

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

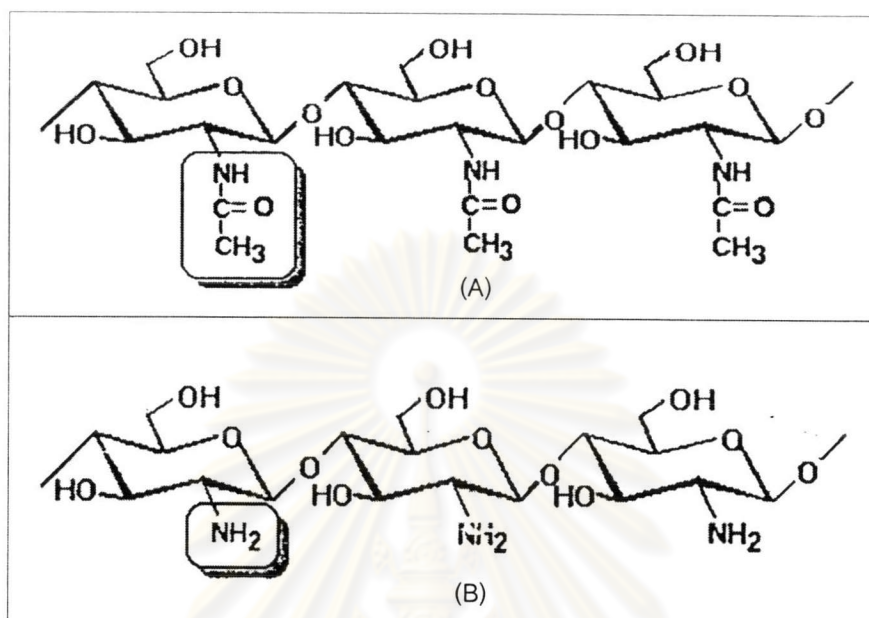
2.1 ลักษณะทั่วไปของไคติน และไคโตซาน

ไคตินเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส พบมากในส่วนประกอบที่เป็นเปลือกแข็งของสัตว์ทะเล เช่น กุ้ง ปู หอย และปลาหมึก เป็นต้น นอกจากนี้ยังพบในเปลือกแข็งของสัตว์พวกแมลง และตามผนังเซลล์ของพืช เห็ด รา และสาหร่ายบางชนิด

ไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-acetamino-2-deoxy-D-glucose หรือ Poly N-acetylglucosamine เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์โมเลกุลยาวที่มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลส ต่างกันที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 มีหมู่ Acetylated amino (NH-CO-CH_3) แทนที่เป็นหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ดังในเซลลูโลส ไคตินมีสูตรทั่วไปเป็น $(\text{C}_8\text{H}_{13}\text{NO}_5)_n$ ประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 47.29 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.45 ไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และออกซิเจนร้อยละ 39.37 (Lee V., 1974 อ้างถึงในเกษม, 2543) เมื่อพิจารณาจากสูตรโครงสร้างของไคติน พบว่า ไคตินเป็นสารโมเลกุลยาวที่ไร้ประจุ (Non-electrolytic polymer) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (A) ซึ่งทำให้ไคตินไม่ละลายในสารละลายต่างๆ ไปโดยง่าย การใช้ประโยชน์จากไคตินจึงไม่แพร่หลาย อย่างไรก็ตามสามารถดัดแปลงไคตินโดยวิธีการทางเคมีเพื่อเพิ่มประโยชน์ในการใช้งานมากขึ้นคือการเตรียมเป็นไคโตซาน

ไคโตซานเป็นอนุพันธ์ของไคตินมีชื่อทางเคมีว่า Poly- β -(1,4)-2-amino-2-deoxy-D-glucose ซึ่งสามารถผลิตได้โดยการแยกหมู่แอซิติลออก (Deacetylation) จากไคตินเหลือเป็นหมู่เอมีโนอิสระ (NH_2) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่สองดังแสดงในรูปที่ 2.1 (B) โดยทั่วไปถ้าหมู่แอซิติลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 60 เรียกว่า ไคโตซาน และถ้าหมู่แอซิติลถูกตัดหรือหลุดไปประมาณร้อยละ 90-100 เรียกว่า Fully deacetylated chitosan (Muzzarelli, 1985) ในทางทฤษฎีไคตินประกอบด้วยไนโตรเจนร้อยละ 6.89 และในไคโตซานร้อยละ 8.70 แต่ในทางปฏิบัติการแยกเอาหมู่แอซิติลออกมักไม่สมบูรณ์ ดังนั้นจึงมีปริมาณไนโตรเจนไม่แน่นอน และอยู่ในช่วงร้อยละ 6.89-8.70 เมื่อพิจารณาสูตรโครงสร้างของไคโตซาน เห็นว่าไคโตซานสามารถมีประจุบวกบนหมู่เอมีโนและอาจพิจารณาว่าเป็นแคทไอออนพอลิเมอร์ สมบัติพอลิอิเล็กโทรไลต์ของไคโตซานมีสมบัติในการดูดซับสารจำพวกอินทรีย์ รวมถึง Polychlorinated biphenyls โปรีติน และกรดนิวคลีอิก (Nucleic acid) รวมถึงไอออนโลหะ นอกจากนี้ยังมีสมบัติในการละลายในตัวทำละลายกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น สารละลายกรดฟอร์มิก สารละลาย

กรดแอสติก เป็นต้น และละลายได้เล็กน้อยในกรดอินทรีย์เจือจาง เช่น กรดเกลือ เป็นต้น จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้การใช้ประโยชน์จากไคโตซานมีสูงกว่าไคติน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของ (A) ไคติน (B) ไคโตซาน (Muzzarelli, 1985)

2.2 กระบวนการเตรียมไคติน

การเตรียมไคตินขึ้นกับวัตถุดิบและสารประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบนั้น ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากเปลือกกุ้งและกระดองปูที่เป็นของเหลือทิ้ง องค์ประกอบของวัตถุดิบส่วนใหญ่เป็นโปรตีนและแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้มีพวกรงควัตถุต่างๆ โปรตีนสามารถแยกออกได้โดยการต้มกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถแยกออกได้โดยการต้มกับกรดไฮโดรคลอริก หรือกรดไนตริก

กระบวนการเตรียมไคตินแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุ (Deminerlization) และขั้นตอนการกำจัดโปรตีน (Deproteinization) ขั้นตอนทั่วไปของการเตรียมไคตินแสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมไคติน

2.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การเตรียมวัตถุดิบเพื่อแยกไคติน เริ่มจากการนำวัตถุดิบ ได้แก่ เปลือกกุ้ง กระดองปู ล้างน้ำ ในกรณีที่ต้องเก็บสะสมวัตถุดิบไว้ระยะหนึ่งก่อน นำเปลือกที่ล้างสะอาดแล้วไปต้มและล้างด้วย Antioxidant solution แล้วนำไปอบให้แห้ง เพื่อให้สามารถเก็บสะสมที่อุณหภูมิห้อง หรือสะดวกต่อการขนส่ง

2.2.2 การกำจัดแร่ธาตุ

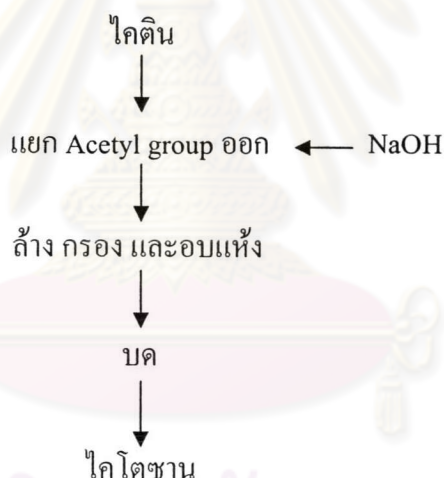
ขั้นตอนการกำจัดแร่ธาตุโดยการใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเจือจางเป็นตัวละลายแร่ธาตุ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเกลือแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังมีการใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ในการกำจัดแร่ธาตุสำหรับกระบวนการเตรียมไคตินในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือลดปฏิกิริยาการสูญเสียสภาพธรรมชาติของไคตินเนื่องจากกรดซัลฟูริกเป็นกรดอ่อน และสามารถนำกลับมาใช้ได้

2.2.3 การกำจัดโปรตีน

ขั้นตอนการกำจัดโปรตีนโดยการใช้สารละลายต่าง ส่วนมากนิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโปรตีน คือ 11.5 นอกจากนี้พบว่า การลดขนาดของวัตถุดิบมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดโปรตีน นอกจากการใช้สารละลายต่างในการกำจัดโปรตีนแล้ว ยังมีการใช้เอนไซม์ในการกำจัดโปรตีนด้วย ซึ่งทำให้ความหนืดของสารละลายไคโตซานลดลง

2.3 กระบวนการเตรียมไคโตซาน

กระบวนการเตรียมไคโตซาน มีขั้นตอนหลักอยู่เพียงขั้นตอนเดียว คือ ขั้นตอนการกำจัดหมู่แอซีทิล (Deacetylation) ในไคตินด้วยสารละลายด่างร้อน สำหรับขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมไคโตซาน แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนทั่วไปของกระบวนการเตรียมไคโตซาน

2.4 สมบัติของไคติน และไคโตซาน

2.4.1 การละลาย (Solubility)

ไคตินไม่ละลายน้ำ กรดเจือจาง ด่างทั้งเจือจางและเข้มข้น แอลกอฮอล์ และตัวทำละลายอินทรีย์อื่นๆ แต่สามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น กรดซัลฟูริกเข้มข้น กรดฟอสฟอริก (78-97%) กรดฟอร์มิก และ DMAc-LiCl (N, N-Dimethylacetamide-Lithium chloride) ซึ่งความยากในการละลายของไคตินในตัวทำละลายต่างๆ เป็นผลมาจากสายโซ่โมเลกุลที่อยู่กันอย่างหนาแน่น มีพันธะ

เกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุล เนื่องจากฟังก์ชันที่ต่างกัน (หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอซีตามิโด) (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2543)

ไคโตซานไม่ละลายในน้ำ ค้าง และตัวทำละลายอินทรีย์ แต่สามารถละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรดอินทรีย์เกือบทุกชนิดที่มีพีเอชน้อยกว่า 6 กรดแอซีติกและกรดฟอร์มิกเป็นกรดที่นิยมใช้ในการละลายไคโตซาน โดยการละลายของไคโตซานในสารละลายกรดอินทรีย์ แสดงดังตารางที่ 2.1 กรดอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก กรดเปอร์คลอริก และฟอสฟอริก สามารถละลายไคโตซานได้เช่นกันแต่ภายใต้การคนที่อุณหภูมิสูงปานกลาง อย่างไรก็ตามในบางครั้งอาจมีตะกอนขาวคล้ายเจลเกิดขึ้น

ตารางที่ 2.1 การละลายของไคโตซานในสารละลายกรดอินทรีย์ที่ความเข้มข้นต่างๆ (รามนรี, 2543)

ชนิดของกรด	ความเข้มข้นของสารละลายกรด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	1	5	10	50	>50
Formic acid	+	+	+	+	+
Acetic acid	+	+	+	+	
Lactic acid	+	+	+		
Citric acid	+	+	+		
Tartaric acid	+	+	+		
Malic acid	+	+	+		
Oxalic acid	+	+	+		
Hydrochloric acid	+				
Adipic acid	+				
Nitric acid	+				
Malonic acid	+				
Propionic acid	+				
Pyruvic acid	+				
Succinic acid	+				

หมายเหตุ: + หมายถึงละลายได้

2.4.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารละลายไคโตซานขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ระดับการกำจัดหมู่แอสีทิล น้ำหนักโมเลกุล ความเข้มข้น ค่าพีเอช และอุณหภูมิ โดยทั่วไปแล้วความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ชนิดของกรดที่ใช้ และการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของสารละลายพอลิเมอร์ให้ผลความหนืดที่แตกต่างกัน เช่น ความหนืดของไคโตซานในกรดแอสีติก เพิ่มขึ้นเมื่อสารละลายมีค่าพีเอชลดลง ในขณะที่ความหนืดของไคโตซานในกรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น

2.4.3 สมบัติพอลิอิเล็กโทรไลต์ (Polyelectrolyte properties)

ไคโตซานเป็นสายพอลิเมอร์ของ Anhydroglucosamine และเป็นสาย Polyelectrolyte ที่สภาวะเป็นกรด มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.5 ไคโตซานในสารละลายมีประจุเป็นบวก เนื่องจากไคโตซานเป็นพอลิเมอร์มีความหนาแน่นของประจุบวกสูง ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloids) โมเลกุลสูง หรือพวกวอลิแซ็กคาไรด์ ส่วนใหญ่มีประจุเป็นกลางหรือเป็นประจุลบ แต่ไคโตซานเป็นหนึ่งในพวก Cationic polyelectrolyte จึงมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ได้มากกว่า เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่มีประจุลบ ประจุบวกของไคโตซานจับอย่างแน่นกับผิวที่เป็นประจุลบทำให้เกิดความเป็นกลางบริเวณผิวของจุลินทรีย์ ดังนั้นการจับของไคโตซานกับเซลล์สิ่งมีชีวิตเป็นสมบัติที่สำคัญมากในการนำไปใช้ในการแพทย์ (Hon, 1996)

2.4.4 มวลโมเลกุล (Molecular weight)

ความยาวของสายโซ่ของโมเลกุลมีความสำคัญในการพิจารณาสมบัติของพอลิเมอร์ ซึ่งพอลิเมอร์ทั่วไปมีสายขนาดใหญ่แต่ไม่จำเป็นต้องมีขนาดยาวเท่ากัน การนำไคโตซานไปใช้ประโยชน์ต่างๆ มีความสัมพันธ์กับมวลโมเลกุล ระดับการกำจัดหมู่แอสีทิล ซึ่งมีผลต่อกลไกการทำงาน และสมบัติทางเคมี เมื่อใช้ไคโตซานในการผลิตฟิล์ม การผลิตเมมเบรน และเส้นใยต่างๆ มวลโมเลกุลสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม ซึ่งมวลโมเลกุลเฉลี่ยของไคติน คือ 1.03×10^6 ถึง 2.5×10^6 คอลตัน และมวลโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลไคติน (Carboxymethylchitin) ประมาณ 1.33×10^6 คอลตัน (Muzzarelli, 1977) โดยทั่วไปมวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักของ Fully deacetylation chitosan ที่สกัดได้จากกุ้งมีค่าประมาณ $440,000 \pm 50,000$ กรัม/โมล และของปูมีค่าประมาณ 500,000-850,000 กรัม/โมล (เขาวภา, 2534)

2.4.5 ระดับการกำจัดหมู่แอซีทิล (Degree of deacetylation)

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการใช้ประโยชน์จากไคโตซาน คือ ระดับการกำจัดหมู่แอซีทิล ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพของไคโตซาน ดังนั้นจึงมีการวัดระดับแอซีทิลของไคโตซานเพื่อพิจารณาถึงการใช้งาน ซึ่งการวิเคราะห์มีหลายวิธี ได้แก่ Infrared spectroscopy (IR), Circular dichroism (CD), Elemental analysis (EA), Titration และ First derivation ultraviolet (UV) spectroscopy ลักษณะของ IR ยากในการวิเคราะห์ และผลที่ได้มีแนวโน้มที่คลาดเคลื่อน การศึกษาแบบ CD มีข้อจำกัดในการละลายของผลิตภัณฑ์ ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์พวกที่ไม่ละลาย และพวก Highly acetylated polymeric compound ได้ วิธีไตเตรตมีความยุ่งยาก และใช้เวลานาน และผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดย ER ไม่มีความแตกต่างกันทางนัยสำคัญ โดยเฉพาะถ้ามีการปนเปื้อนของ By-product . แต่วิธีนี้ใช้ในการหาไคโตซานซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของ glucosamine/N-acetylglucosamine ส่วนการตรวจสอบพวกกลุ่มเอมีโนอิสระโดยการใช้ Fluoresence มีการตอบสนองเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคซามีนแบบไม่เป็นเส้นตรง และการวัดตัวอย่างอาจมีการเจือจางขึ้นอยู่กับค่าที่ต้องการวัด (Miyoshi et al., 1992)

2.5 การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซาน (Application of chitin and chitosan)

การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซานในด้านต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้ไคติน และไคโตซาน (Kupongsak, 1995 และ Goosen, 1997)

การประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการใช้งาน
การบำบัดน้ำ	<ul style="list-style-type: none"> • การกำจัดโลหะหนัก • ตัวสร้างตะกอน/ตกตะกอน: โพรตีน สี และกรดเอมีโน • ใช้เป็นตัวกรอง (Filtration)
อุตสาหกรรมสิ่งทอและกระดาษ	<ul style="list-style-type: none"> • เคลือบหน้ากระดาษเพิ่มความแข็งแรง และทำให้เยื่อกระดาษรวมตัว และเกิดฟิล์มที่ต้านน้ำ • เคลือบเส้นใยผ้าเพิ่มการต้านทานน้ำ
ด้านการแพทย์และเภสัช	<ul style="list-style-type: none"> • ผ้าพันแผล (Bandages) • ป้องกันเส้นเลือดอุดตัน ควบคุมระดับคลอเรสเตอรอลในเลือด • ผลิตเมมเบรน (Membranes) • ใช้ด้านทันตกรรม/ยับยั้งการเกิดหินปูน • รักษาผิวหนังไหม้/ทำผิวหนังเทียม (Artificial skin) • ตกตะกอนยา และใช้เป็น Drug carrier

ตารางที่ 2.2 การประยุกต์ใช้โคติน และโคโตซาน (Kupongsak, 1995 และ Goosen, 1997) (ต่อ)

การประยุกต์ใช้	ตัวอย่างการใช้งาน
เครื่องสำอาง	<ul style="list-style-type: none"> • แป้งแต่งหน้า (Make-up powder) • ผลิตภัณฑ์เคลือบเงาเล็บ (Nail polish) • เพิ่มความชุ่มชื้น (Moisturizer) เป็นส่วนผสมโลชั่นอาบน้ำ (Bath lotion) • ยาสีฟัน • Foam enhancing
เทคโนโลยีชีวภาพ	<ul style="list-style-type: none"> • Enzyme immobilization and Cell immobilization • Protein separation • Chromatography • Cell recovery • Glucose electrode
การเกษตร	<ul style="list-style-type: none"> • เคลือบเมล็ดพันธุ์พืช • Hydroponic/Fertilizer • Controlled agrochemical release
อาหาร	<ul style="list-style-type: none"> • Removal of dyes, solid, Acids • เป็นสารกันเน่าเสีย (Preservatives) • เพิ่มความคงทนของสี (Color stabilization) • ส่วนผสมในอาหารสัตว์ (Animal feed additive)
เมมเบรน	<ul style="list-style-type: none"> • Reverse osmosis • Permeability control • Solvent separation

2.6 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับเป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปฏิกิริยาการเช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass Transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent (มันลีน, 2538)

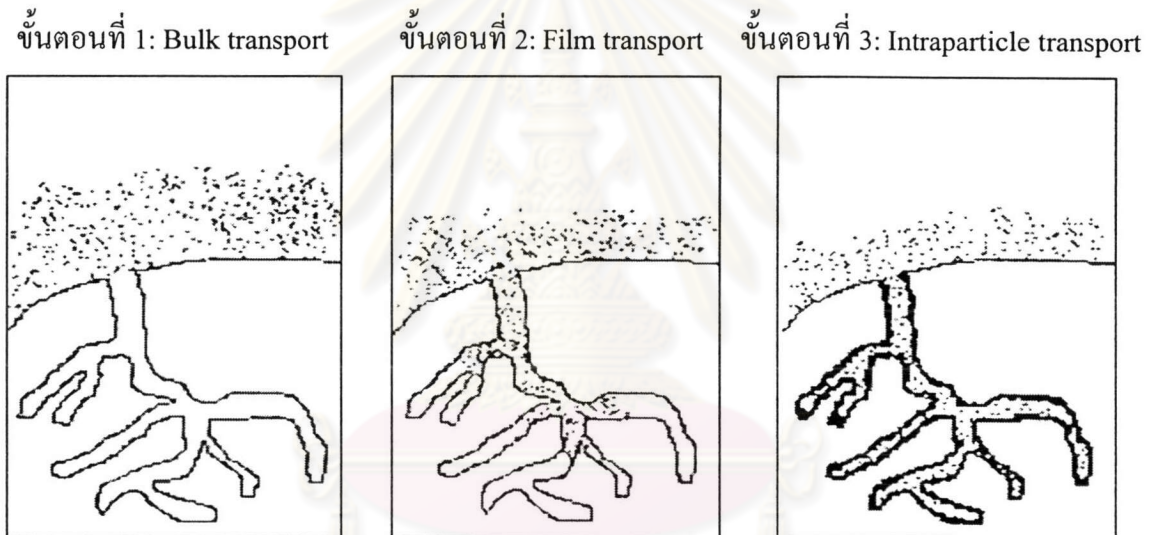
2.6.1 กลไกการดูดซับ (Noll et al., 1992 และ Faust et al., 1987)

กลไกการดูดซับที่เกิดขึ้นในระหว่างการดูดซับ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ในเนื้อสารละลาย (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับในของเหลวถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่หุ้มอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การเคลื่อนที่ในชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับ การเคลื่อนที่ในชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับที่ผิวขั้นตอนหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 3 การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลของตัวถูกดูดซับที่อยู่ที่ผิวหน้าของสารดูดซับเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับภายใน ซึ่งขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นกัน



รูปที่ 2.4 กลไกการดูดซับ (Noll et al., 1992 และ Faust et al.,

2.6.2 ประเภทของการดูดซับ

กระบวนการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ประเภท (Slejko, 1985 and Said et al., 1993)

1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption)

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayered) โดยในแต่ละชั้นของโมเลกุลอยู่

บนชั้นของ โมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของ โมเลกุลของ สารถูกดูดซับ หรือจำนวนชั้นของ โมเลกุลเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดซับเพิ่มขึ้น การดูดซับ แบบนี้สามารถผันกลับได้ (Reversible)

2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

การดูดซับทางเคมีเกิดจากการปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับ และสารดูดซับ ซึ่ง ก่อให้เกิดสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับ และสารถูกดูดซับ

3. การดูดซับด้วยประจุ (Ionic adsorption) (Solmaz et al., 2000)

การดูดซับด้วยประจุเป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่พื้นผิวด้วย แรงของประจุที่ตรงข้ามกัน (Electrical attraction) ทำให้ไอออนของตัวถูกดูดซับติดอยู่ที่พื้นผิวตัวดูดซับ ในตำแหน่งที่มีประจุตรงข้ามกัน ไอออนที่มีประจุสูงถูกดูดติดได้ดีกว่าพวกที่มีประจุต่ำๆ และไอออนที่มีขนาดเล็ก

2.6.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (Said et al., 1993 และ Solmaz et al., 2000)

1. ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับอาจขึ้นอยู่กับ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม หรือแพร่ผ่านรูพรุน (Pore diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบตัวดูดซับมีความหนามาก (เพราะไม่ถูกรบกวน) และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาตัวดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มน้ำเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้น้ำไม่อาจสะสมตัวจนเป็นฟิล์มหนา เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาตัวดูดซับได้เร็วกว่าการเคลื่อนที่เข้าไปในโพรง กรณีนี้การแพร่ผ่านรูพรุนเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

2. ขนาด และพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของตัวดูดซับ คือ ขนาด และพื้นที่ผิว ขนาดของตัวดูดซับมีอิทธิพลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ กล่าวคืออัตราเร็วการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ ดังนั้นตัวดูดซับที่มีขนาดเล็กจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าขนาดใหญ่ ส่วนพื้นที่ผิวของตัวดูดซับนั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) นั่นคือตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้มากกว่าตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวน้อย

3. ค่าพีเอช

ค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) เนื่องจากที่ค่าพีเอชต่ำๆ มีปริมาณไฮโดรเนียมไอออนมากกว่าที่ค่าพีเอชสูง ซึ่งมีผลต่อค่าการดูดซับหรือไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวถูกดูดซับ และตัวดูดซับ กล่าวคือในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นบวก และตัวดูดซับมีตำแหน่งดูดซับที่มีประจุเป็นลบ ถ้าสารละลายมีค่าพีเอชต่ำ ทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มลดลง เนื่องมาจากการแย่งกันที่ถูดูดซับของตัวถูกดูดซับที่มีประจุบวกกับไฮโดรเนียมไอออนในสารละลาย แต่ได้ผลในทางตรงกันข้ามกัน เมื่อการดูดซับอยู่ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูง เนื่องจากไฮโดรเนียมไอออนมีปริมาณน้อยลง และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จึงลดผลในการเข้าแย่งจับหรือดูดซับกับตัวถูกดูดซับ และในกรณีที่ตัวถูกดูดซับมีประจุเป็นลบ ก็ให้ผลตรงกันข้ามในทำนองเดียวกัน

4. อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับขึ้นอยู่กับว่าการดูดซับในระบบเป็นประเภทใด คือถ้าเป็นการดูดซับทางกายภาพอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการดูดซับเปลี่ยนแปลงไปในทางน้อยลงหรือคงที่ ถ้าเป็นการดูดซับทางเคมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นไปด้วย เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนช่วยเร่งการสร้างพันธะเคมีให้เร็วขึ้น และเพิ่มโอกาสที่ตัวดูดซับเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับตำแหน่งดูดซับของตัวดูดซับได้มากขึ้น

5. ความสามารถในการละลายน้ำของสารที่ถูกดูดซับต่อการดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลตัวถูกดูดซับถูกดึงออกจากน้ำก่อนแล้วจึงไปเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียว

แน่นมากกว่าสารที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยกว่า จึงทำให้ยากต่อการดูดซับมากกว่าสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยกว่า แต่ไม่ได้เป็นจริงเสมอไป ทั้งนี้เพราะมีสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิด ถูกดูดซับบนตัวดูดซับได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงไม่อาจกล่าวได้อย่างเต็มที่ว่าความสามารถในการดูดซับ และความสามารถในการละลายน้ำมีความสัมพันธ์กันอย่างแน่นอนในเชิงปริมาณ

6. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับบนผิวของตัวดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ เมื่อนำหนักโมเลกุล และขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เช่น การดูดซับกรดอินทรีย์ โดยถ่านกัมมันต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์ดูดซับ กรดฟอร์มิก กรดแอสติก กรดโพรพิอิก และกรดบิวเทอริก ได้มากขึ้นตามลำดับของขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น (Solmaz et al., 2000 และ Sharma et al., 1993) นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อการละลายด้วย โดยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างที่ยาว มักมีความสามารถในการละลายน้ำได้ลดลงจึงส่งผลทำให้เกิดการดูดซับโดยตัวดูดซับมากขึ้นตามขนาดที่เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ตัวดูดซับมีรูพรุนมาก สารที่มีโมเลกุลเล็กกว่ารูพรุนมักถูกดูดซับได้ดีมากกว่าสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากสารโมเลกุลขนาดใหญ่ไม่สามารถเข้ารูพรุนได้ และพื้นที่ผิวภายนอกที่ดูดซับมีอยู่น้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวภายนอกเป็นรูพรุน

2.7 การศึกษาขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Rate-determining step)

การศึกษาขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ เป็นการศึกษาหาขั้นที่ปฏิกิริยาเกิดช้าที่สุด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วกระบวนการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกเป็นขั้น Bulk transport ซึ่งเป็นขั้นที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเคลื่อนที่ในเนื้อสารละลาย (รูปที่ 2.4) ที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันหมด ดังนั้นเมื่อมีการกวนสารละลายหรือให้ความเร็วแก่ระบบ ทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุลตัวถูกดูดซับเกิดเร็วขึ้น ส่งผลให้ขั้น Bulk transport ไม่ใช่ขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ดังนั้นในงานวิจัยส่วนใหญ่จึงมักทำการศึกษากลไกการเคลื่อนย้ายมวลสารในขั้น Film diffusion และ Intraparticle diffusion เพื่อให้ทราบว่ามีขั้นตอนใดเป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับ และเพื่อได้ทราบภาพรวมอัตราเร็วของปฏิกิริยา โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่ตัวถูกดูดซับถูกดูดบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยตัวดูดซับ (q) กับรากที่สองของเวลา ($t^{1/2}$)

2.8 สมดุล และไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption equilibrium and adsorption isotherm) (Faust และ Aly, 1987)

การดูดซับด้วยของแข็งที่เกิดขึ้นในสารละลาย สัมพันธ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็ง เมื่อกระบวนการดูดซับดำเนินเรื่อยๆ มีการคายการดูดซับ (Desorption) เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน จนในที่สุดจำนวนตัวถูกละลายกับที่คายออกมาเท่ากันหรือระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่ภาวะสมดุลของการดูดซับความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของของแข็งไม่เปลี่ยนแปลง ภาวะในการเกิดสมดุลของการดูดซับหนึ่งๆ เป็นสมบัติของระบบนั้นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวถูกละลาย ตัวดูดซับ อุณหภูมิ และค่าพีเอช ปริมาณของการดูดซับที่สมดุลเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปเราใช้ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้น

2.8.1 ไอโซเทิร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

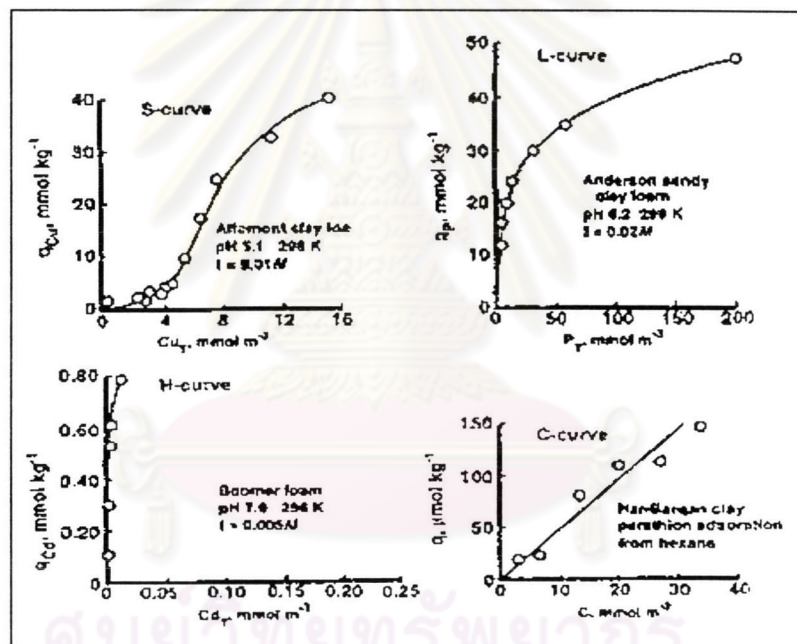
ไอโซเทิร์มของการดูดซับเป็นเส้นที่ลากขึ้นเพื่อบอกถึงปริมาณการดูดซับสาร หรือ ไอออนบนผิวของตัวดูดซับต่างๆ ได้จากการลากเส้นต่อกันระหว่างจุดต่างๆ ที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารหรือไอออนที่ถูกดูดซับไว้ต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (q_c) กับความเข้มข้นของสาร หรือ ไอออนที่เหลืออยู่ในสารละลายที่ภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่ (C_c) โดยทั่วไปการศึกษาการดูดซับมักพบไอโซเทิร์มใน 4 ลักษณะ คือ S, L, H และ C ซึ่งสามารถจำแนกได้ด้วยลักษณะความโค้งของความชันของเส้น ไอโซเทิร์มในช่วงเริ่มต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5

S-curve isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นต่ำแล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ในที่สุดก็ลดลงและเป็น 0 เมื่อพื้นที่ว่างในการดูดซับของสารดูดซับเต็ม ไอโซเทิร์มชนิดนี้ชี้ให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นต่ำๆ พื้นที่ผิวของสารดูดซับมีแรงดึงดูดต่อสารที่ถูกดูดซับต่ำ แต่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

L-curve isotherm ความชันในช่วงเริ่มต้นสูงมาก และค่อยๆ ลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น พฤติกรรมการดูดซับเช่นนี้สามารถอธิบายได้ว่า สารดูดซับมีแรงดึงดูดหรือมีความสามารถในการดูดซับสารหรือไอออนในสารละลายที่ความเข้มข้นต่ำ และลดลงเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ว่างในการดูดซับมีน้อยลง

H-curve (High affinity) isotherm มีลักษณะความชันในช่วงเริ่มต้นสูงมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับ L-curve isotherm) ลักษณะดังกล่าวแสดงว่าการดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้สูง ซึ่งอาจเกิด Inner-sphere complexation หรือเกิดปฏิกิริยาดว้ยแรงวานเดอร์วาลส์ขึ้นในกระบวนการดูดซับ (Sposito, 1989)

C-curve isotherm ความชันกราฟนี้ไม่ผันแปรตามความเข้มข้นของสารละลาย แสดงถึง Partitioning mechanism ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลที่สามารถถูกดูดซับถูกทำให้แพร่กระจายหรือแยกออกระหว่างบริเวณใกล้ผิวของตัวดูดซับ (Interfacial phase) กับสารละลาย โดยปราศจากพันธะจำเพาะใดๆ (Specific bonding) ระหว่างตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ



รูปที่ 2.5 รูปแบบของ Adsorption isotherm ต่างๆ (Danals, 1995)

2.8.2 สมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์ม

โดยทั่วไปสมการที่ใช้อธิบายไอโซเทิร์มของการดูดซับมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้นำมาอธิบายสมดุลของการดูดซับที่เกิดขึ้น แต่ที่นิยมใช้งานมากในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับคือ สมการแลงเมียร์ และสมการฟรุนดลิช

1. สมการแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานของสมการแลงเมียร์

1. การดูดซับเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอน และพื้นที่นั้นๆ สามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว
2. การดูดซับสามารถย้อนกลับได้
3. ไม่มีการเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของไอออน หรือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ
4. พลังงานในการดูดซับเท่ากันในทุกๆ พื้นที่ของการดูดซับ และไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างไอออน หรือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับ

สมการแลงเมียร์สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$q_c = X_m b C_c / (1 + b C_c) \quad (2.1)$$

เมื่อ q_c = ปริมาณของโลหะที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

X_m = ปริมาณสูงสุดของตัวถูกดูดซับที่สามารถถูกดูดซับแบบชั้นเดียวต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

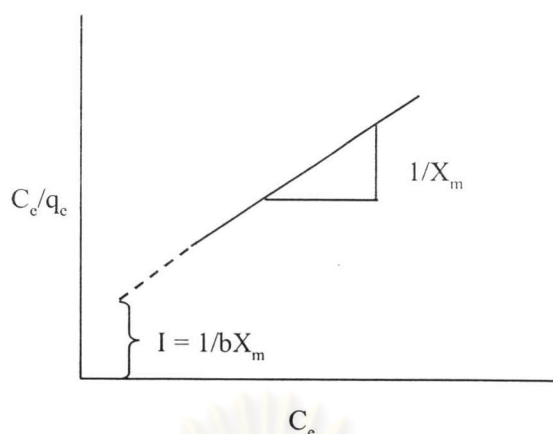
b = ค่าคงที่ของการดูดซับ

C_c = ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล (mg/l)

จากสมการ (2.1) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$C_c/q_c = (1/bX_m) + (C_c/X_m) \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ C_c/q_c เป็นแกน y และ C_c เป็นแกน x ได้ค่าความชันเท่ากับ $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของ Langmuir adsorption isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง (Sunstorm, 1997)

2. สมการฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการฟรุนดลิช เป็นสมการการดูดซับที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอธิบายถึงการลดลงของพลังงานในการดูดซับเมื่อการปกคลุมผิวของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นในรูปของลอการิทึม (Logarithmic) สามารถแสดงได้ดังสมการ

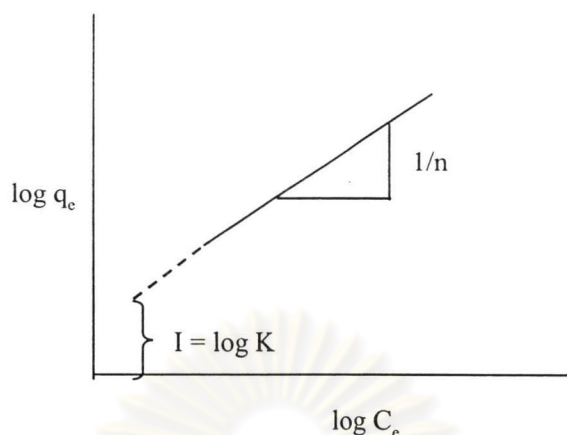
$$q_c = KC_c^{1/n} \quad (2.3)$$

โดย K = สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจาย
 n = correcting factor

จากสมการที่ (2.3) สามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการ

$$\log q_c = \log K + (1/n) \log C_c \quad (2.4)$$

เมื่อนำค่า $\log q_c$ กับ $\log C_c$ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ โดยให้ $\log q_c$ เป็นแกน y $\log C_c$ เป็นแกน x ได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และ จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ แสดงดังรูปที่ 2.7 เมื่อ $1/n$ มากกว่า 1 หรือมีความชันมาก แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยก็มีผลต่ออัตราการดูดซับมาก คือ เมื่อความเข้มข้นต่ำอัตราการดูดซับก็ต่ำและเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น แต่เมื่อ $1/n$ น้อยกว่า 1 หรือความชันต่ำมาก แสดงว่า อัตราการดูดซับเมื่อความเข้มข้นต่ำ หรือสูง ไม่แตกต่างกันนัก



รูปที่ 2.7 ลักษณะของ Freundlich adsorption isotherm ในรูปของกราฟเส้นตรง (Sunstorm, 1997)

2.9 ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม

ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร เป็นศูนย์ฯ แห่งแรก โดยเริ่มต้นจากการที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ลงทุนจัดสร้างศูนย์ฯ นี้ ซึ่งแล้วเสร็จในปี พ.ศ. 2531 ต่อจากนั้นกรมโรงงานฯ ได้ดำเนินการให้มีการเช่าดำเนินการโดยบริษัทเอกชน โดยบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (General Environmental Conservation Public Co., Ltd.: (GENCO) เข้ามาดำเนินการตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 จนถึงปัจจุบัน

ศูนย์ฯ นี้สามารถรองรับของเสียประเภทกรด ต่าง และโลหะหนัก มีความสามารถในการรับน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม 800 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ 200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และกากตะกอนและของแข็งที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก 100 ตันต่อวัน กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียภายในศูนย์ฯ รวมทั้งกากตะกอนและของแข็งที่รับจากภายนอกถูกทำให้คงตัวแล้วถูกส่งไปทำการฝังกลบ (Secure landfill) ยังศูนย์ราชบุรี

2.9.1 การให้บริการ

การให้บริการของศูนย์ฯ ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. การขนส่งกากของเสีย
2. การศึกษาวิเคราะห์ของเสียก่อนการบำบัด
3. การบำบัดน้ำเสีย

4. การปรับเสถียรภาพของเสีย
5. การฝังกลบอย่างปลอดภัย
6. การผสมกากเป็นเชื้อเพลิง

โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอน ดังนี้

1. การขนส่งกากของเสีย

ในการขนส่งกากของเสีย GENCO ได้จัดการขนส่งด้วยวิธีการต่างๆ ตามลักษณะของของเสีย รถทุกคันต้องมีอุปกรณ์ภายในกรณีเหตุฉุกเฉิน เช่น อุปกรณ์ดับเพลิง เครื่องดูดสารเคมี เครื่องสูบน้ำ หมวก ชุดนิรภัย อุปกรณ์สื่อสาร วิธีการขนส่งของเสียมีดังนี้

1.1 ของแข็ง เช่น ฟลอคฟลูออเรสเซนต์ ถ่านไฟฉาย เก็บขนโดยใช้ตู้คอนเทนเนอร์ที่ปิดมิดชิด ทาง GENCO ได้นำตู้คอนเทนเนอร์เปล่าไปตั้งไว้ที่โรงงาน เมื่อใส่ของเสียเต็มแล้วก็มายกตู้ใส่รถพ่วงไปบำบัดที่ศูนย์ฯ

1.2 ของเหลวปริมาณน้อย เช่น ตัวทำละลายอินทรีย์ ตะกอนสี บรรจุไว้ในถังพลาสติกที่มีฝาปิดมิดชิดและมีเข็มขัดรัดฝา ในการขนส่งวางถังเหล่านี้ไว้ในตู้ปิดทึบเพื่อป้องกันการรั่วไหลเมื่อเกิดอุบัติเหตุ

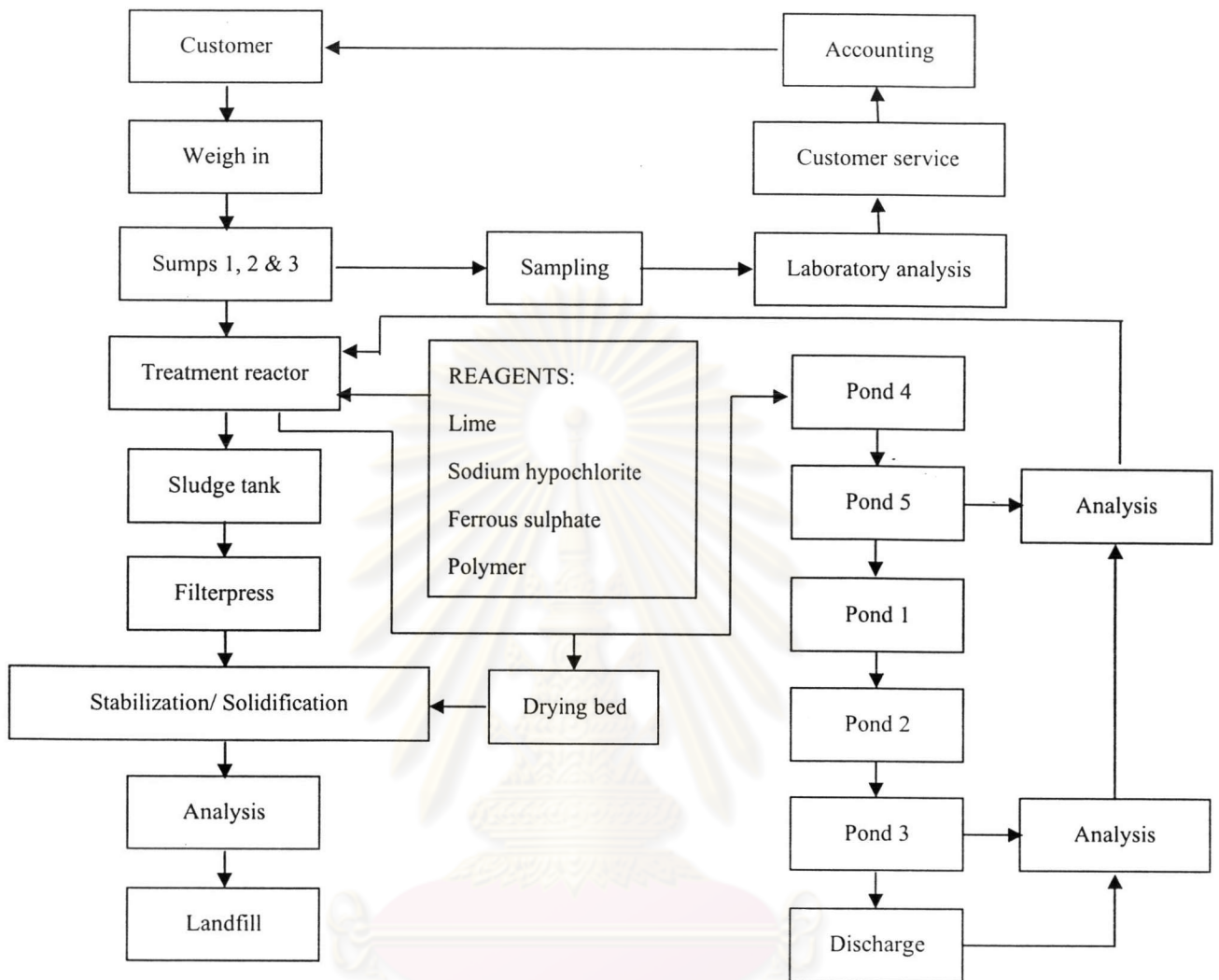
1.3 ของเหลวปริมาณมาก เช่น น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ ใช้รถบรรทุกที่มีลักษณะคล้ายรถน้ำมัน

2. การศึกษาวิเคราะห์ของเสียก่อนบำบัด

ก่อนที่โรงงานใดทำสัญญาจ้าง GENCO ทำการบำบัดของเสียนั้น โรงงานต้องส่งตัวอย่างของเสียมาให้ GENCO เพื่อตรวจสอบชนิดต่างๆ ของของเสีย สารปนเปื้อนในของเสีย และศึกษาความเป็นไปได้ในการบำบัดด้วย ดังนั้นเมื่อถึงขั้นตอนที่โรงงานส่งของเสียมาบำบัดจริง GENCO ต้องทำการตรวจสอบปริมาณและสมบัติของเสียที่ส่งมาว่าเป็นประเภทเดียวกับที่ตกลงไว้หรือไม่ วิธีใดเป็นวิธีการบำบัดที่เหมาะสม และต้องใช้สารเคมีในการบำบัดเท่าใด

3. การบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียที่รับบำบัดที่ศูนย์ฯเสมอมา ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม และโรงงานชุบโลหะ ซึ่งรายละเอียดกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานหุบโลหะ (GENCO, 1999)

โดยมีหลักการดังนี้

3.1 บ่อสูบน้ำเสียจำนวน 3 บ่อ แต่ละบ่อรับน้ำเสียที่มีลักษณะต่างกัน ดังนี้

- บ่อที่ 1 (Sump 1) รับน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักต่างๆ แต่ไม่มีโครเมียม (+6)
- บ่อที่ 2 (Sump 2) รับน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโครเมียม (+6) แต่ไม่มีไซยาไนด์
- บ่อที่ 3 (Sump 3) รับน้ำเสียที่ปนเปื้อนโดยโครเมียม (+6) และไซยาไนด์

3.2 ถังปฏิกรณ์ (Treatment reactor) จำนวน 2 ถัง ซึ่งมีการทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) มีการติดตั้งใบพัดควมผสมสารเคมีให้เข้ากับน้ำ และทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง โดยเปลี่ยนมวลสารที่ละลายน้ำมาเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ และถ้านี้ทำหน้าที่เป็นถังตกตะกอนด้วย ตะกอนก้นถังถูกส่งไปยังลานตากตะกอนต่อไป น้ำเสียที่ศูนย์ฯรับบำบัดแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม แต่ละกลุ่มมีหลักการบำบัดดังนี้

3.2.1 หลักการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนักต่างๆ แต่ไม่มีโครเมียม (+6)

ทำการกำจัดด้วยการตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) โดยเติมปูนขาวหรือสารที่ทำให้เกิดการตกตะกอนชนิดอื่นๆ เช่น เกลือซัลไฟด์ ปรับพีเอชของน้ำให้เหมาะสม เมื่อเกิดตะกอนแล้วทำการรวมตะกอนให้ใหญ่ขึ้นด้วยกระบวนการ Chemical coagulation โดยใช้ Coagulant และ Polymer ชนิดที่เหมาะสม หยุดเครื่องกวนแล้วปล่อยให้ตกตะกอนแยกจากน้ำ

3.2.2 หลักการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโครเมียม (+6) แต่ไม่มีไซยาไนด์

ทำการกำจัดด้วยปฏิกิริยารีดักชัน โดยการใช้สารรีดิวซ์ต่างๆ เช่น Ferrous sulphate, Sodium metabisulfite และ Sulfur dioxide ขั้นตอนนี้เปลี่ยนจาก Cr^{+6} เป็น Cr^{+3} ต่อจากนั้นทำการตกตะกอน Cr^{+3} ในรูป $Cr(OH)_3$ เมื่อเกิดตะกอนขึ้นแล้วจึงทำ Chemical coagulation และตกตะกอนเช่นเดียวกับน้ำเสียชนิดแรก

กรณี (2536) กล่าวว่าโครเมียมในน้ำเสียที่อยู่ในรูปของโครเมียม (+6) ถูกรีดิวซ์เปลี่ยนเป็นโครเมียม (+3) ที่ไม่เป็นอันตราย โดยการเติมโซเดียมเมตาซัลไฟท์ในน้ำเสียที่ปรับค่าพีเอชให้อยู่ระหว่าง 2-2.5 ด้วยกรดกำมะถัน ปฏิกิริยาสมบูรณที่ค่า Redox potential -280 mV

3.2.3 หลักการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโครเมียม (+6) และไซยาไนด์

กรณีนี้ต้องกำจัดโครเมียม (+6) ด้วยกระบวนการรีดักชัน และกำจัดไซยาไนด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน สิ่งที่สำคัญยิ่งก็คือต้องทำการบำบัดไซยาไนด์ก่อน ถ้าไม่เช่นนั้นสามารถเกิดแก๊สพิษซึ่งเป็นอันตรายถึงชีวิตได้ การกำจัดทำเป็นขั้นตอนดังนี้ ขั้นแรกปรับพีเอชของน้ำให้มีค่า 9.5 เติมโซเดียมไฮโปคลอไรด์ (ตัวออกซิไดซ์) แล้วทอเวลาให้เกิดปฏิกิริยาโดยสมบูรณ ไซยาไนด์ถูกเปลี่ยนไปเป็น CNO ซึ่งมีพิษต่ำลง เมื่อไซยาไนด์ถูกกำจัดหมดไปแล้ว ขั้นตอนต่อไปดำเนินการกำจัดโครเมียม (+6) ตามวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

ครุณี (2536) กล่าวว่าโซเดียมไนไตรต์ในน้ำเสียถูกทำลายโดยกระบวนการ Alkali Chlorination ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป และค่อนข้างถูกกว่าวิธีอื่นๆ ในกระบวนการดังกล่าว คลอรีน (ในรูปโซเดียมไฮโปคลอไรต์) ถูกเติมลงในน้ำเสียที่ปรับค่าพีเอชให้อยู่ระหว่าง 11.0-11.5 โดยการเติมปูนขาว คลอรีนทำปฏิกิริยากับโซเดียมไนไตรต์อย่างสมบูรณ์ที่ค่า Redox potential ประมาณ -220 mV

4. การปรับเสถียรกากของเสีย (Stabilization and Solidification)

กากของเสียต่างชนิดกัน มีวิธีการที่เหมาะสมในการปรับเสถียรต่างกัน ดังนั้นก่อนการปรับเสถียรของเสียชนิดใดๆ ต้องมีการทำการทดลองเบื้องต้นในห้องทดลองก่อนเสมอ ตัวอย่างการปรับเสถียรได้แก่ กากตะกอนปรอทนำมาปรับเสถียรด้วยโซเดียมซัลไฟด์แล้วผสมเข้ากับปูนซีเมนต์ให้กลายเป็นก้อนแข็ง สารต่างๆเหล่านี้ถูกนำมารวมกันแล้วผสมให้เข้ากัน โดยการใช้อุปกรณ์ไม่ผสม

5. การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill)

กากของเสียที่ผ่านการบำบัดที่เหมาะสมแล้วถูกนำไปฝังกลบที่จังหวัดราชบุรี

6. การผสมเป็นกากเชื้อเพลิง

เป็นการนำของเสียที่เป็นสารอินทรีย์มาผสมเป็นเชื้อเพลิงเพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ สารอินทรีย์ที่นำมากำจัดโดยวิธีนี้ต้องไม่เป็นสารที่มีปฏิกิริยารุนแรง สารที่ระเบิดได้ หรือสารกัมมันตรังสี

2.10 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่า 5 เท่าตัวขึ้นไป มีอัตราการสลายตัวตามธรรมชาติที่ค่อนข้างช้า จึงทำให้สะสม และตกค้างอยู่ในธรรมชาติได้นาน และเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ ตัวอย่างของโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) แคดเมียม (Cd) ปรอท (Hg) สังกะสี (Zn) เป็นต้น โลหะหนักที่พบมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทซึ่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ สมบัติทางกายภาพของโลหะ คือ นำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนสมบัติทางเคมีที่สำคัญของโลหะ คือ มีค่าออกซิเดชันได้

หลายค่า ดังนั้น โลหะหนักจึงสามารถที่รวมกับสารอื่นๆ กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex compound) ได้หลายรูปแบบซึ่งมีความเสถียรมากกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic compound) ซึ่งสามารถที่ถ่ายทอดไปสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไป ตามห่วงโซ่อาหาร (Food chain) (เกษตรฯ, 2537)

2.10.1 โครเมียม (Chromium: Cr)

โครเมียม เป็นธาตุในหมู่ VIB เป็นโลหะสีขาวยเงิน บางครั้งอยู่ในรูปผลึก มีน้ำหนักอะตอม 51.996 เวเลนซ์ 0, 2, 3, 6 มีจุดหลอมเหลว 1,890 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,480 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นเท่ากับ 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีลักษณะเป็นมันวาวและแข็งมากสามารถต้านทานการผุกร่อนได้ดี คงความเป็นมันเงาได้นานในอากาศจึงใช้ทำโลหะบริสุทธิ์และโลหะผสม นอกจากนี้โครเมียมยังรวมกับออกซิเจนได้ที่อุณหภูมิสูงและสามารถทำปฏิกิริยากับกำมะถันและไฮโดรเจนได้อีกด้วย โครเมียมสามารถเกิดไอออน Cr^{2+} , Cr^{3+} และ CrO_4^{2-} ได้ในสารละลาย ออกซิเดชันสเตต (Oxidation state) ของโครเมียมที่เสถียรที่สุด คือ สารประกอบของโครเมียมประจุ +2 มีสมบัติเป็นตัวรีดิวซ์ และสารประกอบของโครเมียมประจุ +6 มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดส์อย่างแรง สมบัติความเป็นกรดและเบสสังเกตได้จากออกซิเดชันสเตต คือ ความเป็นกรดเพิ่มเมื่อออกซิเดชันสเตตของโครเมียมสูงขึ้น เช่น ในออกไซด์ CrO และไฮดรอกไซด์ Cr(OH)_2 โครเมียมมีออกซิเดชันสเตต +2 มีสมบัติเป็นเบส แต่ใน Cr_2O_3 โครเมียมมีออกซิเดชันสเตต +3 มีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริกออกไซด์ และใน CrO_3 โครเมียมมีออกซิเดชันสเตต +6 มีสมบัติเป็นแอซิดิกออกไซด์ (Acidic oxide)

1. ประโยชน์ของโครเมียม

โครเมียมใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เช่น ชุบชิ้นส่วนรถยนต์ อุปกรณ์ไฟฟ้า โลหะผสมระหว่างโครเมียม เหล็ก และนิกเกิลได้ เป็นโลหะผสมปราศจากสนิม และผสมกับโลหะอื่นๆ แต่ละตัว เช่น นิกเกิล โคบอลต์ ไทเทเนียม เป็นโลหะผสมธรรมดา นอกจากนี้สารประกอบโครเมียมชนิดอนินทรีย์ที่ใช้ในทางพาณิชย์มีสองเวเลนซ์ ชนิดที่มีเวเลนซ์ 3 (โครมิกออกไซด์ และโครมิกซัลเฟต ใช้ในโลหะผสมและอุตสาหกรรมฟอกหนัง และชนิดที่มีเวเลนซ์ 6 นำไปใช้ในการผลิตเม็ดสี ช่วยรักษาเนื้อไม้ ชุบเครื่องประดับ ป้องกันการกัดกร่อน ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตแก้ว ทำให้แก้วมีสีเป็นเงางาม และใช้ในอุตสาหกรรมพิมพ์ย้อมผ้า ขนสัตว์ และไหม

2. พิษของโครเมียม

พิษต่อพืชน้ำ โครเมียมมีพิษต่อพืชน้ำในน้ำดำ เมื่อเปรียบเทียบความเป็นพิษของโครเมียมกับโลหะหนักชนิดอื่นๆ เช่น สังกะสี ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียม และปรอท แม้วามีปฏิกิริยาที่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชที่ความเข้มข้น 0.5-5 มิลลิกรัมโครเมียม (+6) ต่อลิตร แต่โปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ก็ช่วยในการเจริญเติบโตของพืชน้ำบางชนิดได้ ซึ่งความเป็นพิษต่อพืชของโครเมียมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น พีเอช และโลหะหนักตัวอื่นๆ

พิษต่อสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังในน้ำทะเล โครเมียมมีพิษน้อยเนื่องจากการยับยั้งโดยแคทไอออน ส่วนพิษแบบเรื้อรังของโครเมียมทำให้มีอาการมินง ยับยั้งการเจริญเติบโต ทำให้ขนาดของร่างกายเล็กลง และอาจทำให้อัตราการเจริญพันธุ์และการรอดชีวิตของรุ่นหลานลดลง

พิษต่อมนุษย์ โครเมียมไม่ก่อให้เกิดพิษเฉียบพลัน เนื่องจากโครเมียมในธรรมชาติมีความคงตัวสูง อย่างไรก็ตามโครเมียม (+6) มีความเป็นพิษสูงกว่าโครเมียม (+3) เนื่องจากเป็นสารก่อให้เกิดการระคายเคืองและมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้โดยทางเดินอาหาร ผิวหนัง และทางเดินหายใจ แต่ผลกระทบต่อผู้ประกอบอาชีพส่วนใหญ่เป็นที่ระบบผิวหนังและทางเดินหายใจ ในสภาพธรรมชาติโครเมียม (+6) ถูกรีดิวซ์ไปเป็นโครเมียม (+3) ซึ่งช่วยลดความเป็นพิษของโครเมียมที่ระบายทิ้งออกมา โครเมียม (+6) มีสมบัติก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม ส่วนโครเมียม (+3) ถึงแม้ว่าไม่มีผลรุนแรงแต่ก็มีความเป็นไปได้ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

3. วิธีการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย (อดิศักดิ์, 2543 และ อัญชลี, 2535)

3.1 การรีดิวซ์โครเมียม (+6) ที่ละลายอยู่ในน้ำ

โครเมียมที่ปล่อยมากับน้ำทิ้งอยู่ในรูปโครเมียม (+6) เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดโครเมียม (+6) ด้วยปฏิกิริยารีดักชันให้ค่าพีเอชของปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 2-3 ด้วยกรดซัลฟูริก เพื่อให้โครเมียม (+6) เปลี่ยนอยู่ในรูปโครเมียม (+3)

Sittis (1973) ได้กล่าวถึง การรีดิวซ์โครเมียม (+6) ว่า การรีดิวซ์โครเมียม (+6) ไปเป็นโครเมียม (+3) ประสิทธิภาพการรีดิวซ์เกิดไม่ถึง 100% เพราะยังมีโครเมียม (+6) บางส่วนตกค้าง

อยู่ ซึ่งการตกค้างของโครเมียม (+6) ที่เหลืออยู่นั้นขึ้นอยู่กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ค่าพีเอชของปฏิกิริยา และชนิดของสารรีดิวซ์อีกด้วย

3.1.1 สารเคมีที่ใช้รีดิวซ์โครเมียม (+6)

สารเคมีที่ใช้ในการรีดิวซ์โครเมียม (+6) มีดังนี้

(1) ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) นิยมใช้เพราะราคาถูก เหมาะสำหรับระบบกำจัดขนาดใหญ่ แต่มีข้อควรระวังเนื่องจากว่า ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายของมนุษย์ เพราะเป็นแก๊สพิษ สามารถรั่วซึมออกมาสู่ภายนอกได้ การใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารรีดิวซ์ทำปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็นกรดซัลฟูรัส (H_2SO_3) จึงไม่จำเป็นต้องเติมกรดอีก



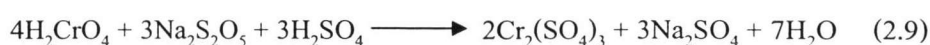
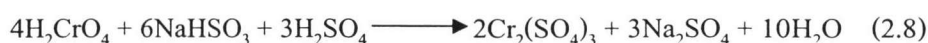
(2) สารประกอบซัลไฟท์ นอกจากซัลเฟอร์ไดออกไซด์แล้ว เกลือซัลไฟท์ก็สามารถใช้ในการกำจัดโครเมียมได้เช่นกัน โดยเกลือซัลไฟท์ในรูปแบบต่างๆ ที่ใช้กันมีดังนี้

(2.1) โซเดียมซัลไฟท์ (Na_2SO_3)

(2.2) โซเดียมไบซัลไฟท์ (NaHSO_3)

(2.3) โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์ ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)

การใช้เกลือซัลไฟท์เป็นสารรีดิวซ์ ทำให้เกิดค้างขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการเติมกรดเพื่อปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2-3 ซึ่งปฏิกิริยารีดักชันระหว่างโครเมียมกับเกลือซัลไฟท์และกรดซัลฟูริก แสดงได้ดังสมการ



(3) เฟอร์รัสซัลเฟต (FeSO_4) อยู่ในรูปของแข็ง หรืออาจเตรียมเป็นสารละลายก่อนใช้รีดิวซ์โครเมียม (+6) โดยใช้ร่วมกับกรดซัลฟูริกที่พีเอช 2-3 แต่การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตทำให้เกิดตะกอนมากกว่าการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือสารประกอบซัลไฟท์ เนื่องจากเหล็กเฟอร์รัส (+2) ออกซิไดส์เป็นเหล็กเฟอร์ริก (+3) เมื่อทำปฏิกิริยากับโครเมียม (+6) และเกิดได้เร็วกว่าที่พีเอชต่ำกว่า 3

ปฏิกิริยารีดักชันระหว่างเฟอร์รัสซัลเฟตกับโครเมียม (+6) และกรดซัลฟูริก แสดงดังสมการ



Patterson (1985) กล่าวถึงการใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเป็นตัวรีดิวซ์ที่พีเอช 2-3 ให้เวลาทำปฏิกิริยา 30 นาที มีโครเมียม (+6) เหลืออยู่ 1 mg/l แต่ถ้าพีเอชมากกว่า 4 ต้องเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 1 ชั่วโมง สำหรับประสิทธิภาพในการรีดิวซ์โครเมียม (+6) ของสารรีดิวซ์แต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพการรีดิวซ์โครเมียม (+6) ของสารรีดิวซ์แต่ละชนิด (Patterson, 1985)

สารรีดิวซ์	ความเข้มข้นของโครเมียม (+6) (mg/l)	
	ก่อนการกำจัด	หลังการกำจัด
1. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	100	<0.05
	1,300	0
	0.23-1.5	0.1
2. ไบซัลไฟท์	140	0.7-1.0
	450-688	<0.10
3. เมตาไบซัลไฟท์	70	0.5
4. เฟอร์รัสซัลเฟต	1,300	0.01

3.1.2 ปริมาณสารเคมีที่ใช้รีดิวซ์โครเมียม (+6)

ปริมาณสารเคมีทางทฤษฎีในการกำจัดโครเมียม 1 mg/l แสดงดังตารางที่ 2.4 แต่ในทางปฏิบัติ ควรใส่มากกว่าค่าทางทฤษฎีประมาณ 2 เท่า เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์

ตารางที่ 2.4 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการกำจัด โครเมียม 1 mg/l (ตามทฤษฎี) (Eckenfelder, 1985)

สารเคมี	ปริมาณที่ใช้ตามทฤษฎี (mg/l)
FeSO ₄ ·7H ₂ O	16.03
H ₂ SO ₄	6.01
Lime (90%)	9.48
Na ₂ S ₂ O ₅ (97.5%)	2.81
H ₂ SO ₄	1.52
Lime (90%)	2.38
SO ₂	1.90
Lime (90%)	2.38
NaHSO ₃	3.00
H ₂ SO ₄	1.41
Lime (90%)	2.38

3.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยารีดักชัน

(1) เวลาและพีเอชในการทำปฏิกิริยา

Patterson (1985) กล่าวว่าปฏิกิริยารีดักชัน โครเมียมเกิดได้ดีที่พีเอชต่ำๆ เวลาในการทำปฏิกิริยาก็น้อยเมื่อเทียบกับการรีดิวซ์โครเมียมที่พีเอชสูง ในส่วนของการรีดิวซ์โครเมียมโดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่พีเอชต่ำทำให้ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาล้นลง ดังนั้นปฏิกิริยารีดักชันโครเมียมจำเป็นต้องเติมกรด เพื่อให้พีเอชของปฏิกิริยาคงที่ตามพีเอชที่ต้องการตลอดปฏิกิริยา

(2) ชนิดของสารรีดิวซ์

การรีดิวซ์ของสารรีดิวซ์แต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) ของชนิดสารนั้นๆ ซึ่งวัดในหน่วยมิลลิ โวลท์ สารที่มีศักย์ออกซิเดชันรีดักชันต่ำๆ สามารถรีดิวซ์สารอื่นได้ดีกว่าสารที่มีศักย์ออกซิเดชันรีดักชันสูง โดยซัลเฟอร์ไดออกไซด์เป็นสารรีดิวซ์ที่ดีที่สุด รองลงมาคือ โซเดียมเมตาไบซัลไฟท์และเฟอร์รัสซัลเฟต ตามลำดับ

(3) ปริมาณสารรีดิวซ์

ปริมาณสารเคมีที่ใช้ต้องมากกว่าค่าทฤษฎีถึง 2 เท่า เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ เนื่องจากสารรีดิวซ์มิใช่เพียงแค่วีดิวิซ์โครเมียมเท่านั้น ยังต้องทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆที่ปะปนในน้ำเสียด้วย เช่น ออกซิเจนละลายน้ำ จึงทำให้ต้องเติมสารรีดิวซ์ที่มากเกินไป เพื่อเน้ใจว่ารีดิวซ์โครเมียม (+6) ไปเป็น โครเมียม (+3) อยู่ในระดับค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้

3.2 การเกิดตะกอนของโครเมียม (+3) ไฮดรอกไซด์

โครเมียม (+6) เมื่อถูกรีดิวซ์เป็น โครเมียม (+3) แล้ว กำจัดโครเมียม (+3) ในรูปตะกอน โครเมียมโดยใช้สารเคมีที่เป็นด่างที่พีเอช 8.5-9.5 ซึ่งเป็นช่วงที่มีการละลายต่ำที่สุด

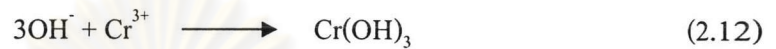
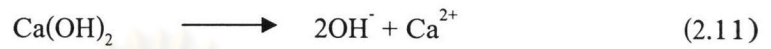
โดยทั่วไปการตกตะกอนโครเมียม (+3) อยู่ในรูปโครเมียม (+3) ไฮดรอกไซด์ สารเคมีที่ใช้ คือ ปูนขาวและโซเดียมไฮดรอกไซด์ บางครั้งในการตกตะกอนทางเคมีก็มีการใช้สารที่ช่วยในการตกตะกอน เช่น พอลิเมอร์ เพื่อช่วยให้ตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น

3.2.1 สารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอน

สารเคมีที่ใช้ในการทำให้โครเมียม (+3) อยู่ในรูปโครเมียม (+3) ไฮดรอกไซด์ มีดังนี้

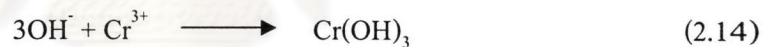
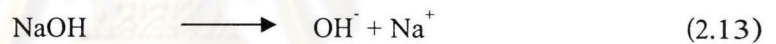
(1) ปูนขาว

มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อยมาก จึงมีปัญหาในการป้อนสารเคมี นอกจากนี้ปูนขาวยังทำให้หินปูนเกิดการตกผลึกของปฏิกิริยาระหว่างปูนขาวกับโครเมียม (+3) ดังสมการ



(2) โซดาไฟ

เป็นสารที่มีราคาแพงกว่าปูนขาว แต่เป็นสารที่เหมาะสมกว่าเพราะการใช้ปูนขาวไม่คุ้ม เนื่องจากอุปกรณ์เติมปูนขาว มีราคาแพงมาก ปฏิกิริยาระหว่างโซดาไฟกับโครเมียม (+3) ดังสมการ



2.10.2 นิกเกิล (Nickel: Ni) (สมบรูณ์ 2543)

นิกเกิล เป็นธาตุในหมู่ VIII B หรือถูกเรียกว่าเป็นกลุ่มโลหะเหล็ก-โคบอลต์ มีเลขอะตอม 28 น้ำหนักอะตอม 58.71 นิกเกิลมีสถานะออกซิเดชัน 0 และ +2 ที่เสถียร ความถ่วงจำเพาะ 8.9 จุดหลอมเหลว 1,453 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,732 องศาเซลเซียส มีความแข็ง 80-120 Brinell นิกเกิลมีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็น $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^8 4s^2$ เนื่องจากรูปแบบของการจัดเรียงอิเล็กตรอนวงนอกแบบ $3d^8$ เป็นรูปแบบที่มีความเสถียรมากที่สุด ดังนั้นนิกเกิลที่พบทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติจึงอยู่ในรูปของนิกเกิลที่มีประจุ +2 เป็นส่วนใหญ่ นิกเกิลมีลักษณะเป็นโลหะสีขาวยเงิน สามารถหลอมและตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ เป็นโลหะที่มีความสามารถในการเป็นแม่เหล็กได้สูง มักใช้ในการฉายเงาให้มีความมันวาวต่อชิ้นงาน และเป็นตัวป้องกันการกัดกร่อน นิกเกิลไม่ละลายในน้ำและแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) แต่สามารถละลายได้ในกรดไนตริก (HNO_3) และละลายได้เล็กน้อยในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

ในธรรมชาติ निकเกิลมี 5 ไอโซโทป คือ ^{58}Ni (98.27%), ^{60}Ni (26.10%), ^{61}Ni (1.13%), ^{62}Ni (3.59%) และ ^{64}Ni (0.91%) निकเกิลที่มีความเสถียรอยู่ในรูปเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุ แต่อย่างไรก็ตามในธรรมชาติ निकเกิลเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอนินทรีย์วัตถุได้เล็กน้อย เช่น $\text{OH}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NH}_3$ ตามลำดับ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ชัลไฟด์เป็นตัวควบคุมความสามารถในการละลายของ निकเกิล

1. ประโยชน์ของ निकเกิล

นิกเกิลส่วนใหญ่ถูกนำมาใช้ประโยชน์โดยนำไปผสมกับโลหะอื่นๆ เป็นโลหะอัลลอยด์ ส่วนนิกเกิลบริสุทธิ์ใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผสมในน้ำมันเบนซิน อุตสาหกรรมเซรามิก ใช้กันแพร่หลายมากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้ निकเกิลชุบรองพื้นบนชิ้นงานก่อนชุบโครเมียม ชุบทองหรือชุบเงิน निकเกิลจัดเป็นโลหะสำคัญตัวหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมการเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า เนื่องจากเป็นตัวให้ความเงาและช่วยลดการกัดกร่อนของโลหะทำให้ผิวของโลหะแข็งขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ निकเกิลในการชุบแม่พิมพ์หนังสือด้วย

2. พิษของ निकเกิล

โลหะ निकเกิลสามารถทำลายการสังเคราะห์ DNA ทำให้เซลล์ตายและมีผลอักเสบ อาการที่เกิดจากพิษ निकเกิล คือ การปวดศีรษะส่วนหน้า ง่วงนอน บางทีมีอาการคลื่นไส้และอาเจียน มีอาการปวดหลัง ตัวเขียว ปวดร้าวที่หน้าอก ไอ หายใจไม่สะดวก อ่อนเพลีย ปวดท้องและท้องร่วง นอกจากนี้ยังมีการศึกษา พบว่า निकเกิลมีผลกระทบต่อปลา รวมถึงมีผลกระทบต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน และต่อระบบบำบัดน้ำเสีย ส่วนสารประกอบ निकเกิลคาร์บอนิล (Nickel carbonyl) เป็นสารก่อมะเร็ง

3. วิธีการกำจัด निकเกิลในน้ำเสีย (Eckenfelder, 2000)

ในน้ำเสียส่วนใหญ่ निकเกิลมักอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนกับไซยาไนด์ ซึ่งอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ การที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของ निकเกิลกับไซยาไนด์นั้นเป็นตัวขัดขวางในกระบวนการบำบัด ดังนั้นจึงต้องทำให้นิกเกิลอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำในรูปของ निकเกิลไฮดรอกไซด์โดยการใส่ปูนขาว ทำให้ความสามารถที่น้อยที่สุดในการละลายเท่ากับ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 10 ถึง 11 ส่วนการใช้คาร์บอนแอคทีฟเพื่อตกตะกอน निकเกิลมาใช้ในกระบวนการบำบัดสามารถนำ निकเกิลกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ในการทดลอง พบว่า การเติมปูนขาว (พีเอช 11.5) อาจทำให้ปริมาณ

ความเข้มข้นของนิกเกิลหลังจากกระบวนการตกตะกอนและการกรองมีค่าเท่ากับ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร การนำนิกเกิลกลับมาใช้โดยกระบวนการตกตะกอนเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุหรือการระเหย พบว่า ให้ประสิทธิภาพสูงเมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียมีค่าสูง ซึ่งผลของการตกตะกอนนิกเกิลแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบการใช้น้ำขุ่นกับปูนขาวผสมซัลเฟตในการตกตะกอนนิกเกิลในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ (Eckenfelder, 2000)

Parameter	Wastewater		
	A	B	C
Treatment pH	8.5	8.75	9.0
Initial nickel, mg/l	119.0	99.0	3.2
Lime treatment			
Clarifier effluent	12.0	16.0	0.47
Filter effluent	9.4	12.0	0.07
Lime plus sulfide			
Clarifier effluent	11.0	7.0	0.35
Filter effluent	3.5	4.2	0.20

2.10.3 ตะกั่ว (Lead: Pb) (Fergus, 1990)

ตะกั่ว เป็นธาตุหมู่ IV A ทุกธาตุในหมู่นี้มีเวเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ตะกั่วมีสถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร สมบัติทางกายภาพของตะกั่วประกอบด้วย ความหนาแน่น 11.3 กรัม/ลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,744 องศาเซลเซียส พลังงานการแตกตัวเป็นไอออนขั้นที่ 1+2 เป็น 2,167 กิโลจูล/โมล ขั้นที่ 1+2+3+4 เป็น 9,330 กิโลจูล/โมล สภาพไฟฟ้าลบเท่ากับ 1.55 การนำไฟฟ้าคือออกไซด์ของตะกั่วอยู่ในรูป PbO , PbO_2 และ Pb_3O_4 ซึ่ง Pb^{2+} เสถียรกว่า Pb^{4+} เกือบของตะกั่ว +2 โดยทั่วไปไม่ละลายน้ำ ยกเว้นแอสซิเทท และไนเตรท เมื่อละลายน้ำให้ไอออน Pb^{2+} ที่ถูกไฮเดรตในรูป Pb^{2+}_{aq} เกือบของตะกั่ว +2 ทุกชนิดละลายได้ในเบสให้พอลิเมอร์ $Pb(OH)_4^{2-}$

1. ประโยชน์ของตะกั่ว

ตะกั่วประมาณหนึ่งในสามของผลผลิตนำไปใช้ในรูปของตะกั่วออกไซด์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมสี เช่น สีแดง (Red lead) สีเหลืองส้ม (Litharge) และสีขาว (Lead carbonate) ตะกั่วขาวและแดงใช้ในการทำสี ตะกั่วสีส้มเป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมกระจก เครื่องเคลือบบางชนิด ใช้ทำหม้อแบตเตอรี่ และโลหะหุ้มสายเคเบิลไฟฟ้าต่างๆ ประมาณร้อยละ 25 ของผลผลิต ใช้เป็นส่วนผสมที่สำคัญในอุตสาหกรรมทำท่อน้ำต่างๆ ตลอดจนทำพีวีซี ใช้ในการผลิตกระสุนปืนต่างๆ และใช้ในอุตสาหกรรมผสมโลหะผสมต่างๆ เช่น ตะกั่วผสมดีบุก เป็นโลหะบัดกรี (Solder) ตะกั่วผสมพลวง เป็นโลหะตัวพิมพ์ (Type metal) และตะกั่วผสมดีบุกและทองแดง เป็นโลหะพิวเตอร์ (Pewter)

2. พิษของตะกั่ว

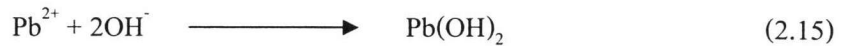
ตะกั่วเป็นโลหะมีพิษที่สามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ ตะกั่วนั้นมีอยู่ทั้งในรูปสารตะกั่วอินทรีย์และอนินทรีย์ ตะกั่วอนินทรีย์เป็นตะกั่วที่เป็นโลหะหรือสารประกอบ เช่น ตะกั่วออกไซด์และตะกั่วซัลเฟต ส่วนตะกั่วอินทรีย์ คือ Alkyl lead ที่ใช้ในน้ำมันเชื้อเพลิง ตะกั่วอนินทรีย์ทำให้เกิดพิษเฉียบพลันและเรื้อรังต่อระบบประสาท การได้รับพิษนั้นเกิดจากการหายใจเอาฝุ่น ไอ หรือควันของตะกั่วเข้าไป ทำให้เกิดอาการปวดท้อง เบื่ออาหาร ถ้าได้รับมากๆ ทำให้กล้ามเนื้อหมดแรง เกิดตะคริว และมีผลต่อการสร้างเม็ดเลือดแดง ถ้าสัมผัสตะกั่วนานๆ พบว่ามีการสะสมของตะกั่วในกระดูก ในเลือด ทำให้เกิดความผิดปกติของโครโมโซม และอาจทำให้เกิดการแท้งในหญิงมีครรภ์ ตะกั่วอาจทำให้เกิดโรคจากสารตะกั่ว (Lead poisoning) โรคที่เกิดจากการดูดซึมสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกาย ซึ่งอาจทำให้เกิดโรคโลหิตจาง อาการท้องผูก อาการจุกเสียด อัมพาต และเป็นตะคริว ส่วนตะกั่วอินทรีย์เป็นอันตรายต่อระบบประสาท

3. วิธีการกำจัดตะกั่วในน้ำเสีย

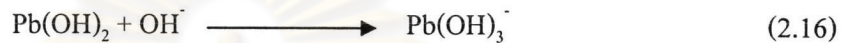
ตะกั่วเป็นสารละลายที่ไม่สลายตัวตามธรรมชาติ และเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียโดยการชะล้างตะกั่วที่ตกค้างจากการใช้งาน หรือจากกิจกรรมอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ การละลายของตะกั่วในน้ำเสีย มีความสำคัญต่อการบำบัดน้ำเสีย แต่ความรู้ทางเคมีของตะกั่วในน้ำเสียมีการศึกษากันน้อย ส่วนใหญ่อ้างอิงจากการศึกษาเคมีของตะกั่วในน้ำธรรมชาติ หรือน้ำก้นบริสุทธี ซึ่งสรุปได้ว่าความสามารถในการละลายของตะกั่วในน้ำเสียขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ความกระด้าง ความเป็นด่าง และสารอินทรีย์ในน้ำเสีย (Nayer และ Dague, 1975) ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ มีดังนี้

(1) ผลของพีเอช

การละลายของสารตะกั่วในสารละลายขึ้นอยู่กับพีเอช ที่พีเอชน้อยกว่า 8 ตะกั่วอยู่ในรูปของสารละลาย พีเอช 8-11 ตะกั่วตกตะกอนเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ ดังสมการ



เนื่องจากสมบัติตามธรรมชาติของตะกั่วออกไซด์ ละลายในสารละลายที่มีพีเอชมากกว่า 11 ดังสมการ



(2) ผลของความกระด้าง

การละลายของตะกั่วถูกกำหนดโดยผลของความกระด้าง ในการกำจัดความกระด้างด้วยปูนขาวที่พีเอช 10.5 ที่พีเอชนี้ตะกั่วตกตะกอนในรูปตะกั่วออกไซด์ ประจุลบจากความกระด้างที่เกิดจากแคลเซียม และแมกนีเซียมมีผลเล็กน้อยต่อการละลายของตะกั่ว

(3) ผลของความเป็นด่าง

ในน้ำที่มีตะกั่ว และคาร์บอนไดออกไซด์ ค่าการละลายของตะกั่วขึ้นอยู่กับพีเอช และความเข้มข้นของคาร์บอเนตไอออน ที่พีเอชน้อยกว่า 5 ตะกั่วอยู่ในรูปสารละลาย ที่พีเอช 5-8.5 ตะกั่วตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต ดังสมการ



ที่พีเอช 8.5-12.5 ตะกั่วตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ดังสมการ (2.17) หรืออาจตกตะกอนในรูป Basic lead carbonate ดังสมการ



ที่พีเอชมากกว่า 12.5 ตะกั่วอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วออกไซด์ตามสมการ (2.18)

(4) ผลของสารอินทรีย์ (Tunay et al., 1994)

ความสามารถในการละลายของตะกั่วเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีสารอินทรีย์ โดยเฉพาะสารอินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นสารคีเลต (Chelating agent) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับตะกั่วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของตะกั่วได้ ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วเพิ่มมากขึ้น

ปัจจุบันการกำจัดตะกั่วที่อยู่ในรูปสารละลายเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีในการเปลี่ยนสารละลายตะกั่วให้เป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ โดยการเติมสารเคมีบางประเภท เช่น ปูนขาว ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($\text{Pb}(\text{OH})_2$) เติมโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต (PbCO_3) และเติมฟอสเฟตเพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปตะกั่วฟอสเฟต ($\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$) นอกจากนี้ยังมีการใช้สารส้มเพอร์รัส และเพอร์ริกซัลเฟตเป็นสารตกตะกอนในการกำจัดตะกั่วในกระบวนการทำให้ตะกั่วตกตะกอนโดยทั่วไปนิยมที่ตกตะกอนในรูปตะกั่วคาร์บอเนต และตะกั่วไฮดรอกไซด์ การเกิดตะกอนของตะกั่วขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอเนตที่มีอยู่หรือที่เติมลงไปใต้น้ำเสีย

ตารางที่ 2.6 สรุปวิธีการกำจัดตะกั่วด้วยวิธีการต่างๆ และประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วของแต่ละวิธี โดยวิธีการตกตะกอนเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีกำจัดตะกั่วที่มีราคาถูก แต่ก็พบปัญหาในการจัดการตะกอนที่เกิดขึ้น พิเศษหลังการบำบัดค่อนข้างสูง และการนำตะกั่วกลับมาใช้ใหม่ค่อนข้างยาก

ตารางที่ 2.6 การกำจัดตะกั่ว และประสิทธิภาพการกำจัด (Patterson, 1985)

วิธีการกำจัด	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นของตะกั่ว (มิลลิกรัม/ลิตร)		
		เริ่มต้น	สุดท้าย	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
Ion exchange	5.0-5.2	0.1	0.01	90
Ion exchange*	-	0.055	0.0015	97.3
	-	126.7-144.8	0.020-0.053	99.9

ตารางที่ 2.6 การกำจัดตะกั่ว และประสิทธิภาพการกำจัด (Patterson, 1985) (ต่อ)

วิธีการกำจัด	ค่าพีเอช	ความเข้มข้นของตะกั่ว (มิลลิกรัม/ลิตร)		
		เริ่มต้น	สุดท้าย	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
Lime-sedimentation	8.3	11.7	0.27	97.7
	7.1	0.91	0.19	79.1
	8.2	1.2	0.15	87.5
	-	30	1	96
	-	6.5	0.1	98.5
	-	0.31	0.1	97
Lime-5-hr sedimentation	7.7	98	39	60
Lime-30-hr sedimentation	6.8	-	0.48	-
Caustic-1-hr sedimentation	5.5	-	1.6	-
Caustic-24-hr sedimentation	7.0	-	0.04	-
Ammonium hydroxide	7.8	-	23.9	-
Lime-ferric sulfate+	10.0	5.0	0.25	95
Sedimentation+filtration*			0.029	99.4
Filtration			0.019	99.6
	9.5	0.9-4.6	0.11-0.21	-
	9.5	0.9-4.6	0.10-0.17	-
Caustic-Soda ash*	9.0-9.5	5.0	0.01-0.03	99
Sodium carbonate+filtration*	6.4-8.7	10.2-70.0	0.2-3.6	82-99
Ferric sulfate+sedimentation+	6.0	5.0	0.25	95
Filtration*	6.0	5.0	0.03	99.4
Ferrous sulfate+sedimentation	10.4-10.8	45	1.7	96.2

* Pilot-plant result

2.11 จุลินทรีย์ที่ดูดซับโลหะหนัก (Prasad, 2001)

จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักมีหลายประเภท ทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ รา และสาหร่าย กระบวนการกำจัดโลหะหนักด้วยวัสดุชีวมวลเริ่มขึ้นเมื่อวัสดุชีวมวลสัมผัสกับสารละลายโลหะหนัก โดยวัสดุชีวมวลที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับอาจมีชีวิตหรือตายแล้ว อาจอยู่แบบเซลล์เดี่ยวๆ หรือถูกตรึงเป็นเม็ดหรือฟิล์มก็ได้ วัสดุชีวมวลเหล่านี้สามารถดูดซับโลหะหนักมาเก็บไว้ที่ผนังเซลล์ และภายในเซลล์โดยกระบวนการต่างๆ หลายกระบวนการร่วมกัน เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน การตกตะกอน การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน การลำเลียงแบบใช้พลังงาน เป็นต้น โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตมีสมบัติร่วมกันประการหนึ่ง คือ สามารถสะสมสารต่างๆ จากสิ่งแวดล้อมไว้ในตัวโดยไม่คำนึงถึงสารนั้นมีพิษหรือไม่ (Rose, 1976) สมบัติข้อนี้เห็นได้ในพวกจุลินทรีย์ ได้แก่ แบคทีเรีย โดยแบ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวก และแบคทีเรียแกรมลบ และสมบัติในการดูดซับโลหะหนักของแบคทีเรียเหล่านี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของผนังเซลล์ ซึ่งเป็น โครงสร้างที่สำคัญในการดูดซับโลหะหนักของแบคทีเรีย ดังนั้นแบคทีเรียจึงแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามองค์ประกอบของผนังเซลล์ที่แตกต่างกัน (Caldwell, 2000) คือ

1. แบคทีเรียแกรมบวก (Gram positive bacteria) (Caldwell, 2000)

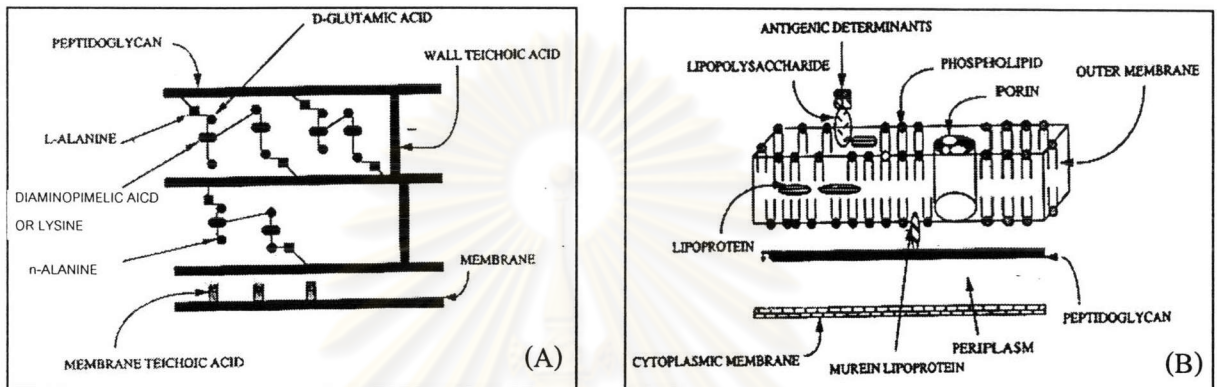
ผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวกประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

- Polymeric network เป็นส่วนของสารที่แข็งแรงมาก และสารที่ยึดหยุ่นได้ เช่น เปปติโดไกลแคน (Peptidoglycan) ซึ่งมีรูปร่างเป็นเส้นใยตรง มีพันธะโคเวเลนต์กับเส้นใยอื่นๆ เกิดการรวมตัวเป็น โมเลกุลขนาดใหญ่ เรียกว่า Nurien sacculas

- Secondary polymer เป็นส่วนที่เป็นเปปติโดไกลแคนที่ยาวกว่า และยึดหยุ่นกว่าส่วนแรก นอกจากนี้ยังมีกรดไทโคอิก (Teichoic) ซึ่งมีลักษณะเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรงของ กลีเซอรอลฟอสเฟต (Glycerol phosphate) และสามารถซึมผ่านช่องว่างในโมเลกุลของ Murein frameworks ผนังเซลล์ของแบคทีเรียกลุ่มนี้มีประจุลบเนื่องจากมีกรดไทโคอิก และกรดไทคูโรนิก (Teichuronic) ติดอยู่ที่โครงร่างข้างของเปปติโดไกลแคน ซึ่งฟอสโฟไดเอสเทอร์ (Phosphodiester) ของกรดไทคูโรนิก และหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดไทคูโรนิกมีส่วนสำคัญในการดูดซับ โลหะหนัก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (A)

2. แบคทีเรียแกรมลบ (Gram negative bacteria)

ผนังเซลล์ประกอบด้วยชั้นต่างๆ ของเปปติโดไกลแคน และลิโปโปรตีน (Lipoprotein) ซึ่งประกอบด้วย Eubacterial lipid lipopolysaccharide และฟอสโฟลิพิด อยู่ที่ด้าน Lower leaflet ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (B)



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของผนังเซลล์แบคทีเรีย แบคทีเรียแกรมบวก (A) แบคทีเรียแกรมลบ (B)
(Caldwell, 2000)

2.11.1 กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์ที่มีชีวิต (Prasad, 2001)

กระบวนการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์ที่มีชีวิตเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนแรก เป็นการดูดซับโลหะที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ (Metabolism independent accumulation) สามารถเกิดได้ทั้งเซลล์มีชีวิต เซลล์ตาย การดูดซับโลหะหนักในขั้นตอนนี้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วภายในเวลาไม่กี่นาทีที่บริเวณผิวเซลล์โดยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) ที่บริเวณหมู่เคมีต่างๆ เช่น คาร์บอกซิล เอมีน ไฮดรอกซิล ฟอสเฟต ซัลฟ์ไฮดริล รวมถึงไคติน และกลูแคน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในโครงสร้างของพอลิแซ็กคาไรด์ในรา โดยอาจมีกระบวนการอื่นๆ รวมด้วย เช่น การตกตะกอนด้วยสารอนินทรีย์ (Inorganic precipitation) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complexation) การดูดซับทางกายภาพ (Adsorption) เป็นต้น

ขั้นตอนที่สอง เป็นการสะสมโลหะที่อาศัยพลังงานจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์ (Metabolism dependent accumulation) ซึ่งเกิดขึ้นได้ช้ากว่าขั้นตอนแรก เพราะมักถูกยับยั้งเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ การขาดแคลนแหล่งพลังงานสำหรับกระบวนการเมแทบอลิซึม อัตราการนำโลหะ

เข้าสู่เซลล์เป็นผลมาจากสภาพทางกายภาพของเซลล์ องค์ประกอบของสารอาหาร โลหะที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต จากการศึกษาของ Crist et al. (1992) พบว่าสาหร่ายทะเลมีการดูดซับ โลหะหนักในขั้นตอนแรกที่บริเวณผิวเซลล์ภายในเวลาไม่ถึง 4 วินาที แล้วจึงมีการนำพาโลหะหนักเข้าไปในเซลล์อย่างช้าๆ ขั้นตอนที่สองซึ่งใช้เวลานานกว่า 2 ชั่วโมง กระบวนการสะสมโลหะหนักในขั้นตอนนี้ ได้แก่ การลำเลียงสารแบบใช้พลังงาน (Active transport) ซึ่งกระบวนการลำเลียงสารแบบนี้เป็นการลำเลียงสารแบบอาศัยตัวพาหะจำเพาะ โดยมีพลังงานมาเกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแรงขับเคลื่อน โมเลกุลของสารถูกละลาย ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างที่มีการลำเลียงสารจากข้างหนึ่งของเมมเบรน ไปอีกข้างหนึ่ง การเคลื่อนที่ของสารถูกละลายที่ต้องอาศัยแรงขับเคลื่อนจากภายนอก มีผลทำให้สารเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นสูง การลำเลียงสารแบบนี้ส่วนมากมีการนำเอาพลังงานจำนวนมากนี้มาจากกระบวนการเมแทบอลิซึม

2.11.2 กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์ที่ไม่มีชีวิต (Prasad, 2001)

กระบวนการดูดซับโลหะหนักโดยเซลล์ที่ไม่มีชีวิตเกิดขึ้นเฉพาะขั้นตอนแรกเท่านั้น โดยแบคทีเรียที่ไม่มีชีวิตสามารถดูดซับ โลหะหนักได้ด้วยหมู่เคมีต่างๆ ที่บริเวณผนังเซลล์ จากงานวิจัยของ Beveridge (1989) พบว่าผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก เช่น *Bacillus subtilis* ประกอบด้วยกลุ่มสายใยเปปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ ในช่องว่างของกลุ่มเปปทิโดไกลแคนมีกรดไทคูอิก และกรดไทคูโรนิก ซึ่งหมู่ฟอสโฟไดเอสเทอร์ ของกรดไทคูอิก และหมู่คาร์บอกซิลของไทคูโรนิก เป็นส่วนที่สามารถจับโลหะหนักได้ ส่วนผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบประกอบด้วยกลุ่มเปปทิโดไกลแคนบางๆ ซึ่งมีไลโปพอลิแซ็กคาไรด์ (Lipopolysaccharide) เป็นเยื่ออยู่ด้านนอก โดยหมู่ฟอสฟอริลของสายไลโปพอลิแซ็กคาไรด์สามารถจับโลหะหนักได้ แต่สำหรับ *E. coli* แล้วโลหะจับกับหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylate group) ของเปปทิโดไกลแคนได้ดีกว่าเนื้อเยื่อชั้นนอก

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เกษม (2543) ศึกษาประสิทธิภาพของโคโคซานซึ่งสกัดมาจากเปลือกกุ้ง กระจอดปู และกุ้งผสมปู ในการกำจัดไอออน Pb^{2+} และ Hg^{2+} ในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม และจากห้องปฏิบัติการ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Pb^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.5 ใช้ปริมาณโคโคซาน 1.7 กรัม ในน้ำเสียด้อย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 90.3 และสภาวะที่ใช้ในการกำจัด Hg^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.0 ใช้ปริมาณโคโคซาน 2.2 กรัม ในน้ำเสียด้อย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 97.8 สำหรับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการพบว่า สภาวะที่

เหมาะสมในการกำจัด Pb^{2+} และ Hg^{2+} คือ พีเอชเท่ากับ 5.5 โดยใช้ปริมาณไคโตซาน 1.5 กรัม ในน้ำเสียตัวอย่าง 400 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 66.4-67.6 และ 48.0-76.7 ตามลำดับ

สุมาลัย ศรีกำไลทอง (2540) ศึกษาการใช้ไคโตซานที่ผลิตได้เป็นสารดูดซับโลหะหนักในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยไคโตซานมีประสิทธิภาพดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งที่พีเอช 5 ได้สูงถึงร้อยละ 81.29 แต่ดูดซับนิกเกิล และสังกะสีเพียงร้อยละ 17.87 และ 18.85 ตามลำดับ อนุพันธ์ไคโตซานที่สังเคราะห์จากการทำปฏิกิริยากับไพริดอกซอลไฮโดรคลอไรด์ (Pyridoxal hydrochloride) และกรดเมอร์แคปโตซัสซินิก (Mercaptosuccinic acid) ให้ผลการดูดซับไอออนของทองแดง นิกเกิลสังกะสี และเหล็กเพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะอนุพันธ์จากไพริดอกซอลไฮโดรคลอไรด์มีการดูดซับสูงที่สุด

อรุณี เทอดเทพพิทักษ์ (2534) แสดงผลการวิเคราะห์หาปริมาณการดูดซับโลหะโดยไคติน และไคโตซานที่ผลิตได้ พบว่า ไอออนโลหะ Pb^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2+} ถูกดูดซับโดยไคตินเท่ากับ 7.0×10^{-3} , 3.4×10^{-3} , 0.01-0.07 และ 0.01-0.07 มิลลิโมล/กรัม ตามลำดับ และไคโตซานเท่ากับ 7.0×10^{-3} , 6.0×10^{-3} , 0.01-0.07 และ 0.01-0.07 มิลลิโมล/กรัม ตามลำดับ สามารถลดปริมาณโลหะ Pb^{2+} ในแหล่งน้ำทิ้งบริเวณใกล้โรงงานอุตสาหกรรมจากความเข้มข้น 2.17×10^{-3} และ 1.3×10^{-3} มิลลิโมล/ลิตร เหลือ 1.06×10^{-3} และ 0.53×10^{-3} มิลลิโมล/ลิตร

Aung (1997) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยการดูดซับด้วยไคโตซาน โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ค่าพีเอช ขนาดอนุภาคไคโตซาน อุณหภูมิ และความเร็วในการกวน ซึ่งพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดง โครเมียมและตะกั่วเท่ากับ 5.5, 6 และ 4 ตามลำดับ ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับโดยไคโตซานขนาด 710 ไมโครเมตร และ 425 ไมโครเมตร เท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากสารละลายความเข้มข้นสมมูล 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับที่ 37.5 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส เท่ากับ 6.5 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 11 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากสารละลายความเข้มข้นสมมูล 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณทองแดงที่ถูกดูดซับโดยการใช้ความเร็วในการกวนที่ 50 รอบต่อนาที และ 250 รอบต่อนาที เท่ากับ 16 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 17 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ จากสารละลายความเข้มข้นสมมูล 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยผลการดูดซับโครเมียมและตะกั่วมีแนวโน้มเช่นเดียวกับทองแดง

Bassi et al. (1999) ได้ศึกษาความสามารถของไคโตซานในการจับโลหะหนักที่ถูกชะออกมาในกระบวนการล้างดินด้วยกรดซิตริก (Citric acid) ซึ่งได้ไอออนโลหะหนักหลายๆ ชนิดผสมกัน ได้แก่ Zn^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} และ Pb^{2+} ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ไคโตซาน 0.5 กรัม ใส่น้ำชะปริมาณ 25 มิลลิลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 6 อัตราเร็วของการกวนเท่ากับ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ให้ผลในการดูดซับไอออนโลหะหนักผสมที่ดีที่สุด โดยมีการดูดซับ Zn^{2+} มากที่สุดคือร้อยละ 75 รองลงมาคือ Pb^{2+} , Cu^{2+} และ Cd^{2+} โดยมีการดูดซับ เท่ากับร้อยละ 71.55, 60 และ 40 ตามลำดับ และการดูดซับไอออนโลหะหนักในสารละลายผสมเกิดขึ้นได้มากกว่าในสารละลายของไอออนโลหะหนักชนิดเดียว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากค่า Ionic strength ที่สูงกว่า

Bassi et al. (2000) ศึกษาความเป็นไปได้ของเกลือไคโตซานในการดูดซับโลหะหนัก เช่น สังกะสี ทองแดง แคลเซียม และตะกั่วในสารละลายที่สภาวะต่างๆ กัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก โดยสามารถดูดซับทองแดงได้ร้อยละ 95 ตะกั่วได้ร้อยละ 84 แคลเซียมร้อยละ 48 และสังกะสีร้อยละ 44 ส่วนค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ที่ 6.0 และ 7.0

Cholumpai (1998) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไคโตซานจับตะกั่วในน้ำเสีย โดยศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย ความเข้มข้นและรูปแบบของไคโตซานที่ใช้ พบว่าไคโตซานสามารถลดระดับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการดักจับตะกั่วคือ 6 และ 7 โดยเมื่อความเข้มข้นของไคโตซานสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการดักจับตะกั่วสูงขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ผงไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดักจับตะกั่วได้ดีกว่าสารละลายไคโตซาน เมื่อนำผงไคโตซานไปทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พบว่า สามารถลดปริมาณตะกั่วในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อทดลองใช้กับสารละลายตะกั่วสังเคราะห์ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าในน้ำเสียอาจมีโลหะอื่นที่สามารถแย่งจับกับไคโตซานได้ด้วย

Deans (1992) ทำการศึกษาการกำจัดไอออน Pb^{2+} และ Cu^{2+} ด้วยไบโอพอลิเมอร์ ได้แก่ cellulose, alginic acid, chitin, chitosan และ carrageenan เทียบกับไบโอพอลิเมอร์พื้นฐานซึ่ง ได้แก่ carboxymethyl, hydroxamic acid, อนุพันธ์ของ hydroxamic acid, terephthalic acid และ Chelex 20™ (Bio-Rad) โดยใช้ไบโอพอลิเมอร์ 0.015 กรัม ปั่นเหวี่ยงกับสารละลาย Pb^{2+} และ Cu^{2+} ความเข้มข้น 1, 10, และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร เป็นเวลา 10 นาที อัตราเร็วของการผสมเท่ากับ 10,000 รอบต่อนาที พบว่าที่ความเข้มข้นของ Cu^{2+} 1 มิลลิกรัม/ลิตร ไคโตซานสามารถลด Cu^{2+} ได้มากที่สุด (ร้อยละ 99.89) ในขณะที่ ความเข้มข้นที่ 10 และ 100 มิลลิกรัม/ลิตร ไคโตซานสามารถลดได้ร้อยละ 91.14 และ 58.55 ตามลำดับ และไม่ใช่ผลที่ดีที่สุดของการศึกษาในครั้งนี้ ส่วนที่ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่ 1, 10 และ 100

มิลลิกรัม/ลิตร ไคโตซานสามารถลด Pb^{2+} ได้ดีพอสมควร คือประมาณร้อยละ 35.41, 82.98 และ 37.5 ตามลำดับ

Eiden et al. (1980) ได้กล่าวถึงอันตรกิริยาการดูดซับของ Pb^{2+} และ Cr^{3+} บนไคติน และไคโตซาน พบว่า ค่าการดูดซับเฉลี่ยของ Pb^{2+} บนไคโตซานเท่ากับ 1.7×10^{-4} โมลต่อกรัมของไคโตซาน ส่วนค่าการดูดซับเฉลี่ยของ Pb^{2+} บนไคตินเท่ากับ 3.5×10^{-5} โมลต่อกรัมของไคติน ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 21 ของความสามารถการดูดซับของไคโตซาน และจำนวนอะตอมของไนโตรเจนในไคตินและไคโตซานต่อจำนวน Pb^{2+} ที่ถูกดูดซับไว้ (N/Pb ratio) เท่ากับ 0.5 และ 11 ตามลำดับ สำหรับค่าการดูดซับเฉลี่ยของ Cr^{3+} บนไคโตซานมีค่าเท่ากับ 2.5 โมลต่อกรัมของไคโตซาน ส่วนค่า N/Cr ratio เท่ากับ 18

Guibal et al. (1998) ได้อธิบายถึงการมีหมู่แอมิโนบนสายพอลิเมอร์ของไคโตซาน ทำให้มีสมบัติในการเชื่อมพันธะกับไอออนของโลหะหนักต่างๆ เช่น แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว ปรอท และโครเมียม จากการทดลองใช้เกลือไคโตซาน 20-200 มิลลิกรัม ดูดซับโมลิบเดท (Molybdate) และวานาเดท (Vanadate) 50-200 มิลลิกรัม/ลิตร โดยปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 2-9 เขย่าด้วยเครื่องเขย่า 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าไคโตซานสามารถดูดซับโมลิบเดทได้ 7-8 มิลลิโมล/กรัมของตัวดูดซับ ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับอยู่ที่ 3-3.5 ซึ่งสภาวะที่เป็นกรด ทำให้หมู่แอมิโนบนไคโตซานมีประจุบวก สามารถดึงดูดหมู่ไอออนได้ดี

Kawamura et al. (1997) พบว่าเกลือไคโตซานที่ผ่านกระบวนการกำจัดหมู่แอสีทิล ร้อยละ 80 จากกระดองปู นำมาละลายในกรดแอสีติก และหยดลงในสารละลายไซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเตรียมเป็นไคโตซานแบบเม็ดที่มีรูพรุน จากนั้นเติมสารเอทิลีนไกลคอลไดกลัยซิดอีเทอร์ (Ethylene glycol diglycidyl ether) เพื่อให้เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายของไคโตซานแบบเม็ด (Crosslinked chitosan beads: CRCS) ซึ่งนำไปดูดซับสารปรอท ทองแดง นิกเกิล แคดเมียม และสังกะสี พบว่า CRCS มีความสามารถในการดูดซับสูง และยังสามารถเลือกดูดซับไอออนโลหะต่างๆ ได้ดังนี้ >ปรอท>>ทองแดง> นิกเกิล \cong แคดเมียม \cong สังกะสี ตามลำดับ

Nagh (1999) นำไคโตซานแบบเม็ดมาดูดซับทองแดง โดยดูดซับได้ 30.95 มิลลิกรัม/กรัมตัวดูดซับ และทำการสังเคราะห์อนุพันธ์ไคโตซานเป็นเอ็นคาร์บอกซิเมทิลไคโตซาน (N-carboxymethyl chitosan) ซึ่งการเพิ่มกรดอินทรีย์ลงในไคโตซานทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยพบว่าสามารถดูดซับทองแดงได้ 33.90 มิลลิกรัม/กรัมตัวดูดซับ

Schmuhl et al. (2001) ได้ศึกษาความสามารถของไคโตซานในการดูดซับไอออนทองแดงและไอออนโครเมียมในน้ำเสีย โดยการใช้ไคโตซานชนิดที่มีการเชื่อมขวางด้วย Epichlorohydrin และชนิดที่ไม่มีการเชื่อมขวาง พบว่า การดูดซับไอออนโครเมียมในช่วงความเข้มข้น 10 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Langmuir และค่าความสามารถสูงสุดของไคโตซานชนิดที่มีการเชื่อมขวางและชนิดที่ไม่มีการเชื่อมขวางในการดูดซับไอออนโครเมียมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 78 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับการดูดซับไอออนทองแดงในช่วงความเข้มข้น 10 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ Freundlich โดยมีค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับไอออนทองแดงของไคโตซานทั้งสองชนิดมากกว่า 80 มิลลิกรัมต่อกรัม

Tomoyo (1992) ทดลองใช้เม็ดไคโตซานที่พองตัวในการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ โดยเม็ดมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 2.5 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนัก เช่น ทองแดง นิกเกิล สังกะสี โคบอลต์ และแมงกานีส ได้ร้อยละ 98, 82, 70, 36 และ 13 ตามลำดับ

Udaybaskar (1990) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (เฮกซะเวเลนซ์) โดยใช้ไคโตซานที่สกัดจากกระดองปู พบว่ากลไกการกำจัดโครเมียมเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยค่าคงที่ของอัตราการกำจัดโครเมียมขั้นที่ 1 มีค่าเท่ากับ 1.92 ต่อชั่วโมง ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์แบบ Langmuir ในการกำจัดโครเมียมพบว่ามีค่าลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น โดยการดูดซับเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 90 ที่พีเอช 3 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และการดูดซับมีค่าลดลงร้อยละ 10 ที่พีเอช 7 การที่มีสารอิเล็กโทรไลต์และคลอไรด์พบว่ามีผลต่อการกำจัดโครเมียมอย่างมีนัยสำคัญ โดยคาดว่ากลไกการกำจัดหลักเกิดขึ้นจากแรงของสารอิเล็กโทรไลต์และคลอไรด์ นอกจากนี้ยังพบว่าการนำตัวดูดซับกลับมาใช้ใหม่โดยการใช้ด่างพบว่าให้ประสิทธิภาพต่ำเพียงร้อยละ 60-65 ของการดูดซับโครเมียม

Yang and Zall (1984) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก คือ โครเมียม ทองแดง แคลเซียม ตะกั่ว และ สังกะสี ด้วยพอลิเมอร์ 5 ชนิดที่ได้มาจากของเหลือทิ้งในกระบวนการแปรรูปอาหารทะเล ได้แก่ chitin, chitosan, porgy, flounder และ cod ขนาด 0.315 มิลลิเมตร ปริมาณ 0.5 กรัม ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6 มีประสิทธิภาพลดลง เมื่อทำการทดลองภายใต้ระบบสารละลายผสม (Multi-solute system) เมื่อเทียบกับระบบสารละลายเดี่ยว (Single-solute system) เพราะเกิดการแย่งการดูดซับระหว่างโลหะแต่ละชนิดในระบบสารละลายผสม ส่วนการศึกษาการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิด พบว่าไคโตซานมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดได้มากกว่าพอลิเมอร์อื่นๆ และมีการดูดซับทองแดงได้มากที่สุด (ร้อยละ 70.5) รองลงมา คือ โครเมียม (ร้อยละ 53.4) โดยมีค่าใกล้เคียงกับ

แคดเมียมคือ ร้อยละ 54.3 และการดูดซับ ตะกั่ว และ สังกะสี มีประสิทธิภาพน้อยที่สุด คือร้อยละ 40.3 และ 20.0 ตามลำดับ ส่วนพอลิเมอร์อีก 4 ชนิด มีแนวโน้มการดูดซับโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดไปในทางเดียวกันกับไคโตซาน นอกจากนี้จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ พบว่าอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ และมีขั้นตอนการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion) เป็นขั้นกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยา



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย