

บทที่ 1

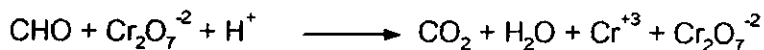
บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

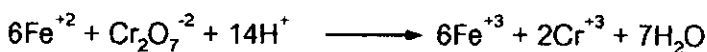
การตรวจวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD, Chemical Oxygen Demand) เป็นวิธีการประเมินความสกปรกของน้ำเนื่องจากการปนเปื้อนของสารอินทรีย์วิธีการหนึ่ง

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่องกำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน กำหนดให้การตรวจสอบค่าซีโอดีกระทำโดยวิธีย่อยสลายด้วยปอตัสเซียมไดโครเมต (potassium dichromate digestion) ซึ่งการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีการดังกล่าวต้องดำเนินการกลั่นไหลกลับ (reflux) ในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่อุณหภูมิสูง (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539)

ขณะกลั่นไหลกลับสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่างจะถูกออกซิไดซ์โดยสารละลายปอตัสเซียมไดโครเมตปริมาณมากเกินพอ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นคือ



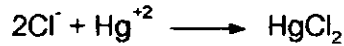
จากนั้นจึงตรวจหาปริมาณไดโครเมตไอออนที่เหลือจากการกลั่นไหลกลับ ซึ่งทำโดยการไตเตรตด้วยสารละลายเฟอร์ริสแอมโมเนียมซัลเฟตและใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นคือ



ไดโครเมตไอออนที่เหลือจะทำปฏิกริยากับเฟอร์ริสไอออนไดโครมิคไอออนจนหมด จากนั้นเฟอร์ริสไอออนจะทำปฏิกริยากับเฟอร์โรอินได้สารประกอบสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไตเตรต

กรณีที่น้ำตัวอย่างมีสารอินทรีย์บางตัว เช่น กรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ สารอินทรีย์ดังกล่าวจะไม่ถูกออกซิไดซ์โดยไดโครเมตไอออน ทำให้ผลการตรวจวิเคราะห์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง แก้ไขโดยเติมซิลเวอร์ซัลเฟตเพื่อให้เงินเป็นตัวคะตะลิส

หากน้ำตัวอย่างมีสารวิดิวิงเอเจนต์อื่นที่ไม่ใช่สารอินทรีย์ เช่น คลอไรด์รวมถึงเฮไลต์อื่น ไนไตรต์ เฟอร์ริส และซัลไฟด์ จะริดิวิซ์ไดโครเมตไอออนทำให้ค่าซีโอดีสูงกว่าความเป็นจริง เฉพาะปัญหาที่น้ำตัวอย่างมีคลอไรด์และเฮไลต์อื่นนั้น สามารถแก้ไขได้โดยเติมเมอร์คิวริกซัลเฟตเพื่อให้เมอร์คิวรีไอออนรวมกับคลอไรด์ไอออน เกิดเป็นเมอร์คิวริกคลอไรด์ซึ่งเป็นสารที่แตกตัวให้ไอออนน้อยมากในสภาวะที่เป็นกรดจัด ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นคือ



(มันลิน ตันทูลเวศม์. 2540 : 117-118)

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติหากผู้ทำการตรวจวิเคราะห์สัณนิษฐานว่าน้ำตัวอย่างมีคลอไรด์ ผู้ตรวจทำการตรวจวิเคราะห์มักเติมเมอร์คิวริกซ์เฟตในปริมาณมากเกินพอในน้ำตัวอย่าง

เมื่อพิจารณาวิธีการตรวจวิเคราะห์ซีโอดีข้างต้นพบว่าของเสียจากการตรวจวิเคราะห์ซีโอดี มีฤทธิ์กัดกร่อนอย่างแรงเนื่องจากมีกรดปริมาณมาก นอกจากนี้ยังมีโลหะหนักที่เป็นพิษโดยเฉพาะปรอทและโครเมียม ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมในของเสียจากการตรวจวิเคราะห์ซีโอดี (ตาราง 1) ส่วนมีค่าสูงกว่าเกณฑ์กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมซึ่งกำหนดให้ปรอททั้งหมดในน้ำทิ้งมีความเข้มข้นไม่เกิน 0.005 mg/l และ โครเมียม (III) มีความเข้มข้นไม่เกิน 0.75 mg/l ขณะที่กำหนดให้ค่าพีเอชของน้ำทิ้งจะต้องมีค่าระหว่าง 5-9 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539)

ตาราง 1 ลักษณะสมบัติของของเสียจากการตรวจวิเคราะห์ค่าซีโอดี ซึ่งเกิดจากห้องปฏิบัติการ ในมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

แหล่งกำเนิดของเสีย	ลักษณะสมบัติ				
	pH	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัม/ลิตร)			
		Cr	Hg	Ag	Fe
คณะกรรมการสิ่งแวดล้อม ⁽¹⁾	<0	300	1,793	NA	NA
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ⁽¹⁾	<0	263	694	NA	NA
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ⁽¹⁾	<0	267	228	NA	NA
ภาควิชาวาริชศาสตร์ ⁽¹⁾	<0	279	2,832	NA	NA
ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำใน มอ. ⁽²⁾	<0	269	1,151	519	795
ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำใน มอ. ⁽³⁾	<0	218	1,312	527	NA
ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์น้ำใน มอ. ⁽⁴⁾	<0	294	787	810	1,410
คณะกรรมการสิ่งแวดล้อม ⁽⁴⁾	<0	370	2,695	2,316	489

ที่มา : ⁽¹⁾ นิวรรณ อินทมนตรี (2544 : 40-41)

⁽²⁾ ฉัตรไชย รัตนไชย และคณะ (2542 : (3-9))

⁽³⁾ ฉัตรไชย รัตนไชย และคณะ (2544 : (9-6))

⁽⁴⁾ งานวิจัยชิ้นนี้

NA = Not Available

หนึ่งจากการทดลองเก็บรวบรวมของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการต่าง ๆ ซึ่งตั้งอยู่ใน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ พบว่ามีของเสียจากการตรวจวิเคราะห์ค่าซีโอดี เกิดขึ้นประมาณ 450 ลิตร/ปี (ฉัตรไชย รัตนไชย และคณะ ,2544 : ((8-11)-(8-13))

ของเสียอันตรายที่เกิดจากการตรวจวิเคราะห์ค่าซีโอดีหากไม่ได้รับการบำบัดที่เหมาะสมก่อน ระบายสู่สิ่งแวดล้อม ย่อมก่อให้เกิดการปนเปื้อนและการสะสมของสารพิษโดยเฉพาะปรอทและ โครเมียมในระบบนิเวศน์ จึงสมควรที่จะต้องดำเนินการหาแนวทางที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ ในการบำบัดของเสียจากการตรวจวิเคราะห์ค่าซีโอดี

การตรวจเอกสาร

1. การตกตะกอนเคมีเพื่อบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก

ในการบำบัดและปรับปรุงคุณภาพน้ำ การตกตะกอนเป็นกระบวนการทางเคมี-ฟิสิกส์ (นราพร หาญจนวนรงค์, มมป. : 25) เพื่อแยกสารปนเปื้อนทั้งในส่วนที่ละลายน้ำ และส่วนที่เป็นสารแขวนลอย ออกจากสารละลายโดยทำให้สารปนเปื้อนดังกล่าวอยู่ในรูปตะกอนของแข็ง จากนั้นจึงแยกตะกอน ของสารปนเปื้อนออกจากสารละลายซึ่งอาจทำได้โดยการปล่อยให้ตกจมตามแรงโน้มถ่วง การกรอง หรือการอาศัยแรงจากการหมุนเหวี่ยง เป็นต้น (Municipal Technology Branch U.S. EPA, 2000)

การตกตะกอนอาจเกิดโดยเป็นไปตามวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายวิธีรวมกัน กล่าวคือ

- การเติมสารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ต้องการให้ตกตะกอน เพื่อให้ สารนั้นละลายน้ำได้น้อยลงและเกิดเป็นตะกอนในที่สุด
- การเติมสารเคมีเพื่อทำให้ภาวะสมดุลของสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงและเลื่อน มาถึงจุดที่สารซึ่งต้องการให้ตกตะกอนไม่สามารถละลายน้ำได้และเกิดเป็นตะกอนขึ้น
- การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัวหรือเกือบอิ่มตัว ไปในทิศทางที่ทำให้ สารที่ต้องการให้ตกตะกอนละลายน้ำได้ลดลง จนเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะของแข็งหรือตะกอน (นราพร หาญจนวนรงค์, มมป. : 25)

โลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำโดยมากจะอยู่ในรูปไอออน กรณีที่น้ำทิ้งมีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ความเข้มข้นสูง เบื้องต้นจะบำบัดโดยการตกตะกอนด้วยสารเคมี เพื่อเปลี่ยนโลหะหนักในรูปไอออน ที่ละลายน้ำได้ให้อยู่ในรูปของแข็งที่ละลายได้น้อย เมื่อแยกของแข็งดังกล่าวออกจากสารละลายแล้ว จึงกำจัดโลหะหนักส่วนที่เหลือในสารละลายซึ่งสามารถทำได้โดยการแลกเปลี่ยนประจุ (Ministry of

Education, Science and Culture, 1992 : 20) รวมถึงการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง (พูลเพอร์
ธงไชย, 2541)

1.1 สารตกตะกอน (precipitant) สำหรับตกตะกอนโลหะหนัก

การตกตะกอนเคมีถือเป็นวิธีที่มีใช้มานานจึงได้รับการพัฒนาจนเป็นที่ยอมรับและมีความ
พร้อมด้านวัสดุอุปกรณ์ นอกจากนี้ยังมีขั้นตอนการดำเนินงานที่ไม่ซับซ้อนจึงง่ายต่อการประยุกต์ใช้
และเสียค่าใช้จ่ายไม่มากนัก ปัจจุบันการตกตะกอนเคมีเพื่อกำจัดโลหะหนักจากน้ำทิ้งที่ถูกพัฒนา
จนสามารถใช้งานได้จริงในทางปฏิบัติ จำแนกเป็น 7 กลุ่ม ตามประเภทสารตกตะกอน ได้แก่

- การตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์
- การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์
- การตกตะกอนด้วยสารประกอบคาร์บอเนต
- การตกตะกอนด้วยแชนธา
- การตกตะกอนด้วยไดไฮโอคาร์บาริเมต
- การรีดิวซ์ด้วยโซเดียมบอโรไฮไดรด์ (NaBH_4)
- การตกตะกอนโดยใช้สารตกตะกอนมากกว่าหนึ่งตัว (Department of The Army,
U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (2-7))

แม้จะมีสารตกตะกอนโลหะหนักหลายชนิดแต่สารตกตะกอนซึ่งนิยมใช้อย่างกว้างขวางคือ
สารประกอบไฮดรอกไซด์ สารประกอบซัลไฟด์ และสารประกอบคาร์บอเนต กรณีการปนเปื้อน
ของโลหะประจุบวกที่มีความเป็นพิษสูงโดยเฉพาะปรอทมักใช้สารประกอบซัลไฟด์เป็นสารตกตะกอน
เนื่องจากสารประกอบโลหะซัลไฟด์ละลายน้ำได้น้อยมากเมื่อเทียบกับสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์
(Committee on Prudent Practices for Handling, Storage, and Disposal of chemical in
Laboratories, 1995 : 167; Ministry of Education, Science and Culture, 1992; United
States Environmental Protection Agency, 1997; Feng, Aldrich and Tan, 2000) ดังแสดงใน
ตาราง 2

1.1.1 การตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์

สารตกตะกอนในกลุ่มนี้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (caustic soda, NaOH)
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (hydrated lime, $\text{Ca}(\text{OH})_2$) และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) เมื่อ
เติมสารตกตะกอน โลหะหนักซึ่งอยู่ในรูปไอออนบวกจะเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซีไอออน (OH^-)
ได้สารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้น้อย ตัวอย่างปฏิกิริยา คือ



ตาราง 2 ค่าทางทฤษฎีของความสามารถในการละลาย (solubility) ของสารประกอบโลหะหนัก ไฮดรอกไซด์ โลหะหนักซัลไฟด์ และโลหะหนักคาร์บอเนต ในน้ำที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

metals	solubility (mg/l)		
	as hydroxide	as sulfide	as carbonate
Cadmium (Cd^{2+})	2.3×10^{-5}	6.7×10^{-10}	1.0×10^{-4}
Chromium (Cr^{3+})	8.4×10^{-4}	no precipitation	-
Cobalt (Co^{2+})	2.2×10^{-1}	1.0×10^{-9}	-
Copper (Cu^{2+})	2.2×10^{-2}	5.8×10^{-18}	-
Iron (Fe^{2+})	8.9×10^{-1}	3.4×10^{-5}	-
Lead (Pb^{2+})	2.1	3.8×10^{-9}	7.0×10^{-3}
Manganese (Mn^{2+})	1.2	2.1×10^{-3}	-
Mercury (Hg^{2+})	3.9×10^{-4}	9.0×10^{-20}	3.9×10^{-2}
Nickel (Ni^{2+})	6.9×10^{-3}	6.9×10^{-9}	1.9×10^{-1}
Silver (Ag^{2+})	13.3	7.4×10^{-12}	2.1×10^{-1}
Tin (Sn^{2+})	1.1×10^{-4}	3.8×10^{-4}	-
Zinc (Zn^{2+})	1.1	2.3×10^{-7}	7.0×10^{-2}

ที่มา : ดัดแปลงจาก Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (2-3)

การตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์เป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพสำหรับการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนของ แคดเมียม โครเมียม (III) ทองแดง และ นิกเกิล

ข้อดีของการตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์

- สามารถใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติในการปรับพีเอช
- กระบวนการไม่มีความซับซ้อน
- ใช้เป็นสารตกตะกอนโลหะหนักได้หลายชนิด เมื่อเทียบกับสารตกตะกอน

อื่น ๆ (Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (3-3))

- เสียค่าใช้จ่ายไม่มากโดยเฉพาะกรณีใช้ปูนขาวเป็นสารตกตะกอน (Municipal Technology Branch U.S. EPA. 2000 : 3)
- ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย (Feng, Aldrich and Tan., 2000 : 624)

ข้อด้อยของการตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์

- ตะกอนที่ได้ไม่เสถียรโดยเฉพาะเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงพีเอช

- กรณีที่มีอิออนโลหะหนักหลายชนิด การตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์อาจเป็นวิธีที่ไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากโลหะหนักแต่ละชนิดมีค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนไม่เท่ากัน
 - สารประกอบไฮดรอกไซด์ตกตะกอนตะกั่ว แมงกานีส และเงิน ได้ไม่ดี
 - ตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์มีโครงสร้างโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) มีลักษณะเป็นเจล (Okuda, Sugano and Tsuji, 1975 : 472) การกำจัดน้ำออกจากตะกอนจึงทำได้ยาก อย่างไรก็ตามอาจแก้ไขได้โดยการกรองแยกที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส หรือเติม diatomaceous earth ในปริมาณ 1-2 เท่าของตะกอนโลหะหนัก ก่อนดำเนินการกรอง (Committee on Prudent Practices for Handling, Storage, and Disposal of chemical in Laboratories, 1995 : 167)
 - สารดีเลต และการเกิดสารเชิงซ้อนมีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างมาก
 - แทบไม่มีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ที่พีเอชต่ำกว่า 6 (Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (3-2)-(3-3))
 - การจัดการตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์โดยการหล่อซีเมนต์อาจทำให้ตะกอนโลหะหนักละลายและโลหะถูกชะออกได้ง่าย เนื่องจากพีเอชของซีเมนต์มีค่าสูง (Tamaura, et al., 1991 : 401 a).
 - ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก (Tamaura et al, 1991 : 1898 b; Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (3-3)) โดยเฉพาะการตกตะกอนด้วยปูนขาวอาจทำให้ปริมาณตะกอนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 50 (Municipal Technology Branch U.S. EPA., 2000 : 3)
 - ตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ตกจมยาก จำเป็นต้องมีกระบวนการเพิ่มขนาดของตะกอน (flocculation) ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการตกจมของตะกอนสูงขึ้น (Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (3-3))

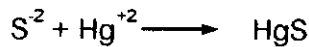
1.1.2 การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์

การตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์จำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

- 1) การใช้สารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายน้ำได้มาก ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) หรือ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (NaHS) เป็นสารตกตะกอน

2) การใช้สารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายน้ำได้น้อย ได้แก่ เฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) หรือ แคลเซียมซัลไฟด์ (CaS) เป็นสารตกตะกอน (Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (4-3)-(4-5))

เมื่อโลหะหนักซึ่งอยู่ในรูปไอออนบวกจะเข้าทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) เกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์เป็นผลิตภัณฑ์ ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ



นิยมใช้สารประกอบซัลไฟด์ในการตกตะกอน แคลเมียม โครเมียม (VI) โคบอลท์ ทองแดง เหล็ก ปรอท แมงกานีส นิกเกิล เงิน ดีบุก และ สังกะสี

ข้อดีของการตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์

- การตกตะกอนโดยใช้สารประกอบซัลไฟด์จัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง เมื่อเทียบกับการใช้สารตกตะกอนชนิดอื่น เนื่องจากตะกอนในรูปโลหะหนักซัลไฟด์มีค่าความสามารถในการละลายต่ำ (Wang, *et al.*, 1996 : 2604) พบว่าปริมาณโลหะหนักในน้ำชะจากการทดสอบที่พีเอช 5 มีค่าต่ำกว่าการทดสอบในลักษณะเดียวกันกับตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ประมาณสามเท่า (Whang, *et al.*, 1981 quoting Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (4-3))

- สามารถดำเนินการได้ในช่วงพีเอชกว้าง โดยอาจดำเนินการได้ในช่วงพีเอช 2-12 ทั้งนี้เนื่องจากโลหะหนักซัลไฟด์มีความเป็นสารแอมโฟเทอริกต่ำ

- ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลให้มีระยะเวลาการทำปฏิกิริยาในปฏิกรณ์สั้น และเมื่อเทียบกับการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์แล้วพบว่าปฏิกิริยาการตกตะกอนในรูปซัลไฟด์เกิดได้เร็วกว่า (Feng, Aldrich and Tan, 2000 : 624)

- ตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์มีปริมาตรน้อยเนื่องจากสามารถอัดตัวได้แน่น และกำจัดน้ำออกจากตะกอนได้ง่ายเมื่อเทียบกับตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์

- สารประกอบเชิงซ้อนรวมถึงสารคีเลตมีอิทธิพลต่อการตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ไม่มากเมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตาม สารคีเลตอย่างแรง เช่น อีดีทีเอ จะส่งผลต่อการตกตะกอนในรูปซัลไฟด์

- ในการตกตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียที่มีโครเมียม (VI) สารประกอบซัลไฟด์จะทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์โครเมียม (VI) เป็นโครเมียม (III) (Ku and Peters, 1986 quoting Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (4-2))

ข้อดีของการตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์

- ไอออนโลหะหนักที่มีประจุเป็นเลขคี่ เช่น โครเมียม(III), เหล็ก (III) จะไม่ตกตะกอนในรูปซัลไฟด์
- อาจเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเป็นก๊าซพิษระหว่างดำเนินปฏิบัติการ โดยเฉพาะเมื่อของเสียที่ต้องการบำบัดมีค่าพีเอชต่ำ จึงควรปรับพีเอชของของเสียให้อยู่ในช่วง เป็นกลาง ก่อนดำเนินการตกตะกอนด้วยสารประกอบซัลไฟด์ และต้องควบคุมพีเอชระหว่างดำเนินปฏิบัติการ ให้มีค่าสูงพอที่จะไม่ทำให้เกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้น (Manahan, 1990 : 291-292)
- สารประกอบซัลไฟด์เป็นสารพิษ เมื่อมีซัลไฟด์ส่วนเกินจากการตกตะกอน จำเป็นต้องกำจัดซัลไฟด์ส่วนเกินก่อนระบายออกสู่สิ่งแวดล้อม
- ระบบอาจมีปัญหากลิ่นรบกวน
- ค่าใช้จ่ายทั้งในส่วนการก่อสร้างระบบและการดำเนินงานสูงกว่าระบบการตกตะกอนที่ใช้สารประกอบไฮดรอกไซด์เป็นสารตกตะกอน
- ระบบมีความซับซ้อนมากกว่าระบบการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ (Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (4-3))
- ขณะเกิดปฏิบัติการตกตะกอนหากพีเอชในปฏิกรณ์มีค่ามากกว่า 9 จะทำให้ความสามารถในการตกตะกอนด้วยซัลไฟด์ลดลง (United States Environmental Protection Agency, 1997 : (2-1)) และหากพีเอชในปฏิกรณ์มีค่ามากกว่า 10 ตะกอนโลหะหนักซัลไฟด์จะมีสภาพเป็นคอลลอยด์ตกจมได้ยาก (Ministry of Education, Science and Culture, 1992 : 67)
- กรณีการตกตะกอนปรอท โดยทั่วไปส่วนโสรที่ได้จะมีความเข้มข้นของปรอทอยู่ในช่วง 0.5-1.0 พีพีเอ็ม (Ministry of Education, Science and Culture, 1992 : 67) ซึ่งสูงกว่าค่าตามกำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นต้องบำบัดส่วนโสรดังกล่าว ด้วยวิธีการอื่น เช่น การใช้คีเลตติ้งเรซินซึ่งมีความจำเพาะสำหรับดูดซับปรอทก่อนระบายทิ้ง
- การกำจัดตะกอนเมอร์คิวริกซัลไฟด์โดยการฝังกลบ อาจทำให้เกิดการแพร่กระจายของปรอทออกสู่สิ่งแวดล้อม เนื่องจากสภาวะในหลุมฝังกลบเชื้อให้ตะกอนเมอร์คิวริกซัลไฟด์ละลายได้ (United States Environmental Protection Agency, 1997 : (2-2))
- ในทางทฤษฎีแม้การละลายของสารประกอบโลหะหนักซัลไฟด์จะไม่ขึ้นกับพีเอช แต่พบว่าสารประกอบโลหะหนักหลายชนิดไม่ตกตะกอนในรูปสารประกอบซัลไฟด์ที่พีเอชต่ำ ขณะเดียวกันที่พีเอชสูงสารประกอบซัลไฟด์ของโลหะหนักบางชนิดจะก่อสารเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ (ตาราง 3)

ตาราง 3 ผลกระทบของพีเอชในการตกตะกอนโลหะหนักชนิดต่างๆ โดยใช้สารประกอบซัลไฟด์

precipitated at pH 7	not precipitated at low pH	soluble complex at high pH
Ag ⁺		
As ^{3+^a}		X
Au ^{3+^a}		X
Bi ³⁺		
Cd ²⁺		
Co ²⁺	X	
Cr ^{3+^a}		
Cu ²⁺		
Fe ^{2+^a}	X	
Ge ²⁺		X
Hg ²⁺		X
In ³⁺	X	
Ir ⁴⁺		X
Mn ^{2+^a}	X	
Mo ³⁺		X
Ni ²⁺	X	
Os ⁴⁺		
Pb ²⁺		
Pd ^{2+^a}		
Pt ^{2+^a}		X
Re ⁴⁺		
Rh ^{2+^a}		
Ru ⁴⁺		
Sb ^{3+^a}		X
Se ²⁺		X
Sn ²⁺		X
Te ⁴⁺		X
Tl ⁺	X	
V ^{5+^a}		
Zn ²⁺	X	

Note : Precipitation of ions listed without an x is usually not pH dependent

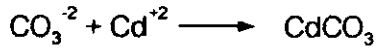
^a Higher oxidation states of this ion are reduced by sulfide ion and precipitated as this sulfide.

ที่มา : Swift and Schaefer, 1961, quoting Committee on Prudent Practices for Handling, Storage, and Disposal of chemical , in Laboratories, 1995 : 170

1.1.3 การตกตะกอนด้วยสารประกอบคาร์บอเนต

สารประกอบคาร์บอเนตที่ใช้ตกตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ โซดาแอช (Na₂CO₃) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) และแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃)

การตกตะกอนด้วยสารประกอบคาร์บอเนตจัดเป็นทางเลือกที่ดีกว่าการตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ โดยเฉพาะกรณีการตกตะกอน แคลเซียม นิกเกิล และตะกั่ว (Manahan, 1990 : 291; Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (2-3)) เนื่องจากสารประกอบคาร์บอเนตของโลหะหนักข้างต้นมีความสามารถในการละลายต่ำ ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ



ข้อดีของการตกตะกอนด้วยสารประกอบคาร์บอเนต

- การตกตะกอนด้วยโซเดียมคาร์บอเนตจะสามารถรักษาระดับพีเอชระหว่างการตกตะกอนไว้ได้ค่อนข้างคงที่ เนื่องจากโซเดียมคาร์บอเนตมีสมบัติเป็นบัฟเฟอร์ นอกจากนี้ยังมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าการตกตะกอนด้วยปูนขาว
- สามารถดำเนินการตกตะกอนได้ที่พีเอช 7-9 ซึ่งนับว่าเป็นระดับพีเอชที่ต่ำกว่าการตกตะกอนด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์
- สามารถกำจัดน้ำออกจากตะกอนที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าตะกอนโลหะหนักที่เกิดจากการใช้สารประกอบไฮดรอกไซด์เป็นสารตกตะกอน (นราพร หาญจนวนวงศ์, มมป. : 36-37; Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (5-1)-(5-3))
- การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตกตะกอนจะเกิดตะกอนน้อยกว่าการใช้ปูนขาว อย่างไรก็ตามพบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานานกว่าปูนขาว (Feng, Aldrich and Tan, 2000 : 624)

ข้อด้อยของการตกตะกอนด้วยสารประกอบคาร์บอเนต

- ปฏิกิริยาตกตะกอนเกิดได้ช้า
- ต้องเติมอากาศเพื่อไล่คาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์จะทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้า
- การตกตะกอนด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตดำเนินการได้เฉพาะช่วงพีเอช 5-7

1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนเคมีของโลหะหนัก

1.2.1 โลหะหนักที่ต้องการตกตะกอน

เฉพาะโลหะหนักประจุบวกอาจแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามระดับความเป็นพิษ สารตกตะกอนที่ใช้ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 สารตกตะกอนโลหะประจุบวก

High Toxic Hazard		Low Toxic Hazard	
Cation	Precipitant ^a	Cation	Precipitant ^a
Antimony	OH ⁻ , S ²⁻	Aluminium	OH ⁻
Arsenic	S ²⁻	Bismuth	OH ⁻ , S ²⁻
Barium	SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻	Calcium	SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻
Beryllium	OH ⁻	Cerium	OH ⁻
Cadmium	OH ⁻ , S ²⁻	Cesium	
Chromium (III) ^b	OH ⁻	Copper ^c	OH ⁻ , S ²⁻
Cobalt (II) ^b	OH ⁻ , S ²⁻	Gold	OH ⁻ , S ²⁻

ตาราง 4 (ต่อ) สารตกตะกอนโลหะประจุบวก

High Toxic Hazard		Low Toxic Hazard	
Cation	Precipitant ^a	Cation	Precipitant ^a
Gallium	OH ⁻	Iron	OH ⁻
Germanium	OH ⁻ , S ²⁻	Lanthanides	
Hafnium	OH ⁻	Lithium	
Indium	OH ⁻ , S ²⁻	Magnesium	OH ⁻
Iridium ^d	OH ⁻ , S ²⁻	Molybdenum (VI) ^{b,c}	
Lead	OH ⁻ , S ²⁻	Niobium	OH ⁻
Manganese (II) ^b	OH ⁻ , S ²⁻	Palladium	OH ⁻ , S ²⁻
Mercury	OH ⁻ , S ²⁻	Potassium	
Nickel	OH ⁻ , S ²⁻	Rubidium	
Osmium (IV) ^{b,f}	OH ⁻ , S ²⁻	Scandium	OH ⁻
Platinum (II) ^b	OH ⁻ , S ²⁻	Sodium	
Rhenium (VII) ^b	S ²⁻	Strontium	SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻
Rhodium (III) ^b	OH ⁻ , S ²⁻	Tantalum	OH ⁻
Ruthenium (III) ^b	OH ⁻ , S ²⁻	Tin	OH ⁻ , S ²⁻
Selenium	S ²⁻	Titanium	OH ⁻
Silver ^d	Cl ⁻ , OH ⁻ , S ²⁻	Yttrium	OH ⁻
Tellurium	S ²⁻	Zinc ^e	OH ⁻ , S ²⁻
Thallium	OH ⁻ , S ²⁻	Zirconium	OH ⁻
Tungsten (VI) ^{b,g}			
Vanadium	OH ⁻ , S ²⁻		

Note : ^a Precipitant are listed in order of preference : OH⁻, CO₃²⁻ = base (sodium hydroxide or sodium carbonate), S²⁻ = sulfide, SO₄²⁻ = sulfate, and Cl⁻ = chloride.

^b The precipitants is for the indicated valence state.

^c Very low maximum tolerance levels have been set for these low toxicity ions in some countries, and large amounts should not be put into public sewer system. The small amounts typically used in laboratories will not normally affect water supplies, although they may be prohibited by the local publicly owned treatment works (POTW)

^e Recovery of these rare and expensive metals may be economically favorable.

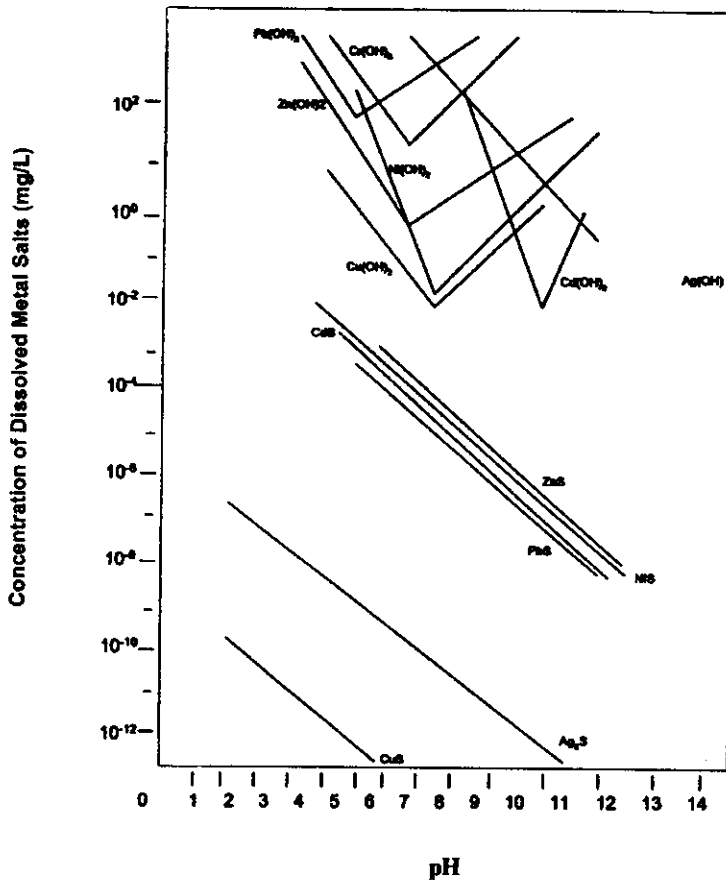
^d These ions are best precipitated as calcium molybdate (VI) or calcium tungstate.

^f CAUTION : Osmium tetroxide, OsO₄, a volatile, extremely poisonous substance, is formed from almost any osmium compound under acid conditions in the presence of air. Reaction with corn oil or powdered milk will destroy it.

ที่มา : Committee on Prudent Practices for Handling, Storage, and Disposal of chemical in Laboratories, 1995 : 167

1.2.2 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะ

กรณีการใช้สารประกอบไฮดรอกไซด์เป็นสารตกตะกอน ตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์แต่ละชนิดจะมีความสามารถในการละลายน้ำที่พีเอชต่าง ๆ ไม่เท่ากัน เนื่องจากโลหะมีสมบัติแอมโฟเทอริก สารประกอบไฮดรอกไซด์ของโลหะหนักจะละลายได้ดีทั้งในกรดแก่และเบสแก่ อาทิ ไฮดรอกไซด์ของสังกะสีเมื่อละลายในกรดจะเกิดแคทไอออน คือ Zn²⁺ และ Zn(OH)⁺ แต่หากละลายในเบสจะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนซึ่งเป็นแอนไอออน คือ Zn(OH)₃⁻ และ Zn(OH)₄²⁻ หรืออาจกล่าวได้ว่าโลหะหนักจะละลายน้ำได้น้อยลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น จนถึงพีเอชค่าหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายต่ำสุด และเมื่อเลยพีเอชนี้แล้วโลหะแอมโฟเทอริกจะกลับละลายน้ำได้มากขึ้น โดยที่โลหะแต่ละชนิดจะมีค่าพีเอชที่ทำให้ความสามารถในการละลายต่ำสุดไม่เท่ากัน (ภาพประกอบ 1)



ภาพประกอบ 1 ความสามารถในการละลายของสารประกอบโลหะหนักไฮดรอกไซด์ และโลหะหนักซัลไฟด์ที่ระดับพีเอชต่าง ๆ

ที่มา : United States Environmental Protection Agency, 1980, quoting Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (2-2)

1.2.3 พีเอชและปริมาณสารเคมี

เนื่องจากสารเคมีที่เติมเพื่อให้เกิดตะกอนจะทำหน้าที่ปรับพีเอชของน้ำด้วย ดังนั้นต้องควบคุมพีเอชและปริมาณต่างที่ใช้ โดยคำนึงถึงพีเอชที่ให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดของโลหะหนักที่ต้องการตกตะกอน ในกรณีต้องการกำจัดโลหะหลายชนิดพร้อมกันจำเป็นต้องทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ซึ่งสามารถตกตะกอนโลหะหนักส่วนใหญ่ในน้ำเสียได้ หรือใช้การตกตะกอนหลายขั้นที่ระดับพีเอชต่างๆ (Feng, Aldrich and Tan, 2000 : 624)

1.2.4 อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิขึ้นกับปฏิกิริยาการตกตะกอนเคมีกล่าวคือ ถ้าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจะตกตะกอนได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะตกตะกอนได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ

1.2.5 เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

การตกตะกอนทางเคมีต้องการเวลาในการกวนผสมเพื่อให้สารเคมีที่เป็นสารตกตะกอนกระจายทั่วถึง และมีโอกาสสัมผัสกับไอออนของโลหะหนักมากขึ้น สารเคมีบางชนิด เช่น ปูนขาวซึ่งละลายน้ำได้น้อยย่อมต้องการเวลาในการกวนผสมนานกว่าโซดาไฟซึ่งละลายน้ำได้ดี

1.2.6 ของแข็งละลาย (Total Dissolved Solids, TDS)

น้ำเสียที่มีของแข็งละลายได้ในปริมาณมาก จะรบกวนปฏิกิริยาตกตะกอนโลหะ และทำให้แยกน้ำออกจากสลัดจ์ได้ยาก นอกจากนี้ น้ำเสียที่มีของแข็งละลายได้สูงจะใช้สารตกตะกอนมากกว่าน้ำเสียที่มีของแข็งละลายได้ต่ำ

1.2.7 น้ำมันและไขมัน

น้ำมันและไขมันจะขัดขวางการตกจมของตะกอน ทำให้ต้องใช้เวลาในการตกตะกอนมากขึ้น แม้จะใช้สารช่วยตกตะกอน (coagulant) แล้วก็ตาม จึงจำเป็นต้องกำจัดน้ำมันและไขมันออกก่อนดำเนินการตกตะกอน (นราพร หาญวงวงศ์, มมป. : 29)

1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของตะกอนโลหะหนัก

1.3.1 การเกิดสารเชิงซ้อน

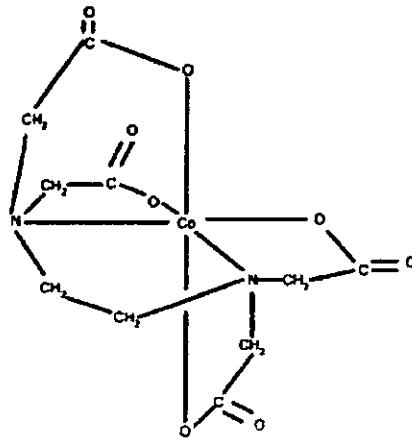
ลิแกนด์ (ligand) เป็นโมเลกุลหรือไอออนที่สามารถก่อสารเชิงซ้อนกับตะกอนโลหะหนัก และสารเชิงซ้อนบางชนิดสามารถละลายน้ำได้ ลิแกนด์ที่พบได้มาก คือ OH^- , CO_3^{2-} , NH_3 , F^- , CN^- และ $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์อีกเป็นจำนวนมากที่มีสมบัติเป็นลิแกนด์

1.3.2 สารคีเลต (chelating agents)

กรณีที่สารละลายมีสารคีเลตจะทำให้ความสามารถในการละลายของไอออนโลหะเพิ่มขึ้น เนื่องจากสารคีเลตจะสร้างพันธะกับไอออนโลหะและทำให้สารประกอบคีเลต-โลหะแปรสภาพโครงสร้างโมเลกุลเป็นวงแหวน (ภาพประกอบ 2) ส่งผลให้ไอออนโลหะไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสารตกตะกอน สารคีเลตที่พบได้มาก ได้แก่ อีดีทีเอ, ซีเตรท และทาร์เตรท

1.3.3 อุณหภูมิ

ค่าคงที่การละลายของตะกอนโลหะหนักจะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ ซึ่งโดยทั่วไปค่าคงที่การละลายจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (2-6)) ยกเว้นการตกตะกอนเคมีบางชนิด เช่น แคลเซียมซัลเฟต, แคลเซียมคาร์บอเนต, แคลเซียมฟอสเฟต และ เฟอริกฟอสเฟต จะละลายน้ำได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง (นราพร หาญวงวงศ์, มมป. : 29)



ภาพประกอบ 2 สารคีเลต-โลหะ ของอิตีทีเอ

ที่มา : Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (2-6)

1.3.4 สารช่วยตกตะกอน

ความสามารถในการละลายของตะกอนโลหะจะลดลงเมื่อมีสารช่วยตกตะกอน เนื่องจากโลหะที่ต้องการตกตะกอนจะถูกดูดซับไว้ที่ผิวหน้าของสารช่วยตกตะกอน อาทิ เมื่อเติม แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารช่วยตกตะกอนจะทำให้ประสิทธิภาพการตกตะกอนแคดเมียมเพิ่มขึ้น เนื่องจาก แคดเมียมถูกดูดซับไว้ที่ผิวหน้าของแคลเซียมคาร์บอเนต (Anderson, 1994 quoting Department of The Army, U.S. Army Corps of Engineers, 2001 : (2-6))

1.3.5 ปฏิกริยาออกซิเดชัน / รีดักชัน

การตกตะกอนโลหะบางชนิดจะต้องทำให้ไอออนโลหะนั้น ๆ อยู่ในรูปที่ตกตะกอนได้ หรืออยู่ในรูปซึ่งให้ตะกอนที่เสถียร เช่น ในการตกตะกอนโครเมียมจะต้องรีดิวซ์โครเมียม (IV) ให้เป็นโครเมียม (III) ซึ่งตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ หรือ จะต้องออกซิไดซ์เหล็ก (II) เป็นเหล็ก (III) ซึ่งให้ตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ที่มีความเสถียร

2. การตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี

พงษ์ศิริ เจะดุนัน และ สมบูรณ์ สุรติจินดา (2542 : 41-42) ทดลองใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 และใช้ปูนขาว ตกตะกอนโลหะหนักในของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีซึ่งมีความเข้มข้นของปรอทและโครเมียม 640 มิลลิกรัม/ลิตร และ 382 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยใช้ของเสีย 500 มิลลิลิตร ปรากฏผลดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ผลการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 และปูนขาว

ตัวอย่าง	สารตกตะกอน	ความเข้มข้น (mg/l)		น้ำหนักตะกอน (g/l COD waste)
		ปรอท	โครเมียม	
1	120 ml 30%Na ₂ S ₂ O ₃ + 235 ml 50%NaOH	0.8	1.6	619
2	120 ml 40%Na ₂ S ₂ O ₃ + 234.5 ml 50%NaOH	1.0	1.6	636
3	4.8 g Na ₂ S ₂ O ₃ + CaO(10 times COD waste)	0.8	1.6	1,254
4	3.0 g Na ₂ S ₂ O ₃ + CaO(15 times COD waste)	1.0	1.6	1,360
5	2.4 g Na ₂ S ₂ O ₃ + CaO(20 times COD waste)	1.0	2.1	1,764
6	1.8 g Na ₂ S ₂ O ₃ + CaO(25 times COD waste)	0.5	1.5	2,704

ที่มา : พงษ์ศิริ เจงดูหมั่น และ สมบูรณ์ สุจริตจินดา (2542 : 42)

วิภาสินี ปริญญาพันธ์ (2542 : 37, 45-46) ทดลองใช้ปูนขาวตกตะกอนโลหะหนักในของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีที่ระดับพีเอชต่างๆ ในอุปกรณ์จาร์เทสต์ พบว่าไม่สามารถควบคุมให้พีเอชมีค่าตามต้องการได้ แต่เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 เพื่อทำการทดลองในลักษณะเดียวกัน สามารถควบคุมให้พีเอชมีค่าตามต้องการได้ ปรากฏผลการทดลองดังแสดงในตาราง 6

ตาราง 6 ผลการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 50 ในการตกตะกอนที่พีเอชต่าง ๆ

ค่าพีเอช	50%NaOH (ml/500 ml COD waste)	ความเข้มข้น (mg/l)		
		ปรอท	โครเมียม	เหล็ก
-0.32*		1,420*	245*	780*
8.5	203.3	8.5	1.36	0.54
9.0	205.3	6.0	0.62	0.60
9.5	205.5	3.7	0.89	0.54
10.0	212.0	1.2	1.10	0.79
10.5	212.2	0.73	13.50	0.45
11.0	213.5	1.4	35.10	0.37

หมายเหตุ * ของเสียเริ่มต้น

ที่มา : วิภาสินี ปริญญาพันธ์ (2542 : 46)

ฉัตรไชย รัตนไชย และคณะ (2542 : (3-6)-(3-9)) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อบำบัดของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยใช้วิธีตกตะกอนซัลไฟด์และวิธีตกตะกอนร่วมด้วยเฟอร์ไรท์ (ferrite co-precipitation) ผลดังแสดงในตาราง 7

ตาราง 7 ผลการบำบัดของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยใช้วิธีตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ และวิธีตกตะกอนร่วมด้วยเฟอร์ไรท์

วิธีการบำบัด	ของเสีย	พีเอช	ความเข้มข้น (mg/l)			
			ปรอท	โครเมียม	เงิน	เหล็ก
ตกตะกอนซัลไฟด์	ก่อนบำบัด	<1	1,536	269	519	839
	หลังบำบัด	>14	390.5	0.31	4.62	0.54
ตกตะกอนร่วมด้วยเฟอร์ไรท์	ก่อนบำบัด	<1	1,151	271	604	795
	หลังบำบัด	11.8	0.18	0.23	3.64	0.61

ที่มา : ฉัตรไชย รัตนไชย และคณะ (2542 : (3-9))

ฉัตรไชย รัตนไชย และคณะ (2544 : (9-6)-(9-8)) ทำการทดลองแบบที่ละเทในระดับนำร่อง เพื่อบำบัดของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีโดยใช้วิธีตกตะกอนร่วมด้วยเฟอร์ไรท์ ทั้งนี้ของเสียที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นของปรอท เงิน และโครเมียม 1,312 มิลลิกรัม/ลิตร 527 มิลลิกรัม/ลิตร และ 218 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ พบว่าส่วนใส่ที่ได้มีความเข้มข้นของปรอท เงิน และโครเมียม 0.15 มิลลิกรัม/ลิตร 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร และ 0.07 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ เมื่อประเมินค่าใช้จ่ายเฉพาะส่วนสารเคมีในการบำบัดพบว่าต้องเสียค่าใช้จ่าย 7.77 บาทต่อการบำบัดของเสียจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี 1 ลิตร

3. การใช้สารประกอบเฟอร์ไรท์ของเหล็กเป็นสารช่วยตกตะกอน ในการบำบัดน้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก

เหล็กเฟอร์ไรท์ (iron ferrite) หรือแมกนีไทท์ (magnetite) สูตรโมเลกุล $FeO \cdot Fe_2O_3$ เป็นสารประกอบในกลุ่มเฟอร์ไรท์ที่นอกจากจะพบได้ทั่วไปในธรรมชาติแล้วยังเป็นสารที่สามารถเตรียมขึ้นได้

เนื่องจากเหล็กเฟอร์ไรท์มีสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก จึงมีการพัฒนาเพื่อนำเหล็กเฟอร์ไรท์มาใช้ในกระบวนการแยกน้ตั้งแต่ช่วงศตวรรษที่ 19 เป็นต้นมา กระทั่งปัจจุบันในกระบวนการบำบัด

และปรับปรุงคุณภาพน้ำมีการใช้เหล็กเฟอร์ไรท์แยกสารปนเปื้อนหลายประเภท เช่น อนุภาคของสารให้สี, สารมลพิษจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี, สารกัมมันตรังสี รวมถึงไอออนของโลหะหนัก ออกจากสารละลาย (<http://jpec.utulsa.edu/lpec/10.d/FinalReport.html>)

เหล็กเฟอร์ไรท์ที่ใช้ในกระบวนการแยกมีทั้งเหล็กเฟอร์ไรท์ที่ได้จากแร่ธรรมชาติ และเหล็กเฟอร์ไรท์ที่เตรียมขึ้น แต่เหล็กเฟอร์ไรท์ที่เป็นแร่ธรรมชาตินั้นจะต้องผ่านการกระตุ้นก่อนนำมาใช้ (<http://www.epa.gov/ttbnmr/AsenicPres/485.pdf>)

เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็ก สามารถดูดติดกับอนุภาคที่ต้องการแยกออกจากสารละลายได้ แรงดึงดูดที่เหล็กเฟอร์ไรท์กระทำต่ออนุภาคเป้าหมายมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดเนื่องจากแรงโน้มถ่วงประมาณ 1,000 เท่า (de Reuver, 1994 : 605, 607; <http://www.epa.gov/ttbnmr/AsenicPres/485.pdf>) และการเติมเหล็กเฟอร์ไรท์ร้อยละ 0.01-0.1 โดยน้ำหนัก/ปริมาตร ถือว่าเพียงพอที่เหล็กเฟอร์ไรท์จะสามารถดูดจับอนุภาคสารปนเปื้อนได้ (Parsonage, 1984 quoting Feng, Aldrich and Tan, 2000 : 630)

ในการบำบัดน้ำที่ปนเปื้อนโลหะหนักโดยกระบวนการตกตะกอน นิยมใช้สารประกอบที่แตกตัวให้เหล็ก (III) เป็นสารช่วยตกตะกอน (Dzombak and Morel, 1990 quoting <http://www.epa.gov/ttbnmr/AsenicPres/485.pdf>) อาทิ การตกตะกอนปรอทโดยใช้สารประกอบซัลไฟด์อาจเติมเฟอร์ริกคลอไรด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตกตะกอน (Ministry of Education, Science and Culture, 1992 : 67) อย่างไรก็ตามโลหะหนักไฮดรอกไซด์เป็นตะกอนเบา และมีความหนาแน่นต่ำจึงตกจมและแยกชั้นจากส่วนใสได้ช้า การเพิ่มความหนาแน่นของตะกอนอาจทำได้โดยใช้เครื่องทำข้น (thickener) นอกจากนี้การแยกตะกอนจากส่วนใสอาจกรองด้วยเครื่องกรอง แต่การเพิ่มอุปกรณ์ข้างต้นย่อมทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำบัดเพิ่มขึ้น ต้องใช้พื้นที่เพิ่มขึ้นสำหรับจัดวางอุปกรณ์ รวมถึงต้องใช้เวลาในการบำบัดนานขึ้น (Feng, Aldrich and Tan, 2000 : 624) ขณะที่ตะกอนซึ่งถูกดูดติดกับเหล็กเฟอร์ไรท์จะมีน้ำหนักมากจึงตกจมได้เร็ว และมีปริมาตรตะกอนน้อย นอกจากนี้ยังสามารถกรองแยกตะกอนออกจากส่วนใสได้ง่าย การใช้เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอนจึงใช้พื้นที่ติดตั้งอุปกรณ์ไม่มาก (de Reuver, 1994 : 607) อีกทั้งสมบัติเฟอร์โรแมกเนติกของเหล็กเฟอร์ไรท์ทำให้สามารถแยกอนุภาคเหล็กเฟอร์ไรท์ได้ด้วยแม่เหล็กถาวร (Tamura, *et al.*, 1991 : 1894 b)

แม้กรรมวิธีการตกตะกอนโลหะจะทำให้ความเข้มข้นของเกลือในสารละลายเพิ่มขึ้น (Feng, Aldrich and Tan, 2000 : 624) แต่เกลือความเข้มข้นสูงจะไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของเหล็กเฟอร์ไรท์มากนัก (<http://www.epa.gov/ttbnmr/AsenicPres/485.pdf>)

ไฮดรอกซีไอออนสามารถดูดติดกับผิวหน้าของอนุภาคสารประกอบเฟอร์ไรท์ได้ดีมาก ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์เมื่อไฮดรอกซีไอออนดูดติดกับผิวหน้าของอนุภาคสารประกอบเฟอร์ไรท์ ไอออนของโลหะหนักจะสร้างพันธะไอออนิกกับไฮดรอกซีไอออนดังกล่าวเกิดตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ซึ่งถูกดูดติดอยู่กับผิวหน้าสารประกอบเฟอร์ไรท์ อย่างไรก็ตามโลหะที่ไม่ตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ เช่น อัลคาลิ และอัลคาไลน์ รวมถึงสารเชิงซ้อนของโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งเกิดขึ้นที่พีเอชสูง จะไม่ดูดติดกับผิวหน้าสารประกอบเฟอร์ไรท์

(<http://www.epa.gov/ttbnr/mr/AsenicPres/485.pdf>)

ขณะที่การตกตะกอนโลหะหนักโดยใช้สารประกอบซัลไฟด์นั้น สารประกอบเฟอร์ไรท์เพียงอนุภาคเดียวสามารถดูดติดกับอนุภาคสารประกอบโลหะหนักซัลไฟด์ได้หลายอนุภาค (McKinnon, *et al.*, 2000)

ในการใช้เหล็กเฟอร์ไรท์เป็นสารช่วยตกตะกอนอาจมีอนุภาคเหล็กเฟอร์ไรท์ซึ่งตกจมยากแขวนลอยอยู่ในส่วนใส ซึ่งจะสามารถแยกอนุภาคดังกล่าวออกได้โดยใช้อุปกรณ์แยกที่มีการติดตั้งแม่เหล็ก (magnetic separator) (Feng, Aldrich and Tan, 2000 : 630)

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี
2. ออกแบบระบบบำบัดแบบต่อเนื่อง เพื่อบำบัดของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถหาแนวทางที่เหมาะสมในการตกตะกอนโลหะหนักในของเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีได้
2. สามารถออกแบบระบบตกตะกอนโลหะหนักแบบต่อเนื่อง เพื่อบำบัดของเสียที่เกิดจากการตรวจวิเคราะห์ค่าซีโอดีให้มีค่าต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมากที่สุด