

การสกัดตะกั่วและเงินจากแร่กาลีนา

RECOVERY OF LEAD AND SILVER FROM GALENA CONCENTRATE

มณฑป วัลยะเพ็ชร
Monthop Valayapetre
ธรรมบุญ ชาวกิจ
Thamanoon Chaowakit

ภักดี ทรงเจริญ
Pakdi Songchareon
มณชัย ศิริมา
Monchai Sirima

กองโลหกรรม กรมทรัพยากรธรณี
Metallurgy Division, Department of Mineral Resources

บทคัดย่อ

ทดลองสกัดตะกั่วจากแร่กาลีนา (PbS) โดยการละลาย 2 ขั้นตอนด้วยสารละลาย FeCl_3 และตามด้วย NaCl พร้อมทั้งศึกษาตัวแปรที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มข้นของ FeCl_3 , NaCl ขนาดของเม็ดแร่และเวลาการละลาย พบว่าอุณหภูมิขณะละลายด้วย FeCl_3 มีความสำคัญมากที่สุดคือที่ 90°ซ. สามารถเปลี่ยนตะกั่วซัลไฟด์ให้อยู่ในรูปของคลอไรด์ได้มากถึง 99.5% โดยใช้อัตราส่วนของ FeCl_3/PbS ประมาณ 1.5 เท่า นอกจากนี้ขนาดของเม็ดแร่-270 เมช มีผลต่อการละลายมากขึ้นก็สามารถสกัดตะกั่วออกได้กว่า 99.9% ส่วน NaCl มีความสำคัญในการละลายแยกตะกั่วคลอไรด์ออกจากสารประกอบคลอไรด์อื่น ๆ ที่เกิดจากการละลายด้วย FeCl_3 โดยที่อุณหภูมิ 90°ซ. NaCl จำนวน 250 ก./ล. สามารถละลายตะกั่วได้ประมาณ 38 ก./ล. การทดลองแยกตะกั่วออกจากตะกั่วคลอไรด์ที่ได้จากการตกผลึกด้วยวิธีไฟฟ้า (Electrowinning) และการถลุง (Smelting) ได้โลหะตะกั่วมีความบริสุทธิ์ใกล้เคียงกันกว่า 99.99% การแยกตะกั่วคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าในสารละลาย HCl ใช้เหล็กแผ่นเป็นแอโนดเพื่อกำจัดก๊าซคลอรีนและลดค่า Cell voltage ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าวิธี Fused salt electrolysis ที่ใช้ในต่างประเทศ นอกจากนี้ยังพบว่าสภาวะที่เหมาะสม ควรใช้กรดเกลือ (HCl) ความเข้มข้น 1-8% โดยปริมาตร ค่า Cell voltage 2-3 โวลต์ ที่อุณหภูมิ 40°ซ. และค่า Current density ในช่วง 266-339 แอมแปร์/ตร.ม. ส่วนการทดลองถลุงตะกั่วคลอไรด์โดยใช้ปูนขาว (CaO) ในปริมาณ 40-45% และถ่านไม้เป็นส่วนผสมที่อุณหภูมิ 1,150-1,200°ซ. เป็นเวลา 30 นาที ปรากฏว่าได้ Recovery ประมาณ 90%

สำหรับเงินที่เกิดร่วมกับแร่กาลีนาในปริมาณความสมบูรณ์กว่า 4 กก./ตัน จะละลายอยู่ใน FeCl_3 และ NaCl โดยสามารถแยกเงินได้มากกว่า 99% เมื่อใช้อัตราส่วนของ FeCl_3/PbS สูงขึ้นเป็น 3 เท่า และ NaCl 250 ก./ล. ขั้นตอนต่อมาเป็นการแยกเงินออกจากสารละลายดังกล่าวด้วยวิธีซีเมนต์ชัน (Cementation) โดยการแทนที่เงินด้วยทองแดง ได้เงินผงมีความบริสุทธิ์กว่า 93% เมื่อนำมาหลอมด้วยบอแรกซ์ ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และซิลิกา (SiO_2) ที่อุณหภูมิ 1,200°ซ. ได้โลหะเงินบริสุทธิ์กว่า 98%

ABSTRACT

Double stage leaching technique of galena concentrate with ferric chloride and sodium chloride has been studied. The roles of the following important parameters : temperature, ferric chloride and sodium chloride concentrations, particle size and leaching time are described. The leaching temperature of ferric chloride solution appears to play the most significant role in this investigation. At 90°C, 99.5% of PbS in the concentrate was converted to PbCl_2 with the ratio of FeCl_3/PbS equal to 1.5. The particle size of galena concentrate, -270 mesh, was found to enhance the lead dissolution (over 99.9%). Sodium chloride solution also plays an important role in dissolving lead chloride from other chloride compounds, for instance, at 90°C, the solution comprising 250 g/l NaCl can dissolve 38 g of lead. The recovery of lead from lead chloride by both electrowinning and smelting techniques yield high purity of lead metal over 99.99%. A steel sheet was used as an anode in HCl electrolyte in order to eliminate chlorine gas and reduce the cell voltage as the result of lower electric energy consumption as compared to the fused salt electrolysis which has been investigated abroad. The optimum electrowinning conditions found in this study are as follows : 1-8% HCl electrolyte, cell voltage = 2-3V, temperature = 40°C and current density = 266-339 A/m².

Whilst the chloride smelting of PbCl_2 using charcoal as a reducing agent, yields 90% lead recovery at the following condition : 40-45% CaO, temperature = 1,150-1,200°C and smelting time = 30 min.

Valuable silver in association with lead concentrate (4kg/ton) was also dissolved in FeCl_3 and NaCl . Over 99% of silver was extracted at the following condition : $\text{FeCl}_3/\text{PbS}=3$ and NaCl 250 g/l. The recovery of silver from aqueous solution by cementation with copper plate yields silver powder over 93% purity. The cement silver is then refined with borax, sodium carbonate and silica at 1,200°C to obtain silver metal over 98% purity.

คำนำ

การแยกตะกั่วจากแร่กาลีน่าโดยทั่วไปใช้วิธีถลุงด้วยความร้อนสูงซึ่งต้องผ่านขั้นตอนการย่างแร่ (Roasting) เพื่อเปลี่ยนตะกั่วจากรูปตะกั่วซัลไฟด์มาอยู่ในรูปออกไซด์ ทำให้เกิดมลพิษจากก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไอตะกั่ว แม้ว่าในปัจจุบันจะมีการพัฒนาด้านการเก็บฝุ่น และการกำจัดก๊าซต่าง ๆ ได้ผลดีแล้วก็ตาม แต่ก็ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา^{1,3,4} จึงทำการค้นคว้าทดลองการแยกตะกั่วโดยกรรมวิธีโลหวิทยาสารละลายด้วย FeCl_3 และ NaCl อย่างจริงจัง ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 เป็นต้นมา ขณะนี้ศึกษาอยู่ในขั้นโรงงานทดลองยังไม่ได้นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เนื่องจากค่าใช้จ่ายสูงโดยเฉพาะขั้นตอนการแยกตะกั่วคลอไรด์ด้วยวิธี Fused salt electrolysis ตลอดจนปัญหาด้านเทคนิคบางประการยังต้องปรับปรุงแก้ไข เช่น ปัญหาการกัดกร่อน (Corrosion) วัสดุที่ใช้ในการทำอุปกรณ์ เครื่องมือ และปัญหาการสะสมของธาตุมลทิน ดังนั้นเพื่อเป็นการส่งเสริมและพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศโดยการเพิ่มมูลค่าแร่ตะกั่วที่ผลิตได้ซึ่งนำส่งออกเป็นเวลากว่า 10 ปีมาแล้ว เช่นในปี 2529 มีการส่งออกแร่ตะกั่วปริมาณ 54,127 เมตริกตัน คิดเป็นมูลค่าประมาณ 190 ล้านบาท การทดลองนี้จึงเป็นการนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยและเหมาะสมกับสถานะของประเทศมาประยุกต์ใช้กับแหล่งแร่ตะกั่วในประเทศเป็นครั้งแรก โดยเฉพาะบริเวณจังหวัดพัทลุงและยะลา ซึ่งมีปริมาณความสมบูรณ์ของเงินสูงมากถึง 1-2 กก./ตันแร่ และการแยกเงินจากแร่ตะกั่วด้วยกรรมวิธีโลหวิทยาสารละลายในต่างประเทศ ยังไม่มีการทดลองอย่างจริงจัง นอกจากนี้ยังได้ศึกษาหาวิธีใหม่ ๆ ที่ยังไม่มีการนำมาใช้ในการแยกตะกั่ว เพื่อแก้ไขปัญหาด้านเทคนิคโดยไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. Atomic Absorption Spectrophotometer แบบ AA 875 Varian Techtron (ผลิตในออสเตรเลีย)
2. Scanning Electron Microscope แบบ Philips-505 ผลิตในเนเธอร์แลนด์และแบบ JSM-35 CF ผลิตในญี่ปุ่น
3. เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrophotometer แบบ JSX-60 PA (ผลิตในญี่ปุ่น)
4. เครื่อง Miniflex X-ray Diffractometer (ผลิตในญี่ปุ่น) ใช้ตรวจสอบองค์ประกอบแร่
5. เครื่องกวนสารละลายใช้ระบบแม่เหล็กให้ความร้อนในตัวแบบ Thermolyne 1,000 Stir Plate ขนาด 725 วัตต์
6. เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง แบบ S.R.M.K. ขนาด 30V, 100A

7. เตา Crucible แบบใช้ไฟฟ้ารุ่น C.R. 5 และแบบใช้น้ำมันซึ่งสร้างขึ้นเอง
8. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Hoskins AH และแบบ Jenway 7500

แร่กาลีน่า จากบริษัทเหมืองแร่สากล จำกัด ผ่านกรรมวิธีการแต่งแร่แล้ว บริเวณแหล่งแร่
อยู่ที่ตำบลถ้ำทะลุ อำเภอบันนังสตา จังหวัดยะลา มีองค์ประกอบทางเคมีดังนี้คือ
Pb 82.17%, Ag 0.42%, Zn 0.04%, Cu 0.025%, Fe 1.38% และ As 0.12%

สารเคมี (AR grade) ได้แก่ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ของบริษัท May & Baker และ NaCl
ของบริษัท Merck

วิธีการ

การแยกตะกั่วและเงินจากแร่กาลีน่า (PbS) ใช้วิธีโลหวิทยาสารละลาย ดังแผนภูมิ
(รูปที่ 1) มีรายละเอียดดังนี้คือ

1. การละลายแร่ (Leaching) นำแร่กาลีน่ามาละลายในสารละลาย FeCl_3 และ NaCl
เพื่อเปลี่ยนตะกั่วซัลไฟด์ในแร่กาลีน่าให้เป็นตะกั่วคลอไรด์ การละลายแร่มี 2 วิธีคือ

1.1 การละลายแบบ 2 ขั้นตอน (Double stage leaching) คือ การนำแร่มาละลาย
ด้วย FeCl_3 ก่อน โดยให้ความร้อนกับสารละลายตามอุณหภูมิที่ต้องการ ใส่แร่ลงไปก่อนถึง
อุณหภูมิที่กำหนดเล็กน้อย กวนสารละลายด้วยความเร็วคงที่ เมื่อครบเวลาที่ต้องการ ทิ้งให้เย็น กรอง
สารละลายแยก Chloride slurry ออกจากสารละลายแล้วจึงนำ Chloride slurry มาละลายในสาร-
ละลาย NaCl ตามอุณหภูมิที่ต้องการเพื่อแยกตะกั่วคลอไรด์ออกจากสารประกอบคลอไรด์อื่น ๆ
แล้วกรองขณะที่ยังร้อนอยู่ ทิ้งสารละลายให้เย็นเพื่อตกผลึกตะกั่วคลอไรด์ กรองสารละลายแยก
ตะกั่วคลอไรด์ออกนำไปอบให้แห้ง ส่วนสารละลายนำไปใช้ในการแยกเงิน

1.2 การละลายขั้นตอนเดียว (Single stage leaching) คือ การนำแร่มาละลายด้วย
 FeCl_3 และ NaCl พร้อมกัน เพื่อตกผลึกตะกั่วคลอไรด์

ศึกษาตัวแปรสำคัญต่าง ๆ ในการละลายแร่ เช่น ความเข้มข้นของ NaCl อุณหภูมิ
การละลาย สัดส่วนของ FeCl_3/PbS และขนาดของเม็ดแร่

2. การแยกตะกั่วจากตะกั่วคลอไรด์ ได้ทดลอง 2 วิธีคือ

2.1 วิธีตกผลึกด้วยไฟฟ้า (Electrowinning) ใช้ HCl เป็นสารละลายตัวนำ ใช้
เหล็กเป็นแอโนดเพื่อกำจัดก๊าซคลอรีน ศึกษาตัวแปรสำคัญต่าง ๆ เช่น Current-density, Cell
voltage, ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายตัวนำ HCl

2.2 วิธีถลุงตะกั่วคลอไรด์ด้วยความร้อน (Smelting) ศึกษาปริมาณของปูนขาว (CaO) ที่ใช้ในการถลุง

3. การแยกเงิน

นำสารละลายที่ได้จากขั้นตอนการละลายมาแยกเงินออกด้วยวิธีซีเมนเตชัน (Cementation) ศึกษาชนิดของโลหะที่ใช้แทนที่เงินในสารละลาย และอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาแทนที่

ผลและวิจารณ์

1. การละลายแร่กาลีน่า

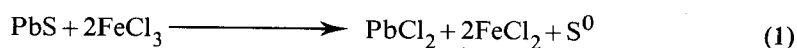
การทดลองนี้ได้ศึกษาอัตราการละลายของตะกั่วคลอไรด์ใน NaCl ความสำคัญของอุณหภูมิสารละลาย FeCl_3 , FeCl_3/PbS และขนาดของเม็ดแร่ ผลการทดลองมีดังนี้

1.1 อัตราการละลายของตะกั่วคลอไรด์ใน NaCl

ผลการศึกษาอัตราการละลายของตะกั่วคลอไรด์ใน NaCl ความเข้มข้น 150, 200, 250 และ 300 ก./ล. ที่อุณหภูมิ 20, 60 และ 90°ซ. (รูปที่ 2) พบว่า อัตราการละลายของตะกั่วสูงขึ้นตามความเข้มข้นและอุณหภูมิ ดังนั้นการแยกตะกั่วจึงต้องคำนึงถึงปริมาณตะกั่วในแร่เป็นหลัก แล้วจึงประยุกต์อัตราการละลายจากผลการทดลองนี้ไปใช้ละลายตะกั่วตามสภาวะที่ต้องการ ในการปฏิบัติควรใช้อุณหภูมิสูง 80–90°ซ. เพื่อความสะดวกในการกรองและตกผลึก PbCl_2 เพราะเป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่า การตกผลึกของตะกั่วคลอไรด์ค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

1.2 ความสำคัญของอุณหภูมิสารละลาย FeCl_3

การศึกษาผลของอุณหภูมิสารละลาย FeCl_3 ที่ 30, 60 และ 90°ซ. ในการแยกตะกั่วโดยละลายแร่กาลีน่าเป็นเวลา 15, 30, 60 และ 120 นาที ตามลำดับ ตามปฏิกิริยาเคมีของสมการที่ 1



เมื่อใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ FeCl_3/PbS เท่ากับ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ (รูปที่ 3) พบว่า การสกัดตะกั่วที่อุณหภูมิ 30°ซ. ได้ผลน้อยที่สุดคือประมาณ 18.5, 24.8 และ 28.4% เมื่อใช้ FeCl_3/PbS เท่ากับ 1, 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ ในการละลาย 15 นาที และสูงขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อใช้เวลานานขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสารละลายสูงขึ้นเป็น 60 และ 90°ซ. ปริมาณ

การสกัดตะกั่วที่สูงขึ้นตามลำดับ ในทางปฏิบัติไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100°ซ. เพราะกัมมันต์ที่เกิดขึ้นเริ่มละลายและเคลือบผิวของเม็ดแร่ ทำให้ปฏิกิริยาการละลายของเม็ดแร่ลดลง

1.3 บทบาทของ FeCl_3/PbS

ผลการศึกษาปริมาณการใช้ FeCl_3/PbS (โดย นน.) ในอัตราส่วน 1, 2 และ 3 ที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90°ซ. โดยการละลายแร่กาลีน่าเป็นเวลา 15, 30, 60 และ 120 นาที (รูปที่ 3) พบว่าที่อุณหภูมิ 30°ซ. อัตราส่วน 1:1 ให้ประสิทธิภาพการแยกตะกั่วต่ำมากที่สุดคือระหว่าง 18.5–36% โดยมีปริมาณการใช้ Fe^{+3} เพียง 26–50% เท่านั้น และพบว่าเปอร์เซ็นต์การแยกตะกั่วสูงขึ้นเล็กน้อยเป็น 40.6% เมื่อใช้อัตราส่วน 3 เท่าซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า อัตราการแยกตะกั่วสูงขึ้นตามความเข้มข้นกล่าวคือ เมื่อใช้อัตราส่วนของ FeCl_3/PbS เท่ากับ 1 จะมีตะกั่วละลายอยู่ประมาณ 1.27 ก./ล. และสูงขึ้นเป็น 1.5 และ 2.2 ก./ล. ที่อัตราส่วน 2 และ 3 เท่า ตามลำดับ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ว่าเปอร์เซ็นต์การแยกตะกั่วสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณตะกั่วบางส่วนถูกละลายใน FeCl_3 มากขึ้น ทำให้ตะกั่วในกากแร่มีปริมาณลดลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการละลายเป็น 60°ซ. ทำให้ประสิทธิภาพการแยกตะกั่วสูงขึ้นเป็น 82–83% เมื่อใช้อัตราส่วนของ FeCl_3/PbS เท่ากับ 2 และ 3 เท่า ไม่ได้มีผลให้เปอร์เซ็นต์การแยกตะกั่วเปลี่ยนไปมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ Fe^{+3} ในสารละลายยังเหลืออยู่เป็นจำนวนมากเช่นกัน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการใช้ FeCl_3 สูงขึ้นไม่เป็นผลดีต่อการแยกตะกั่วแต่อย่างใด และเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 90°ซ. ทำให้ประสิทธิภาพการแยกตะกั่วสูงขึ้นถึง 99.60% ซึ่งลักษณะผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่า อุณหภูมิเป็นองค์ประกอบสำคัญยิ่งซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ในข้อ 1.2 ปริมาณการใช้ FeCl_3/PbS ที่คำนวณจากสมการที่ 1 มีค่า 1.36 เท่า ในขณะที่ผลจากการทดลองมีค่าสูงกว่าทางทฤษฎีเล็กน้อย คือประมาณ 1.5 เท่า จึงสรุปได้ว่าการแยกตะกั่วจากแร่กาลีน่าควรใช้ปริมาณของ FeCl_3/PbS ในอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง 1.5–2 เท่า ซึ่งสามารถยืนยันได้จากรูปที่ 3 ที่แสดงเส้นกราฟของ FeCl_3/PbS เท่ากับ 2 และ 3 มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก

1.4 ความสำคัญของขนาดเม็ดแร่กาลีน่า

ผลการทดลองศึกษาเกี่ยวกับขนาดเม็ดแร่กาลีน่า +100, +200, และ -270 เมช ที่อุณหภูมิ 90°ซ. โดยใช้อัตราส่วนของ FeCl_3/PbS เท่ากับ 3 เป็นเวลา 15, 30, 60 และ 120 นาที พบว่าการละลายของเม็ดแร่ขนาด -270 เมช ให้ประสิทธิภาพในการแยกตะกั่วสูงมากเพียงระยะเวลา 15 นาที สามารถแยกตะกั่วได้สูงถึง 97% ในขณะที่ +100 และ +200 เมช แยกตะกั่วได้ 71 และ 79% ตามลำดับ (รูปที่ 4) และเมื่อใช้เวลาการละลายนาน 60–120 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการละลายของ -270 เมช และ +200 เมช มีค่าสูงถึง 99.9% ตาม Shrinking Core Model อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการบดแร่ให้ละเอียดเกินไปจะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นมาก แม้ว่าจะให้ผลดีต่อการละลายมากกว่าก็ตาม

2. การแยกตะกั่วคลอไรด์ด้วยวิธีไฟฟ้า

การทดลองนี้ได้ศึกษาบทบาทของตัวแปรต่อไปนี้คือ Current density (C.D.) อุณหภูมิ ระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรด และความเข้มข้นของสารละลายตัวนำไฟฟ้าดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 Current density

ผลการศึกษา C.D. ต่อการแยกตะกั่วคลอไรด์ 113, 226, 339 และ 452 แอมแปร์/ตร.ม. ที่ 40°C. ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 3.81 ซม. มีเหล็กเป็นแอโนด ส่วนทองแดงเป็นแคโทด โดยใช้ HCl เป็นสารละลายตัวนำไฟฟ้า ความเข้มข้น 0.5, 1, 2, 4, 8 และ 16% โดยปริมาตร (ตารางที่ 1) พบว่าอัตราการแยกตะกั่วคลอไรด์สูงขึ้นตามค่า C.D. ดังเช่นที่ 8% HCl ปริมาตร Deposition ในเวลา 30 นาทีเพิ่มจาก 9.6 ก. เป็น 18.0, 22.6 และ 30.1 ก. เมื่อใช้ C.D. เท่ากับ 113, 226, 339 และ 452 แอมแปร์/ตร.ม. ตามลำดับ สำหรับมลทินเจือปนในผงตะกั่วที่แยกได้มีเหล็ก ทองแดง และเงิน เป็นหลัก โดยปริมาณเหล็กในผงตะกั่วสูงขึ้นตามค่า C.D. อย่างเห็นได้ชัด ตามรูปที่ 5 สำหรับทองแดงซึ่งมีค่า Nobility มากกว่าตะกั่ว จะเจือปนอยู่ในผงตะกั่ว โดยมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า C.D. สูงขึ้นเช่นเดียวกับเงิน ดังนั้น C.D. จึงมีส่วนสำคัญยิ่งในการควบคุมปริมาณมลทินในผงตะกั่ว ทั้งนี้ เนื่องจากค่า C.D. มีความสัมพันธ์โดยตรงกับ ค่า Cell voltage ซึ่งจะเกี่ยวข้องไปถึงปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าอีกด้วย

2.2 ความเข้มข้นสารละลายตัวนำไฟฟ้า HCl

การศึกษาคความเข้มข้นสารละลายตัวนำไฟฟ้า HCl ที่ 0.5, 1, 2, 4, 8 และ 16% โดยปริมาตรที่ค่า C.D. เท่ากับ 113, 226, 339 และ 452 แอมแปร์/ตร.ม. ตามลำดับ อุณหภูมิ การละลาย 40°C. โดยใช้เหล็กและทองแดงเป็นแอโนดและแคโทด ตามลำดับ (ตารางที่ 1) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย HCl ค่า Cell voltage จะลดลงตามลำดับตามความสัมพันธ์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 ดังนั้นอัตราการแยกตะกั่วคลอไรด์สามารถควบคุมได้โดยความเข้มข้นของสารละลาย ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมากเกินไปจะทำให้อัตราการแยกตะกั่วคลอไรด์ลดน้อยลง เนื่องจากค่า Cell voltage ต่ำลงตามไปด้วย ค่า Decomposition voltage ของตะกั่วคลอไรด์ในการทดลองนี้คำนวณได้ 0.556 โวลต์ ดังนั้นการแยกตะกั่วคลอไรด์ที่ค่า Cell voltage เท่ากับ 0.6 โวลต์ จากการทดลองนี้จึงให้ค่าน้อยที่สุด อย่างไรก็ตามการทดลองนี้แสดงว่าการใช้เหล็กเป็นแอโนดสามารถลดค่า Cell voltage ลงได้มาก ทั้งนี้จากการวิเคราะห์สารละลาย HCl หลังการแยกตะกั่วแล้วพบว่า เหล็กในสารละลายส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ Fe^{+2} จึงเป็นไปตามทฤษฎีที่คาดไว้ว่าการลดค่า Cell voltage โดยใช้ Fe^{+2} เป็นตัวจำกัดก๊าซคลอรีนมีความเป็นไปได้และมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ Fe^{+3} เป็นตัวจำกัดก๊าซคลอรีนดังที่ M.J. Krammer et al.² ได้ศึกษาไว้

2.3 อุณหภูมิในการแยกตะกั่วคลอไรด์ในสารละลาย HCl

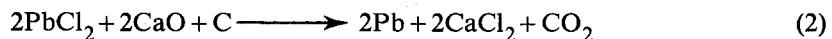
การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการแยกตะกั่วคลอไรด์ที่ 40, 55, 65 และ 80°C. ในสารละลาย HCl ความเข้มข้น 2 และ 8% โดยปริมาตรตามลำดับ โดยใช้ค่า C.D. เท่ากับ 452 แอมแปร์/ตร.ม. และระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 3.81 ซม. พบว่าอัตราการแยกตะกั่วคลอไรด์สูงขึ้นตามอุณหภูมิ (ตารางที่ 2) โดยค่า Cell voltage มีแนวโน้มลดลง ซึ่งเป็นผลให้การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในกรรมวิธีลดน้อยลง สำหรับมลทินที่สำคัญได้แก่ เหล็กและทองแดง ไม่ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เด่นชัดดังค่า C.D. แต่ปริมาณเงินมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนั้นลักษณะของผงตะกั่วที่เกาะบนแผ่นแคโทดค่อนข้างวากว่าที่อุณหภูมิต่ำ

2.4 ผลของ Electrode spacing

การศึกษาผลของระยะระหว่างแผ่นทองแดงซึ่งเป็นแคโทดและเหล็กซึ่งเป็นแอโนดในสารละลายมีความเข้มข้น 8% HCl ที่อุณหภูมิ 40°C. โดยใช้ค่า C.D. เท่ากับ 452 แอมแปร์/ตร.ม. ที่ระยะ 2.54, 3.81, 5.08, 6.35 และ 7.62 ซม. ปรากฏว่าอัตราการแยกตะกั่วคลอไรด์ในเวลา 30 นาที ที่ระยะห่างดังกล่าวไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด (ตารางที่ 3) ดังนั้นหากวางระยะของแผ่นอิเล็กโทรดไว้ห่างมากเกินไปจะมีผลทำให้สิ้นเปลืองพลังงานสูงขึ้น

3. การถลุงตะกั่วคลอไรด์

การทดลองถลุงตะกั่วคลอไรด์ซึ่งตกผลึกจากสารละลายที่ได้จากการละลายแร่กาลีน่าด้วย FeCl_3 และ NaCl เป็นกรรมวิธีการผลิตโลหะตะกั่วบริสุทธิ์ได้ง่าย เพราะตะกั่วคลอไรด์ดังกล่าวมีมลทินของธาตุอื่นเจือปนเล็กน้อยเช่น เหล็ก ทองแดง และเงิน ส่วนผสมอื่นที่สำคัญได้แก่ ปูนขาว (CaO) และถ่านโค้ก การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของปูนขาวต่อการแยกตะกั่วที่ปริมาณต่าง ๆ กันคือ 20, 25, 30, 35 และ 40% โดยน้ำหนักของตะกั่วคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 1,200°C. เป็นเวลา 30 นาที ใช้ถ่านโค้ก 20% ผลการทดลอง (ตารางที่ 4) แสดงว่าปริมาณ CaO เป็นปัจจัยสำคัญในการถลุงดังสมการเคมีที่ 2 โดยมีปริมาณ Recovery 90%



โลหะตะกั่วที่ถลุงได้มีความบริสุทธิ์อยู่ในช่วง 99.7–99.9% มีทองแดง เหล็ก และเงินเป็นธาตุมลทินหลัก สำหรับเหล็กและทองแดงสามารถแยกออกได้โดยวิธี Liquation และ Sulfur dressing

4. การแยกเงินจากสารละลายด้วยวิธีซีเมนเตชัน

การแยกโลหะจากสารละลายด้วยการตกตะกอน (Precipitation) โดยใช้โลหะที่มี Nobility ต่ำกว่าตาม Electrochemical series เข้าแทนที่โลหะที่มี Nobility สูงกว่าเรียกว่าซีเมนเตชัน เป็นวิธีที่ง่ายและทำกันมานานแล้ว การทดลองนี้ได้เลือกศึกษาทองแดงและเหล็กซึ่งมีค่า Nobility ต่ำกว่าเงินแทนที่ในสารละลาย $\text{FeCl}_3/\text{NaCl}$, NaCl และการทำเงินผงให้บริสุทธิ์

4.1 การแยกเงินในสารละลาย $\text{FeCl}_3/\text{NaCl}$

ทดลองแยกเงินผงจากสารละลาย $\text{FeCl}_3/\text{NaCl}$ ที่ได้จากการละลายแร่แบบขั้นตอนเดียวด้วยวิธีซีเมนเตชัน ที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90°C. โดยใช้เหล็กและทองแดงเข้าแทนที่เงินในสารละลาย ตารางที่ 5 แสดงค่าของปริมาณธาตุต่าง ๆ ในสารละลายหลังทำซีเมนเตชันด้วยทองแดงและเหล็กตามลำดับ ส่วนตารางที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์การแยกเงินที่ได้ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นสิ่งสำคัญมากในการทำซีเมนเตชัน โดยอัตราการแยกเงินจากสารละลายเมื่อแทนที่ด้วยเหล็กค่อนข้างเร็วกว่าทองแดง ทั้งนี้เนื่องจากค่า Nobility ของเหล็กต่ำกว่าทองแดงมาก โดยที่สถานะเดียวกันเหล็กสามารถแทนที่เงินได้กว่า 99% ในขณะที่ทองแดงแทนที่เงินได้เพียง 61.67% แต่ข้อดีของการใช้ทองแดงแทนที่คือเงินผงที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่า (ตารางที่ 7)

4.2 การแยกเงินจากสารละลาย NaCl

ทดลองแยกเงินจากสารละลาย NaCl ที่ได้จากการละลายแร่กาลีน่าแบบ 2 ขั้นตอนด้วยวิธีซีเมนเตชัน ที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90°C. โดยใช้เหล็กและทองแดงแทนที่เงินในสารละลายเช่นเดียวกับการแยกเงินจากสารละลาย $\text{FeCl}_3/\text{NaCl}$ ที่ได้จากการละลายแร่แบบขั้นตอนเดียวดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 4.1 ตารางที่ 8 แสดงค่าปริมาณของเงิน ตะกั่ว เหล็ก และทองแดงที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังทำซีเมนเตชันด้วยทองแดง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับการทำซีเมนเตชันจากสารละลาย $\text{FeCl}_3/\text{NaCl}$ แล้วจะเห็นว่า การแทนที่เงินจากสารละลาย NaCl ค่อนข้างเร็วกว่า ทั้งนี้เนื่องจากมลทินของธาตุต่าง ๆ ใน NaCl น้อยกว่าการละลายแบบขั้นตอนเดียว โดยเฉพาะ Fe จาก FeCl_3 ซึ่งมลทินเหล่านี้ล้วนมีผลต่อการทำซีเมนเตชันทั้งสิ้น ตารางที่ 8 และ 9 แสดงค่าปริมาณของเงินและมลทินต่าง ๆ เมื่อแทนที่ด้วยเหล็กซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับที่แทนที่ด้วยทองแดงแล้วมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก ตารางที่ 10 แสดงค่าความบริสุทธิ์ของเงินผงที่ได้จากการทำซีเมนเตชันด้วยทองแดง จะเห็นได้ว่าการทำซีเมนเตชันจากสารละลาย NaCl จากการละลายแบบ 2 ขั้นตอน (Double stage leaching) นั้น ได้เงินมีความบริสุทธิ์สูงกว่าการแทนที่ด้วยเงินจากสารละลาย $\text{FeCl}_3/\text{NaCl}$ ทั้งนี้เนื่องจากมีมลทินในสารละลายน้อยกว่านั่นเอง

4.3 การหลอมเงินผง

นำเงินผงที่ได้จากการทำซีเมนเตชัน มาหลอมในเตาน้ำมันโดยเติมซิลิกาบอแรกซ์ และโซเดียมคาร์บอเนตในปริมาณ 15-20% โดยน้ำหนัก เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 1,200°ซ. ผลการทดลองได้โลหะเงินมีความบริสุทธิ์กว่า 98% มีตะกั่ว เหล็กและทองแดงเป็นมลทิน

สรุป

การทดลองแยกตะกั่วจากแร่กาลีน่าด้วย FeCl_3 และ NaCl สามารถสกัดตะกั่วออกได้กว่า 99% โดยผลการทดลองที่ได้แสดงว่า อุณหภูมิ ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย FeCl_3 เวลาการละลายและขนาดเม็ดแร่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการละลายแร่กาลีน่า สำหรับ NaCl เป็นปัจจัยสำคัญในการละลายตะกั่วคลอไรด์ โดยอัตราการละลายของตะกั่วสูงขึ้นตามความเข้มข้นของ NaCl และอุณหภูมิของการละลาย การละลายแร่กาลีน่าแบบขั้นตอนเดียวมีข้อดีว่าการละลายแบบ 2 ขั้นตอนในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่าย แต่ผลึกตะกั่วคลอไรด์ที่ได้มีความบริสุทธิ์น้อยกว่า ซึ่งมีผลทำให้โลหะตะกั่วที่ได้มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่าด้วยเช่นกัน ดังนั้นการจะตัดสินใจว่าการละลายวิธีใดเหมาะสมกว่ากันนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณมลทินของธาตุต่าง ๆ ของแหล่งแร่ นั้น ๆ การทดลองนี้ได้นำตะกั่วคลอไรด์ที่ได้มาถลุงด้วยความร้อนสูงและวิธีไฟฟ้า เพื่อหากรรมวิธีที่เหมาะสมกับสภาวะของประเทศในเชิงพาณิชย์ โลหะตะกั่วที่ถลุงได้มีความบริสุทธิ์กว่า 99.99% มีเงินเป็นมลทินหลัก เนื่องจากแหล่งแร่ตะกั่วดังกล่าวมีความสมบูรณ์ของเงินสูง ซึ่งจำเป็นจะต้องแยกออกเพราะมีราคาค่อนข้างสูง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกรรมวิธีถลุงตะกั่วคลอไรด์ด้วยความร้อนกับวิธี Fused salt electrolysis แล้ว การถลุงด้วยความร้อนดูจะเหมาะสมกว่า เพราะไม่สิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงมาก และไม่ประสบปัญหาการกัดกร่อนที่ทำให้วิธี Fused salt electrolysis ไม่สามารถนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ และการทดลองนี้พบว่า การถลุงตะกั่วคลอไรด์ที่ได้จากการละลายแร่กาลีน่าแบบ 2 ขั้นตอนให้โลหะตะกั่วมีความบริสุทธิ์สูงกว่าการละลายแบบขั้นตอนเดียว

ส่วนการแยกตะกั่วคลอไรด์ด้วยวิธีไฟฟ้าในสารละลายตัวนำ HCl เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะสามารถลดปัญหาหลาย ๆ ด้านที่เกิดขึ้นในกรรมวิธี Fused salt electrolysis เช่น ด้านการสิ้นเปลืองพลังงานและการกัดกร่อน นอกจากนี้อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและง่ายต่อการออกแบบสำหรับผู้ประกอบการขนาดเล็ก การศึกษานี้ได้พัฒนาการใช้พลังงานไฟฟ้าให้ลดลงกว่าเดิมโดยใช้เหล็กเป็นแผ่นแอโนด ทำให้ Decomposition voltage ลดลงจาก 0.897 โวลต์ เหลือเพียง 0.566 โวลต์ นอกจากนี้ยังช่วยลดมลภาวะจากก๊าซคลอรีน โดยสารละลายตัวนำไฟฟ้าดังกล่าวสามารถนำมาหมุนเวียนไปใช้ในกรรมวิธีได้อีกเมื่อปรับปริมาณความเข้มข้นของสารละลายตามสภาวะที่ต้องการ การทดลองนี้แตกต่างไปจากงานวิจัยอื่นหลายประการ เช่น การออกแบบเซลล์ใช้ระบบง่าย ๆ ไม่ต้องมี Diaphragm กั้นระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดที่ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานสูงขึ้น

การใช้เหล็กเป็นแผ่นแอโนดทำให้ลดค่า Cell voltage ได้ ส่วนมลทินต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นสามารถแยกได้ด้วยวิธี Liqutation และ Sulfur dressing สำหรับปริมาณเงินในแร่กาสนาที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า 4 กก./ตันแร่นั้น สามารถแยกได้ด้วยวิธีซีเมนเตชัน โดยใช้โลหะที่มีค่า Nobility ต่ำกว่าเงินคือ เหล็ก และทองแดงเป็นตัวแทนที่เงินในสารละลาย $FeCl_3/NaCl$ และ $NaCl$ ที่ได้จากการละลายแบบขั้นตอนเดียวและแบบ 2 ขั้นตอนตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเหล็กสามารถแทนที่เงินได้ดีกว่าทองแดง เนื่องจากเหล็กมีค่า Nobility ต่ำกว่าทองแดง แต่เงินผงที่ได้มีความบริสุทธิ์น้อยกว่าเงินผงที่แทนที่ด้วยทองแดงเนื่องจาก Nobility ที่แตกต่างกันเช่นกัน สำหรับการแทนที่เงินในสารละลาย $FeCl_3/NaCl$ แบบการละลายขั้นตอนเดียว มีข้อดีว่าการแทนที่เงินในสารละลาย $NaCl$ ที่ได้จากการละลายแบบ 2 ขั้นตอน เนื่องจากปริมาณเงินส่วนใหญ่จะอยู่ในสารละลาย $FeCl_3/NaCl$ ในขณะที่การละลายแบบ 2 ขั้นตอนนั้น ปริมาณเงินบางส่วนละลายอยู่ใน $FeCl_3$ อย่างไรก็ตามการละลายแบบขั้นตอนเดียวก็มีข้อเสียเปรียบในแง่ของความบริสุทธิ์ของเงิน เพราะสารละลาย $FeCl_3/NaCl$ มีมลทินของธาตุมากกว่า

คำขอบคุณ

รายงานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณประโชติ สุวรรณรัฐ ผู้อำนวยการกองโลหกรรม คุณรุจยา บุญยทุมานนท์ คุณยศยง สุรกีจบรรหาร คุณปราวณี ชูศรี และข้าราชการกองโลหกรรม ที่ให้การสนับสนุนและมีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้สำเร็จด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Haver, P.P. and Wong, M.M. Ferric Chloride Brine Leaching of Galena Concentrate. USBM RI 8105, 1976, 17.
2. Krammer, M.J., Duby, P.F. and Parker, P.D. Electrowinning of Lead from Complex Chloride Solutions. Paper Presented at the 110th AIME Annual Meeting, Chicago, 1981.
3. Stevenson, E.J. Extractive Metallurgy (Recent Advances). Noyes Data Corporation, Park Ridge, 1977.
4. Wong, M.M. Ferric Chloride Leach-Electrolysis Process for Production of Lead, In Cigan, J.M. (ed.), Lead-Zinc-Tin (80), 1980, 445-454.

ตารางที่ 1. ผลของ C.D. ต่อการแยกตะกั่วกลอไรด์ในสารละลาย HCl ด้วยไฟฟ้า

%HCl โดย ปริมาตร	Current density (แอมแปร์/ตร.ม.)	Cell voltage (โวลต์)	นน. ตะกั่วที่ เกาะบนแคโทด (ก.)	% ธาตุมลทินต่าง ๆ ในผงตะกั่ว		
				เหล็ก	ทองแดง	เงิน
0.5	113	3.7	9.6	0.004	0.027	0.073
	226	5.0	18.1	0.070	0.006	0.068
	339	5.5	25.5	0.270	0.010	0.039
	452	6.0	29.6	0.080	0.008	0.039
1	113	1.7	10.0	0.011	0.001	0.043
	226	2.9	24.0	0.013	0.001	0.016
	339	3.0	20.6	0.010	0.001	0.019
	452	3.1	26.5	0.031	0.003	0.014
2	113	0.9	7.5	0.007	0.070	0.061
	226	2.2	14.0	0.006	0.026	0.160
	339	3.0	20.5	0.008	0.011	0.330
	452	3.2	29.5	0.021	0.007	0.190
4	113	0.9	7.6	0.006	0.017	0.610
	226	1.4	17.6	0.007	0.026	0.160
	339	1.8	23.0	0.026	0.008	0.130
	452	2.4	29.5	0.037	0.011	0.060
8	113	0.8	9.6	0.014	0.600	0.130
	226	1.3	18.0	0.016	0.030	0.050
	339	1.8	22.6	0.022	0.012	0.035
	452	2.2	30.1	0.018	0.009	0.030
16	113	0.6	6.0	1.012	1.063	1.011
	226	1.0	12.5	0.011	0.320	0.015
	339	1.0	16.4	0.010	0.100	0.004
	452	1.5	18.0	0.021	0.033	0.002

ตารางที่ 2. ผลของอุณหภูมิและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกตะกั่วกลอไรด์

% HCl โดยปริมาตร	อุณหภูมิ (°ซ.)	โวลต์	kWh/kg wt. of deposition	นน. ตะกั่วที่ เกาะบนแคโทด (ก.)	% ธาตุผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในผงตะกั่ว		
					เหล็ก	ทองแดง	เงิน
2	40	3.1	0.590	21.0	0.093	0.034	0.0010
	55	3.0	0.441	27.2	0.013	0.020	0.0003
	65	2.4	0.331	29.0	0.030	0.030	0.0008
	80	2.2	0.332	26.5	-	0.022	0.0016
8	40	1.6	0.255	25.1	0.013	0.019	0.0050
	55	1.4	0.248	22.6	0.028	0.044	0.0023
	65	1.1	0.221	19.9	0.043	0.025	0.0013
	80	1.0	0.163	24.5	0.022	0.074	0.0010

ตารางที่ 3. ผลของ Electrode spacing ในการแยกตะกั่วกลอไรด์

Electrode spacing (ซม.)	Cell voltage (โวลต์)	นน.ตะกั่วที่เกาะบนแคโทด (ก.)	kWh/kg wt of deposition	% ธาตุมลทินต่าง ๆ ในผงตะกั่ว		
				เหล็ก	ทองแดง	เงิน
2.54	1.4	16.6	0.337	0.140	0.034	0.088
3.81	1.8	17.0	0.423	0.057	0.040	0.090
5.08	1.8	14.6	0.493	0.057	0.051	0.160
6.35	1.8	18.0	0.400	0.013	0.014	0.290
7.62	2.1	18.5	0.454	0.032	0.220	0.120

ตารางที่ 4. ผลของ CaO ในการลดตะกั่วกลอไรด์ที่อุณหภูมิ 1200°ซ.

% ปูนขาว	นน. โลหะตะกั่ว (ก.)	นน. ตะกรัน (ก.)	% ธาตุมลทินในโลหะตะกั่ว			% ความบริสุทธิ์ของโลหะตะกั่ว	% การแยกโลหะตะกั่ว
			เหล็ก	ทองแดง	เงิน		
20	51.5	36.65	0.053	0.002	0.220	99.725	71.33
25	52.6	25.10	0.002	0.006	0.021	99.971	73.03
30	58.1	20.57	0.026	0.001	0.079	99.894	80.61
35	61.0	38.50	0.024	0.002	0.086	99.888	84.63
40	65.0	24.65	-	0.003	0.006	99.991	90.27
45	65.0	37.50	0.014	0.002	0.003	99.981	90.26

ตารางที่ 5. ปริมาณของธาตุต่างๆ ในสารละลาย FeCl₃/NaCl (จากการละลายชั้นตอนเดียว) หลังทิ้งชั้นเมมเบรนด้วยทองแดงและเหล็ก

โลหะ ที่ใส่แทนที่ เงิน	เวลา (นาที)	ปริมาณธาตุในสารละลาย FeCl ₃ /NaCl ณ อุณหภูมิต่างๆ											
		เงิน (พีพีเอ็ม)			ตะกั่ว (ก./ล.)			ทองแดง (ก./ล.)			เหล็ก (ก./ล.)		
		30ชม.	60ชม.	90ชม.	30ชม.	60ชม.	90ชม.	30ชม.	60ชม.	90ชม.	30ชม.	60ชม.	90ชม.
ทองแดง	0	60	60	60	20.12	20.12	20.12	Trace	Trace	Trace	23.78	23.78	23.78
	5	59	56	31	20.60	20.60	20.70	1.06	1.42	2.28	23.56	23.66	24.40
	10	58	49	26	21.08	28.84	21.06	0.50	2.26	3.62	23.18	23.80	24.52
	20	54	50	23	21.16	20.20	21.20	2.42	3.94	6.20	23.80	23.78	24.34
	40	50	43	23	20.32	20.50	21.62	4.40	6.88	8.78	23.22	23.74	23.82
เหล็ก	0	60	60	60	20.12	20.12	20.12	Trace	Trace	Trace	23.78	23.78	23.78
	5	53	43	23	20.11	20.10	21.44	Trace	Trace	Trace	24.15	24.62	25.50
	10	48	38	10	20.67	20.40	20.88	Trace	Trace	Trace	24.15	25.28	27.78
	20	40	8.9	4.8	20.00	21.56	21.02	Trace	Trace	Trace	24.54	27.04	28.56
	40	25	1.5	0.5	20.22	21.66	21.06	Trace	Trace	Trace	25.81	27.54	28.00

ตารางที่ 6. เปอร์เซ็นต์การแยกเงินผลที่ได้จากการทำซีเมนเตชันด้วยทองแดงและเหล็ก

เวลา (นาที)	ทองแดง			เหล็ก		
	30ซ.	60ซ.	90ซ.	30ซ.	60ซ.	90ซ.
5	1.67	6.67	48.33	11.67	28.33	61.67
10	3.33	18.33	56.67	20.00	36.67	83.33
20	10.00	16.67	61.67	33.33	85.17	92.00
40	16.67	28.33	61.67	58.33	97.50	99.17

ตารางที่ 7. ค่าความบริสุทธิ์ของเงินผลที่ได้จากการทำซีเมนเตชันด้วยทองแดงและเหล็ก (จากการละลาย
ชั้นตอนเดียว)

ชนิดของโลหะที่แทนที่เงินในสารละลาย	ปริมาณของธาตุต่าง ๆ ในเงินผล			
	% เงิน	% ตะกั่ว	% เหล็ก	% ทองแดง
ทองแดง	88.18	3.83	7.49	0.50
เหล็ก	82.11	12.47	4.91	0.51

ตารางที่ 8. ปริมาณธาตุในสารละลาย NaCl (จากการละลายแบบ 2 ขั้นตอน) หลังที่เพิ่มมาตรฐานด้วยทองแดงและเหล็ก

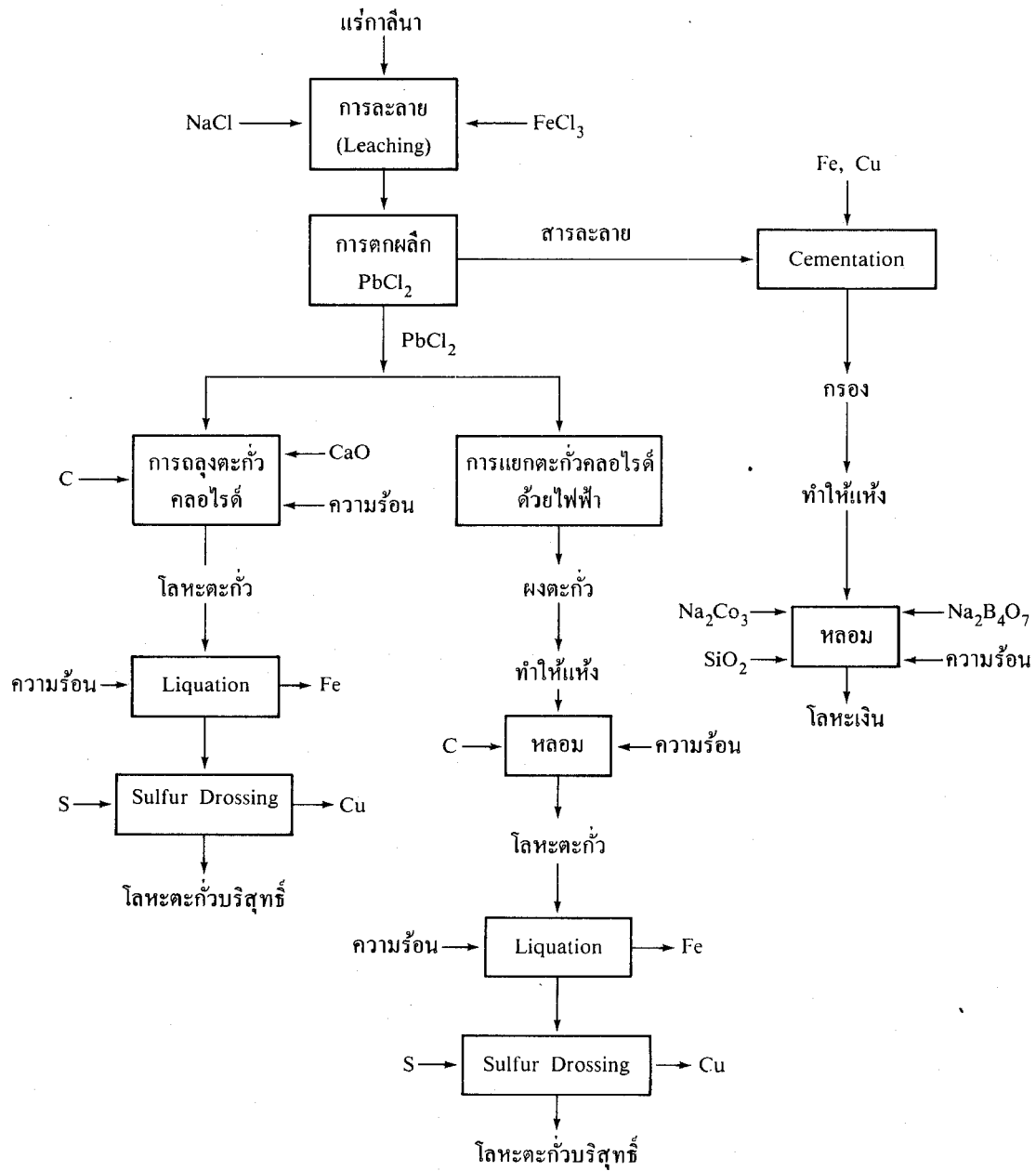
โลหะที่ ใช้แทน- ที่เงิน	เวลา (นาที)	ปริมาณธาตุในสารละลายที่อุณหภูมิต่าง ๆ												ทองแดง และสังกะสี
		เงิน (พีพีเอ็ม)			ตะกั่ว (ก./ล.)			เหล็ก (พีพีเอ็ม)						
		30ข.	60ข.	90ข.	30ข.	60ข.	90ข.	30ข.	60ข.	90ข.				
ทองแดง	0	35	35	35	10.39	10.39	10.39	135	135	135	135	135	Trace	
	5	31	28	26	10.39	10.44	10.16	117	108	108	108	108		
	10	29	25	21	10.17	10.56	10.50	111	108	108	108	104		
	20	22	17	11	10.34	10.56	10.27	100	86	86	88	88		
	40	16	4	3	10.34	10.44	10.27	89	76	76	76	76		
เหล็ก	0	35	35	35	10.39	10.39	10.39	135	135	135	135	135		
	5	31	29	25	10.22	10.10	10.15	123	160	160	283	283		
	10	29	22	18	10.17	10.08	9.60	131	202	202	395	395		
	20	23	18	4	10.73	10.00	9.60	139	254	254	425	425		
	40	13	2	1	10.28	9.75	9.60	150	288	288	535	535		

ตารางที่ 9. เปอร์เซ็นต์การแยกเงินจากสารละลาย NaCl ด้วยทองแดงและเหล็ก (การละลายแบบ 2 ขั้นตอน)

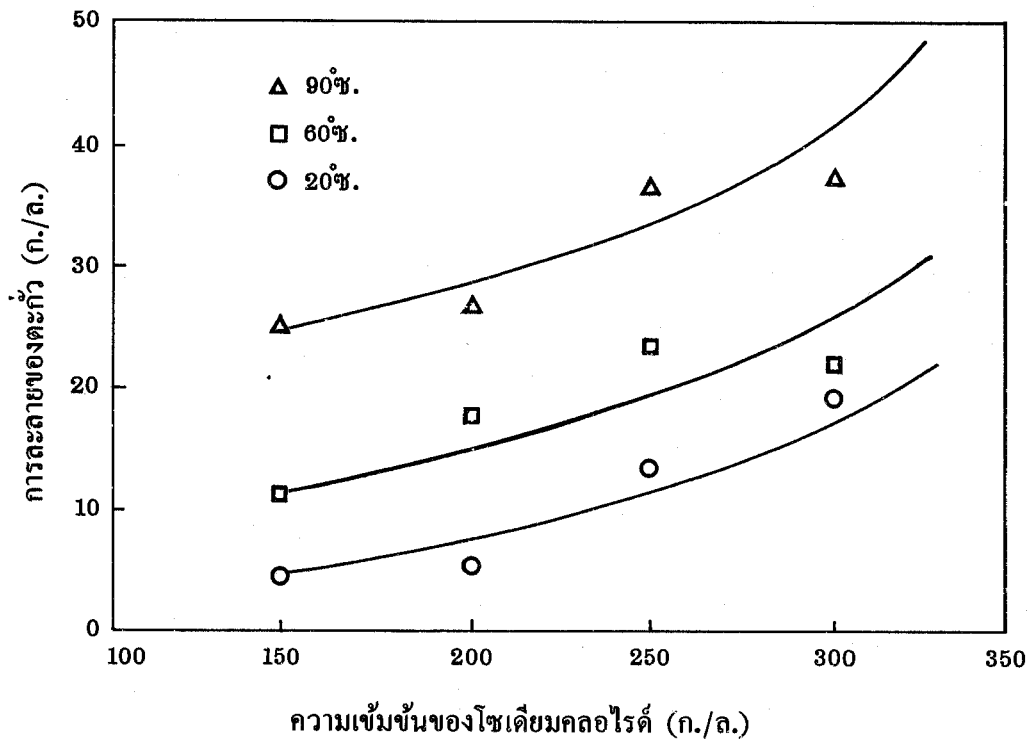
เวลา (นาที)	ทองแดง			เหล็ก		
	30ชม.	60ชม.	90ชม.	30ชม.	60ชม.	90ชม.
5	11.43	20	25.71	11.43	17.14	28.57
10	17.14	28.57	40.00	17.14	37.14	48.57
20	37.14	51.43	68.57	34.28	48.57	88.57
40	54.28	88.57	91.43	62.86	94.28	97.14

ตารางที่ 10. แสดงค่าความบริสุทธิ์ของเงินผงจากการทำซีเมนต์ชั้นด้วยทองแดง (การละลายแบบ 2 ขั้นตอน)

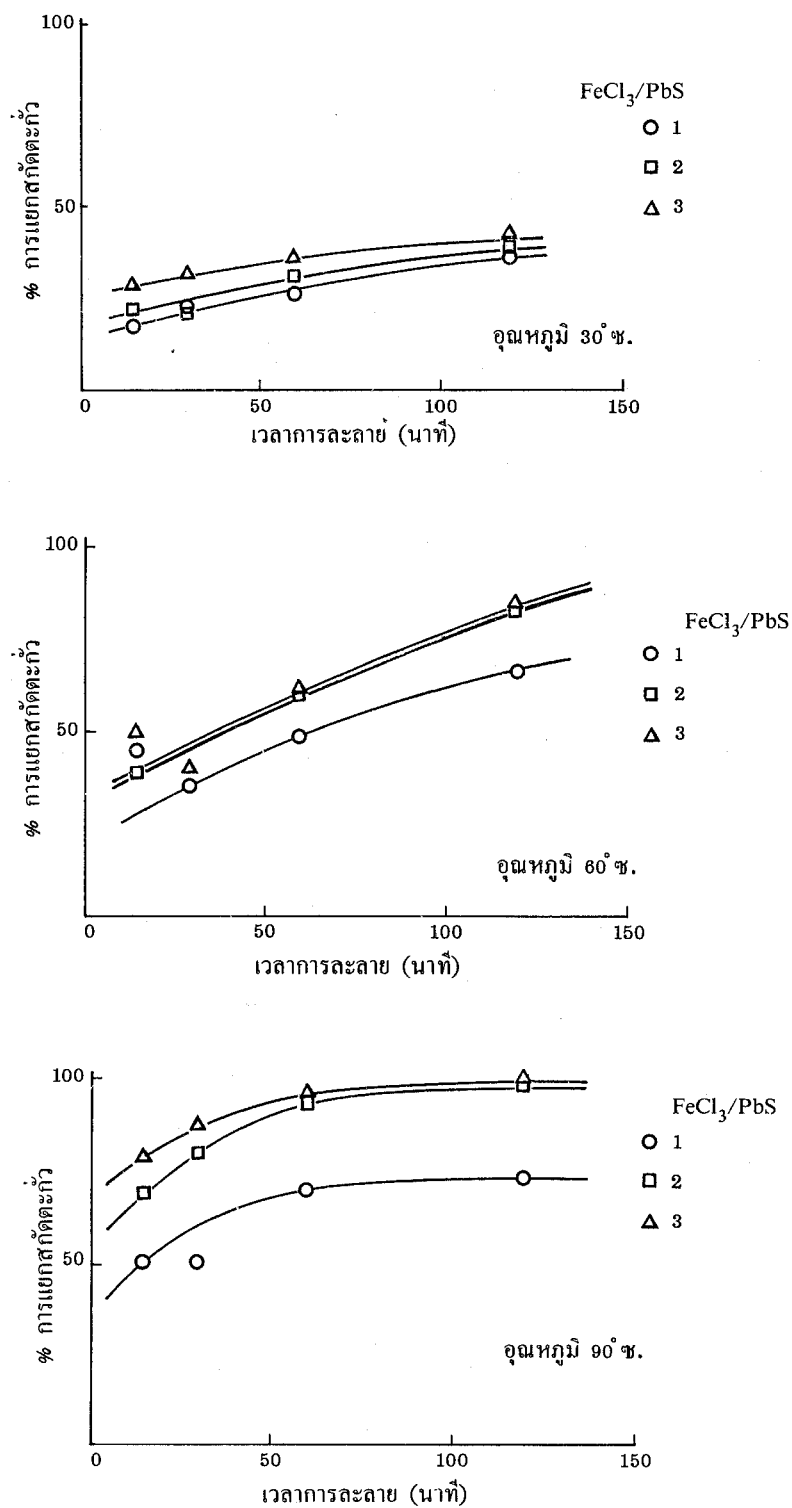
ชนิดของโลหะที่แทนที่เงินในสารละลาย	ปริมาณของธาตุในเงินผง			
	% เงิน	% ตะกั่ว	% เหล็ก	% ทองแดง
ทองแดง	93.10	5.41	1.02	0.47



รูปที่ 1. แผนภูมิกรรมวิธีการแยกตะกั่วและเงินจากแร่กาลีนาโดยย่อ

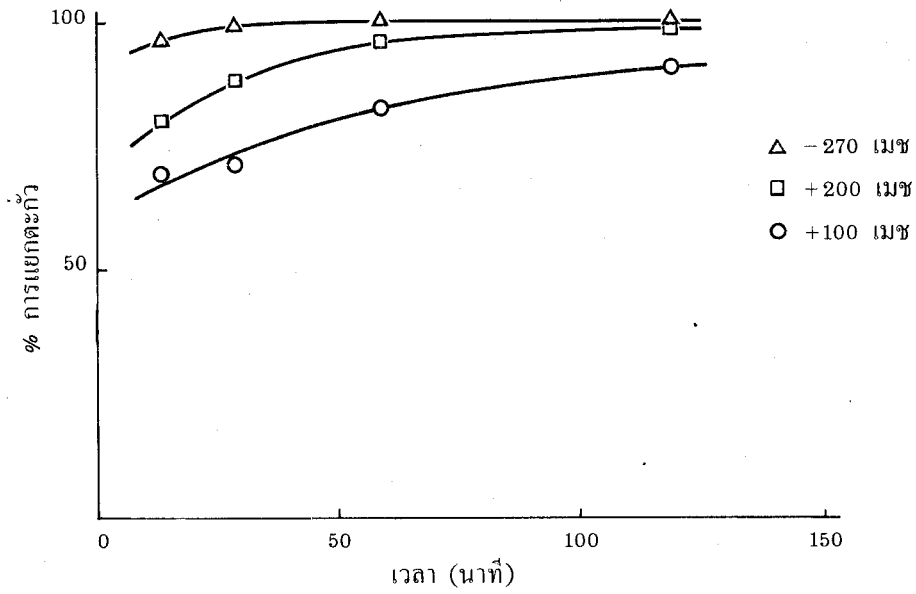


รูปที่ 2. อัตราการละลายของตะกั่วในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ในเวลา 15 นาที

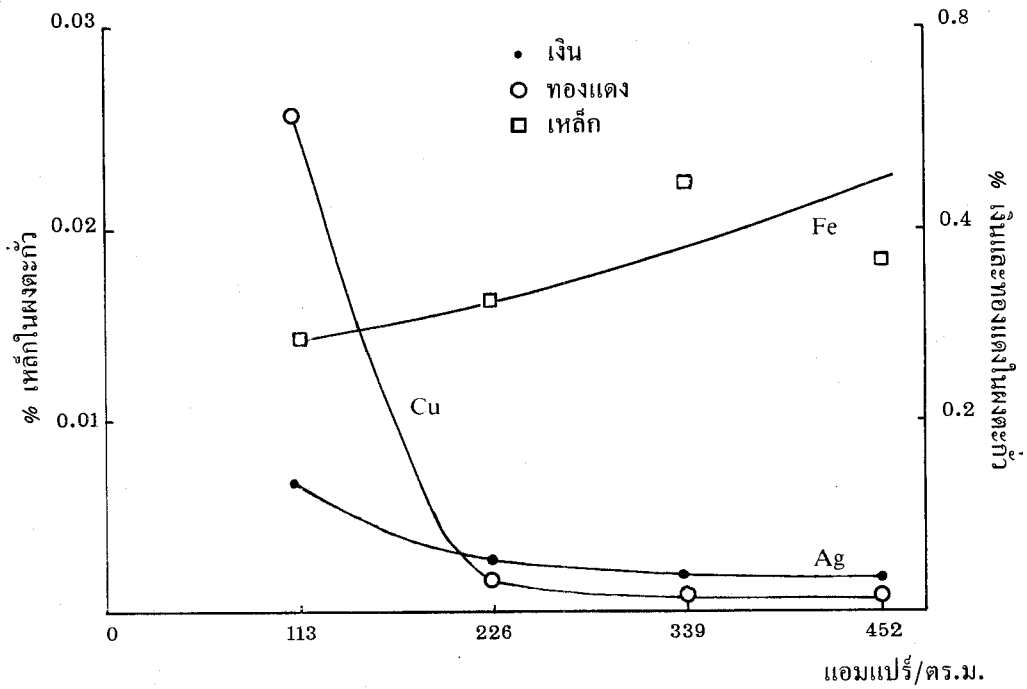


รูปที่ 3. การแยกตะกั่วจากแร่กลีนาที่อุณหภูมิ 30, 60 และ 90°ซ. ตามอัตราส่วนการใช้ FeCl₃ ต่อแร่โดยน้ำหนัก

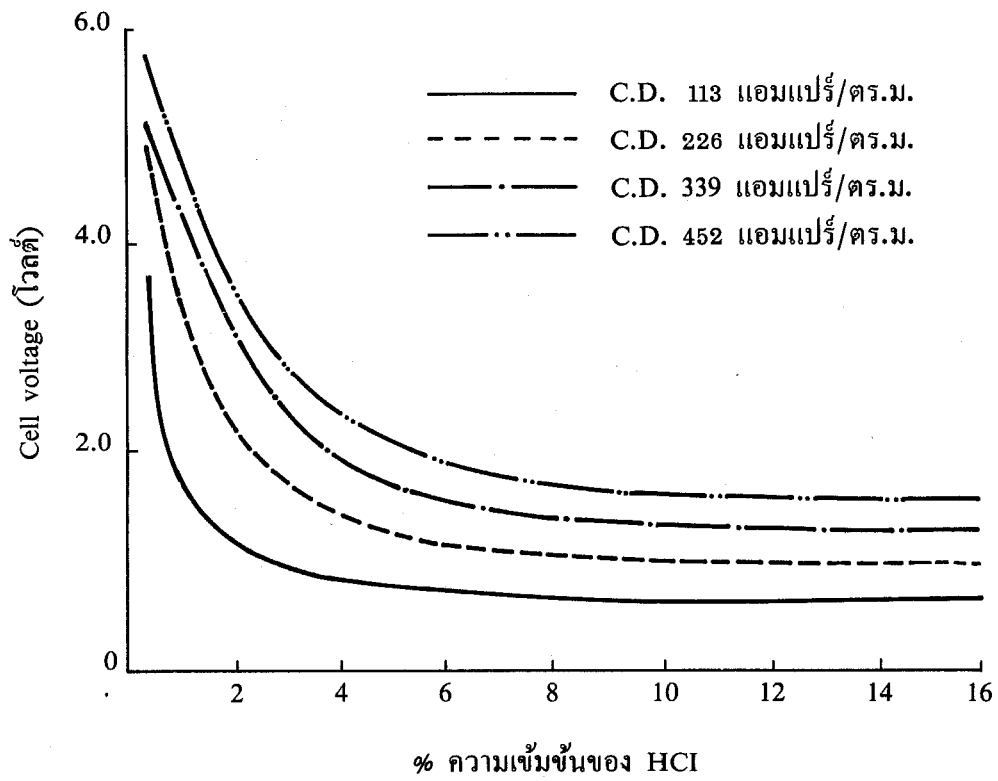
J. Natl. Res. Council Thailand, 1988, 20(1)



รูปที่ 4. แสดงอัตราการละลายของตะกั่วจากแร่กล้าที่มีขนาด +100, +200 และ -270 เมช ที่อุณหภูมิ 90°ซ.



รูปที่ 5. ปริมาณมลทินในผงตะกั่วที่แยกด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารละลาย HCl 8%



รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารละลาย HCl และค่า Cell voltage