวกของโลหะรวมตัวอยู่กับธาตุของน้ำ ได้แก่ ไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งครอบคลุมถึงสารประกอบของโลหะที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นไฮดรอกไซด์(-OH) ออกซีไฮดรอกไซด์(-OOH) และออกไซด์(-O) ที่มีลักษณะทางเคมีของพื้นผิวที่ถูกไฮเดรตได้ง่าย สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดิน ดินเหนียว และตะกอนต่างๆ โดยจะเคลือบอยู่บนผิวของแร่ธาตุเหล่านั้น มีรูปแบบทางเคมี เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ferric hydroxide), FeO (ferrous oxide), Fe_2O_3 (ferric oxide หรือเรียกว่า hematite), Fe_3O_4 ซึ่งคือ $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (ferrous ferric oxide หรือเรียกว่า magnetite) และ FeOOH เรียกว่า goethite โดย poorly crystalline หรือ amorphous hydrous ferric oxide ซึ่งอยู่ในรูปของ α , β หรือ γ จะเรียกว่า ferrihydrite เป็นต้น

เหล็กออกไซด์จะอยู่ในรูปแบบใดขึ้นอยู่กับภาวะในการก่อตัว ตัวอย่างเช่น เกอร์ไทต์ (FeOOH) และ ฮีมาไทต์ (Fe_2O_3) เป็นเหล็กที่อยู่ในรูปของออกซีไฮดรอกไซด์และออกไซด์ตามลำดับ ซึ่งเกิดได้จากการตกตะกอนหรือกระบวนการโซลเจล (sol-gel processing) ของสารละลายของเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ซึ่งในภาวะที่มีความเป็นกรดต่ำหรือ pH สูง แต่อุณหภูมิต่ำจะชักนำไปสู่การเกิดเกอร์ไทต์ ส่วนภาวะที่ pH ต่ำ ($\text{pH} < 4$) และอุณหภูมิสูงๆ จะชักนำไปให้เกิดเหล็กออกไซด์ในรูปของฮีมาไทต์ อย่างไรก็ตามเมื่อปรับ pH ให้สูงขึ้น ณ อุณหภูมิต่ำสารละลายเกลือเฟอร์ริก (Fe^{3+}) จะเกิดเป็น amorphous ferrihydrite (FeOOH) ซึ่งมีขนาดอนุภาค 3-5 nm หลังจากล้างและทำให้แห้งแล้วจะมีพื้นผิว $225\text{-}340 \text{ m}^2/\text{g}$ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรง ประมาณ 4 nm แต่ถ้าให้ความร้อนที่ $400\text{-}700 \text{ }^\circ\text{C}$ ก็จะทำให้เกิดเป็นฮีมาไทต์ที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 20 nm โดยมีพื้นที่ผิวลดลงเหลือน้อยกว่า $20 \text{ m}^2/\text{g}$ และเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโพรงโดยเฉลี่ยเป็น 100 nm ส่วนแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) เกิดจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Fe_2O_3 หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$

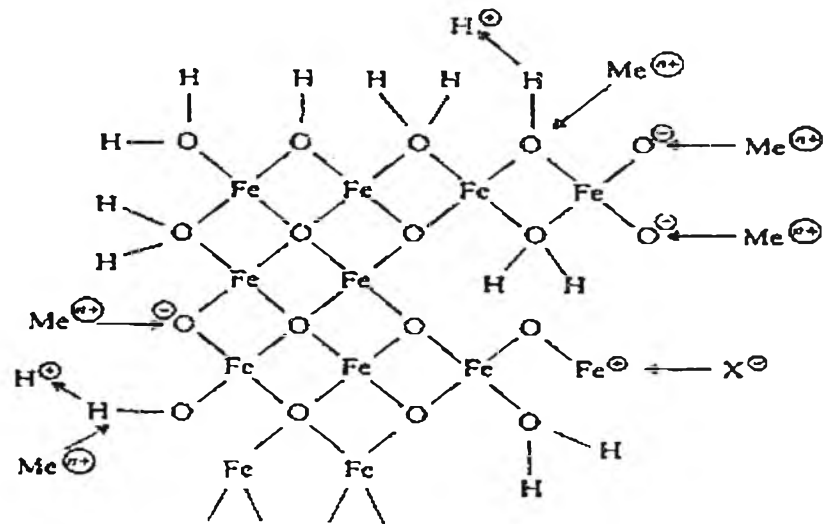
2.2.4 การเกิดปฏิกิริยาบนผิวสัมผัสของเหล็กออกไซด์

เมื่อออกไซด์ของเหล็กสัมผัสกับน้ำจะทำให้เกิดหมู่ไฮดรอกซิลขึ้นที่บริเวณพื้นผิว ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมที่เป็นได้ทั้งกรดและเบส (amphoteric) กล่าวคือ สามารถรับอิเล็กตรอนหรือปล่อยโปรตรอนก็ได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับโลหะจึงมีได้หลายแบบ เรียกโดยรวมว่า sorption ซึ่งมีทั้งการดูดซับหรือการดูดติดผิว (adsorption) การดูดซึม (absorption) และการตกตะกอน (precipitation)

ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดเพียงกระบวนการเดียว สองกระบวนการ หรือทั้งหมดร่วมกัน โดยในการศึกษานี้สนใจและกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเท่านั้น ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 การดูดซับ ดูดซึม และการตกตะกอนของสังกะสีบนผิวของเหล็กออกไซด์ (Koretsky, 2000)



X⁻ คือ แอนไอออน ได้แก่ PO₄³⁻ เป็นต้น
 Meⁿ⁺ คือ แคทไอออน ได้แก่ Pb²⁺, Zn²⁺ เป็นต้น

รูปที่ 2.4 การดูดซับแคทไอออนและแอนไอออนบริเวณผิวของไฮดรตเหล็ก (III) ออกไซด์ (O'Neill, 1993)

2.3 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไปโดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะอัลคาไลน์ (alkaline) และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธ (alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 และอยู่ในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ สามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว และนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ รวมทั้งสามารถสะท้อนแสงได้ดี ส่วนคุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญ คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ทำให้โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (complexing compound) ได้หลายรูปแบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (organometallic compound) ซึ่งสามารถถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (food chain) ได้

2.4 แคดเมียม

2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

แคดเมียมถูกค้นพบในปีพ.ศ. 2360 เป็นโลหะที่มีในธรรมชาติประมาณ 0.1 – 0.2 $\mu\text{g/L}$ ในพื้นดินชั้นลิวโทสเฟียร์ มักเจือปนกับปรอท ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว แคดเมียมมีคุณสมบัติอ่อนงอได้ ตัดได้ง่ายและตีแผ่ได้ มีสีขาวปนน้ำเงิน มีเลขอะตอม 48 มวลอะตอม 112.4 อยู่ในหมู่ IIB ของตารางธาตุ ความหนาแน่นเท่ากับ 8.65 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ 20 $^{\circ}\text{C}$ มีจุดหลอมเหลวที่ 320.9 $^{\circ}\text{C}$ จุดเดือดที่ 765 $^{\circ}\text{C}$ มีค่าออกซิเดชันเท่ากับ 0, +1 และ +2 ความยาวคลื่นที่อะตอมของแคดเมียมในภาวะแก๊สดูดกลืนคือ 228.8 nm ทนต่อการกัดกร่อน เป็นธาตุที่ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในกรดอ่อนและละลายได้ดีในกรดไนตริก (HNO_3) และละลายได้อย่างช้าๆ ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ระหว่างการหลอมเหลวด้วยความร้อนและแรงกดดันสูง จะกลายเป็นควันในรูปของแคดเมียมออกไซด์ (CdO) แคดเมียมอาจอยู่ในรูปเกลือหรือสารประกอบต่างๆ เช่น แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl_2) แคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) แคดเมียมไนเตรท ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$) และแคดเมียมคาร์บอเนต (CdCO_3) เป็นต้น

แคดเมียมที่ปรากฏอยู่ในน้ำส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไอออนอิสระ (Cd^{2+}) หรือไฮดรอกไซด์ไอออน (CdOH^+) ภายใต้ภาวะที่ pH น้อยกว่า 7 หรือ 8 แต่ถ้า pH 8 - 9 ปริมาณของ CdOH^+ จะลดลง ในขณะที่ปริมาณของ Cd^{2+} มีมากขึ้น ในแหล่งน้ำจืดที่มีมลภาวะแคดเมียมจะปรากฏอยู่ในรูปสารประกอบอื่น เช่น แคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) และสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมอินทรีย์ ในสภาพกรดอ่อนแคดเมียมสามารถเกิดพันธะกับสารต่างๆ เช่น สารซิสทีน (Cysteine) ในกรดอะมิโน

การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแคดเมียมอินทรีย์นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสม และ ไอออนบวกของโลหะชนิดอื่นที่สามารถเกิดสารประกอบได้เช่นเดียวกับแคดเมียม (Fergusson, 1990)

2.4.2 การนำไปใช้ประโยชน์

แคดเมียมเกิดขึ้นในธรรมชาติร่วมกับสังกะสีเป็นส่วนมากเพราะธาตุทั้งสองมีสมบัติทางเคมีและกายภาพคล้ายคลึงกัน แคดเมียมเป็นผลพลอยได้จากการถลุงสินแร่สังกะสีในอัตราส่วน 3 ตันของแคดเมียมต่อ 1,000 ตันของสังกะสี แต่ก็มี การนำแคดเมียมมาใช้ประโยชน์อย่างมหาศาล ดัง จะสามารถแยกประเภทการใช้ประโยชน์ออกได้เป็น 2 ด้าน คือ ด้านเกษตรกรรม และด้าน อุตสาหกรรม (คลฤดี ยนต์สุวรรณ, 2547)

ด้านเกษตรกรรม

แคดเมียมเป็นองค์ประกอบของสารเคมีกำจัดศัตรูพืช สารเคมีกำจัดเชื้อราและใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต

ด้านอุตสาหกรรม

สารประกอบของแคดเมียมที่ใช้เป็นส่วนประกอบของสีในอุตสาหกรรมสีทาบ้าน สีชุบ โลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อน สีข้อมในเซรามิกส์ เส้นใยแก้ว หมึกพิมพ์ ได้แก่ แคดเมียมซัลไฟด์ และ แคดเมียมซัลโฟซิลิไนด์ คุณสมบัติที่ใช้ในด้านนี้ เนื่องจากมีค่าการหักเหสูง ทนความร้อนสูงถึง 600°C ทนต่อปรอทซัลไฟด์ ทนต่อเบส ทนต่อสภาพอากาศและแสงได้ แคดเมียมยังใช้ทำเป็นสารที่ทำให้สีเป็นเนื้อเดียวกันด้วย นอกจากนี้มีการใช้แคดเมียมสเตียเรตในการทำพลาสติกโพลีไวนิล คลอไรด์ โดยทำหน้าที่เป็น Stabilizer ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของแคดเมียมในด้านนี้ คือ ทนต่อแสงและความร้อน รวมถึงกับสารไฮโดรเจนคลอไรด์และสารเจือปนที่เกิดจากเรซินระหว่างปฏิกิริยาใน กระบวนการผลิตพลาสติก ป้องกันการออกซิไดซ์ โดยการแทนที่พันธะคู่หรืออะตอมคลอไรด์ได้ และไม่เป็นอันตรายต่อคุณสมบัติของพลาสติก นอกจากนี้แคดเมียมยังใช้ทำโลหะผสม หรือ alloy ซึ่งนำไปทำขั้วของ เครื่องป้องกันไฟ เบ้าหลอม ปืน ส่วนประกอบของรถยนต์ โลหะบัดกรี ทำลวด โทรศัพท แคดเมียมช่วยในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพราะจะป้องกันการกัดกร่อนได้ดี ทั้งในเบสและ น้ำทะเล เกาะกับผิวหน้าวัสดุที่จะชุบได้แน่น และเรียบสม่ำเสมอ ยิ่งเคลือบหนา อายุการใช้งานยิ่ง นาน โลหะที่ชุบแคดเมียมนำไปทำน็อต ตะปูควง ส่วนของแม่เหล็ก ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมทำ

รถยนต์ และเครื่องบิน แคลเดียมยังเป็นส่วนประกอบในวิทยุ โทรศัพท์ ในอุตสาหกรรมทำแบตเตอรี่ แบตเตอรี่นิกเกิล-แคลเดียมมีคุณสมบัติที่ดี คือ อายุการใช้งานยาวนาน ไม่เสียหายเนื่องจากการลัดวงจร ให้กระแสไฟฟ้าแรงสูง มีอัตราการปล่อยประจุจากตัวเองต่ำ ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง แคลเดียมเซลล์ที่เสียแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้ อีก และใช้กันแพร่หลายในวงการอิเล็กทรอนิกส์ แคลเดียมยังใช้เป็นตัวควบคุมจำนวนนิวตรอนในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู เพราะแคลเดียมมีค่า thermal neutron cross section สูงถึง 200,000 barns นอกจากนี้ยังใช้แคลเดียมในอุตสาหกรรมสารเคลือบต่างๆ

แคลเดียมในสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากมีการนำแคลเดียมมาใช้ประโยชน์มากมายในด้านอุตสาหกรรม แคลเดียมจึงมีโอกาที่จะหลุดรอดและปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม แคลเดียมจะกระจายทั่วไปในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ได้แก่ อากาศ น้ำ ดิน พืช

แคลเดียมในดิน

แคลเดียมเป็นโลหะที่เป็นตัวถูกละลายได้ดีกว่าโลหะธาตุอื่นๆที่สามารถเปลี่ยนแปลง และเคลื่อนย้ายได้ ในรูปของ Cd^{2+} พืชสามารถดูดเข้าไปในเนื้อเยื่อได้อย่างรวดเร็ว ปริมาณแคลเดียมในดินทั่วไปจะขึ้นอยู่กับชนิดของหินที่สลายเป็นดิน ทั้งนี้เพราะปริมาณของแคลเดียมในหินต่างๆมีไม่เท่ากัน ดังนั้นดินที่สลายจากหินชนิดต่างๆ จึงมีปริมาณแคลเดียมไม่เท่ากัน นอกจากนี้ชั้นของดินยังมีปริมาณแคลเดียมไม่เท่ากัน ดินที่ไม่ถูกเคลื่อนย้ายจะมีปริมาณแคลเดียมในดินชั้นบนมากกว่าระดับอื่น เพราะพืชดูดแคลเดียมจากดินมาสะสมไว้ที่ต้นพืช และเมื่อพืชเหล่านี้ตายลงก็จะสลายให้แคลเดียมกับดินที่อยู่ชั้นบน ดินบริเวณใกล้ถนนมักพบแคลเดียมมากกว่าบริเวณอื่น สันนิษฐานว่าอาจมาจากเหล็กروبสเตอร์ ยางรถ และน้ำมันมีแคลเดียมปนอยู่ จากการทดลองหาแคลเดียมในเหล็กروبสเตอร์ 20 - 90 ppm ในน้ำมัน 0.2 - 0.26 ppm และในน้ำมันดีเซล 0.07 - 0.10 ppm แต่อย่างไรก็ตามผลกระทบของแคลเดียมในดินอันเกิดจากขบวนการพาหนะถือว่าปริมาณน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับแหล่งอุตสาหกรรม

แคลเดียมในน้ำ

แคลเดียมในรูปของเกลือซัลเฟตและคลอไรด์จะละลายน้ำได้ แต่เมื่อรวมกับกำมะถันแล้วจะตกตะกอนอยู่ในรูป greenochite และมีมากในบริเวณโคลน ดังนั้นบริเวณที่มี H_2S สูง จะพบ

แคดเมียมในปริมาณสูงด้วย โดยทั่วไปแล้ว พบว่ามีแคดเมียมปะปนอยู่ด้วยในน้ำปริมาณน้อยมาก จนอาจไม่มีผลกระทบต่อพืช จากการทดลองหาปริมาณแคดเมียมในแหล่งน้ำธรรมชาติอยู่ในช่วง 0.5 - 14.6 $\mu\text{g/L}$ ในน้ำกลั่นมี 0.5 $\mu\text{g/L}$ ส่วนน้ำบริเวณใกล้เหมืองแร่ แหล่งชุมชน แหล่งเกษตรกรรม และโรงงานอุตสาหกรรมอาจมีแคดเมียมมากกว่าปกติ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อพืชและสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ได้

แคดเมียมในอากาศ

แคดเมียมสามารถตกค้างอยู่ในพืชอันเนื่องมาจากการปนเปื้อนของแคดเมียมในอากาศได้ โดยถ้ามีฝุ่นละอองในอากาศที่มีแคดเมียมมากระทบที่ผิวของพืชนี้ ถ้าฝุ่นนั้นละลายน้ำได้มันจะเข้าสู่พืชทางปากใบ หรือเข้าทางเซลล์ผิวใบ โลหะแคดเมียมที่กระจายอยู่ในอากาศส่วนใหญ่ มักจะอยู่ในรูปไอออนแคดเมียม ซึ่งมาจากการถลุง หรือหลอมโลหะ มนุษย์มีโอกาสได้รับไอแคดเมียมในอากาศเข้าไปโดยตรงในปริมาณน้อยมาก แต่แคดเมียมเคลื่อนที่ไปได้ไกล และจะตกลงสู่ผิวดิน, น้ำ และพืช ในสหรัฐอเมริกา มีหน่วยงานที่เรียกว่า The Nation Air Sampling Network ได้สำรวจสถานะทางอากาศอยู่ตลอดเวลาแต่ปริมาณแคดเมียมที่สำรวจพบน้อยมาก มีการประมาณการว่านุหรี 1 มวนให้แคดเมียม 1.3 μg ซึ่งบางส่วนปะปนอยู่ในควันนุหรีที่พ่นออกมา และบางส่วนเข้าสู่ร่างกายผู้สูบนั่น ในประเทศไทยพบว่าย่านที่มีการจราจรหนาแน่น ย่านธุรกิจที่พักอาศัย มีแคดเมียมในอากาศ 0 - 4.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ดังนั้นปริมาณในอากาศโดยทั่วไปนับว่ามีผลกระทบต่อพืชน้อยมาก ยกเว้นบริเวณใกล้เหมืองสังกะสี หรือโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับแคดเมียม

2.2.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม

ความเป็นพิษของแคดเมียม โดยเฉพาะต่อมนุษย์จะมีผลทั้งเฉียบพลันและผลแบบเรื้อรัง โดยแคดเมียมในอาหารจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางลำไส้ร้อยละ 3 - 8 ระบบทางเดินหายใจดูดซึมไ้ร้อยละ 15 - 30 จะไปสะสมที่ไตร้อยละ 33 ตับร้อยละ 13.8 ตับอ่อนร้อยละ 0.3 และเนื้อเยื่ออื่นๆ อีก ใน 1 วันจะเก็บสะสมไว้ในร่างกายประมาณ 2 μg และอาจสูงถึง 30 mg โดยแคดเมียมมีค่าวงจรครึ่งชีวิต (half-life) ในไตอยู่ระหว่าง 17 - 33 ปี ส่วนในตับประมาณ 7 ปี เมื่อร่างกายดูดซึมแคดเมียมไว้แล้วจะแพร่กระจายไปในพลาสมา และไปสู่ส่วนต่างๆ ของร่างกายอย่างรวดเร็ว คนปกติมีแคดเมียมในร่างกายสูงในอายุ 50 - 60 ปี เนื่องจาก biological half-life ของแคดเมียมยาวนาน และในปัจจุบันมีปริมาณแคดเมียมไอออนในสิ่งแวดล้อมเพิ่มมากขึ้น ยิ่งคนมีอายุมากโอกาสที่จะสัมผัสแคดเมียมยิ่งมีมาก และอัตราการดูดซึมของลำไส้เมื่ออายุมากมีการเปลี่ยนแปลงไป คนปกติมีแคดเมียมในน้ำปัสสาวะประมาณ 2 - 5 $\mu\text{g}/\text{day}$ และเพิ่มมากขึ้นตามอายุ แคดเมียมในอุจจาระจะถูก

ขับถ่ายออกจากเยื่อในกระเพาะอาหาร ถ้าใส่ ดับอ่อน และน้ำดี นอกจากนี้หากเป็นแคดเมียมในปริมาณน้อยจะถูกขับถ่ายปนมากับเหงื่อผ่านผิวหนังและหม้ออีกด้วย

ความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียม ถ้าได้รับแคดเมียมจากอาหารสูงถึง 326 mg จะมีอาการปวดหัว ปวดท้องอย่างแรง เสมหะมาก อาเจียน ท้องเดิน ถ้าได้รับแคดเมียมจากอาหารในปริมาณ 350 mg - 1 g จะทำให้เกิดอาการช็อกและล้มลงทันที อาจเสียชีวิตได้ภายใน 24 ชั่วโมง หรือภายใน 1 - 2 สัปดาห์ และในระหว่างนี้ตับและไตจะถูกทำลาย ถ้าได้รับแคดเมียมจากอากาศ 100 mg/m³ นาน 30 นาที หรือ 8 mg/m³ นาน 4 ชั่วโมง จะเจ็บหน้าอก หายใจไม่ออก เสมหะมาก อาเจียน และเสียชีวิตในที่สุด

ผลระยะยาว ถ้าได้รับแคดเมียมจากอากาศ 30 - 40 mg/day เป็นเวลานานๆจะมีผลเสียโดยตรงกับการสร้างกระดูก โดยจะไปลดการสะสมของธาตุแคลเซียม ขณะที่มีการสร้างและการซ่อมแซมกระดูก และไม่มีการสะสมของ Collagen ในกระดูก โดยแคดเมียมเป็นตัวการทำให้เอนไซม์หมดประสิทธิภาพ จึงทำให้กระดูกผุอ่อนเสียรูปและทำให้เจ็บปวดมาก ดังตัวอย่างโรคอิตาลี-อิตาลีในประเทศญี่ปุ่น เกิดจากชาวญี่ปุ่นรับประทานปลาดิบที่จับจากแหล่งน้ำบริเวณที่โรงงานอุตสาหกรรมปล่อยแคดเมียมลงไป ซึ่งทำให้ปริมาณแคดเมียมสูงมากกว่าปกติ ถ้าร่างกายได้รับแคดเมียมในระดับ 170 - 500 µg/day เป็นเวลานานจะก่อให้เกิดโรคโลหิตจาง ความดันโลหิตสูง แคดเมียมมีผลเสียต่อการทำงานของร่างกายทุกระบบ เช่น ไต หากได้รับแคดเมียมปริมาณ 0.6 - 1 mg/day จะทำให้ไตทำงานผิดปกติ ยังผลให้การขับถ่ายโปรตีนออกจากร่างกายมากเกินไป ปอดดับ ดับอ่อน ระบบทางเดินอาหาร ถูกทำลายโดยตรง ระบบประสาทส่วนกลางและเส้นประสาทถูกทำลาย ระบบเมตาบอลิซึมของธาตุเหล็ก สังกะสี ทองแดงผิดปกติ แคดเมียมลดการสังเคราะห์โปรตีนในระบบสืบพันธุ์ แคดเมียมในปริมาณ 100 - 150 mg จะทำลายการทำงานของลูกอัมตะโดยลดการสร้างกรดออกซิโรโบนิวคลีอิก และถ้าได้รับแคดเมียม 10 µmole/kg จะทำให้ตัวอ่อนในครรภ์อายุ 18 วันเสียชีวิต

แคดเมียมเป็นโลหะที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง ทั้งทางด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม ทำให้ปะปนสู่สิ่งแวดล้อม แคดเมียมสามารถไปสะสมในเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ทั้งในสาหร่าย หอย ลูกน้ำ และปลา ในปลาส่วนใหญ่จะเก็บสะสมแคดเมียมไว้ที่ตับ ไต ลำไส้ และเหงือกและถ่ายทอดทางห่วงโซ่อาหารสู่มนุษย์ในที่สุด จากพิษภัยดังที่กล่าวมาทำให้มีการกำหนดมาตรฐานต่างๆเพื่อควบคุมปริมาณแคดเมียมก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม กำหนดความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรมต้องมีแคดเมียมไม่เกิน 0.03 mg/L (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3, 2539)

2.5 นิกเกิล

2.5.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

นิกเกิลเป็นธาตุที่มีสัญลักษณ์ทางเคมีว่า Ni มีเลขอะตอม 28 โดยปกติที่พบในธรรมชาติมีมวลอะตอม 58.71 ในสภาพที่เป็นธาตุเป็นโลหะสีขาวคล้ายเงิน มีความอ่อนสามารถดัดหรืองอได้ มีจุดหลอมเหลวที่ $1,455^{\circ}\text{C}$ จุดเดือดที่ $2,900^{\circ}\text{C}$ ทนต่อการกัดกร่อนของด่างแต่ละลายได้ช้าๆ ในกรดเจือจาง และละลายได้เร็วในกรดไนตริก โดยปกติมีประจุ +2 ในสารประกอบสามารถมี oxidation states 4 ค่าคือ 0, +1, +2 และ +4 นิกเกิลมีอยู่ทั่วไปในเปลือกโลกในสภาพสินแร่ ในดินทั่วไปมักจะพบนิกเกิลอิสระปะปนอยู่ประมาณ 40 ppm โดยเฉลี่ยและพบ โมลิบดีนัม 2 ppm ตะกั่ว 10 ppm และอาเซนิก 6 ppm นิกเกิลเป็นโลหะที่พบกระจายตามธรรมชาติทั่วไปบริเวณเปลือกโลกในทะเลและมหาสมุทร รวมทั้งเป็นองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์

2.5.2 การนำไปใช้ประโยชน์

โลหะนิกเกิลถูกค้นพบมาประมาณ 200 ปีแล้ว ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ลักษณะการใช้ประโยชน์นั้นขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของนิกเกิลเป็นหลักสำคัญ โลหะนิกเกิลถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น อุตสาหกรรมสารเคมีและกลั่นน้ำมัน ซึ่งใช้ในรูปของโลหะเจือในชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่สัมผัสกับสารเคมีกัดกร่อน ใช้ในเครื่องบินและยานอวกาศ ใช้ในรูปโลหะเจือพิเศษซึ่งต้านทานการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงในรถและอุปกรณ์เกี่ยวกับรถโดยใช้ในลักษณะเคลือบผิวเป็นส่วนใหญ่ ใช้ในโรงงานชุบโลหะ ซึ่งจะทำให้โลหะทนต่อการผุกร่อน ทำให้โลหะผสมนั้นมีความเหนียว แข็งแกร่ง เบาล ทนต่อความร้อนสูงๆ ใช้ในการผลิตเหล็กไม่เป็นสนิม นอกจากนี้ยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ ใช้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้โลหะนิกเกิลและแคดเมียม และเนื่องจากนิกเกิลเป็นโลหะสีขาวคล้ายเงินดังนั้นการนำไปใช้ประโยชน์บางอย่างจึงนำไปใช้แทนโลหะเงินเช่น ทำโลหะผสม ทำเครื่องประดับต่างๆซึ่งต้องมีการขัดเงาหรือการทำความสะอาด ลงยา นอกจากนี้ยังถูกนำมาใช้ในการชุบอย่างกว้างขวางเพื่อรักษาและป้องกันเนื้อโลหะที่ถูกชุบให้ทนอยู่ได้นานและสวยงามยิ่งขึ้น ในการชุบโลหะด้วยนิกเกิลนั้นใช้ส่วนผสมของสารประกอบนิกเกิล คือ นิกเกิลซัลเฟต นิกเกิลคลอไรด์ เพื่อใช้เป็นสารละลายในการนำประจุไฟฟ้า และในการทำเหล็กกล้าไร้สนิม สแตนเลส จะใช้ในอัตราส่วนนิกเกิล 3.5 - 22% และโครเมียม 16 - 26% ซึ่งมีส่วนทำให้สแตนเลสมีคุณสมบัติคงทน นิกเกิลเป็นโลหะที่นิยมทำโลหะผสมหลายชนิด เช่น โลหะผสมนิกเกิล-ทองแดง ใช้ในการทำเหรียญกษาปณ์เงิน นอกจากนี้ยังใช้ทำแบตเตอรี่ หัวเทียน ขดลวด ไส้หลอดไฟฟ้า นิกเกิลผสมโครเมียมยังใช้ทำเครื่องยนต์ ยานพาหนะ เครื่องยนต์ของ

เครื่องปั้นไอน์ซึ่งทนความร้อนสูงๆได้ นิกเกิลสามารถผสมกับอะลูมิเนียมเพื่อเป็นตัวคะตะลิสต์ในการทำให้เกิด ไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) ของน้ำมัน นิกเกิลไฮดรอกไซด์และเกลือผสมของนิกเกิล เช่น ไชยาไนต์ คลอไรด์ คาร์บอเนต ไนเตรท และซัลเฟต มีประโยชน์เพื่อใช้ในการทำแม่พิมพ์ที่เป็นแผ่นโลหะ นอกจากนี้เกลือของนิกเกิลโคบอลต์ไกลออกซิม ใช้ทำเครื่องสำอาง ทำสีทาบ้านชนิดแห้งเร็ว เกลื่อนิกเกิลซัลเฟตซึ่งเป็นสารสีเหลืองใช้ทำสีน้ำมัน เป็นต้น

นิกเกิลในสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากนิกเกิลถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากมายในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆมากกว่า 200 ปีแล้ว ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้กระบวนการเคลื่อนย้ายธาตุชนิดนี้ในสิ่งแวดล้อมผิดไปจากสภาพธรรมชาติเดิม โลหะนิกเกิลถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิดจึงทำให้เกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในรูปแบบต่างๆ ซึ่งมีชนิดสารประกอบแตกต่างกัน บางชนิดอาจเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในรูปเดิมของนิกเกิล แต่บางชนิดกลายเป็นสารประกอบรูปใหม่ที่สลายตัวได้ยาก และก่อให้เกิดผลร้ายในสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากการปนเปื้อนของนิกเกิลส่งผลให้มีกระบวนการสะสมนิกเกิลในสิ่งมีชีวิตต่างๆ แล้วเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารในลำดับต่อมา

นิกเกิลในดิน

ในสภาวะธรรมชาติแล้วนิกเกิลที่อยู่ในส่วนของเปลือกโลก จะอยู่ในลักษณะของธาตุหรือสารประกอบทางธรณีวิทยา ตามปกติบริเวณใดที่มีแร่ pentlandite และ pyrrhotite ซึ่งเป็นสินแร่ของนิกเกิลในโลก เมื่อมีการสลายตัวของสินแร่ชนิดนี้ก็จะก่อให้เกิดเป็นเม็ดดินที่มีสารนิกเกิลเป็นจำนวนมาก เมื่อในดินมีปริมาณของนิกเกิลสูง จะทำให้มีการสะสมนิกเกิลในส่วนต่างๆของพืชในบริเวณนั้นนั่นเอง ในทางอุตสาหกรรมได้มีการนำนิกเกิลออกมาใช้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงก่อให้เกิดของเสียต่างๆที่มีสารประกอบของนิกเกิลหลงเหลืออยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก ของเหลือใช้ของนิกเกิลบางชนิดเราสามารถนำไปใช้ใหม่ได้ โดยการนำไปหลอมและนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ แต่บางชนิดนั้นเราไม่สามารถนำมาใช้ได้เลย ก็จะกลายเป็นขยะโดยปริยาย ซึ่งการกำจัดขยะชนิดนี้มักจะนำไปถมที่ หรือขุดหลุมฝังไว้ในดิน แต่เนื่องจากนิกเกิลเป็นโลหะทรานซิชันและสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย และสามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ถ้าเกิดฝนตก น้ำจะทำให้เกิดการแพร่กระจายของนิกเกิลในดินชั้นต่างๆได้มากยิ่งขึ้นและเมื่อพืชหรือสิ่งมีชีวิตชนิดอื่นๆได้รับสารนิกเกิลนี้เข้าไปก็จะก่อให้เกิดการสะสมของนิกเกิลในส่วนของเนื้อเยื่อของร่างกายมาผิดปกติได้ นิกเกิลนอกจากจะมีการแพร่กระจายในดินโดยการถมที่ของขยะแล้ว ยังปรากฏว่าในเหมืองแร่ที่มีการขุดเจาะเพื่อนำเอาสินแร่ นิกเกิล-ซัลไฟด์ของเหล็ก สินแร่ gamierite

สินแร่ที่เป็นสารประกอบ arsenide (NiAs) เป็นต้น นำมาใช้ประโยชน์ก็ก่อให้เกิดการปนเปื้อนของนิกเกิลในดินปริมาณสูงมาก นอกจากนี้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้นิกเกิลเป็นวัตถุดิบในการประกอบเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เช่น เครื่องยนต์ชนิดหนักๆ เครื่องประดับ เบริลยูทอปัส หัวเทียน แบตเตอรี่ และอื่นๆ ยังส่งผลกระทบต่อปริมาณนิกเกิลในดินอันเนื่องมาจากการปลดปล่อยของเสียอีกด้วย

นิกเกิลในน้ำ

นิกเกิลเป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมชุบโลหะเป็นจำนวนมาก และก่อให้เกิดผลของการตกค้างของนิกเกิลในแหล่งน้ำได้ นอกจากนี้อุตสาหกรรมที่ใช้นิกเกิลเป็นโลหะผสมชนิดต่างๆยังมีผลทำให้เกิดการปนเปื้อนของสารประกอบนิกเกิลในน้ำทิ้ง เช่น นิกเกิลซัลเฟต นิกเกิลคลอไรด์ นิกเกิลไฮดรอกไซด์ และเกลือผสมของนิกเกิล เช่น โซเดียมไนต์ คาร์บอเนต ไนเตรท และซัลเฟต

จากรายงานพบว่าโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำทะเลนั้นมาจากโรงงานอุตสาหกรรมชายฝั่ง ซึ่งโลหะหนักที่ปล่อยออกสู่ทะเลเหนือของอังกฤษนั้น มาจากแม่น้ำต่างๆของยุโรปและพบว่าสิ่งปฏิกูลของลอนดอนมีนิกเกิลอยู่ 50 ตัน ของการปลดปล่อยทั้งหมด ปริมาณของมวลสารที่มาจากสิ่งปฏิกูลหรือขยะจากโรงงานกำจัดในเมืองใหญ่เมื่อเทียบกับที่ปลดปล่อยโดยตรงสู่มแม่น้ำและออกสู่ทะเลเป็นเพียง 10 - 20% ของมลพิษทางน้ำทั้งหมด นั่นคือผลจากการควบคุมมลพิษทางน้ำอันเนื่องจากการตั้งโรงงานกำจัดขยะสามารถช่วยลดมลพิษทางน้ำได้ (Weichart, 1973)

นิกเกิลในอากาศ

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่านิกเกิลคาร์บอนิลนั้นเป็นสารประกอบของนิกเกิลในสถานะแก๊สที่มีอันตรายสูงสุด ซึ่งนิกเกิลคาร์บอนิลนั้นเกิดจากอุตสาหกรรมทำเหล็กกล้า หรืออุตสาหกรรมถลุงนิกเกิล นอกจากนี้นิกเกิลคาร์บอนิลยังสามารถเกิดจากการสูบบุหรี่ด้วย ในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทเช่น เครื่องประดับที่ใช้นิกเกิลเป็นส่วนผสมต่างๆยังมีการขัดถูเพื่อให้ผิวของโลหะผสมเรียบจะก่อให้เกิดฝุ่นของนิกเกิลได้แก่ ผงนิกเกิลซัลไฟด์ นิกเกิลคาร์บอเนต นิกเกิลออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งฝุ่นเหล่านี้ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ แล้วยังก่อให้เกิดมะเร็งในปอดเช่นเดียวกับนิกเกิลคาร์บอนิลอีกด้วย

2.5.3 ความเป็นพิษของนิกเกิล

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่านิกเกิลเป็นสารที่มีอยู่ในพืช, สัตว์ และมนุษย์ นิกเกิลยังมีส่วนช่วยในกิจกรรมทางด้านเมตาบอลิซึมบางอย่างของสิ่งมีชีวิตด้วย แต่การสะสมของนิกเกิลในสิ่งแวดล้อมปัจจุบันมีค่อนข้างสูงกว่าปกติ และยังมีสารประกอบบางชนิดที่เป็นสารแปลกปลอมในธรรมชาติซึ่งอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ จากการศึกษความเป็นพิษของนิกเกิลที่มีต่อพืชส่วนใหญ่ และพวกเขื่อราต่างๆพบว่าเกิดจากการปนเปื้อนของนิกเกิลในดินเฉพาะแห่งที่มีความเข้มข้นผิดปกติ การสะสมของนิกเกิลนั้นส่วนใหญ่สะสมอยู่ตามเนื้อเยื่อต่างๆของพืช เช่น ใบชา ใบยาสูบ เป็นต้น นอกจากนี้การศึกษาการปนเปื้อนของนิกเกิลในน้ำปรากฏว่าเกิดการปนเปื้อนของนิกเกิลในแม่น้ำ ลำคลองและทะเล จากการสำรวจสัตว์ทะเล เช่น หอยนางรม กุ้งทะเลใหญ่ และกั้ง พบปริมาณนิกเกิลอยู่เป็นจำนวนมาก การใช้นิกเกิลในอุตสาหกรรมต่างๆทำให้นิกเกิลและสารประกอบนิกเกิลเกิดการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมในสภาวะที่ไม่ใช่สารประกอบตามธรรมชาติ แต่เป็นสารแปลกปลอมสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ได้รับนิกเกิลเข้าไปในร่างกาย สารประกอบนิกเกิลที่เป็นพิษมากที่สุดคือ นิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นของเหลวไม่มีสี กลายเป็นไอได้ง่าย นิกเกิลคาร์บอนิลใช้ทำประโยชน์ในการทำปิโตรเลียมให้บริสุทธิ์ได้ดีเท่ากับทำนิกเกิลให้บริสุทธิ์ ความเข้มข้นที่อนุญาตให้มีได้ในอากาศคือ 1 ppm แต่ถ้าได้รับนิกเกิลในระดับความเข้มข้นต่ำ บ่อยๆ นานๆเข้าอาจทำให้เกิดพิษ ซึ่งลักษณะความเป็นพิษของนิกเกิลมีอยู่ 2 ลักษณะดังนี้

- Acute poisoning มีอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ เจ็บหน้าอก ซึ่งเกิดอาการขึ้นภายใน 2 - 3 ชั่วโมงหลังจากเริ่มแสดงอาการแล้ว 12 - 23 ชั่วโมง หรือมากกว่า 5 วัน จะมีอาการของโรคเกี่ยวกับปอดอย่างรุนแรง หัวใจเต้นเร็ว อ่อนเพลียแล้วเสียชีวิตภายใน 4 - 13 วัน
- Chronic poisoning เป็นอาการที่เกิดขึ้นจากร่างกายที่มีการสะสมนิกเกิลเป็นระยะเวลานานๆ จนถึงระดับหนึ่งแล้วแสดงอาการเป็นพิษออกมา จากการตรวจสอบเนื้อเยื่อปรากฏอวัยวะในปอด สมอง ดับ ไต และม้าม ตลอดจนเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

จากการตรวจสอบพบว่านิกเกิลมีนิกเกิล 1.59 - 3.07 $\mu\text{g}/\text{มว}$ เมื่อมีการเผาไหม้อาจก่อให้เกิดนิกเกิลคาร์บอนิลได้ ฉะนั้นการสูบบุหรี่ติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เป็นมะเร็งในปอดได้ นอกจากนี้มีรายงานเกี่ยวกับคนงานที่ทำงานในโรงงานนิกเกิลให้บริสุทธิ์เป็นเนื้องอกในทางเดินหายใจ และผิวหนังอักเสบ คนที่ใส่หน้ากากหรือเครื่องประดับที่ทำด้วยโลหะนิกเกิลทำให้เกิดโรคผิวหนังอักเสบได้ โรคคันที่เกิดจากนิกเกิลนั้นจะเริ่มมีอาการร้อนและคัน ต่อมาผิวหนังเป็นผื่นแดงและกลายเป็นตุ่มหนองหรือแผลเปื่อย ได้มีการศึกษาผลของนิกเกิลต่อการเกิดโรคมะเร็ง พบว่าสัตว์ทดลองที่หายใจเอานิกเกิลคาร์บอนิลเข้าไปจะเกิดมะเร็งปอดและจมูก นอกจากนี้มะเร็งยังเกิดจากฝุ่นของนิกเกิล นิกเกิลซัลไฟด์ นิกเกิลคาร์บอนเนต นิกเกิลออกไซด์ และนิกเกิลโอไซด์ ซึ่งสาร

ทั้งหมดนี้ละลายน้ำที่อุณหภูมิ 37°C มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม กำหนดความเข้มข้นขณะที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมนิคมอุตสาหกรรม ต้องมีนิเกิลไม่เกิน 1.00 mg/L (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3, 2539)

2.6 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกวิธีใดนั้น ขึ้นอยู่กับ ความเหมาะสมในหลายด้าน ดังนี้คือ

- คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด
- คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย
- ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

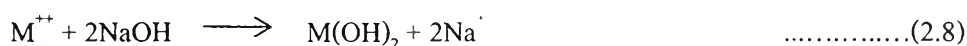
ซึ่งสามารถสรุปวิธีการกำจัดโลหะหนักได้ดังนี้

2.6.1 การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้มานานแล้ว ทำโดยการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เพื่อให้ เกิดตะกอนแยกออกได้ ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมคือการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนซัลไฟด์

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิม ทำโดยการเติมเบสเช่น ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น เกิดปฏิกิริยาดังสมการ



โดย M^{++} คือ ไอออนของโลหะ

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือ โลหะไฮดรอกไซด์จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วงพีเอชกว้าง ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะในน้ำ โดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าพีเอชเปลี่ยนไปจากค่าพีเอชที่ตกตะกอน

การตกตะกอนซัลไฟด์

การตกตะกอนซัลไฟด์จะใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือโซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) หรือเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) เป็นสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

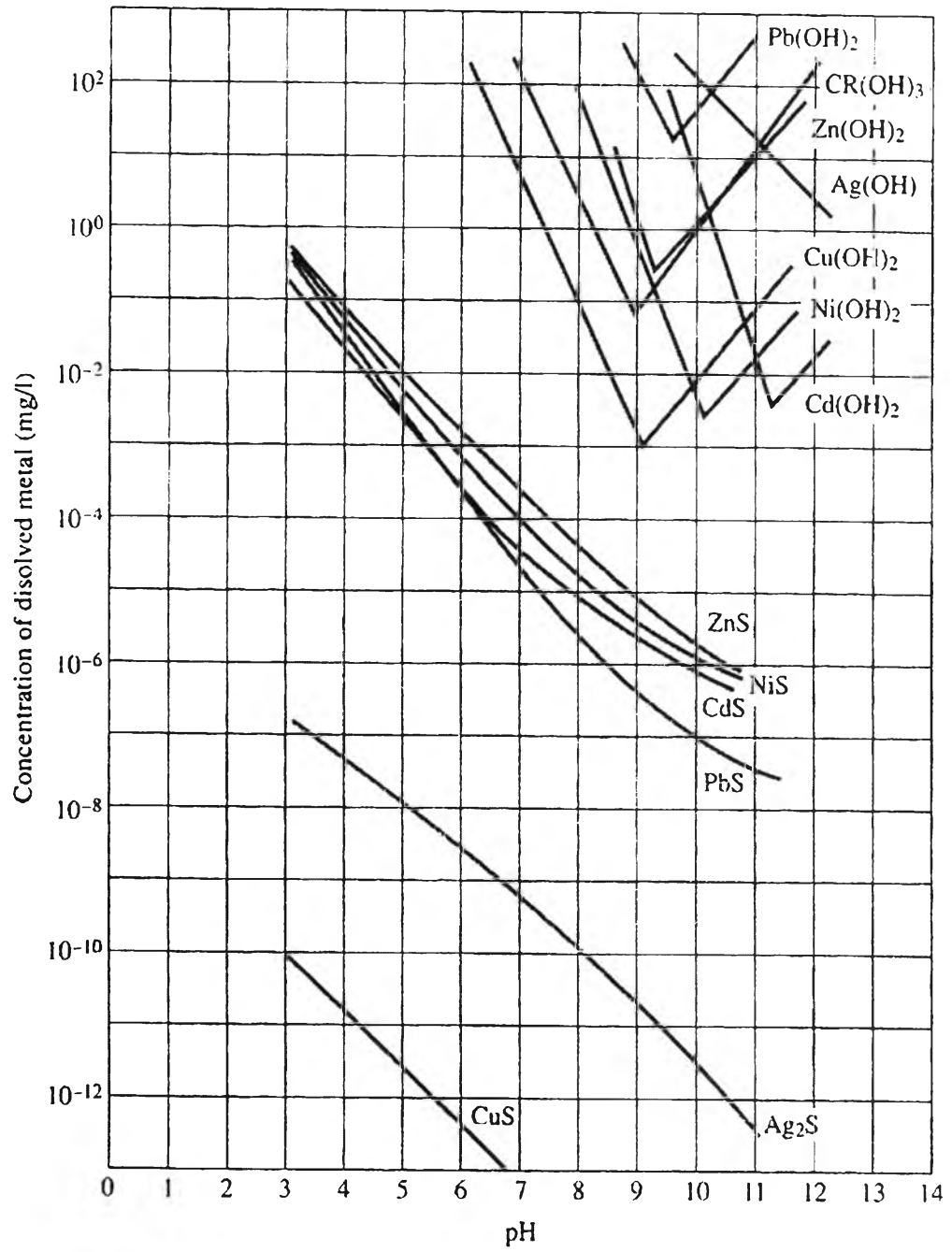


โดย M^{++} คือ ไอออนของโลหะ

ข้อดีของการตกตะกอนซัลไฟด์คือการละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นเล็กน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือเรื่องกลิ่นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากการเติมไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันแก๊สที่เกิดขึ้นโดยการนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง



INDUSTRIAL WATER POLLUTION CONTROL



รูปที่ 2.5 การตกตะกอนของโลหะหนักในรูปของไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ (Eckenfelder, 2000)

2.6.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกจับด้วยเรซินได้ไม่เท่ากัน ซึ่งเรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งจากธรรมชาติและชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น โดยเรซินนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุติดอยู่ และจะถูกทำให้สมดุลด้วย counter ion ที่มีประจุตรงข้ามกัน ซึ่งหากสารที่ต้องการกำจัดในสารละลายมีประจุเหมือนกับ counter ion ก็จะสามารถแลกเปลี่ยนกับ counter ion ของเรซิน และถูกจับไว้บนเรซินได้ วิธีนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นที่สามารถจับกับเรซินได้อยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะเข้าถึงเรซินเพื่อให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด และยังมีข้อเสียที่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการสูง

2.6.3 การรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีการนี้เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำเสีย โดยหลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซีเตทและโพลีเอไมด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable Membrane) ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่านเพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 ความดันบรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนจึงต้องทนความดันสูง และต้องมีการบำบัดขี้ด้นโดยการปรับพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า และน้ำเสียจากการล้างภาพ

2.6.4 การออกซิเดชันและการรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

วิธีการนี้เป็นวิธีทางเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆเจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน ไฮโปคลอไรท์ เปอร์แมงกานेट โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีการออกซิเดชัน ได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะโดยใช้คลอรีนหรือไฮโปคลอไรท์ ส่วนตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีรีดักชัน ได้แก่ การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมต

หรือกรดโครมิกเจือปนอยู่โดยใช้ เฟอร์ซัลเฟต โดยต้องทำปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำกว่า 3 หลังจากนั้นเติมปูนขาวลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการบำบัดด้วยวิธีนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก จะต้องปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสม ปฏิกิริยาจึงจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

2.6.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลาย โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด (ขั้วลบ) และเกิดออกซิเจนที่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่ไม่นิยมเพราะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.6.6 การระเหย (Evaporation)

เป็นการระเหยเอาน้ำออกซึ่งเป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งการระเหยที่บรรยากาศธรรมดา และระเหยภายใต้สภาวะสุญญากาศ วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง แต่มีข้อเสียที่ต้องใช้ทุนในการดำเนินงานสูง

2.6.7 การอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยไฟฟ้ากระแสตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) โดยเมมเบรนมักจะทำจากโพลีเมอร์ที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนโดยเมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนบวก ก็จะยอมให้ไอออนบวกผ่านเท่านั้นและผลักไอออนลบออกไป และการเคลื่อนที่ของไอออนผ่านเมมเบรนจะอาศัยศักย์ไฟฟ้าเป็นตัวช่วย ซึ่งน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีข้อเสียตรงมีค่าต้นทุนการก่อสร้างและการดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดไอออนที่ต้องการได้

2.6.8 การดูดซับ (Adsorption)

การดูด (Sorption) เป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งในทางวิทยาศาสตร์สถานะแวดล้อมและวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ช่วยให้เข้าใจถึงความเป็นไปและการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนต่างๆในสิ่งแวดล้อม รวมทั้งยังนำไปใช้ในการกำจัดสารปนเปื้อน โดยทั่วไปการดูดมี 2 ชนิด คือ การดูดซับ (adsorption) และการดูดซึม (absorption)

1. การดูดซับ เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าโดยจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส โดยมีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนโดยความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ
2. การดูดซึม เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งระบบ โดยเกิดขึ้นทั่วทั้งวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยา เช่นการดูดซึมของก๊าซออกซิเจนสู่น้ำ และการดูดซึมของดีดีทีสู่ตัวทำลายอินทรีย์ เช่น เฮกเซน เป็นต้น

ระบบการดูดซับที่ประกอบไปด้วยวัฏภาคเดียวเรียกว่า ระบบเนื้อเดียว (Homogeneous system) และถ้าประกอบด้วยหลายวัฏภาคเรียกว่า ระบบเนื้อผสม (Heterogeneous system) โดยมีขอบเขตระหว่างวัฏภาคเรียกว่า ผิวสัมผัส (Interface) โดยที่ระบบเนื้อผสมนี้อาจจะอยู่ในภาวะสมดุลหรือไม่สมดุลก็ได้ ในระบบเนื้อผสมที่ประกอบด้วยโมเลกุล อะตอม และไอออน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างวัฏภาคจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสก่อน โดยเวลาช่วงที่อยู่บนพื้นผิวจะขึ้นกับธรรมชาติของพื้นผิวและโมเลกุล อุณหภูมิของพื้นผิวและพลังงานจลน์ของโมเลกุล

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวสามารถพบได้ที่ผิวสัมผัสระหว่างของแข็ง - แก๊ส ของแข็ง - ของเหลว ของเหลว - ของเหลว ของเหลว - แก๊ส ของแข็ง - ของแข็ง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสนี้จะเกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลจากวัฏภาคหนึ่งไปยังอีกวัฏภาคหนึ่ง (ปิยะพร บารมี, 2542)

2.6.8.1 หลักการดูดซับ

การดูดซับ เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของสารไปเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งหรือของเหลว สารที่ไปเกาะเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ (adsorbate) และของแข็งหรือของเหลวที่พื้นผิวถูกสารนั้นเกาะเรียกว่า สารดูดซับ (adsorbent) ซึ่งการดูดซับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) และการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) การดูดซับจะเกิดขึ้นทั้งทางกายภาพและทางเคมีเมื่อโมเลกุลในวัฏภาคแก๊ส หรือวัฏภาคของเหลวยึดติดกับผิวของของแข็งเนื่องมาจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็ง

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

เกิดจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ ระหว่างโมเลกุลซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงแผ่กระจาย (London dispersion force) ซึ่งเป็นแรงที่มีอยู่ทั่วไปในวัตถุทุกชนิด เกิดจากการดึงดูดระหว่างอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ติดกัน และแรงขั้วคู่-ขั้วคู่ (dipole-dipole forces) และแรงขั้วคู่-ขั้วเหนี่ยวนำ ซึ่งเป็นแรงไฟฟ้าสถิตย์ ทำให้เกิดการเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและโมเลกุลที่ผิวหน้าของสารดูดซับซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับหลายๆชั้นซ้อนทับกัน จำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสาร การดูดซับทางกายภาพนี้จะเกิดได้อย่างรวดเร็วและผันกลับได้ (reversible) การดูดซับทางกายภาพมักเป็นแบบไม่จำเพาะ กล่าวคือโมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้จะไม่ถูกดูดติดกับเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนผิวหน้าของของแข็ง แต่จะเป็นอิสระในการเคลื่อนที่อยู่ที่เหนือบริเวณผิวนั้น (Sawyer et al., 1994) โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจะไม่ขึ้นตรงกับอุณหภูมิและค่าไอออนิกสเตรงค์ (Ionic strength) ของสารละลาย แต่มักจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและสารเชิงซ้อนที่ปะปนอยู่ในวัฏภาคของของเหลว (Allard et al., 1987) ทั้งนี้การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะสามารถผันกลับได้ การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพจะขึ้นกับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดมีค่าน้อยจะสามารถเกิดการปลดปล่อยสารที่ถูกดูดซับ (Desorption) ซึ่งอาจเป็นผลจากการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับหรือการเพิ่มอุณหภูมิเข้าไป ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะทำให้เกิดการคายความร้อน โดยปริมาณความร้อนที่เกิดจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว (พล สาเกทอง, 2518)

การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับ หรือแรงดึงดูดทางเคมีซึ่งเป็นแรงที่แข็งแรงกว่าการดูดซับทางกายภาพและเป็นแรงที่ทำให้เกิดพันธะ ณ บริเวณเฉพาะใดๆ บนพื้นผิวของวัฏภาคของแข็ง เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัสของสารดูดซับ ทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะเคมี อาจเกิดการดูดซับได้ช้าและผันกลับไม่ได้เป็นบางส่วน โดยทั่วไปสารที่ถูกดูดซับจะเกิดเป็นโมเลกุลชั้นเดียวเหนือผิวหน้าของสารดูดซับ โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระจากบริเวณผิวนั้นไปยังบริเวณอื่น เมื่อผิวหน้าของสารดูดซับถูกปกคลุมด้วยโมเลกุลหนึ่งชั้นแล้วความสามารถในการดูดซับจะลดลง จึงเกิดการผันกลับได้ยากนอกจากจะมีการให้ความร้อนถึงอุณหภูมิสูงๆ แล้วสารที่ถูกดูดซับจึงจะแยกตัวออกมาจากสารดูดซับได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดที่

อุณหภูมิสูงและเกี่ยวข้องกับพลังงานกระตุ้น รวมทั้งยังมีการใช้พลังงานความร้อนในการผันกลับของปฏิกิริยาด้วย ทั้งนี้การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยสำคัญต่างๆ ได้แก่ ส่วนประกอบของพื้นผิวของของแข็ง ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย พิเอช และอุณหภูมิของสารละลาย

นอกจากนี้ยังมีการกล่าวถึงการดูดซับอีกประเภทหนึ่งคือการดูดซับแบบแลกเปลี่ยนซึ่งใช้ในการอธิบายถึงการดูดซับที่บอกลักษณะด้วยการดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างสารถูกดูดซับกับบริเวณผิวหน้าของสารดูดซับ โดยที่การแลกเปลี่ยนไอออนก็ถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มนี้เช่นกัน กล่าวคือ ไอออนของสารถูกดูดซับซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับเป็นผลมาจากการดึงดูดทางศักย์ไฟฟ้าซึ่งดึงดูดไอออนสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงข้ามที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดซับ รวมทั้งไอออนของสารถูกดูดซับที่มีอยู่ในสารละลายจะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุแบบเดียวกันซึ่งเป็น counter ion ของหมู่ที่มีประจุของสารดูดซับ โดยทั่วไปนั้นไอออนที่มีประจุมากกว่า เช่น ไอออนแบบไตรวาเลนท์จะถูกดึงดูดสู่บริเวณที่มีประจุแบบตรงกันข้ามได้แรงกว่าไอออนที่มีประจุน้อยกว่า เช่น ไอออนแบบโมโนวาเลนท์ การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปฏิกิริยาเคมีที่ผันกลับได้ นอกจากนี้ไอออนที่มีขนาดเล็กกว่าจะถูกดึงดูดได้แรงกว่าไอออนที่มีขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะมีความแตกต่างกันระหว่างการดูดซับทั้งสามประเภทที่กล่าวมาแต่ก็ยังเป็นการยากที่จะตัดสินว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนสารดูดซับชนิดหนึ่งๆจะมีการดูดซับแบบใดแบบหนึ่งที่กำลังมาเกิดขึ้นเพียงแบบเดียวบนสารดูดซับนั้น

การดูดซับทางกายภาพจะต่างจากการดูดซับทางเคมีตามข้อกำหนดเหล่านี้ คือ

- (1) การดูดซับทางกายภาพเป็นแรงที่เกี่ยวกับสารชนิดเดียวที่สามารถย้อนกลับได้ กล่าวคือสามารถเกิดการปลดปล่อยสารออก (desorption) ได้ที่อุณหภูมิเดียวกัน แม้กระบวนการที่เกิดขึ้นจะเป็นไปอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากผลของการแพร่ โดยไม่มีความเกี่ยวข้องกับการแบ่งหรือการถ่ายโอนอิเล็กตรอน ส่วนการดูดซับทางเคมี จะเกิดเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น ทำให้ไม่สามารถผันกลับได้
- (2) การดูดซับทางกายภาพไม่เจาะจงบริเวณที่เกิดการดูดซับ ซึ่งโมเลกุลที่ถูกดูดซับ จะมีอิสระในการเคลื่อนย้ายได้ตลอดทั่วทั้งพื้นผิว ต่างกับการดูดซับทางเคมีที่การดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเกิดได้เฉพาะที่ เฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้นและโมเลกุลของตัวถูกละลายไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้
- (3) การดูดซับทางกายภาพเป็นการเกิดแบบ multilayers กล่าวคือ โมเลกุลของสารที่

ถูกดูดซับที่เกาะอยู่บนผิวของตัวดูดซับสามารถเกิดได้หลายชั้น ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่หนึ่ง (monolayer) แล้ว ซึ่งบางครั้งการดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีได้อีก

(4) ความร้อนที่เกิดขึ้นของการดูดซับทางกายภาพจะต่ำกว่าที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางเคมี

(5) การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นทันทีเช่นเดียวกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย

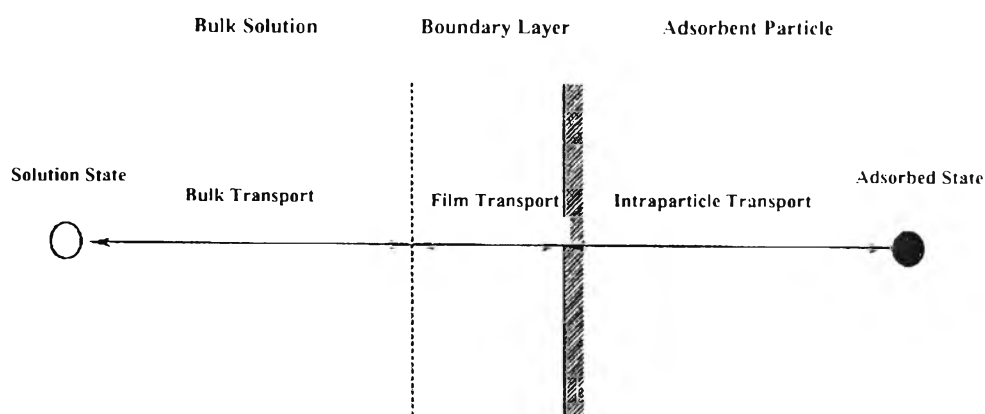
อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

อัตราการดูดซับเป็นกลไกของการดูดซับที่เกี่ยวข้องกับอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุลที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สมดุลได้เร็วขึ้น ซึ่งขั้นตอนที่เกิดช้าที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับทั้งหมดของสาร ละลายด้วยตัวดูดซับที่มีรูพรุน ดังรูปที่ 2.6

(1) การขนส่งทั้งก้อน (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายถูกส่งผ่านไปยังผิวหน้าของชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มอยู่ที่ผิวของตัวดูดซับ และเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเร็วมาก

(2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวบางๆ เข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ ทำให้เกิดกระบวนการแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) หรือเรียกว่า การแพร่ภายนอก (external diffusion) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

(3) การขนส่งภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกละลายซึ่งอยู่ที่ผิวหน้าของตัวดูดซับแพร่ผ่านเข้าสู่ช่องว่างหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (pore diffusion) ทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน หรือเรียกว่า การแพร่ภายใน (internal diffusion) และเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับด้วยเช่นกัน



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับที่มีรูพรุน (Eckenfelder, 1981)

สมดุลของการดูดซับ

ในกระบวนการดูดซับ ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้งก่อนจะถูกดูดซับเข้าไปใหม่ จนเมื่ออัตราการดูดซับและอัตราการปลดปล่อยสารเข้าสู่ภาวะคงที่ ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของตัวดูดซับอีก เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (adsorption equilibrium) หรือเรียกสมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิของระบบคงที่ว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) โดยได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาเพื่อใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับที่เกิดขึ้น แบบจำลองที่นิยมใช้ ได้แก่

ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแลงเมียร์ ดังสมการที่ (2.10) เรียกว่า

Ideal Localized Monolayer Model ใช้อธิบายการดูดซับที่มีสมมติฐาน ดังนี้

- (1) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับติดอยู่บริเวณพื้นผิวที่จำกัดของตัวดูดซับ
- (2) บริเวณที่เกิดการดูดซับจะเกิดได้เพียงชั้นเดียว (monolayer)
- (3) พื้นผิวที่ถูกดูดซับมีจำนวนจำกัด ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิวนั้นๆ
- (4) พลังงานในการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

$$X = \frac{(X_m b C_e)}{(1 + b C_e)} \dots\dots\dots(2.10)$$

โดย $X = x/m$ คือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (m) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือ โมลต่อกรัม
 X_m = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่มากที่สุดต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่สามารถเกิดการดูดซับได้เพียงชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม
 C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ โมลต่อลิตร
 b = ค่าคงที่ของพลังงานในระบบ

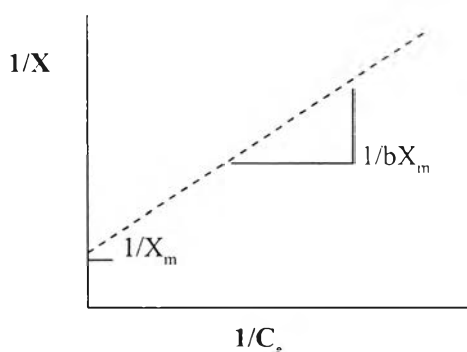
จากสมการที่ (2.10) เมื่อ X เข้าใกล้ X_m และ C_e เข้าสู่ ∞ (infinity) สามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{C_e}{X} = \left(\frac{1}{b X_m} \right) + \left(\frac{C_e}{X_m} \right) \dots\dots\dots (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X กับ C_e จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $1/X_m$ และมีจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง

$$\frac{1}{X} = \left(\frac{1}{X_m} \right) + \left(\frac{1}{C_e} \right) \left(\frac{1}{b X_m} \right) \dots\dots\dots (2.12)$$

และเมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบแลงเมียร์

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของฟรอนด์ลิช ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของการดูดซับ ในระบบของเหลวที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังเป็นไปตามสมการที่ (2.13)

$$X = KC_e^{1/n} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

โดย $X = x/m$ คือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (m) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือโมลต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือโมลต่อลิตร

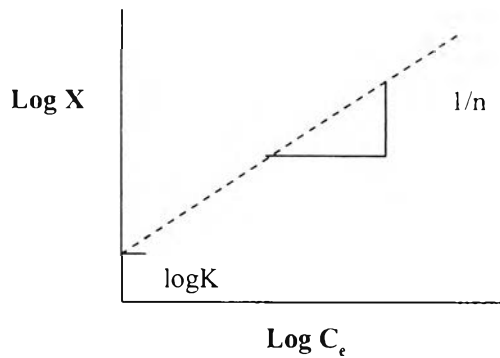
K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ

$1/n$ = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

จากสมการที่ (2.13) ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบเอกโปเนนเชียล (exponential) สามารถเขียนให้เป็นสมการเชิงเส้นที่อยู่ในรูปของ logarithmic ได้ดังนี้

$$\text{Log}X = \text{Log}K + \left(\frac{1}{n}\right)\text{Log}C_e \quad \dots\dots\dots(2.14)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log X$ กับ $\log C_e$ จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $1/n$ และ จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช

ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที (BET, Brunauer Emmerett – Teller Adsorption Isotherm)

เป็นแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาจาก Brunauer, Emmerett และ Teller เพื่อใช้ ในการอธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayers) ซึ่งพัฒนามาจากสมการของแลงเมียร์ โดยมีสมมติฐานว่าแต่ละ โมเลกุลของการดูดซับในชั้นแรก จะเป็นตำแหน่งที่เกิดการดูดซับของ โมเลกุลในชั้นที่สอง และชั้นต่อไป ดังสมการ (2.15)

$$X = \frac{X_m b C_e}{(C_s - C_e) [1 + (b-1)(C_e / C_s)]} \dots\dots\dots (2.15)$$

โดย $X = x/m$ คือปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (x) ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (m) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมหรือ โมลต่อกรัม

$X_m =$ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่มากที่สุด ต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ต้องการสำหรับการเกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม

$C_e =$ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลที่ยังเหลืออยู่ในสารละลาย มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ โมลต่อลิตร

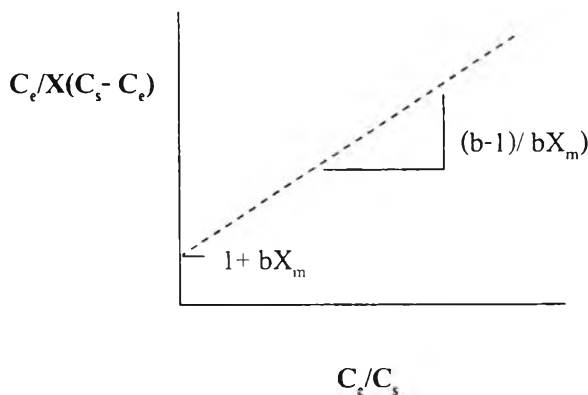
$C_s =$ ความเข้มข้นอิ่มตัวของตัวถูกละลายในน้ำ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรหรือ โมลต่อลิตร

$b =$ ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ (2.15) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น ดังนี้

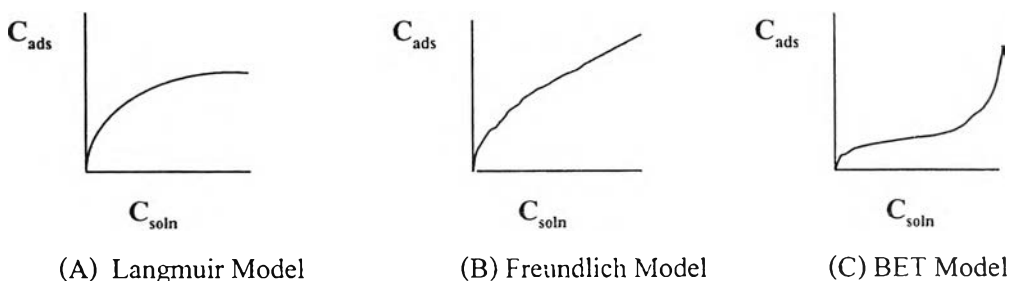
$$\frac{C_c}{X(C_s - C_c)} = (1 + bX_m) + \left[\frac{(1 - b)}{(bX_m)(C_c / C_s)} \right] \dots\dots\dots (2.16)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_c/X(C_s - C_c)$ กับ (C_c/C_s) จะได้สมการเส้นตรงที่มีความชัน $(b-1)/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1 + bX_m$



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตามแบบจำลองการดูดซับแบบ BET

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (C_{ads}) และความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย (C_{soln}) ตามแบบจำลองไอโซเทอมที่กล่าวมาข้างต้น จะได้ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.10 แบบจำลองไอโซเทอมของการดูดซับแบบต่างๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

(1) ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ (size and surface area) ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับ เนื่องจากปฏิกิริยาที่พื้นผิวเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของพื้นที่ผิว อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกเรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ (Diamadopoulos et al., 1992)

ในกรณีที่ตัวดูดซับไม่มีรูพรุนนั้นพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดขนาดลง แต่ถ้าตัวดูดซับมีรูพรุนมากกว่าพื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดซับจะอยู่ในรูพรุนทำให้ความสามารถในการดูดซับไม่ขึ้นกับขนาดของวัตถุ (สุจินต์ เอี่ยมปี, 2544)

อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ ส่วนพื้นที่ผิวของสารดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorptive Capacity) (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538)

(2) ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ (nature of adsorbate) การดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเกิดการดูดซับส่วนของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกแยกออกจากน้ำหรือตัวทำละลายและเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ ดังนั้นสารที่ละลายน้ำหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงทำให้การดูดซับเกิดได้ไม่ดี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบอินทรีย์จะลดลง เมื่อขนาดสายไฮโดรคาร์บอนยาวขึ้น อย่างไรก็ตามเกณฑ์ข้างต้น ไม่ได้เป็นจริงเสมอไปทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดเกาะติดผิวสารดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างแน่นอนในเชิงปริมาณระหว่างความสามารถในการดูดซับและความสามารถในการละลายน้ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2538) นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายยังแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับด้วยเช่นกัน

(3) พีเอช พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการกำหนดความสามารถของการดูดซับ เนื่องจากพีเอชหรือไฮโดรเจนไอออนมีอิทธิพลอย่างมากต่อการแตกตัวและการละลายน้ำของไอออนต่างๆ ประกอบกับค่า zero point of charge (zpc), point of zero charge (pzc) หรือ pH

zero (pH_0) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้แสดงผลรวมของประจุ เมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าสูงกว่า pH_0 ของตัวดูดซับ พื้นผิวของตัวดูดซับก็จะกลายเป็นประจุลบ และพื้นผิวของตัวดูดซับจะสามารถดูดซับประจุบวกได้ ในทางกลับกันหากพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำกว่า pH_0 ของตัวดูดซับ พื้นผิวของตัวดูดซับก็จะกลายเป็นประจุบวกที่สามารถดูดซับกับประจุลบได้เช่นกัน (Vanloon และ Duffy, 2000) นอกจากนี้จะขึ้นอยู่กับพีเอชแล้ว จำนวนประจุของไอออนบวกก็มีผลต่อพีเอชด้วย (David&Marion, 1976) ดังนี้

ไอออนประจุบวกหนึ่ง (Monovalent cations) มีงานวิจัยหลายชิ้นได้ให้ความสำคัญของพีเอชเสมือนเป็นปัจจัยควบคุมความสามารถของการดูดซับไอออนบวกบนไฮดรอกไซด์โลหะออกไซด์ส่วนใหญ่แล้วการดูดซับของไอออนประจุบวกหนึ่งอย่างเช่น โลหะไอออนบวกประเภทอัลคาไลน์จะขึ้นกับประจุที่ผิวของออกไซด์ที่เป็นตัวดูดซับโดยตรง ซึ่งจะพิจารณาจากจำนวนของไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกไซด์ไอออนที่ดูดซับโดยจะอธิบายสั้นๆ ได้ดังนี้ การดูดซับของไอออนบวกจะเกิดน้อยมากที่ zpc แต่ถ้ามากกว่าค่า zpc ขึ้นไป ไอออนบวกจะถูกดูดซับในปริมาณที่เท่ากับประจุลบทั้งหมดที่พื้นผิวและในส่วนของประจุลบที่พื้นผิวจะเกิดสมดุลได้โดยการคัดเลือกไอออนลบบางตัวออกไป แต่จะเป็นเพียงส่วนน้อยถ้าเทียบกับประจุทั้งหมดและเกิดในกรณีที่มีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงมากๆ จากการที่กล่าวถึงความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ จึงได้มีการทำการทดลองเพื่อสร้างกราฟระหว่างประจุไฟฟ้าและพีเอช ซึ่งเป็นวิธีทางอ้อมในการวัดความหนาแน่นของไอออนที่ electrical double layer ที่พีเอช และความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่กำหนด โดยการไตเตรทสารแขวนลอยออกไซด์ด้วยกรดหรือเบสที่ความเข้มข้นต่างๆกันของอิเล็กโทรไลต์ตัวเดียวกัน และที่จุดตัดของ titration curve หลายๆเส้นจะแสดงค่า zpc ซึ่งจากกราฟของออกไซด์ต่างๆ พบว่าการดูดซับของไอออนบวกเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของพีเอชและความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ในกรณีพื้นผิวจะจงจะดูดซับเฉพาะไอออนประจุบวกหนึ่งนั้น การดูดซับนอกจากจะขึ้นกับพีเอชแล้วยังขึ้นกับกลไกของการดูดซับด้วย แต่ในกรณีที่มีการดูดซับไม่เจาะจงว่าจะต้องเป็นไอออนประจุบวกเท่าใด การดูดซับของไอออนประจุบวกหนึ่งจะเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น แต่การดูดซับก็ยังคงเกิดขึ้นไม่มากเท่ากับในกรณีของไอออนประจุบวกมากกว่าหนึ่ง (multivalent cations)

ไอออนประจุบวกสอง (Divalent cations) ส่วนใหญ่การดูดซับของไอออนประจุบวกสองบนผิวของแข็งที่เป็นไฮดรอกไซด์ พวกเหล็ก อลูมินัมและแมงกานีส ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนจากสารละลายจะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะขึ้นอยู่กับพีเอชเหมือนกัน การดูดซับของไอออนโลหะจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แม้จะเกิดในช่วงพีเอชที่แคบๆก็ตาม และอาจจะเกิดขึ้นจริงกับไอออนบวกที่ถูกไฮโดรไลซ์ การดูดซับผิวเสมือนเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่าง M^{2+} กับ โปรตอน ซึ่งได้มาจาก OH-group ที่ผิวตัวดูดซับ

ไอออนประจุบวกสามและประจุบวกสี่ (Tri and Quadivalent cations) ปกติแล้วการศึกษาปริมาณการดูดซับของไอออนบวกบนไฮดร็อกไซด์ มักจะรวมถึงการดูดซับทั้ง ไอออนประจุ +1, +2, +3 และ +4 ซึ่งจะถูกลดซับได้เกือบทั้งหมด นอกจากจะกล่าวถึงกระบวนการดูดซับแล้ว ยังมีกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนมาเกี่ยวข้องด้วย โดยจะขึ้นกับพีเอชเป็นส่วนใหญ่

(1) อุณหภูมิ ในส่วนของอุณหภูมิจะมีผลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิและลดลงตามการลดของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ

(2) ความเร็วในการเขย่า (mixing speed) เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งเกี่ยวข้องกับแพร่ภายนอกหรือการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในหรือการแพร่เข้าสู่โพรง ถ้าระบบเป็นของเหลว (เช่น น้ำ) และใช้ความเร็วในการเขย่าต่ำ ฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ กรณีนี้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าการเขย่ามีความเร็วสูงขึ้น ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงและทำให้โมเลกุลเคลื่อนเข้าหาตัวดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับแทนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ลักษณะของการดูดซับหรือการส่งถ่ายมวลสารที่อยู่ภายในสารละลายไปยังพื้นผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กำจัดสารปนเปื้อนมี 3 ขั้นตอนสำคัญคือ

1. การถ่ายโอนมวลสารของสารที่ถูกดูดซับจากภูมิภาคของเหลวหรือแก๊สเข้าสู่บริเวณรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับหรือทางเข้ารูพรุนของสารดูดซับ
2. การแพร่กระจายของมวลสารที่ถูกดูดซับจากรอบนอกที่ใกล้กับพื้นผิวของสารดูดซับเข้าสู่ผิวภายในรูพรุนของสารดูดซับ
3. การดูดซับคือการที่โมเลกุลที่อยู่ภายในรูพรุนถูกดูดซับจากสารละลายไปปะติดอยู่ที่ภูมิภาคของแข็งซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับสองขั้นตอนที่ผ่านมา คาดว่าภาวะสมดุลเกิดขึ้นระหว่างภูมิภาคทั้งสองนี้

ประโยชน์ของการดูดซับที่ใช้ในอุตสาหกรรมเช่น

- กำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกจากน้ำดื่ม เช่น สารพวกไตรฮาโลมีเทน สารปราบศัตรูพืช และสารประกอบอินทรีย์ที่มีคลอรีนเป็นองค์ประกอบต่างๆ
- การกำจัดกลิ่น รส และสีออกจากน้ำดื่ม
- การกำจัดสีออกจากน้ำมันพืช
- การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้เป็นส่วนหนึ่งในกระบวนการทางเคมีฟิสิกส์
- แยกพาร์ฟิน และไอโซพาร์ฟินออกจากกัน

ตัวดูดซับที่นิยมใช้ได้แก่ ซิลิกาเจล ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ จีไฉ่ ฯลฯ ซึ่งคุณสมบัติของตัวดูดซับที่ดีต้องมีพื้นที่ผิวต่อมวลมากจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น และสามารถจับสารที่ต้องการกำจัดได้

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการดูดซับโลหะหนักสามารถใช้วัสดุได้หลายประเภท เช่น ถ่านกัมมันต์ ดินลูกรัง ใ้ฉ่ แกลบ ทราเยลือบด้วยเหล็กออกไซด์ เป็นต้น ในงานวิจัยนี้สนใจการใช้วัสดุที่มีออกไซด์ของโลหะต่างๆเป็นองค์ประกอบ หรืออาจใช้วัสดุที่เหมาะสมมาเป็นตัวกลางแล้วเคลือบด้วยออกไซด์ของโลหะ

Rahman และ Ghosh (1979) ได้ทำการวิจัยเรื่องการหาพื้นที่ผิวจำเพาะของผงเฟอร์ริกออกไซด์ อะลูมินาและซิลิกาเจล โดยการใช้การดูดซับไพริดีน (Pyridine) จากสารละลายนอร์มัลเฮปเทน (n-Heptane) พบว่าสามารถประเมินผลได้ตามสมมติฐานของ Close-packed monolayer

Schultz และคณะ (1987) ได้รายงานถึงผลของพีเอชในการจับและหลุดของ Cu (II), Pb (II), Ni (II), Zn (II) และ Cr (III) บนสารประกอบออกไซด์ของเหล็ก โดยโลหะจะถูกจับบนเหล็กออกไซด์ได้ที่พีเอช 9 และเริ่มหลุดจากตัวดูดซับที่พีเอช 4.5

Edward และ Benjamin (1989) ศึกษาการฟื้นอำนาจ (regeneration) และการนำกลับมาใช้ใหม่ของ ferrihydrite (เหล็กออกไซด์) ในการบำบัดโลหะหนักออกจกน้ำเสีย โดยทำการเปรียบเทียบกับการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของโลหะหนัก พบว่า ferrihydrite สามารถกำจัด Cu (II), Cd

(II), Zn (II), Cr (III) , Ni (II) และ Pb (II) ได้ทุกค่าของพีเอช (3 - 13.5) แต่จะมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 8 – 12.5 ในขณะที่การตกตะกอนจะทำได้ไม่ดีเท่า รวมทั้ง ferrihydrite ยังสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่อย่างน้อยถึง 50 ครั้ง โดยใช้ได้ทั้งกับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

Namasivayan และ Ranganathan (1995) ได้ทำการวิจัยเรื่องผลของลิแกนด์ของสารอินทรีย์ที่มีต่อการกำจัด Pb (II), Ni (II) และ Cd (II) โดยใช้สารดูดซับที่เป็นของเสียประเภท Fe (III) / Cr (III) Hydroxide ที่มาจากโรงงานผลิตปุ๋ย พบว่าการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่พบผลกระทบจาก ionic strength อย่างชัดเจน และผลของลิแกนด์ทำให้การดูดซับของ Pb(II) ในช่วงพีเอช 3.5-8.5 ลดลง ในขณะที่ซีเตรทและ EDTA ทำให้การดูดซับของ Ni (II) ลดลงแต่จะซีเตรทจะทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนการดูดซับ Cd (II) จะลดลงอย่างมากถ้ามีอะซีเตรทและซีเตรทอยู่

ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการนำเหล็กออกไซด์ไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำ คือสารประกอบของเหล็กแยกออกจากน้ำได้ยาก รวมทั้งเหล็กออกไซด์เป็นสื่อให้น้ำผ่านได้ยาก จึงมีการพัฒนาใช้เหล็กออกไซด์เคลือบบนผิวตัวกลางที่เป็นของแข็งที่เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาเพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน เช่น ทราย, polymer, diatomite เป็นต้น

Edward และ Benjamin (1989) ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก (Pb (II), Cu (II), Ni (II), Cd (II), Cr(III)) และสารประกอบเชิงซ้อนของแอมโมเนียกับโลหะ Cd (II), Zn (II) และ Cu (II) ด้วยทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จากการตกผลึกและการให้ความร้อน พบว่าทรายที่เคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าทรายปกติ และสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกเมื่อทำการล้างย้อนด้วยกรดที่พีเอช 3 โดยการกำจัดขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลายที่เข้าไปในระบบและจะกำจัดได้ดีที่พีเอชสูง

Scheidegger และคณะ (1993) ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของทราย (silica sand) ที่เคลือบด้วยเจอร์ไวต์เพื่อใช้ในการจับโลหะ จากการศึกษาเกี่ยวกับพีเอชและ ionic strength ในการก่อตัวของเหล็กออกไซด์ พบว่าปฏิกิริยาเริ่มแรกในการสัมผัสของเจอร์ไวต์บนพื้นผิวทรายเกิดมาจากแรงทางไฟฟ้า (electrostatic attraction) และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) สรุปได้ว่าการยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมีคือ Fe-O-Si ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา $-Fe-OH + HO-Si- \longrightarrow Fe-O-Si- + H_2O$ และเป็นพันธะที่มีความแข็งแรง โดยอาจจะเป็นพันธะที่เกิดขึ้นจากการเคลือบของเหล็กออกไซด์บนผิวของแร่ธาตุ

หรืออนุภาคของดินที่มีในธรรมชาติด้วย และพบว่าตัวกลางที่เคลือบด้วยเกอร์ไทต์จะมีรูพรุนและพื้นที่ผิวสูงขึ้นทำให้เพิ่มความสามารถในการจับโลหะเช่น Cd (II), Ni (II), Cu (II), Pb (II) และ Zn (II)

พนจิตร์ รณสิน (1996) ได้ทำการวิจัยเรื่องการกำจัดสังกะสีและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวกลางทรายเคลือบออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์และทรายเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและไอออนนิกเกิลได้ดีที่สุดที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 6 โดยทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนสังกะสีและไอออนนิกเกิลเท่ากับ 68.92% และ 69.52% ตามลำดับ

Benjamin และคณะ (1996) ศึกษาการกำจัดโลหะหนัก สารประกอบเชิงซ้อนของแอมโมเนียกับโลหะหนัก (Cu (II), Cd (II), Pb (II), Ni (II) และ Zn (II)) และออกซิแอนไอออนของโลหะหนัก (SeO_4^{2-} , AsO_4^{3-}) ด้วยทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ ทั้งจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง พบว่าทรายเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัดโลหะทั้งสามประเภทได้อย่างดี โดยตัวดูดซับนี้มีความเสถียรทั้งการล้างย้อนและการนำกลับมาใช้ใหม่ (back washing and regeneration) ซึ่งจะปลดปล่อยโลหะหนักออกมาได้มากใกล้เคียงกับที่ดูดซับไป ยกเว้น AsO_4^{3-} ที่ไม่สามารถนำกลับมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้ว่าจะใช้กรดหรือด่างในการทำรีเจนเนอเรชัน

Lo และคณะ (1997) ศึกษาลักษณะและคุณสมบัติของการดูดซับที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ในการดูดซับ Cu (II), Ni (II) และ Cd (II) โดยศึกษาผลของพีเอช ความเข้มข้นของเหล็ก และอุณหภูมิที่ใช้ในการเคลือบ ด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) และเทคนิค X – Ray Diffraction Spectroscopy (XRD) และใช้เทคนิค Energy Dispersive Analysis of X – Ray (EDAX) เพื่อหาลักษณะของการดูดซับที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากเส้นสเปกตรัมของธาตุที่ปรากฏหลังจากนำตัวอย่างทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการดูดซับแบบแบตช์และผ่านการล้างแล้วไปวิเคราะห์ โดยหากมีการเปลี่ยนแปลงของธาตุหรือองค์ประกอบเกิดขึ้น แสดงว่าการดูดซับนั้นเป็นการดูดติดผิวทางเคมี (chemisorption) ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะไม่เกิดขึ้นหากเป็นการดูดติดทางกายภาพ ผลการทดลองสรุปได้ว่า ทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะประกอบด้วยรูพรุนและพื้นผิวที่มีความเฉพาะตัวสูง เนื่องจากการมีเหล็กออกไซด์ไปเกาะติดอยู่ โดยการเคลือบที่พีเอชสูงเหล็กออกไซด์มีแนวโน้มจะเกิดเป็นเกอร์ไทต์ และมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักได้ดี แต่มีความสามารถในการต้านทานกรดต่ำ ในขณะที่การเคลือบที่อุณหภูมิสูงจะช่วยเพิ่มความเสถียรของออกไซด์ที่เคลือบอยู่ โดยมีฮีมาไทต์

เป็นรูปแบบหลักที่เกิดขึ้น และพบว่า การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักได้ในช่วงพีเอชที่กว้างกว่าและกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าการตกตะกอน

Lai และคณะ (2000) พบว่าทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ บนเม็ดทรายจะมีปริมาณเหล็กที่เคลือบอยู่ประมาณ 1-2 mg Fe/g quartz sand ซึ่ง pH ที่ใช้เคลือบมีบทบาทสำคัญในการก่อตัวของเหล็กออกไซด์และการกำจัดโลหะหนัก โดยเหล็กออกไซด์ที่เตรียมได้ที่พีเอชสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดเป็นเกอร์ไทต์ซึ่งสามารถกำจัด Cd (II) และ Ni (II) ได้ดี แต่ถ้าทำการเคลือบที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเหล็กออกไซด์ในรูปฮีมาไทต์เป็นหลัก โดยอัตราในการดูดซับโลหะหนักจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นและเกิดดุลยภาพที่เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง

ชาญวิทย์ ศุภรานนทร์รัตน์ (2000) ได้ศึกษาผลของฟลูออไรด์ในน้ำเสียต่อการดูดซับของตะกั่วบนทรายที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่าการดูดซับของตะกั่วและฟลูออไรด์บนทรายเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์จะเข้าสู่ภาวะสมดุลภายในเวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง โดยการดูดซับของตะกั่วจะน้อยลงหากมีความเข้มข้นของตะกั่วในช่วงเริ่มต้นมากขึ้น ส่วนการดูดซับของฟลูออไรด์จะเพิ่มขึ้นหากเพิ่มฟลูออไรด์เริ่มต้นมากขึ้น และพีเอชเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับของไอออนทั้งสองชนิด โดยการดูดซับของตะกั่วจะดีที่สุดในช่วงพีเอช 5 - 8 ส่วนฟลูออไรด์จะดีในช่วงพีเอช 4-5 และจะดูดซับลดลงเมื่อพีเอชสูงขึ้น ส่วนความเข้มข้นของไอออนรวม (ความเข้มข้นของโซเดียมไนเตรต) ไม่มีผลต่อการดูดซับของตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์ แสดงว่าการดูดซับของตะกั่วเป็นการดูดซับผิวทางเคมี (inner - sphere surface complex) ส่วนเมื่อเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ผสมกันระหว่างตะกั่วและฟลูออไรด์นั้น พบว่าไม่มีความแตกต่างกับการดูดซับของตะกั่วและฟลูออไรด์ในช่วงที่ยังไม่ผสมกัน แสดงว่าการดูดซับของฟลูออไรด์เป็นการดูดซับผิวทางกายภาพ (outer - sphere surface complex) ภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดตะกั่วและฟลูออไรด์พร้อมกันคือ อัตราส่วนจำนวนโมลของตะกั่วต่อฟลูออไรด์เท่ากับ 1 ต่อ 10 ที่พีเอช 6 เมื่อทดลองกับน้ำเสียที่ได้จากการทำงานจริงพบว่าการกำจัดทำได้ดีที่พีเอช 8 ซึ่งอาจเกิดจากการมีสารเจือปนอื่นๆ ในน้ำเสียทำให้ภาวะการกำจัดตะกั่วบนทรายเคลือบเหล็กออกไซด์แตกต่างออกไป

Katsoyiannis และ Zouboulis (2002) ได้ประยุกต์ใช้โพลีเมอร์ประเภทโพลีสไตรีน และ poly HIPE มาเป็นตัวกลางในการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ พบว่าทั้งสองสามารถกำจัดอาร์ซีนิกออกจากน้ำเสียได้ดี โดย poly HIPE สามารถกำจัดอาร์ซีนิกในน้ำเสียได้ดีกว่าโพลีสไตรีน โดยประสิทธิภาพที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของเหล็กไฮดรอกไซด์ที่เกาะอยู่บนผิวของตัวกลาง ซึ่งหากมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น และการที่ตัวกลางมีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) อย่าง polyHIPE นี้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอาร์ซีนิกดีขึ้นเพราะสามารถยึดจับกับเหล็กไฮดรอกไซด์ได้มากขึ้น

อาจพบ เนียมขนาด (2002) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยดินเบาเคลือบเหล็กออกไซด์ โดยทดสอบการกำจัดไอออนของโลหะ Pb (II), As (II) และ Cd (II) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับชนิดโลหะหนัก ความเข้มข้นของโลหะหนัก พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์และระยะเวลาที่ตัวดูดซับสัมผัสกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วย Pb 10-100 ppm, As 30 ppm หรือ Cd 10 ppm แยกกัน พบว่าดินเบาเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์สามารถดูดซับ Pb (II) และ Cd (II) ได้สูงกว่า 99% และสามารถดูดซับ As (II) ได้ 68%

ศุภฤกษ์ รักสมบัติ (2001) ได้ศึกษาการกำจัดสารประกอบของปรอทจากไฮโดรคาร์บอนบนตัวดูดซับ การทดลองทำในระบบไม่ต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 30, 50 และ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เมอร์คิวริกคลอไรด์ และไดฟิโนลเมอร์คิวรีเป็นตัวแทนสำหรับสารประกอบปรอทในรูปอนินทรีย์และอินทรีย์ที่ปรากฏอยู่ในปิโตรเลียม เมอร์คิวริกคลอไรด์ และไดฟิโนลเมอร์คิวรีถูกเติมลงในโทลูอีนเพื่อเตรียมสารละลายที่มีปรอทในปริมาณ 1 ส่วนในล้านส่วน โดยตัวดูดซับที่ใช้คือซลิคาที่เคลือบด้วยนิกเกิลออกไซด์ โครเมียมออกไซด์ เพอริกออกไซด์ โมลิบดีนัมออกไซด์ และแมงกานีสออกไซด์ โดยเป็นโลหะออกไซด์บนซลิคาซึ่งเตรียมโดยเทคนิคการเคลือบฝัง (impregnation) ปริมาณโลหะที่เคลือบฝังอยู่บนซลิคาคิดเป็นร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนักของตัวดูดซับ การศึกษาการดูดซับแสดงว่าตัวดูดซับข้างต้นว่องไวต่อการกำจัดสารประกอบปรอท และความสามารถในการกำจัดสารประกอบปรอทขึ้นกับชนิดของโลหะออกไซด์ ซึ่งพบว่าโมลิบดีนัมออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์มีความสามารถในการกำจัดเมอร์คิวริกคลอไรด์สูง ส่วนโครเมียมออกไซด์และโมลิบดีนัมออกไซด์มีความสามารถในการกำจัดไดฟิโนลเมอร์คิวรีสูง ผลของการกำจัดขึ้นกับอุณหภูมิ โดยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้สูงขึ้นความสามารถในการกำจัดปรอทจะสูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะนำตัวกลางประเภท ซลิคา เจล มาใช้เป็นตัวรองรับเหล็กออกไซด์ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูง มีการกระจายตัวได้ดีในน้ำ และแยกออกจากน้ำได้ง่าย ซลิคาเจลประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถทำปฏิกิริยาได้อยู่บนพื้นผิวโดยรอบ การปรับปรุงคุณสมบัติพื้นผิวของซลิคาเจล ทำได้หลายวิธี วิธีการหนึ่งที่สามารถดัดแปลงพื้นผิวของซลิคาเจล คือการปรับปรุงพื้นผิวด้วยออกไซด์ของเหล็ก โดยกระบวนการ impregnation ที่เกิดจากการทำให้อิมัลชันรวมกับการตกตะกอน และเกิดการรวมตัวขึ้นแทนที่ ในขณะที่ระเหยเอาตัวทำละลายออกไป

Xu และ Axe (2004) ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาลักษณะของซลิคาที่เคลือบด้วยเหล็กออกไซด์และทำการดูดซับโลหะหนัก Ni (II) เพื่อพิจารณาถึงการเคลื่อนย้ายของโลหะหนักในดิน

และตะกอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เนื่องจากการดูดซับที่สำคัญเกิดจากพื้นผิวของเหล็กออกไซด์ และซลิคาซึ่งมีอยู่ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม จากการศึกษาพบว่าปริมาณเหล็กที่เคลือบอยู่บนผิวของซลิคาอยู่ในช่วง 0.59 – 21.36 mgFe/g solid โดยปัจจัยสำคัญของปริมาณเหล็กที่พบบนผิวของซลิคา โดยปริมาณเหล็กจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ยจาก 0.85 เป็น 9.6 mgFe/g solid เมื่อขนาดของซลิคา ลดลงจาก 1.5 เป็น 0.2 mm และปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์ที่เคลือบบนพื้นผิวของซลิคาเป็นพันธะทางเคมี โดยซลิคาเคลือบเหล็กออกไซด์สามารถกำจัด Ni (II) ได้ดีกว่าซลิคาที่ไม่ได้เคลือบมาก

จากการศึกษาเบื้องต้น พบว่ายังไม่มีหรือนำซลิคาเจลที่ใช้แล้วมาเป็นตัวกลางในการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะ ในงานวิจัยนี้จึงสนใจนำซลิคาเจลที่ใช้แล้วมาปรับปรุงพื้นผิวโดยการเคลือบด้วยเหล็กออกไซด์ เพื่อใช้เป็นตัวดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสีย