

การตรวจเอกสาร

เหล็ก

เหล็กเป็นโลหะที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างมาก และมีความสำคัญต่อมนุษย์ในด้านอุตสาหกรรม ทั้งในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง การผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า ยานยนต์ โดยเหล็กบริสุทธิ์ มีคุณสมบัติทั่วไป ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของเหล็กบริสุทธิ์

คุณสมบัติทั่วไป	ค่าที่พบ
สัญลักษณ์	Fe
เลขอะตอม	26
น้ำหนักอะตอม	55.85
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Weight)	7.87 ¹
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	1,535
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	3,000
ความร้อนจำเพาะ (0-100 องศาเซลเซียส), แคลอรีต่อกรัม	65
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย (แคลอรีต่อกรัม)	1,598

หมายเหตุ¹ ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) ของเหล็กออกไซด์ จากสเกลเหล็กโรงงานผลิตเหล็กรีดร้อน เท่ากับ 4.86 (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ, 30 มีนาคม 2549)

ที่มา: มานพ (2545)

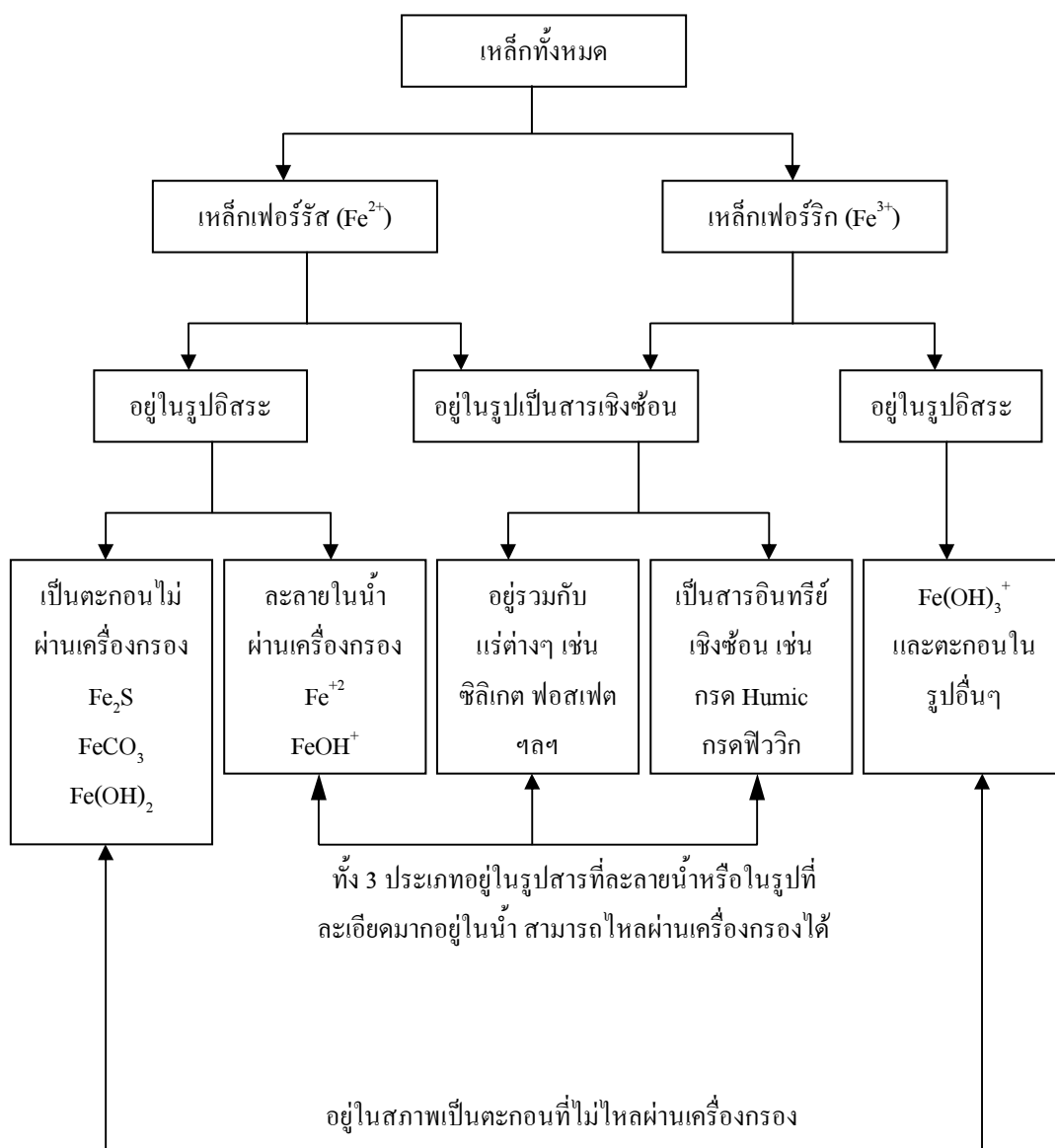
เหล็กที่อยู่ในธรรมชาติจะไม่เกิดอยู่ในรูปอิสระ โดยจะรวมตัวกับธาตุอื่นๆ เช่น ออกซิเจน (Oxygen, O) หรือ ซัลเฟอร์ (Sulfur, S) นอกจากนี้เหล็กยังรวมตัวอยู่กับดินเหนียว (Clay Ironstone) บางชนิดรวมอยู่กับถ่านหิน (Blackband Ironstone) โดยเหล็กที่พบในสภาพธรรมชาติที่เป็นสินแร่เหล็ก (Iron Ore) ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงสินแร่เหล็กที่พบในธรรมชาติและปริมาณเหล็กที่เจือปนอยู่

ชื่อเรียก	สูตรเคมี	ปริมาณเหล็กที่เจือปนอยู่
แมกนีไทต์ (Magnetite)	Fe_3O_4 หรือ $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$	45-70%
ฮีมาไทต์ (Hematite)	Fe_2O_3	40-65%
ลิโมนาइट (Limonite)	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	40-60%
ไซด์ไรต์ (Siderite)	FeCO_3	25-40%
ไพไรต์ (Pyrite)	FeS_2	60-65%

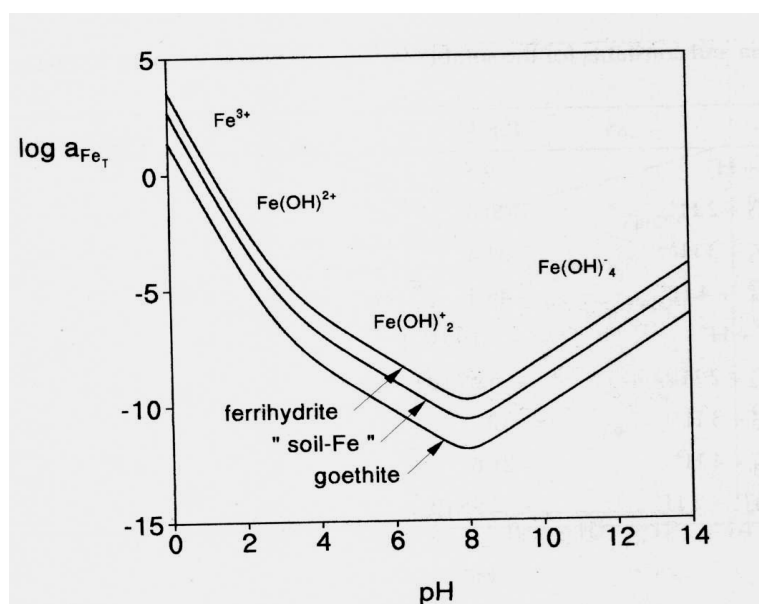
ที่มา: มานพ (2545)

นอกจากนี้ยังพบเหล็กอยู่ในแหล่งน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนในรูปของสารละลาย ได้แก่ เฟอรัส (Fe^{2+}) หรือ เฟอริก (Fe^{3+}) เช่น เฟอรัสไฮดรอกไซด์ไอออน (FeOH^+) เฟอริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) กรดฮิวมิก (Humic) กรดฟิววิก (Fulvic) หรือรวมตัวกับแร่ธาตุต่างๆ เช่น ซิลิเกต (Silicate) ฟอสเฟต (Phosphates) โดยเหล็กที่ละลายในน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 1 ทั้งนี้ ความสามารถในการละลายน้ำของเหล็กจะขึ้นอยู่กับค่าของ พีเอช (pH) โดยพีเอชต่ำจะมีความสามารถในการละลายได้ดีกว่าพีเอชสูง ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 แสดงเหล็กที่ละลายอยู่ในน้ำ

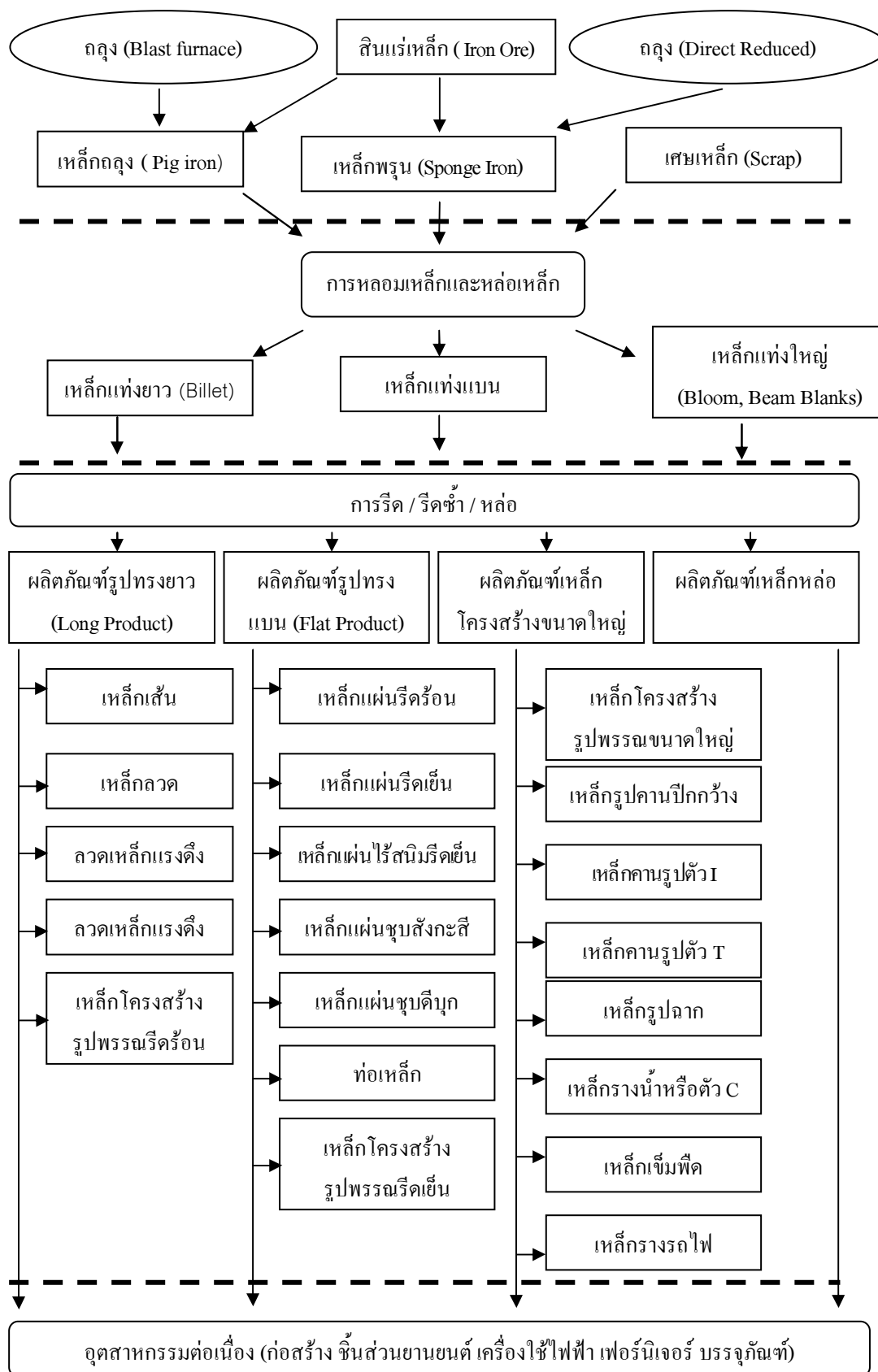
ที่มา: ณรงค์ (2540)



ภาพที่ 2 ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของเหล็กที่พีเอช (pH) ของน้ำต่างๆ กัน
ที่มา: Cornell and Schwertmann (1996)

1. การผลิตเหล็ก

เหล็กที่อยู่ในธรรมชาติเป็นสินแร่เหล็ก (Iron Ore) ซึ่งอยู่ในรูปของเหล็กออกไซด์ เหล็กซัลไฟด์ หรือเหล็กคาร์บอเนต การนำมาใช้ประโยชน์ต้องผ่านกระบวนการต่างๆ โดยเริ่มจากการผลิตสินแร่เหล็ก (Iron Ore Production) การถลุงเหล็ก (Iron Production) การผลิตถ่านโค้ก (Coke Production) การหลอมปรุงแต่งเหล็กและหล่อเหล็กแท่ง (Steel Making) การรีดเหล็ก (Rolling Mill) โครงสร้างการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 โครงสร้างการผลิตของอุตสาหกรรมเหล็ก

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม (2545)

2. การผลิตสินแร่เหล็ก

การผลิตสินแร่เหล็กเริ่มตั้งแต่การนำสินแร่เหล็กขึ้นมาจากพื้นดิน เรียกว่าการทำเหมืองแร่เหล็ก (Iron Ore Mining) มี 2 ลักษณะ คือ การทำเหมืองแบบเปิด (Open-Pit Mining) โดยการขุดเปิดผิวหน้าดินจนถึงชั้นแร่เหล็กแล้วขุดตักสินแร่เหล็ก และ การทำเหมืองแบบใต้ดิน (Under Ground Mining) เป็นการทำเหมืองแบบเจาะเป็นอุโมงค์ลงไปใต้พื้นดินจนถึงชั้นสินแร่จึงทำการขุดนำสินแร่ขึ้นมา จากนั้นจะทำการเตรียมสินแร่ (Ore Preparation) บดย่อยสินแร่ (Crushing and Grinding) ทำการคัดแยกสิ่งเจือปนและปรงแต่งสินแร่ให้เข้มข้น (Ore Concentration) เมื่อแยกได้สินแร่เหล็กที่บดย่อยละเอียดแล้ว จะนำมาปรงแต่งสินแร่เหล็กโดยการผสมปูนขาว ถ่านโค้ก ผุนจากเตาถลุง และน้ำ และทำให้เป็นก้อน (Agglomeration)

3. การผลิตถ่านโค้ก

ถ่านโค้กมีความจำเป็นในการถลุงแร่เหล็ก องค์ประกอบของถ่านโค้กเป็นคาร์บอนซึ่งจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและให้ความร้อนออกมาในการหลอมละลายแร่เหล็ก โดยคาร์บอนจะเป็นตัวลดออกซิเจน (Reducing Agent) ที่อยู่ในแร่เหล็กซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) การผลิตถ่านโค้กมาจากการอบหรือกลั่นสลายถ่านหิน (Destructive Distillation of Coal) โดยการผ่านความร้อนที่อุณหภูมิสูง 1,350 องศาเซลเซียส ไปยังถ่านหินในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ซึ่งเจือปนอยู่ในถ่านหินอยู่ประมาณร้อยละ 20-30 เรียกว่า ขบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เริ่มจากการนำถ่านหินที่จะทำถ่านโค้กที่มีขนาดประมาณ 0.5 เซนติเมตร ใสลงไปในเตาอบถ่านโค้กโดยใช้ก๊าซร้อนจากกระบวนการถลุงแร่เหล็ก (Blast Furnace) หรือความร้อนจากการผลิตถ่านโค้กเอง หรืออาจใช้ทั้งสองร่วมกัน

4. การถลุงเหล็ก

การถลุงเหล็กเป็นกระบวนการทำให้สินแร่เหล็กเป็นเหล็ก โดยการลดออกซิเจน เป็นปฏิกิริยา (Reduction) มีวิธีการถลุงเหล็ก คือ การถลุงโดยเตาพ่นลม (Blast Furnace) เป็นการถลุงโดยให้ความร้อนสินแร่เหล็กจนหลอมละลาย ออกซิเจนในสินแร่เหล็กจะถูกดึงออก (Reduce) ด้วยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซึ่งได้จากการเผาถ่านโค้ก ส่วนสารปนเปื้อน (Impurities) อื่นๆ ที่ปะปน

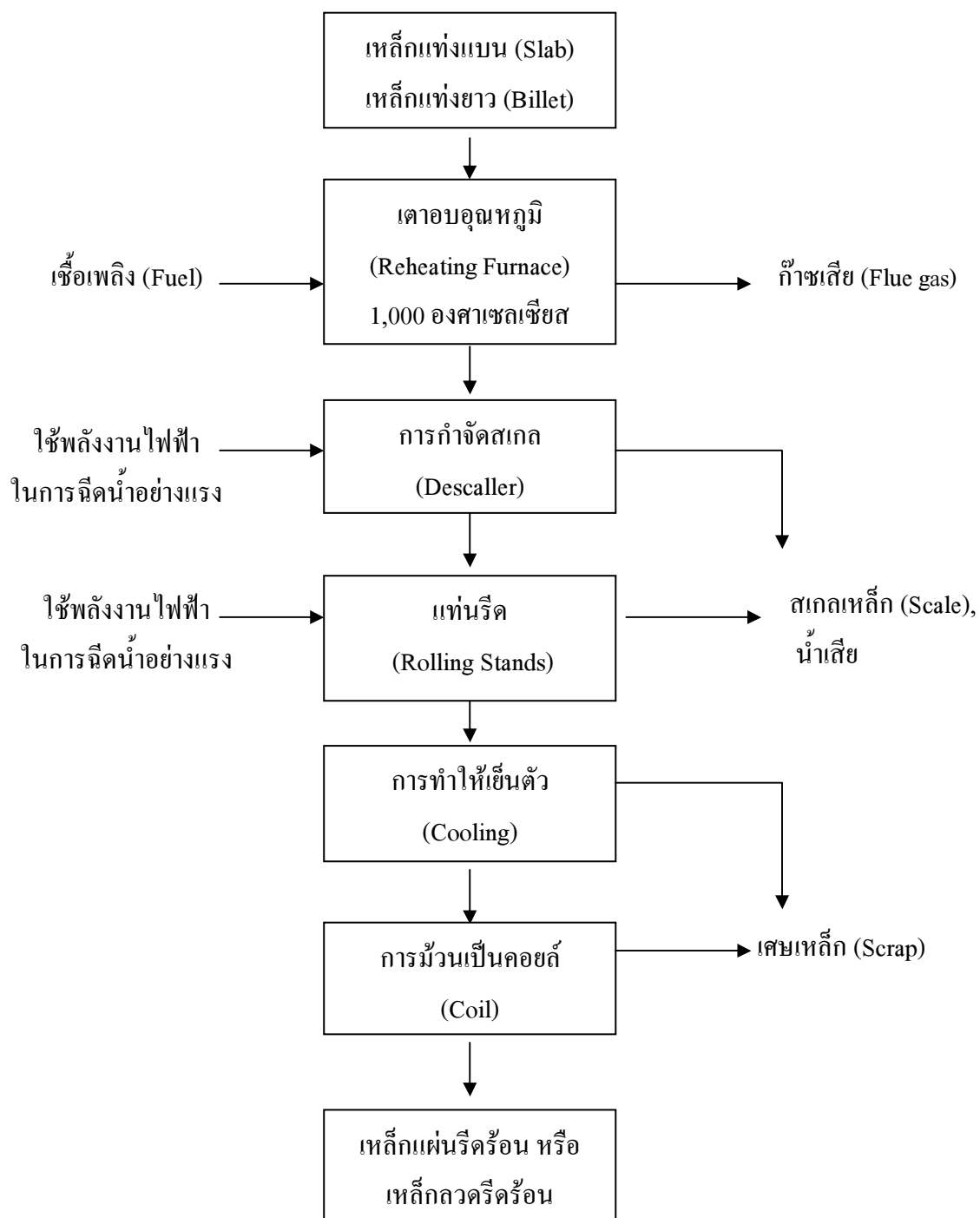
มากับสินแร่ จะทำปฏิกิริยากับหินปูนที่ใส่เข้าไปเพื่อเปลี่ยนสารปนเปื้อนให้อยู่ในรูปของตะกอน เรียกว่า Slag เหล็กที่ผลิตได้จากวิธีนี้มีชื่อเรียกว่า เหล็กดิบ หรือ เหล็กถลุง

5. การหลอมปรุงแต่งเหล็ก และหล่อเหล็กแท่ง

ขั้นตอนการปรุงแต่ง เหล็กดิบ เหล็กพูน หรือเศษเหล็ก ให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ ควบคุมปริมาณธาตุต่างๆ ที่เจือปนให้อยู่ในปริมาณที่จำกัดเพื่อให้เหล็กมีคุณสมบัติ ตามที่ต้องการ เช่น ทำให้จุดหลอมเหลวของเหล็กต่ำลง ทำให้แข็ง (Hardness) ความเปราะ (Brittleness) ความแข็งแรง (Strength) ความทนทานต่อการเสียดสี หรือการสึกหรอ กระบวนการปรุงแต่งเหล็ก (Steel Making Process) เป็นขบวนการลดปริมาณคาร์บอนให้อยู่ในปริมาณที่ต้องการ และกำจัดสารมลทินต่างๆ เช่น ฟอสฟอรัส ซิลิกอน แมงกานีส และธาตุต่างๆ ในเหล็กดิบ หรือเหล็กพูนออกไป และมีการเติมเหล็กผสมธาตุ (Ferroalloy) บางชนิดลงไปในการผลิต เพื่อให้ได้เหล็กที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ เมื่อทำการหลอมละลายเหล็กและปรุงแต่งเหล็กให้มีคุณสมบัติโดยการผสมธาตุต่างๆ ตามที่ต้องการแล้ว น้ำเหล็กเหลวจะเทลงในแบบหล่อต่างๆ เช่น แบบแท่งยาว (Billet) หรือแท่งแบน (Slab) เพื่อส่งเป็นวัตถุดิบในขบวนการรีดเหล็กต่อไป สำหรับกรรมวิธีการผลิตที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไปมีหลายแบบ เช่น Open Hearth Furnace, Electric Furnace และ Basic Oxygen Furnace

6. การรีดเหล็ก

การรีดเหล็กเป็นการใช้พลังงานกลในการรีดลดขนาดโดยมีหลักการ คือ การให้ความร้อนกับเหล็กแท่งแบนหรือเหล็กแท่งยาวให้มีอุณหภูมิประมาณ 1,000 องศาเซลเซียสโดยเตาอบเหล็กแท่ง (Reheating Furnace) เพื่อลดความเครียดและให้เหล็กอ่อนตัวรีดได้ง่าย จากนั้นแท่งเหล็กจะเข้าสู่กระบวนการรีดลดขนาด (Rolling Mill) โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าไปขับเคลื่อนรีดต่างๆ เมื่อได้ตามขนาดที่ต้องการ จะทำให้เย็นตัวลง (Cooling) และทำให้เป็นม้วนหรือคอยล์ (Coil) เหล็กแท่งแบน (Slab) หรือเหล็กแท่งยาว (Billet) ที่ได้จากการหลอมปรุงแต่งเหล็กและหล่อเหล็ก จะถูกนำมารีดเพื่อให้เป็นผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ โดยเหล็กแท่งแบนจะถูกรีดเป็นเหล็กแผ่น เหล็กแท่งยาวจะรีดได้เป็นเหล็กกลวด เหล็กเส้น ดังแสดงภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการผลิตเหล็กรีดร้อน

7. มลพิษหรืออากาศของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมหลัก

อุตสาหกรรมหลักมีมลพิษหรืออากาศของเสียที่เกิดขึ้นเกือบทุกขั้นตอนของการผลิตเหล็ก โดยเฉพาะก๊าซเสียและน้ำเสีย นับตั้งแต่ขั้นตอนการนำสินแร่ขึ้นมาจากพื้นดิน การผลิตถ่านโค้ก การถลุง การหลอมหล่อเหล็ก และการรีด ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 3 อากาศเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กครบวงจร

ประเภทอากาศเสีย	แหล่งที่เกิด
ฝุ่น (Particulates)	ปล่องของหม้อน้ำ (Stack of Boiler Plant) เตาถลุง (Steel Making Furnace) โรงเตรียมสินแร่ และปั้นแร่ (Ore Preparation, Sinter Plant, Slag Plant)
ก๊าซเสีย (Flue Gases)	
สารประกอบซัลเฟอร์	การเผาไหม้เตาทุกชนิด
คาร์บอนมอนอกไซด์	ในเตาถลุงแบบ Blast Furnace
ไซยาไนด์	ในเตาถลุงแบบ Blast Furnace และเตาเผาถ่านหิน
ฟลูออไรด์	เตาหลอมเหล็ก (Steel Making Furnace)
สารเบนซีน (Benzene)	โรงงานแยกผลพลอยได้จากการผลิตถ่านโค้ก

ที่มา: Hebert F. (1971)

ตารางที่ 4 น้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมผลิตเหล็กครบวงจร

สิ่งที่ปะปนในน้ำเสีย	แหล่งที่เกิด
<u>น้ำมัน :</u>	
Rolling Oils	Rolling mill, น้ำมันที่ใช้กับแท่นรีด
Lubricants	น้ำมันหล่อลื่นทุกชนิดที่ใช้เครื่องจักรทุกชนิด
Hydraulic Oil	น้ำมันที่ใช้กับปั๊มทุกชนิดที่มีแรงกด
Quench Oil	Heat Treatment, น้ำมันที่ใช้ในขบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน
Fuel Oil	หม้อต้มน้ำ (Boiler Plant), เตา (Furnace)
Solvent	การผสมสีที่ใช้ในโรงงาน
Tar and Pitch	โรงงานผลิตถ่านโค้ก โรงงานแยกผลพลอยจากการผลิตถ่านโค้ก
<u>สารแขวนลอย :</u>	
Scale	Rolling Mills
Sand	Foundry
Fly Ash	เตาเผาถ่านหิน
Coal and Coke	โรงงานผลิตถ่านโค้ก
<u>สารเคมี :</u>	
Acid Sludge	โรงงานผลิตผลพลอยได้จากถ่านโค้ก
Caustic Wash	โรงงานผลิตผลพลอยได้จากถ่านโค้ก
Brine (น้ำเกลือ)	ในขั้นตอนการผลิตน้ำที่ผ่านเครื่องกรอง
Cleaners	น้ำล้างโรงงาน, ล้างไขมัน
สารเคมีอันตราย	โรงงานผลิตถ่านโค้ก
<u>ความร้อน :</u>	
น้ำหล่อเย็น	ในเตาถลุง กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อน การหล่อเย็นลูกรีด

ที่มา: Hebert F. (1971)

ออกไซด์ของโลหะไฮดรอกไซด์

ออกไซด์ของธาตุหลายชนิด เช่น ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็กเป็นสิ่งที่มียู่มากมาย และพบได้ทั่วไปตามเปลือกโลก ออกไซด์เหล่านี้ถ้าถูกล้อมรอบด้วยน้ำ โดยทั่วไปจะเกิดไฮดรอกไซด์ปกคลุมพื้นที่ผิว (Anderson and Rubin, 1981)

1. รูปแบบของหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวสัมผัสของออกไซด์และน้ำ

จากการเกิดความไม่สมดุลของแรงทางเคมีที่ผิวสัมผัสของออกไซด์และน้ำเกิดจากการดูดซับทางเคมี (Chemisorbing) กับโมเลกุลของน้ำและเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว นอกจากนี้ยังเกิด Hydrogen bond ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นชั้นของการดูดซับทางกายภาพ (Physical Absorbent Water) ความแตกต่างของรูปแบบที่หลากหลายของไฮดรอกซิลเป็นผลทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่แตกต่างกัน

2. ความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวออกไซด์

การหาความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลของ $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ สามารถทำได้โดยวิธี BET Treatment ของการดูดซับโดยก๊าซไนโตรเจน ค่าความเข้มข้นของหมู่ไฮดรอกซิลเท่ากับ 5.5 ต่อ 100 ($\text{\AA}$)² นอกจากนี้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลของเหล็กออกไซด์ ยังมีอัตราเกิด Hydroxyl (Hydroxylation) เกิดได้อย่างรวดเร็ว (Anderson and Rubin, 1981)

3. คุณสมบัติของไฮดรอกไซด์เฟอร์ริกออกไซด์

3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบ

ไฮดรอกไซด์เฟอร์ริกออกไซด์หรือที่เรียกว่า Amorphous Ferric Hydroxide และ Amorphous Iron Oxyhydroxide ภายใต้การไฮโดรไลซิสการละลาย (Fe (III)) ที่อุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส จะเกิดการตกตะกอนเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว ไฮดรอกไซด์เฟอร์ริกออกไซด์ที่ตกตะกอนใหม่นี้มีรูปร่างค่อนข้างกลมและเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 1 ถึง 10 นาโนเมตร และเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการรวมตะกอนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เนื่องด้วยตะกอนที่เกิดขึ้นมีรูพรุนสูงมากจึงมี

น้ำรวมอยู่ในโครงสร้างจำนวนมากจึงมีลักษณะเหมือนเจลมากกว่าของแข็ง (Dzombak and Morel, 1990)

Dzombak and Morel (1990) กล่าวว่าของแข็งไฮดรอสเฟอรไรต์มีรูปร่างไม่แน่นอน โดยทั่วไปจะเขียนสูตรทางเคมีเป็น $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ โดยส่วนประกอบของแข็งไฮดรอสเฟอรไรต์จะแปรค่าอยู่ระหว่าง $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ถึง $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 1\text{H}_2\text{O}$ จากการวัดค่าความหนาแน่นของไฮดรอสเฟอรไรต์จะมีอยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 4.0 กรัม /ลบ.ซม. และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.5 กรัม /ลบ.ซม.

ในกระบวนการบ่ม (Aging) สารละลาย Fe (II) ที่อุณหภูมิ 20-30 องศาเซลเซียส ไฮดรอสเฟอรไรต์จะเปลี่ยนรูปเป็นผลึกของเหล็กออกไซด์ โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของ Goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$) อัตราการเกิดผลึกเหล็กออกไซด์ จะเกิดเร็วขึ้นในสารละลายที่มี Fe (III) และ pH สูง (Dzombak and Morel, 1990)

3.2 พื้นที่ผิวของไฮดรอสเฟอรไรต์

การวัดขนาดของพื้นที่ผิวของไฮดรอสเฟอรไรต์ สามารถทำได้โดยวิธีวิเคราะห์ของ BET ใช้การดูดซับโดยก๊าซไนโตรเจน เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุด แต่เนื่องจากวิธีนี้ไม่ค่อยเหมาะสมที่จะใช้กับวัสดุที่มีรูพรุนดังเช่นเฟอรไรต์ ทำให้ผลที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ (Dzombak and Morel, 1990) ขนาดพื้นที่ผิวในทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 840 ตร.ม./กรัม ของไฮดรอสเฟอรไรต์ อย่างไรก็ตามค่าที่แนะนำให้นำไปใช้งานคือ 600 ตร.ม./กรัม

4. การดูดซับของไอออนที่ผิวสัมผัสของโลหะไฮดรอกไซด์ในน้ำ

ออกไซด์ของธาตุหลายชนิด เช่น ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก คุณลักษณะที่สำคัญในการดูดซับไอออนต่างๆที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งสามารถพบได้โดยทั่วไปในดิน ในน้ำและในชั้นตะกอน และรูปแบบอื่นๆในทางธรณีวิทยา

4.1 การดูดซับของประจุบวก

ไอออนของโลหะประจุบวกนอกจากจะรวมตัวกับหมู่ไฮดรอกซิลที่อยู่ในน้ำแล้ว ยังสามารถจับยึดอย่างแข็งแรงกับพื้นผิวไฮดรอกซิลออกไซด์ได้ด้วย (Dzomobak and Morel, 1981) สำหรับโลหะทรานสิชัน ส่วนใหญ่จะถูกดูดซับเพิ่มจากศูนย์ไปถึงเกือบ 100 % ในช่วงพีเอช แคบๆ เป็นที่ทราบโดยทั่วไปจะคู่กับการปล่อย H^+ (หรือเรียกว่าการดูดซับของ OH^-) แต่ Net Stoichiometry ของกระบวนการดูดซับยังเป็นที่เข้าใจน้อย ประจุบวกและประจุลบที่ถูกดูดซับบนผิวออกไซด์จะมีผลตอบสนองทั้งแรงผลักทางไฟฟ้าสถิตย์ได้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโคออร์ดิเนตเคมีของไอออนโลหะที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิวมีความสำคัญอย่างมาก (Stumm *et al.*, 1976) ไอออนโลหะเหล่านี้เป็นกรดอ่อน และแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่พื้นผิว การดูดซับของประจุบวกโดยเหล็กไฮดรอกไซด์ พบว่าเกือบจะไม่มีผลกับ Ionic Strength เลย ถึงแม้ว่าการดูดซับของประจุบวกบนไฮดรอกไซด์อื่นๆ เช่น Quartz, Titania และ Clay minerals บางอย่างอาจจะมีผลกับ Ionic Strength บ้าง ส่วนประจุบวกที่มีการดูดซับที่ไม่แข็งแรง (กรดแก่) เช่น ไอออนของธาตุ IIA (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+}) โดยทั่วไปจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวแบบโคเวเลนต์และการดูดซับของไอออนเหล่านี้จะมีผลกับแรงไฟฟ้าสถิตย์ และ Ionic Strength ด้วย นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับ โดยทั่วไปพบว่าการดูดซับของประจุบวกสองจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

5. สมดุลการดูดซับสำหรับโลหะและลิแกนด์บนผิวออกไซด์

Stumm and Morgan (1995) พบว่าสมดุลของความเป็นกรด-ด่าง ไม่เพียงแต่จะมีผลเป็นพิเศษต่อโลหะในการละลาย ยังมีผลถึงประจุที่พื้นผิวออกไซด์ด้วย การมีอยู่ของลิแกนด์สามารถเพิ่มหรือลดความสามารถการดูดซับ โดยขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและลิแกนด์ ชนิดของสารที่ใช้ในการดูดซับและพีเอช ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 สมการดูดซับของ Surface Complexation

Acid-Base Equilibrium for Surface		Reactions
$S-OH + H^+$	$\rightleftharpoons$	$S-OH_2^+$
$S-OH + OH^-$	$\rightleftharpoons$	$S-O^- + H_2O$
Metal-binding (M^{Z+} = metal)		
$S-OH + M^{Z+}$	$\rightleftharpoons$	$S-OM^{(Z-1)+} + H^+$
$2 S-OH + M^{Z+}$	$\rightleftharpoons$	$S-O^- + H_2O$
$S-OH + M^{Z+} + H_2O$	$\rightleftharpoons$	$S-OMOH^{(Z-2)+} + 2H$
Ligand Exchange (L^- = Ligand)		
$S-OH + L^-$	$\rightleftharpoons$	$S-L + OH^-$
$2 S-OH + L^-$	$\rightleftharpoons$	$S-L^+ + 2 OH^-$
Ternary surface Complex Formation		
$S-OH + L^- + M^{Z+}$	$\rightleftharpoons$	$S-L + M^{(Z)+} + OH^-$
$S-OH + L^- + M^{Z+}$	$\rightleftharpoons$	$S-OM-L^{(Z-2)+} + 2H^+$

หมายเหตุ $S-OH$ Oxide Surface

ที่มา: Stumm and Morgan (1995)

แคดเมียม

โลหะหนัก (Heavy Metal) หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นตั้งแต่ 5 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะหนักคือ นำไฟฟ้า และนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว สามารถตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนคุณสมบัติทางเคมีด้านอื่นๆ เป็นสารเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นโลหะหนักเกิดการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม โดยการปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ และผลิตผลทางการเกษตร จะเกิดการสะสมและถ่ายทอดสู่มนุษย์ได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร เมื่อสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อจนถึงระดับหนึ่งจะก่อให้เกิดโรคหรือความพิการจนอาจถึงตายได้ (เกศสุชา, 2537)

โลหะหนักที่ทำการศึกษาวิจัยนี้ได้แก่ แคดเมียม ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี การนำไปใช้ประโยชน์ การแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม และความเป็นพิษ ดังนี้

1. คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

แคดเมียมเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มโลหะทรานสิชันหมู่ II B จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับสังกะสีในตารางธาตุ ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของแคดเมียมดังแสดงในตารางที่ 6

แคดเมียม เป็นโลหะหนัก มีสีขาว ฟา วาว มีลักษณะเนื้ออ่อน สามารถบิดโค้ง งอได้ และถูกตัดได้ง่ายด้วยมีด มักอยู่ในรูปแท่ง แผ่น เส้นลวด หรือเป็นผงเม็ดเล็กๆ ในอากาศที่มีความชื้น แคดเมียมจะถูกออกซิไดซ์เป็นแคดเมียมออกไซด์ ในธรรมชาติแคดเมียมมักจะอยู่รวมกับกำมะถันในรูปแคดเมียมซัลไฟด์ และมักปนอยู่ในสินแร่สังกะสี ตะกั่ว หรือทองแดง ดังนั้น ในการทำเหมืองแร่สังกะสีจะได้แคดเมียมซึ่งเป็นผลพลอยได้ (By Product) มีการนำโลหะแคดเมียมมาใช้ในวัสดุแผ่นผสมของอัลลอยด์ใช้ในการทำนิกเกิลแคดเมียม แบตเตอรี่ เป็นสารคงตัวในโพลีไวนิลคลอไรด์ ใช้ทำสีพลาสติกและแก้ว เป็นส่วนผสมของอมัลกัม (Amalgam) ที่ใช้ในร้านทันตแพทย์ ผลิตภัณฑ์ที่มีแคดเมียมเป็นส่วนประกอบถ้าให้ความร้อนเกินจุดหลอมเหลว (321 องศาเซลเซียส) จะเกิดควันของแคดเมียม (Cadmium Fumes) การนำเอาแคดเมียมมาใช้ทำให้เกิดการปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม ทั้งในอากาศ น้ำ และดิน รวมทั้งในอาหาร เมื่อมีมากๆ จะเกิดการสะสม

โดยเฉพาะมนุษย์และสัตว์ ถ้ามีการสะสมของแคดเมียมในร่างกายมากอาจก่อให้เกิดพิษได้ (สุวัจน์, 2549)

ตารางที่ 6 แสดงคุณสมบัติโดยทั่วไปของแคดเมียม

คุณสมบัติ	คุณสมบัติ
สัญลักษณ์	Cd
เลขอะตอม	48
โครงสร้างผลึก	Close-Packed Hexagonal
น้ำหนักอะตอม	112.41
ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม. ที่ 20 °ซ)	8.65
จุดหลอมเหลว (°ซ)	320.9
จุดเดือด (°ซ)	765
ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว(แคลอรี/กรัม)	13.2
ความร้อนแฝงของการเป็นไอ(แคลอรี/กรัม)	286.4
สถานะออกซิเดชัน	+2
สี	ขาว เงิน

ที่มา : Townshend (1995)

แคดเมียมสามารถพบโดยทั่วไปในธรรมชาติ อยู่ร่วมกับธาตุสังกะสี (Zinc) ตะกั่ว (Lead) และคอปเปอร์ซัลไฟด์ (Copper Sulfide) ในชั้นเปลือกโลกมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 0.2 ppm ในหินอัคนี (Igneous Rocks) พบแคดเมียมอยู่ในระดับต่ำ (<0.001-1.6 ppm) แต่ในหินตะกอน (Sedimentary Rock) พบแคดเมียมอยู่ในระดับสูง เนื่องจากหินตะกอนมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ ก้อนแร่ แมงกานีส (Manganese Nodule) และแร่ฟอสฟอไรต์ (Phosphorite) แคดเมียมจะพบมากในวัสดุที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบสูง เช่น ในถ่านหิน พบแคดเมียม 0.01-22 ppm และในน้ำมันดิบ พบแคดเมียม 0.01-16 ppm (Fergusson, 1990)

2. แคดเมียมในน้ำ

พฤติกรรมของธาตุแคดเมียมในสิ่งแวดล้อมจะมีลักษณะคล้ายกับธาตุสังกะสี แคดเมียมสามารถรวมตัวกับไอออนชนิดอื่นอยู่แล้วในรูปสารประกอบ ซึ่งมีอยู่ 4 ชนิดหลัก คือ แคดเมียมเฮไลด์ (Cadmium Halide) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide) แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium Oxide) และสารประกอบออร์แกโนแคดเมียม (Organocadmium Compound) รูปแบบแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับพีเอช (pH) รูปแบบของแคดเมียมยังสามารถพบในรูปของสารประกอบอื่นๆ ได้แก่ CdO , CdS , $\text{Cd}(\text{OH})_2$, CdCO_3 และ CdSiO_3 แต่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อย (สุวัจน์, 2549)

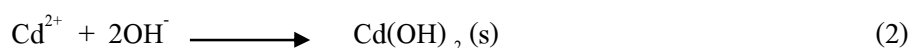
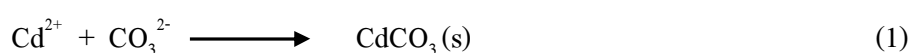
2.1) แคดเมียมเฮไลด์ (Cadmium Halide) มีอยู่ 4 ชนิด แต่ในรูปแคดเมียมคลอไรด์ (Cadmium Chloride : CdCl_2) เป็นรูปแบบที่สำคัญในสิ่งแวดล้อม รูปแบบที่พบบ่อย คือ CdCl^+ , CdCl_2 และ CdCl_3^- และประมาณร้อยละ 2.5 เปอร์เซ็นต์ ของแคดเมียมทั้งหมดจะพบในรูปของแคดเมียมไอออนอิสระ (Free Cadmium Ion : Cd^{+2}) (Fergusson, 1990) อย่างไรก็ตาม รูปแบบของแคดเมียมเฮไลด์ จะสามารถละลายในน้ำและเกิด Complex Ions

2.2) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide) สารประกอบแคดเมียมในรูปนี้เกิดขึ้นโดยการผ่านไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ลงในสารละลายแคดเมียม ($\text{Cd}(\text{II})$) ไอออนของ Cd^{+2} และ S^{2-} สามารถรวมตัวได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ เนื่องจากเป็นไอออนแบบมีขั้ว สารประกอบที่เกิดขึ้นสามารถละลายน้ำได้น้อยมาก แคดเมียมซัลไฟด์มักจะเป็นรูปแบบที่ค่อนข้างคงที่ และมักพบในสภาพแวดล้อมแบบรีดักชัน

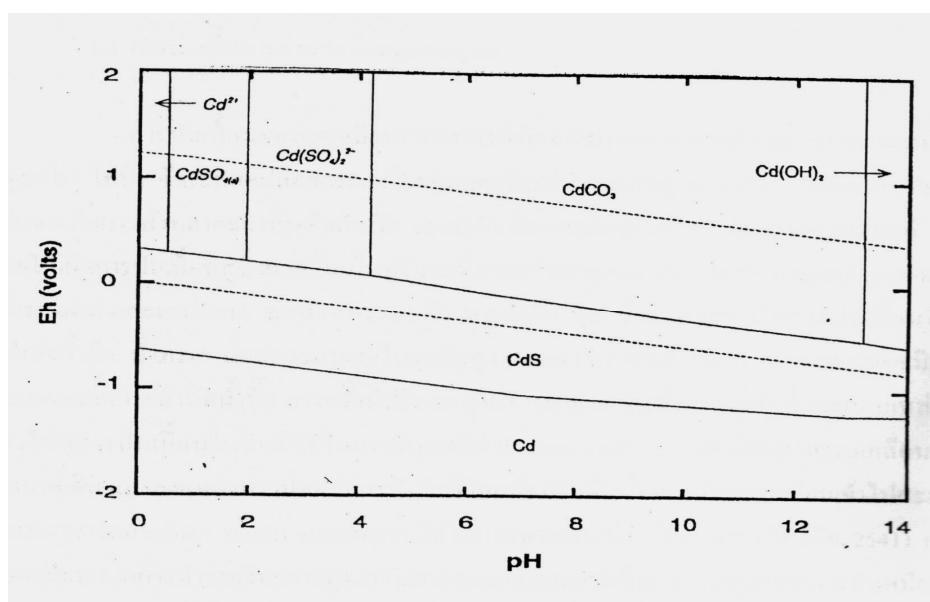
2.3) แคดเมียมออกไซด์ (Cadmium Oxide) รูปแบบของแคดเมียมออกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันธาตุแคดเมียมที่สัมผัสกับอากาศเป็นเวลานาน โดยสีของออกไซด์ที่เกิดขึ้นอาจมีสีที่แตกต่างกัน จากสีเขียว สีเหลือง และสีแดง บางครั้งอาจมีสีดำ โครงสร้างของแคดเมียมออกไซด์มีลักษณะคล้ายกับโซเดียมคลอไรด์ สามารถเปลี่ยนแปลงรูปได้เมื่อถูกความร้อน เนื่องจากการสูญเสียออกซิเจน แคดเมียมออกไซด์ละลายในกรด แต่ละลายได้น้อยในน้ำและในสภาพเป็นด่าง (Fergusson, 1990)

2.4) สารประกอบออร์กาโนแคดเมียม (Organocadmium Compound) สารประกอบดังกล่าวสามารถได้จากกการเตรียม Grignard Reagent ในสภาพที่เหมาะสม เช่น การเติม Dimethylcadmium ที่ 105.7 องศาเซลเซียส และ Dimethylcadmium ที่ 64 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 19 มิลลิเมตร-ปรอท สารประกอบดังกล่าวสามารถละลายตัวได้ในแหล่งน้ำ

Faust and Aly 1987 รายงานว่าแคดเมียมเมื่ออยู่ในน้ำจะอยู่ในรูป Cd^{2+} CdCO_3 (s) และ Cd(OH)_2 (s) ดังสมการที่ (1) และ (2)



โดยค่า pH สูงกว่า 10 ซึ่ง CdCO_3 สามารถละลายน้ำได้ประมาณ 300 ไมโครกรัมต่อลิตร และที่ pH เท่ากับ 10 Cd(OH)_2 ละลายน้ำได้ประมาณ 225 ไมโครกรัมต่อลิตร แต่หากมีการละลายของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ลงสู่น้ำเพิ่มขึ้นจะทำให้แคดเมียมไฮดรอกไซด์และแคดเมียมคาร์บอเนตที่ตกตะกอนอยู่จะเปลี่ยนรูปและสามารถละลายกลับขึ้นมาสู่น้ำได้อีก สำหรับแหล่งน้ำที่มีซัลเฟอร์อยู่เมื่อเกิด Reducing Condition แคดเมียมจะอยู่ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์ดังภาพที่ 5 (Smith, 1995)



ภาพที่ 5 แสดงขอบเขตสถานะของแคดเมียมในน้ำที่มีซัลเฟอร์และคาร์บอนเนต

(Sulfur Carbonate Water System) $Cd=0.001\text{ M}$; $S = 0.1\text{ M}$; $C = 0.1\text{ M}$.

ที่มา: Faust and Aly (1987)

แคดเมียมในรูป Hydrated Cd^{2+} มักพบในสภาพออกซิเดชัน โดยเฉพาะสภาพแวดล้อมโดยทั่วไปในแหล่งน้ำจืด และน้ำที่มีระดับความเค็มต่ำ แต่ในสภาพรีดักชันและมีซัลเฟอร์ปรากฏร่วมอยู่ด้วย แคดเมียมอาจอยู่ในรูป $CdHS^-$ (Fergusson, 1990)

รูปแบบของแคดเมียมบริเวณผิวน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เนื่องจากแคดเมียมอยู่ในรูปของ Cd^{2+} (2+ Oxidation State) ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันจะมีอิทธิพลค่อนข้างน้อยต่อรูปแบบของแคดเมียมที่ละลายในน้ำ การดูดซับขึ้นอยู่กับอนุภาคของแร่ดินเหนียว (Clay) และเหล็กออกไซด์ (Iron Oxide) จะมีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยารีดักชันธาตุแคดเมียมในน้ำ อย่างไรก็ตาม แคดเมียมไม่สามารถถูกเปลี่ยนรูปได้โดยพวกจุลชีพหรือที่เรียกว่า Methylation เหมือนกับธาตุปรอท (U.S.EPA, 1991)

3. การนำมาใช้ประโยชน์

แคลเซียมถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างมากในหลายด้าน ได้แก่ อุตสาหกรรมและการเกษตร อุตสาหกรรมแคลเซียมและเกลือของแคลเซียมจำนวนมากมักถูกนำมาใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า นำมาผสมกับโลหะอื่น เช่น อลูมิเนียม ปะทอ แมกนีเซียม นิกเกิล ทำเป็นโลหะผสม เช่น อัลลอยด์ ซึ่งนำไปทำเป็นอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ท่ออ เครื่องป้องกันไฟ เบ้าหลอม ส่วนประกอบรถยนต์ นอกจากนี้ยังทำเป็นแบตเตอรี่ นิกเกิล-แคลเซียม ผสมในยางเพื่อให้ความร้อนทำหน้าที่เป็น Stabilizer ในอุตสาหกรรมพลาสติก ใช้ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีทาบ้าน สีชุบโลหะ หมึกพิมพ์ กระดาษ สิ่งทอ เป็นต้น ใช้เป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์สุริยะ (Solar Cell) และใช้ในทางด้านการแพทย์และทันตแพทย์ ด้านการเกษตรแคลเซียมถูกนำมาใช้เป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารฆ่าวัชพืช สารฆ่าเชื้อรา ส่วนผสมในการผลิตปุ๋ยฟอสเฟต (สิทธิชัย, 2541) นอกจากนี้ยังมีสารประกอบแคลเซียมอีกมากมายที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรม ดังแสดงไว้ในตารางที่ 7

4. การปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมและมนุษย์

แคลเซียมสามารถเคลื่อนย้ายสู่อากาศ ดินและลงแหล่งน้ำ เมื่อคนและสัตว์บริโภคพืชหรือดื่มน้ำ จะได้รับแคลเซียมเข้าไปสะสมไว้และสามารถถ่ายทอด สะสม และเพิ่มขึ้นได้ในกระบวนการห่วงโซ่อาหาร(สิทธิชัย, 2541) คนรับแคลเซียม จากการทำงานโดยการสูดเอาไอระเหยของแคลเซียมซึ่งส่วนใหญ่มาจากการทำเหมืองและการหลอมโลหะและการสูดควันบุหรี่ รวมไปถึงการรับเข้าไปสู่ร่างกายโดยการกินอาหาร และดื่มน้ำที่มีแคลเซียมปนเปื้อนอยู่ด้วย ตารางที่ 8 (พรรณราย , 2546) เป็นการสรุปค่าประมาณปริมาณของแคลเซียมที่ปนเปื้อนสู่บรรยากาศและมหาสมุทรที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากการกระทำของมนุษย์

5. ความเป็นพิษ

อันตรายที่เกิดจากแคลเซียมจากการบันทึกพบครั้งแรกในประเทศญี่ปุ่น เรียกว่าโรคอิไต-อิไต (Itai-Itai) ลักษณะอาการของโรคจะปวดกระดูกและส่วนข้อต่อต่างๆของร่างกาย เนื่องจากการได้รับแคลเซียมที่ปนเปื้อนจากโรงงานถลุงแร่สังกะสี ในปัจจุบันอาการที่แสดงออกจากการได้รับแคลเซียมมีลักษณะคล้ายกับการขาดสารอาหาร (Malnutrition) และขาดวิตามิน (Vitamin Deficiency) การได้รับแคลเซียมที่ละเล็กละน้อย เป็นเวลานาน ทำให้เกิดการสะสมแคลเซียมในไต

ตารางที่ 7 สารประกอบแคดเมียมต่างๆที่ใช้ในด้านอุตสาหกรรม

สารประกอบ	การนำไปใช้ประโยชน์
แคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4)	- อิเล็กโทรไลต์ในเซลล์ - วัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแคดเมียม - ยาน้ำเชื้อราและยาน้ำแบคทีเรีย - สารหล่อลื่น
แคดเมียมไนเตรด ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$)	- กระเบื้องเคลือบและกระจก - ผงฟลักสำหรับกลึงถ้ำรูป - แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม
แคดเมียมคลอไรด์ (CdCl_2)	- การถ่ายภาพ - การย้อมและการพิมพ์ - การทำดอกไม้เพลิง
แคดเมียมโบรไมด์ (CdBr_2)	- การถ่ายภาพ - กระบวนการแกะสลัก - การผลิต Epoxy Resin
แคดเมียมออกไซด์ (CdO)	- ตัวเร่งปฏิกิริยา - ตัวต้านทานในเตาเผาไฟฟ้า
แคดเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cd}(\text{OH})_2$)	- การผลิตตัวแคดเมียมอื่นๆ - แบตเตอรี่นิกเกิล-แคดเมียม
แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)	- เครื่องตรวจจับการแผ่รังสี - การผลิตเม็ดสี - เซลล์พลังงานแสงอาทิตย์ - วัสดุไวแสง
แคดเมียมคาร์บอเนต (CdCO_3)	- การผลิตเกลือแคดเมียมอื่นๆ - ตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Sriannathakumar (1988)

ตารางที่ 8 ค่าประมาณปริมาณแคว่เมี่ยมที่ปนเปื้อนสู่บรรยากาศและมหาสมุทร

แหล่งกำเนิดของแคว่เมี่ยม	ค่าประมาณในแต่ละปี (10^3 ตัน)
แคว่เมี่ยมที่ปล่อยสู่บรรยากาศ	
แหล่งธรรมชาติ	
ภูเขาไฟ	0.82
อนุภาคดินเหนียว	0.21
ไฟป่า	0.11
ละอองเกลือทะเล	0.06
ชีววิทยาของสิ่งมีชีวิต	0.24
ผลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ	1.44
การกระทำของมนุษย์	
การถลุงแร่	5.59
การเผาขยะ	0.75
การเผาไหม้ถ่านหิน	0.53
การผลิตซีเมนต์	0.27
ปุ๋ยฟอสเฟต	0.17
การเผาไหม้น้ำมัน	0.14
การเผาไหม้	0.12
ผลรวมจากการกระทำของมนุษย์	7.57
แคว่เมี่ยมที่ปล่อยลงสู่มหาสมุทร	
แหล่งน้ำธรรมชาติ	
การไหลของแม่น้ำ	5.11
การฝังตัวของชั้นบรรยากาศ	0.72
ผลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ	5.83

ตารางที่ 8 (ต่อ)

แหล่งกำเนิดของแคดเมียม	ค่าประมาณในแต่ละปี (10^3 ตัน)
การกระทำของมนุษย์	
น้ำเสียจากบ้านเรือน	1.74
การผลิตพลังงานไฟฟ้า	0.13
เหมืองแร่ การถลุงแร่ การกลั่นน้ำมัน	1.95
ขบวนการผลิตต่างๆ	2.45
ขยะ	0.69
การฝังตัวจากชั้นบรรยากาศ	2.27
ผลรวมที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์	9.23

ที่มา: พรรณราย (2546)

อาจจะทำให้เป็นโรคไตได้ จากการทดลองในสัตว์โดยการให้แคดเมียมทางน้ำและอาหาร พบว่าความดันเลือดสูงขึ้น เหล็กในเลือดต่ำ เป็นโรคตับ ประสาทและสมองเสียหาย เชื่อว่าแคดเมียมมีส่วนทำให้เป็นมะเร็งปอดแน่นอน แต่ในมนุษย์ยังไม่ทราบแน่นอนว่าถ้าสัมผัสแคดเมียมทางผิวหนังหรือรับแคดเมียมโดยทางน้ำและอาหารแล้ว แคดเมียมจะทำให้เป็นมะเร็งได้หรือไม่ (สุวัจน์, 2549)

6. แหล่งแคดเมียมจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

สุวัจน์ (2549) ได้รายงานว่าน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตแผงวงจรไฟฟ้า ซึ่งมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 100-500 ppm การสึกกร่อนของยางรถยนต์และจักรยานยนต์ ซึ่งมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 20-90 ppm ส่วนการผลิตปุ๋ยฟอสเฟตโดยหินฟอสเฟตที่ใช้เป็นวัตถุดิบจะมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 10 ppm สำหรับน้ำทิ้งตามอาคารบ้านเรือนต่างๆจะมีแคดเมียมเป็นองค์ประกอบอยู่ถึง 30 ppm

7. มาตรฐานการควบคุมแคะเมียม

มาตรฐานการปนเปื้อนของแคะเมียมที่ยอมให้มีได้ในสิ่งแวดล้อม ที่กำหนดโดยหน่วยงานที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9

8. การจัดแคะเมียมในน้ำ

กระบวนการที่นำมาใช้ในการกำจัดแคะเมียมออกจากน้ำมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process) และกระบวนการดูดซับ (Adsorption Process) หลักการของวิธีการดังกล่าวสรุปดังนี้

ตารางที่ 9 มาตรฐานค่าความเข้มข้นของแคะเมียมที่ยอมให้มีได้ในสิ่งแวดล้อม

มาตรฐาน	แหล่งที่มา	ค่ามาตรฐาน
มาตรฐานคุณภาพน้ำดื่ม ในภาชนะที่บรรจุปิดสนิท	ประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 61 พ.ศ. 2524	ไม่เกิน 0.01 มก./ล
มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ประกาศกระทรวง อุตสาหกรรมฉบับที่ 332 พ.ศ. 2521	ไม่เกิน 0.01 มก./ล.
มาตรฐานคุณภาพน้ำ อุตสาหกรรมน้ำบริโภค	ประกาศกระทรวง อุตสาหกรรมฉบับที่ 4 พ.ศ. 2521	ไม่เกิน 0.01 มก./ล.
มาตรฐานคุณภาพน้ำผิวดิน ที่ใช้ทะเล	ประกาศคณะกรรมการ สิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 พ.ศ. 2537	ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัม/ลิตร ในกรณีที่มีน้ำกระด้างในรูป CaCO ₃ ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/ ลิตร และ ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัม/ลิตรในกรณีที่มี ความกระด้างในรูป CaCO ₃ เกินกว่า 100 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ 9 (ต่อ)

มาตรฐาน	แหล่งที่มา	ค่ามาตรฐาน
มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อบาดาล	ประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 พ.ศ. 2521	ไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร
มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงาน อุตสาหกรรมและ นิคมอุตสาหกรรม	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร
มาตรฐานน้ำดิบ	การประปาส่วนภูมิภาค	ไม่เกิน 0.01 มิลลิกรัม/ลิตร
มาตรฐานคุณภาพน้ำประปา	การประปานครหลวง	ไม่เกิน 0.003 มิลลิกรัม/ลิตร

ที่มา: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2544)

8.1) การตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมีเป็นการเติมสารเพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายในน้ำทำให้เกิดเป็นตะกอนแยกออกจากน้ำ โดยทั่วไปนิยมตกตะกอนด้วยโลหะ ซึ่งจะได้เป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ เช่น การเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO, Lime) หรือการตกตะกอนเป็นโลหะคาร์บอเนตด้วยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)

นอกจากนี้โลหะหนักบางตัวสามารถกำจัดออกได้ด้วยการตกตะกอนเป็นโลหะซัลไฟด์ด้วยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โลหะหนักแต่ละชนิดสามารถตกตะกอนได้ที่พีเอชต่างกัน ในกรณีของแคลเซียมไฮดรอกไซด์พบว่า สามารถตกตะกอนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ได้ดีที่ค่าพีเอชระหว่าง 10 ถึง 11 (Eckenfelder, 1989; Metcalf and Eddy, 2003)

Faust and Aly (1987) ได้ศึกษากระบวนการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีที่ใช้กำจัดแคลเซียมในน้ำผิวดิน และน้ำบาดาลโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Coagulation) ใช้สารส้มและเฟอร์ริกซัลเฟต (Ferric Sulfate) เป็นสารตกตะกอน (Coagulation) ในสภาพความเป็นด่างค่อนข้างสูง (200 มิลลิกรัม/ลิตร as CaCO_3) พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนอยู่ระหว่าง 8.5-9.0 ผล

การศึกษา คือ เมื่อใช้เฟอร์ริกซัลเฟตทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำผิวดินและน้ำบาดาลได้ดีกว่าสารส้ม ที่ปริมาณและพีเอชเท่ากัน

8.2) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออน คือ การแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนในน้ำกับไอออนในสารละลายที่เป็นของแข็งที่สามารถเกิดพันธะทางเคมีกับไอออนได้ สารของแข็งที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออน ได้นี้ เรียกว่า เรซิน (Resin) มี 2 แบบ คือ เรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Exchange Resin) และเรซินที่สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion Exchange Resin) (มันติน, 2542) และ Faust and Aly (1998) กล่าวว่า การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกแบบกรดแก่สามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำได้ดินด้วยประสิทธิภาพ 90-100 เปอร์เซ็นต์

Maliou *et al.* (1992) พบว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ (Clinoptilolite) สามารถกำจัดแคดเมียมและตะกั่วได้ โดยอาศัยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน การศึกษากระทำภายใต้สภาวะต่างๆ กันได้ คือ กรณีที่มีไอออนบวกอื่นๆ ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และ โซเดียม ผลการศึกษาพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ขนาดของซีโอไลต์ไม่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก แต่มีผลเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้จากการทดสอบโดยการใช้ขนาดของซีโอไลต์ที่เท่ากัน แต่อุณหภูมิต่างกัน พบว่าซีโอไลต์ที่มีขนาดเล็กกว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีกว่าซีโอไลต์ที่มีขนาดใหญ่

Cukovic *et al.* (1997) ได้ทำการศึกษาการกำจัดแคดเมียมและตะกั่วในน้ำเสีย โดยการใช้ซีโอไลต์ธรรมชาติเปรียบเทียบกับซีโอไลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพแล้ว พบว่าซีโอไลต์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าซีโอไลต์ธรรมชาติ ซึ่งซีโอไลต์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยการทำปฏิกิริยากับโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่อุณหภูมิสูง จะสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีกว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เท่ากัน ทั้งนี้ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น แต่กลับลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคดเมียม

Zhao *et al.* (2002) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมที่มีปริมาณน้อยในน้ำดื่ม ด้วยการใส่เรซินแลกเปลี่ยนไอออนลบแบบเบสอ่อน (Weak base anion exchange resin) โดยอาศัยอันตรกิริยาระหว่างเรซินซึ่งทำหน้าที่เป็นลิวอิสเบส (Lewis Bases) และโลหะหนักในสารละลายจะทำ

หน้าที่เป็นลิวอิสกรด (Lewis Acids) นอกจากนี้ยังสามารถนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ

8.3) กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

กระบวนการนี้อาศัยเมมเบรน (Semi-Permeable Membrane) ในการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย กระบวนการเมมเบรนที่นิยมใช้กำจัดแคดเมียมมี 2 แบบ คือ การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis) และการออสโมซิสผันกลับ (Reverse Osmosis) ซึ่งความแตกต่างของทั้ง 2 กระบวนการนี้ อยู่ที่ความสามารถในการแยกสารละลายที่มีขนาดต่าง ๆ กัน รวมถึงแรงดันที่ทำให้เกิดการแยกไอออนออกจากน้ำด้วย

การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการแยกสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออนให้ออกจากน้ำ โดยแผ่นเยื่อเมมเบรนที่ใช้ มี 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ แผ่นบวกจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุลบและปล่อยสารที่มีประจุบวกผ่านไป ส่วนแผ่นลบจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุบวกและปล่อยสารที่มีประจุลบผ่านไป โดยที่โมเลกุลของน้ำไหลผ่านได้ยาก ทำให้สามารถแยกไอออนของโลหะหนักออกจากน้ำได้ Faust and Aly (1988) กล่าวว่า การใช้กระบวนการออสโมซิสผันกลับที่มีเมมเบรนขนาดต่าง ๆ กันจำนวน 5 ชนิด สามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำได้ประสิทธิภาพมากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์

8.4) การใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ดูดซับแคดเมียม

การกำจัดสารปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยอาศัยความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน (มันสิน, 2542) ตัวดูดซับที่นิยมใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นมาเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากพอที่จะทำได้ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ ดังเช่นการศึกษาของ Leyva *et al.* (1997) ได้นำมาดูดซับแคดเมียมในสารละลายด้วยถ่านกัมมันต์ โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) มีการแปรผันอุณหภูมิ 10, 25 และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แปรผันพีเอชจาก 2 ถึง 8 ผลจากการทดลองพบว่า การดูดซับแคดเมียมจะลดลง 3 เท่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 10 ถึง 40 องศาเซลเซียส พบว่าแคดเมียมไอออนจะไม่สามารถถูกดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่พีเอชเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า

นอกจากนี้ก็จะเกิดการตกตะกอนเป็นแคดเมียมไฮดรอกไซด์ที่พีเอชมากกว่า 9 ซึ่งความสามารถในการดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นที่พีเอช 8 และจะลดลงเป็น 12 เท่าเมื่อลดพีเอชจาก 8 ถึง 3

Faust and Aly (1987) รายงานว่าการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับระหว่างการใช้อ่านกัมมันต์แบบผงและเกร็ด พบว่าอ่านกัมมันต์แบบผงมีประสิทธิภาพในการดูดซับแคดเมียมได้ดีกว่าแบบเกร็ดที่ปริมาณ พีเอช และระยะเวลาเท่ากัน และเมื่อได้ใช้อ่านกัมมันต์ดูดซับโลหะไปนานๆ จะเกิดการอุดตันขึ้น ทำให้หมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนั้น จึงต้องทำการรีเจเนอเรท (Regenerate) เป็นช่วงๆ

8.5) การใช้โลหะออกไซด์

โลหะออกไซด์ ได้แก่ แมงกานีส เหล็กและอลูมิเนียม สามารถดูดซับแคดเมียมในรูปสารละลาย แมงกานีสออกไซด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับแคดเมียม โดยช่วงพีเอชที่เหมาะสม คือ 5-8.5 (Faust and Aly, 1987)

การดูดซับ

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของแข็งเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) (มันสิน, 2542)

1. กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน (Faust and Aly, 1987) มีดังนี้

1) การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าถึงตัวดูดซับ ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าตัวดูดซับ

2) การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3) ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2. อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล

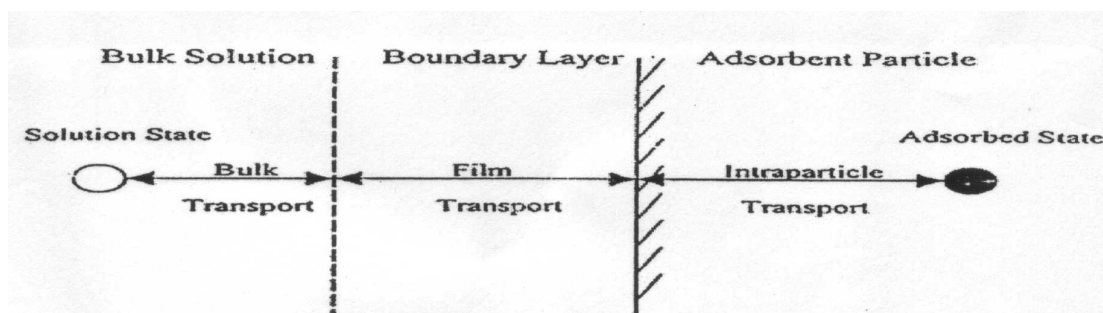
อัตราการดูดซับมีความสำคัญมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ซึ่งมี 3 ขั้นตอน คือ (Eckenfelder, 1981)

2.1) การเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Bulk Transport) โมเลกุลของสารถูกดูดซับในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มตัวดูดซับ

2.2) การเคลื่อนที่ของชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของตัวดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง

2.3) การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลสารถูกดูดซับเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

โดยขั้นตอนการเคลื่อนที่ย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับมายังตัวดูดซับ แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับ

ที่มา: Eckenfelder (1981)

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากพบว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

3. ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับที่สำคัญ มี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้ เกิดขึ้นเมื่อมีโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดกับผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่มีอยู่ในของเหลวได้ (Eckenfelder, 1981)

ธิดา (2542) พบว่าปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกถึงประเภทของกระบวนการดูดซับโดยพิจารณาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารถูกดูดซับ ถ้าแรงยึดเหนี่ยวเป็นแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) จะถูกดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) แต่ถ้าแรงยึดเหนี่ยวทำให้เกิดพันธะเคมีระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารถูกดูดซับจะเรียกว่า การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

3.1) การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพเป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลอย่างอ่อน คือ แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Forces) ซึ่งเกิดจากการรวมแรงกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) (Eckenfelder, 1981) การดึงดูดด้วยแรงที่อ่อนนี้เองทำให้การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานการคายความร้อนค่อนข้างน้อย คือ ต่ำกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล และสามารถเกิดการผันกลับของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่ายด้วย นอกจากนี้ Cheremisnoff and Ellerbusch (1978) กล่าวว่าวัสดุสารถูกดูดซับสามารถเกาะอยู่รอบๆผิวของตัวดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) กล่าวคือในแต่ละชั้นของโมเลกุล สารถูกดูดซับจะติดอยู่กับชั้นของโมเลกุลของสารถูกดูดซับในชั้นก่อนหน้า (สามารถมีหลายชั้นโมเลกุลจับยึดซ้อนๆกันขึ้นไปได้) โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับ และเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

3.2) การดูดซับของทางเคมี

การดูดซับประเภทนี้เกิดขึ้นเมื่อสารถูกดูดซับกับตัวดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน โดยส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของสารที่ถูกดูดซับเดิม คือมีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมหรือกลุ่มอะตอมเดิมแล้วมีการจัดเรียงอะตอมไปเป็นสารประกอบใหม่ขึ้น โดยมีพันธะเคมีซึ่งเป็นพันธะที่แข็งแรง มีพลังงานกระตุ้นเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงประมาณ 50-400 กิโลจูลต่อโมล กล่าวคือ การกำจัดสารที่ถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับจะทำได้ยาก คือ เกิดปฏิกิริยาไม่ผันกลับ (Irreversible) และการดูดซับประเภทนี้จะเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น สำหรับการดูดซับเพียงชั้นเดียวนั้นคือ มีเพียง 1 โมเลกุลต่อการยึดที่จุดหนึ่ง ซึ่งการดูดซับทางกายภาพและเคมี มีข้อแตกต่างกันหลายประการ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 10 (ธียา, 2542) มีดังนี้

ตารางที่ 10 ข้อแตกต่างระหว่างการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมี

ตัวแปร	การดูดซับทางกายภาพ	การดูดซับทางเคมี
ค่าความร้อนของการดูดซับ	น้อยกว่า 20 กิโลจูลต่อโมล	50-400 กิโลจูลต่อโมล
อุณหภูมิที่เกิดการดูดซับ	ต่ำ	สูง
แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล	แรงแวนเดอร์วาลส์	พันธะเคมี
การผันกลับของปฏิกิริยา	ผันกลับได้	ส่วนใหญ่ไม่ผันกลับ
การดูดซับบนก๊าซ-ของแข็ง	เกิดได้เกือบทุกชนิด	เกิดเฉพาะบางระบบ
พลังงานก่อกัมมันต์ใน	ไม่เกี่ยวข้อง	เกี่ยวข้อง
กระบวนการเกิด		
รูปแบบชั้นของการดูดซับ	Monolayer และ Multilayer	Monolayer

ที่มา: ธียา (2542)

4. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

4.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

ความสามารถในการดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) คือ ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดซับโมเลกุลได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย เพราะพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ของตัวดูดซับได้มาจากโพรงภายใน ดังนั้น ขนาดของตัวดูดซับจึงมีบทบาทน้อยในการกำหนดพื้นที่ผิว (มันสิน, 2542)

4.2 ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ

สิ่งที่สำคัญในการดูดซับของสารที่ถูกดูดซับประการหนึ่งคือ ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับสารที่ถูกดูดซับ จะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย แล้วไปเกาะติดบนผิวของแข็ง นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลสารที่ถูกดูดซับยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะแปรผกผันกับอัตราดูดซับ ดังนั้น การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อยหรือเข้าโพรงได้พอดี เพราะจะทำให้มีแรงดึงดูดระหว่างสารที่ถูกดูดซับและตัวดูดซับมีค่ามากที่สุด โดยโมเลกุลขนาดเล็กจะเข้าไปในโพรงก่อนโมเลกุลขนาดใหญ่ (มันสิน, 2542)

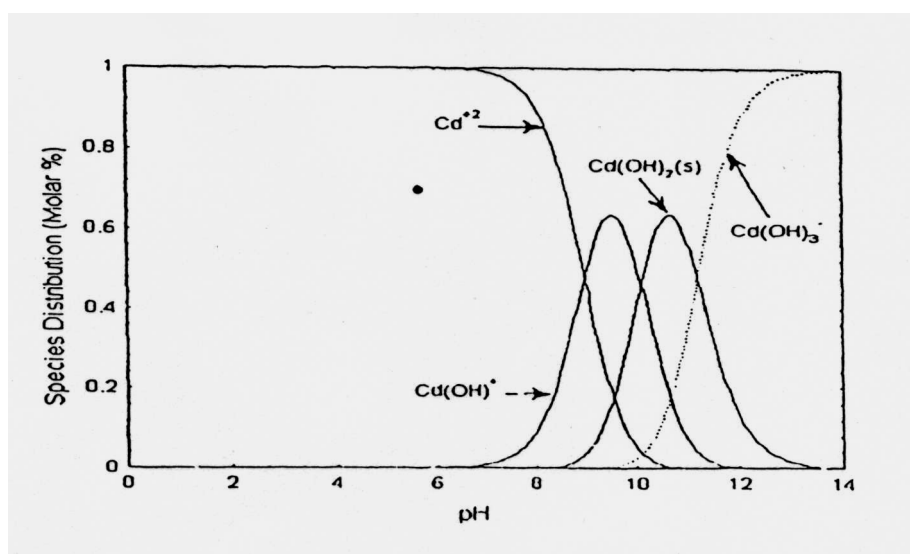
4.3 เวลาสัมผัส

ระยะเวลาสัมผัสเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ จะขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งในระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้ในงานจริง (มันสิน, 2542)

4.4 ความเป็นกรด-ด่าง

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดซับได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้น จึงมีผลกระทบต่อการดูดซับ (มันสิน, 2542)

นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อรูปแบบ (Species) ของโลหะ เช่น แคดเมียมไอออนจะมีรูปแบบต่างๆ กันขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย Leyva-Ramos *et al.* (1997) กล่าวว่า ที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 7 แคดเมียมจะอยู่ในรูปแคดเมียมไอออน (Cd^{2+}) เป็นส่วนใหญ่ แต่ค่าพีเอชสูงขึ้นแคดเมียมไอออนจะมีการรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดต่างๆ เช่น $\text{Cd}(\text{OH})^+$, $\text{Cd}(\text{OH})_2$ และ $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ ดังแสดงในภาพที่ 7

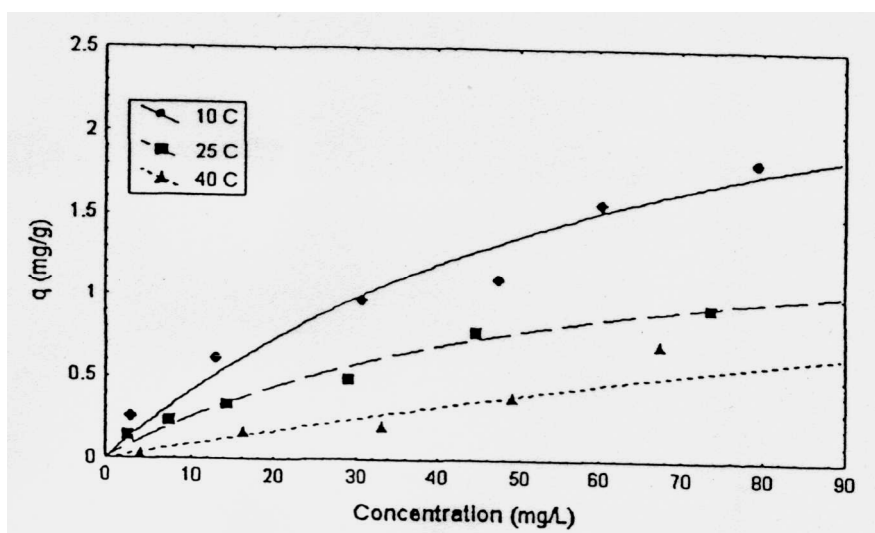


ภาพที่ 7 สารประกอบเชิงซ้อนของแคดเมียมในสารละลายพีเอชต่างๆ

ที่มา: Leyva-Ramos *et al.* (1997)

4.5 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคือ อัตราเร็วจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิ แต่ขีดความสามารถในการดูดซับมีค่าลดลงที่อุณหภูมิสูง และมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (มันสิน, 2542) ดังภาพที่ 8 จะเห็นได้ว่าความสามารถในการดูดซับแคดเมียมจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 25 และ 40 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 8 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับของแคดเมียมไอออนบนถ่านกัมมันต์

ที่มา: Leyva-Ramos *et al.* (1997)

4.6 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่ในรูพรุน (Pore Diffusion) ขึ้นอยู่กับความปั่นป่วนของระบบ กล่าวคือ ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มมากขึ้น โมเลกุลของสารถูกดูดซับเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับช้า ดังนั้นการแพร่ผ่านฟิล์มจึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับของปฏิกิริยา ในทางตรงกันข้ามถ้าระบบมีความปั่นป่วนสูงจนทำให้น้ำไม่สามารถรวมตัวเป็นฟิล์มหนา ทำให้โมเลกุลของสารถูกดูด

ขับเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปยังตัวดูดซับได้อย่างรวดเร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าโพรง ในกรณีนี้ การเคลื่อนที่เข้าโพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (มันสิน, 2542)

5. สมดุลและไอโซเทอมการดูดซับ

การดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibrium) สามารถอธิบายปรากฏการณ์ของ กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นว่า ณ จุดสมดุลการดูดซับ สมรรถนะของตัวดูดซับ (Adsorption Capacity) สามารถเขียนในรูปความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในน้ำที่อุณหภูมิ คงที่ โดยเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) (Faust and Aly, 1987)

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบเป็นผลมาจากการพัฒนาทางทฤษฎีและการสังเกตจากการทดลอง รายละเอียด มีดังนี้

5.1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm) มีสมมุติฐาน พื้นฐานที่เรียกว่า Ideal localized Monolayer Model ดังนี้

- 1) เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนผิวของตัวดูดซับได้
- 3) เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าเดียวกันสำหรับทุกๆ โมเลกุล
- 4) พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ (3)

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (3)$$

X = ปริมาณของสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

- X_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับเมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์
 C_e = ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
 b = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ (3) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น ได้ดังสมการที่ (4) และ (5)

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{bX_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad (4)$$

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{bX_m C_e} \quad (5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ ข้อมูลสมดุลการดูดซับดังแสดงในภาพที่ 9 (ก) สามารถหาค่าคงที่ b และ X_m ได้จากความชันและจุดตัดกราฟ

5.2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller, BET Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบ BET พัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ ใช้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) โดยมีสมมุติฐาน ดังนี้

- 1) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ
- 2) เอนทาลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- 4) ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับต่อไป

สมการการดูดซับแบบ BET แสดงในการสมการที่ (6)

$$X = \frac{X_m B C_e}{(C_s - C_e)[1 + (B - 1)(C_e/C_s)]} \quad (6)$$

X = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

X_m = ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

C_e = ความเข้มข้นสารที่ถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

C_s = ความสามารถในการละลายของสารที่ถูกดูดซับในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

B = ค่าคงที่ของพลังงานของการดูดซับ

จากสมการที่ (6) สามารถจัดเรียงเป็นแบบเชิงเส้น ได้ดังสมการ (7)

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)X} = \frac{1}{X_m B} + \frac{B - 1}{X_m B} \frac{C_e}{C_s} \quad (7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e/(C_s - C_e) X$ กับ C_e/C_s จะได้เส้นตรงที่มีความชัน $(B-1)/(X_m B)$ และจุดตัดแกนเท่ากับ $1/X_m B$ กราฟของสมการการดูดซับแบบ BET แสดงในภาพที่ 9 (ข)

5.3) ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิค

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิคใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลวที่มีสมการ (8) ดังนี้

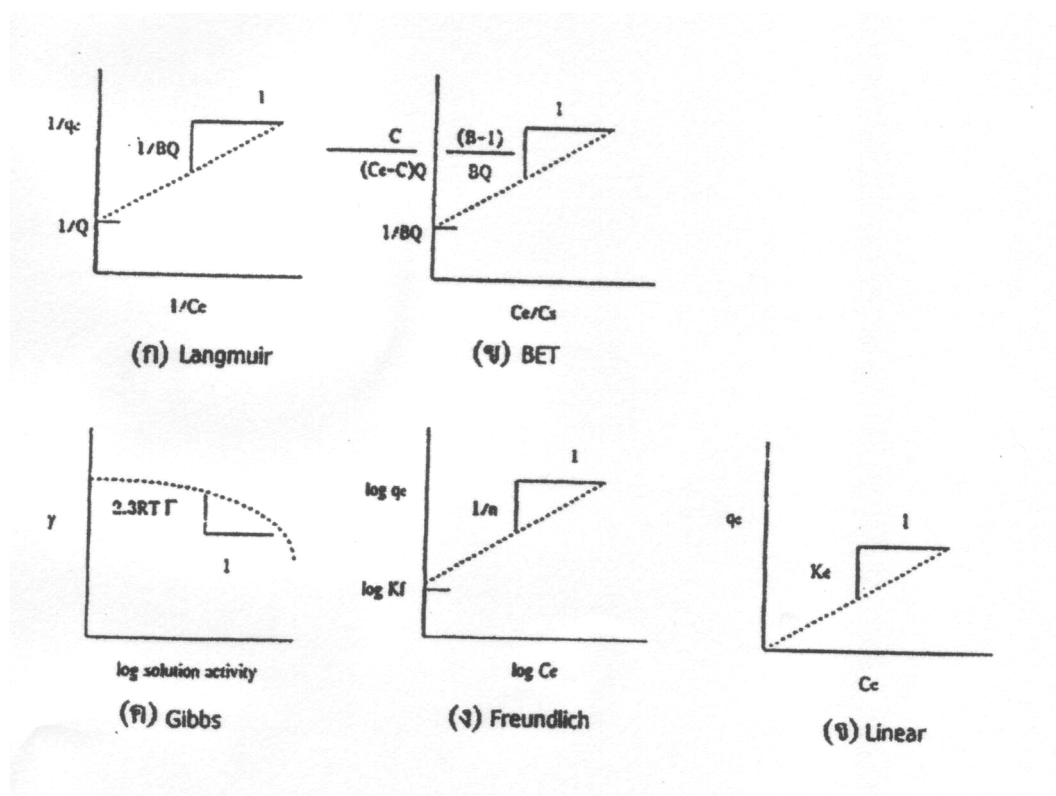
$$\frac{X}{M} = KC_e^{1/n} \quad (8)$$

X	=	ปริมาณสารถูกดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัม
M	=	น้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็นกรัม
C _e	=	ความเข้มข้นของสารตัวถูกดูดซับในสารละลาย ที่จุดสมดุล มิลลิกรัมต่อลิตร
K, 1/n	=	ค่าคงที่ของระบบ

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงเส้นตรง (8) ได้ดังนี้

$$\text{Log } (X/M) = \text{Log } K + (1/n) C_e \quad (9)$$

พลอตกราฟระหว่าง $\log (X/M)$ กับ $\log C_e$ จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$ ดังแสดงในภาพที่ 9 (ง) ค่า $1/n$ ที่ได้จากการดูดซับของสารถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับ ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับ ค่า $1/n$ ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของตัวดูดซับที่ดี



ภาพที่ 9 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมในรูปแบบต่างๆ

ที่มา: Faust and Aly (1987)

ค่าปริมาณการดูดซับสูงสุด (Capacity) ของตัวดูดซับ คือ ลักษณะของตัวดูดซับซึ่งรูปร่างไอโซเทอมสามารถบอกถึงลักษณะการดูดซับได้ แต่ไม่สามารถบอกค่าปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับได้ ดังนั้น จำเป็นต้องมีแบบจำลอง หรือสามารถนำมาใช้ในการทำนายปริมาณการดูดซับสูงสุดของการดูดซับนี้ แบบจำลองการดูดซับที่เป็นที่ยอมรับ และใช้กันอย่างกว้างขวางในการทำนายลักษณะการดูดซับ คือ แบบจำลอง Langmuir และ Freundlich

6. การทดลองด้วยคอลัมน์ดูดซับ

จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับจะสามารถพิจารณาเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมได้แต่อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้นี้ยังไม่เพียงพอสำหรับการออกแบบกระบวนการดูดซับ จึงต้องมีการทดลองโดยใช้คอลัมน์ดูดซับ (Column Test) เพื่อหาอายุการใช้งานของตัวดูดซับ

ระบบการดูดซับ แบ่งออกได้ 2 ประเภท ดังนี้ (ชาติ, 2546)

1) การดูดซับแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Adsorption)

จากสมการมวลสารของสิ่งเจือปนในน้ำ ดังสมการ (10)

$$q_F M + C_F S = qM + CS \quad (10)$$

โดยที่	q_F	=	ปริมาณสิ่งเจือปนบนผิวตัวดูดซับก่อนใช้งาน
	M	=	น้ำหนักของตัวดูดซับ
	C_F	=	ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในน้ำ
	S	=	ปริมาตรของน้ำ
	q	=	ปริมาณสิ่งเจือปนบนผิวตัวดูดซับที่จุดสมดุล
	C	=	ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนที่จุดสมดุล

2) การดูดซับแบบต่อเนื่อง (Continuous Adsorption)

2.1) ความสามารถสูงสุดของ Column ในการดูดซับสิ่งเจือปน ดังสมการ (11)

$$t_t = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C}{C_0} \right) dt \quad (11)$$

เมื่อ

t_t	=	ระยะเวลาการใช้งาน Column จนหมดประสิทธิภาพ
C/C_0	=	ปริมาณสิ่งเจือปนในน้ำออก/น้ำเข้า

2.2) ถ้า Column ถูกใช้งานจนน้ำที่ผ่าน Column มีปริมาณสิ่งเจือปนเท่ากับความเข้มข้นที่กำหนด (Break through concentration) ดังสมการ (12)

$$t_u = \int_0^{t_b} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) dt \quad (12)$$

เมื่อ

t_b = ระยะเวลาการใช้งาน Column จนหมดจนกระทั่งมีปริมาณสิ่งเจือปนเท่ากับความเข้มข้นที่กำหนด

2.3) ความสูงของ Column ที่ถูกใช้งาน (H_B) ดังสมการ (13)

$$H_B = \frac{t_u}{t_t} H_T \quad (13)$$

เมื่อ

H_T = ความสูงทั้งหมดของ Column

2.4) ความสูงของ Column ที่ไม่ถูกใช้งาน (H_{UNB}) ดังสมการ (14) และ (15)

$$H_{UNB} = \left(1 - \frac{t_u}{t_t}\right) H_T \quad (14)$$

โดยที่

$$H_T = H_B + H_{UNB} \quad (15)$$

ปริมาตรน้ำรวมที่ผ่าน Column ก่อนหยุดใช้งาน = Av_t

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดของ Column

v = อัตราเร็วของน้ำใน Column (หรือการะบรทุกพื้นที่ผิว)

จากทฤษฎีของปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface – reaction theory) ของ Bohart Adams

ดังสมการ (16)

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_b} - 1\right) = \ln\left(e^{KNH/v} - 1\right) - KC_0t \quad (16)$$

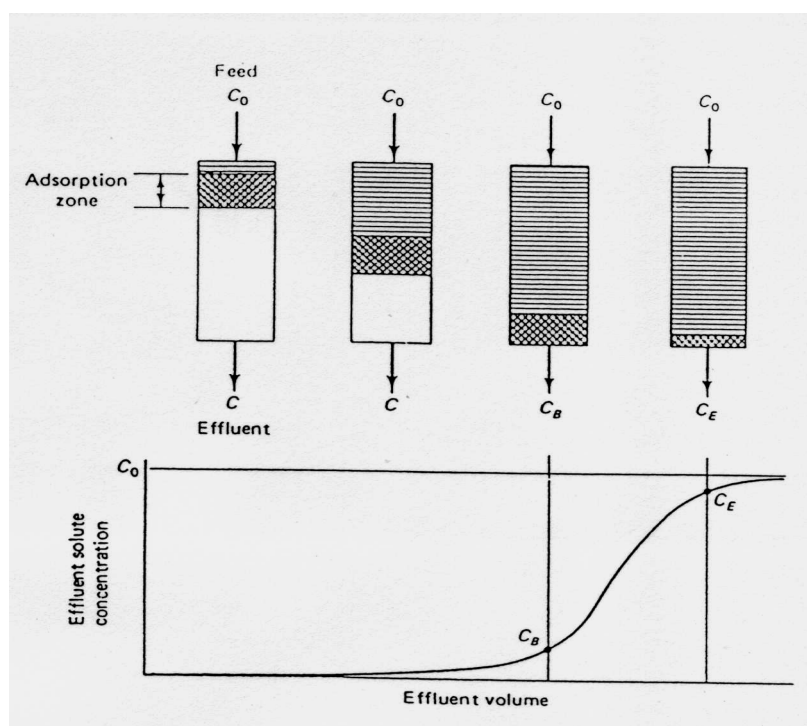
จากสมการ (16) จะได้สมการที่ (17)

$$t = \frac{N_0 H}{C_0 v} - \frac{1}{KC_0} \ln\left[\frac{C_0}{C_b} - 1\right] \quad (17)$$

เมื่อ

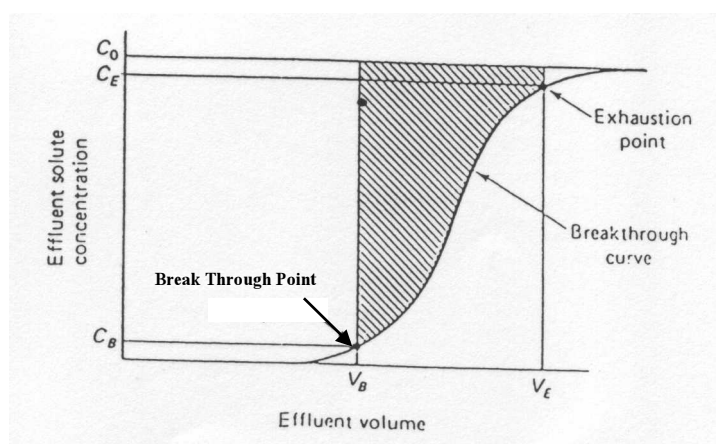
t	=	ระยะเวลาการใช้งาน (นาท)
v	=	ความเร็วในการไหลของสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ผ่านชั้นของเปลือกออกไซด์ (เซนติเมตรต่อนาท)
H	=	ความสูงของชั้นเปลือกออกไซด์ (เซนติเมตร)
N ₀	=	ความจุในการดูดซับหรือขีดความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรของเปลือกออกไซด์)
K	=	ค่าคงที่ของอัตราการดูดซับ (ลูกบาศก์เซนติเมตรของสารละลายต่อมิลลิกรัมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์-นาท)
C ₀	=	ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
C _b	=	ค่าความเข้มข้นในการใช้งานของสารถูกดูดซับหรือค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

เมื่อน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์ของชั้นตัวดูดซับ ตัวดูดซับชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อน และชั้นของตัวดูดซับที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาการใช้งาน ดังแสดงไว้ในภาพที่ 10 ดังนั้น ความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่ผ่านการดูดซับแล้วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาจนในที่สุดความเข้มข้นถึงค่าสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ ที่จุดนี้เรียกว่าจุดเบรคท루จ (Break Through) เส้นโค้งดังแสดงในภาพที่ 11 เรียกว่า เส้นโค้งเบรคท루จ (Break Through Curve) โดยเวลาที่นับจากเริ่มต้นการดูดซับจนถึงจุดเบรคท루จ เรียกว่า เวลาการใช้งาน (Service Time) (เสริมพล และ ไชยยุทธ, 2524) และเมื่อตัวดูดซับไม่สามารถดูดซับได้อีก เรียกว่า จุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพ (Exhaust Point) ซึ่งจุดนี้ความเข้มข้นของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ (C_E) จะมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของน้ำเสียเข้าระบบ (C_0)



ภาพที่ 10 การเคลื่อนตัวของ Adsorption Zone สำหรับชั้นตัวดูดซับที่อยู่กับที่ ตามทิศทางการไหลของน้ำเสีย

ที่มา: Sundstrom and Klei (1979)



ภาพที่ 11 ลักษณะของเส้นโค้งเบรคทูร์สำหรับชั้นตัวดูดซับที่อยู่กับที่ ตามทฤษฎี
ที่มา: Sundstrom and Klei (1979)

Argamon *et al.*, 1973 กล่าวว่าในการทดลองถ้าวัดความเข้มข้นที่จุดต่างๆภายในคอลัมน์จะได้กราฟความเข้มข้นของสารที่ลดลงเรื่อยๆ จากความเข้มข้นเท่ากับน้ำเสียขาเข้า ออกจนเป็นความเข้มข้นเป็นศูนย์ โดยกราฟนี้จะค่อยๆเคลื่อนที่เข้าไปเรื่อยๆจากปลายด้านหนึ่งของคอลัมน์(ขาเข้าของน้ำเสีย) ไปยังปลายขาออกของน้ำเสีย เพราะช่วงแรกๆตัวดูดซับถูกใช้งานก่อน และเมื่อพื้นที่ผิวเต็มก็จะมีไม่ดูดซับไปอีกต่อไปได้ ดังนั้นจึงเกิดการลดลงของความเข้มข้น เรียกส่วนที่เกิดการดูดซับนี้ว่า Mass Transfer Zone (MTZ) และเมื่อ MTZ เคลื่อนที่จนถึงปลายขาออกของน้ำเสีย ซึ่งจะพบว่ามีการบนตัวดูดซับส่วนหนึ่งที่เล็ดลอดออกไปกับน้ำเสีย เรียกจุดที่น้ำเสียเริ่มมีการถูกดูดซับเกือบจนออกมาว่าจุดเบรคทูร์ (Break Through) ซึ่งเป็นจุดที่คอลัมน์ไม่สามารถทำงานได้ 100 เปอร์เซ็นต์อีก

เวลาการใช้งาน (Service Time) จะมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขึ้นอยู่กับปัจจัย ดังนี้

- 1) ความสูงของชั้นตัวดูดซับ โดยเวลาการใช้งานของตัวดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของชั้นตัวดูดซับ และจะลดลงเมื่อความสูงของตัวดูดซับลดลง
- 2) พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับ (Specific Surface Area) ตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากทำให้เวลาการใช้งานมากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย

3) อัตราการการกรอง จะส่งผลต่อเวลาการใช้งานของตัวดูดซับ คือ ถ้าอัตราการกรองสูง จะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าอัตราการกรองต่ำ

4) ความเข้มข้นของน้ำเสียที่เข้าระบบจะส่งผลต่อให้เวลาการใช้งาน เมื่อระดับความเข้มข้นของน้ำเสียสูง จะทำให้เวลาการใช้งานน้อยกว่าที่ความเข้มข้นต่ำ

การเลือกใช้ลักษณะของน้ำไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ สามารถเลือกใช้ได้ดังนี้

1) การไหลลง (Down Flow) คือ การให้น้ำไหลผ่านชั้นตัวดูดซับ โดยอาศัยแรงโน้มถ่วงของโลก แต่เมื่อตัวดูดซับเสื่อมสภาพจะต้องทำการฟื้นฟูสภาพใหม่ทั้งคอลัมน์

2) การไหลขึ้น (Up Flow) คือ การให้น้ำที่ต้องใช้พลังงานในการดันน้ำให้ไหลผ่านชั้นตัวดูดซับชั้นข้างบน สามารถฟื้นฟูสภาพของชั้นตัวดูดซับที่หมดสภาพแล้วได้เป็นระยะๆ โดยการเอาตัวดูดซับออกด้านล่างคอลัมน์ เมื่อนำไปทำการฟื้นฟูสภาพแล้ว สามารถนำกลับมาใช้ในส่วนบนของคอลัมน์ได้

การออกแบบการบำบัดโดยใช้ถังกรองการดูดซับ มีข้อพิจารณา ดังนี้ (เสริมพลและไชยยุทธ์, 2524)

- 1) การให้น้ำไหลลงข้างล่าง (Down Flow) หรือไหลขึ้นข้างบน (Up Flow)
- 2) การใช้หน่วยเดียวหรือหลายๆหน่วยต่อกันเป็นอนุกรมหรือขนานได้
- 3) ถ้าเลือกให้น้ำไหลลงล่างจะให้ไหลด้วยแรงดัน (Pressure) หรือไหลด้วยตนเอง
- 4) ถ้าเลือกให้น้ำไหลขึ้นบนจะให้ชั้นตัวดูดซับอัดแน่น (Pack Bed) หรือขยายตัวได้ (Expanded) เมื่อน้ำไหลผ่านตัวกรอง
- 5) ลักษณะถังบรรจุ วัสดุที่ใช้ทำถังกรองดูดซับ

7. การคายซับ (Desorption)

การคายสารที่ถูกดูดซับออกจากผิวของตัวดูดซับ ขึ้นอยู่กับ

- 1) สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารที่ถูกดูดซับ
- 2) ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับ
- 3) ความแข็งแรงของการเกิดการดูดซับ (ในสมการฟรุนดลิค ค่า $1/n$ เพิ่มขึ้น)
- 4) ขนาดของอนุภาคตัวดูดซับ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bruemmer and Tiller (1988) ได้ศึกษาจลนศาสตร์การดูดซับและการคายซับของนิเกิล สังกะสี และแคดเมียม โดยจีโออิต (Goethite) เป็นตัวดูดซับ รวมทั้งได้ศึกษาการแพร่โลหะ ออกไซด์เข้าไปภายในอนุภาคของจีโออิต โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะออกไซด์อยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-4} มก./ล. ค่าพีเอชในช่วง 4-8 เวลาการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง จำนวน 42 วัน และทดสอบที่อุณหภูมิ 5 - 35 องศาเซลเซียส พบว่า การดูดซับของโลหะออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพีเอช รวมทั้งเวลาในการทำปฏิกิริยา และอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นด้วย ในการดูดซับนั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายในช่วง 2-3 ชั่วโมงแรก และตามด้วยปฏิกิริยาที่ช้ามากซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับเวลา ($t^{1/2}$)

Wong and Fung (2002) ได้ศึกษาการกำจัดและการนำกลับมาใช้ของนิเกิลไอออนจากสารละลาย โดยใช้เซลล์เอ็นเทอร์โรแบคทีเรีย (*Enterobacter* sp.4-2) ยึดติดกับแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) โดยสัดส่วนของเซลล์แบคทีเรียต่อแมกนีไทต์เป็น 10 : 1 ซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาเก็บกัก 10 นาที สามารถลดนิเกิลไอออนในสารละลายได้ 90 เปอร์เซ็นต์

Moller *et al.*, (2002) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำโดยใช้ทรายเคลือบออกไซด์ (Iron Oxide Coated Sand, IOCS) โลหะหนักที่ใช้ในการศึกษา คือ ตะกั่ว (Pb) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และโครเมียม (Cr) เหล็กออกไซด์เป็นกลุ่มเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ และจีโออิตเคลือบด้วยทราย ขนาดอนุภาค 0.32-0.71 มิลลิเมตร มีความพรุน 38 เปอร์เซ็นต์ โดยบรรจุในคอลัมน์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร ความยาว 1 เมตร ความหนา 0.3 เมตร ความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์ เท่ากับ 1 และ 3 เมตรต่อชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Sung Ahn *et al.*, (2001) ได้ศึกษาการกำจัดอาร์ซีนิก (As) โดยใช้ผลพลอยได้ภายในโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กที่เหลือจากกระบวนการต่างๆ โดยมีสารประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 11 ในการทดลองแบบทีละครั้ง (Batch) ปริมาณเหล็กออกไซด์ 50 มิลลิกรัม และสารละลายที่มีอาร์ซีนิกที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ความเร็วรอบในกวนผสม 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 3, 6, 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง แล้วนำมาหาค่าอาร์ซีนิกที่เหลืออยู่ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 20 ชั่วโมงอาร์ซีนิกที่เหลืออยู่มีค่าน้อยกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในภาพที่ 12

Oliveira *et al.*, (2002) ได้ศึกษาส่วนผสมระหว่างดินกับเหล็กออกไซด์ ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) เป็นตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยสารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) เป็นสารที่ปนเปื้อนด้วย นิเกิล ทองแดง แคดเมียม และสังกะสี ตัวดูดซับเหล็กออกไซด์ที่ใช้เป็นส่วนผสมขึ้นมามีพื้นที่ผิว 66 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่าในสัดส่วนดินต่อเหล็กออกไซด์ 2:1 ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส สามารถกำจัด นิเกิล ทองแดง แคดเมียม และสังกะสี ได้ 40, 50, 74 และ 75 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 13

ตารางที่ 11 คุณลักษณะของเหล็กออกไซด์จากผลพลอยได้จากโรงงานเหล็ก

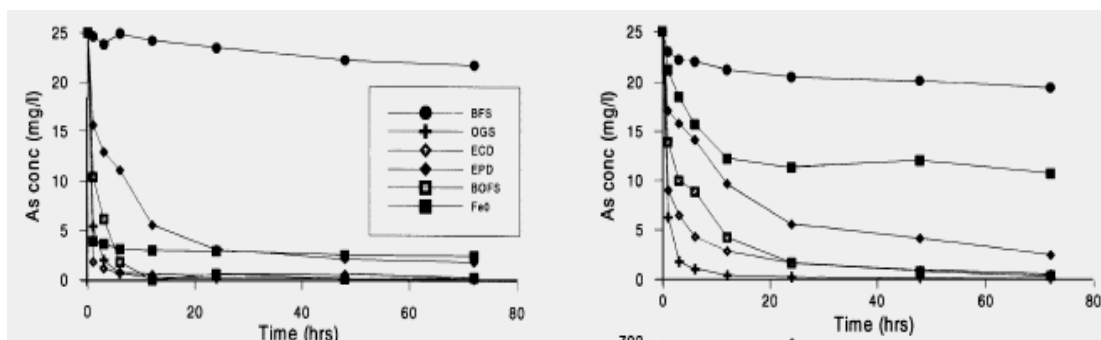
รายการ	องค์ประกอบทางเคมี	แหล่งกำเนิด				
		Blast Furnace Sludge, BFS	Oxygen Gas Sludge, OGS	Evaporation Cooler Dust, ECD	Electrostatic Precipitator Dust, EPD	Basic Oxygen Furnace Slag, BOFS
องค์ประกอบทางเคมี	SiO ₂	7.34	0.75	0.90	1.17	11.04
	Al ₂ O ₃	1.76	<0.01	<0.01	<0.01	1.47
	TiO ₂	0.82	0.04	0.09	0.08	1.40
	Fe ₂ O ₃	64.82	75.75	81.78	80.69	31.34
	MgO	1.14	2.44	1.81	1.62	11.31
	CaO	4.42	9.83	10.99	5.45	34.56
	Na ₂ O	0.05	<0.01	0.01	<0.01	<0.01
	K ₂ O	0.13	0.08	0.04	0.82	<0.01
	MnO	0.35	0.68	0.33	0.71	2.90
	P ₂ O ₃	0.11	0.18	0.19	0.15	2.41
	ZnO	<0.01	4.66	<0.01	4.37	<0.01
	LoI	17.92	0.92	<0.01	<0.01	<0.01
	รวม	98.87	95.31	96.15	95.06	96.43
ความเข้มข้นของน้ำชะขยะ	pH	9.3	11.5	12.2	12.2	11.9
,Leachate Concentration (มก./ล.) ¹	Fe	0.20	<0.01	0.03	<0.01	<0.01
	Ca	15.8	111.2	1,003	513	290
	Pb	0.01	<0.01	2.72	0.43	0.03
	Zn	0.04	0.33	3.15	2.00	0.66
	Ni	<0.01	0.03	0.04	0.13	0.27

ตารางที่ 11 (ต่อ)

รายการ	องค์ประกอบทางเคมี	แหล่งกำเนิด				
		Blast Furnace Sludge, BFS	Oxygen Gas Sludge, OGS	Evaporation Cooler Dust, ECD	Electrostatic Precipitator Dust, EPD	Basic Oxygen Furnace Slag, BOFS
ขนาดของอนุภาค (ไมโครเมตร)	-	16.2-161	1.2-582	1.3-420	3.0-117	<0.5 มม.
d(0.1),d(0.9), (0.5)	-	55.8	36.6	100.7	28.0	-
องค์ประกอบหลักทางแร่วิทยา	-	Fe ₂ O ₃ , CaCO ₃ , SiO ₂	Fe, FeO, CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , CaO	FeO, Fe, Ca(OH) ₂ , CaO, CaCO ₃	Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ O ₃ , Fe, Ca(OH) ₂	FeO, Fe ₂ O ₃ , Ca ₂ SiO ₄ , Ca ₂ Fe ₂ O ₃

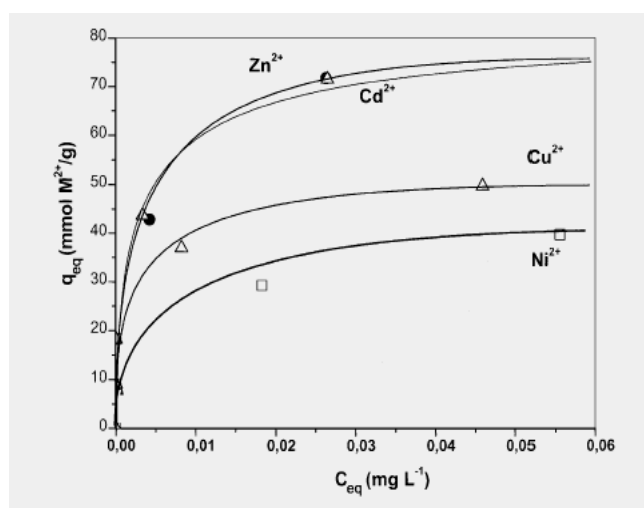
หมายเหตุ ¹ หมายถึง ทดสอบสำหรับวัสดุ 50 มก. คือน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water) ปริมาณ 500 มล. โดยการกวนตลอด 24 ชั่วโมง

ที่มา: Sung Ahn *et al.* (2002)

(ก) อาร์ซีนิก (As⁺⁵)(ข) อาซีนิก (As⁺³)

ภาพที่ 12 กราฟแสดง (ก) อาร์ซีนิก (As⁺⁵) และ (ข) อาซีนิก (As⁺³) ที่เหลืออยู่เป็นเวลาต่างๆ

ที่มา: Sung Ahn *et al.* (2002)



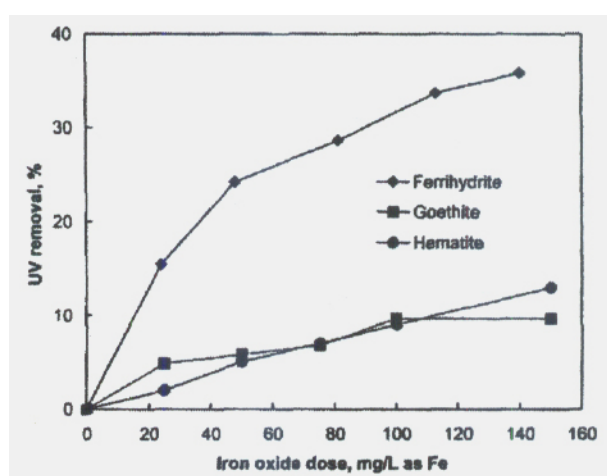
ภาพที่ 13 ไอโซเทอมของการดูดซับของดินผสมเหล็กออกไซด์ที่สัดส่วน 2:1 อุณหภูมิ 28±1

องศาเซลเซียส

ที่มา: Oliveira *et al.* (2002)

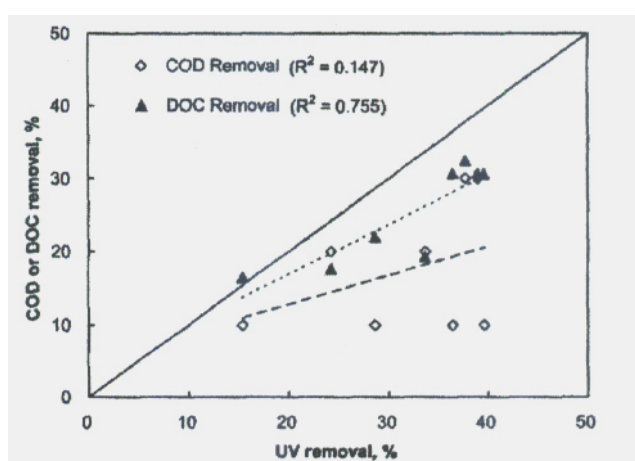
Choo and Kang (2002) ได้ศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ (Organic Matter) ในน้ำเสียโดยใช้การดูดซับเหล็กออกไซด์ ประกอบด้วยเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ จีโออีไทต์ และฮีมาไทต์ โดยความเข้มข้นของเหล็กออกไซด์ 0-150 มิลลิกรัมต่อลิตร และนำไปกวนผสมที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าสารอินทรีย์ที่

เหลืออยู่ ค่าดีไอซี (Organic Carbon, DOC) ซีโอดี (COD) และการดูดกลืนแสงยูวี (UV Absorbance) พบว่า ค่าความเข้มข้นของเหล็กออกไซด์ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จีไออีไทต์และฮีมาไทต์ สามารถดูดกลืนแสงยูวีได้น้อยกว่า 13 เปอร์เซ็นต์ ส่วนเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์สามารถกำจัดได้ 36 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 14 เมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงยูวีกับการกำจัดซีโอดีและดีไอซี พบว่าการดูดกลืนแสงยูวีที่ 40 เปอร์เซ็นต์ สามารถกำจัดซีโอดีได้ประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และดีไอซีได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 15



ภาพที่ 14 เปอร์เซ็นต์การดูดกลืนแสงยูวีของเหล็กออกไซด์

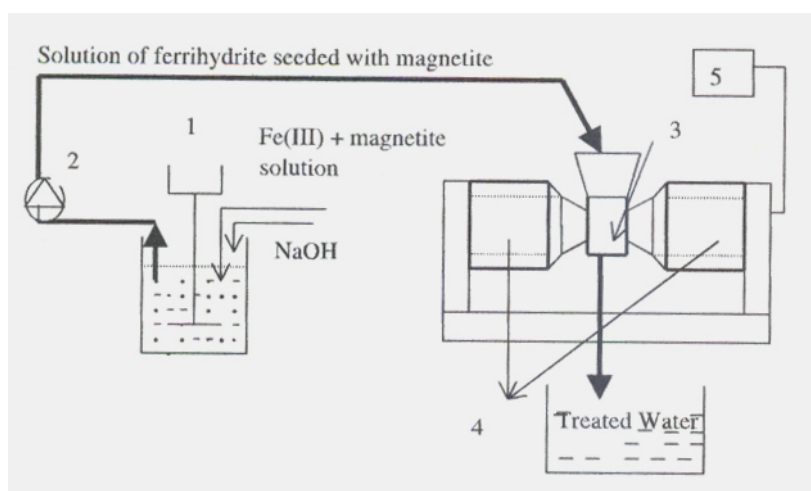
ที่มา: Choo and Kang (2002)



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ดูดกลืนแสงยูวี กับเปอร์เซ็นต์กำจัดซีโอดีหรือดีไอซี

ที่มา: Choo and Kang (2002)

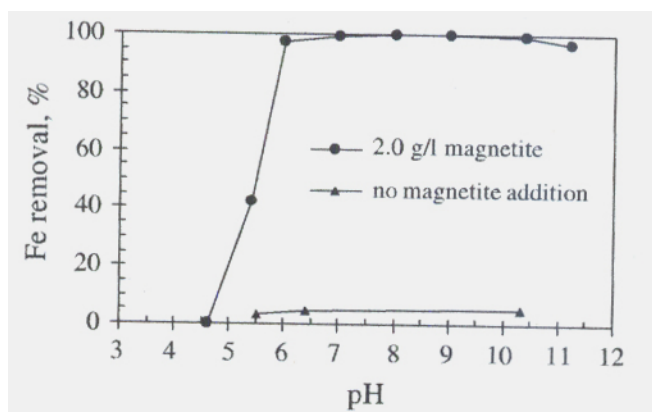
Karapinar (2002) ได้ศึกษาการใช้สนามแม่เหล็กในการแยกเฟอร์ริกไฮดรไรต์ (Ferrihydrite) จากน้ำเสียโดยใช้อ่อนุภาคของแมกนีไทต์ (Fe_3O_4) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคที่สามารถดูดติดแม่เหล็กได้ ขนาดอนุภาค 13 ไมโครเมตร โดยมีพื้นที่ผิว 2.0 ตารางเมตรต่อกรัม ก่อนนำมาใช้จะทำการล้างด้วยกรดไนตริก (HNO_3) และล้างน้ำที่ปราศจากไอออน (Deionized Water) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ใช้ 2.0 กรัมต่อลิตร ในการผสมกับสารละลายเฟอร์ริกไฮดรไรต์ การทดลองดังแสดงในภาพที่ 16 พบว่าการใช้แมกนีไทต์และใช้สนามแม่เหล็กในการเร่งอนุภาคในการตกตะกอนที่พีเอชตั้งแต่ 5.5 ขึ้นไปจะตกตะกอนเฟอร์ริกไฮดรไรต์ได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ไม่ใช้สนามแม่เหล็กจะตกตะกอนได้ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในภาพที่ 17



สัญลักษณ์

- 1 Mechanic Stirrer,
- 2 Peristaltic pump,
- 3 Feed Box,
- 4 Coils,
- 5 Current Control Panel

ภาพที่ 16 การทดลองใช้อ่อนุภาคแมกนีไทต์และสนามแม่เหล็กแยกเฟอร์ริกไฮดรไรต์จากน้ำเสีย
ที่มา: Karapinar (2002)



ภาพที่ 17 ประสิทธิภาพการกำจัดเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์โดยใช้สนามแม่เหล็กขนาด 6900 G.

ที่มา: Karapinar (2002)

Namasivayam and Ranganathan (1995) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียมด้วยตะกอนเหล็ก(II) และโครเมียม(III) ไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมปุ๋ย นำมาทดลองเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง(Batch) พบว่าสมมูลการดูดซับจะเกิดขึ้นภายในเวลา 5 ชั่วโมง โดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้น คือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคดเมียมไอออน เปอร์เซ็นต์การดูดซับจะลดลง แต่ปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับจะเพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิจาก 20 เป็น 40 องศาเซลเซียส ทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลของพีเอช โดยการเพิ่มพีเอชจะทำให้การดูดซับเพิ่มด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำการปรับพีเอช เป็น 3.8

Chen *et al.* (1997) ได้ศึกษาการดูดซับตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ด้วยแร่อะพาไทต์(Apatite) ผลจากการศึกษา พบว่า ความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยแร่อะพาไทต์ไม่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช กล่าวคือ พีเอช 3-10.5 แร่อะพาไทต์ จะถูกดูดซับตะกั่วลดลง 99.9 เปอร์เซ็นต์ แต่ที่พีเอช 12 ดูดซับได้ลดลง 95.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการดูดซับแคดเมียม พบว่าแร่อะพาไทต์จะสามารถดูดซับแคดเมียมได้เพิ่มขึ้นตามพีเอชที่สูงขึ้น และเพิ่มขึ้นเกือบร้อยละ 100 เมื่อพีเอชมากกว่า 6.2 เช่นเดียวกับการดูดซับสังกะสี แต่แตกต่างกันเล็กน้อยในช่วงพีเอช 3.3-6.5 คือการดูดซับแคดเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น ในขณะที่การดูดซับสังกะสีลดลงจาก 0.7953 เป็น 0.5964 มิลลิโมลต่อกรัม และเพิ่มขึ้นทันทีเมื่อพีเอชมากกว่า 6.5 ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้ถึงร้อยละ 99.9

Singh *et al.* (1998) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้แร่ฮีมาไทต์ (Hematite) มากำจัดแคดเมียมในน้ำด้วยกระบวนการดูดซับ โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ ความเข้มข้นของแคดเมียม พีเอช ขนาดอนุภาคของแร่ฮีมาไทต์ อัตราความเร็วในการเขย่า และ อุณหภูมิ ซึ่งพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือ ความเข้มข้นของแคดเมียมเท่ากับ 44.88 ไมโครโมลต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และพีเอชที่ 9.2 โดยการใช้แร่ฮีมาไทต์ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 200 ไมโครเมตร ปริมาณ 40 กรัมต่อลิตร อัตราเร็วในการเขย่า เท่ากับ 125 รอบต่อนาที เวลาที่เข้าสู่สมดุล 2 ชั่วโมง และที่สภาวะนี้สามารถกำจัดแคดเมียมได้ 98 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้มาคำนวณค่าคงที่ต่างๆ และศึกษากลไกของการดูดซับแคดเมียมบนแร่ฮีมาไทต์จากสมการ ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์

จรรยา (2544) ได้ศึกษาการกำจัดอาร์ซีเนท และอาร์ซีนีในสารละลายโดยใช้ฮีมาไทต์เป็นตัวดูดซับ โดยใช้สภาวะความเข้มข้นของอาร์ซีนี และอาร์ซีนี 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช เท่ากับ 4 และเวลาที่ใช้ในการดูดซับเท่ากับ 24 ชั่วโมง พบว่า ค่าสูงสุดของการกำจัดอาร์ซีนี และอาร์ซีนี เท่ากับร้อยละ 82 และร้อยละ 30 ตามลำดับสำหรับฮีมาไทต์ เป็นตัวดูดซับ และพบว่าการดูดซับอาร์ซีนี และอาร์ซีนีเป็นไปตามรูปแบบของแลงเมียร์ ไอโซเทอม และฟรุนดลิค ไอโซเทอม