



เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสีย

ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีโลหะหนักอยู่นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือ หลายอย่างรวมกันดังต่อไปนี้

1. การตกตะกอนผลึก (precipitation) เป็นการเปลี่ยนรูปโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง (solids) สามารถทำได้โดยการทำอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้

1.1 การเติมสารเคมีเพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักโดยตรง เกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น การเติมซัลไฟด์ เป็นต้น

1.2 การเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง ได้แก่ การปรับพีเอช

1.3 การเปลี่ยนออกฤทธิ์ เป็นการปรับเพื่อให้สารประกอบของโลหะนั้นมีค่าความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยลง

2. การรวมตะกอน (flocculation) เป็นกระบวนการในการทำให้ตะกอนรวมตัวมีขนาดใหญ่ขึ้น สามารถตกตะกอนได้เร็วขึ้น

3. การตกตะกอน (sedimentation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกของแข็งออกจากน้ำ โดยสารประกอบโลหะหนักมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ สามารถตกตะกอนได้เร็วโดยกระบวนการนี้มักจะต่อจากกระบวนการตกตะกอนผลึก และการรวมตะกอน

4. การกรอง (filtration) เป็นกระบวนการแยกของแข็งออกจากน้ำเนื่องจากตะกอนบางส่วนที่มีขนาดเล็กและแขวนลอยได้ ไม่สามารถแยกได้โดยการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว

5. ออกซิเดชันและรีดักชัน (oxidation-reduction) เป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนค่าเลขประจุเพื่อให้มีความเป็นพิษน้อยลง และสามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น เช่น โครเมียมประจุ

+ 6 เป็นโครเมียมประจุ +3

6. กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) เป็นกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่มีโลหะหนักที่มีประจุบวกหรือสารประกอบที่มีประจุลบ เมื่อผ่านเรซินก็จะถูกจับไว้ในเรซิน ทำให้น้ำทิ้งมีคุณภาพดี แต่หลังจากใช้งานสักกระยะหนึ่งประสิทธิภาพจะต่ำลง ต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพ (regeneration) และได้น้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะหนัก หรือสารประกอบสูงมาก อาจนำกลับมาใช้ใหม่หรือกำจัดด้วยวิธีอื่น

7. การระเหย (evaporation) เป็นการใช้ความร้อนในการระเหยน้ำออกไป ทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียสูงขึ้น หรือ กลายเป็นกากตะกอน พลังงานที่ใช้มาจากเชื้อเพลิง (fuel) การถ่ายเทความร้อน (heat exchanger) หรือใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์

8. รีเวอร์ส ออสโมซิส (reverse osmosis) เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยการยอมให้แรงดันอัดน้ำเสียผ่านเยื่อ semipermeable membrane ซึ่งเยื่อนี้มีคุณสมบัติยอมให้น้ำและสารบางอย่างผ่านไปได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่มีความสะอาด และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง กระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานมาก และต้องมีการควบคุมคุณภาพของน้ำเสียเข้า

9. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากมีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำเสียทำให้โลหะหนักต่างๆในน้ำถูกจับไว้ในช่องรูพรุนต่างๆ ทำให้น้ำทิ้งสะอาด แต่ถ่านกัมมันต์ที่ใช้งานแล้วไม่ควรกำจัดโดยการเผา

หลักการในการเลือกใช้กระบวนการต่างๆอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือหลายอย่างนั้น จะต้องพิจารณาความเหมาะสมต่างๆในหัวข้อ ต่อไปนี้

1. ลักษณะของน้ำเสียก่อนบำบัด
2. คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
3. พื้นที่ต้องใช้ทั้งหมด
4. ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและตรวจสอบคุณภาพ
5. ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย
6. ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ หรือ กากที่ต้องกำจัด

การตกตะกอนผลึกทางเคมี

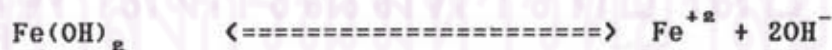
เป็นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนสารละลายให้มาอยู่ในสถานะของแข็ง และตกตะกอนแยกออกจากน้ำได้ กระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะสมดุลทางเคมีในน้ำเสียที่มีผลต่อการละลายน้ำของสารที่เกิดการตกตะกอนผลึก กระบวนการตกตะกอนผลึก (precipitation) ทำได้โดย 3 วิธี คือ

1. การตกตะกอนผลึกเนื่องจากการเติมสารเคมี เพื่อทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยลง ในการกำจัดโลหะหนักก็อาจใช้หลักการนี้ได้เช่นกัน เช่น ในการกำจัดซิงค์ละลายน้ำ (Zn^{+2}) จะต้องเติมโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซึ่งละลายน้ำได้ดีเกิดปฏิกิริยาได้สารประกอบ ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก ดังสมการ



2. เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลาย ทำให้ความสามารถในการละลายของสารนั้นๆ ลดลง สารบางส่วนตกตะกอนเป็นตะกอนผลึก

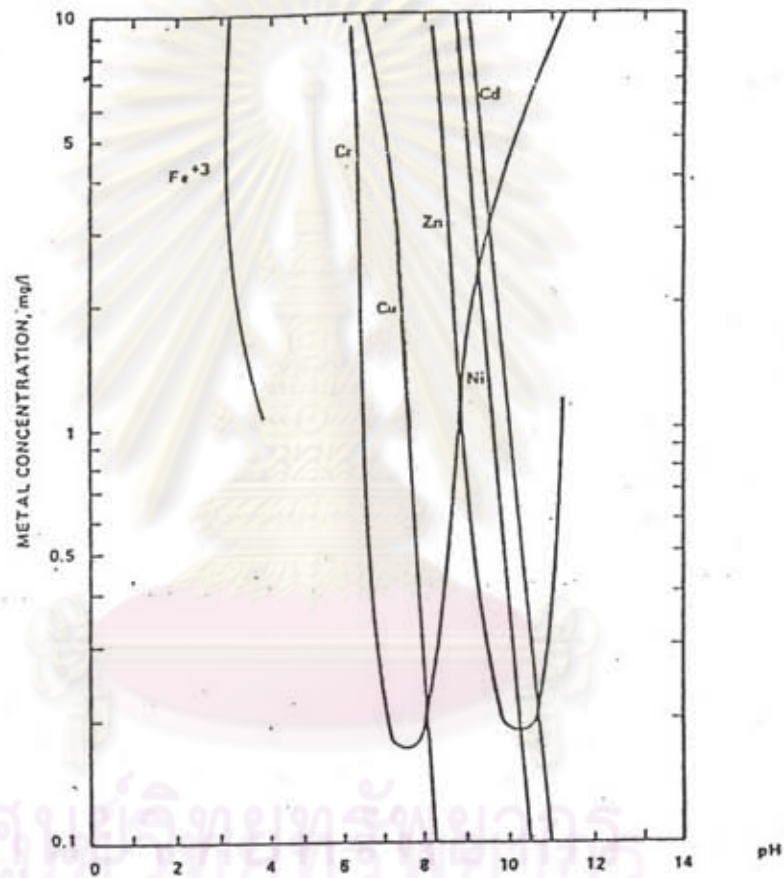
3. การตกตะกอนผลึก เนื่องจากการเปลี่ยนสมดุลของการละลาย (solubility equilibrium) ในการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้ ทำโดยการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอชให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นของโลหะจะต่ำลง และโลหะส่วนเกินอยู่ในรูปของตะกอนผลึก สามารถจมน้ำได้คือเช่น ถ้าเอา $Fe(OH)_2$ ละลายน้ำ สามารถละลายได้เล็กน้อย ดังนี้



แต่ถ้าเติมกรดลงไป ทำให้พีเอชต่ำลง เพิ่ม solubility ปฏิกิริยาเลื่อนมาทางขวามากขึ้น Fe^{+2} มีในน้ำมากขึ้น วิธีการนี้ใช้มากในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนัก โดยปรับพีเอชให้สูงมากขึ้น ทำให้โลหะหนักตกตะกอนผลึกเป็นโลหะออกไซด์ได้

ความสัมพันธ์ของ พีเอช กับ solubility แสดงในรูปที่ 3.1

เนื่องจากตะกอนฟล็อกโลหะมักมีขนาดเล็กและตกตะกอนได้ไม่ดี หลังจากปรับพีเอชแล้วต้องมีกระบวนการกวนช้า (flocculation) เพื่อช่วยให้ตะกอนเหล่านี้จับตัวกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ บางครั้งก็มีการเติมสารเคมีพวกโพลีเมอร์ เพื่อช่วยให้ฟล็อกจับตัวกันได้ดีขึ้นก่อนเข้าสู่ถังตกตะกอน



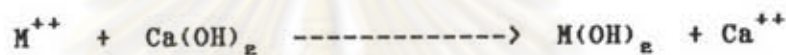
รูปที่ 3.1 ความสามารถในการละลายของโลหะหนักที่พีเอชต่างๆ
(Ecklenfelder, 1989)

ประเภทของการตกตะกอนผลึก

Wentz ได้แบ่งประเภทการตกตะกอนผลึกไว้ใน Hazardous Waste Management โดยแบ่งตามรูปแบบของตะกอนได้ดังนี้

1. การตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์ (hydroxide precipitation)

การตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์ เป็นการตกตะกอนผลึกโดยใช้สารเคมี ได้แก่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการ โดยไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมี



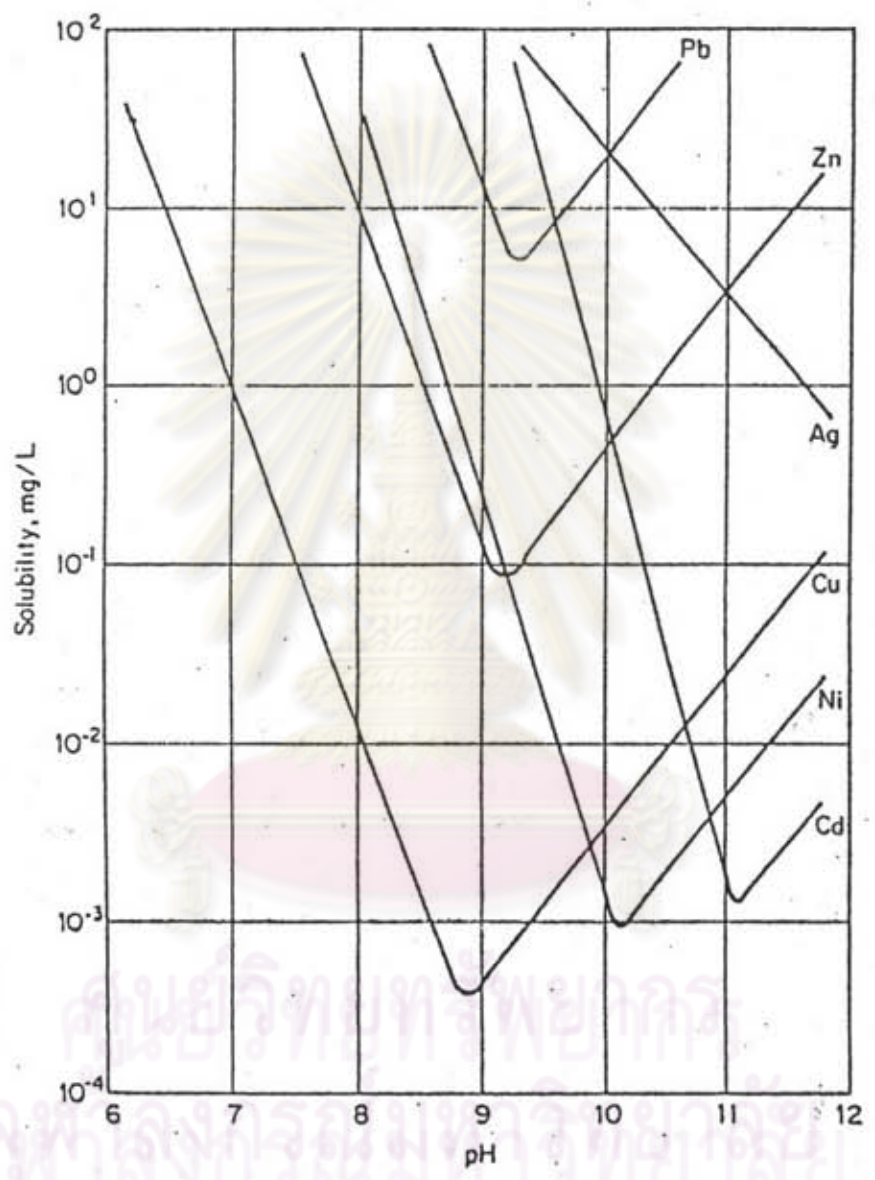
โดยที่ M^{++} คือ โลหะไอออน

ช่วงพีเอชที่ใช้ในการตกตะกอนผลึกของไฮดรอกไซด์อยู่ในช่วง 8-11 ซึ่งโลหะส่วนใหญ่ตกตะกอนผลึกได้ดี การตกตะกอนผลึกของโลหะในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์แต่ละช่วงพีเอช แสดงดังรูปที่ 3.2

ความสามารถในการตกตะกอนผลึกของไฮดรอกไซด์ ขึ้นอยู่กับความสามารถของการละลายของโลหะ สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน พีเอชที่ใช้ และสารอื่นๆที่สามารถขัดขวางการตกตะกอนผลึกได้ตามทฤษฎีแล้ว ความเข้มข้นของโลหะหลังจากผ่านการตกตะกอนผลึกด้วยไฮดรอกไซด์จะมีความเข้มข้นน้อยกว่า 1.0 มก./ล

2. การตกตะกอนผลึกในรูปของซัลไฟด์ (sulfide precipitation)

การตกตะกอนผลึกในรูปของซัลไฟด์ เป็นการตกตะกอนผลึกโดยใช้สารเคมี ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ($NaHS$) ซึ่งต้องละลายน้ำได้ดี และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS)



รูปที่ 3.2 ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์
(Palmork , 1980)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะตกตะกอนผลึกเป็นดังนี้



โลหะซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำกว่าโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์จึงไม่อยู่ในรูป amphoteric และนอกจากนี้ โลหะบางชนิดเช่น โครเมียม สามารถนำมาตกตะกอนผลึกได้โดยโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการรีดักชัน ดังสมการ



ข้อเสียสำหรับการตกตะกอนในรูปซัลไฟด์คือ การเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งในขณะที่ทำการทดลองต้องควบคุมให้มีพีเอช มีค่ามากกว่า 8 เพื่อป้องกันแก๊สที่เกิดขึ้น ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือ ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงมีซัลไฟด์หลงเหลืออยู่ในน้ำ ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายจึงต้องมีการบำบัดนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์ในแต่ละช่วงของค่าพีเอช แสดงในรูปที่ 3.3

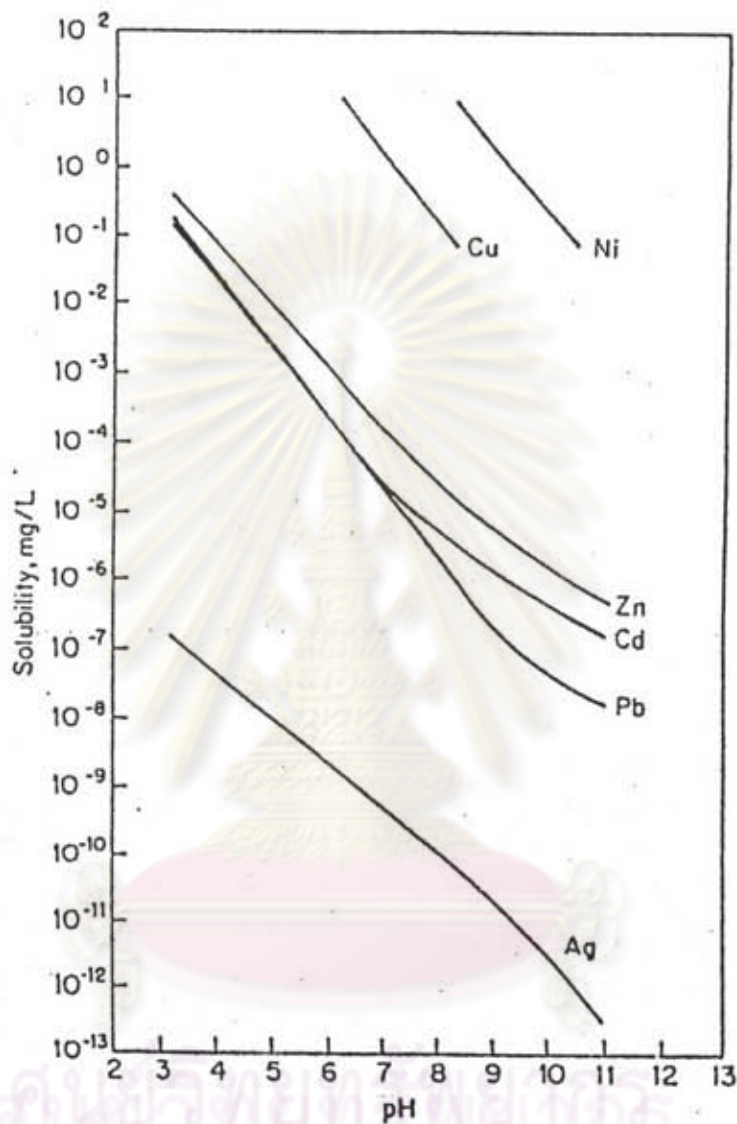
3. การตกตะกอนผลึกในรูปของคาร์บอเนต (carbonate precipitation)

ในการตกตะกอนผลึกของโลหะเช่น แคลเซียม และตะกั่ว การตกตะกอนผลึกในรูปของคาร์บอเนตให้ผลดีกว่าการตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสามารถทำได้ในพีเอชที่ต่ำกว่า ในการตกตะกอนผลึกรูปคาร์บอเนตของแคลเซียม และตะกั่ว เกิดขึ้นที่พีเอชประมาณ 7.8-8.5 ในขณะที่การตกตะกอนผลึกในรูปของไฮดรอกไซด์ ต้องควบคุมพีเอชประมาณ 10 หรือมากกว่านั้น

สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนผลึกได้แก่ โซดาแอช หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ซึ่งเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ



กระบวนการนี้เหมาะสมกับโลหะบางชนิดเท่านั้น เช่น แคลเซียมและตะกั่ว



รูปที่ 3.3 ความสามารถในการละลายของโลหะหนัก

(USEPA , 1979)

4. การตกตะกอนผลึกในรูปของโบรไฮไดรด์โซเดียม (sodium borohydride precipitaion)

สารเคมีโบรไฮไดรด์โซเดียม เป็นสารเคมีที่ใช้ในการรีดิวซ์ (reducing agent) ใช้ในการตกตะกอนผลึกโลหะหนัก ให้อยู่ในรูปที่โลหะที่ไม่ละลายน้ำ ปฏิกริยารันอยู่กับค่าพีเอช อธิบายได้ดังสมการ



พีเอชที่เหมาะสมคือ ช่วง 8-11 ถ้าพีเอชต่ำกว่า 8 ต้องเพิ่ม borohydride ทำให้เกิด hydrolysis ถ้าพีเอชมากกว่า 11 ทำให้อัตราการเกิดปฏิกริยาลดลง การตกตะกอนผลึกชนิดนี้ใช้ในการ recovery โลหะจากสารละลายในน้ำเสีย โดยเฉพาะโลหะหนัก เมอร์คิวรี นิกเกิล ทองแดง ซิลเวอร์ ฯลฯ

ทฤษฎีการตกตะกอนผลึกในรูปไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกในรูปไฮดรอกไซด์ สามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานทางเคมี โดยการตกตะกอนผลึกขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ทำให้ทราบพีเอชที่ใช้ในการตกตะกอนได้อย่างคร่าวๆ

ให้ M^{++} แทนโลหะไอออน

$$\text{จาก } (M^{++})(OH^-)^n = K_{sp} \quad (1)$$

โดยที่ K_{sp} แทนความสามารถในการละลายของโลหะที่เกิด
 (OH^-) แทนโมลาริตีของไฮดรอกไซด์ไอออน
 (M^{++}) แทนโมลาริตีของโลหะไอออน ในหน่วย มก./ล

เมื่อแทนค่า \log ลงไปในสมการ (1) จะได้ว่า

$$\log (M^n) + n\log(OH^-) = \log K_{sp} \quad (2)$$

จากค่าจำกัดความของพีเอชว่า

$$\log (OH^-) = pOH \quad (3)$$

$$\log (H^+) = pH \quad (4)$$

และที่อุณหภูมิ $20^\circ C$

$$pH + pOH = 14 \quad (5)$$

จากสมการที่ (2) เมื่อแทนค่าจะได้ว่า

$$\log (M^n) + n pOH = \log K_{sp} \quad (6)$$

หรือ

$$pOH = 1/n \log K_{sp} - 1/n \log M^{n+}$$

ในแทนของพีเอชจะได้ว่า

$$\log(M^{n+}) + n(14-pH) = \log K_{sp} \quad (7)$$

หรือ

$$-pH = 1/n \log K_{sp} - 14 - 1/n \log M^{n+} \quad (8)$$

$$pH = 14 + 1/n \log M^{n+} - 1/n \log K_{sp}$$

จากสมการ (8) ถ้ารู้ความสามารถในการแตกตัวของโลหะ M^{n+} และความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ จะสามารถทราบค่าพีเอชที่ใช้ในการตกตะกอนได้อย่างคร่าวๆ ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์แต่ละชนิด แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์

(Sund, 1986)

โลหะไฮดรอกไซด์	ค่าความสามารถการละลาย
Cu^{2+}	$10^{-10.8}$
Fe^{2+}	$10^{-16.3}$
Fe^{3+}	$10^{-35.6}$
Hg^{2+}	$10^{-24.4}$
Ni^{2+}	$10^{-15.3}$
Pb^{2+}	$10^{-10.0}$
Zn^{2+}	$10^{-16.1}$
Bi^{3+}	10^{-31}
Cd^{2+}	$10^{-14.3}$

การตกตะกอนหลักของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์

1. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (hydrated lime, $\text{Ca}(\text{OH})_2$)

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาวพ่นก้นน้ำ เป็นสารเคมีที่ใช้กันมากในตกตะกอนหลัก ความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยทำให้เกิดตกตะกอนหลักในรูปหินปูน การเก็บรักษาจึงค่อนข้างยุ่งยาก การป้อนปูนขาวพ่นก้นน้ำ จะต้องให้ในลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry) ข้อดีในการใช้ปูนขาวพ่นก้นน้ำคือมีราคาถูก

2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (caustic soda, NaOH)

โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการตกตะกอนหลัก เนื่องจากการทำปฏิกิริยาเป็นไปโดยง่าย และสามารถทำปฏิกิริยาได้รวดเร็วกว่าปูนขาว แต่จะมีราคาแพงมากกว่า การเก็บรักษาทำได้ง่ายแต่ต้องไม่ให้ได้รับความร้อน

ข้อดีและข้อเสียของการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์

	ปูนขาว Ca(OH)_2	โซดาไฟ NaOH
ข้อดี	1. ราคาถูก	1. ทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า 2. การนำมาใช้งานสะดวกกว่า 3. เกิดตะกอนน้อย
ข้อเสีย	1. การเตรียมสารยุ่งยากกว่า 2. ค่าใช้จ่ายในการป้อนสารเคมีมีราคาสูงกว่า 3. ถ้าน้ำเสียนี้อุปริมาณซัลเฟตสูงจะเกิดตะกอนมาก 4. เกิดตะกอนมาก	1. ราคาแพง 2. เสียค่าใช้จ่ายในการทำตะกอนให้แห้งมากกว่า 3. ตะกอนกลับมาละลายในน้ำได้อีก

การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

Dean และคณะ (1971) ศึกษาการกำจัดเมอร์คิวรีออกจากน้ำเสียที่ผ่านการทดลองในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ น้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีโอดี , เจห์คาร์ท และจากการประมาณค่าความเข้มข้นโดยใช้ Nessler การทดลองนี้ใช้วิธีการตกตะกอนผลึกในรูปของผลึกซิลไฟด์ ลำดับขั้นตอนในการทดลองเป็นดังนี้

1. นำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองหาค่าซีโอดี และน้ำเสียส่วนอื่นๆมาปรับค่าพีเอช โดยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พร้อมกับกวนให้ความร้อน
2. ปรับค่าพีเอช ของน้ำเสียให้มีค่ามากกว่า 10
3. เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึกของโลหะหนักในรูปตะกอนซิลไฟด์
4. แยกน้ำใสออกจากตะกอนโลหะหนัก นำตะกอนมาล้างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เจือจางเพื่อให้เกิดโซเดียมซิลเฟตเพื่อกำจัดซิลเฟตออก จากนั้นนำตะกอนให้แห้งโดยอบที่อุณหภูมิมากกว่า 100 C และนำไปกำจัดต่อไป

วิธีการนี้ได้นำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีโอดี ในห้องปฏิบัติการ ก่อนที่จะมีการพัฒนาวิธีบำบัดน้ำเสียในปีต่อมา

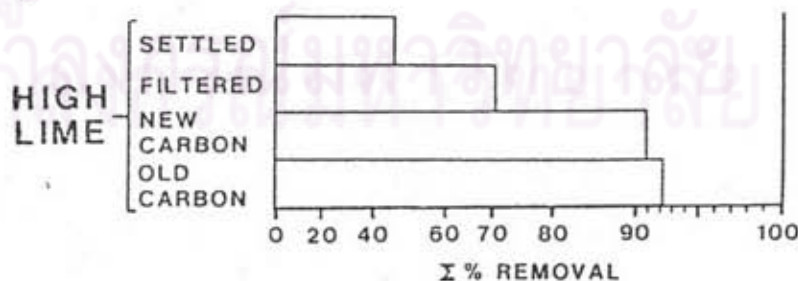
Haruyama และคณะ (1974) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยใช้วิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี (precipitation) โดยน้ำเสียจะได้รับการเติมสารเคมี เพื่อให้เกิดการตกตะกอนผลึก จากนั้นจะถูกนำไปตกตะกอนที่ถังตกตะกอน เพื่อนำตะกอนของโลหะหนักออก ส่วนน้ำเสียจะถูกบำบัดด้วยการกรอง และการดูดซับโดยใช้ถ่านคาร์บอนและทำให้เป็นกลางก่อนที่จะระบายทิ้ง

การทดลองที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยนี้ คือ การกำจัดเมอร์คิวรีและโครเมียม โดยในการกำจัดเมอร์คิวรีได้ใช้สารเคมี คือ ปูนขาว ซึ่งมีความเข้มข้น 600 มก./ล เติมน้ำลงในน้ำเสีย โดยมีค่าควบคุมพีเอชที่ 11.5 และในการกำจัดโครเมียมได้ใช้สารเคมี 3 ชนิด คือ เหล็ก 45 มก./ล โดยควบคุมพีเอชที่ 6.0 , ปูนขาว 260 มก./ล และเหล็ก 20 มก./ล โดยควบคุมพีเอชที่ 10.0 และ ปูนขาว 600 มก./ล โดยควบคุมพีเอชที่ 11.5

จากการทดลองพบว่าในการกำจัดเมอร์คิวรี น้ำที่ผ่านการตกตะกอนและนำมากรอง สามารถกำจัดเมอร์คิวรีได้ 70 % เมื่อผ่านการดูดซับจากถ่านคาร์บอนพบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มเป็น 91 % ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในการกำจัดโครเมียม พบว่าโครเมียมประจุ +3 สามารถตกตะกอนได้ดี โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกอนของสารเคมีทั้ง 3 ชนิด และของทุกกระบวนการ 98 ถึง 99 % ส่วนโครเมียมประจุ +6 มีการตกตะกอนที่ไม่ค่อยดีนัก การตกตะกอนไม่สามารถกำจัดโครเมียมได้หมด ต้องนำไปผ่านการดูดซับ ประสิทธิภาพจึงจะเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 3.5 และ 3.6

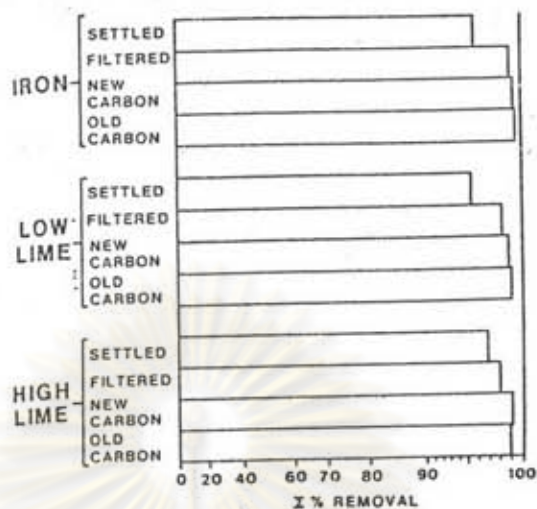
Netzer และคณะ (1974) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ปูนขาวและ ทรายร่อนที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Discarded Automobile Tiles) โลหะหนักที่ทำการศึกษาได้แก่ อลูมิเนียม แคลเซียม โครเมียม โคบอลต์ ทองแดง เหล็ก แมงกานีส เมอร์คิวรี ตะกั่ว นิเกิล ซิลเวอร์ และสังกะสี การทดลองเริ่มจากการนำน้ำเสียมาเติมสารเคมี คือ ปูนขาวเพื่อให้เกิดการตกตะกอนที่ค่าพีเอชต่างๆ จากนั้นจะนำไปผ่านกระบวนการดูดซับ โดยใช้องค์ที่ผ่านการใช้งานแล้ว

ในการกำจัดเมอร์คิวรี พบว่า พีเอชที่ใช้ในการควบคุมได้แก่ 4.6, 5.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10.0 และ 11.0 ผลของการทดลองพบว่าในการกำจัดเมอร์คิวรีโดยวิธีนี้มีประสิทธิภาพ 90 % การเติมขางจะช่วยในการลดปริมาณปูนขาวที่ต้องใช้ในการตกตะกอนได้ วิธีนี้สามารถกำจัดเมอร์คิวรีให้มีเหลืออยู่ในน้ำเสียได้น้อยกว่า 0.1 ppm

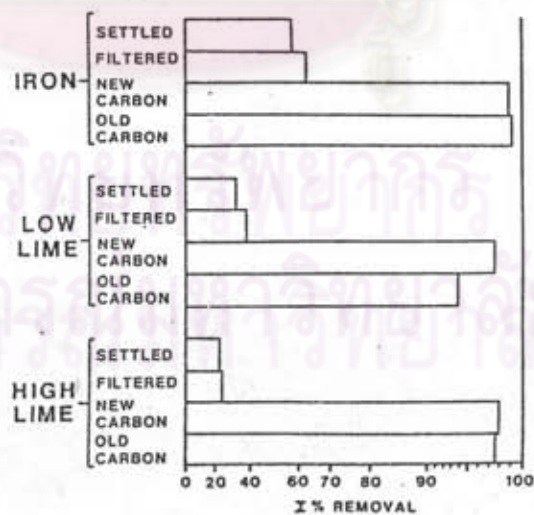


รูปที่ 3.4 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทโดยวิธีการตกตะกอน

(Maruyama และคณะ, 1974)



รูปที่ 3.5 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมประจุบวกสาม
(Haruyama และคณะ , 1974)



รูปที่ 3.6 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมประจุบวกหก
(Haruyama และคณะ , 1974)

Lanouete (1977) ได้เขียนบทความในการกำจัดโลหะหนัก โดยได้กล่าวถึงการตกตะกอนของเมอร์คิวรี โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปของตะกอนซัลไฟด์ วิธีการทดลองเริ่มจาก การนำน้ำเสียมาปรับค่าพีเอชให้อยู่ระหว่าง 5-6 ด้วยกรดซัลฟิวริก จากนั้นเติมโซเดียมซัลไฟด์ให้มีมากพอและเหลืออยู่ในน้ำเสียประมาณ 1-3 มก./ล นำน้ำที่ผ่านการตกตะกอนไปกรองโดยใช้ Precoat Filter

ผลการทดลองนี้พบว่าสามารถกำจัดเมอร์คิวรีออกจากน้ำเสียได้ดี โดยมีความเข้มข้นของเมอร์คิวรีเหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วประมาณ 10-20 ไมโครกรัม/ลิตร

Keenan และคณะ (1982) ได้ทำการทดลองโดยนำน้ำเสียจากการชะล้างพื้นที่ถมขยะ โดยในน้ำเสียจะประกอบด้วยโลหะหนัก ซึ่งได้แก่ แคลเซียม ทองแดง เหล็ก ตะกั่ว นิเกิล เมอร์คิวรี และ สังกะสี

การบำบัดน้ำเสียทำโดยนำน้ำเสียมาเติมปูนขาว เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก จากนั้นน้ำเสียจะถูกนำไปผ่านก๊าซแอมโมเนียมเพื่อบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนที่นำไประบายทิ้ง ค่าพีเอชที่ใช้ในการควบคุมอยู่ในช่วง 9-12.5 โดยใช้ขุยมะพร้าวต่างกัน

จากผลการทดลอง ในด้านการกำจัดเมอร์คิวรี พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด 52 % โดยพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 10.2-11.2 , 10-11 และ 9.8-10.8 และจากการทดลองนี้พบว่าขุยมะพร้าวมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนผลึก ความเข้มข้นของเมอร์คิวรีในน้ำเสียเริ่มต้น 5.69 มก./ล เมื่อผ่านการบำบัดด้วยการตกตะกอนโดยใช้ปูนขาว ความเข้มข้นเมอร์คิวรีในน้ำ 2.85 มก./ล จากการบำบัดน้ำเสีย 66 ตัวอย่าง

Aslam และ Walker (1982) ได้ทำการศึกษาวิธีการในการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการทดลองหาค่าซีไอดี โดยมีวิธีการดังนี้

1. นำน้ำเสียมา 2 ลิตร มาเติมโซเดียมคลอไรด์จำนวน 20 กรัม และกวนประมาณ 2-3 นาที
2. แยกตะกอนสีขาวของซิลเวอร์คลอไรด์ออกจากน้ำที่มีตะกอนโลหะหนักอยู่ เพื่อนำตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ไปทำการทดลองนำกลับมาใช้ใหม่
3. นำที่ผ่านการแยกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ นำมาเติมเฟอร์รัสซัลไฟด์ โดยต้องทำการทดลองนี้ในตู้ควีน เนื่องจากเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ทั้งไว้ประมาณ 2-3 ชั่วโมง
4. นำตะกอนในรูป เมอร์คิวรีซัลไฟด์มาแยกออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดออก

ประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียประมาณ 98 % ในขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดเมอร์คิวรีของวิธีที่ทาง EPA รับรองประมาณ 96.4 % โดยได้นำเสนอผังตารางที่ 3.3

การทดลองนี้นอกจากจะทำการศึกษาการกำจัดปรอทออกจากน้ำเสียแล้ว ได้ทำการนำซิลเวอร์กลับมาใช้ใหม่ โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. นำตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์มาประมาณ 100 กรัม เติมโลหะสังกะสี 50 กรัม
2. นำมาเติมกรดซัลฟูริก 4 นอร์มัล ปริมาณ 500 มิลลิลิตร
3. ทำให้ได้ผงซิลเวอร์ ทำการเติม สังกะสีและกรดซัลฟูริก อีกครั้งในปริมาณเดิมจากนั้นกรอง และล้างด้วยน้ำกลั่น จะได้ซิลเวอร์ที่ยังคงมี สังกะสีเป็นสารมลทิน (impurity)
4. นำซิลเวอร์มาเติมกรดไนตริก 5-8 มิลลิลิตรและน้ำกลั่น จากนั้นนำไปต้มจนเกิดสารละลายสีใส เติมกรดซัลฟูริก 800 มิลลิลิตรต่อสารละลาย 1 ลิตร จะได้ซิลเวอร์ซิลเฟตในสารละลายกรดซัลฟูริกสามารถนำไปใช้ในการทดลองได้

จากการทดลองนี้พบว่า ประสิทธิภาพในการนำซิลเวอร์กลับมาใช้ใหม่เป็น 99 % โดยยังคงมีสังกะสีเป็นสารมลทิน ดังแสดงในตารางที่ 3.4

Okazaki (1983) ได้กล่าวถึงระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ของประเทศญี่ปุ่น โดยน้ำเสียที่มีเมอร์คิวรีอยู่จะได้รับการเติมสารเคมีซึ่งได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ โซดาไฟ กรดซัลฟูริก เฟอร์รัสซัลเฟต โซเดียมไฮโปคลอไรต์ และโพลิเมอร์ น้ำเสียจะถูกนำไปยัง precoat filter โดยโลหะหนักจะอยู่ในรูปของตะกอนเฟอไรต์แยกออกมาจากน้ำ ส่วนน้ำใสจะนำไปยัง chelate resin tower เพื่อกำจัดปรอทและโลหะอื่นๆที่หลงเหลืออยู่ในน้ำ จากนั้นน้ำจะได้รับการทำให้เป็นกลางก่อนระบายทิ้ง

การบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์โดยวิธีนี้ สามารถกำจัดเมอร์คิวรีได้อย่างมีประสิทธิภาพและกำจัดได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ คือต่ำกว่า 0.005 มก./ล

แผนผังในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้แสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8

ตารางที่ 3.3 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทของวิธีการโดย Aslam & Walker และ
วิธีการที่ EPA รับรอง

(Aslam และ Walker , 1982)

Wastewater Analysis

Table 1—Comparison of the recommended method with the new method for the removal of mercury from COD wastes.

Experiment no.	Concentration of mercury (Hg) in COD waste solution	Concentration of Hg after removal by new method	% of Hg removed	Concentration of Hg after removal by method recommended by EPA	% of Hg removed	% of silver removed
1	2 940*	50*	98.3	108*	96.4	99.9
2	3 000	58	98.1	116	96.1	99.8
3	2 890	45	98.4	110	96.2	99.9
4	3 120	70	97.8	98	96.9	99.9
5	3 050	65	97.9	120	96.1	99.9
6	3 070	66	98.2	121	96.2	99.9
7	2 860	54	98.2	105	96.4	99.8
8	2 980	56	98.1	97	96.8	99.9
9	3 250	68	97.9	130	96.0	99.9
10	3 110	74	97.6	101	96.8	99.9
Mean			98.0		96.4	

* mg/l.

ตารางที่ 3.4 แสดงประสิทธิภาพในการนำซิลเวอร์กลับมาใช้ใหม่

(Aslam และ Walker , 1982)

No. of test	% of Silver	% of Zinc	% of Mercury	% of Cadmium	% of Mercury after heating
1	99.86	0.030	0.071	0.0014	Not detectable
2	99.89	0.025	0.078	0.0010	Not detectable
3	99.86	0.023	0.085	0.0012	Not detectable
4	99.90	0.030	0.065	0.0010	Not detectable
5	99.93	0.021	0.076	0.0013	Not detectable
6	99.92	0.032	0.067	0.0015	Not detectable
7	99.90	0.034	0.063	0.0011	Not detectable
Average	99.89	0.0278	0.072	0.0012	

Hendrickson และคณะ (1984) ได้เสนอวิธีในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลอง
หาค่าซีโอดี โดยได้ทำการทดลองในการกำจัดเมอร์คิวรี ดังนี้

1. นำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองหาค่าซีโอดีมาเติม โซเดียมคลอไรด์ในปริมาณ 30 มิลลิโมลต่อลิตร

2. แยกตะกอนและน้ำที่มีโลหะหนักออกจากกัน นำน้ำที่มีโลหะหนักไปบำบัดต่อ ส่วน
ตะกอนนำไปทำการทดลองนำ ซิลเวอร์กลับมาใช้ใหม่

3. เติมผงเหล็ก 5.4 มิลลิโมลต่อลิตรน้ำเสีย ลงไปในน้ำที่มีโลหะหนักอยู่ ผงเหล็ก
จะเกิดการออกซิไดส์และปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา โดยปรอทจะนำอิเล็กตรอนนั้นไปใช้ในการ
รีดิวซ์ ดังสมการ



4. ทำการผสมกันนาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองออก นำน้ำที่ผ่านการกรอง
ไปปรับพีเอชให้มีความเป็น 7 ก่อนนำไปทิ้ง

จากการทดลองนี้พบว่าปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเป็น ปรอท 0.08 ไมโคร
กรัมต่อลิตร โครเมียม 0.013 ไมโครกรัมต่อลิตร

การทดลองในการนำซิลเวอร์กลับมาใช้ใหม่ ได้ทดลองหาปริมาณโซเดียมคลอไรด์
ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ โดยได้แนะนำปริมาณที่เหมาะสมใช้ในการทดลองคือ 30 มิลลิโมลต่อ
ลิตร โดยนำไปให้ความร้อนที่ 75-100 C และได้เสนอแนะขั้นตอนในการทำให้เป็นซิลเวอร์ซิลเฟด
ดังนี้

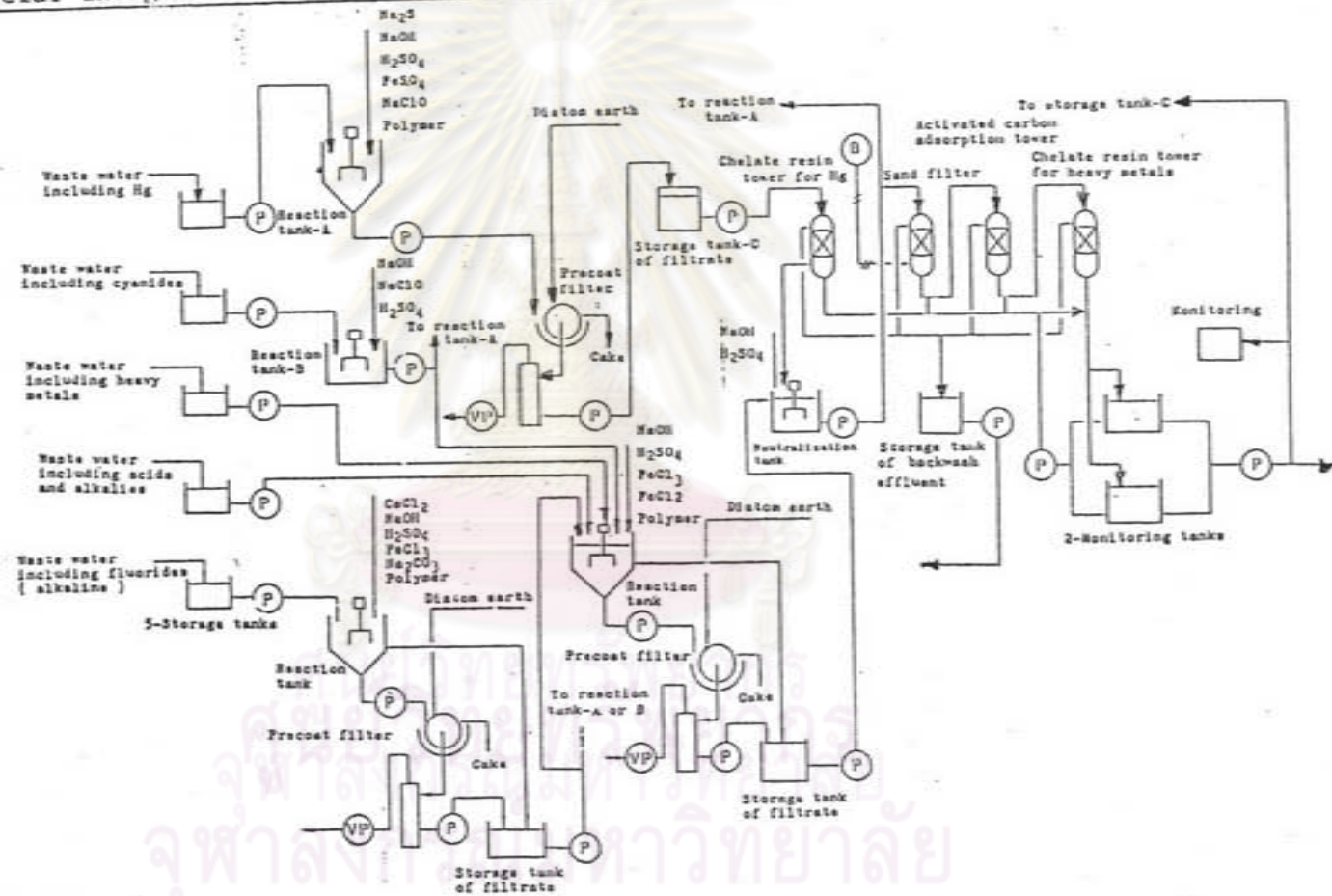
5. นำไปละลายในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นเติมโลหะทองแดง โดยรักษาที่
อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-2 วัน

6. นำไปกรองเพื่อแยกทองแดงออกและรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-2 วัน

7. เติม 7.6 กรัมของซิลเวอร์ ลงในกรดซัลฟิวริก 2.5 ลิตร และสามารถนำไปใช้
ในการทดลองต่อไปได้

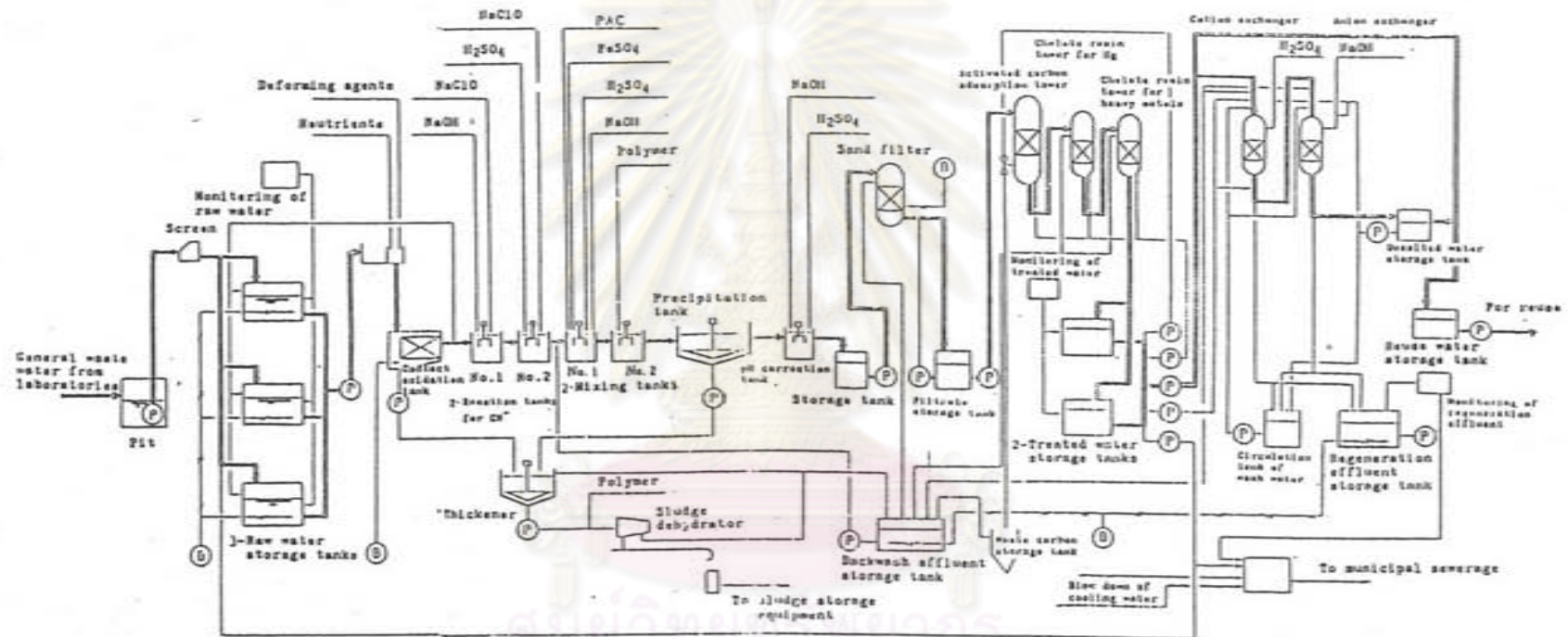
วิธีการนี้สามารถนำไปใช้ในการนำซิลเวอร์กลับมาใช้ใหม่ได้โดยอยู่ในรูปของซิลเวอร์
ซิลเฟด โดยไม่มีสารใดเป็นสารมลพิษซึ่งแตกต่างไปจากวิธีที่ Aslam และ Walker ได้แนะนำใช้

Flow Diagram of the Treatment Facility for the
Special Inorganic Wastewaters from the Laboratories



รูปที่ 3.7- แสดงแผนผังการบำบัดน้ำเสียพิเศษที่เป็นอนินทรีย์สารจากห้องปฏิบัติการ
(Okazaki , 1983)

Flow Diagram of the Treatment Facility for the General Waste Water from the Laboratories and the Desalination Equipment



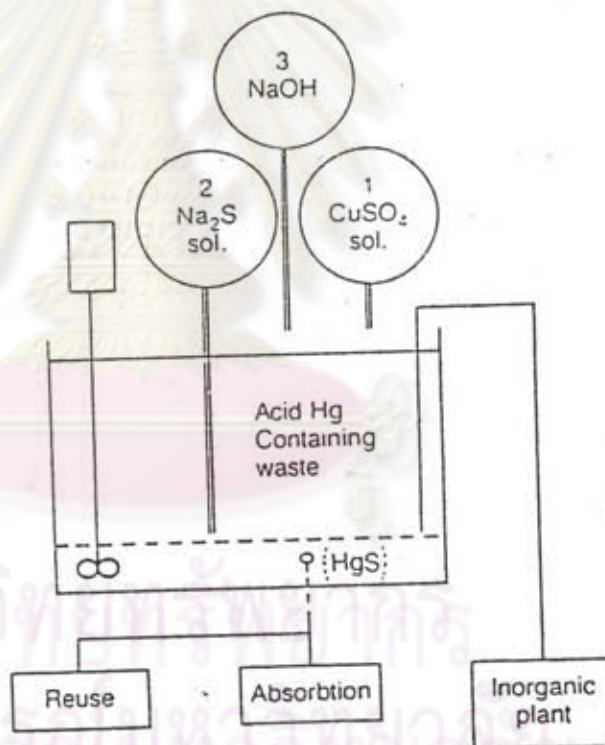
รูปที่ 3.8- แสดงแผนผังการบำบัดน้ำเสียทั่วไปจากโรงปฏิบัติการและอุปกรณ์ในการบำบัด (Okazaki , 1983)

Sund (1986) ได้กล่าวถึงระบบบำบัดน้ำเสียรวมของประเทศเดนมาร์ก ซึ่งใช้บำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่างๆรวมทั้ง โลหะหนักจากโรงงานอุตสาหกรรมและน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการ

ในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีโลหะหนักคือ เมอร์คิวีรียมอยู่ด้วยได้ทำการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ ในปริมาณที่มากกว่าการคำนวณจากปฏิบัติการเคมี 30 % จากนั้นเติมคอปเปอร์ซัลเฟต โดยปริมาณที่เติมมากกว่าปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ประมาณ 15 % เพื่อป้องกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากนั้นเติมโซดาไฟ เพื่อปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่โลหะหนักจะตกตะกอนลงมาได้ ตะกอนของโลหะหนักจะอยู่ในรูปของซัลไฟด์

แผนผังการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีนี้แสดงในรูปที่ 3.9

Precipitation of HgS



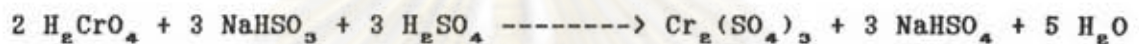
รูปที่ 3.9 แสดงแผนผังในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการของประเทศเดนมาร์ก

(Sund , 1986)

Yuan (1990) ได้ทำการทดลองในการนำน้ำเสียที่ผ่านการทดลองวิเคราะห์ค่าซีโอไซด์มาบำบัด เพื่อให้โลหะอยู่ในรูปตะกอน จากนั้นนำตะกอนของโลหะที่ได้ไปบำบัดโดยใช้หลักการของ cementation ซึ่งทำจาก portland cement และ lime-rice husk ash

วิธีในการบำบัดน้ำเสียจากการทดลองหาค่าซีโอไซด์ ทำได้โดย

1. นำน้ำเสียมาวัดปริมาณโครเมียมและปรอท
2. วัดพีเอช และปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าน้อยกว่า 2 เพื่อให้เหมาะสมกับการรีดักชันโครเมียมจากประจุ +6 เป็นโครเมียมประจุ +3 เพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ดีในรูปของไฮดรอกไซด์
3. เติม NaHSO_3 อย่างช้าๆ ใช้เวลาผสมสารเคมีประมาณ 10 นาที เพื่อให้เกิดการ reduction ตามสมการ



4. เติม NaOH โดยใช้ commercial grade เพื่อปรับพีเอชจนมีค่าประมาณ 8.5 ซึ่งจะเกิดการตกตะกอน โลหะหนักอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ ตามสมการ



5. ตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการตกตะกอน จากนั้นแยกตะกอนโลหะหนักออกจากน้ำเสีย
6. วัดความเข้มข้นของโครเมียมและปรอท ในน้ำใสที่ผ่านการบำบัดและในตะกอนของโลหะหนักที่ตกของโลหะไปทำ cementation

ผลการทดลองพบว่า ตะกอนโลหะหนักจะอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์และปริมาณเมอร์คิวรีที่อยู่ในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีปริมาณน้อยและเป็นไปตามมาตรฐาน คือน้อยกว่า 0.005 มก./ล

Tamura และคณะ (1992) ได้ศึกษากระบวนการ ferrite process โดยเป็นการใช้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ในการบำบัดน้ำเสีย โดยตะกอนจะอยู่ในรูปของ ferrite น้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองมาจากแหล่งโรงงานอุตสาหกรรม รวมทั้งห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์

การทดลองในการบำบัดน้ำเสียมีดังนี้

1. เติม $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก ซึ่งอยู่ในรูปของเฟอร์ไรต์
2. ปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 9-11 โดยการเติม NaOH ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดี
3. ปรับอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส โดยการให้น้ำ
4. ให้อากาศเพื่อทำให้เกิดการ oxidize ของเหล็กเฟอร์ไรต์
5. แยกตะกอนของโลหะออกจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วโดยใช้แม่เหล็ก

ผลการทดลอง

วิธีการนี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ผลดี โดยมีปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย ประมาณ 1 มก./ล ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นประมาณ 0.18 ตันต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.5 , 3.6 และ 3.7

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.5 ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองบำบัดด้วยเหล็กเฟอร์ไรต์
(Tamura และคณะ , 1992)

Table 1 Chemical composition of the waste water. (mg dm⁻³)

Sample No	Cd	Mn	Fe	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Ni	T-Hg
16	ND	ND	19	3250	4	3	1	ND	2	ND
39	190	175	2000	335	95	520	425	830	515	ND
49	63	97	1200	240	40	281	193	90	230	ND

ND = not determined.

ตารางที่ 3.6 แสดงปริมาณน้ำเสียและตะกอนที่ได้ของเหล็กเฟอร์ไรต์
(Tamura และคณะ , 1992)

Table 2 The volume of the waste waters and the ferrite sludges.

	waste waters (m ³)	conc. of heavy metal ions	ferrite-sludges (10 ³ kg)
1976	10.27	1742	—
1977	5.95	6838	0.86
1978	6.66	3003	0.86
1979	5.00	4120	0.92
1980	5.54	6083	1.10
1981	4.25	5866	0.75
1982	7.84	4518	1.50
1983	4.92	4281	0.86

ตารางที่ 3.7 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว
(Tamura และคณะ , 1992)

Table 3 Heavy metal ion concentration in the treated waste waters. (mg dm⁻³)

Sample No	Cd	Mn	Fe	Cu	Pb	Zn	Cr	T-Hg	As
38	ND	0.14	ND	1.3	ND	ND	ND	ND	ND
42	ND	ND	ND	0.07	ND	0.23	ND	ND	ND
51	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND = not determined.