# บทที่ 2
# วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 1. คุณสมบัติของโลหะเงิน

โลหะเงิน เป็นโลหะสีขาว มีความมันวาว สามารถตีเป็นแผ่น หรือดึงเป็นเส้นได้ เป็นธาตุแทรนซิชันแถวที่ IB หรือหมู่ที่ 11 มีเลขอะตอม เท่ากับ 47 น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 107.868 จุดหลอมเหลว 961.93 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 10.5 g/cm$^3$ มีโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิคส์เป็น [Kr] 4d $^{10}$ 5s$^1$ โลหะเงินในธรรมชาติ อยู่ในรูปของสารประกอบซัลไฟด์และสารประกอบคลอไรด์ คือ แร่ Silver (Silver sulfide, $Ag_2s$) และ Horn Silver (Silver choride, AgCl) นอกจากนี้ ยังสามารถพบโลหะเงินในรูปอิสระได้จากการถลุงโลหะ และจากปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis reaction)

### 1.1 สมบัติทั่วไปของโลหะเงิน

1.1.1 โลหะเงินเป็นตัวนำความร้อน และไฟฟ้าได้ดีที่สุด

1.1.2 โลหะเงินสามารถทนต่อการกัดกร่อนในอากาศและความชื้น แต่เมื่อรวมตัวกับแก๊ส $H_2S$ ในอากาศ จะทำให้เกิดสีดำของ ซิลเวอร์ซัลไฟด์เคลือบที่ผิวของโลหะเงิน

1.1.3 ไม่ทำปฏิกิริยากับ Non – oxidizing Acid เช่น กรดเกลือ กรดกำมะถันที่เจือจาง แต่ทำปฏิกิริยากับกรกซัลฟูริกเข้มข้น และกรดไนตริกเจือจาง พร้อมกับเกิดเป็น $Ag^+$ ดังสมการ (ชัยวัฒน์ หิตาพิสุทธ์ และประยงค์ ยะปะตัง, 2539 )

$$2Ag + 2H_2SO_4 \longrightarrow AgSO_4 + SO_2 + H_2O \quad (2.1)$$

$$3Ag + 4HNO_3 \longrightarrow 3AgSO_4 + NO + 2H_2O \quad (2.2)$$

### 1.2 สารประกอบของโลหะเงิน

ออกซิเดชันสเตตที่สำคัญของโลหะเงิน คือ $^+1$ สารประกอบโลหะเงินที่มีออกซิเดชัน สเตต $^+2$ และ $^+3$ ก็มีแต่น้อย เช่น $AgF_2$, $K[AgF_4]$ สารประกอบ $Ag^{3+}$ และ $Ag^{2+}$ จะเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี เสถียรภาพของ $Ag^{2+}$ ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เมื่อเปรียบเทียบกับ $Ag^+$ ซิลเวอร์ซัลเฟต ($Ag_2SO_4$) มีน้ำหนักสูตร 311.83 มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ซิลเวอรซัลเฟต ($Ag_2SO_4$) มีความสามาถละลายน้ำได้สูง (Wikipedia, 2010) และซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) มีน้ำหนักสูตร 143.34 มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) สามารถละลายได้ดีในสารละลายแอมโมเนีย แต่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ ซึ่งมีค่าการละลายน้ำต่ำ (Meites Louis,1963) ตารางที่ 2.1 อธิบายคุณลักษณะทางกายภาพของสารประกอบโลหะเงิน

**ตารางที่ 2.1** ลักษณะทางกายภาพของสารประกอบโลหะหนัก

| ชื่อ | สูตร | น้ำหนักสูตร | ลักษณะ | ความหนาแน่น (ก/ซม$^3$) | จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส) | จุดเดือด (องศาเซลเซียส) | ตัวทำละลาย* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Silver nitrate | $AgNO_3$ | 169.89 | ไม่มีสี Rhombic | 4.352 | 210 | สลายตัวที่ 440 | น้ำ |
| Silver sulfate | $AgSO_4$ | 311.83 | ขาว Rhombic | 5.45 | 660 | 1085 | น้ำ |
| Silver chloride | AgCl | 143.34 | ขาว Cubic | 5.56 | 545 | 1564 | $NH_4OH$ $1.9x10^{-4}$ |
| Silver iodide | AgI | 234.80 | เหลือง Hexagonal | 5.683 | 556 | 1505 | KCN |
| Silver bromide | AgBr | 187.80 | เหลืองสด | 6.473 | 568 | 1560 | KCN $1.4 \times 10^{-5}$ |

ที่มา: ชัยวัฒน์ หิตาพิสุทธ์ และ ประยงค์ ยะปะตัง (2539 )

* หมายถึง ตัวทำละลายมีปริมาณเป็น 100 โดยน้ำหนัก เช่น KCN x $10^{-5}$ (จากข้อมูล ของ AgBr) คือ AgBr 1.4 x $10^{-5}$ กรัม จะละลายได้ในสารละลาย KSCN 100 กรัม

### 1.3 ประโยชน์ของโลหะเงิน

เมื่อเป็นโลหะผสมกับทองแดงใช้ในการทำเหรียญกษาปณ์ประโยชน์ส่วนใหญ่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ภาชนะเครื่องใช้ เหรียญกษาปณ์ เครื่องประดับ งานด้านทางแพทย์และทันตกรรม อุตสาหกรรมรถยนต์อุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มภาพยนตร์และงานถ่ายภาพอัดภาพ อุตสาหกรรมไฟฟ้าและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และอุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็น โดยมีรายละเอียดดังนี้ (เดชนา ชุตินรา, 2527)

1.3.1 อุตสาหกรรมการผลิตฟิล์มภาพยนตร์และงานถ่านภาพอัดภาพ

อุตสาหกรรมประเภทนี้ใช้โลหะเงินประมาณร้อยละ 40 ของการผลผลิตเงินทั่วโลก เงินที่ใช้นี้ใช้ในรูปของเกลือเงินเฮไลด์ที่มีความไวต่อแสง ใช้เคลือบบนฟิล์มถ่ายภาพ กระดาษอัดภาพและกระดาษถ่ายเอกสาร ซึ่งให้ภาพชัดเจนกว่าการเคลือบด้วยสารอื่นๆ

1.3.2 อุตสาหกรรมไฟฟ้าและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

โลหะเงินที่ประกอบด้วยแคดเมียมออกไซด์ ใช้ทำเป็นสะพานไฟในส่วนที่มีกระแสไฟฟ้าสูงและปานกลางผ่านชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ในเครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ ใช้เป็นตัวเชื่อมโดยทำเป็นโลหะผสมกับทองแดง สังกะสี และโลหะอื่นๆ เพื่อใช้ในการต่อเชื่อมท่อ เชื่อมข้อต่อสายไฟฟ้าในเครื่องวิทยุ โทรทัศน์ เป็นต้น

1.3.3 ผลิตภัณฑ์ภาชนะเครื่องใช้

การใช้เงินทำภาชนะเครื่องใช้ต่างๆ เช่น ขันน้ำพานรอง หีบบุหรี่ ชุดน้ำชา กาน้ำ กรอบรูป เป็นต้น ถึงแม้ว่าปัจจุบันโลหะเงินมีราคาสูงกว่าเดิม มีผลทำให้การผลิตภาชนะชิ้นใหญ่ๆ ลดลง แต่ก็ยังเป็นที่นิยมของตลาดอยู่มาก

1.3.4 เหรียญกษาปณ์

ในสมัยก่อนเหรียญกษาปณ์ผลิตจากโลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์กันมาก มีเนื้อเงินบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 92.4 ผสมกับทองแดงไม่เกินร้อยละ 7.5

1.3.5 เครื่องประดับ

โลหะเงินที่ใช้ทำเครื่องประดับ ประเภทสร้อย เข็มกลัด แหน ตุ้มหู เป็นต้น

1.3.6 งานด้านการแพทย์และทันตกรรม

โลหะเงินที่ใช้ในทางการแพทย์ส่วนใหญ่อยู่ในด้านศัลยกรรม เนื่องจากเงินมีคุณสมบัติเป็นตัวกันไม่ให้แผลเน่าเปื่อย จึงใช้คลุมบาดแผลหลังจากการผ่าตัดเพื่อตบแต่งผิวหนัง ใช้ดามกระดูกและใช้ทำเครื่องมือในการผ่าตัดบางอย่าง ส่วนด้านทันตกรรม เงินอยู่ในส่วนผสมของอะมัลกัมสำหรับอุดฟัน เพื่อใช้ในการรักษาทางทันตกรรมต่อไป

1.3.7 อุตสาหกรรมรถยนต์

ด้านอุตสาหกรรมรถยนต์ใช้วัสดุเคลือบด้วยเงินบริสุทธิ์มากที่สุด โดยเฉพาะสำหรับทำดวงไฟหน้ารถ เนื่องจากคุณสมบัติของโลหะเงินที่สามารถสะท้อนแสงได้ดีที่สุด

1.3.8 อุตสาหกรรมเครื่องทำความเย็นและอื่นๆ

ในอุตสาหกรรมการผลิตตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศใช้โลหะเงินในรูปของโลหะประสาน ซึ่งสามารถทำให้โลหะหลักจับกำโลหะอื่นๆ หรือโลหะชนิดเดียวกันได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะนั้น ๆ โลหะประสานนี้ไม่ทำให้เหล็กกล้าละลายหรือทำให้เหล็กกล้าเสียหายในสภาวะการใช้งานปกติ

สำหรับประเทศไทย แร่เงินที่พบมักเกิดร่วมกับโลหะพื้นฐานอื่นๆ โดยเฉพาะทอแดง ตะกั่ว สังกะสี มีการพบโลหะเงินประปรายในแร่ดังกล่าว โลหะเงินส่วนใหญ่ใช้ในการทำเครื่องประดับ เพชรพลอย ภาชนะเครื่องเงินและเหรียญต่างๆ

## 2. น้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดี

การวิเคราะห์ค่าซีโอดีเป็นการวิเคราะห์หาความสกปรกของน้ำเสียต่างๆ โดยเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของน้ำเสีย เพื่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ นอกจากนี้พวกกรดอะมิโนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโนเนียไนโตรเจน เงื่อนไขสำคัญในการวิเคราะห์ซีโอดีคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องเกิดขึ้นโดยอาศัยออกซิไดซิงเอเจนต์อย่างแรง ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเข้มข้นและมีอุณหภูมิสูง หลักการของซีโอดี จะคล้ายกับบีโอดีคือ สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เพียงแต่บีโอดีต้องใช้แบคทีเรียในการย่อยสลาย ส่วนซีโอดีใช้ออกซิไดซิงเอแจนต์ แต่ซีโอดีไม่สามารถบอกถึงความยากง่ายในการย่อยสลายทางชีวภาพได้ เนื่องจากสารอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์ได้หมดไม่ว่าจะสามารถออกซิไดซ์ได้ทางชีวภาพหรือไม่

วิธีวิเคราะห์ซีโอดีโดยใช้ไดโครเมตเป็นออกซิไดซิงเอแจนต์ มี 2 วิธี คือ

1) วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open Refluk Method)

2) วิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Close Refluk Method)

วิธีรีฟลักซ์แบบเปิดเหมาะสำหรับหาค่าซีโอดีในช่วงกว้าง ๆ ต้องการใช้ตัวอย่างมาก ส่วนวิธีรีฟลักซ์แบบปิด จะใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยกว่า และจะประหยัดสารเคมี แต่ก็เหมาะกับตัวอย่างน้ำที่มีสารแขวนลอยที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน

น้ำเสียการวิเคราะห์ค่าซีโอดี จะมีโลหะหนักเป็นส่วนผสมอยู่ ได้แก่ ปรอท 1,257.80 มก/ล. โครเมียม 215.90 มก/ล. เงิน 324.00 มก/ล. และเหล็ก 534.50 มก/ล. (อารยา รานอก, 2549)

โลหะหนักที่พบในน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดีได้แก่ ปรอท โครเมียม จะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ ดังนี้

ปรอท เป็น โลหะหนักที่ของเหลวระเหยเป็นไอได้ง่ายในภาวะปกติ ไอปรอทเป็นพิษต่อมนุษย์มาก ไอปรอทที่เข้าสู่ร่างกายทางหายใจเข้าไป จะถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบหมุนเวียนโลหิตทันทีเกือบทั้งหมด และกระจายไปยังสมองและส่วนอื่น ๆ ของร่างกายได้รวดเร็วมาก ปรอทที่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ มีความเป็นพิษสูงที่สุด เพราะร่างกายสามารถดูดซึมในทางเดินอาหารได้ถึงร้อยละ 95 - 98 และขับออกมาและขับออกมาในรูปของเสียได้น้อยมาก ปรอทจะจับยึดกับเม็ดโลหิตแดงและกระจายไปทั่วทุกส่วนของร่างกาย และประมาณร้อยละ 15 ของปริมาณที่ได้รับเข้าไป จะสะสมที่สมอง แล้วสามารถทำอันตรายต่อเนื้อเยื่อสมอง ในส่วนที่ควบคุมการมองเห็นและความรู้สึกนึกคิด (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2543) และเมื่อปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม จะก่อให้เกิดการสะสมในระบบนิเวศ เกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ ทำให้แหล่งน้ำเสื่อมโทรม

โครเมียม เมื่อสูดหายใจเอาฝุ่นละอองหรือควันของเกรดโครมิค ก็จะทำให้ระบบทางเดินหายใจส่วนต้นบริเวณจมูก โดยแผ่นกั้นระหว่างจมูกซึ่งเป็นกระดูกอ่อนทำลายและทำให้เป็นมะเร็งที่ปอด นอกจากนั้นการสัมผัส กับฝุ่นละออง หรือสารละลายของกรดโครมิคทำให้ผิวหนังอักเสบ (คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, 2551)

เงินเป็นโลหะที่มีค่าและเป็นที่ต้องการสูง ซึ่งน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดี มีโลหะเงินปนเปื้อนอยู่ ดังนั้นศึกษาการนำกลับโลหะเงินในน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดี เพื่อเป็นการนำทรัพยากรกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด น้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดีมีปรอท และโครเมียมปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ต้องมีการบำบัดน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดีเพื่อลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดี การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียที่นิยมมากคือการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) โดยเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการตกตะกอนปรอทและโครเมียม ส่วนการตกตะกอนเงินในน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดีมีการเติมโซเดียมคลอไรด์เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนเงินดียิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการตกตะกอนแบบจำเพาะ (Selective Precipitation)

### 3. การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับสารมลพิษที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย (soluble form) เปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble form) เกิดเป็นตะกอนซึ่งจมตัวได้ ตัวอย่างสารเคมีที่เติมเพื่อช่วยในการตกตะกอน ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ปูนขาว วิธีการนี้แตกต่างจาก

วิธีรวมตะกอน (Coagulation) ซึ่งเป็นการเติมสารเคมีเพื่อช่วยให้สารมลพิษที่เป็นตะกอนขนาดเล็กรวมตัวกันเป็นตะกอนใหญ่ ในการควบคุมระบบบำบัดแบบนี้จะต้องปรับสารเคมีที่ใช้ในการทำให้ตกตะกอนที่เหมาะสม (Optimum Dose) เพราะถ้าใช้มากเกินไปจะทำให้ขุ่น และทำให้พีเอชเป็นด่างมาก ต้องใช้กรดในการปรับพีเอชลงมาให้เป็นกลางก่อนที่จะปล่อยทิ้ง (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2525)

วิธีการตกตะกอนทางเคมีสามารถตกตะกอนสารละลายที่ปนเปื้อนมากับของเหลวได้ทุกชนิด ซึ่งการตกตะกอนทางเคมีเป็นระบบการควบคุมค่าพีเอช (pH contorl) และจะสามารถทำให้เกิดตะกอนได้มากเพียงใดนั้นขึ้นกับค่าพีเอช และสารเคมีที่ใช้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

โลหะหนักจะเป็นปัญหาเฉพาะกับน้ำเสียที่มีค่าพีเอชต่ำ เนื่องจากโลหะหนักสามารถละลายน้ำได้ดีที่ค่าพีเอชต่ำ การเพิ่มค่าพีเอชจะทำให้ความสามรถในการละลายน้ำของโลหะหนักลดลงและสามารถตกผลึกได้

การตกตะกอนทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้เนื่องจากไม่ซับซ้อน ควบคุมง่าย และบำรุงรักษาต่ำ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)ตกตะกอนโลหะหนักอาจทำให้อยู่ในรูปซัลไฟด์โดยเติมสารประกอบซัลไฟด์ที่ละลายน้ำได้ เช่น โซเดียมซัลไฟด์ ($Na_2S$) ในการเกิดปฏิกิริยาเป็นโลหะซัลไฟด์ซึ่งเป็นของแข็งไม่ละลายน้ำ มีประสิทธิภาพสูงกว่าการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ แต่ในการเป็นให้อยู่ในรูปโลหะซัลไฟด์มักเกิดกลิ่นเหม็นของไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงไม่นิยมใช้ ส่วนใหญ่นิยมทำให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ โดยใช้ปูนขาวเป็นตัวปรับพีเอชให้สูงขึ้น เพื่อเปลี่ยนสมดุลการละลายของโลหะหนัก โดยโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้ดีที่สุดในช่วงพีเอชที่แตกต่างกัน ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนโลหะปรอท โครเมียม เหล็ก และเงิน มีดังนี้

**ปรอท (Mercury; Hg)** ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.5-9.0 และตกตะกอนในรูปของซัลไฟด์ พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8.5 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) ดังตารางที่ 2.2

**โครเมียม (Cromium; Cr)** Patterson (1978) กล่าวว่า โครเมียมตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ได้ดีที่สุดในช่วงพีเอช 8.5-9.5 และ การละลายของโครเมียมในรูปของไฮดรอกไซด์พบว่า โครเมียมมีค่าการละลายต่ำสุดที่พีเอช 8.3 ส่วนการใช้ $Ca(OH)_2$ กำจัดโครเมียมให้อยู่ในรูป $Cr(OH)_3$ ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8.0-9.5 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) และการตกตะกอนโครเมียมค่าพีเอชที่เหมาะสม คือ 7-8 ดังภาพที่ 2.1

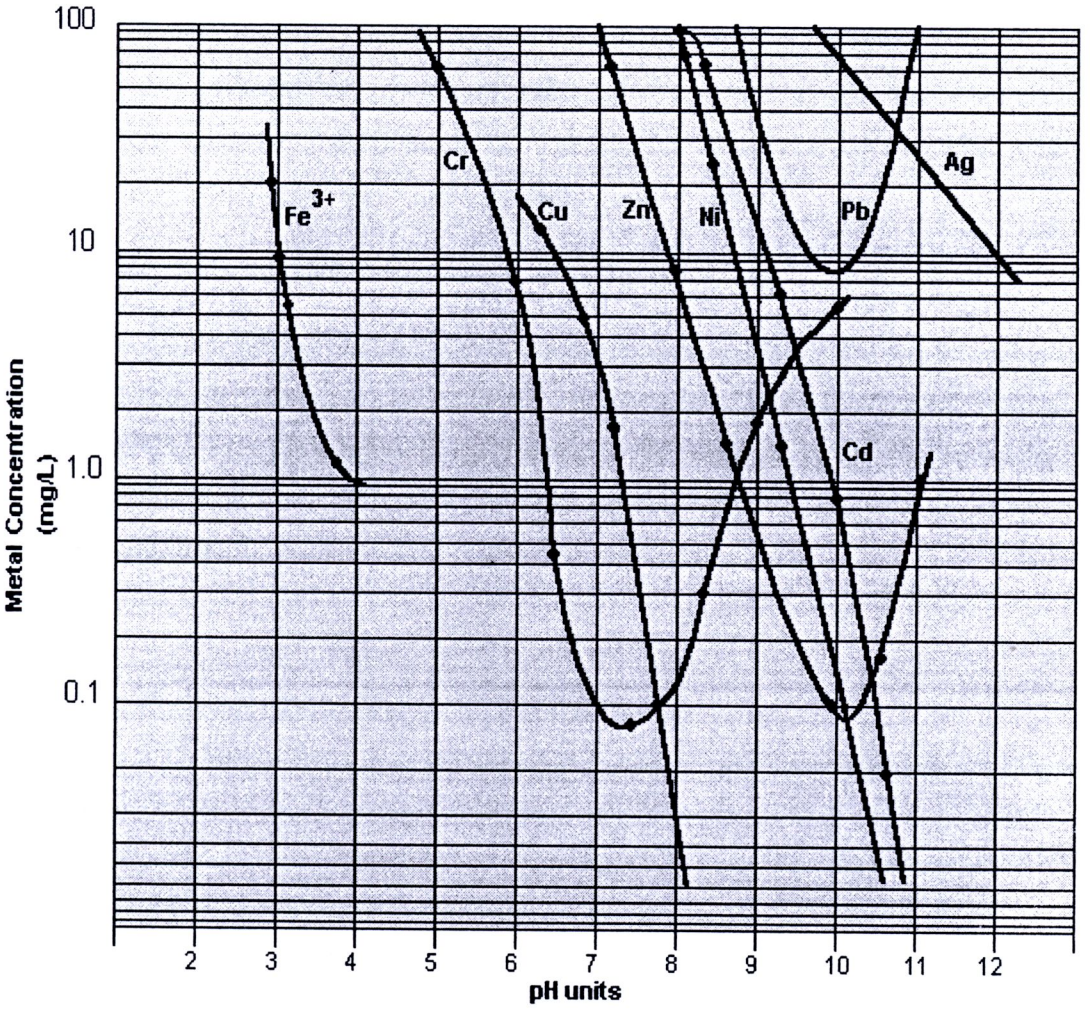
**เหล็ก (Ferric; Fe)** Patterson (1985) กล่าวว่า เหล็ก+3 ($Fe^{+3}$) จะตกตะกอนในรูป $Fe(OH)_3$ โดยมีค่าการละลายน้อยที่สุดที่พีเอช 5.5 ดังภาพที่ 2.1 และจะกลับมาละลาย (Resolubilization) อีกที่พีเอช 12.0 และการตกตะกอน เหล็กในรูป $Fe(OH)_2$ จะเกิดได้ดีที่พีเอชมากกว่า 8 (ลัดดาวัลย์ วิระมิตรชัย, 2537) การละลายของเหล็กในรูปของไฮดรอกไซด์พบว่ามีค่าการละลายต่ำสุดที่พีเอช 8.0 ส่วนการใช้ $Ca(OH)_2$ เป็นสารทำให้ตกตะกอนเหล็กจะอยู่ในรูป $Fe(OH)_3$ ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7.0 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

**เงิน (Silver; Ag)** การใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารทำให้ตกตะกอน เงินจะอยู่ในรูปของ AgCl ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 8.0 (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) ดังตารางที่ 2.2 และการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 11.0 - 12.0 (U.S.EPA, 1980)

**ตารางที่ 2.2** ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักด้วยสารเคมีต่าง ๆ

| มลสารที่อยู่ในน้ำเสีย | สารเคมี | ค่าพีเอชที่เหมาะสม | สารเคมีที่ตกตะกอนได้ |
|---|---|---|---|
| Aluminium | Lime | 5 | $Al(OH)_3$ |
| Arsenic | Ferric chloride | 8 | $AsCl_2$ |
| Barium | Sodium sulfate | 10 | $BaSO_4$ |
| Cadmium | Lime | 9.5-12 | $Cd(OH)_3$ |
| Chromium | Lime | 8.0-9.5 | $Cr(OH)_3$ |
| Cupric | Lime | 9-10 | $Cu(OH)_2$ |
| Ferric | Lime | 7 | $Fe(OH)_3$ |
| Fluoride | Lime | 12 | $CaF_2$ |
| Manganese | Lime | 10 | $Mn(OH)_2$ |
| Mercury | Sodium sulfide | 8.5 | HgS |
| Nickel | Lime | 10 | $Ni(OH)_2$ |
| Phosphorus | Ferric chloride | 7 | $FePO_4$ |
| Plumbic | Lime | 6-10 | $Pb(OH)_2$ |
| Selenium | Sodium sulfide | 6.5 | $SeS_2$ |
| Silver | Sodium chloride | 8 | AgCl |
| Stannic | Lime | 4-4.5 | $Sn(OH)_2$ |
| Zinc | Lime | 5-6 | $Zn(OH)_2$ |

ที่มา: เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2539)




**ภาพที่ 2.1** กราฟแสดงความสามารถในการละลายน้ำของมลสารต่าง ๆ สำหรับ pH ต่าง ๆ (Hoffland Environmental Inc., 2006)

### 3.1 การตกตะกอนแบบจำเพาะ (Selective precipitation)

การเลือกตกตะกอน (Selective precipitation) ในกรณีที่สารละลายมีไอออนหลายชนิดผสมกันอยู่และต้องการแยกไอออนเหล่านั้นออกจากกันอาจพิจารณาการแยกไอออนโดยการเลือกตกตะกอนบางที เรียกว่า การตกตะกอนทีละส่วน (Fractional precipitation) เป็นเทคนิคการแยกไอออนที่ผสมกันอยู่ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ออกจากสารละลาย โดยการเติมสารเริ่มต้นบางอย่างเพื่อตกตะกอนไอออนชนิดแรกและตัวอื่นๆ ต่อไป (ชูศักดิ์ พูนสวัสดิ์, 2553)

การตกตะกอนเพื่อแยกเอาโลหะเงินออกมาจากสารละลาย โดยทำให้ตกตะกอนในรูปของซิลเวอร์-คลอไรด์ อาจจะใช้ตัวช่วยตกตะกอนเป็นโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) วิธีนี้เป็นการตกตะกอนแบบจำเพาะ (Selective precipitation) เพราะคลอไรด์ไอออนจะเลือกทำปฏิกิริยากับไอออนของเงินที่มีอยู่ในสารละลายเกิดเป็นซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) (Aslam and Walker, 1982) ดังสมการ

$$Ag_2SO_4 + 2NaCl \longrightarrow 2AgCl + Na_2SO_4 \quad (2.3)$$

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของ AgCl แรงดึงดูดระหว่าง Ag กับ Cl แข็งแรงกว่าแรงดึงดูดระหว่าง Na และ Cl กับน้ำ ซิลเวอร์คลอไรด์จึงไม่ละลายน้ำสารละลายอิ่มตัวของ ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ในน้ำที่อยู่ในสมดุลกับของแข็ง ซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) (รานี สุวรรณพฤกษ์, 2540) ดังสมการ

$$AgCl(s) \longrightarrow Ag^+(aq) + Cl^- \quad (2.4)$$

เนื่องจากซิลเวอร์คลอไรด์เป็นอิเล็กโทรไลต์แก่ (Strong electrolyte) ในส่วนซิลเวอร์คลอไรด์ที่ละลายน้ำจึงแตกตัวได้หมด เมื่อนำซิลเวอร์คลอไรด์ไปละลายน้ำ จะมีซิลเวอร์คลอไรด์เพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ละลายได้ โดยส่วนที่ละลายไปจะแตกตัวเป็นไอออนคือ $Ag^+$ และ $Cl^-$ ซึ่งในที่สุดการละลายนี้ก็จะอยู่ในภาวะสมดุลระหว่างไอออนที่ละลายน้ำกับซิลเวอร์คลอไรด์ ส่วนที่ไม่ละลายหรือตะกอนของ AgCl นั่นเอง (รานี สุวรรณพฤกษ์, 2540) ดังสมการ

$$AgCl(s) \rightleftharpoons Ag^+(aq) + Cl^-(aq) \quad (2.5)$$

ค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยานี้คือ $K_{sp} = [Ag^+][Cl^-]$

ค่า $K_{sp}$ นี้เรียกว่า ค่าคงที่ผลคูณของการละลาย (Solubility product constant) หรือเรียกสั้นๆ ว่าผลคูณการละลาย ซึ่งค่าคงที่นี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเช่นเดียวกับค่าคงที่สมดุลอื่นๆ และเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่าสารประกอบนั้นละลายน้ำได้มากน้อยเพียงใดที่อุณหภูมิคงที่และใช้สำหรับเปรียบเทียบว่าสารใดละลายน้ำได้ดีกว่ากัน โดยปกติค่า $K_{sp}$ มากกว่าจะละลายน้ำได้ดีกว่า (รานี สุวรรณพฤกษ์, 2540)

การตกตะกอนเงินในรูปของซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการตกตะกอนเงินในน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดี เนื่องจากตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) มีค่าการละลายน้ำต่ำ (Meites Louis, 1963) ทำให้เกิดการละลายกลับในน้ำเสียได้ยาก ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ (AgCl) ที่ได้จากการตกตะกอนสามารถนำกลับเงินมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง

### 3.2 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

การตกตะกอนโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ไอออนของโลหะหนักจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ (Metals-hydroxide) ที่ไม่ละลายน้ำ สารเคมีที่ใช้ คือ ปูนขาว และโซเดียมไฮดรอกไซด์ การใช้ปูนขาวจะทำให้เกิดฟล็อคของหินปูนทำให้ได้ตะกอนแข็งและฟล็อคขนาดใหญ่กว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ การกำจัดโลหะหนักด้วยปูนขาวได้ผลดีกว่า อาจเนื่องมาจากปูนขาวทำให้เกิดฟล็อคของหินปูน ($CaCO_3$) หรือสารประกอบแคลเซียมอื่นๆ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ที่ช่วยให้เกิด Coprecipitation ในการกำจัดโลหะหนัก ทำให้การตกตะกอนดียิ่งขึ้น แต่จะมีปริมาณสลัดจ์ที่ต้องกำจัดเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้ได้ง่ายกว่าและไม่มีปัญหาเรื่องการฟุ้งกระจายของสารเคมีอาจเป็นอันตรายต่อผู้ใช้

ปฏิกิริยาในการตกตะกอนโลหะหนักด้วยปูนขาว ดังสมการ

$$M^{2+} + Ca(OH)_2 \longrightarrow M(OH)_2 + Ca^{2+} \quad (2.6)$$

ปฏิกิริยาในการตกตะกอนโลหะหนักด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ

$$M^{2+} + 2Na(OH) \longrightarrow M(OH)_2 + 2Na^{2+} \quad (2.7)$$

โลหะไฮดรอกไซด์เป็นพวกแอมโฟริค (Amphotrric) คือ สามารถเพิ่มการละลายเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช และจุดของการละลายต่ำสุดของโลหะแต่ละชนิดแตกต่างกันที่ค่า พีเอชหนึ่ง ทำให้เกิดปัญหาสำหรับน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดปนกันอยู่ ดังนั้นการที่จะควบคุมการกำจัดโลหะทุกตัวออกจากน้ำอาจใช้ร่วมกับการตกตะกอนในรูปอื่น เช่น โลหะซัลไฟด์ หรือ คาร์บอเนต

การตกตะกอนเงินในรูปของไฮดรอกไซด์ให้มีประสิทธิภาพสูงควรปรับพีเอชอยู่ในช่วง 10-12 มีค่าการปนเปื้อนของเงินในน้ำเสียน้อยที่สุด ส่วนการตกตะกอนโครเมียมคลอไรด์ ควรปรับพีเอช 9 ดังภาพที่ 2.2 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์มีข้อดีข้อเสียดังนี้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

ข้อดีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์

1) วิธีการใช้ง่าย สะดวก มีขั้นตอนไม่ซับซ้อน
2) ราคาถูก ค่าใช้จ่ายต่ำ

ข้อเสียการตกตะกอนไฮดรอกไซด์มีดังนี้

1) ตะกอนสามารถละลายกลับเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช
2) มีปัญหากับน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดเนื่องจากโลหะแต่ละชนิดตกตะกอนได้ดีที่ค่าพีเอชต่างกัน
3) ตะกอนที่ได้มีลักษณะเบาทำให้แยกออกจากน้ำได้ยาก
4) ปริมาณตะกอนมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการบำบัดตะกอนเพิ่มขึ้น
5) ไม่สามารถตกตะกอนโลหะบางชนิดที่ต้องผ่านกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันก่อน เช่น โครเมียม ในการตกตะกอนโครเมียมในรูปไฮดรอกไซด์จะต้องทำให้โครเมียมประจุ +6 ให้อยู่ในรูป +3 เสียก่อนโดยกระบวนการรีดักชัน

### 3.3 การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนโลหะหนักในรูปซัลไฟด์ ไอออนของโลหะหนักจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปซัลไฟด์ (metal-sulfide) ที่ไม่ละลายน้ำ ซัลไฟด์จะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำกว่าโลหะไฮดรอกไซด์ ไม่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริคทำให้ค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอน สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide; $Na_2S$) โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (Sodium hydrosulfide; NaHS) เฟอรัสซัลไฟด์ (Ferrous sulfide; FeS) และแคลเซียมซัลไฟด์ (Calcium sulfide; CaS) (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

ปฏิกิริยาการตกตะกอนของโลหะโดยซัลไฟด์ดังสมการ

$$M^{2+} + S^{2-} \longrightarrow MS \quad (2.8)$$

การตกตะกอนด้วยซัลไฟด์สามารถตกตะกอนโครเมียมประจุ +6 ซึ่งสามารถตกตะกอนด้วยกระบวนการนี้ได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการรีดักชัน ได้ตะกอนโครมิกไฮดรอกไซด์ ดังสมการ

$$Cr_2O_7^- + 2FeS + 7H_2 \longrightarrow 2Fe(OH)_3 + 2Cr(OH)_3 + 2S + 2OH^- \quad (2.9)$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

การตกตะกอนเงินอยู่ในรูปซัลไฟด์ สามารถตกตะกอนตั้งแต่พีเอช 3-11 มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนเงินเพิ่มมากขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้น ดังภาพที่ 2.3 การตกตะกอนโลหะหนักในรูปซัลไฟด์มีข้อดีข้อเสียดังนี้

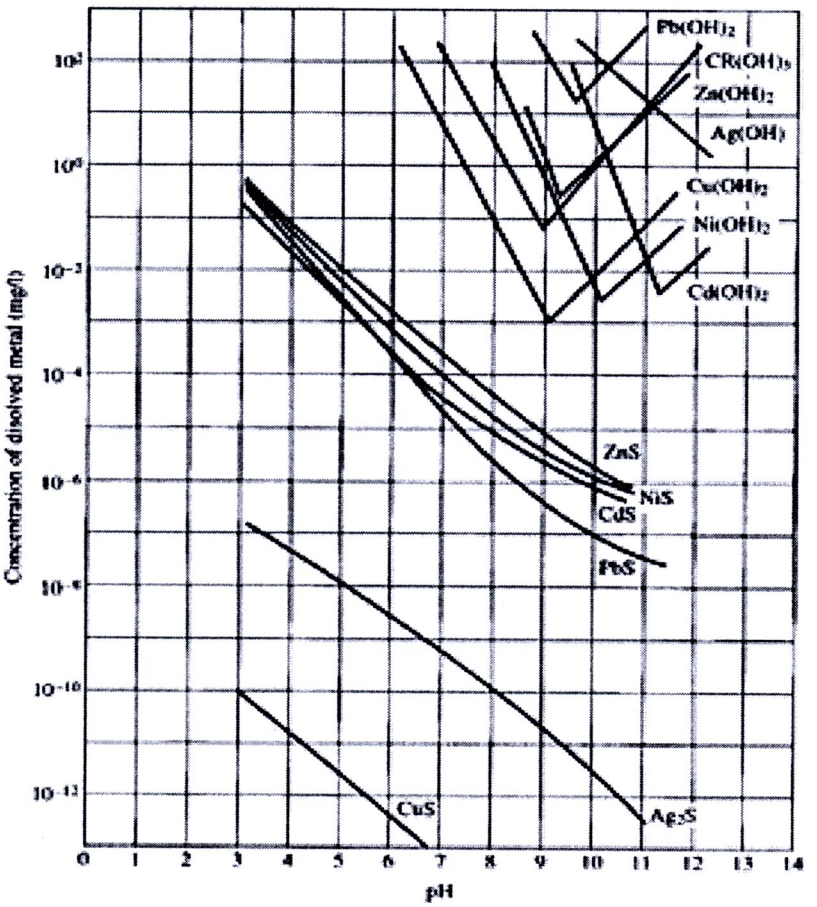
ข้อดีการตกตะกอนซัลไฟด์

1) มีความสามารถในการละลายน้อยกว่าโลหะไฮดรอกไซด์
2) ตะกอนมีน้ำหนักมากสามารถแยกออกจากน้ำได้ง่าย
3) การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการตกตะกอนมากนัก
4) สามารถตกตะกอนโครเมียมประจุ +6 โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการรีดักชัน
5) สามารถตกตะกอนน้อยกว่าการตกตะกอนไฮดรอกไซด์

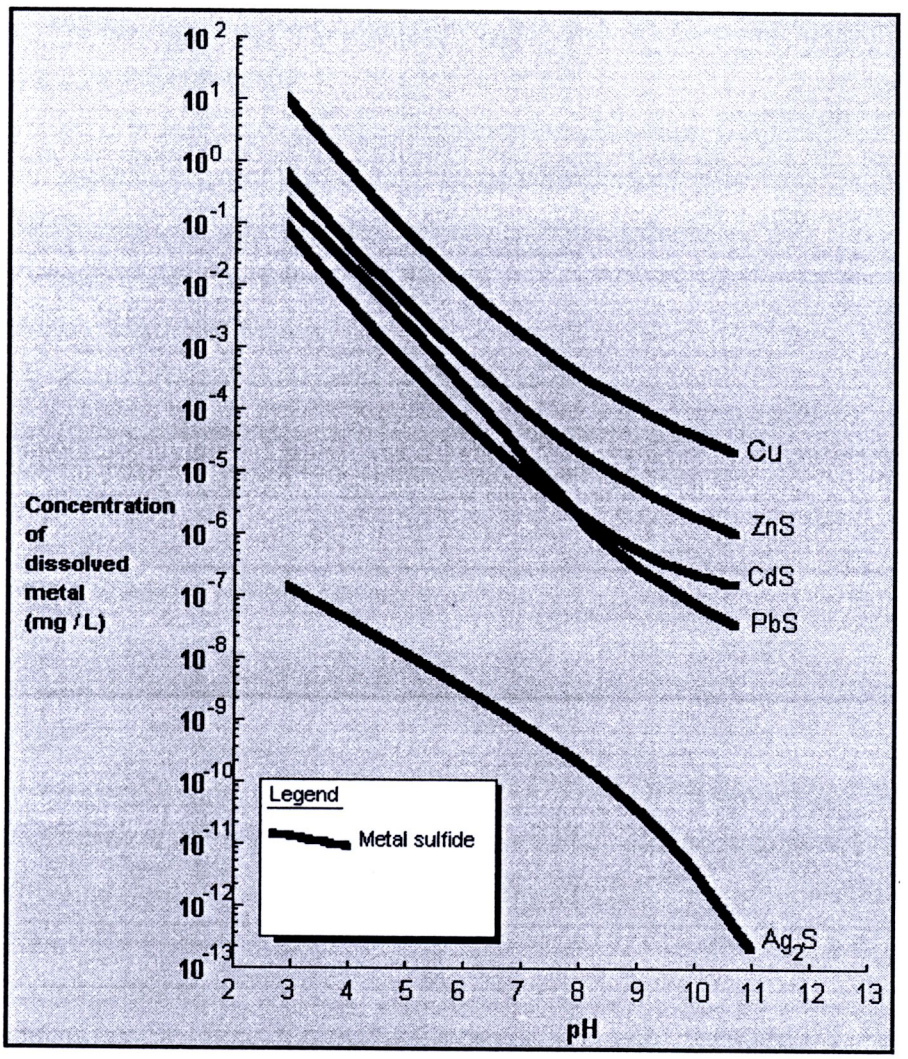
อย่างไรก็ตาม การตกตะกอนซัลไฟด์มีข้อเสียดังนี้

1) เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์หากตกตะกอนที่ค่าที่เอชต่ำ ดังนั้นจึงควรตกตะกอนที่พีเอชมากกว่า 8 เพื่อป้องกันการเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์
2) เกิดกลิ่นเหม็น
3) ตะกอนมีขนาดเล็กและเกิดฟล็อคขนาดเล็ก
4) มีซัลไฟด์ตกค้างในน้ำจึงต้องเพิ่มขั้นตอนการบำบัดซัลไฟด์ที่เหลือเสียก่อน
5) มีค่าใช้จ่ายสูง

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 24 S.A. 2555
เลขทะเบียน 203332
เลขเรียกหนังสือ




**ภาพที่ 2.2** การตกตะกอนของโลหะหนักไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ (Hoffland Environmental Inc., 2006)




**ภาพที่ 2.3** ความสามารถในการละลายของโลหะซัลไฟด์ (Hoffland Environmental Inc., 2006)

### 3.4 การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation)

การตกตะกอน มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักบางตัว เช่น แคดเมียม นิกเกิล และตะกั่วสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และสามารถกรองตะกอนได้มากกว่า ความสามารถในการตกตะกอนขึ้นอยู่กับค่าคงที่การตกตะกอน และค่าพีเอชในน้ำเสีย เช่น การใช้แคลเซียมคาร์บอเนต ในการตกตะกอน จะมีประสิทธิภาพสูงที่พีเอช 5-7 เท่านั้น สารเคมีที่นิยมใช้ ได้แก่ เถ้าโซดา (Sodium carbonate; $Na_2CO_3$) โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate; $Na(HCO_3)$) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate; $CaCO_3$) (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ปฏิกิริยาของการตกตะกอนโลหะหนักด้วยคาร์บอเนต ดังสมการ

$$Na_2CO_3 + M^{+2} \longrightarrow MCO_3 + 2Na \qquad (2.10)$$

การตกตะกอนโลหะหนักด้วยคาร์บอเนตมีข้อดีข้อเสียดังนี้ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

ข้อดีการตกตะกอนคาร์บอเนต

1) การใช้โซเดียมคาร์บอเนตเป็นสารตกตะกอนจะเป็นการเพิ่มบัฟเฟอร์ในน้ำ
2) ตะกอนมีปริมาณน้อย สามารถแยกตะกอนออกจากน้ำได้ง่าย
3) มีประสิทธิภาพในการตกตะกอนโลหะแคดเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล
4) สามารถตกตะกอนโหละหนักได้ในพีเอชต่ำ

ข้อเสียการตกตะกอนคาร์บอเนต

1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาต่ำทำให้ใช้เวลานานในการตกตะกอน
2) การตกตะกอนขึ้นกับค่าพีเอช จึงต้องมีการควบคุมพีเอชให้เหมาะสม
3) การกำจัดโครเมียมประจุ+6 ต้องผ่านกระบวนการรีดักชันก่อน

## 4. ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตกตะกอน

การตกตะกอนโลหะหนักด้วยการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) มีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการตกตะกอนโลหะหนัก ได้แก่ (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2545)

4.1 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะ

สารประกอบโลหะหนักแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายน้ำที่พีเอชต่าง ๆ ไม่เท่ากัน โลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริค เช่น ทองแดง สังกะสี นิกเกิล จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึง พีเอชค่าหนึ่งที่ทำให้ตวามสามารถในการละลายน้ำนั้นต่ำสุด และเมื่อเลยพีเอชนี้แล้วโลหะแอมโฟเทอริคจะกลับละลายน้ำได้มากขึ้นอีก

4.2 ความเป็นกรด-ด่าง

น้ำแต่ละชนิดจะมีช่วงพีเอชที่จะเกิดการรวมตัวและตกตะกอนได้ดีต่างกัน การเติมสารเคมีในช่วงพีเอชที่ไม่เหมาะสม นอกจากจะเปลืองสารเคมีที่ใช้แล้วยังจะทำให้น้ำที่ได้มีคุณภาพไม่ดีเท่าที่ควร

4.3 เกลือแร่ต่างๆ

การมีอนุมูลซัลเฟตหรือฟอสเฟสจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการจับตัวเป็นฟล๊อคเปลี่ยนแปลงไป ผลของอิออนชนิดต่างๆต่อการจับตัวเป็นฟล๊อค จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพีเอชที่ดีที่สุดในการเกิดฟล๊อค ระยะเวลาในการเกิดฟล๊อค และปริมาณที่เหมาะสมของสารตกตะกอนที่เปลี่ยนแปลงไป

4.4 ความขุ่น

ความใส่สารตกตะกอนเพิ่มขึ้นตามความขุ่นที่เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มของสารเคมีไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความขุ่นที่เพิ่มขึ้น และถ้าน้ำมีความขุ่นมาก ควรใส่สารตกตะกอนเพียงเล็กน้อย เพราะโอกาสที่อนุภาคต่างๆ จะมาชนและจับตัวกันมีมาก

4.5 ชนิดของสารตกตะกอน

สารเคมีแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับสารหรือโลหะที่ต้องการตกตะกอนไม่เหมือนกัน รวมทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น การละลายของอิออนโลหะ ลักษณะของตะกอน ความเร็วของการตกตะกอน ราคาและความยากง่ายในการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

4.6 อุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาการตกตะกอนทางเคมีว่าเป็นปฏิกิริยาดูดหรือคายความร้อน ถ้าเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อนจะตกตะกอนเคมีได้ดีที่อุณหภูมิสูง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะตกตะกอนเคมีได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงได้เร็วกว่าอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อความหนืดของน้ำด้วย ซึ่งความหนืดของน้ำมีผลต่อการตกตะกอน กล่าวคือที่อุณหภูมิสูงความหนืดของน้ำจะต่ำลง จึงทำให้กลุ่มตะกอนสามารถตกตะกอนได้ดี ในทำนองเดียวกันที่อุณหภูมิต่ำ จะมีผลให้ความหนืดของน้ำสูงขึ้น ทำให้การตกตะกอนช้าลง มีผลที่ช่วงพีเอชที่เหมาะสม (Optimum pH) ในการทำการสร้างตะกอนต่ำลง ทำให้ต้องเพิ่มสารเคมีในการตกตะกอน

4.7 การกวน

เพื่อให้เกิดความปั่นป่วนของน้ำต้องมีความเร็วที่เหมาะสมการกวนเร็ว (Repid mixing) ช่วยทำให้สารเคมีกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง ส่วนการกวนช้า (Slow mixing) จะทำให้สารตกตะกอนทำปฏิกิริยากับสารหรือโลหะที่ต้องการตกตะกอนได้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และทำให้มวลตะกอนรวมตัวเป็นตะกอนได้ดี มีความเสถียรสูงและสามารถแยกออกจากน้ำโดยการตกตะกอนได้ง่าย ความเร็วของการกวนที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับค่า G (Velocity gradient) สำหรับการกวนเร็วค่า G ประมาณ 100 - 1,000 รอบต่อนาที และกวนช้า 10 - 75 รอบต่อนาที เวลาในการกวนเร็ว 30 - 60 วินาที กวนช้า 15 - 30 นาที และค่า Gt สำหรับการกวนเร็วควรอยู่ที่ช่วง 3,000 - 60,000 รอบต่อนาที และกวนช้าควรมีค่า Gt ประมาณ 10,000 - 100,000 รอบต่อนาที

4.8 สารประกอบเชิงซ้อน

สารประกอบเชิงซ้อน เช่น ไซยาไนด์ แอมโมเนียและสารคีแลนด์ เช่น EDTA สามารถเกิดอิออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้และเสถียรกับโลหะหลายชนิดในน้ำเสีย ซึ่งอิออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการตกตะกอนทางเคมีของโลหะ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักลดลง

## 5. กระบวนการแยกสกัดโลหะเงิน

โลหะเงินที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่จะปนอยู่กับทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี สามารถโลหะเงินของจากโลหะอื่นๆได้ จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีดังนี้ (Hermann Renner, 1993)

5.1 การสกัดด้วยการถลุง (Smelting)

วิธีนี้จะต้องพิจารณาถึงปริมาณของเงินที่มีในแร่ที่ต้องการสกัด โดยการถลุงต้องมีอยู่ในเปอร์เซ็นที่สูงพอสมควรและทำภายใต้ภาวการณ์เติมหรือลดออกซิเจน เพื่อเปลี่ยนองค์ประกอบของวัตถุดิบ ซึ่งในตอนแรกนั้นวัตถุดิบเกือบทั้งหมดนอกจากแร่เงินแล้วประกอบไปด้วยเงินกำมะถัน และสารประกอบของเงินเฮไลท์

5.2 การสกัดด้วยปรอท (Amalgamation)

หลายร้อยปีมาแล้ว ปรอทเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในกระบวนการแยกแร่เงิน ในปัจจุบันวิธีการนี้ถูกนำมาใช้ไม่บ่อยนัก เนื่องจากต้นทุนสูงแต่ได้ผลตอบแทนน้อย และยังทำให้อากาศเป็นพิษด้วย โดยการแยกเงินมาได้ทุก 1 กิโลกรัมของเงินการต้องการใช้ปรอทผสมจำนวน 0.2 – 2 กิโลกรัม

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

5.3 การสกัดด้วยกระบวนการไซยาไนด์ (Cyanidation)

กระบวนการนี้เป็นส่วนสำคัญในการสกัดเงินจากแร่เงินและภาวะที่จำเป็นก็เหมือนกับกระบวนการแยกทองด้วยไซยาไนด์ โดยแร่ที่ถูกบดด้วยเครื่องบดและจะถูกแช่ด้วยน้ำยาโซเดียมไซยาไนด์ (5-10g NaCN/L) และถูกทิ้งไว้หลายวันในถังเก็บ และเงินจะถูกทำให้ตกตะกอนจากน้ำยาด้วยผงสังกะสี นอกจากนี้ยังมีอีกกระบวนการคือ ทำให้เกิดการดูดซับของสารประกอบเงินไซยาไนด์ไปยังคาร์บอน (active carbon) ซึ่งคล้ายคลึงกันกับกระบวนการที่ใช้สำหรับในการแยกทองคำ กระบวนการนี้ได้ถูกพัฒนามาเรื่อย ๆ แต่ไม่ได้รับความสำคัญเหมือนกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นทองคำ ในกรณีของเงินคลอไรด์จากสมบัติของการทำละลาย) ดังปฏิกิริยา

$$AgCl + 2NaCN \longrightarrow Na[Ag(CN)_2] + NaCl \qquad (2.11)$$

เงินจะถูกทำให้ละลายโดยการผ่านอากาศไปในน้ำยา

$$4Ag + 8NaCN + O_2 + H_2O \longrightarrow 4Na[Ag(CN)_2] + 4NaOH \qquad (2.12)$$

เงินซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยาด้วย แต่จะเป็นไปอย่างช้าๆ ตามสมการดังนี้

$$2Ag_2S + 8NaCN + 2O_2 + H_2O \longrightarrow 4Na[Ag(CN)_2] + Na_2S_2O_3 + 2NaOH \qquad (2.13)$$

และ

$$2Ag2S + 10\ NaCN + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4Na[Ag(CN)_2] + 2Na_2SCN + 2NaOH \qquad (2.14)$$

ถ้าแร่ประกอบด้วยสารประกอบที่ไม่ละลายในไซยาไนด์ ตัวอย่างเช่น proustite ($Ag_3AsS_3$) และ pyrargite ($Ag_3SbS_3$) การสกัดด้วยไซยาไนด์ต้องใช้ไซยาไนด์โบรไมด์ เป็นการเพิ่มการทำละลายของโซเดียมโบรไมด์บนโลหะเงิน

$$2Ag + BrCN + 3NaCl \longrightarrow 2Na[Ag(CN)_2] + NaBr \qquad (2.15)$$

โดยทั่วไปกระบวนการล้างแร่เงินนั้นจะช้ากว่าแร่ทอง แต่แร่ทองจะได้รับผลตอบแทนที่สูงกว่าเงิน ถ้าเป็นโลหะเงินและเงินคลอไรด์ จะได้รับผลตอบแทนประมาณ 98% เท่านั้น แต่แร่อื่นๆ บางครั้งจะได้แค่ 80% เท่านั้น ขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการจะเหลือเงินในกาก หลังจากที่แยกเงินแล้วซึ่งปกติจะมีค่าเป็น 0.5 มก/ล.

5.4 การแยกสกัดด้วยไทโอซัลเฟต (Patera process)

ในกระบวนการการล้างแร่เงินได้ถูกพัฒนาโดยใช้สารละลายไทโอซัลเฟต โดยกระบวนการนี้ มีต้นกำเนิดในยุโรปภายใต้ชื่อของกระบวนการพาเทรา (Patera process) และได้ถูกพัฒนาขึ้นในอเมริกากลางและอเมริกาใต้ และหลังจากนั้นในอเมริกาเหนือก็นำมาใช้แทนที่การสกัดจากแร่ด้วยปรอท เพราะจะได้ผลตอบแทนสูงและต้นทุนต่ำกว่า ปัจจุบันยังถูกนำมาใช้บ้างนาน ๆ ครั้ง

แร่เงินที่มีส่วนประกอบของธาตุพวกฮาไลด์ จะสามารถทำแยกเงินโดยผ่านกระบวนการที่ใช้สำหรับแยกเงินจากฟิล์ม (Photographic fixing)

$$AgCl + 2Na_2S_2O_3 \longrightarrow Na_3[Ag(S_2O_3)_2] + NaCl \quad (2.16)$$

และ

$$AgCl + 3Na_2S_2O_3 \longrightarrow Na_5[Ag(S_2O_3)_3] + NaCl \quad (2.17)$$

ผลผลิตที่ได้ของเงินในการแยกด้วยไทโอซัลเฟต จะต่ำกว่ากระบวนการไซยาไนด์ ซึ่งกระบวนการทางเทคนิคนั้นคล้ายคลึงกัน แต่ข้อเสียของการแยกด้วยไทโอซัลเฟตก็คือไม่สามารถละลายทองไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Hermann Renner, 1993)

## 6. กระบวนการแยกสกัดเงินบริสุทธิ์

เงินที่ยังไม่บริสุทธิ์ที่มาจากแร่และเงินที่ใช้แล้ว โดยทั่วไปจะมีความบริสุทธิ์ที่ร้อยละ 98-99 ซึ่งอาจจะมีทองคำและโลหะกลุ่มแพลทตินัม (Platinum-group metals) รวมอยู่ด้วยเพราะกระบวนการเหล่านี้เป็นการแยกโลหะ มีค่าออกจากโลหะเบสเท่านั้น หลักในการทำงานของการสกัดเงินนั้นเป็นการผลิตเงินให้ได้ความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.98

การสกัดเงินให้มีความบริสุทธิ์ที่ น้อยกว่าร้อยละ 99.98 ในทางอุตสาหกรรมขั้นแรกจะมีความสำคัญมาก เพราะจะเป็นการแยกเอาทองคำและโลหะกลุ่มแพลทตินัมออกจากเงินที่ไม่บริสุทธิ์กลับมาใช้ใหม่มูลค่าของทองคำในเงิน บางครั้งมากกว่าค่าของเงิน แม้ว่าการสกัดเงินโดยทั่วไปจะประกอบด้วยการแยกทองคำและเงินออกจากกัน

### 6.1 การแยกสกัดเงินบริสุทธิ์ด้วยวิธีทางเคมี

6.1.1 การแยกด้วยกรดไนตริก กระบวนการที่เป็นที่รู้จักเป็นเวลายาวนานของการละลายเงินในกรดไนตริก ปฏิกิริยาประกอบด้วยสมการดังนี้

$$3Ag + 4HNO_3 \longrightarrow 3AgNO_3 + 2H_2O + NO \quad (2.18)$$

และทองคำที่เหลือจะไม่ละลายในกรดไนตริก การะแตกตัวจะทำให้มีประสิทธิภาพมากจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของอัลลอยด์ ซึ่งส่วนผสมที่ทำให้มีประสิทธิภาพดีที่สุด คือ เงินเท่ากับร้อยละ 75 และทองคำเท่ากับร้อยละ 25 ส่วนการละลายเงินที่แยกออกมาจะนำมาผ่านกระบวนการแยกเงินคืนโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าหรือจะทำให้ตกตะกอน (Lida, Suzuki, Meguro, and Tanaka, 1991)

6.1.2 การแยกด้วยกรดซัลฟุริก

จะใช้กรดซัลฟุริกความเข้มข้นประมาณ 86% ที่อุณหภูมิ 240°C ซึ่งเงินจะถูกออกซิไดซ์และเกิดปฏิกิริยาดังสมการดังนี้

$$2Ag + 2H_2SO_4 \longrightarrow Ag_2SO_4 + 2H_2O + SO_2 \quad (2.19)$$

และสารละลายที่ได้จะถูกทำให้เจือจางและทำให้ตกตะกอนได้เงินซัลเฟตซึ่งจะถูกกรองออกและตกตะกอนด้วยเหล็ก (iron) เพื่อแยกเงินออกมา (Lida et al., 1991)

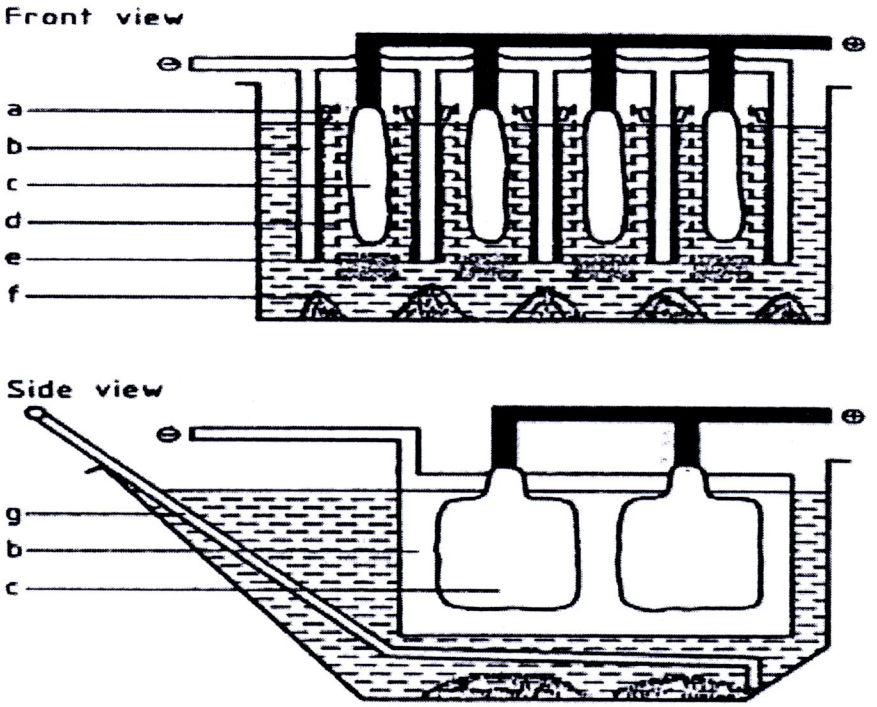
การศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้การแยกสกัดเงินบริสุทธิ์ด้วยกรดซัลฟูริก เนื่องจากโลหะเงินในน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดีอยู่ในรูปของซิลเวอร์ซัลเฟต เพื่อเป็นการลดขั้นตอนการแยกสกัดเงิน และลดค่าใช้จ่ายในการนำกลับโลหะเงินอีกครั้ง

## 6.2 การแยกสกัดเงินบริสุทธิ์ด้วยวิธีทางไฟฟ้า

### 6.2.1 การแยกด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการมอเบียร์ (Mobius Elecrolysis)

กระบวนการมอเบียร์ (Mobius Elecrolysis) สำหรับการสกัดเงินให้บริสุทธิ์จะใช้กระบวนการนี้ในยุโรปเป็นหลัก โดยเงินจะถูกละลายเพื่อทำเป็นอิเล็กโทรไลต์เงินที่ต้องการแยกให้บริสุทธิ์ จะถูกนำมาทำเป็นที่ขั้วแอโนดและทำการควบคุมกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นเงินที่บริสุทธิ์จะถูกแยกออกไปที่ขั้นแคโทด ส่วนที่ขั้นแอโนดสิ่งสกปรกรวมทั้งโลหะอื่นๆ จะถูกเก็บในถุงผ้าที่แขวนใส่เงินที่ไม่บริสุทธิ์ เงินบริสุทธิ์ที่ขั้วแคโทดจะถูกนำมารวมไว้ที่แผ่นสแตนเลสและถูกกวาดออกอย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร ส่วนทองแดงจะสะสมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และถ้าปริมาณของทองแดงสูงจะมีผลกระทบต่อความบริสุทธิ์ของเงินเหมือนกัน โดยจะถูกแยกมาอยู่ที่ขั้วแคโทดเช่นกัน ดังภาพที่ 2.4 สภาวะที่ต้องควบคุมคือ ความเข้มข้นของเงินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ควรมีประมาณ 50 กรัมต่อลิตรเป็นอย่างน้อย ความเข้มข้นของกรดเท่ากับ 10 กรัมต่อลิตร ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดควรประมาณ 400+500 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 2.0-2.5 โวลท์ การจัดวางขั้วแอโนดและแอโทดวางขนานกันในแนวตั้งฉากกับพื้นพลังงานที่ใช้เป็นประมาณ 0.6 กิโลวัตต์ต่อหนึ่งกิโลกรัมของเงินบริสุทธิ์ที่แยกได้

เมื่อเวลาผ่านไปจนขั้วแอโนดที่เป็นเงินไม่บริสุทธิ์ละลายหมดกระบวนการจะหยุดเพื่อเก็บเอาเงินที่ขั้วแคโทดออกไปและใส่เงินที่ไม่บริสุทธิ์ที่ขั้วบวกใหม่ กระบวนการมอเบียร์ (Mobius process) จะเหมาะสำหรับเงินที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 90 การแยกสกัดด้วยวิธีนี้จะให้ค่าความบริสุทธิ์ของเงินที่ร้อยละ 99.95-99.99 (Hermann Renner, 1993)

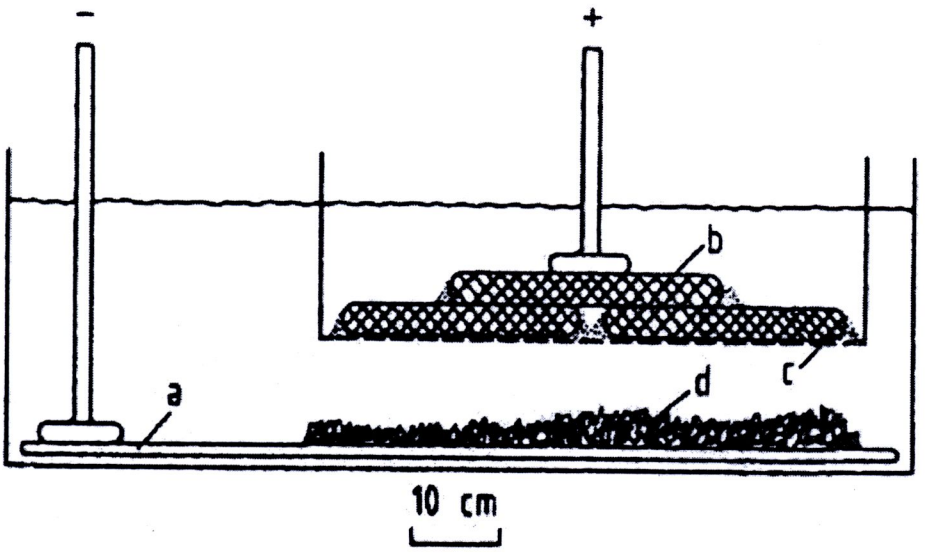



a. อุปกรณ์สำหับกวาเงินที่ขั้วแคโทด (ขั้วลบ)
b. ขั้วลบ
c. ชิ้นงานที่ต้องการแยก
d. ถุงสำหรับใส่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก)
e. กากของชิ้นงานที่ขั้วแอโนด
f. เงินบริสุทธิ์ที่แยกออกมา
g. อุปกรณ์สำหรับกวาดเงินออกจากเซลล์

**ภาพที่ 2.4** การแยกเงินด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการมอเบียส์ (Hermann Renner, 1993)

6.2.2 การแยกด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการบอลแบท-ทัม (balbach-Thum Elecrolysis)

จะใช้สภาวะการทำงานเช่นเดียวกับกระบวนการมอเบียร์ (Mobius process) แต่จะแตกต่างกันที่การจัดวางขั้วแอโนดกับแคโทดเท่านั้น คือจะถูกจัดวางขนานกันเป็นแนวนอนกับพื้น ขั้วแคโทดที่เป็นสแตนเลสจะถูกปกคลุมพื้นที่ทั้งหมด และระยะระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดประมาณ 10 เซนติเมตร (ภาพที่ 2.5) ประโยชน์ของกระบวนการบอลแบท-ทัม (balbach-Thum process) คือสิ่งสกปรกที่ขั้วแอโนดจะถูกเก็บได้ง่ายกว่ากระบวนการมอเบียร์ (Mobius process) ซึ่งมีความสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเงินที่ขั้วบวกมีเปอร์เซ็นต์ของทองคำสูง แต่ข้อเสีย คือ ใช้พื้นที่ในการทำงานมากและการใช้พลังงานที่สูง กระบวนการบอลแบท-ทัม (balbach-Thum process) จะใช้ในอเมริกาเป็นส่วนใหญ่ (Hermann Renner, 1993)




a. ขั้วแคโทด
b. ชิ้นงานที่ต้องการแยก
c. แผ่นไดอะแฟรม
d. เงินบริสุทธิ์ที่แยกออกมา

**ภาพที่ 2.5** การแยกเงินด้วยไฟฟ้าโดยกระบวนการบอลแบท-ทัม (Hermann Renner, 1993)

## 7. การนำกลับโลหะเงิน

การตกตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดีด้วยโซเดียมคลอไรด์ การตกตะกอนเงินโซเดียมคลอไรด์(NaCl) จะทำปฏิกิริยากับซิลเวอร์ซัลเฟต ($Ag_2SO_4$) ได้ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ที่เกิดขึ้น และเมอร์คิวริคซัลเฟตทำปฏิกิริยาได้เมอร์คิวรัสคลอไรด์ ส่วนโครเมียมและเหล็กอยู่ในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ ซึ่งตะกอนที่ได้นั้นยังไม่มีความบริสุทธิ์มากพอที่จะนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกครั้ง ต้องมีการแยกตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ออกจากตะกอนโลหะหนักอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนในตะกอน เพื่อให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์ มีขั้นตอนการนำกลับโลหะเงินดังนี้

### 7.1 แยกปรอทออกจากตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์

ตะกอนสีขาวที่ได้มานั้น ไม่ได้มีเพียงตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์เท่านั้น แต่ยังมีตะกอนของเมอร์คิวรัสคลอไรด์ปนอยู่ด้วย ดังนั้นจึงอาศัยสมบัติในการละลายที่แตกต่างกันของตะกอนสองชนิดนี้ โดยตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์สามารถละลายได้ในสารละลายได้ในสารละลายแอมโมเนียเกิดเป็นไอออนเชิงซ้อน $[Ag(NH_3)_2]^+$ ดังสมการ (Maudos et al., 1994)

$$AgCl + 2NH_3 \longrightarrow [Ag(NH_3)_2]Cl \qquad (2.20)$$

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ส่วนเมอร์คิวรัสคลอไรด์นั้นไม่ละลายในสารละลายแอมโมเนีย แต่ตะกอนจะเปลี่ยนเป็นสีดำเนื่องจากเกิดเป็นอะมิโน-เมอร์คิวริกคลอไรด์และผงละเอียดของปรอท ดังสมการ (วิลาวรรณ์ จันทรประทิน, 2542)

$$HgCl_2 + 2NH_3 \longrightarrow Hg(NH_2)Cl + Hg + NH_4Cl \quad (2.21)$$

$$HgCl_2 + 2NH_3 \longrightarrow Hg(NH_2)Cl + Hg + NH_4^+ + Cl^- \quad (2.22)$$

ด้วยสมบัติดังกล่าวจึงสามารถแยกเอาสารประกอบของปรอทออกจากตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ โดยการกรองเอาของผสมสีดำนี้แยกเก็บเอาไว้เนื่องจากอาจก่อให้เกิดอันตรายจากพิษของปรอท นำสารละลายที่ผ่านการกรองไปปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยการเติมกรดไนตริก (ทดสอบโดยการใช้กระดาษลิตมัส) จะได้ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์กลับคืนอีกครั้ง ดังสมการ (สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพิพัฒน์, 2550)

$$[Ag(NH_3)_2]Cl + 2HNO_3 \longrightarrow AgCl + 2NH_4NO_3 \quad (2.23)$$

### 7.2 การรีดิวซ์ซิลเวอร์คลอไรด์

ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์ที่ได้นั้นต้องทำการรีดิวซ์ เพื่อทำให้อยู่ในรูปโลหะเงินในการรีดิวซ์ซิลเวอร์-คลอไรด์ให้อยู่ในรูปโลหะเงิน (Metallic silver) สามารถทำให้ 3 วิธีการดังนี้

7.2.1 วิธีการรีดิวซ์โดยตรงเป็นวิธีการที่ทำเพียงขั้นตอนเดียวคือ ซิลเวอร์คลอไรด์ไปหลอมด้วยฟลักซ์ ซึ่งประกอบด้วยบอแรกซ์ (Borex) ผงแก้ว [Flint glass (lead-free)] และโซดาแอช (Soda ash) โลหะเงินที่ได้จากวิธีการนี้จะไม่ค่อยมีความบริสุทธิ์มากนัก

7.2.2 รีดิวซ์ด้วยผงสังกะสี (reduction with zinc) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากเพราะไม่ยุ่งยากและไม่ทำให้เกิดการสูญเสียโลหะเงินมากนัก สามารถทำได้โดยนำตะกอนของซิลเวอร์คลอไรด์ที่ผ่านการล้างแล้วใส่ในบีกเกอร์จากนั้นเทกรดซัลฟูริกให้ท่วมตะกอน ให้ความร้อนเล็กน้อย จากนั้นจึงโรยผงสังกะสีลงไป สังกะสีจะละลายในกรดและในขณะที่สังกะสีละลาย ตะกอนซิลเวอร์คลอไรด์จะถูกรีดิวซ์กลายเป็นโลหะเงิน ซึ่งจะเปลี่ยนจากตะกอน สีขาวเป็นสีเทา มองดูคล้ายผงซีเมนต์ จึงเรียกว่าซีเมนต์ซิลเวอร์ (cement silver) ดังสมการ (Aktas, 2010)

$$2AgCl + Zn + H_2SO_4 \longrightarrow 2Ag^0 + ZnSO_4 + 2HCl \quad (2.24)$$

นำซีเมนต์ซิลเวอร์ที่ได้นี้ไปทำการหลอมด้วยเปลวไฟ โดยใช้บอริกเอซิดเป็น ฟลักซ์จะทำให้โลหะเงินรวมตัวกันเป็นเม็ดโลหะเงินที่มีลักษณะวาว

7.2.3 รีดิวซ์ด้วยผงเหล็ก (reduction with iron) วิธีการนี้ทำเช่นเดียวกับการใช้ผงสังกะสี แต่ผงเหล็กต้องใช้เวลาในการรีดิวซ์มากกว่าจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมนัก (วิลาวรรณ์ จันทรประทิน, 2542)

## 8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 8.1 การบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี และการตกตะกอนโลหะหนัก

พวงรัตน์ แก้วล้อม (2537) ได้ทำการศึกษาแนวทางการกำจัดน้ำเสียซีโอดีในเขตกรุงเทพมหานคร โดยน้ำเสียมาทำการทดลองเพื่อหาวิธีที่เหมาะสมในการบำบัดและนำกลับซิลเวอร์ พบว่าสารเคมีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ พีเอชที่เหมาะสม คือ 9.5 และเวลาในการตกตะกอน 150 นาที สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนซิลเวอร์ คือ โซเดียมคลอไรด์ โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ ประมาณ 4 เท่าของค่าสตอยซิโอเมตริก

ขนิษฐา ทวีถาวรสวัสดิ์ (2538) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้สารเคมี 4 ชุด คือ โซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซดียมซัลไฟด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ โซเดียมไธโอซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการทดลองที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากการวิเคราะห์ค่าซีโอดี คือ การตกตะกอนด้วยโซเดียมไธโอซัตเฟต 10 กรัม และปรับ พีเอชเป็น 7 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 50% โดยตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 วัน

สุรีรัตน์ ถมยาศิริกุล (2540) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการเฟอร์ไรต์ โดยทำการทดลอง 2 ขั้นตอน คือ การทดลองหาพีเอชและอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยค่าตัวแปรพีเอชเป็น 9, 10, 11, 12 และแปรค่าอุณหภูมิเป็น 55, 60, 65, 70 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณเฟอรัสซัลเฟตคงที่เท่ากับ 0.025 โมล และทำการทดลองหาอัตราส่วนโมลที่เหมาะสม โดยแปรปริมาณเฟอรัสซัลเฟตเป็น 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1 โมล ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ พีเอช 9 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของเฟอรัสซัลเฟตไอออนต่อโลหะทั้งหมดในน้ำเสียเท่ากับ 18.65 ประสิทธิภาพการกำจัดปรอทร้อยละ 99.86 โครเมียมร้อยละ 97.87 และเหล็กร้อยละ 99.53 ตามลำดับ ซึ่งปรอทยังมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม ส่วนโครเมียมมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ผลการทดสอบการชะละลาย พบว่า ความเข้มข้นของปรอทและโครเมียมในน้ำสกัดต่ำกว่ามาตรฐาน

สุรัตน์ เพชรเกษม (2541) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียวิเคราะห์ซีโอดีด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกทางเคมี โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เพื่อตกผลึกเงิน เฟอรัสซัลไฟด์เพื่อตกผลึกปรอท และโซเดียมไฮรอกไซด์เพื่อตกผลึกโครเมียม พบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมคือใช้โซเดียมคลอไรด์ 4 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 0 สำหรับการตกผลึกเงิน ใช้เฟอรัสซัลไฟด์ 3 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 0.5 สำหรับการตกผลึกปรอท และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่ม เพื่อปรับพีเอชเป็น 9 สำหรับการตกผลึกโครเมียม มีประสิทธิภาพการกำจัดเงิน ปรอทร้อยละ 99.989 โครเมียมร้อยละ 99.99 และเหล็กร้อยละ 99.967 และ 94.41 ตามลำดับ ราคาของสารเคมีที่ใช้ คือ 10.25 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

พัชราภรณ์ ทวีสุววณพร (2545) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียซีโอดี โดยใช้สารคีเลติ้งโพลิเมอร์ พบว่า สารคีเลติ้งโพริเมอร์สามารถกำจัดปรอทและเงินได้ดี แต่ไม่สามารถกำจัดโครเมียมและเหล็กได้ ค่าพีเอชไม่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการกำจัดปรอทและเงิน นอกจากนี้ ยังพบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับสารคีเลติ้งโพริเมอร์สามารถกำจัดโลหะหนักต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัชรี พิลาสมบัติ (2546) ศึกษาการกำจัดซิลเวอร์ในน้ำเสียจากฟิล์มเอกซเรย์โดยใช้เบนโทไนต์ โดยศึกษาปริมาณเบนโทไนต์และค่าพีเอช ในการกำจัดซิลเวอร์ ใช้น้ำเสียจากโรงพยาบาล 3 แห่ง ในจังหวัดนครราชสีมา ปริมาณเบนโทไนต์ที่ 6, 9 และ 15 กรัม/ลิตร ที่ระดับพีเอช 5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดซิลเวอร์ได้

ร้อยละ 80.18, 91.18 และ99.86 ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการกำจัดซิลเวอร์สูงสุด คือ เบนโทไนต์ 15 กรัม/ลิตร นำค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียมาพิจารณา เมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ระดับพีเอช 5 ความเข้มข้นของ เบนโทไนต์ 6, 9 และ 15 กรัม/ลิตร มีต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียต่อปริมาตรน้ำเสีย 1,000 ลิตร คือ 42, 63 และ 105 บาท เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพ และค่าใช้จ่าย พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดซิลเวอร์ คือ ที่ระดับพีเอช 5 ความเข้มข้นของเบนโทไนต์ 9 กรัม/ลิตร

อารยา รานอก (2549) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดี โดยการตกตะกอนทางเคมีและโคแอกกูเลชัน ให้อยู่ในรูปของโลหะซัลไฟด์และโลหะไฮดรอกไซด์ โดยใช้โซเดียมไธโอซัลเฟตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการตกตะกอน และใช้สารส้มในกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าโซเดียมไธโอซัลเฟตปริมาณ 7.5 กรัม และปรับค่าพีเอชที่ 9 ต่อน้ำเสียซีโอดี 500 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด สามารถกำจัดปรอท, เงิน, โครเมียม, และเหล็ก คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99.97 99.85 99.99 และ 99.21 ตามลำดับ และพบว่า การใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอนปริมาณ 600 มล/ล. ใช้เวลาในการตกตะกอน 40 นาที เมื่อเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วยวิธีการตกตะกอน และการตกตะกอน ร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะเหล็กด้วยวิธีการตกตะกอนร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชันดีกว่าการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว ส่วนปรอท เงิน และโครเมียม มีค่าใกล้เคียงกัน

### 8.2 การนำกลับโลหะเงิน

วิลาวรรณ์ จันทรประทิน (2542) ศึกษาการกำจัดปรอทและการแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมที่เหลือทิ้งจากการบูรณะฟัน โดยการกำจัดปรอทออกก่อนด้วยวิธีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง สามารถกำจัดปรอทออกจากโลหะเจืออะมัลกัมได้โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดคือร้อยละ 88.01 โดยน้ำหนัก การการตรวจวัดปริมาณไอปรอทในอากาศขณะที่ปฏิบัติงาน พบว่า ไอปรอทในอากาศไม่เกินค่ามาตรฐานในอากาศที่ 0.05 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นำโลหะเจืออะมัลกัมทดลองแยกโลหะเงินด้วยวิธีการทางเคมีไฟฟ้าและวิธีการใช้สารเคมี พบว่าการใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าไม่สามารถแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมได้อย่างมีประสิทธิภาพใต้สภาวะที่ทดลอง ส่วนวิธีการใช้สารเคมีทำโดยการละลายโลหะเจืออะมัลกัมในกรดไนตริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 35 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แล้วจึงนำไปตกตะกอนให้อยู่ในรูปของซิลเวอร์คลอไรด์ จากนั้นรีดิวซ์ด้วยสังกะสีในกรดให้อยู่ในรูปของโลหะเงิน พบว่าสามารถแยกโลหะเงินออกจากโลหะเจืออะมัลกัมได้ถึงร้อยละ 97.44 โดยน้ำหนัก โลหะเงินที่ได้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99369 และสูงกว่าโลหะเงินที่ใช้ในการผลิตผงอะมัลกัมซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99127 จึงสามารถนำไปใช้งานทางด้านทันตกรรมได้อีกครั้ง

สุรชัย รักสมบัติ (2545) ศึกษาการแยกเงินจากสารละลายที่เหลือจากการแยกเงินด้วยอิเล็คโตรไลซีส โดยใช้อิเล็กโตรไลซีลแบบต่อเนื่อง ผลจากการวิจัยพบว่า สามารถแยกโลหะเงินจากสารละลายออกมาได้ โดยมีเงื่อนไขที่สามารถแยกไอออนของโลหะเงินให้มีประสิทธิภาพสูงสุดคือ ใช้ขั้วบวกที่สามารถทดแทนไอออนของโลหะเงินได้ที่เลือกใช้คือ ทองแดง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 6.45 - 7.75 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร อุณหภูมิของน้ำรอบถังสารละลายอิเล็คโตรไลต์เท่ากับ 70 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 0.2 ลิตรต่อนาที จำนวนถังปฏิกรณ์เท่ากับ 10 ถัง จะแยกเงินจากสารละลายได้ร้อยละ 99.95

Tan และ Dinardo (1992) ศึกษาวิธีการทำโลหะเงินให้บริสุทธิ์ (silver refining) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยนำโลหะเงินที่ต้องการนำมาทำให้บริสุทธิ์มากขึ้นมาหลอมรวมกันเป็นแท่งที่ขั้วอาโนด หุ้มด้วยถุงผ้า เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นส่วนโลหะผสมหลุดร่วงปนอยู่ในสารละลาย เมื่อทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าแล้ว ใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ($AgNO_3$) เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยไฟฟ้า จะทำการรักษาระดับซิลเวอร์ไอออน ($Ag^+$) โดยการเติมสารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$) ซึ่งได้มาจากการใช้กรดซัลฟูริก ($H_2SO_4$) ล้างขั้นอาโนดก่อนที่จะมาแยกสลายด้วยไฟฟ้า เพื่อกำจัดโลหะมลทินบางชนิด เช่น อาร์เซนิก แอนติโมเนีย ซีลีเนียม และเทลลูเลียม วิธีการนี้ทำให้ได้โลหะเงินที่มีความบริสุทธิ์สูง อีกทั้งสามารถลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการวิจัย