

การนำกลับทองแดงจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย



นางสาวสิรินุช วชิรวัชรินทร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6938-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECOVERY OF COPPER FROM ELECTROPLATING WASTEWATER
USING SOLVENT EXTRACTION



Miss Sirinuch Vachiravatcharin

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Environmental Science (Inter-department)

Graduate School

Chulalongorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6938-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การนำกลับทองแดงจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยวิธีสกัด
ด้วยตัวทำละลาย
โดย นางสาวสิรินุช วชิรวัชรินทร์
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ม.ร.ว.กัลยา ดิงศภัทย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฉมิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

สิรินุช วชิรวัชรินทร์ : การนำกลับทองแดงจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย. (RECOVERY OF COPPER FROM ELECTROPLATING WASTEWATER USING SOLVENT EXTRACTION) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ, 106 หน้า. ISBN 974-17-6938-5.

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะจะมีโลหะต่างๆเจือปนอยู่ ซึ่งเป็นการยากต่อการกำจัดเองภายในโรงงาน จึงได้มีการศึกษาเพื่อหาแนวทางที่จะนำโลหะเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ โดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยตัวสกัดที่ใช้ คือ LIX 84-I และการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ทำการทดลองในระบบขวดเขย่า โดยน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็น น้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีปริมาณทองแดงประมาณ 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าในขั้นตอนการสกัด ตัวสกัดจะมีประสิทธิภาพการสกัดได้ดีในช่วงพีเอช 1 ถึง 3 โดยค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่เหมาะสมที่สุด คือ 1.6 และอัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัดที่เหมาะสมที่สุด ได้แก่ 10:3 ซึ่งสามารถสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียได้ถึง 15,042 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพการสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียร้อยละ 99.83 โดยคงเหลือทองแดงในน้ำเสีย 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนของกระบวนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด พบว่าสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 โมลาร์ ที่อัตราส่วนสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัด 1:2 สามารถสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดได้ดีที่สุดโดยมีประสิทธิภาพการสกัดกลับร้อยละ 57.8 และในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด LIX 84-I พบว่าตัวสกัดสามารถนำมาใช้สกัดซ้ำได้ถึง 27 ครั้ง โดยจะได้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีปริมาณทองแดงเฉลี่ยประมาณ 28,749 มิลลิกรัมต่อลิตร การประมาณการค่าใช้จ่ายในการนำกลับทองแดง โดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยคำนวณจากกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช ตัวสกัด LIX 84-I สำหรับการสกัด และกรดซัลฟิวริกสำหรับการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด เป็นเงิน 5.25 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร หรือประมาณ 1.22 บาทต่อทองแดง 1 กรัมที่สกัดได้

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา.....2547..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4689166020 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEY WORD: RECOVERY / COPPER / ELECTROPLATING / WASTEWATER / SOLVENT / EXTRACTION / LIX 84-I / STRIPPING

SIRINUCH VACHIRAVATCHARIN : RECOVERY OF COPPER FROM ELECTROPLATING WASTEWATER USING SOLVENT EXTRACTION. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.PETCHPORN CHAWAKITCHAREON, Ph.D., 106 pp. ISBN 974-17-6938-5.

Wastewater from electroplating process was contaminated by heavy metal that the removal of metal from wastewater is very difficult. Therefore research is needed in order to determine the method for recovery the metal. This research investigated the recovery of copper from electroplating wastewater by using solvent extraction, LIX 84-I, and the stripping process by aqueous solution of sulfuric acid in shake flask. The waste aqueous solution contained about 4,500 mg/l of copper. In the solvent extraction process, the optimum initial pH was 1.6, and the wastewater/solvent ratio was 10:3. The percentage extraction of copper was 99.83 %. The raffinate remained the copper at a concentration of approximately 7.5 mg/l. In the stripping process, the optimum concentration of sulfuric solution was 10 molar, and the sulfuric solution/extract ratio was 1:2. Copper was recovered at a percentage of 57.8%. The sulfuric solution contained copper at a concentration of approximately 17,383 mg/l, which could be used as a raw material in electroplating process. This solvent could be reused as many as 27 times, and corresponded to the sulfuric solution containing copper at a concentration of approximately 28,749 mg/l. Cost estimation for copper recovery from electroplating wastewater using solvent extraction was evaluated. The result indicated that the total cost of the extractant and the chemicals was 5.25 Baht per liter of wastewater (1.22 Baht per gram of copper)

Field of study.....Environmental Science.....

Student's signature.....

Academic year.....2004.....

Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่กรุณาใช้เวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนกรุณาช่วยตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม และอาจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน ที่กรุณาตรวจสอบและให้คำชี้แนะ

ขอขอบพระคุณ Cognis Corporation ที่เอื้อเฟื้อตัวสกัด LIX 84-I สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเงินทุนในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนการเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ (19 – 21 มกราคม พ.ศ.2548) ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน จังหวัดชลบุรี โดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำลังใจในการทำงานวิจัย และพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโททุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษา

ผู้วิจัยระลึกเสมอว่า งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จได้ ก็ด้วยความกรุณาของทุกท่านดังกล่าวข้างต้น จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง | |
| สารบัญรูป | |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 วัตถุประสงค์..... | 2 |
| 1.2 ขอบเขตการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 2 |
| บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร..... | 3 |
| 2.1 ทองแดง..... | 3 |
| 2.2 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า..... | 4 |
| 2.3 ขั้นตอนการชุบโลหะ..... | 6 |
| 2.4 การชุบผิวด้วยทองแดง..... | 9 |
| 2.5 แหล่งกำเนิดและลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะ..... | 9 |
| 2.6 ผลกระทบที่เกิดจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ..... | 11 |
| 2.7 การบำบัดน้ำเสีย..... | 12 |
| 2.8 การกำจัดสิ่งที่เป็นพิษในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ..... | 13 |
| 2.9 การกำจัดโลหะหนัก..... | 14 |
| 2.10 การสกัดแยกสาร..... | 15 |
| 2.11 ตัวสกัด..... | 17 |
| 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 19 |
| บทที่ 3 แผนการดำเนินงานวิจัย..... | 25 |
| 3.1 แผนการวิจัย..... | 25 |
| 3.2 น้ำเสียโรงงานชุบโลหะสำหรับการใช้ในการวิจัย..... | 25 |
| 3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย..... | 26 |

| | หน้า |
|----------------------------|--|
| 3.4 | ขั้นตอนการวิจัย..... 26 |
| 3.5 | การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล..... 29 |
| บทที่ 4 | ผลการทดลองและวิจารณ์..... 31 |
| 4.1 | ปริมาณโลหะและคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย..... 31 |
| 4.2 | ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในขั้นตอนการสกัด..... 31 |
| 4.3 | อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) ที่เหมาะสม ในขั้นตอนการสกัด..... 33 |
| 4.4 | ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกและอัตราส่วนของ สารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอ็กซ์แทรกต์ที่เหมาะสมในขั้นตอน การสกัดกลับ..... 36 |
| 4.5 | อายุการใช้งานของตัวสกัด..... 39 |
| 4.6 | ประมาณการค่าใช้จ่ายในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัดด้วย ตัวทำละลาย..... 43 |
| บทที่ 5 | สรุปผลการทดลอง..... 47 |
| บทที่ 6 | ความน่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย..... 50 |
| | เอกสารอ้างอิง..... 52 |
| ภาคผนวก | 54 |
| ภาคผนวก ก | ผลการทดลอง..... 55 |
| ภาคผนวก ข | การคำนวณปริมาณทองแดงในสารละลาย..... 83 |
| ภาคผนวก ค | การคำนวณค่าใช้จ่ายในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัด ด้วยตัวทำละลาย..... 85 |
| ภาคผนวก ง | การคำนวณราคาของสารละลายทองแดงในกรดซัลฟิวริก..... 90 |
| ภาคผนวก จ | การชุบผิวแบบต่างๆ ส่วนประกอบของน้ำยาชุบ และสภาวะการทำงานของกระบวนการชุบผิวด้วยทองแดง..... 92 |
| ภาคผนวก ฉ | ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม..... 98 |
| ภาคผนวก ช | การสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัด น้อยกว่า 10:1..... 103 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 106 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า..... | 10 |
| ตารางที่ 2.2 การตกตะกอนของโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ที่ช่วงของค่าพีเอชต่างๆ..... | 14 |
| ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราส่วนของสารละลายต่อตัวสกัดต่อการสกัดทองแดงและนิกเกิล..... | 21 |
| ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อประสิทธิภาพการสกัดกลับ..... | 22 |
| ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์..... | 30 |
| ตารางที่ 4.1 ปริมาณทองแดงและคุณสมบัติเริ่มต้นของน้ำเสีย..... | 31 |
| ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด..... | 38 |
| ตารางที่ ผ-1 ปริมาณทองแดงและคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย..... | 56 |
| ตารางที่ ผ-2 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 12 ในการทดลองครั้งที่ 1..... | 56 |
| ตารางที่ ผ-3 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 12 ในการทดลองครั้งที่ 2..... | 57 |
| ตารางที่ ผ-4 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 12 ในการทดลองครั้งที่ 3..... | 58 |
| ตารางที่ ผ-5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 12..... | 59 |
| ตารางที่ ผ-6 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 2 ในการทดลองครั้งที่ 1..... | 60 |
| ตารางที่ ผ-7 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 2 ในการทดลองครั้งที่ 2..... | 60 |
| ตารางที่ ผ-8 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 2 ในการทดลองครั้งที่ 3..... | 60 |
| ตารางที่ ผ-9 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 2..... | 61 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| ตารางที่ ผ-40 | ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการสกัดทองแดง ในขั้นตอนการศึกษา อายุการใช้งานของตัวสกัด ในการทดลองครั้งที่ 3..... | 81 |
| ตารางที่ ผ-41 | ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด ในขั้นตอน การศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด ในการทดลองครั้งที่ 3..... | 82 |
| ตารางที่ ผ-42 | ราคาสารเคมีที่ใช้ในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย..... | 86 |
| ตารางที่ ผ-43 | การคำนวณค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการปรับพีเอชน้ำเสียเป็น 1 ถึง 12..... | 86 |
| ตารางที่ ผ-44 | การคำนวณค่าใช้จ่ายของตัวสกัดในขั้นตอนการสกัด..... | 87 |
| ตารางที่ ผ-45 | การคำนวณค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด..... | 88 |
| ตารางที่ ผ-46 | การคำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัด ด้วยตัวทำละลายต่อน้ำเสีย 1 ลิตร..... | 89 |
| ตารางที่ ผ-47 | ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม..... | 99 |
| ตารางที่ ผ-48 | ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสีย ต่อตัวสกัดต่างๆ น้อยกว่า 10 : 1 ในการทดลองครั้งที่ 1..... | 104 |
| ตารางที่ ผ-49 | ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสีย ต่อตัวสกัดต่างๆ น้อยกว่า 10 : 1 ในการทดลองครั้งที่ 2..... | 104 |
| ตารางที่ ผ-50 | ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสีย ต่อตัวสกัดต่างๆ น้อยกว่า 10 : 1 ในการทดลองครั้งที่ 3..... | 105 |
| ตารางที่ ผ-51 | ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสีย ต่อตัวสกัดต่างๆ น้อยกว่า 10 : 1..... | 105 |

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย..... | 5 |
| รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย..... | 8 |
| รูปที่ 2.3 การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของวัสดุ..... | 16 |
| รูปที่ 2.4 การถ่ายเทมวลสารเมื่อใช้ไบพัดกวน..... | 17 |
| รูปที่ 2.5 เมื่อหยุดการกวนวัสดุทั้งสองจะแยกออกจากกัน..... | 17 |
| รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของตัวสกัด LIX 84-I..... | 18 |
| รูปที่ 2.7 ค่าพีเอชเริ่มต้นและความเข้มข้นของ Acorga M5640 ของการสกัดทองแดง..... | 23 |
| รูปที่ 3.1 ตัวสกัด LIX 84-I..... | 25 |
| รูปที่ 3.1 น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงของโรงงานชุบโลหะ..... | 25 |
| รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด LIX 84-I..... | 29 |
| รูปที่ 4.1 น้ำเสียและตัวสกัดภายหลังการเขย่า..... | 32 |
| รูปที่ 4.2 ปริมาณทองแดงในแรฟไฟเนตและเอ็กซ์แทรกที่ค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียต่างๆ..... | 32 |
| รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงที่ค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียเป็น 1.2 1.4 1.6 และ 1.8..... | 33 |
| รูปที่ 4.4 ปริมาณทองแดงในแรฟไฟเนตที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัดต่างๆ..... | 34 |
| รูปที่ 4.5 ปริมาณทองแดงในเอ็กซ์แทรกที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัดต่างๆ..... | 35 |
| รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัดต่างๆ..... | 35 |
| รูปที่ 4.7 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริก ต่อเอ็กซ์แทรกที่เหมาะสม..... | 36 |
| รูปที่ 4.8 ปริมาณทองแดงที่ตกค้างอยู่ในตัวสกัดที่อัตราส่วนกรดซัลฟิวริก ต่อตัวสกัดต่างๆ..... | 37 |
| รูปที่ 4.9 ปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่อัตราส่วนกรดซัลฟิวริก ต่อตัวสกัดต่างๆ..... | 38 |
| รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการสกัดกลับทองแดงที่อัตราส่วนสารละลายกรดซัลฟิวริก ต่อตัวสกัดต่างๆ..... | 39 |
| รูปที่ 4.11 ปริมาณทองแดงในแรฟไฟเนตในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด..... | 40 |
| รูปที่ 4.12 ปริมาณทองแดงในเอ็กซ์แทรกในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด..... | 40 |

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด..... | 41 |
| รูปที่ 4.14 ปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริกในการศึกษาอายุการใช้งาน ของตัวสกัด..... | 42 |
| รูปที่ 4.15 ปริมาณทองแดงตกค้างอยู่ในตัวสกัดในการศึกษาอายุการใช้งาน ของตัวสกัด..... | 42 |
| รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดในการศึกษา อายุการใช้งานของตัวสกัด..... | 43 |
| รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงและค่าใช้จ่ายในการสกัด ในการศึกษาค่าพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นที่เหมาะสม..... | 44 |
| รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงและค่าใช้จ่ายในการสกัด ในการศึกษาอัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัดที่เหมาะสม..... | 44 |
| รูปที่ 4.19 ค่าใช้จ่ายในการสกัดกลับทองแดงที่อัตราส่วนกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัด และความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่างๆ..... | 45 |
| รูปที่ 4.20 ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้งในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด..... | 46 |

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันประเทศต่างๆในโลกมีการตื่นตัวในการตั้งกฎหมายสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับการพิทักษ์รักษาสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยมีจุดประสงค์เพื่อป้องกันปัญหาสภาพแวดล้อมเป็นพิษ โดยเฉพาะระเบียบข้อบังคับทางกฎหมายที่ใช้ควบคุมน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น มีแนวโน้มที่จะเข้มงวดมากขึ้น สำหรับภาคอุตสาหกรรมก็เช่นเดียวกัน น้ำเสียที่เกิดจากโรงงานที่มีการใช้โลหะหรือสารเคมีตรวจสอบวิเคราะห์ (reagent) ที่เป็นพิษนั้น ได้กลายเป็นเป้าหมายสำคัญของแผนการป้องกันปัญหาสภาพแวดล้อมเป็นพิษ

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มาจากกระบวนการผลิต ซึ่งส่วนประกอบต่างๆในน้ำเสียนั้นก็จะขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม ซึ่งลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียนั้นจะใช้ในการพิจารณาเพื่อเลือกการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป

ในส่วนของอุตสาหกรรมชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นอุตสาหกรรมสนับสนุนต่ออุตสาหกรรม การผลิตสาขาหนึ่งที่มีความสำคัญและมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด การชุบเคลือบผิวโลหะนับเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการผลิต เพราะจะทำให้ผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนมีความสวยงาม เกิดความแข็งแรง ป้องกันสนิม ป้องกันการกัดกร่อน ฯลฯ

ในปัจจุบัน รัฐบาล เอกชน และประชาชน ได้ให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก กระบวนการชุบเคลือบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าจะมีน้ำเสียออกมาจำนวนหนึ่ง การบำบัดน้ำเสียจึงเป็นส่วนที่จำเป็นต่อโรงงานชุบเคลือบผิว การบำบัดนี้สามารถทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของน้ำเสีย การเลือกใช้เทคโนโลยีและเทคนิคการบำบัดน้ำเสียอย่างเหมาะสม จะสามารถทำให้ต้นทุนในส่วนนี้เป็นไปอย่างเหมาะสม และทำให้โรงงานเป็นที่ยอมรับ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำกลับทองแดงจากน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะ โดยได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียด้วยตัวทำละลาย ศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการสกัดกลับ (stripping) ศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด รวมทั้งประมาณการค่าใช้จ่ายโดยรวมของกระบวนการในการนำกลับทองแดงโดยใช้ตัวสกัด LIX 84-I

1.1 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดด้วยตัวสกัด LIX 84-I
2. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการสกัดกลับออกจากตัวสกัด (stripping) โดยใช้กรดซัลฟิวริก
3. ศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด
4. ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำกลับทองแดงจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

1.2 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียจากระบวนการชุบโลหะ โดยใช้วิธีสกัดด้วยตัวสกัด LIX 84-I ทำการทดลองในระบบขวดเขย่า ซึ่งสารละลายทองแดงที่สกัดได้นี้สามารถนำกลับไปใช้เป็นวัตถุดิบ (คอปเปอร์ซัลเฟต) ในอุตสาหกรรมชุบโลหะได้ ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่

2. กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ตัวสกัด LIX 84-I
 - ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสีย
 - อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัดที่เหมาะสม
3. กระบวนการสกัดกลับออกจากตัวสกัด
 - ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม
 - อัตราส่วนของกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัดที่เหมาะสม
4. ศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด
5. ประเมินการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำวิธีการสกัดแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะไปใช้ในอุตสาหกรรมได้
2. เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก
3. เพื่อเป็นแนวทางในการนำทองแดงกลับมาใช้ใหม่

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 ทองแดง

2.1.1 ทองแดง (ศคิเกษม ทองยงค์, 2520)

ทองแดงเป็นโลหะที่มีประโยชน์มากที่สุดชนิดหนึ่ง เป็นโลหะหนึ่งใน 2 – 3 ชนิดเท่านั้นที่เราอาจพบได้ในรูปของโลหะล้วนๆตามธรรมชาติ

ทองแดงมีสีส้มค่อนข้างแดง สามารถตีให้แผ่เป็นแผ่นบางๆได้ง่าย ทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ หรือทำให้เป็นเส้นลวดเล็กๆได้ นอกจากนี้ยังไม่สึกกร่อนอย่างรวดเร็วในอากาศ คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ทองแดงเป็นโลหะที่มีคุณค่ามาก และถูกนำมาใช้ประโยชน์ ทำเป็นเครื่องประดับ ถ้วย เขื่อนกั้น แจกัน ตลอดจนภาชนะที่ใช้ในการหุงต้มต่างๆ

ทองแดงมีความเหมาะสมที่จะใช้ทำภาชนะในการหุงต้มโดยเฉพาะ เนื่องจากเป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก และในขณะเดียวกันก็เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมากด้วยเช่นกัน ดังจะเห็นได้จากสายไฟฟ้า สายโทรศัพท์ มอเตอร์ไฟฟ้า และเครื่องรับวิทยุโทรทัศน์ ล้วนมีลวดทองแดงประกอบอยู่ทั้งสิ้น

2.1.2 คุณสมบัติของทองแดง (สุวิชัย สัมปิตตะวณิช และ งามพิศ อังคทะวานิช, 2518)

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทองแดง

น้ำหนักอะตอม

63.57

ความหนาแน่น (25 องศาเซลเซียส)

8.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จุดหลอมเหลว

1,083 องศาเซลเซียส

จุดเดือด

2,595 องศาเซลเซียส

ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ

(20 องศาเซลเซียส)

1.71 ไมโคร โอห์ม.เซนติเมตร

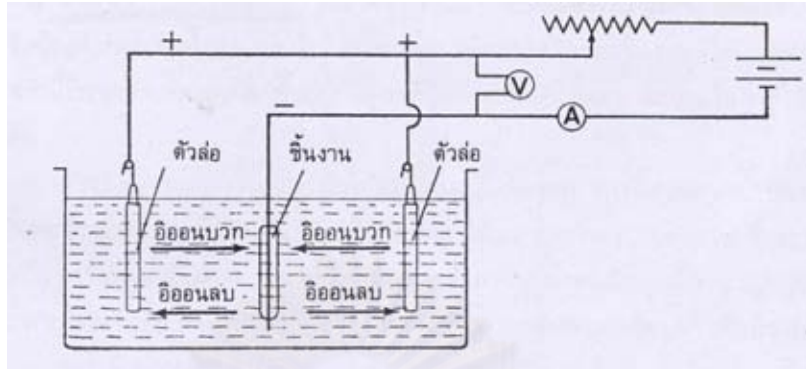
คุณสมบัติพิเศษของทองแดงซึ่งโลหะอื่นไม่มี ดังแสดงต่อไปนี้
(พร้อม วัชระคุปต์ และ เผ่าเทพ โชติณัฐิต, 2502)

1. ทองแดงบริสุทธิ์มีคุณสมบัติอ่อนและเหนียว สามารถทำเป็นแผ่นบางๆ ขนาด 0.002 นิ้วได้ง่าย และสามารถดึงให้เป็นเส้นลวดเล็กๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.001 นิ้วได้ โดยไม่ขาด
2. ทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและตัวนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดในบรรดาโลหะทั้งหลาย ยกเว้นเงิน ซึ่งดีกว่าทองแดงไม่มากนัก ด้วยเหตุนี้ทองแดงจึงเป็นโลหะที่สำคัญอย่างยิ่งในการสร้างอุปกรณ์เครื่องมือไฟฟ้า โดยเฉพาะในการทำสายไฟทุกชนิด
3. ทองแดงและโลหะผสมของทองแดงแทบทุกชนิดสามารถเชื่อมได้ง่าย
4. ทองแดงเป็นโลหะที่ทนต่อการกัดของบรรยากาศสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ ไม่เกิดเป็นสนิมหรือผุพังได้ง่าย
5. ทองแดงและโลหะผสมของทองแดงมีความสวยงาม และอาจผลิตเป็นสีต่างๆ ได้ ตั้งแต่สีแดง ในรูปของทองแดงบริสุทธิ์ ไปจนถึงสีน้ำตาล สีทอง สีเหลือง หรือขาว ตามปริมาณของธาตุและโลหะที่ผสมอยู่

2.2 การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า (สารโรช พันธุ์แพ, 2526)

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นของการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การนำเอาชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวเคลือบผิวด้วยโลหะโดยอาศัยไฟฟ้ากระแสตรงเข้าช่วย ซึ่งมีหลักการอย่างง่ายคือ นำชิ้นงานที่จะทำการชุบต่อเข้ากับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนโลหะที่จะไปเคลือบผิวบนชิ้นงานให้ต่อเข้ากับขั้วบวก เรียกว่า ตัวล่อ (โดยที่ขั้วบวกไม่จำเป็นต้องเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่จะไปเคลือบบนผิวชิ้นงานเสมอไป) จากนั้นนำชิ้นงานและตัวล่อจุ่มลงในน้ำยาชุบ แล้วปรับปริมาณทางไฟฟ้า คือ แรงเคลื่อนและกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสม จะสามารถทำให้อิออนของโลหะที่จะเคลือบบนชิ้นงานวิ่งไปยังขั้วลบซึ่งในที่นี้ก็คือชิ้นงานนั่นเอง จากนั้นจะรับอิเล็กตรอนที่ผิวชิ้นงานกลายเป็นโลหะเคลือบติดอยู่บนผิวของชิ้นงาน ส่วนขั้วบวกถ้าเป็นโลหะชนิดเดียวกับโลหะที่ไปเคลือบที่ผิวของชิ้นงาน ก็จะละลายลงสู่น้ำยาชุบในรูปของอิออนบวก ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 หลักการชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย (สาโรช พันธุ์แพ, 2526)

จากรูปจะทำให้ทราบว่า น้ำยาชุบนั้นจะต้องนำไฟฟ้าได้จึงจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจรได้ ดังนั้นสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในน้ำยาชุบจึงมีสารเคมีที่แตกตัวได้ดีเป็นไอออนบวกและไอออนลบเมื่อละลายน้ำ ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าให้ไหลครบวงจร ฉะนั้นโดยทั่วไปแล้วน้ำยาชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะประกอบด้วยสารเคมีที่สำคัญดังนี้

สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะ น้ำยาชุบแต่ละชนิดจะมีตัวกำเนิดโลหะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่าต้องการชุบเคลือบด้วยโลหะชนิดใด เช่น ถ้าหากต้องการชุบเคลือบผิวด้วยทองแดง ก็จะต้องมีเกลือของโลหะทองแดงเป็นตัวกำเนิดโลหะ คือ คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ละลายอยู่ในน้ำยาชุบ เป็นต้น สารที่เป็นตัวกำเนิดโลหะนี้เป็นสารหลักที่สำคัญที่สุดในการชุบ เนื่องจากสารเหล่านี้จะแตกตัวเมื่ออยู่ในน้ำยาชุบเป็นไอออนบวกและไอออนลบ โดยไอออนบวก คือ Cu^{2+} จะเป็นตัวเคลื่อนที่ไปเคลือบบนชิ้นงานเป็นโลหะทองแดง

สารที่ช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้า ส่วนใหญ่จะเป็นพวกกรดแก่หรือด่างแก่ชนิดต่างๆ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งจะช่วยให้อัตราเร็วของการเกาะเคลือบผิวดีขึ้น

สารควบคุมระดับพีเอช (Buffer) น้ำยาชุบแต่ละชนิดจะสามารถใช้งานได้ดีหรือไม่นั้น จะต้องมีพีเอชอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามชนิดของน้ำยาชุบ ดังนั้นหากไม่ต้องการให้พีเอชของน้ำยาชุบเปลี่ยนแปลงมากนัก ควรจะต้องใส่สารควบคุมระดับพีเอชลงไปด้วย ตัวอย่างของสารควบคุมระดับพีเอชของน้ำยาชุบ เช่น โซเดียมคาร์บอเนตในน้ำยาชุบทองแดงแบบด่าง กรดบอริกในน้ำยาชุบนิกเกิล เป็นต้น

น้ำยาเงา (Brightener) ในงานชุบที่ต้องการชิ้นงานที่มีความเงางาม จึงต้องมีการเติมน้ำยาเงาลงไปในน้ำยาชุบด้วย เพื่อให้ผิวของชิ้นงานที่ได้มีความแวววาวสวยงาม ซึ่งน้ำยาเงานี้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับสูตรที่ผู้ผลิตคิดค้นขึ้นมา ฉะนั้นในการใช้จึงควรใช้ตามคำแนะนำของผู้ผลิต

สารรักษาระดับการเคลือบผิวให้สม่ำเสมอ (Leveller) สารนี้ส่วนใหญ่จะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีซัลเฟอร์เจือปนอยู่ ซึ่งชนิดที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ กูมาริน (Coumarin) ซึ่งช่วยลดความเป็นรูหรือหลุมของผิวชิ้นงานให้ลดน้อยลง

สารเพิ่มความชื้น (Wetting agent) เป็นสารที่มีความสำคัญมากสำหรับการชุบโลหะเงา เนื่องจากจะไปลดแรงตึงผิวของสารละลาย ซึ่งจะช่วยให้ชิ้นงานไม่เกิดรอยด่าง การใช้สารเพิ่มความชื้นจะต้องใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสม หากไม่ใช้ในอัตราส่วนที่เหมาะสมแล้วจะทำให้ความเงางามสูญเสียไปหรือทำให้การรักษาระดับการเคลือบผิวไม่ดี ดังนั้นโดยปกติแล้วน้ำยาเงา

2.2.2 วัตถุประสงค์ในการชุบชิ้นงาน (วัชรานันท์, 2538)

กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นวิธีการอย่างหนึ่งเพื่อตกแต่งผิวชิ้นงาน โดยเป้าหมายหลักของการชุบโลหะ คือ

1. เพื่อความสวยงาม
2. เพื่อป้องกันการสึกกร่อน
3. เพื่อป้องกันการผุกร่อน
4. เพื่อเพิ่มคุณสมบัติพิเศษที่ผิวของชิ้นงาน เช่น เพิ่มความแข็งแรง ป้องกันสนิม เป็นต้น

ในการชุบโลหะต้องทำการควบคุมสถานะต่างๆที่เหมาะสม เช่น

- พีเอชที่เป็นกรดมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของขั้วบวก (ชิ้นงาน) ลดลง
- พีเอชที่เป็นด่างมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของขั้วลบ (ตัวต่อ) ลดลง
- เวลาและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าจะมีผลต่อความหนาของผิวชิ้นงานที่ทำการชุบ
- ระยะห่างระหว่างขั้วต่อและชิ้นงาน จะส่งผลต่อความสม่ำเสมอของความหนาของผิวชิ้นงานที่ทำการชุบ

2.3 ขั้นตอนการชุบโลหะ (สาโรช พันธุ์แพ, 2526)

ก่อนที่จะเริ่มกระบวนการชุบโลหะ จำเป็นที่จะต้องมีการเตรียมชิ้นงานก่อนเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพ ซึ่งในที่นี้คือการทำความสะอาดชิ้นงานก่อนที่จะนำไปชุบซึ่งนับเป็นสิ่งที่สำคัญ

เพราะหากชิ้นงานไม่สะอาดเพียงพอแล้ว อาจจะทำให้การชุบไม่ประสบผลสำเร็จ ทั้งนี้เนื่องมาจาก โลหะที่จะเข้าไปเกาะผิวชิ้นงานเกาะได้ไม่แน่นหรือเกาะติดเป็นบางจุด หรืออาจไม่เกาะติดเลย ทั้งยังทำให้น้ำยาชุบสกปรก เนื่องจากชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีคราบน้ำมัน ไขมัน และรอยเปื้อน ต่างๆ ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิต เช่น การกลึง การอัด การขัดผิว เป็นต้น

นอกจากการทำความสะอาดชิ้นงานแล้ว ยังจะต้องมีการกำจัดพวกสนิมโลหะหรือสะเก็ด โลหะต่างๆที่ติดอยู่ที่ผิวชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งมีบ่อยครั้งที่ขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงานส่งผลใน การช่วยกระตุ้นโลหะให้มีสภาพพื้นผิวที่มีคุณสมบัติที่จะทำให้การเกาะติดของโลหะที่จะมาเคลือบ มีคุณภาพดีขึ้น ในส่วนของการทดสอบชิ้นงานว่ากำจัดคราบน้ำมันออกหมดหรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยการพ่นน้ำให้เป็นฝอยละเอียดบนชิ้นงาน หากผิวของชิ้นงานมีหยดน้ำรวมตัวเป็นเม็ดกลม เล็กๆ นั่นก็แสดงว่ายังกำจัดคราบน้ำมันออกไม่หมด แต่หากเกิดลักษณะฟิล์มบางๆของน้ำอย่าง สม่ำเสมอปรากฏอยู่บนผิวชิ้นงาน ก็แสดงว่าชิ้นงานนั้นได้กำจัดคราบน้ำมันออกหมดแล้ว

2.3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดชิ้นงาน

มีด้วยกัน 4 ขั้นตอน คือ

1. การทำความสะอาดเบื้องต้น (precleaning)

เพื่อล้างคราบน้ำมันที่ติดอยู่เป็นจำนวนมากออก หรือสะเก็ดของแข็งที่ติดอยู่ บนผิวชิ้นงาน สารที่ใช้ในขั้นตอนนี้ ได้แก่

- ตัวทำละลาย
- ตัวทำละลายเพื่อกำจัดไขมัน
- สเปรย์หรือจุ่มในน้ำยากำจัดไขมันที่ร้อน
- คัมในสารละลายสบู่หรือผงซักฟอก
- สเปรย์ด้วยสารละลายต่าง
- คัมในสารละลายต่าง

2. การทำความสะอาดด้วยด่าง (alkaline cleaning)

เป็นการล้างทำความสะอาดชิ้นงานให้สะอาดขึ้นกว่าขั้นตอนที่ 1 มักใช้วิธีจุ่ม หรือสเปรย์

- การทำความสะอาดโดยการจุ่ม โดยใช้สารทำความสะอาด 30 – 120 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ถึงจุดเดือด เป็นเวลา 3 – 15 นาที

- การทำความสะอาดโดยการสเปรย์ สารทำความสะอาดที่ใช้มีส่วน ประกอบเช่นเดียวกับการทำความสะอาดโดยการจุ่ม ยกเว้นตัว surfactant

3. การทำความสะอาดด้วยไฟฟ้าขั้นสุดท้าย (final electrolytic cleaning)
เป็นขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกเล็กๆ น้อยๆ ที่ยังเหลืออยู่บนผิวชิ้นงาน โดย
การทำให้เกิดฟองก๊าซบนผิวชิ้นงาน

4. การจุ่มในกรด (acid dip)

นิยมทำต่อจากการทำความสะอาดด้วยด่าง เพื่อช่วยในการกำจัดพวกออกไซด์
ฟิล์มที่เกิดจากการทำความสะอาดด้วยด่าง รวมทั้งยังช่วยกัดผิวให้มีรอยหยابซึ่งจะไปช่วยเพิ่ม
กำลังการยึดเกาะสำหรับการชุบผิวต่อไป

โดยสามารถเขียนเป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่ายได้
ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย

การชุบโลหะที่นิยม ได้แก่

- การชุบทองแดง นิกเกิล โครเมียม บนชิ้นงานที่เป็นเหล็ก
- การชุบทองแดง นิกเกิล ทอง บนเครื่องประดับ
- การชุบสังกะสีบนเหล็ก และการชุบฮาร์ดโครม เป็นต้น

2.4 การชุบผิวด้วยทองแดง (สารโรซ พันธ์แพ, 2526)

การชุบชิ้นงานด้วยทองแดง นิยมใช้ในการชุบเพื่อรองพื้นหรือชุบผิวชั้นแรกของชิ้นงาน ก่อนที่จะนำไปชุบด้วยโลหะอื่นต่อไป เนื่องจากทองแดงมีเกลือบิวอยู่จะช่วยในการป้องกัน ออกซิเจนจากอากาศหรือไอกรดไอน้ำต่าง ๆ ที่จะเข้าไปทำให้เกิดการกัดกร่อนวัสดุที่เป็นชิ้นงาน นอกจากนี้ทองแดงยังเป็นโลหะที่มีแรงยึดเหนี่ยวกับโลหะอื่นๆ ได้ดี

การชุบผิวด้วยทองแดงแบ่งตามสภาพของน้ำยาชุบที่ใช้ได้หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้มีด้วยกัน 3 ชนิด คือ

1. การชุบทองแดงแบบต่าง (การชุบทองแดงแบบไซยาไนด์)
 - แบบสไตรค์
 - แบบรอกเซลล์
 - แบบประสิทธิภาพสูง
2. การชุบทองแดงแบบกรด
3. การชุบทองแดงแบบไฟโรฟอสเฟต

2.5 แหล่งกำเนิดและลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะ

ในกระบวนการชุบโลหะมีขั้นตอนมากมาย รวมทั้งมีการการใช้สารเคมีหลายชนิด ทั้งเพื่อการเตรียมชิ้นงานและในส่วนของกระบวนการชุบ ก่อให้เกิดน้ำเสียซึ่งมีสารเคมีและสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการบำบัดก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียเหล่านี้สู่ออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะนั้นมีที่มาจากแหล่งต่างๆ ดังนี้ (Nemerrow, 1978)

- น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมันและไขมัน
- น้ำล้างจากการขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม
- น้ำล้างชิ้นงานหลังกระบวนการชุบน้ำยา
- น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือรั่วไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
- น้ำล้างทำความสะอาดอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ทำงาน

เนื่องจากในน้ำเสียที่เกิดขึ้นมีสารเคมีเจือปนอยู่ โดยส่วนที่มีความเข้มข้นของสารเคมีสูงนั้น มาจากน้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมันและไขมัน น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงาและกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานหลังการชุบน้ำยา

ตัวอย่างแหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แหล่งกำเนิดสารที่เป็นพิษจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
(วัชรา ขนิษฐบุตร, 2538)

| สารที่เป็นพิษ | | แหล่งกำเนิด | วิธีบำบัด |
|------------------|---|--|---|
| น้ำมัน | สารประเภทไขมัน | การเตรียมชิ้นงานก่อนชุบ | การแยกไขมัน |
| ของแข็ง | ยาขัด ทRAY | การขัด การยิงทRAY | ตกตะกอน |
| กรด | กรดกำมะถัน กรดเกลือ, กรดไนตริก กรดกัดแก้ว กรดฟอสฟอริก กรดน้ำส้ม | การจุ่มกรดกระตุ้นผิว การขัดเงาด้วยสารเคมี | ทำให้เป็นกลาง |
| ด่าง | โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมซัลเฟต โซดาไฟ โซเดียมฟอสเฟต | ต้มล้างไขมัน กัดผิว อะลูมิเนียม ทำให้เป็นกลาง | ทำให้เป็นกลาง |
| ไซยาไนด์ | สารประกอบไซยาไนด์ ต่างๆ | ล้างด้วยไฟฟ้าหรือจากถังชุบ | ทำการออกซิเดชัน โดยใช้สารประเภท คลอรีน |
| ไอออนของโลหะหนัก | โลหะมีค่า ทองแดง นิกเกิล เหล็ก แคดเมียม อะลูมิเนียม แมงกานีส สังกะสี | อยู่ในน้ำยาชุบและจากการ เตรียมก่อนชุบ | ใช้ด่าง |
| กรดโครมิก | กรดโครมิก | น้ำยาชุบ การทำโครเมต | ทำการรีดักชัน แล้วตกตะกอน |
| ไอออนเชิงซ้อน | ไอออนเชิงซ้อนของทองแดง นิกเกิล | น้ำยาชุบ | ทำให้สารประเภท คีเลต เกิดการแยกตัว ทำให้เป็นกลางแล้ว ตกตะกอน |

โดยสามารถสรุปได้ว่าสารที่เป็นพิษที่ควรได้รับการบำบัดก่อนปล่อยทิ้ง ได้แก่

- สารประเภทไซยาไนด์
- สารประเภทกรดโครมิก
- กรดและด่าง
- ไอออนของโลหะหนัก

2.6 ผลกระทบที่เกิดจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ

2.6.1 ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์ (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2525)

- ทองแดง (Cu)

ทองแดงที่โลหะที่ร่างกายมนุษย์มีความต้องการในปริมาณน้อย หากร่างกายได้รับมากเกินไปก็อาจก่อให้เกิดผลเสียแก่ร่างกายได้ โดยอาจทำให้เกิดอาการอาเจียน หนึ่บชา ลำไส้ หรืออาจถึงแก่ชีวิตได้

- โครเมียม (Cr)

สารประกอบโครเมียมที่มีประจุเป็นบวกสาม ไม่พบความเป็นพิษต่อร่างกาย ในขณะที่สารประกอบโครเมียมที่มีประจุเป็นบวกหก มีพิษต่อร่างกาย โดยทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง หากสูดดมไอกรดโครมิกจะก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

- นิกเกิล (Ni)

สารประกอบนิกเกิลไม่ส่งผลกระทบต่อสรีระของสัตว์และพืช หรือเป็นพิษในเกณฑ์ต่ำมาก

- สังกะสี (Zn)

สังกะสีที่อยู่ในรูปธาตุไม่ปรากฏความเป็นพิษ ในขณะที่สารประกอบของสังกะสีหลายตัวมีความเป็นพิษอยู่ในเกณฑ์ต่ำ

- ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่วเป็นโลหะที่ร่างกายไม่ต้องการ แต่ร่างกายมนุษย์สามารถทนต่อปริมาณตะกั่วได้ โดยคนทั่วไปสามารถมีตะกั่วในเลือดได้ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยไม่เป็นพิษ แต่หากได้รับเข้าสู่ร่างกายในปริมาณมากในทันทีทันใด เช่น พบในเลือดมากกว่า 0.8 มิลลิกรัมต่อลิตร อาจเกิดพิษเฉียบพลันได้

- ไซยาไนต์ (CN)

ก๊าซไฮโดรเจนไซยาไนต์มีความเป็นพิษอย่างรุนแรง โดยก่อให้เกิดความระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ และอาจทำให้เสียชีวิตได้

2.6.2 ผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสีย

โลหะหนักที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัด โดยที่โลหะหนักบางชนิดเมื่อมีความเข้มข้นต่ำ จะสามารถกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ให้ดีขึ้น เช่น ทองแดง สังกะสี เป็นต้น ในขณะที่โลหะหนักบางชนิดไม่มีความสามารถในการกระตุ้นการทำงาน แต่มีความเป็นพิษเมื่อมีปริมาณมากพอ

2.7 การบำบัดน้ำเสีย

2.7.1 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียนั้น สามารถทำได้กระทำได้ด้วยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายๆวิธีรวมกัน ดังต่อไปนี้ (Patterson, 1985 และ Wentz, 1989)

1. การตกผลึก (Precipitation)

เป็นการเปลี่ยนรูปของโลหะที่ละลายน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง โดยการทำอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้

- การเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักโดยตรง เกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น การเติมซัลไฟด์ เป็นต้น
- การเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำลดลง ได้แก่ การปรับพีเอช
- การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบของโลหะมีค่าความสามารถในการละลายน้ำลดน้อยลง

2. การรวมตะกอน (Flocculation)

เป็นการทำให้ตะกอนเกิดการรวมตัวกันและมีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้สามารถตกตะกอนได้เร็ว

3. การตกตะกอน (Sedimentation)

ใช้ในการแยกของแข็งออกจากน้ำ โดยสารประกอบโลหะหนักที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำสามารถตกตะกอนได้เร็ว โดยกระบวนการนี้มักจะใช้ต่อจากการตกผลึกและการรวมตะกอน

4. การกรอง (Filtration)

เป็นการแยกของแข็งออกจากน้ำ เนื่องจากตะกอนบางส่วนมีขนาดเล็กและแขวนลอยได้ ไม่สามารถทำการแยกได้โดยการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว

5. ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation – Reduction)

เป็นกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าเลขประจุ เพื่อให้ความเป็นพิษน้อยลง และสามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น เช่น โครเมียมประจุบวกหก เป็นต้น

6. การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange)

เมื่อน้ำเสียที่มีโลหะหนักที่มีประจุบวกหรือสารประกอบที่มีประจุลบ ผ่านเรซิน อีออนของโลหะหนักหรือสารประกอบก็จะถูกจับไว้ในเรซิน แต่หลังจากการใช้งานสักระยะเวลา ประสิทธิภาพในการจับอีออนของเรซินจะลดลงต้องมีการฟื้นฟูประสิทธิภาพ (Regeneration)

7. การระเหย (Evaporation)

ทำโดยใช้ความร้อนระเหยน้ำออกไปทำให้ความเข้มข้นของน้ำเสียเพิ่มขึ้นหรือกลายเป็นกาต้มน้ำ

8. รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse osmosis)

เป็นวิธีการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยแรงดันออสโมซิสให้ผ่านเยื่อ (Semipermeable membrane) ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้น้ำและสารบางตัวผ่านได้ ทำให้ได้น้ำที่มีความสะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง แต่วิธีการนี้ต้องใช้พลังงานมากและต้องมีการควบคุมคุณภาพน้ำเสียเข้า

9. การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีรูพรุนและพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักมาก เมื่อมีการสัมผัสกับน้ำเสีย จะทำให้มลสารต่างๆถูกจับไว้ในรูพรุน ทำให้น้ำทิ้งสะอาด

โดยการที่จะเลือกใช้วิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายๆวิธีรวมกัน ในการบำบัดน้ำเสียนั้น จำเป็นจะต้องพิจารณาความเหมาะสมต่างๆดังต่อไปนี้

- ลักษณะน้ำเสียก่อนการบำบัด
- คุณภาพน้ำทิ้งที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ต้องใช้ทั้งหมด
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและการตรวจสอบคุณภาพ
- ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย
- ความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่หรือกากที่ต้องกำจัด

2.8 การกำจัดสิ่งที่เป็นพิษในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ (วัชรา ขนิษฐบุตร, 2538)

โดยทั่วไปการกำจัดสิ่งที่เป็นพิษแต่ละตัว มีดังนี้

1. ไซยาไนต์ - กำจัดโดยเติม NaClO (โซเดียมไฮโปคลอไรต์) จะได้ CNO^- (ไซยาเนต) ก่อน จากนั้นทำปฏิกิริยาต่อได้เป็น $\text{CO}_2 + \text{N}_2$

2. Cr^{+6} - กำจัดโดย NaHSO_3 (โซเดียมไบซัลไฟต์) จะกลายเป็น Cr^{+3} แล้วกำจัด Cr^{+3} ต่อโดยการตกตะกอนเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$

3. โลหะหนัก - กำจัดโดยทำให้ตกตะกอนในรูปของ $\text{M}(\text{OH})_x$ โดยการเติมโซดาไฟเป็นหลัก และโลหะแต่ละตัวจะมีช่วงของการตกตะกอนที่พีเอชต่างกัน

4. กรดต่าง - กำจัดโดยการปรับค่าพีเอชโดยใช้กรดกำมะถัน (H_2SO_4) และโซดาไฟ (NaOH)

2.9 การกำจัดโลหะหนัก

โลหะหนักในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโลหะจะอยู่ในสายน้ำประเภทกรดต่าง คือ มาจากขั้นตอนการกัดผิวโลหะเพื่อกำจัดสนิม การกระตุ้นผิวก่อนการชุบ หรือการขัดเงาชิ้นงานอะลูมิเนียมด้วยโซดาไฟ โดยโลหะในกลุ่มนี้ ได้แก่ เหล็ก (Fe^{+2}) ทองแดง (Cu^{+2}) หรือทองเหลือง ($\text{Cu}^{+2} + \text{Zn}^{+2}$) นอกจากนี้ยังมีโลหะจากน้ำยาชุบโดยตรงติดอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งมาจากน้ำล้างชิ้นงานหลังกระบวนการชุบ โลหะเหล่านี้ ได้แก่ ทอง (Au^+) นิกเกิล (Ni^{+2}) ทองแดง (Cu^{+2}) โครเมียม (Cr^{+6}) เป็นต้น

สุดท้ายคือโลหะหนักซึ่งเกิดจากการกระทำภายหลังการชุบ เช่น เมื่อชุบสังกะสีแล้วนำมาจุ่มสีรุ้ง จะมีใช้น้ำยาโครเมตซึ่งมีโครเมียม (Cr^{+6}) อยู่ ซึ่งโลหะหนักจะถูกกำจัดออกไปได้ด้วยวิธีการทำให้ตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์โดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เรียกกรรมวิธีนี้ว่า Neutralization ดังสมการที่ 2.1



ในบางครั้งอาจใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เป็นตัวช่วยให้ตกตะกอน เนื่องจากทำให้เกิดให้ตกตะกอนง่ายและมีราคาถูกกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ข้อเสียคือจะเกิดตะกอนปริมาณมากทำให้ยากต่อการกำจัด โดยโลหะแต่ละประเภทจะมีการตกตะกอนที่ค่าพีเอชต่าง ๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การตกตะกอนของโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ที่ช่วงของค่าพีเอชต่างๆ

(วัชรา ขนิษฐบุตร, 2538)

| ประเภทของโลหะหนัก | ช่วงค่าพีเอช |
|-------------------------------|---|
| ทองแดง (Cu^{+2}) | 7 – 12 ไม่มีการละลายกลับ |
| นิกเกิล (Ni^{+2}) | 9 – 10 ไม่มีการละลายกลับ |
| โครเมียม (Cr^{+3}) | 8 – 10 ไม่มีการละลายกลับ แต่ > 11 ละลายกลับ |
| สังกะสี (Zn^{+2}) | 9 – 11 ไม่มีการละลายกลับ แต่ > 11 ละลายกลับเล็กน้อย |
| เหล็ก (Fe^{+2}) | 7.5 – 10 ไม่มีการละลายกลับ แต่ > 11 ละลายกลับ |

2.10 การสกัดแยกสาร (Solvent Extraction)

สารประกอบของโลหะบางชนิดมีความสามารถในการละลายสูงในตัวทำละลายอินทรีย์ การสกัดแยกสารเป็นกระบวนการที่มีการถ่ายเทมวลที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่ง เป็นกรรมวิธีที่ใช้แยกสารออกจากของผสมที่มีลักษณะเป็นของแข็งหรือของเหลว โดยใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลว แบ่งออกเป็น การสกัดแยกสารออกจากของแข็งด้วยของเหลว (Leaching) และการสกัดสารออกจากของเหลวด้วยของเหลว (Liquid – Liquid Extraction)

2.10.1 การสกัดแยกสารออกจากของแข็งด้วยของเหลว (Leaching) (Gill, 1980)

การสกัดแยกสารออกจากของแข็งด้วยของเหลว เป็นกระบวนการที่ทำให้สารประกอบของโลหะซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นของแข็งละลายออกมาอยู่ในสารละลาย ทั้งนี้ก็เพื่อที่จะแยกโลหะที่ต้องการออกจากวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว เช่น เศษแร่ แบตเตอรี่เก่า หรือกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะดำเนินไปอย่างช้าๆ เช่น ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี อะลูมิเนียม ทอง พลาตินัม และนิกเกิล โดยสารละลายที่ใช้ในการชะละลายนี้มีอยู่หลายชนิด เช่น น้ำ กรด เบส และเกลือต่างๆ แต่ที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ กรดซัลฟิวริก กรดไนตริก กรดไฮโดรคลอริก และแอมโมเนีย ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญของสารละลาย คือ สามารถชะละลายบางชนิดได้ดี มีความสามารถในการละลายน้ำดี ราคาถูก สามารถนำไปใช้ซ้ำได้ และไม่กัดกร่อนภาชนะและอุปกรณ์

2.10.2 การสกัดสารออกจากของเหลวด้วยของเหลว (Liquid – Liquid Extraction)

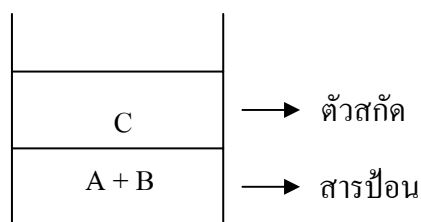
(สมนึก ภาคพานิชย์, 2538)

การสกัดแยกสารออกจากของเหลวด้วยของเหลว เป็นกระบวนการแยกของผสมออกจากของผสมเดิมที่มีสถานะเป็นของเหลว ด้วยตัวสกัดแยกสารที่ไม่ผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายเดิม ตัวสกัดต้องมีความสามารถในการที่จะสกัดแยกสารชนิดหนึ่งออกจากของผสมได้ดี แต่ในขณะที่เดียวกันความสามารถในการสกัดแยกสารอีกชนิดหนึ่งได้ไม่ดีหรือไม่ได้เลย โดยทั่วไปการแยกของผสมที่เป็นของเหลวออกจากกันทำได้ง่ายโดยวิธีการกลั่น แต่ในบางกรณีก็มีขอบเขตจำกัดที่ไม่สามารถกระทำได้หรือไม่เหมาะสมที่จะใช้วิธีการกลั่น เช่น การกลั่นแยกสารที่มีค่าความดันไอใกล้เคียงกัน การแยกสารที่เป็นของผสมอาซีโอโทป (Azeotrope mixture) จะไม่สามารถแยกโดยวิธีการกลั่นตามปกติได้ ในกรณีของผสมที่มีความเจือจางมากๆ หากใช้วิธีการกลั่นในการแยกสารจำเป็นจะต้องใช้พลังงานมาก หรือสารบางชนิดมีจุดเดือดสูง การกลั่นจะต้อง

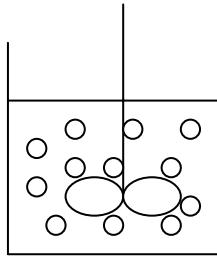
ใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสลายตัวของสารได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำวิธีการสกัดสารออกจากของเหลวด้วยของเหลวมาใช้แทนการแยกสารด้วยการกลั่น

โดยสามารถอธิบายสรุปทฤษฎีขั้นพื้นฐาน ได้ดังนี้ นำของผสมที่มีสารที่ต้องการจะแยก ซึ่งเรียกว่า สารป้อน (Feed) ซึ่งประกอบด้วยสาร A และ B โดยในที่นี้ให้สาร A เป็นสารที่ต้องการแยกออกจากของผสมใส่ลงในภาชนะแล้วทำการเติมตัวสกัดแยกสาร (Extractant) ซึ่งในที่นี้คือสาร C โดยสารในภาชนะจะมีการแยกออกเป็นสองชั้น ดังรูปที่ 2.3 (ซึ่งสารป้อนในที่นี้คือน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะที่มีทองแดงเจือปนอยู่ และมีความหนาแน่นมากกว่าตัวสกัดแยกสาร) ดังนั้นจะเกิดการถ่ายเทมวลสารขึ้นบริเวณพื้นผิวที่เป็นรอยต่อระหว่างชั้น นั่นคือ โมเลกุลของสาร A จะค่อยๆรวมตัวเข้าไปอยู่ในชั้น C ซึ่งการถ่ายเทมวลสารนี้จะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ทั้งนี้เนื่องจากการถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่ตรงรอยต่อระหว่างวัฏภาคเท่านั้น หากต้องการให้การถ่ายเทมวลสารเกิดเร็วขึ้นสามารถทำได้โดยการกวนสารละลายด้วยใบพัด ซึ่งจะทำการกวนของเหลวอยู่ในสภาพที่เป็นหยดๆ (ตัวสกัด) กระจายอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง (น้ำเสีย) ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสและเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลสาร โดยของเหลวที่มีลักษณะเป็นหยดๆนี้เรียกว่า Dispersed phase และเรียกส่วนของเหลวที่ไม่แตกเป็นหยดว่า Continuous phase ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทั้งนี้ปริมาณของสาร A จากสารป้อนที่ละลายเข้าไปอยู่ใน C จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับระยะเวลาและลักษณะการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของเหลวในระบบ แต่เมื่อถึงระยะเวลาหนึ่ง ปริมาณของ A ที่อยู่ใน C และที่เหลืออยู่ใน B จะคงที่ ซึ่งเรียกสภาวะเช่นนี้ว่าภาวะสมดุล (Equilibrium) ซึ่งจะเป็นปริมาณสูงสุดของสารที่สกัดแยกได้ในระบบนั้น

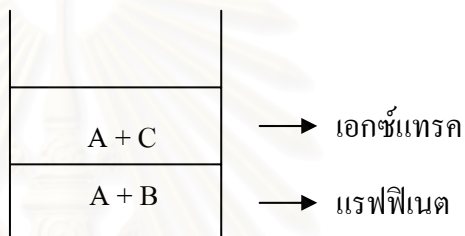
หลังจากการกวนแล้ว ระบบอาจถึงสมดุลหรือไม่ก็ตาม เมื่อเสร็จสิ้นการกวนแล้วหยดของของเหลวที่กระจายอยู่จะเกิดการรวมตัวกันแยกออกเป็นสองชั้นดังเดิมดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยในชั้นล่างจะมี B และ A ส่วนที่แยกออกไปได้ไม่หมด และอาจจะมี C ส่วนที่ละลายใน B ได้บ้างปนอยู่ ซึ่งสารละลายในส่วนนี้จะเรียกว่า วัฏภาคแรฟฟินेट (Raffinate) ส่วนของเหลวชั้นบนจะมีตัวสกัด C อยู่ร่วมกับสารที่ถูกสกัดแยกออกมา นั่นคือ A และอาจมี B ที่ละลายเล็กน้อยรวมอยู่ด้วย โดยของเหลวในส่วนนี้จะเรียกว่า วัฏภาคเอกซ์แทรค (Extract)



รูปที่ 2.3 การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของวัฏภาค (สมนึก ภาคพานิชย์, 2538)



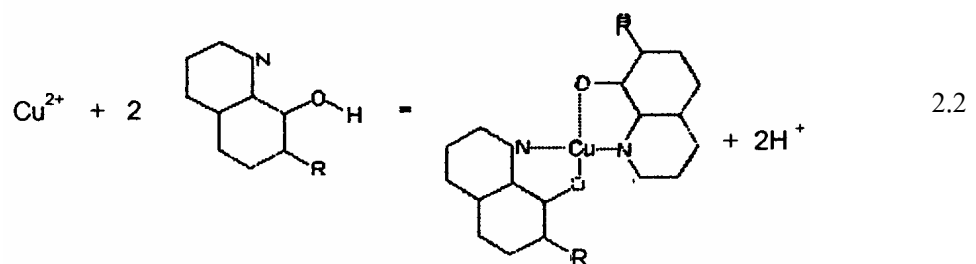
รูปที่ 2.4 การถ่ายเทมวลสารเมื่อใช้ไบโพลาร์ (สมนึก ภาคพานิชย์, 2538)



รูปที่ 2.5 เมื่อหยุดการกวนวัฏภาคทั้งสองจะแยกออกจากกัน (สมนึก ภาคพานิชย์, 2538)

2.11 ตัวสกัด (Gilchrist, 1980)

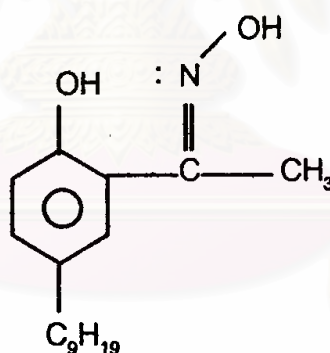
ตัวสกัดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถเกิดการแทนที่ของไฮโดรเจนอะตอมได้ ที่นิยมใช้มักอยู่ในรูป chelating compounds โดยมีชื่อทางการค้าว่า LIX และ KELEX และจะมีเลขต่อท้าย LIX เป็นสารประกอบเชิงซ้อนประเภทไฮดรอกซิลออกซิม (hydroxyl oxime) ในขณะที่ KELEX เป็นสารประกอบเชิงซ้อนประเภทไฮดรอกซิลควิโนลีน (hydroxyl quinolines) ตัวอย่างปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบ hydroxyl quinolines กับสารละลายที่มีโลหะทองแดง ดังแสดงในสมการที่ 2.2



ในการใช้งานมักนำตัวสกัดไปเจือจางด้วยน้ำมันก๊าดเพื่อลดความหนืดของตัวสกัด ก่อนที่จะนำไปกวนผสมกับสารละลายที่ต้องการสกัด จากนั้นจะเกิดการถ่ายเทมวลสารของทองแดงจากสารละลายไปสู่ตัวสกัดเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายเกิดการแยกชั้นกันแล้วทำการแยกตัวสกัดที่มีทองแดงอยู่และสารละลายที่ถูกสกัดออกจากกัน แล้วนำตัวสกัดที่มีทองแดงไปกวนผสมกับสารละลาย เช่น สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาณที่น้อยกว่าตัวสกัด ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะกลับกัน คือ ทองแดงจะเกิดการถ่ายเทมวลสารออกจากสารประกอบเชิงซ้อนและเข้าไปอยู่ในสารละลาย หากอัตราส่วนโดยปริมาตรของสารละลายต่อตัวสกัดที่มีทองแดงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม จะได้ความเข้มข้นของทองแดงสูงถึง 50 เท่าของสารละลายที่ต้องการสกัด ซึ่งเหมาะที่จะนำไปแยกด้วยไฟฟ้าต่อไป

2.11.1 ตัวสกัด LIX 84-I (Cognis Corporation, 1996)

ตัวสกัด LIX 84-I เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคีโตนออกซิม (ketone oxime) มีชื่อทางเคมีว่า 2-ไฮดรอกซี-5-โนนิลอะซิโตนออกซิม (2-hydroxy-5-nonylacetonophenone oxime) มีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างของตัวสกัด LIX 84-I (Cognis Corporation, 1996)

สามารถเกิดปฏิกิริยากับโลหะที่มีประจุเป็นบวก 2 ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการที่ 2.3



คุณสมบัติทางกายภาพ (Cognis Corporation, 1996)

| | |
|--|--|
| ลักษณะภายนอก | ของเหลวสีเหลืองอำพัน |
| ความถ่วงจำเพาะ | 0.90 – 0.92 |
| จุดวาบไฟ | มากกว่า 160 องศาฟาเรนไฮต์ |
| ความสามารถในการละลายของสารประกอบทองแดง | มากกว่า 30 กรัมต่อลิตร ทองแดง (25 องศาเซลเซียส) |

ข้อมูลเฉพาะ (Cognis Corporation, 1996)

| | |
|------------------------------|--------------------------|
| Maximum Copper Loading | 4.7 – 5.0 g/l Cu |
| Extraction Isotherm Point | ≥ 3.65 g/l Cu |
| Extraction Kinetics | $\geq 90\%$ (60 seconds) |
| Extraction Cu/Fe Selectivity | ≥ 2000 |
| Extraction Phase Separation | ≤ 60 seconds |
| Strip Isotherm point | ≤ 0.50 g/l Cu |
| Strip Kinetics | $\geq 90\%$ (30 seconds) |
| Strip Phase Separation | ≤ 80 seconds |

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Parija, Reddy และ Bhaskara Sarma (1998) ศึกษาการนำกลับนิกเกิลจากสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตโดยใช้ LIX 84-I เป็นตัวสกัด พบว่านิกเกิลถูกสกัดออกมาได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ที่ A:O = 1:3.5 และนิกเกิลถูกสกัดกลับออกจากตัวสกัดโดยให้สารละลายไหลสวนทางกัน 4 stage ที่ A:O = 1:3.5 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าในสารละลายนิกเกิลซัลเฟตมีนิกเกิลอยู่ 60 – 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งเหมาะในการนำไปแยกด้วยกระแสไฟฟ้า (electrowinning) หรือนำไปทำให้เป็นผลึก (crystallisation) ต่อไป

Alguacil (1999) ได้ทำการศึกษากการสกัดทองแดงด้วยตัวสกัด LIX 973N (ซึ่งเป็นสารผสมระหว่าง 5-nonylsalicylaldoxime และ 2-hydroxy-5-nonyl-acetophenone oxime) และการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด ดังนี้

- พีเอช

ศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อการสกัดทองแดงออกจากสารละลายที่มีปริมาณทองแดงเข้มข้น 3 กรัมต่อลิตร และแอมโมเนียมคาร์บอเนต 60 กรัมต่อลิตร ด้วยตัวสกัด LIX 973N ที่มีความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำการปรับพีเอชของสารละลายระหว่าง 8.5 – 10.5 ใช้ระยะเวลาการสกัด 10 นาที A:O ratio = 1:1 และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส พบว่าสามารถสกัดทองแดงได้เกือบสมบูรณ์ (99.5 เปอร์เซ็นต์)

- อุณหภูมิ

ทำการศึกษาโดยใช้สารละลาย ตัวสกัด ระยะเวลาในการสกัด รวมทั้ง A:O ratio เช่นเดียวกับขั้นตอนการศึกษาผลของค่าพีเอช โดยแปรค่าอุณหภูมิในช่วง 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิไม่มีผลอย่างเป็นนัยสำคัญต่อการสกัดทองแดงด้วยตัวสกัด LIX 973N โดยมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์

Parija และ Bhaskara Sarma (2000) ศึกษาการสกัดนิกเกิลและทองแดงออกจากสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต โดยใช้ตัวสกัด LIX 84 ที่มีความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่านิกเกิลและทองแดงจะถูกสกัดออกจากสารละลายร่วมกัน ซึ่งในสารละลายที่ถูกสกัดออกมานั้นประกอบด้วยทองแดง 13.8 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นิกเกิล 10.7 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร $(\text{NH}_4)\text{OH}$ 90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรและ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 45 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนของสารละลายต่อตัวสกัด (A:O ratio) = 1:2 แล้วทำการกำจัดแอมโมเนียออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 6.6 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นนิกเกิลถูกสกัดแยกออกจากตัวสกัดที่ A:O ratio = 2:1 โดยใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่ใช้แล้ว ซึ่งประกอบด้วยนิกเกิล 57 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร H_3BO_3 12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร Na_2SO_4 12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (พีเอชประมาณ 1.7) สามารถสกัดนิกเกิลกลับออกจากตัวสกัดได้เกือบสมบูรณ์ โดยคงเหลืออยู่ในตัวสกัดประมาณ 20 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในสารละลายอิเล็กโตรไลต์มีทองแดงเข้าไปอยู่ด้วยประมาณ 68 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร และได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนของสารละลายต่อตัวสกัด (A:O ratio) โดยใช้ตัวสกัด LIX 84 ความเข้มข้น 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่อัตราส่วนของสารละลายต่อตัวสกัดต่างๆกัน พบว่าที่ทุกอัตราส่วนของสารละลายต่อตัวสกัดสามารถสกัดทองแดงได้มากกว่านิกเกิล และสามารถสกัดทองแดงและนิกเกิลร่วมกันได้ภายใต้เงื่อนไขการทดลอง โดยมีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง 99.98 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิล 98.3 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนของสารละลายต่อตัวสกัด = 1:2 ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลของอัตราส่วนของสารละลายต่อตัวสกัดต่อการสกัดทองแดงและนิกเกิล

(Parija และ Bhaskara Sarma, 2000)

| อัตราส่วนของสารละลาย ต่อตัวสกัด | ความเข้มข้นในแรฟไฟเนต (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร) | |
|------------------------------------|---|---------|
| | ทองแดง | นิกเกิล |
| 1:1 | 157.6 | 586.0 |
| 1:2 | 2.78 | 183.0 |
| 1:3 | 0.89 | 32.2 |
| 1:4 | 0.76 | 12.0 |
| 1:5 | 0.31 | 6.80 |

Srinivasa, Devi และ Reddy (2000) ได้ศึกษาการสกัดทองแดงออกจากสารละลายซัลเฟต โดยใช้ตัวสกัด MOC45 (2-hydroxy-5-nonylacetophenone oxime) โดยแบ่งการศึกษาในส่วนของอิทธิพลของพีเอชต่อการสกัด พบว่าเปอร์เซ็นต์การสกัดทองแดงเพิ่มขึ้นจนมีค่าเกือบสมบูรณ์ (มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์) ที่ค่าพีเอชที่สภาวะสมดุลเท่ากับ 1.82 จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของตัวสกัดต่อประสิทธิภาพการสกัด พบว่าประสิทธิภาพการสกัดจะเพิ่มขึ้นจาก 36 เป็น 85 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นของตัวสกัดเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ในส่วนของการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกในขั้นตอนการสกัดกลับ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการสกัดกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อประสิทธิภาพการสกัดกลับ
(Srinivasa, Devi และ Reddy, 2000)

| ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก (โมลาร์) | ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดง (%) |
|--|---------------------------------------|
| 0.01 | 2.9 |
| 0.02 | 5.8 |
| 0.05 | 17.0 |
| 0.07 | 22.6 |
| 0.10 | 31.8 |
| 0.20 | 54.8 |
| 0.50 | 85.4 |
| 1.00 | 97.6 |
| 2.00 | 100 |

Alguacil, Cobo และ Alonso (2002) ได้ทำการศึกษากการแยกทองแดงออกจากสารละลายกรดไนตริกโดยการสกัดด้วย Acorga M5640 (ตัวสกัดประเภทไฮดรอกซีออกซิม) โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาได้ดังนี้

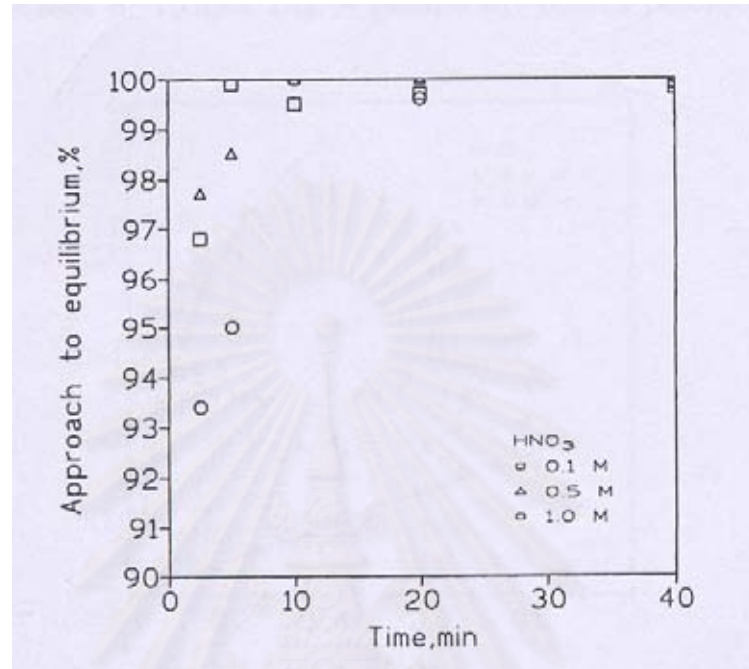
- อัตราการสกัด

ทำการศึกษาโดยใช้สารละลายที่มีทองแดงเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นกรดไนตริกต่างๆกัน โดยใช้ตัวสกัด Acorga M5640 เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าปฏิกิริยาจะเข้าสู่สมดุลภายใน 10 นาที และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดไนตริกเพิ่มขึ้น แม้ว่าจะไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสกัดทองแดง แต่มีผลทำให้การระการรองรับทองแดงของตัวสกัดลดลง (ความเข้มข้นทองแดง 0.99, 0.57 และ 0.24 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้กรดไนตริกเข้มข้นเท่ากับ 0.1, 0.5 และ 1.0 โมลาร์ ที่ระยะเวลาการสกัด 10 นาที)

- ค่าพีเอชเริ่มต้นและความเข้มข้นของตัวสกัด

ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงของตัวสกัด Acorga M5640 จะขึ้นอยู่กับความเป็นกรดเริ่มต้นของสารละลาย ทำการศึกษาโดยใช้สารละลายไนเตรทที่มีทองแดงเข้มข้น 0.1 กรัมต่อลิตร และทำการปรับพีเอชสารละลายด้วยกรดไนตริก และใช้ตัวสกัด Acorga M5640 ที่มีความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลการศึกษาพบว่าค่าพีเอชของสารละลายมีผลต่อ

การสกัดทองแดง โดยที่พีเอช 1 ให้ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงเกือบสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ค่าพีเอชเริ่มต้นและความเข้มข้นของ Acorga M5640 ของการสกัดทองแดง (Alguacil, Cobo และ Alonso, 2002)

ทัศนลักษณ์ จิระภาพันท์ (2545) ได้ทำการศึกษาการนำกลับนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานชุบเคลือบโลหะโดยใช้ตัวสกัด LIX 84-I โดยทำการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียในขั้นตอนการสกัด ที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) = 2:1 พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียเท่ากับ 8.4 โดยให้ประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิล 88.5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการศึกษาอัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) พบว่าอัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัดที่เหมาะสม คือ 10:3 โดยมีประสิทธิภาพการสกัดนิกเกิล 89.4 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นได้ศึกษาค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกและอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอ็กซ์แทรกที่เหมาะสมในขั้นตอนการสกัดกลับออกจากตัวสกัด ผลการทดลอง พบว่าเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอ็กซ์แทรกเป็น 1:2 เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ได้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีประมานนิกเกิล 9,068 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการสกัดกลับนิกเกิลออกจากตัวสกัด 98.4 เปอร์เซ็นต์ ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด พบว่าในการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 22 จะมีประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลกลับออกจาก

ตัวสกัดเฉลี่ย 78 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนการทดลองตั้งแต่ครั้งที่ 23 เป็นต้นไป พบว่าประสิทธิภาพในการสกัดกลับนิกเกิลออกจากตัวสกัดจะลดลงอย่างมาก คิดเป็นประสิทธิภาพในการสกัดกลับนิกเกิลออกจากตัวสกัดเฉลี่ย 41 เปอร์เซ็นต์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

การวิจัยนี้ดำเนินการขึ้นที่ห้องปฏิบัติการ ณ ชั้นที่ 17 ตึกมหามกุฏ สหสาขาวิทยาศาสตร์ ลี้ังแควดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย การดำเนินงานประกอบด้วย การศึกษาองค์ประกอบเริ่มต้นของน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงของโรงงานชุบโลหะ การศึกษากระบวนการสกัดทองแดงด้วยตัวสกัด LIX 84-I การศึกษากระบวนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด การศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด และประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการนำกลับทองแดง โดยได้แสดงรูปตัวสกัด LIX 84-I ในรูปที่ 3.1

3.2 น้ำเสียโรงงานชุบโลหะสำหรับใช้ในการวิจัย

น้ำเสียที่ใช้ในการดำเนินการวิจัยนี้ เป็นน้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงของโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ โดยนำมาจากบ่อกักน้ำเสียของกระบวนการชุบทองแดงก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดทางเคมีของโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ตัวสกัด LIX 84-I



รูปที่ 3.2 น้ำเสียจากกระบวนการชุบทองแดงของโรงงานชุบโลหะ

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องเขย่า (shaker)
2. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
3. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)
4. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
5. กรวยแยก
6. กระจกตวง
7. ปิเปต
8. กระดาษกรอง Whatman 1PS (phase separation paper)
9. กระดาษกรอง GF/C

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

- 3.4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้นทางเคมีของน้ำเสียจากระบวนการชุบโลหะ
 1. วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช ความนำไฟฟ้า ไออาร์พี
 2. วิเคราะห์ปริมาณทองแดงในน้ำเสีย โดยนำน้ำเสียไปวัดปริมาณโลหะหนักอื่นๆ โดยการวัดค่าความดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 3.4.2 ศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในขั้นตอนการสกัด
 1. ปรับพีเอชของน้ำเสียเป็นค่าต่าง ๆ กัน คือ 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 และ 12 โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช
 2. เติมน้ำเสียที่ปรับพีเอชแล้วลงในขวดรูปชมพู่และเติมตัวสกัด LIX 84-I โดยใช้ อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) = 2:1
 3. เขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
 4. ทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้นจากกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วแยกสารละลายออกจากกัน
 5. เก็บตัวอย่างแรฟฟินेट (raffinate) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณทองแดงเหลืออยู่ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

6. กำหนดปริมาณทองแดงที่อยู่ในตัวสกัด (extract) และประสิทธิภาพในการสกัด
 7. เลือกพีเอชที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง
- เพื่อใช้เป็นตัวแปรควบคุมในการเตรียมการสกัดสำหรับการทดลองต่อไป

3.4.3 ศึกษาหาอัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัดที่เหมาะสมในขั้นตอนการสกัด

1. ปรับพีเอชของน้ำเสี้ยวให้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองข้อ 2
2. เติมน้ำเสี้ยวที่ปรับพีเอชแล้วและตัวสกัด LIX 84-I ลงในขวดรูปชมพู่ โดยใช้อัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด (A:O ratio) 10 ค่า ดังนี้ 10:1 10:2 10:3 10:4 10:5 10:6 10:7 10:8 10:9 และ 10:10
3. เขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
4. ทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้นกัน 1 ชั่วโมง แล้วแยกสารละลายออกจากกัน
5. เก็บตัวอย่างแรฟไฟเนต (raffinate) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณทองแดงเหลืออยู่ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปคโตรโฟโตมิเตอร์
6. กำหนดปริมาณทองแดงที่อยู่ในตัวสกัด (extract) และประสิทธิภาพในการสกัด
7. เลือกค่าอัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัดที่เหมาะสม โดยการพิจารณาจากประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง เพื่อเป็นตัวแปรควบคุมในการเตรียมการสกัดสำหรับการทดลองต่อไป

3.4.4 ศึกษาหาค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก และอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัดที่เหมาะสมในกระบวนการสกัดกลับออกจากตัวสกัด

1. ปรับพีเอชของน้ำเสี้ยวให้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองข้อที่ 2
2. เติมน้ำเสี้ยวที่ปรับพีเอชแล้ว และตัวสกัด LIX 84-I ลงในขวดรูปชมพู่ โดยใช้อัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด (A:O ratio) จากการทดลองข้อที่ 3
3. เขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
4. ทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้นจากกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วแยกสารละลายออกจากกัน
5. เก็บตัวอย่างแรฟไฟเนต (raffinate) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณทองแดงเหลืออยู่ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปคโตรโฟโตมิเตอร์
6. กำหนดปริมาณทองแดงที่อยู่ในตัวสกัด (extract) และประสิทธิภาพในการสกัด

7. เติมตัวสกัดลงในหลอดทดลอง
8. จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.2 1 2 4 และ 10 โมลาร์ และอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัดเป็น 1:1 1:2 1:3 1:4 และ 1:5
9. เขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
10. เขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
11. ทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้นกัน 1 ชั่วโมง แล้วแยกสารละลายออกจากกัน
12. กำหนดปริมาณทองแดงที่เหลือในตัวสกัด (stripped solvent) และประสิทธิภาพในการสกัดกลับออกจากตัวสกัด

3.4.5 ศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด

1. ปรับพีเอชของน้ำเสียให้เป็นค่าที่ได้จากการทดลองข้อที่ 2
2. เติมน้ำเสียที่ปรับพีเอชแล้ว และตัวสกัด LIX 84-I ลงในขวดรูปชมพู่ โดยใช้อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) จากการทดลองข้อที่ 3
3. เขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
4. ทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้นจากกันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วแยกสารละลายออกจากกัน
5. เก็บตัวอย่างแรฟฟินेट (raffinate) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณทองแดงเหลืออยู่ โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
6. กำหนดปริมาณทองแดงที่อยู่ในตัวสกัด (extract) และประสิทธิภาพในการสกัด
7. เติมตัวสกัดลงในหลอดทดลอง
8. จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก และอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัดในขั้นตอนการสกัดกลับออกจากตัวสกัดจากการทดลองข้อ 4
9. เขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที
10. เขย่าอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที

11. ทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้นกัน 1 ชั่วโมง แล้วแยกสารละลายออกจากกัน
12. คำนวณปริมาณทองแดงที่เหลือในตัวสกัด (stripped solvent) และประสิทธิภาพในการสกัดกลับออกจากตัวสกัด
13. ทำการทดลองซ้ำใหม่ โดยไม่เปลี่ยนตัวสกัด
14. วิเคราะห์ประสิทธิภาพในการสกัด (% extraction) และประสิทธิภาพในการสกัดกลับออกจากตัวสกัด (% stripping) โดยเทียบกับจำนวนครั้งในการใช้งาน



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด LIX 84-I

3.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล

ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องทำการวิเคราะห์ รวมทั้งวิธีการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

| พารามิเตอร์ | การวิเคราะห์ |
|--------------|---|
| พีเอช | เครื่องวัดพีเอช |
| ความนำไฟฟ้า | เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า |
| ไออาร์พี | เครื่องวัดค่าไออาร์พี |
| ปริมาณทองแดง | เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ปริมาณโลหะและคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย

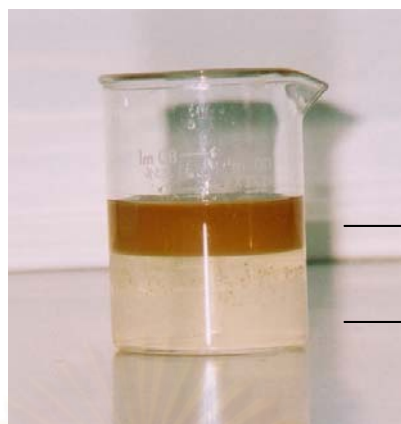
การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเบื้องต้นจะวิเคราะห์เฉพาะทองแดง เนื่องจากน้ำเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยนั้น นำมาบ่อกักน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะด้วยทองแดงก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดรวม โดยใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งปริมาณทองแดงในน้ำเสีย ค่าพีเอช ค่าความนำไฟฟ้า และค่าไออาร์พี แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 และตารางที่ ผ-1 ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.1 ปริมาณทองแดงและคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย

| พารามิเตอร์ | ผลการวิเคราะห์ |
|---|----------------|
| ทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร) | 4,520 |
| ค่าพีเอช | 12.12 |
| ค่าความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร) | 33.82 |
| ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลต์) | 31.5 |

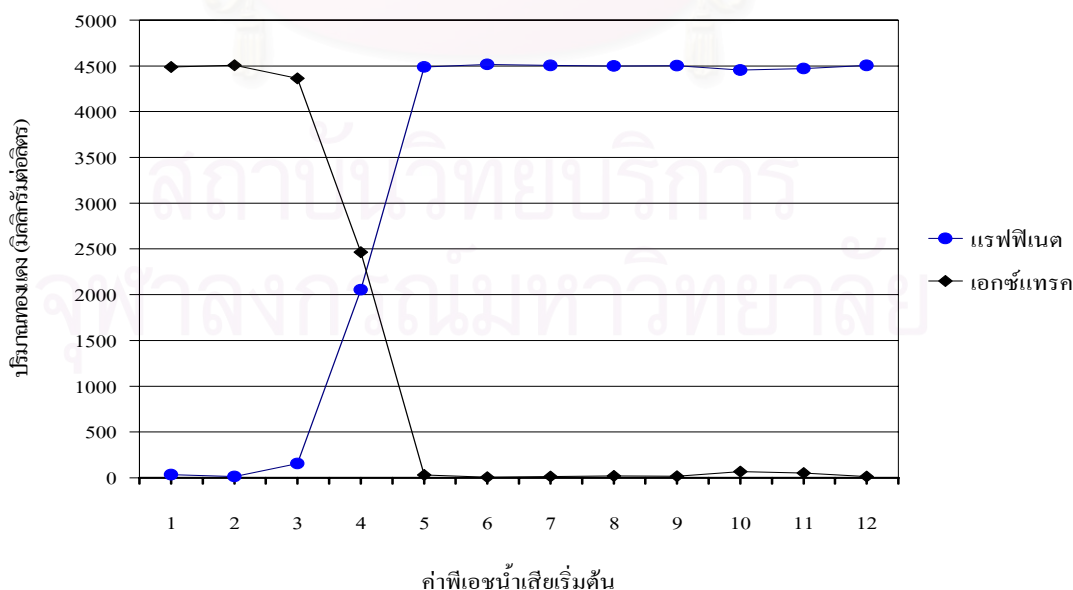
4.2 ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในขั้นตอนการสกัด

การทดลองเพื่อศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์พบว่าน้ำเสียมีปริมาณทองแดง 4,520 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกในการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าเป็น 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 และ 12 อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) เท่ากับ 2:1 โดยปริมาณสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ดังแสดงในตารางที่ ผ-43 ภาพการทดลองหลังการเขย่าดังแสดงในรูปที่ 4.1



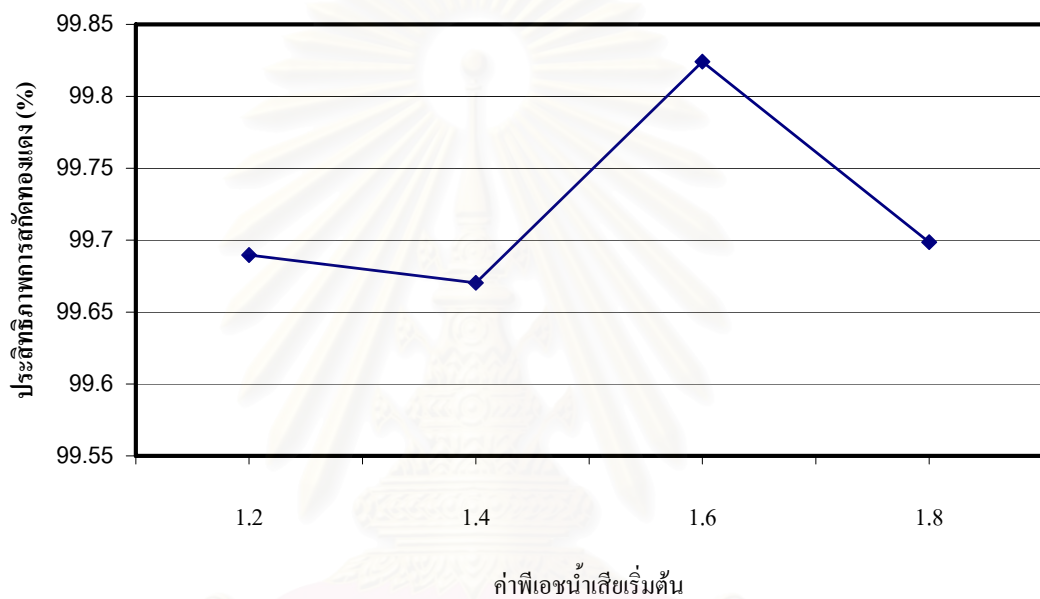
รูปที่ 4.1 น้ำเสียและตัวสกัดภายหลังการเขย่า

เมื่อทำการเขย่าที่ความเร็วรอบ 300 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ เพื่อให้สารละลายเกิดการแยกชั้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลการทดลองดังแสดงในกราฟแสดงปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนตและเอกซ์แทรคที่รูปที่ 4.2 การปรับพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้มีค่าตั้งแต่ 5 ถึง 12 ประสิทธิภาพการสกัดเกือบ 0 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 4 จะให้ประสิทธิภาพการสกัด 54.54 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรคเป็น 2,055 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้เป็น 1 และ 2 จะให้ประสิทธิภาพการสกัดเป็น 99.27 และ 99.70 เปอร์เซ็นต์ โดยคิดเป็นปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรคเป็น 33.13 และ 13.46 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนตและเอกซ์แทรคที่ค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียต่างๆ

ดังนั้นจากผลการทดลองที่ได้ใน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการสกัดทองแดงที่ค่าพีเอช เริ่มต้นน้ำเสียต่างๆ พบว่าที่ค่าพีเอชเป็น 1 และ 2 มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาลึกลง ไป คือที่ค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียเป็น 1.2 1.4 1.6 และ 1.8 ที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัดเท่ากับ 2:1 พบว่าเมื่อให้ค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียเป็น 1.6 มีประสิทธิภาพการสกัดทองแดงสูงถึง 99.8 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในกราฟแสดงประสิทธิภาพการสกัดทองแดงของตัวสกัด LIX 84-I รูปที่ 4.3

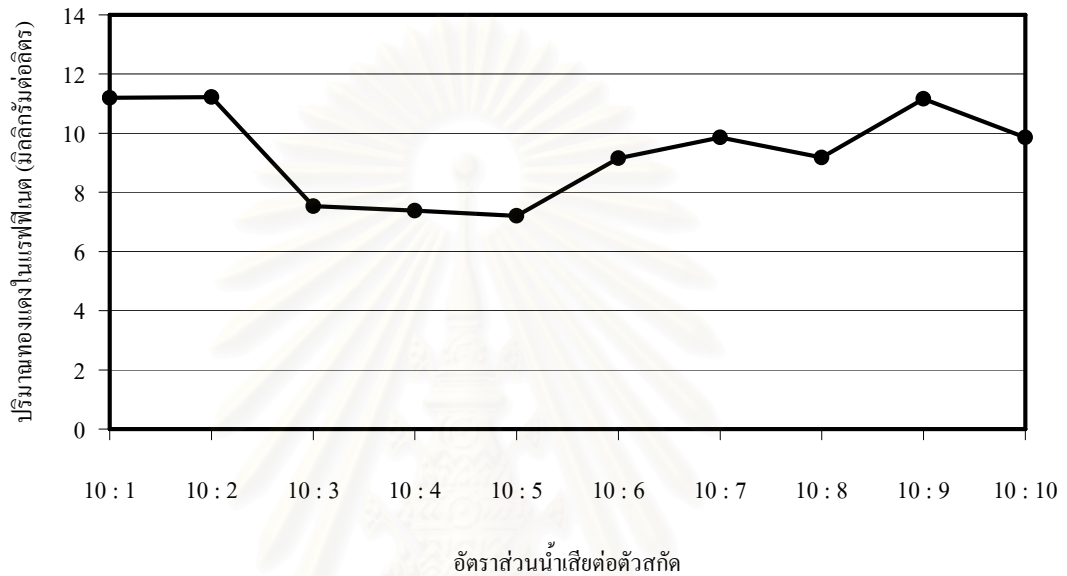


รูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงที่ค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียเป็น 1.2 1.4 1.6 และ 1.8

4.3 อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) ที่เหมาะสมในขั้นตอนการสกัด

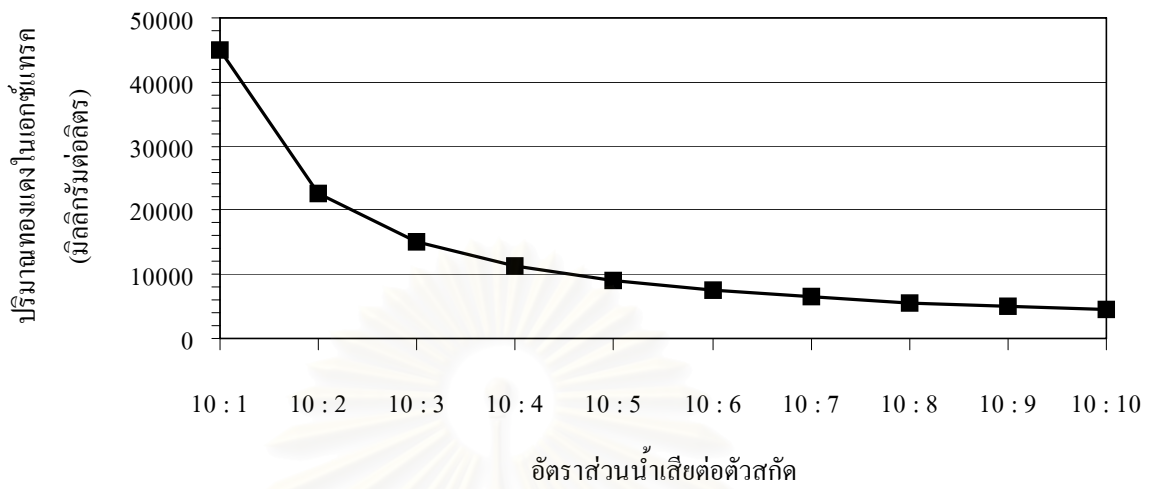
ในส่วนของการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัดที่เหมาะสมในขั้นตอนการสกัด โดยน้ำเสียที่ใช้มีปริมาณทองแดง 4,520 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 1.6 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองข้อที่ 4.2 จากนั้นทำการเติมตัวสกัดที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) ต่างๆ ดังนี้ 10:1 10:2 10:3 10:4 10:5 10:6 10:7 10:8 10:9 และ 10:10 จากนั้นทำการเขย่าและตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายแยกชั้นออกจากกัน

ผลการทดลอง พบว่าที่อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสก๊ตเท่ากับปริมาณทองแดงที่คงเหลืออยู่ในแรฟฟิเนตที่อัตราส่วน 10:3 ถึง 10:5 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4

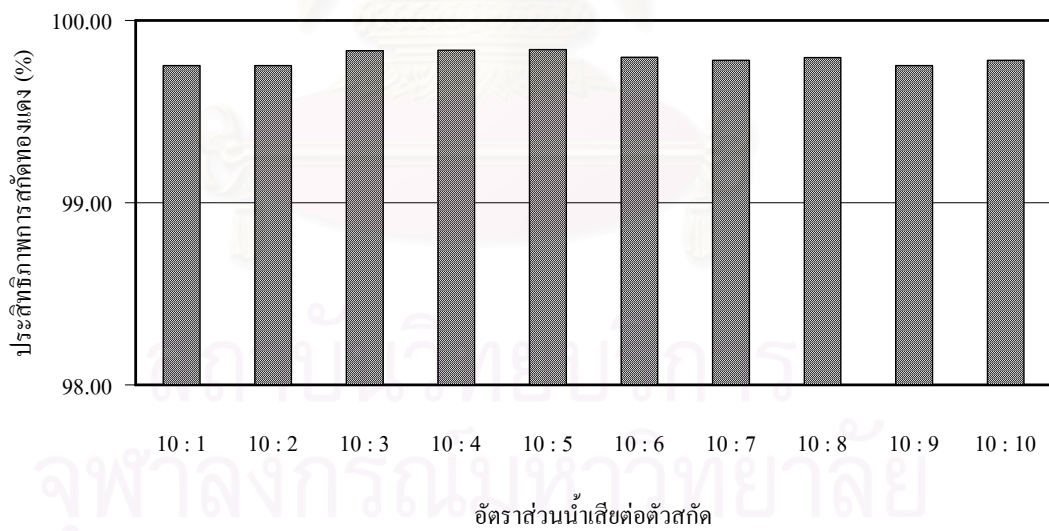


รูปที่ 4.4 ปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนตที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสก๊ตต่างๆ

และเมื่อพิจารณาปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรกในรูปที่ 4.5 พบว่าที่อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสก๊ตเป็น 10:1 มีปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรกสูงถึง 45,088 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมาคือ ที่อัตราส่วน 10:2 แต่เมื่อพิจารณาจากในส่วนของประสิทธิภาพการสกัดทองแดงดังแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 10:3 ถึง 10:10 ให้ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงสูงใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพประมาณ 99.84 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นอัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสก๊ตที่เหมาะสมคือ 10:3 เนื่องจากใช้ปริมาณตัวสก๊ตน้อยกว่าในขณะที่มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงใกล้เคียงกัน



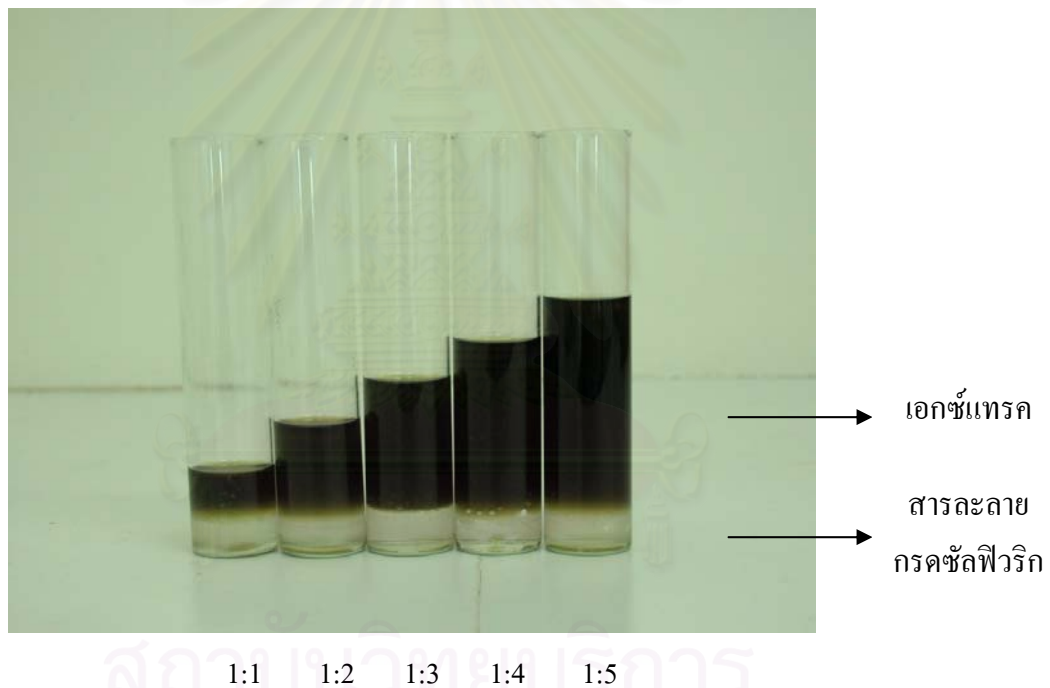
รูปที่ 4.5 ปริมาณทองแดงในเอ็กซ์แทรกต์ที่อัตราส่วนน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัดต่างๆ



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการสกัดทองแดงที่อัตราส่วนน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัดต่างๆ

4.4 ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกและอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอทซ์แทรคที่เหมาะสมในกระบวนการสกัดกลับออกจากตัวสกัด

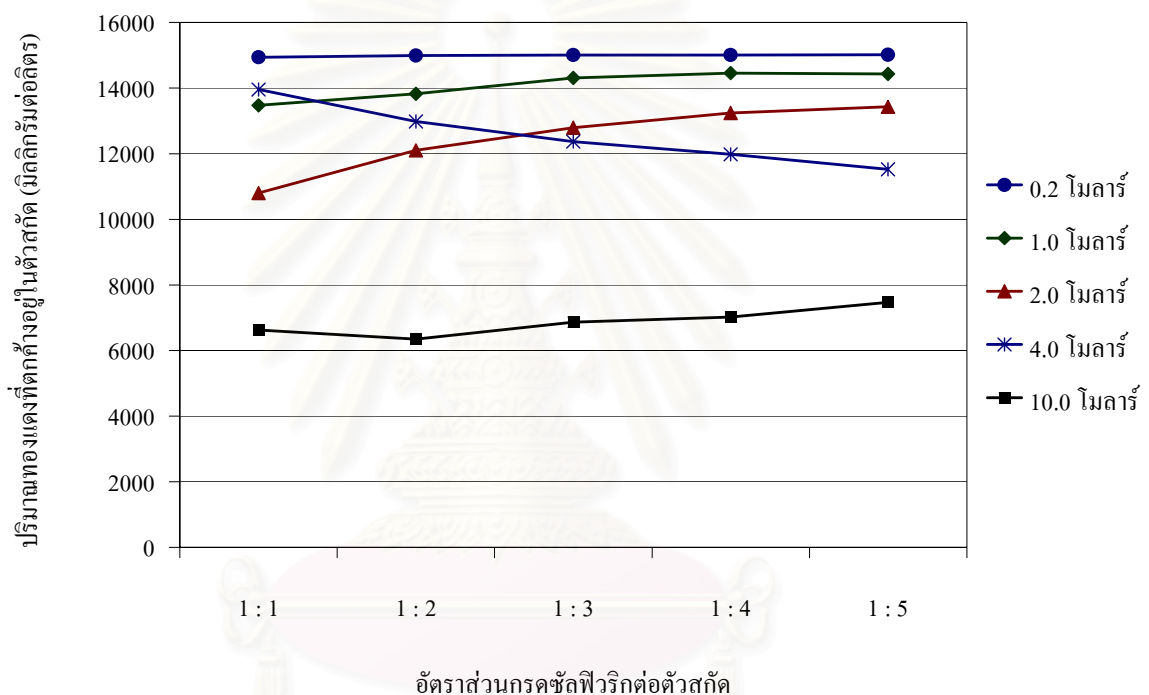
ในการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกและอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอทซ์แทรคที่เหมาะสม จะทำการแปรค่าความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเป็น 0.2 1.0 2.0 4.0 และ 10.0 โมลาร์ และให้อัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอทซ์แทรค (A:O ratio) เท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 ค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกและอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอทซ์แทรคที่เหมาะสมนั้น พิจารณาโดยเลือกจากปริมาณของทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่สูงสุด



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองหาอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอทซ์แทรคที่เหมาะสม

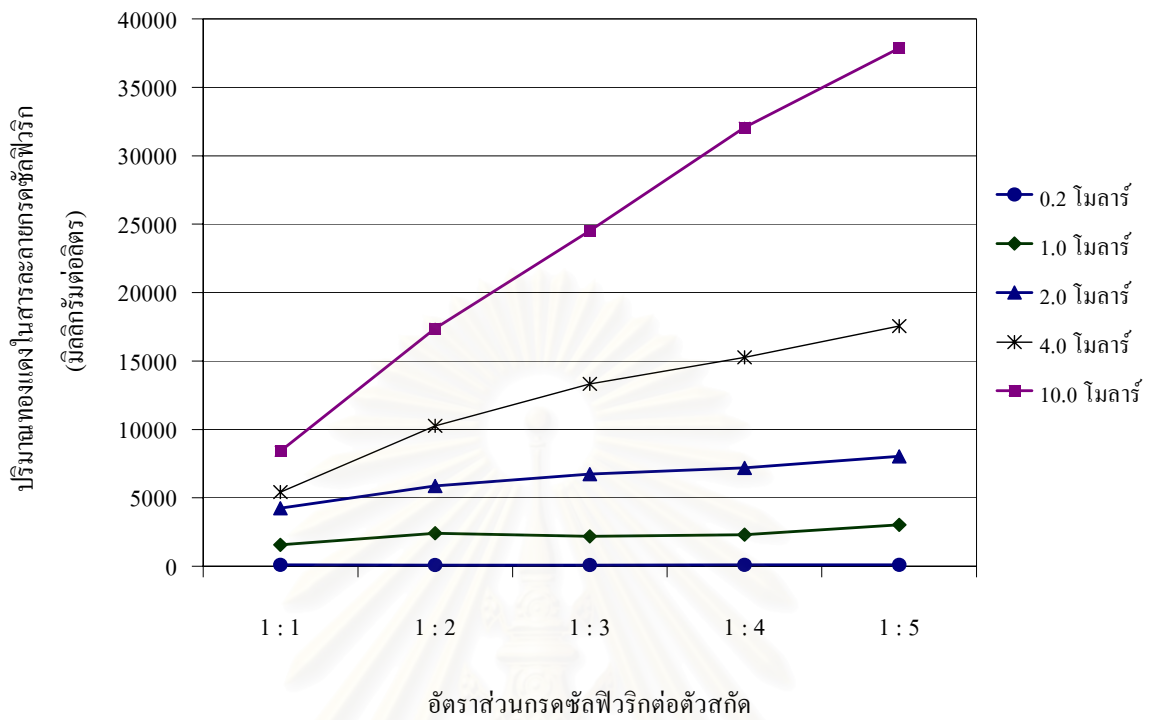
จากการทดลอง เมื่อพิจารณาปริมาณทองแดงที่ตกค้างอยู่ในตัวสกัดดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่าที่ความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริก 10 โมลาร์ ในทุกๆอัตราส่วนมีปริมาณทองแดงตกค้างอยู่ในตัวสกัดน้อยกว่าที่ความเข้มข้นอื่นๆ และเมื่อพิจารณาในส่วนของปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริกในรูปที่ 4.9 พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกเท่ากับ 10 โมลาร์มีปริมาณทองแดงมากกว่าที่ความเข้มข้นสารละลายกรดซัลฟิวริกอื่นๆ

และจากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 10 โมลาร์ในการสกัดกลับ จะมีประสิทธิภาพการสกัดกลับออกจากตัวสกัดดีที่สุดในทุกอัตราส่วน และในส่วนของอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟูริกต่อเอ็กซ์แทรก พบว่าที่อัตราส่วนของของสารละลายกรดซัลฟูริกต่อเอ็กซ์แทรกเท่ากับ 1:2 ของการสกัดกลับด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 10 โมลาร์ มีประสิทธิภาพการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด 57.8 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.8 ปริมาณทองแดงที่ตกค้างอยู่ในตัวสกัดที่อัตราส่วนกรดซัลฟูริกต่อตัวสกัดต่างๆ

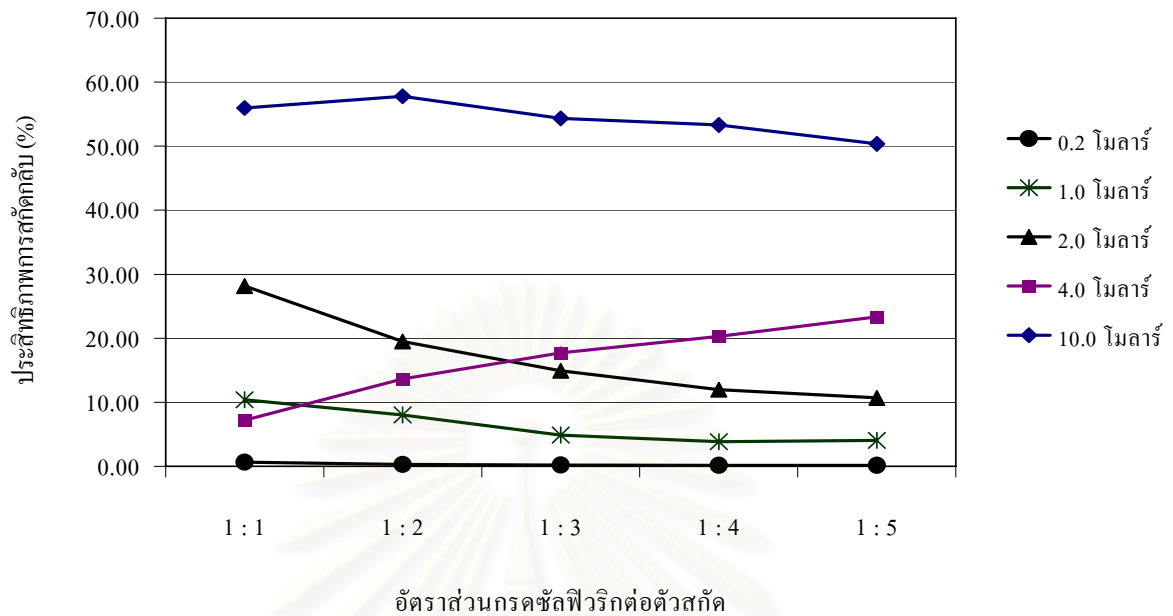
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่อัตราส่วนกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัดต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด

| อัตราส่วนกรดซัลฟิวริก ต่อเอ็กซ์แทรค (A:O ratio) | ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด (%) | | | | |
|--|---|----------|----------|----------|-----------|
| | ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก | | | | |
| | 0.2 โมลาร์ | 1 โมลาร์ | 2 โมลาร์ | 4 โมลาร์ | 10 โมลาร์ |
| 1:1 | 0.7 | 10.2 | 28.2 | 7.2 | 56.0 |
| 1:2 | 0.3 | 8.0 | 19.5 | 13.7 | 57.8 |
| 1:3 | 0.2 | 4.9 | 14.9 | 17.7 | 54.3 |
| 1:4 | 0.2 | 3.8 | 12.0 | 20.3 | 53.3 |
| 1:5 | 0.1 | 4.0 | 11.0 | 23.4 | 50.4 |

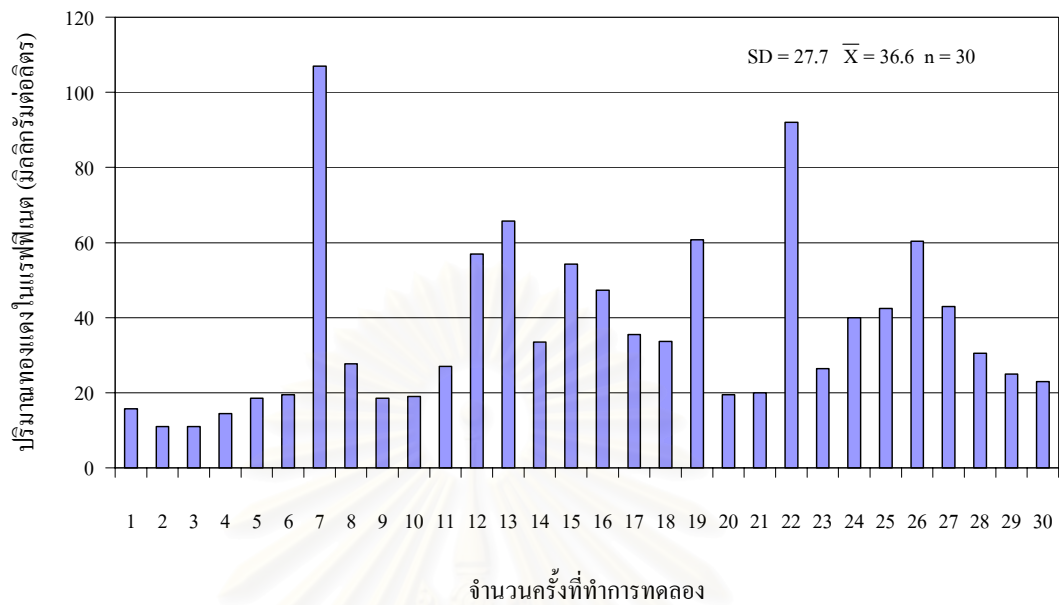


รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการสกัดกลับของแฉงที่อัตราส่วนสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัดต่างๆ

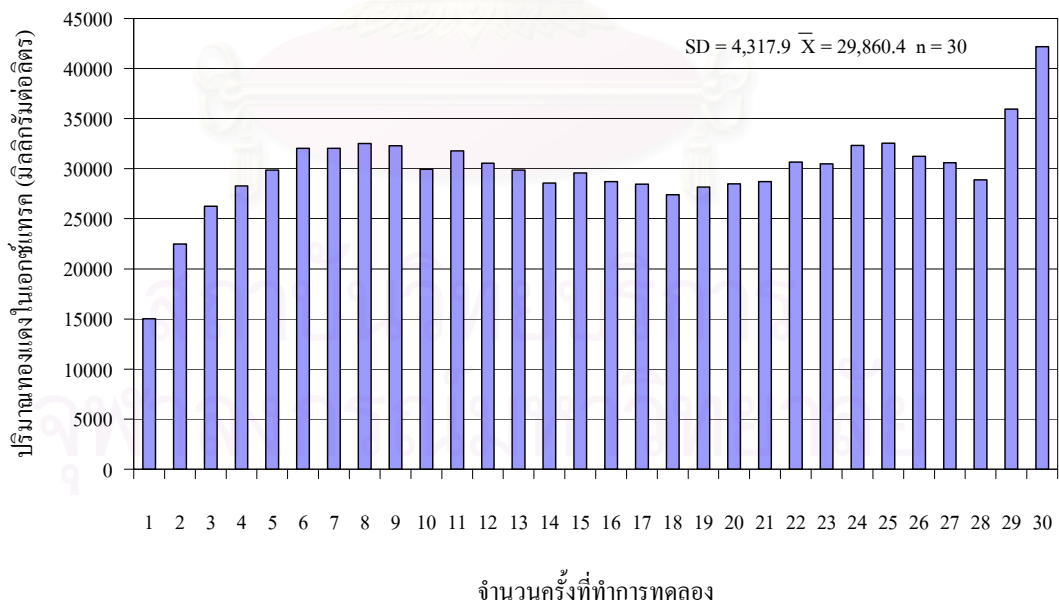
4.5 อายุการใช้งานของตัวสกัด

ในการทดลองเพื่อศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด โดยการนำตัวสกัดที่ผ่านการสกัดแล้ว มาวนใช้สกัดทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของทองแดงประมาณ 4,520 มิลลิกรัมต่อลิตร ซ้ำ โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้ง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดของตัวสกัดที่ใช้แล้ว และประสิทธิภาพในการสกัดกลับของแฉงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก

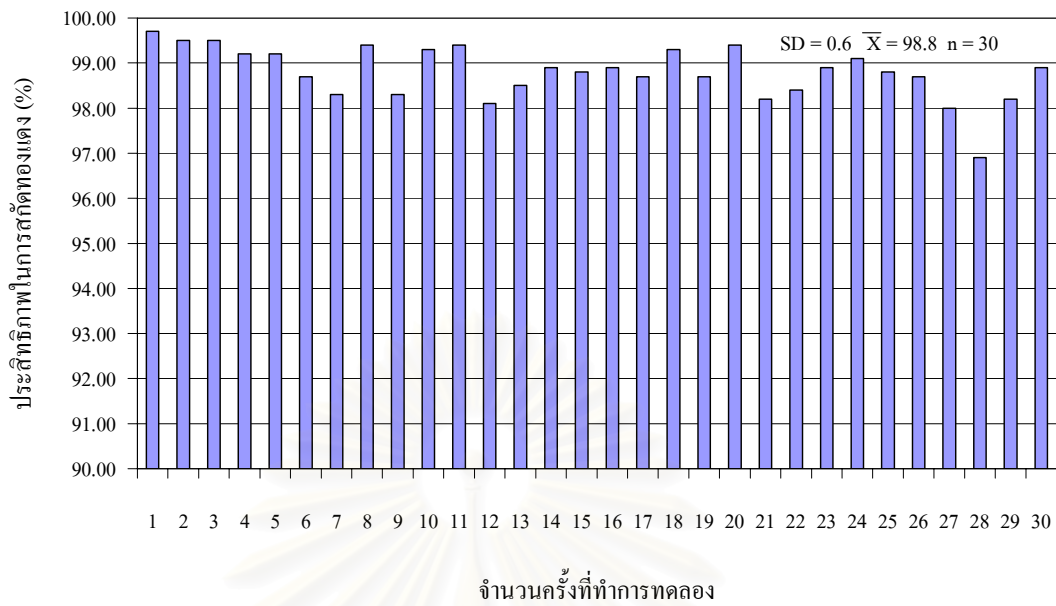
จากผลการทดลอง พบว่าในขั้นตอนการสกัดทองแดงจะมีปริมาณทองแดงอยู่ในแรฟไฟเนต เฉลี่ย 36.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรค 29,860 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงเฉลี่ย 98.8 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ ซึ่งถ้าพิจารณาจากกราฟทั้ง 3 จะพบว่าสามารถใช้ตัวสกัดในการสกัดต่อไปได้มากกว่า 30 ครั้ง



รูปที่ 4.11 ปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนตในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด



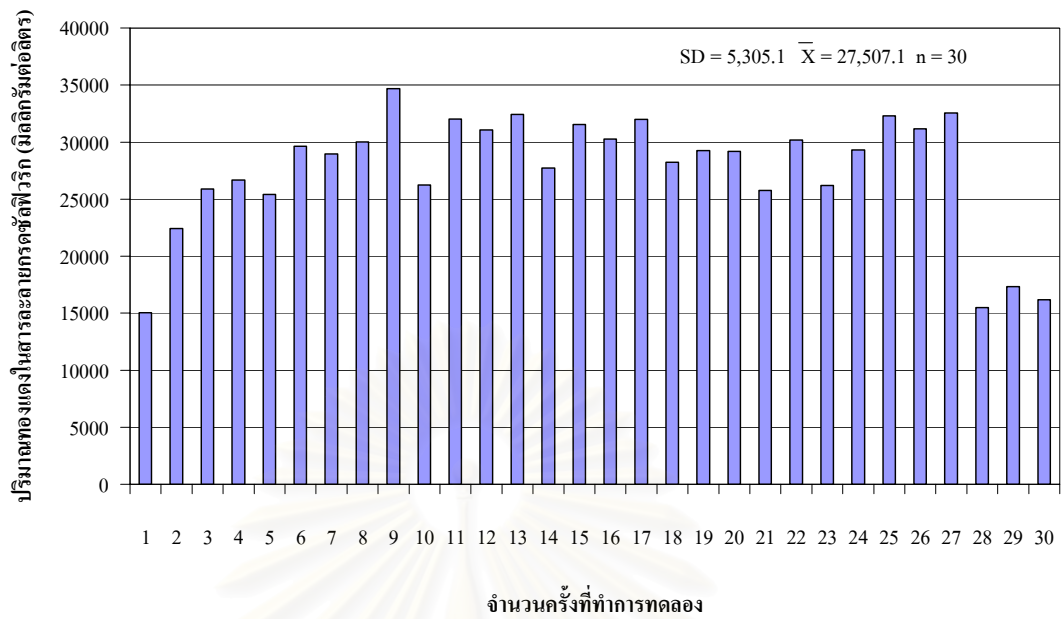
รูปที่ 4.12 ปริมาณทองแดงในแอโนดในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด



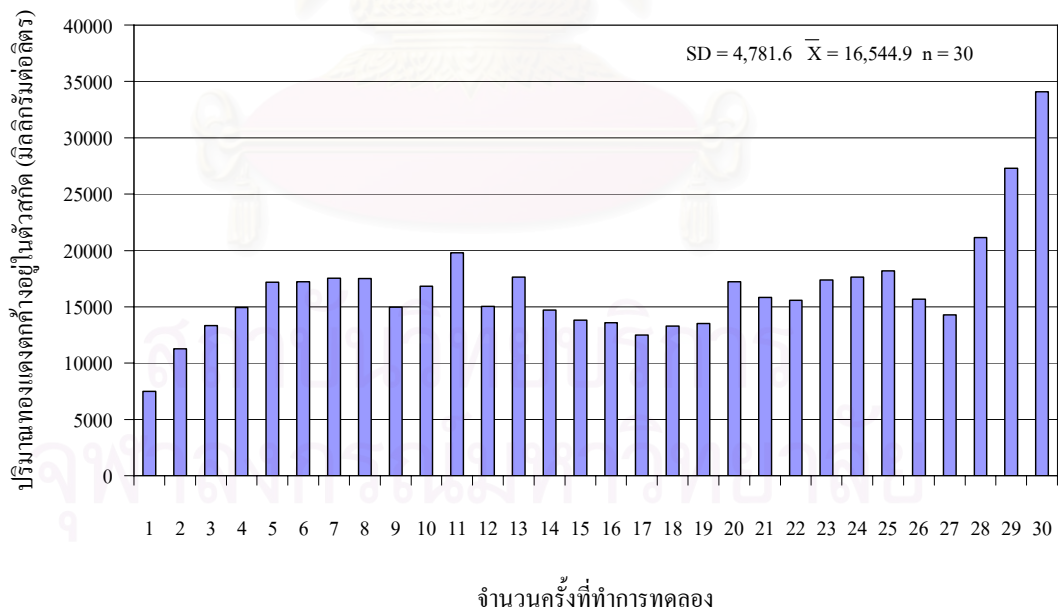
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด

แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของขั้นตอนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด พบว่าในการทดลองตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึง 27 มีปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริกเฉลี่ย 28,749 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณทองแดงตกค้างอยู่ในตัวสกัดเฉลี่ย 15,327 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดเฉลี่ย 50.0 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการทดลองตั้งแต่ครั้งที่ 28 เป็นต้นไป พบว่าประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดลดลงอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.14 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ

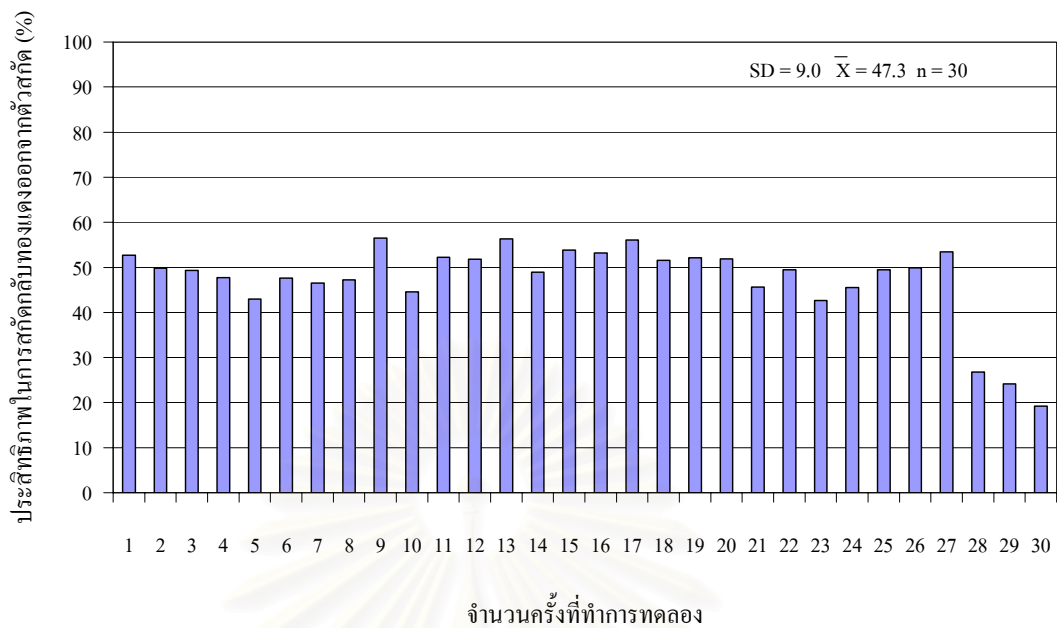
ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ในการสกัดทองแดงออกจากรู้น้ำเสียด้วยตัวสกัด LIX 84-I เมื่อใช้ตัวสกัดปริมาณ 300 มิลลิลิตร และนำมาใช้ในการสกัดทองแดงออกจากรู้น้ำเสียได้ 27 รอบ สามารถสกัดทองแดงออกจากรู้น้ำเสียได้ 788.8 กรัม คิดเป็นความสามารถในการสกัดทองแดง 2,629.3 กรัมทองแดงต่อลิตรของตัวสกัด



รูปที่ 4.14 ปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริกในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสักด



รูปที่ 4.15 ปริมาณทองแดงตกค้างอยู่ในตัวสักดในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสักด

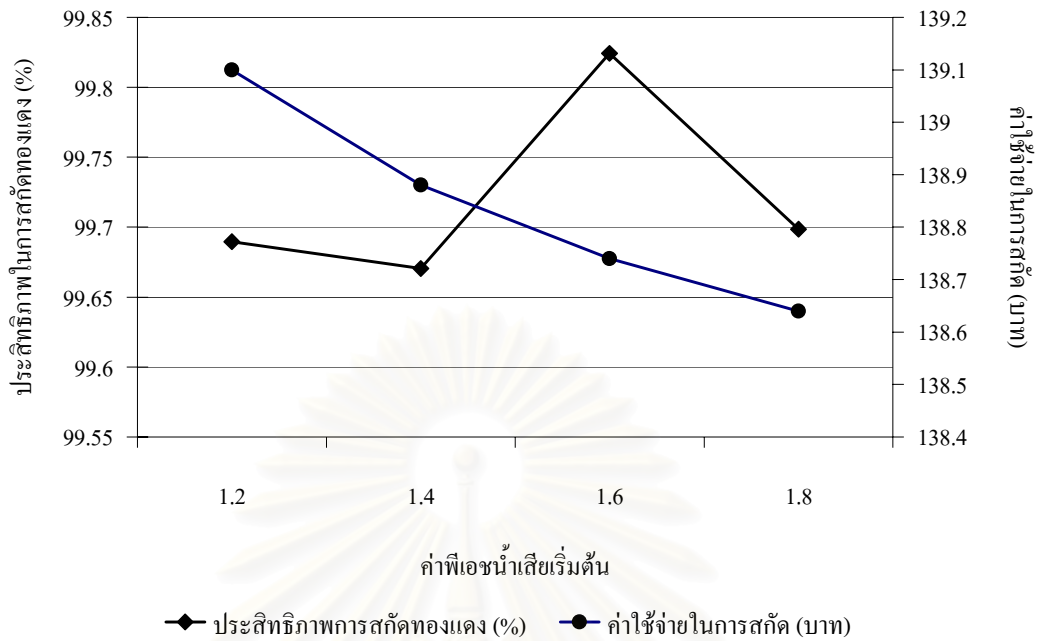


รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการสั้ดกลับทองแดงออกจากตัวสั้ดในการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสั้ด

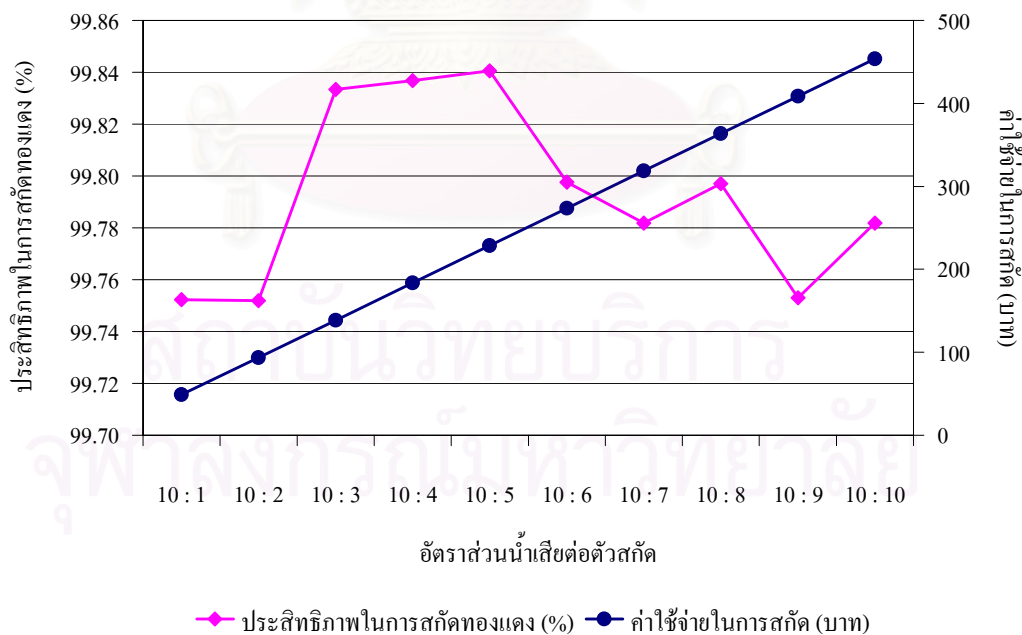
4.6 ประมาณการค่าใช้จ่ายในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสั้ดด้วยตัวทำละลาย

ในการพิจารณาค่าใช้จ่ายสำหรับขั้นตอนการปรับพีเอชน้ำเสียที่มีปริมาณทองแดง 4,520 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ตารางที่ ผ-43 โดยค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในขั้นตอนการสั้ด คือ 1.6 จะต้องสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้นในการปรับพีเอชต่อน้ำเสีย 1 ลิตร เท่ากับ 26.7 มิลลิลิตร คิดเป็นค่าใช้จ่าย 3.74 บาท

เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายสำหรับขั้นตอนการสั้ดทองแดงออกจากน้ำเสีย ที่มีปริมาณทองแดง 4,520 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวสั้ด LIX 84-I ที่อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสั้ด เท่ากับ 10:3 ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ ผ-44 นั่นคือต้องใช้ตัวสั้ดปริมาณ 300 มิลลิลิตร ต่อการสั้ดทองแดงออกจากน้ำเสีย 1 ลิตร คิดเป็นค่าใช้จ่ายในส่วน of ตัวสั้ดเป็น 135 บาทต่อลิตรน้ำเสีย สำหรับการสั้ดครั้งแรก และเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณทองแดงที่สั้ดได้ต่อครั้ง คือ 15.051 กรัมต่อลิตรของตัวสั้ด คิดเป็นค่าใช้จ่าย 8.99 บาทต่อกรัมของทองแดงที่สั้ดได้

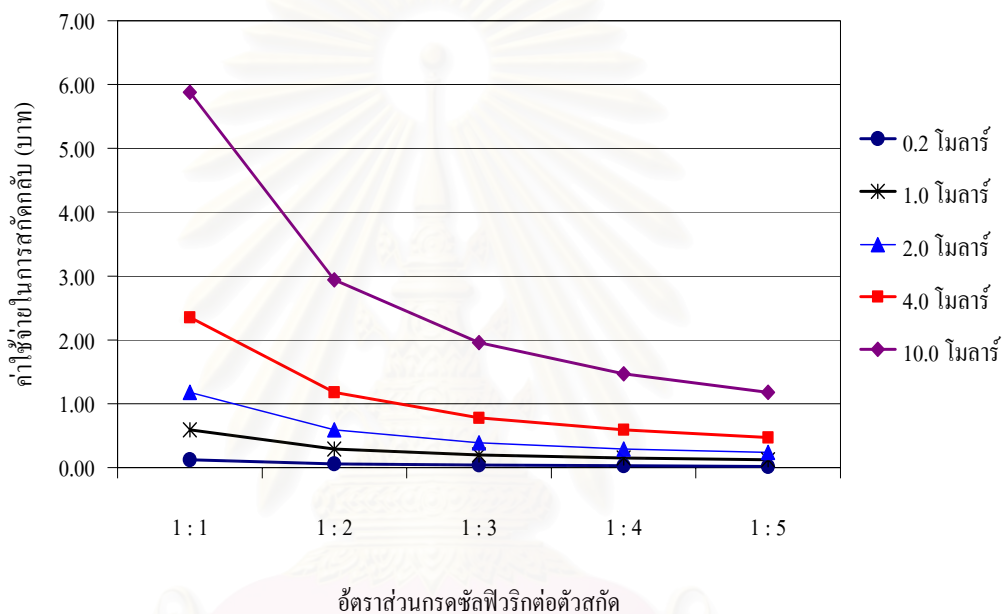


รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงและค่าใช้จ่ายในการสกัดในการศึกษา
ค่าพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นที่เหมาะสม



รูปที่ 4.18 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงและค่าใช้จ่ายในการสกัดในการศึกษา
อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัดที่เหมาะสม

ในส่วนของการพิจารณาค่าใช้จ่ายสำหรับขั้นตอนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ ที่อัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริก ต่อตัวสกัดเท่ากับ 1:2 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และตารางที่ ผ-45 โดยในกระบวนการสกัดใช้ตัวสกัด ปริมาณ 300 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงต้องใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกปริมาณ 150 มิลลิลิตร คิดเป็น ค่าใช้จ่ายในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 2.94 บาท หรือ เท่ากับ 0.68 บาทต่อกรัมของทองแดงที่สกัดกลับได้



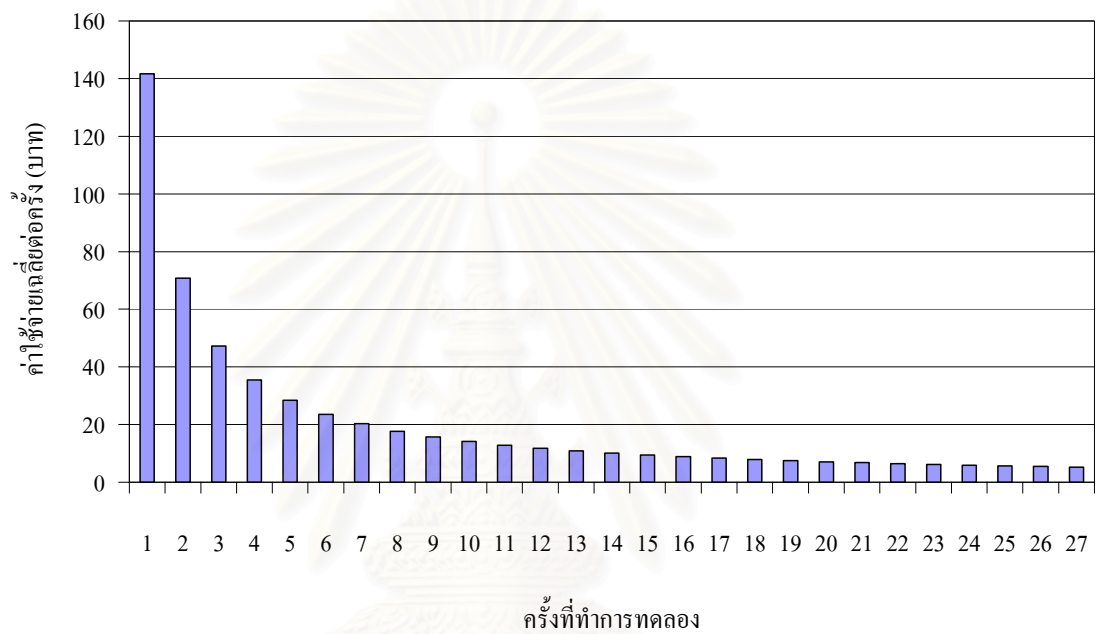
รูปที่ 4.19 ค่าใช้จ่ายในการสกัดกลับทองแดงที่อัตราส่วนกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัด และความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่างๆ

และเนื่องจากตัวสกัดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ดังนั้นค่าใช้จ่ายเนื่องจากตัวสกัดโดยเฉลี่ยต่อจำนวนครั้งในการสกัดจะลดลงเมื่อจำนวนครั้งในการสกัดเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณ ค่าใช้จ่ายในการสกัดทองแดงออกจากรุ่น้ำเสีย 1 ลิตร ได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าใช้จ่ายในการสกัดทองแดง} &= (\text{ค่าใช้จ่ายเนื่องมาจากตัวสกัด} \div \text{จำนวนครั้งในการสกัด}) \\
 &+ \text{ค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอชน้ำเสียด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก} \\
 &+ \text{ค่าใช้จ่ายในการสกัดกลับด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก} \\
 &= (135 \div n) + 3.74 + 2.94
 \end{aligned}$$

โดย n คือ จำนวนครั้งในการสกัด

เมื่อกำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมตั้งสมการแล้ว ทำให้ทราบว่าค่าใช้จ่ายโดยรวมในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย จำนวน 27 ครั้ง ตั้งแต่ขั้นตอนการปรับพีเอชน้ำเสีย การสกัดด้วยตัวสกัด LIX 84-I และการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และตารางที่ ผ-46 คิดเป็นค่าใช้จ่ายโดยรวมในการนำกลับทองแดงเฉลี่ยต่อครั้ง คือ 5.25 บาทต่อลิตรน้ำเสีย หรือประมาณ 1.22 บาทต่อกรัมของทองแดงที่สกัดได้



รูปที่ 4.20 ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้งในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำกลับทองแดงจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองนำมาจากน้ำล้างชิ้นงานจากกระบวนการชุบเคลือบโลหะด้วยทองแดงของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวมีปริมาณทองแดงประมาณ 4,520 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเริ่มต้นประมาณ 12.1 ในขั้นตอนการทดลองทำในระบบขวดเขย่า โดยทำการศึกษากระบวนการสกัดด้วยตัวสกัด LIX 84-I และศึกษากระบวนการสกัดกลับออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสียในขั้นตอนการสกัด

ในการทดลองหาค่าค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมของน้ำเสีย ที่มีความเข้มข้นของทองแดงประมาณ 4,520 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการสกัดโดยใช้อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) เท่ากับ 2:1 พบว่าเมื่อทำการปรับพีเอชน้ำเสียเป็น 1.6 จะทำให้มีประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียสูงสุด โดยจะคงเหลือทองแดงอยู่ในแรฟฟิเนตประมาณ 8.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงเท่ากับ 99.8 เปอร์เซ็นต์

5.2 อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัด (A:O ratio) ที่เหมาะสมในขั้นตอนการสกัด

การศึกษาหาอัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัดที่เหมาะสมในขั้นตอนการสกัด โดยทำการปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 1.6 ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัดที่ให้ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงสูงที่สุดมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงอัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัด 10:3 ถึง 10:5 ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกที่อัตราส่วนเท่ากับ 10:3 เนื่องจากใช้ปริมาณตัวสกัดน้อย ในขณะที่ประสิทธิภาพในการสกัดใกล้เคียงกันโดยสามารถสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียได้ 15,042 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยคงเหลือทองแดงในน้ำเสีย 7.5 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการสกัด 99.83 เปอร์เซ็นต์

5.3 ค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริกและอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อ เอ็กซ์แทรกที่เหมาะสมในขั้นตอนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด

ในขั้นตอนนี้ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.2 1 2 4 และ 10 โมลาร์ และให้อัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอ็กซ์แทรก (A:O ratio) เท่ากับ 1:1 1:2 1:3 1:4 และ 1:5 จากการทดลองพบว่าที่สารละลายกรดซัลฟิวริก 10 โมลาร์ มีประสิทธิภาพการสกัดกลับออกจากตัวสกัดดีที่สุดในทุกอัตราส่วน ในส่วนของอัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอ็กซ์แทรกพบว่าที่อัตราส่วนของสารละลายกรดซัลฟิวริกต่อเอ็กซ์แทรกเท่ากับ 1:2 ของการสกัดกลับด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 10 โมลาร์ จะได้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีปริมาณทองแดง 17,382.5 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดประสิทธิภาพการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด 57.8 เปอร์เซ็นต์

5.4 อายุการใช้งานของตัวสกัด

การศึกษาหาอายุการใช้งานของตัวสกัด เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดและการสกัดกลับออกจากตัวสกัด โดยการนำตัวสกัดที่ใช้แล้วมาวนใช้สกัดทองแดงออกจากน้ำเสียซ้ำ โดยทำการทดลองจำนวน 30 ครั้ง พบว่ามีปริมาณทองแดงคงเหลืออยู่ในเรฟไฟเนตเฉลี่ย 36.6 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณทองแดงในเอ็กซ์แทรกเฉลี่ย 29,860 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงเฉลี่ย 98.8 เปอร์เซ็นต์

ในขั้นตอนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด พบว่าในการทดลองครั้งที่ 1 ถึง 27 จะมีปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริกเฉลี่ย 28,749 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณทองแดงตกค้างอยู่ในตัวสกัดเฉลี่ย 15,327 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดเฉลี่ย 50.0 เปอร์เซ็นต์

ส่วนในการทดลองตั้งแต่ครั้งที่ 28 เป็นต้นไป พบว่าประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดลดลงอย่างมาก โดยมีประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดเพียง 26.8 เปอร์เซ็นต์

5.5 การประมาณการค่าใช้จ่ายในการนำกลับทองแดงโดยการสกัดด้วยตัวสกัด LIX 84-I

ในส่วนของประมาณการค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการปรับพีเอชน้ำเสี้ยว โดยใช้สารละลายกรดซัลฟิวริก พบว่าการปรับพีเอชน้ำเสี้ยวจนกระทั่งมีพีเอชเป็น 1.6 ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 26.7 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสี้ยว 1 ลิตร คิดเป็นค่าใช้จ่าย 3.74 บาท

สำหรับขั้นตอนการสกัดทองแดงออกจากรู้น้ำเสี้ยว พบว่าปริมาณของตัวสกัดที่ใช้ต่อน้ำเสี้ยว 1 ลิตร คือ 300 มิลลิลิตร คิดเป็นค่าใช้จ่าย 135 บาท แต่เนื่องจากตัวสกัดที่ใช้มีการนำมาวนใช้ซ้ำจำนวน 27 รอบ ดังนั้นจึงคิดค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อครั้งเป็น 5.25 บาทต่อน้ำเสี้ยว 1 ลิตร

ในขั้นตอนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10 โมลาร์ พบว่าต้องใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกปริมาณ 150 มิลลิลิตรต่อตัวสกัด 300 มิลลิลิตร (จากขั้นตอนการสกัดทองแดงออกจากรู้น้ำเสี้ยว 1 ลิตร) คิดเป็นค่าใช้จ่าย 2.94 บาทต่อน้ำเสี้ยว 1 ลิตร โดยจะได้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้นทองแดงปริมาณ 28,749 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 150 มิลลิลิตร จากการสกัดทองแดงออกจากรู้น้ำเสี้ยว 1 ลิตร

ค่าใช้จ่ายโดยรวมในการนำกลับทองแดงตั้งแต่ขั้นตอนการปรับพีเอชน้ำเสี้ยว การสกัดด้วยตัวสกัด LIX 84-I และขั้นตอนการสกัดกลับออกจากตัวสกัด คิดเป็นค่าใช้จ่ายโดยรวมเฉลี่ย 5.25 บาทต่อน้ำเสี้ยว 1 ลิตร หรือเท่ากับ 1.22 บาทต่อกรัมของทองแดงที่สกัดได้

บทที่ 6

ความน่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

6.1 ความน่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์

การนำกลับทองแดงจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลายนี้ มีความน่าสนใจในเชิงเศรษฐศาสตร์หลายประการ ดังนี้

1. สามารถนำกลับทองแดงโดยอยู่ในรูปของสารละลายกรดซัลฟิวริก ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ทดแทนในอุตสาหกรรมชุบโลหะได้บางส่วน ซึ่งจากผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่า จะได้สารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีปริมาณทองแดงเฉลี่ยประมาณ 28,749 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นราคา 90.8 บาทต่อลิตร ดังแสดงในภาคผนวก ง ซึ่งสารละลายที่ได้มีความเข้มข้นของทองแดงสูงกว่าในน้ำเสียประมาณ 6.4 เท่า

2. เป็นการลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักของโรงงานอุตสาหกรรม โดยจากงานวิจัยนี้สามารถลดประมาณทองแดงในน้ำเสียได้เฉลี่ย 98.8 เปอร์เซ็นต์ คงเหลือทองแดงในน้ำเสียเฉลี่ย 36.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเมื่อนำไปเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียทางเคมีแล้ว จะสามารถลดปริมาณสารเคมีที่ต้องใช้ในการบำบัดได้

3. อันเนื่องมาจากข้อ 2 สามารถลดค่าใช้จ่ายในการส่งกากตะกอนโลหะหนักไปกำจัดยังศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรม เมื่อปริมาณการใช้สารเคมีในการตกตะกอนโลหะหนักลดลง ตะกอนที่เกิดขึ้นก็จะลดลงตามไปด้วย ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการกำจัดกากตะกอนลดลง

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการนำกลับทองแดงโดยการใช้ตัวสกัดอื่น เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการสกัดด้วยตัวสกัด LIX 84-I ในส่วนของสภาวะที่เหมาะสม รวมถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรม

2. ควรมีการศึกษาระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลปฏิกิริยาในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด

3. ควรมีการศึกษากาแฟฟูสภาพของตัวสกัด LIX 84-I เพื่อให้สามารถนำตัวสกัดกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างคุ้มค่า

4. ควรมีการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบขวดเขย่า ไปเป็นข้อมูลสำหรับการนำไปใช้ในระดับถึงปฏิกิริยา เพื่อเป็นการศึกษาในสภาวะที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

ชัยวัฒน์ เจนวาณิชย์. สารานุกรมธาตุ. O.S. Printing House, 2525.

ทัศนลักษณ์ จิระภาพันธุ์. 2545. การนำกลับมาใช้ใหม่จากน้ำเสียโรงงานชุบเคลือบโลหะโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พร้อม วัชรกุลป์ และ เผ่าเทพ โชตินุชิต. โลหะรอบตัวเรา. กรุงเทพมหานคร: 2502.

วัชรา ขนิษฐบุตร. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร : สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2538.

วิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539). กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2539.

ศศิเกษม ทองยงค์. โลหะจากพื้นโลก. กรุงเทพมหานคร: 2520.

สมนึก ภาคพานิชย์. การกำจัดไอออนของโลหะสังกะสีออกจากน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้งานแล้วโดยการสกัดสารออกจากของเหลวด้วยของเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

สาโรช พันธุ์แพ. การชุบผิวด้วยโลหะ. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ชวนพิมพ์, 2526.

สุวิชัย สัมปตตะวานิช และ งามพิศ อังคทะวานิช. ทองแดง. เอกสารเศรษฐกิจธรณีวิทยา เล่มที่ 11. ทรัพยากรธรณี, กรม. 2518.

ภาษาอังกฤษ

Alguacil, F. J. Recovery of copper from ammoniacal/ammonium carbonate medium by LIX 973N. Hydrometallurgy 52 (1999): 55–61.

Alguacil, F. J. Cobo, A., and Alonso, M. Copper separation from nitrate/nitric acid media using Acorga M5640 extractant. Chemical Engineering 85 (2002): 259-263.

Cognis Corporation. Mining chemical technology. [Online]. 1996. Available from: <http://www.cognis-us.com/cognis/mining/mid/prodinfo/LIX84-I.pdf> [2000, November 20].

Gilchrist, J. D. Extraction metallurgy. 2nd ed. Oxford, 1980.

- Gill, C. B. Nonferrous extractive metallurgy. New York, 1980.
- Nemerrow, N. L. Industrial water pollution, origin, Characteristics and treatment. USA: Addison-Wesley, 1978.
- Parija, C., and Bhaskara Sarma, P.V.R. Separation of nickle and copper from ammoniacal solutions through co-extraction and selective stripping using LIX 84 as the extractant. Hydrometallurgy 57 (2000): 195-204.
- Parija, C., Reddy B. R., and Bhaskara Sarma, P. V. R. Recovery of nickle from solutions containing ammonium sulphate using LIX 84-I. Hydrometallurgy 49 (1998): 255–261.
- Patterson, J. W. Industrial wastewater treatment technology. 2nd ed. Butterworth, 1985.
- Srinivasa Rao, K., Devi N. B. and Reddy B. R. Solvent extraction of copper from sulphate medium using MOC45 as extractant. Hydrometallurgy 57 (2000): 269–275.
- Wentz, C. A. Hazardous waste management. Simgapore: McGraw-Hill, 1989.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-1 ปริมาณทองแดงและคุณสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย

| ลำดับ | ทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ค่าพีเอช | ค่าความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต่อ เซนติเมตร) | ค่าไออาร์พี (มิลลิโวลต์) |
|------------|------------------------------|----------|--|-----------------------------|
| ครั้งที่ 1 | 4,515 | 12.12 | 33.80 | 31.5 |
| ครั้งที่ 2 | 4,521 | 12.14 | 33.83 | 31.4 |
| ครั้งที่ 3 | 4,514 | 12.13 | 33.83 | 31.6 |
| เฉลี่ย | 4,520 | 12.12 | 33.82 | 31.5 |
| SD | 3.8 | 0 | 0 | 1.0 |
| n | 3 | 3 | 3 | 3 |

ตารางที่ ผ-2 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 12
ในการทดลองครั้งที่ 1

| พีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสีย | พีเอชของแรฟฟิเนต ที่สถานะสมดุล | ปริมาณทองแดงใน แรฟฟิเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงใน เอ็กซ์แทรก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|--|---------------------------------------|
| 1 | 1.1 | 33 | 4,486 | 99.2 |
| 2 | 1.9 | 18 | 4,512 | 99.8 |
| 3 | 2.5 | 363 | 4,158 | 91.8 |
| 4 | 3.5 | 2,085 | 2,459 | 54.3 |
| 5 | 4.5 | 4,430 | 107 | 2.0 |
| 6 | 5.9 | 4,480 | 33 | 0.7 |
| 7 | 6.9 | 4,486 | 14 | 0.3 |
| 8 | 7.4 | 4,501 | 18 | 0.5 |
| 9 | 8.9 | 4,483 | 60 | 1.3 |
| 10 | 9.9 | 4,501 | 34 | 1.7 |
| 11 | 10.5 | 4,386 | 130 | 2.2 |
| 12 | 11.1 | 4,495 | 15 | 0.3 |

ตารางที่ ผ-3 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 12
ในการทดลองครั้งที่ 2

| พีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสีย | พีเอชของแรฟไฟเนต ที่สถานะสมดุล | ปริมาณทองแดงใน แรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงใน เอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 1 | 1.2 | 27 | 4,502 | 99.35 |
| 2 | 1.9 | 10 | 4,498 | 99.8 |
| 3 | 2.5 | 389 | 4,152 | 92.0 |
| 4 | 3.5 | 2,055 | 2,469 | 54.6 |
| 5 | 4.5 | 4,435 | 109 | 1.9 |
| 6 | 5.9 | 4,490 | 27 | 0.7 |
| 7 | 6.8 | 4,518 | 16 | 0.3 |
| 8 | 7.4 | 4,508 | 18 | 0.4 |
| 9 | 8.8 | 4,455 | 58 | 1.3 |
| 10 | 9.8 | 4,469 | 36 | 1.7 |
| 11 | 10.4 | 4,382 | 134 | 2.1 |
| 12 | 11.2 | 4,512 | 14 | 0.3 |

ตารางที่ ผ-4 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 12
ในการทดลองครั้งที่ 3

| พีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสีย | พีเอชของแรฟไฟเนต ที่สถานะสมดุล | ปริมาณทองแดงใน แรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงใน เอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 1 | 1.0 | 39 | 4,473 | 99.3 |
| 2 | 1.8 | 13 | 4,511 | 99.8 |
| 3 | 2.5 | 360 | 4,138 | 91.7 |
| 4 | 3.5 | 2,025 | 2,467 | 54.7 |
| 5 | 4.5 | 4,425 | 114 | 2.0 |
| 6 | 5.9 | 4,500 | 30 | 0.6 |
| 7 | 6.9 | 4,511 | 15 | 0.3 |
| 8 | 7.4 | 4,499 | 16 | 0.4 |
| 9 | 8.9 | 4,442 | 62 | 1.4 |
| 10 | 9.9 | 4,486 | 35 | 1.6 |
| 11 | 10.5 | 4,395 | 132 | 2.2 |
| 12 | 11.1 | 4,507 | 15 | 0.2 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-5 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง

1 – 12

| พีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสีย | พีเอชของแรฟฟิเนต ที่สถานะสมดุล | ปริมาณทองแดงใน แรฟฟิเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงใน เอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 1 | 1.1 | 33.1 | 4,486 | 99.3 |
| 2 | 1.9 | 13.5 | 4,512 | 99.7 |
| 3 | 2.5 | 371 | 4,158 | 91.8 |
| 4 | 3.5 | 2,055 | 2,459 | 54.5 |
| 5 | 4.5 | 4,430 | 107 | 2.0 |
| 6 | 5.9 | 4,490 | 33 | 0.7 |
| 7 | 6.9 | 4,505 | 14 | 0.3 |
| 8 | 7.4 | 4,503 | 18 | 0.4 |
| 9 | 8.9 | 4,460 | 60 | 1.3 |
| 10 | 9.9 | 4,485 | 34 | 1.7 |
| 11 | 10.5 | 4,388 | 130 | 2.1 |
| 12 | 11.1 | 4,505 | 15 | 0.3 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-6 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 2
ในการทดลองครั้งที่ 1

| พีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสีย | พีเอชของแรฟไฟเนตที่ สถานะสมดุล | ปริมาณทองแดงใน แรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงใน เอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการ สกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 1.2 | 1.1 | 13.4 | 4,322 | 99.7 |
| 1.4 | 1.3 | 15.3 | 4,382 | 99.6 |
| 1.6 | 1.5 | 7.8 | 4,449 | 99.8 |
| 1.8 | 1.7 | 13.3 | 4,375 | 99.7 |

ตารางที่ ผ-7 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 2
ในการทดลองครั้งที่ 2

| พีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสีย | พีเอชของแรฟไฟเนตที่ สถานะสมดุล | ปริมาณทองแดงใน แรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงใน เอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการ สกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 1.2 | 1.1 | 14.6 | 4,317 | 99.7 |
| 1.4 | 1.3 | 14.5 | 4,369 | 99.7 |
| 1.6 | 1.4 | 8.1 | 4,435 | 99.7 |
| 1.8 | 1.7 | 13.5 | 4,392 | 99.6 |

ตารางที่ ผ-8 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง 1 – 2
ในการทดลองครั้งที่ 3

| พีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสีย | พีเอชของแรฟไฟเนตที่ สถานะสมดุล | ปริมาณทองแดงใน แรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงใน เอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการ สกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 1.2 | 1.0 | 14.0 | 4,312 | 99.8 |
| 1.4 | 1.3 | 14.8 | 4,362 | 99.7 |
| 1.6 | 1.5 | 8.2 | 4,439 | 99.8 |
| 1.8 | 1.7 | 13.9 | 4,385 | 99.7 |

ตารางที่ ผ-9 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่พีเอชน้ำเสียเริ่มต้นในช่วง

1 – 2

| พีเอชเริ่มต้น ของน้ำเสีย | พีเอชของแรฟฟิเนตที่ สภาวะสมดุล | ปริมาณทองแดงใน แรฟฟิเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงใน เอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการ สกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------|-----------------------------------|--|---|------------------------------------|
| 1.2 | 1.1 | 14.0 | 4,317 | 99.7 |
| 1.4 | 1.3 | 14.9 | 4,371 | 99.7 |
| 1.6 | 1.5 | 8.0 | 4,441 | 99.8 |
| 1.8 | 1.7 | 13.6 | 4,384 | 99.7 |

ตารางที่ ผ-10 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสียต่อตัวสกัดต่างๆ
ในการทดลองครั้งที่ 1

| อัตราส่วนของ น้ำเสียต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง ในแรฟฟิเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 10:1 | 10.9 | 44,890 | 99.75 |
| 10:2 | 10.5 | 22,498 | 99.70 |
| 10:3 | 7.8 | 15,034 | 99.85 |
| 10:4 | 7.4 | 11,265 | 99.87 |
| 10:5 | 7.2 | 8,985 | 99.90 |
| 10:6 | 9.1 | 7,475 | 99.85 |
| 10:7 | 9.8 | 6,410 | 99.80 |
| 10:8 | 9.2 | 5,626 | 99.80 |
| 10:9 | 11.2 | 4,979 | 99.85 |
| 10:10 | 10.0 | 4,503 | 99.75 |

ตารางที่ ผ-11 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสียดต่อตัวสกัดต่างๆ
ในการทดลองครั้งที่ 2

| อัตราส่วนของ น้ำเสียดต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง ในแรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดง (%) |
|------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 10:1 | 10.7 | 45,088 | 99.70 |
| 10:2 | 11.4 | 22,544 | 99.70 |
| 10:3 | 7.2 | 15,042 | 99.85 |
| 10:4 | 7.3 | 11,282 | 99.80 |
| 10:5 | 7.2 | 9,026 | 99.82 |
| 10:6 | 9.4 | 7,518 | 99.70 |
| 10:7 | 10.1 | 6,443 | 99.80 |
| 10:8 | 9.1 | 5,639 | 99.80 |
| 10:9 | 11.3 | 5,010 | 99.70 |
| 10:10 | 9.8 | 4,510 | 99.80 |

ตารางที่ ผ-12 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัดต่างๆ
ในการทดลองครั้งที่ 3

| อัตราส่วนของ น้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง ในแรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดง (%) |
|-------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 10:1 | 12.0 | 45,088 | 99.80 |
| 10:2 | 11.8 | 22,544 | 99.85 |
| 10:3 | 7.5 | 15,042 | 99.80 |
| 10:4 | 7.5 | 11,282 | 99.85 |
| 10:5 | 7.3 | 9,026 | 99.80 |
| 10:6 | 9.2 | 7,518 | 99.85 |
| 10:7 | 9.9 | 6,443 | 99.75 |
| 10:8 | 9.2 | 5,639 | 99.80 |
| 10:9 | 11.2 | 5,010 | 99.70 |
| 10:10 | 9.8 | 4,510 | 99.80 |

ตารางที่ ผ-13 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสีย
ต่อตัวสกัดต่างๆ

| อัตราส่วนของ น้ำเสียต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง ในแรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ในเอ็กซ์แทรก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดง (%) |
|-----------------------------------|--|--|---------------------------------------|
| 10:1 | 11.2 | 45,088 | 99.75 |
| 10:2 | 11.2 | 22,544 | 99.75 |
| 10:3 | 7.5 | 15,042 | 99.83 |
| 10:4 | 7.4 | 11,282 | 99.84 |
| 10:5 | 7.2 | 9,026 | 99.84 |
| 10:6 | 9.2 | 7,518 | 99.80 |
| 10:7 | 9.9 | 6,443 | 99.78 |
| 10:8 | 9.2 | 5,639 | 99.80 |
| 10:9 | 11.2 | 5,010 | 99.75 |
| 10:10 | 9.9 | 4,510 | 99.78 |

ตารางที่ ผ-14 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
0.2 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 1

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 0.2 โมลาร์ | 1:1 | 92 | 14,944 | 0.6 |
| | 1:2 | 78 | 14,997 | 0.3 |
| | 1:3 | 86 | 15,007 | 0.2 |
| | 1:4 | 94 | 15,012 | 0.2 |
| | 1:5 | 87 | 15,018 | 0.1 |

ตารางที่ ผ-15 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
0.2 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 2

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 0.2 โมลาร์ | 1:1 | 104 | 14,932 | 0.7 |
| | 1:2 | 84 | 14,994 | 0.3 |
| | 1:3 | 76 | 15,010 | 0.2 |
| | 1:4 | 88 | 15,014 | 0.1 |
| | 1:5 | 92 | 15,017 | 0.1 |

ตารางที่ ผ-16 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
0.2 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 3

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 0.2 โมลาร์ | 1:1 | 95 | 14,941 | 0.6 |
| | 1:2 | 92 | 14,990 | 0.3 |
| | 1:3 | 90 | 15,006 | 0.2 |
| | 1:4 | 100 | 15,011 | 0.2 |
| | 1:5 | 102 | 15,015 | 0.1 |

ตารางที่ ผ-17 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลาย
กรดซัลฟิวริก 0.2 โมลาร์

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 0.2 โมลาร์ | 1:1 | 97 | 14,978 | 0.7 |
| | 1:2 | 85 | 14,993 | 0.3 |
| | 1:3 | 84 | 15,007 | 0.2 |
| | 1:4 | 93 | 15,012 | 0.2 |
| | 1:5 | 94 | 15,017 | 0.1 |

ตารางที่ ผ-18 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
1 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 1

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 1 โมลาร์ | 1:1 | 1,533 | 13,502 | 10.2 |
| | 1:2 | 2,442 | 13,814 | 8.1 |
| | 1:3 | 2,175 | 14,310 | 4.8 |
| | 1:4 | 2,310 | 14,458 | 3.8 |
| | 1:5 | 2,990 | 14,437 | 4.0 |

ตารางที่ ผ-19 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
1 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 2

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 1 โมลาร์ | 1:1 | 1,595 | 13,440 | 10.6 |
| | 1:2 | 2,394 | 13,838 | 8.0 |
| | 1:3 | 2,201 | 14,302 | 4.9 |
| | 1:4 | 2,285 | 14,464 | 3.8 |
| | 1:5 | 3,056 | 14,424 | 4.1 |

ตารางที่ ผ-20 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก
1 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 3

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟูริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟูริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟูริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1 โมลาร์ | 1:1 | 1,555 | 13,480 | 10.3 |
| | 1:2 | 2,400 | 13,835 | 8.0 |
| | 1:3 | 2,185 | 14,307 | 4.8 |
| | 1:4 | 2,320 | 14,455 | 3.9 |
| | 1:5 | 3,045 | 14,426 | 4.1 |

ตารางที่ ผ-21 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลาย
กรดซัลฟูริก 1 โมลาร์

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟูริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟูริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟูริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|---|---|---|---|---|
| 1 โมลาร์ | 1:1 | 1,561 | 13,475 | 10.4 |
| | 1:2 | 2,412 | 13,830 | 8.0 |
| | 1:3 | 2,187 | 14,306 | 4.8 |
| | 1:4 | 2,305 | 14,459 | 3.8 |
| | 1:5 | 3,030 | 14,429 | 4.0 |

ตารางที่ ผ-22 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก
2 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 1

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟูริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟูริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟูริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|---|---|---|---|---|
| 2 โมลาร์ | 1:1 | 4,218 | 10,817 | 28.1 |
| | 1:2 | 5,899 | 12,086 | 19.6 |
| | 1:3 | 6,740 | 12,789 | 14.9 |
| | 1:4 | 7,218 | 13,231 | 12.0 |
| | 1:5 | 8,003 | 13,435 | 10.6 |

ตารางที่ ผ-23 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก
2 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 2

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟูริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟูริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟูริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|---|---|---|---|---|
| 2 โมลาร์ | 1:1 | 4,252 | 10,783 | 28.3 |
| | 1:2 | 5,838 | 12,116 | 19.4 |
| | 1:3 | 6,711 | 12,798 | 14.9 |
| | 1:4 | 7,193 | 13,237 | 12.0 |
| | 1:5 | 8,051 | 13,425 | 10.7 |

ตารางที่ ผ-24 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
2 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 3

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 2 โมลาร์ | 1:1 | 4,235 | 10,800 | 28.2 |
| | 1:2 | 5,870 | 12,100 | 19.5 |
| | 1:3 | 6,763 | 12,781 | 15.0 |
| | 1:4 | 7,174 | 13,242 | 11.9 |
| | 1:5 | 8,030 | 13,429 | 10.7 |

ตารางที่ ผ-25 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลาย
กรดซัลฟิวริก 2 โมลาร์

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 2 โมลาร์ | 1:1 | 4,235 | 10,800 | 28.2 |
| | 1:2 | 5,869 | 12,101 | 19.5 |
| | 1:3 | 6,738 | 12,789 | 14.9 |
| | 1:4 | 7,195 | 13,237 | 12.0 |
| | 1:5 | 8,028 | 13,430 | 10.7 |

ตารางที่ ผ-26 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
4 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 1

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 4 โมลาร์ | 1:1 | 5,404 | 9,631 | 35.9 |
| | 1:2 | 10,230 | 9,920 | 34.0 |
| | 1:3 | 13,345 | 10,587 | 29.6 |
| | 1:4 | 15,287 | 11,214 | 25.4 |
| | 1:5 | 17,528 | 11,530 | 23.3 |

ตารางที่ ผ-27 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
4 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 2

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 4 โมลาร์ | 1:1 | 5,430 | 9,605 | 36.1 |
| | 1:2 | 10,295 | 9,888 | 34.2 |
| | 1:3 | 13,320 | 10,595 | 29.5 |
| | 1:4 | 15,259 | 11,221 | 25.4 |
| | 1:5 | 17,596 | 11,516 | 23.4 |

ตารางที่ ผ-28 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
4 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 3

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 4 โมลาร์ | 1:1 | 5,420 | 9,615 | 36.0 |
| | 1:2 | 10,270 | 9,900 | 34.2 |
| | 1:3 | 13,289 | 10,606 | 29.5 |
| | 1:4 | 15,228 | 11,228 | 25.3 |
| | 1:5 | 17,550 | 11,525 | 23.3 |

ตารางที่ ผ-29 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลาย
กรดซัลฟิวริก 4 โมลาร์

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 4 โมลาร์ | 1:1 | 5,418 | 13,952 | 7.2 |
| | 1:2 | 10,265 | 12,982 | 13.7 |
| | 1:3 | 13,318 | 12,372 | 17.7 |
| | 1:4 | 15,258 | 11,984 | 20.3 |
| | 1:5 | 17,558 | 11,524 | 23.4 |

ตารางที่ ผ-30 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก
10 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 1

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟูริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟูริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟูริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|---|---|---|---|---|
| 10 โมลาร์ | 1:1 | 8,385 | 6,651 | 55.8 |
| | 1:2 | 17,401 | 6,335 | 57.9 |
| | 1:3 | 24,545 | 6,854 | 54.4 |
| | 1:4 | 32,067 | 7,019 | 53.3 |
| | 1:5 | 37,817 | 7,472 | 50.3 |

ตารางที่ ผ-31 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟูริก
10 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 2

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟูริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟูริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟูริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|---|---|---|---|---|
| 10 โมลาร์ | 1:1 | 8,437 | 6,599 | 56.1 |
| | 1:2 | 17,350 | 6,361 | 57.7 |
| | 1:3 | 24,479 | 6,876 | 54.3 |
| | 1:4 | 32,022 | 7,030 | 53.2 |
| | 1:5 | 37,884 | 7,459 | 50.4 |

ตารางที่ ผ-32 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก
10 โมลาร์ ในการทดลองครั้งที่ 3

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 10 โมลาร์ | 1:1 | 8,420 | 6,616 | 56.0 |
| | 1:2 | 17,398 | 6,337 | 57.9 |
| | 1:3 | 24,509 | 6,866 | 54.3 |
| | 1:4 | 32,100 | 7,011 | 53.4 |
| | 1:5 | 37,849 | 7,466 | 50.3 |

ตารางที่ ผ-33 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัดด้วยสารละลาย
กรดซัลฟิวริก 10 โมลาร์

| ความเข้มข้น ของสารละลาย กรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของ สารละลายกรด ซัลฟิวริกต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง สารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพใน การสกัดกลับ ทองแดงออกจาก ตัวสกัด (%) |
|--|--|--|---|---|
| 10 โมลาร์ | 1:1 | 8,414 | 6,622 | 56.0 |
| | 1:2 | 17,383 | 6,344 | 57.8 |
| | 1:3 | 24,511 | 6,865 | 54.3 |
| | 1:4 | 32,063 | 7,020 | 53.3 |
| | 1:5 | 37,850 | 7,465 | 50.3 |

ตารางที่ ผ-34 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด
ในการทดลองครั้งที่ 1

| ครั้งที่ | ปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง (%) |
|----------|--|---|-----------------------------------|
| 1 | 14 | 15,021 | 99.7 |
| 2 | 11 | 22,261 | 99.8 |
| 3 | 12 | 27,475 | 99.7 |
| 4 | 15 | 29,967 | 99.7 |
| 5 | 20 | 32,840 | 99.6 |
| 6 | 17 | 36,024 | 99.6 |
| 7 | 18* | 37,927 | 99.6 |
| 8 | 21 | 37,272 | 99.5 |
| 9 | 14 | 36,609 | 99.7 |
| 10 | 16 | 36,444 | 99.7 |
| 11 | 23 | 36,128 | 99.5 |
| 12 | 56 | 34,784 | 98.8 |
| 13 | 44 | 32,724 | 99.0 |
| 14 | 82* | 32,436 | 98.2 |
| 15 | 58 | 32,038 | 98.7 |
| 16 | 62 | 29,905 | 98.6 |
| 17 | 100* | 31,152 | 97.8 |
| 18 | 29 | 28,256 | 99.4 |
| 19 | 81 | 27,566 | 98.2 |
| 20 | 19 | 28,672 | 99.6 |
| 21 | 20 | 32,204 | 99.6 |
| 22 | 73 | 31,802 | 98.4 |
| 23 | 31 | 28,121 | 99.3 |
| 24 | 29 | 30,709 | 99.4 |
| 25 | 36 | 30,152 | 99.2 |
| 26 | 50 | 31,366 | 98.9 |
| 27 | 30 | 30,770 | 99.3 |
| 28 | 27 | 29,433 | 99.4 |
| 29 | 23 | 36,625 | 99.5 |
| 30 | 23 | 42,691 | 99.5 |
| เฉลี่ย | 35.1 | 31,645.8 | 99.2 |
| SD | 24.2 | 5,134.5 | 0.5 |
| n | 30 | 30 | 30 |

* คือ ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ ผ-35 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัดในการทดลองครั้งที่ 1

| ครั้งที่ | ปริมาณทองแดงในสารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการสกัดกลับ ทองแดงออกจากตัวสกัด (%) |
|----------|---|---|---|
| 1 | 15,582 | 7,230 | 51.9 |
| 2 | 19,628 | 12,448 | 44.1 |
| 3 | 25,053 | 14,949 | 45.6 |
| 4 | 24,252 | 17,841 | 40.5 |
| 5 | 23,649 | 21,015 | 36.0 |
| 6 | 26,205 | 22,921 | 36.4 |
| 7 | 31,305 | 22,274 | 41.3 |
| 8 | 31,365 | 21,590 | 42.1 |
| 9 | 30,360 | 21,429 | 41.5 |
| 10 | 30,615 | 21,137 | 42.0 |
| 11 | 32,445 | 19,905 | 44.9 |
| 12 | 33,960 | 17,804 | 48.8 |
| 13 | 30,165 | 17,642 | 46.1 |
| 14 | 30,540 | 17,166 | 47.1 |
| 15 | 33,990 | 15,043 | 53.0 |
| 16 | 26,970 | 16,420 | 45.1 |
| 17 | 35,730 | 13,287 | 57.3 |
| 18 | 30,975 | 12,769 | 54.8 |
| 19 | 27,795 | 13,669 | 50.4 |
| 20 | 22,935 | 17,204 | 40.0 |
| 21 | 30,450 | 16,979 | 47.3 |
| 22 | 37,290 | 13,157 | 58.6 |
| 23 | 24,765 | 15,738 | 44.0 |
| 24 | 31,005 | 15,207 | 50.5 |
| 25 | 27,375 | 16,465 | 45.4 |
| 26 | 31,125 | 15,803 | 49.6 |
| 27 | 32,625 | 14,457 | 53.0 |
| 28 | 15,600 | 21,633 | 26.5 |
| 29 | 17,850 | 27,700 | 24.4 |
| 30 | 15,750 | 34,816 | 18.4 |
| เฉลี่ย | 27,578.5 | 17,856.6 | 44.2 |
| SD | 6,006.8 | 5,164.6 | 9.1 |
| n | 30 | 30 | 30 |

* คือ ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ผ-36 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด
ในการทดลองครั้งที่ 2

| ครั้งที่ | ปริมาณทองแดงในแรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง (%) |
|----------|--|---|-----------------------------------|
| 1 | 13 | 15,023 | 99.7 |
| 2 | 11 | 22,032 | 99.8 |
| 3 | 10 | 25,365 | 99.8 |
| 4 | 14 | 28,912 | 99.7 |
| 5 | 17 | 31,262 | 99.6 |
| 6 | 22 | 32,555 | 99.5 |
| 7 | 79 | 33,808 | 98.3 |
| 8 | 25 | 34,832 | 99.4 |
| 9 | 23 | 34,722 | 99.5 |
| 10 | 22 | 33,965 | 99.5 |
| 11 | 28 | 34,390 | 99.4 |
| 12 | 58 | 34,578 | 98.7 |
| 13 | 72 | 32,919 | 98.4 |
| 14 | 36 | 32,586 | 99.2 |
| 15 | 58 | 31,788 | 98.7 |
| 16 | 45 | 31,361 | 99.0 |
| 17 | 35 | 29,550 | 99.2 |
| 18 | 30 | 28,025 | 99.3 |
| 19 | 65 | 30,020 | 98.6 |
| 20 | 20 | 30,219 | 99.5 |
| 21 | 20 | 32,217 | 99.5 |
| 22 | 111 | 34,634 | 97.5 |
| 23 | 91* | 35,527 | 98.0 |
| 24 | 50 | 33,817 | 98.9 |
| 25 | 82* | 33,379 | 98.2 |
| 26 | 72 | 33,581 | 98.4 |
| 27 | 57 | 31,778 | 98.7 |
| 28 | 354* | 29,814 | 92.2 |
| 29 | 201* | 35,961 | 95.6 |
| 30 | 106* | 41,609 | 97.7 |
| เฉลี่ย | 60.9 | 31,674.3 | 98.7 |
| SD | 68.6 | 4,713.4 | 1.5 |
| n | 30 | 30 | 30 |

* คือ ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ ผ-37 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัดในการทดลองครั้งที่ 2

| ครั้งที่ | ปริมาณทองแดงในสารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการสกัดกลับ ทองแดงออกจากตัวสกัด (%) |
|----------|---|---|---|
| 1 | 16,044 | 7,001 | 53.4 |
| 2 | 23,400 | 10,332 | 53.1 |
| 3 | 22,948 | 13,891 | 45.2 |
| 4 | 25,322 | 16,251 | 43.8 |
| 5 | 27,400 | 17,562 | 43.8 |
| 6 | 27,100 | 19,005 | 41.6 |
| 7 | 27,920 | 19,848 | 41.3 |
| 8 | 30,200 | 19,732 | 43.4 |
| 9 | 31,500 | 18,972 | 45.4 |
| 10 | 29,100 | 19,415 | 42.8 |
| 11 | 29,370 | 19,705 | 42.7 |
| 12 | 32,970 | 18,093 | 47.7 |
| 13 | 30,560 | 17,639 | 46.4 |
| 14 | 31,340 | 16,916 | 48.1 |
| 15 | 30,690 | 16,443 | 48.3 |
| 16 | 33,520 | 14,601 | 53.4 |
| 17 | 32,980 | 13,060 | 55.8 |
| 18 | 25,710 | 15,170 | 45.9 |
| 19 | 29,600 | 15,220 | 49.3 |
| 20 | 26,000 | 17,219 | 43.0 |
| 21 | 24,560 | 19,937 | 38.1 |
| 22 | 27,740 | 20,764 | 40.0 |
| 23 | 33,220 | 18,917 | 46.8 |
| 24 | 30,460 | 18,587 | 45.0 |
| 25 | 29,250 | 18,754 | 43.8 |
| 26 | 33,360 | 16,901 | 49.7 |
| 27 | 31,700 | 15,928 | 49.9 |
| 28 | 16,500 | 21,564 | 27.7 |
| 29 | 18,130 | 26,896 | 25.2 |
| 30 | 17,500 | 32,859 | 21.0 |
| เฉลี่ย | 27,536.5 | 17,906.1 | 43.5 |
| SD | 5,110.9 | 4,549.6 | 7.8 |
| n | 30 | 30 | 30 |

* คือ ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ผ-38 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด
ในการทดลองครั้งที่ 3

| ครั้งที่ | ปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง (%) |
|----------|--|---|-----------------------------------|
| 1 | 20 | 15,001 | 99.6 |
| 2 | 47* | 23,142 | 99.0 |
| 3 | 45* | 25,949 | 99.0 |
| 4 | 85* | 25,917 | 98.1 |
| 5 | 71* | 25,497 | 98.4 |
| 6 | 135* | 27,553 | 97.0 |
| 7 | 135 | 24,339 | 97.0 |
| 8 | 37 | 25,445 | 99.2 |
| 9 | 200* | 25,585 | 95.6 |
| 10 | 53* | 19,364 | 98.8 |
| 11 | 30 | 24,856 | 99.3 |
| 12 | 150* | 22,302 | 96.7 |
| 13 | 81 | 23,975 | 98.2 |
| 14 | 31 | 20,647 | 99.3 |
| 15 | 47 | 24,906 | 99.0 |
| 16 | 35 | 24,865 | 99.2 |
| 17 | 36 | 24,651 | 99.2 |
| 18 | 42 | 25,949 | 99.1 |
| 19 | 36 | 26,877 | 99.2 |
| 20 | 41* | 26,617 | 99.1 |
| 21 | 204* | 21,673 | 95.5 |
| 22 | 26* | 25,518 | 99.4 |
| 23 | 22 | 27,786 | 99.5 |
| 24 | 41 | 32,420 | 99.1 |
| 25 | 49 | 34,060 | 98.9 |
| 26 | 59 | 28,780 | 98.7 |
| 27 | 42 | 29,201 | 99.1 |
| 28 | 34 | 27,464 | 99.2 |
| 29 | 27 | 35,252 | 99.4 |
| 30 | 23 | 42,255 | 99.5 |
| เฉลี่ย | 62.8 | 26,261.4 | 98.6 |
| SD | 50.5 | 5,012.1 | 1.1 |
| n | 30 | 30 | 30 |

* คือ ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ผ-39 ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัดในการทดลองครั้งที่ 3

| ครั้งที่ | ปริมาณทองแดงในสารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการสกัดกลับ ทองแดงออกจากตัวสกัด (%) |
|----------|---|---|---|
| 1 | 13,540 | 8,231 | 45.1 |
| 2 | 24,220 | 11,032 | 52.3 |
| 3 | 29,630 | 11,134 | 57.1 |
| 4 | 30,500 | 10,667 | 58.8 |
| 5 | 25,120 | 12,937 | 49.3 |
| 6 | 35,660 | 9,723 | 64.7 |
| 7 | 27,670 | 10,504 | 56.8 |
| 8 | 28,520 | 11,185 | 56.0 |
| 9 | 42,220 | 4,475* | 82.5 |
| 10 | 18,950 | 9,889 | 48.9 |
| 11 | 34,240 | 7,736* | 68.9 |
| 12 | 26,250 | 9,177 | 58.9 |
| 13 | 36,580 | 5,685* | 76.3 |
| 14 | 21,300 | 9,997 | 51.6 |
| 15 | 29,980 | 9,916 | 60.2 |
| 16 | 30,320 | 9,705 | 61.0 |
| 17 | 27,260 | 11,021 | 55.3 |
| 18 | 28,040 | 11,929 | 54.0 |
| 19 | 30,380 | 11,687 | 56.5 |
| 20 | 38,660 | 7,287* | 72.6 |
| 21 | 22,270 | 10,538 | 51.4 |
| 22 | 25,450 | 12,793 | 49.9 |
| 23 | 20,590 | 17,491 | 37.1 |
| 24 | 26,530 | 19,155 | 40.9 |
| 25 | 40,300 | 13,910 | 59.2 |
| 26 | 29,010 | 14,275 | 50.4 |
| 27 | 33,380 | 12,511 | 57.2 |
| 28 | 14,380 | 20,274 | 26.2 |
| 29 | 15,970 | 27,267 | 22.7 |
| 30 | 15,350 | 34,580 | 18.2 |
| เฉลี่ย | 27,409 | 12,556.9 | 52.2 |
| SD | 7,499.0 | 6,119.3 | 14.2 |
| n | 30 | 30 | 30 |

* คือ ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ผ-40 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งาน
ของตัวสกัด

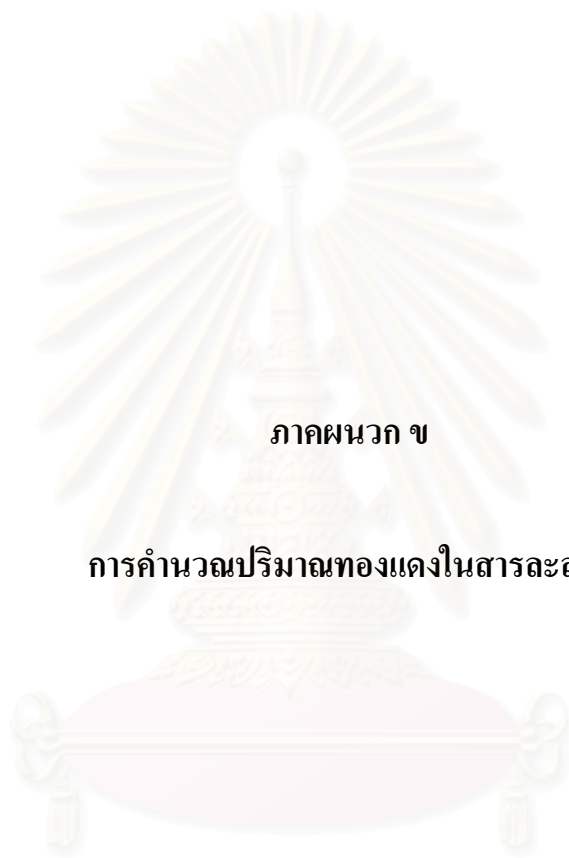
| ครั้งที่ | ปริมาณทองแดงในแรฟไฟเนด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง (%) |
|----------|--|---|-----------------------------------|
| 1 | 16 | 15,015 | 99.7 |
| 2 | 11 | 22,478 | 99.5 |
| 3 | 11 | 26,263 | 99.5 |
| 4 | 15 | 28,265 | 99.2 |
| 5 | 19 | 29,866 | 99.2 |
| 6 | 20 | 32,044 | 98.7 |
| 7 | 107 | 32,025 | 98.3 |
| 8 | 28 | 32,516 | 99.4 |
| 9 | 19 | 32,305 | 98.3 |
| 10 | 19 | 29,924 | 99.3 |
| 11 | 27 | 31,791 | 99.4 |
| 12 | 57 | 30,555 | 98.1 |
| 13 | 66 | 29,873 | 98.5 |
| 14 | 34 | 28,556 | 98.9 |
| 15 | 54 | 29,577 | 98.8 |
| 16 | 47 | 28,710 | 98.9 |
| 17 | 36 | 28,451 | 98.7 |
| 18 | 34 | 27,410 | 99.3 |
| 19 | 61 | 28,154 | 98.7 |
| 20 | 20 | 28,503 | 99.4 |
| 21 | 20 | 28,698 | 98.2 |
| 22 | 92 | 30,652 | 98.4 |
| 23 | 27 | 30,478 | 98.9 |
| 24 | 40 | 32,315 | 99.1 |
| 25 | 43 | 32,530 | 98.8 |
| 26 | 60 | 31,242 | 98.7 |
| 27 | 43 | 30,583 | 98.0 |
| 28 | 31 | 28,904 | 96.9 |
| 29 | 25 | 35,946 | 98.2 |
| 30 | 23 | 42,184 | 98.9 |
| เฉลี่ย | 36.6 | 29,860.4 | 98.8 |
| SD | 27.7 | 4,317.9 | 0.6 |
| n | 30 | 30 | 30 |

* คือ ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ตารางที่ ผ-41 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด ในขั้นตอนการศึกษาอายุการใช้งานของตัวสกัด

| ครั้งที่ | ปริมาณทองแดงในสารละลาย กรดซัลฟิวริก (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดงตกค้างในตัวสกัด (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพในการสกัดกลับ ทองแดงออกจากตัวสกัด (%) |
|----------|---|---|---|
| 1 | 15,055 | 7,487 | 52.7 |
| 2 | 22,416 | 11,271 | 49.8 |
| 3 | 25,877 | 13,325 | 49.3 |
| 4 | 26,691 | 14,920 | 47.7 |
| 5 | 25,390 | 17,171 | 43 |
| 6 | 29,635 | 17,216 | 47.6 |
| 7 | 28,965 | 17,542 | 46.5 |
| 8 | 30,028 | 17,502 | 47.2 |
| 9 | 34,693 | 14,959 | 56.5 |
| 10 | 26,222 | 16,819 | 44.6 |
| 11 | 32,018 | 19,805 | 52.2 |
| 12 | 31,060 | 15,025 | 51.8 |
| 13 | 32,435 | 17,641 | 56.3 |
| 14 | 27,727 | 14,693 | 48.9 |
| 15 | 31,553 | 13,800 | 53.8 |
| 16 | 30,270 | 13,575 | 53.2 |
| 17 | 31,990 | 12,486 | 56.1 |
| 18 | 28,242 | 13,289 | 51.6 |
| 19 | 29,258 | 13,525 | 52.1 |
| 20 | 29,198 | 17,212 | 51.9 |
| 21 | 25,760 | 15,818 | 45.6 |
| 22 | 30,160 | 15,571 | 49.5 |
| 23 | 26,192 | 17,382 | 42.6 |
| 24 | 29,332 | 17,650 | 45.5 |
| 25 | 32,308 | 18,176 | 49.5 |
| 26 | 31,165 | 15,660 | 49.9 |
| 27 | 32,568 | 14,299 | 53.4 |
| 28 | 15,493 | 21,156 | 26.8 |
| 29 | 17,317 | 27,288 | 24.1 |
| 30 | 16,200 | 34,085 | 19.2 |
| เฉลี่ย | 27,507.3 | 16,544.9 | 47.3 |
| SD | 5,305.1 | 4,781.6 | 9.0 |
| n | 30 | 30 | 30 |

* คือ ค่าที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาคผนวก ข

การคำนวณปริมาณทองแดงในสารละลาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. การคำนวณปริมาณทองแดงในขั้นตอนการสกัด

จากผลการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนต ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สามารถคำนวณปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรคและประสิทธิภาพการสกัดทองแดงได้ดังสมการ

$$\text{ปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรค} = \frac{(\text{ปริมาณทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสียน้ำ} - \text{ปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนต}) \times A}{O}$$

$$\text{ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดง (\%)} = \frac{(\text{ปริมาณทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสียน้ำ} - \text{ปริมาณทองแดงในแรฟฟิเนต}) \times 100}{\text{ปริมาณทองแดงเริ่มต้นในน้ำเสียน้ำ}}$$

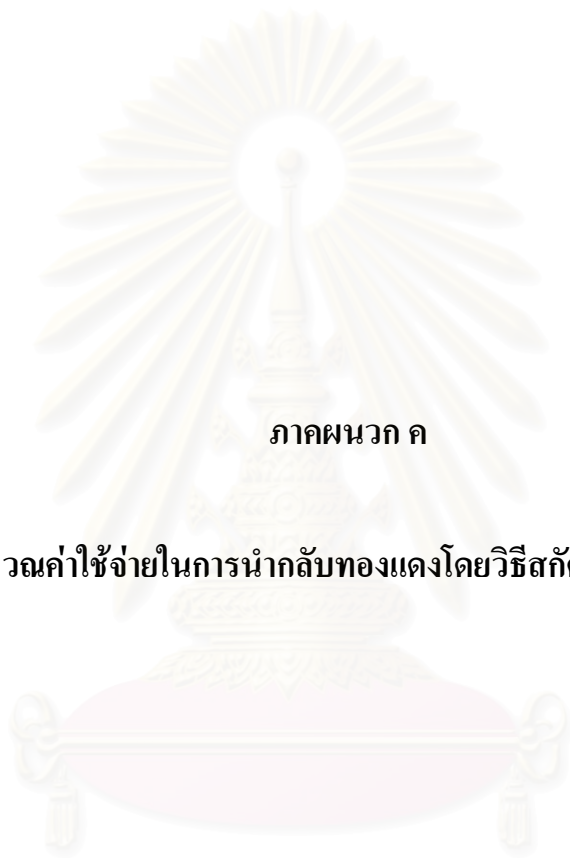
2. การคำนวณปริมาณทองแดงในขั้นตอนการสกัดกลับออกจากตัวสกัด

จากการวิเคราะห์ปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริก ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สามารถคำนวณปริมาณทองแดงที่ตกค้างอยู่ในตัวสกัดรวมทั้งประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด ได้ดังสมการ

$$\text{ปริมาณทองแดงที่ตกค้างอยู่ในตัวสกัด} = \frac{\text{ปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรค} - (A \times \text{ปริมาณทองแดงในสารละลายกรดซัลฟิวริก})}{O}$$

ประสิทธิภาพในการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด (%)

$$= \frac{(\text{ปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรค} - \text{ปริมาณทองแดงที่ตกค้างอยู่ในตัวสกัด}) \times 100}{\text{ปริมาณทองแดงในเอกซ์แทรค}}$$



ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-42 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย

| สารเคมี | ราคา |
|--|------------------|
| LIX 84-I | 450 บาทต่อลิตร |
| H ₂ SO ₄ เข้มข้น 96% | 140 บาทต่อลิตร |
| H ₂ SO ₄ 0.2 โมลาร์ | 0.39 บาทต่อลิตร |
| H ₂ SO ₄ 1 โมลาร์ | 1.96 บาทต่อลิตร |
| H ₂ SO ₄ 2 โมลาร์ | 3.92 บาทต่อลิตร |
| H ₂ SO ₄ 4 โมลาร์ | 7.84 บาทต่อลิตร |
| H ₂ SO ₄ 10 โมลาร์ | 19.60 บาทต่อลิตร |

ตารางที่ ผ-43 การคำนวณค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการปรับพีเอชน้ำเสียเป็น 1 ถึง 12

| ค่าพีเอชน้ำเสีย | ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร (มิลลิลิตร) | ค่าใช้จ่าย (บาท) |
|-----------------|---|------------------|
| 1 | 31.7 | 4.44 |
| 1.2 | 29.3 | 4.10 |
| 1.4 | 27.7 | 3.88 |
| 1.6 | 26.7 | 3.74 |
| 1.8 | 26.0 | 3.64 |
| 2 | 25.5 | 3.57 |
| 3 | 23.1 | 3.23 |
| 4 | 20.7 | 2.90 |
| 5 | 19.0 | 2.66 |
| 6 | 16.8 | 2.35 |
| 7 | 16.0 | 2.24 |
| 8 | 15.4 | 2.16 |
| 9 | 14.3 | 2.00 |
| 10 | 12.8 | 1.79 |
| 11 | 11.4 | 1.60 |
| 12 | 10.0 | 1.40 |

ตารางที่ ผ-44 การคำนวณค่าใช้จ่ายของตัวสกัดในขั้นตอนการสกัด

| อัตราส่วนน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด (A:O ratio) | ปริมาณตัวสกัดที่ใช้ ต่อน้ำเสี้ยว 1 ลิตร (มิลลิลิตร) | ค่าใช้จ่าย (บาทต่อน้ำเสี้ยว 1 ลิตร) |
|---|--|--|
| 10:1 | 100 | 45 |
| 10:2 | 200 | 90 |
| 10:3 | 300 | 135 |
| 10:4 | 400 | 180 |
| 10:5 | 500 | 225 |
| 10:6 | 600 | 270 |
| 10:7 | 700 | 315 |
| 10:8 | 800 | 360 |
| 10:9 | 900 | 405 |
| 10:10 | 1,000 | 450 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-45 การคำนวณค่าใช้จ่ายในขั้นตอนการสกัดกลับทองแดงออกจากตัวสกัด

| ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก | อัตราส่วนของกรดซัลฟิวริกต่อตัวสกัด (H ₂ SO ₄ :extract ratio) | ปริมาณสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ใช้ต่อตัวสกัด 300 มิลลิลิตร (มิลลิลิตร) | ค่าใช้จ่ายในการสกัดกลับออกจากตัวสกัด (บาท) |
|------------------------------------|--|--|--|
| 0.2 โมลาร์ | 1:1 | 300 | 0.12 |
| | 1:2 | 150 | 0.06 |
| | 1:3 | 100 | 0.04 |
| | 1:4 | 75 | 0.03 |
| | 1:5 | 60 | 0.02 |
| 1 โมลาร์ | 1:1 | 300 | 0.59 |
| | 1:2 | 150 | 0.29 |
| | 1:3 | 100 | 0.20 |
| | 1:4 | 75 | 0.15 |
| | 1:5 | 60 | 0.12 |
| 2 โมลาร์ | 1:1 | 300 | 1.18 |
| | 1:2 | 150 | 0.59 |
| | 1:3 | 100 | 0.39 |
| | 1:4 | 75 | 0.29 |
| | 1:5 | 60 | 0.24 |
| 4 โมลาร์ | 1:1 | 300 | 2.35 |
| | 1:2 | 150 | 1.18 |
| | 1:3 | 100 | 0.78 |
| | 1:4 | 75 | 0.59 |
| | 1:5 | 60 | 0.47 |
| 10 โมลาร์ | 1:1 | 300 | 5.88 |
| | 1:2 | 150 | 2.94 |
| | 1:3 | 100 | 1.96 |
| | 1:4 | 75 | 1.47 |
| | 1:5 | 60 | 1.18 |

ตารางที่ ผ-46 การคำนวณค่าใช้จ่ายโดยรวมในการนำกลับทองแดงโดยวิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย
 ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

| ครั้งที่ | ปรับพีเอชด้วย กรดซัลฟิวริกเข้มข้น | | สกัดด้วยตัวสกัด LIX 84-I | | สกัดกลับด้วยสารละลาย กรดซัลฟิวริก 10 โมลาร์ | | ค่าใช้จ่าย โดยรวม ถึงครั้งที่ ทดลอง (บาท) | ค่าใช้จ่าย เฉลี่ยต่อ ครั้งที่ (บาท) |
|----------|--------------------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|--|---------------|--|---|
| | ปริมาณ (มิลลิลิตร) | ราคา (บาท) | ปริมาณ (มิลลิลิตร) | ราคา (บาท) | ปริมาณ (มิลลิลิตร) | ราคา (บาท) | | |
| 1 | 26.7 | 3.74 | 300 | 135 | 150 | 2.94 | 141.68 | 141.68 |
| 2 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 148.36 | 70.84 |
| 3 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 155.04 | 47.23 |
| 4 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 161.72 | 35.42 |
| 5 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 168.40 | 28.34 |
| 6 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 175.08 | 23.61 |
| 7 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 181.76 | 20.24 |
| 8 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 188.44 | 17.71 |
| 9 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 195.12 | 15.74 |
| 10 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 201.80 | 14.17 |
| 11 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 208.48 | 12.88 |
| 12 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 215.16 | 11.81 |
| 13 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 221.84 | 10.90 |
| 14 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 228.52 | 10.12 |
| 15 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 235.20 | 9.45 |
| 16 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 241.88 | 8.86 |
| 17 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 248.56 | 8.33 |
| 18 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 255.24 | 7.87 |
| 19 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 261.92 | 7.46 |
| 20 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 268.60 | 7.08 |
| 21 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 275.28 | 6.75 |
| 22 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 281.96 | 6.44 |
| 23 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 288.64 | 6.16 |
| 24 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 295.32 | 5.90 |
| 25 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 302.00 | 5.67 |
| 26 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 308.68 | 5.45 |
| 27 | 26.7 | 3.74 | - | - | 150 | 2.94 | 315.36 | 5.25 |



ภาคผนวก ง

การคำนวณราคาของสารละลายทองแดงในกรดซัลฟิวริก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ราคา 750 บาทต่อกิโลกรัม

$$\text{มวลโมเลกุลของ } \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 63.55 + 32 + 4(16) + 6(18) = 267.55$$

$$(\text{Cu} = 63.55 \quad \text{S} = 32 \quad \text{O} = 16 \quad \text{H} = 1)$$

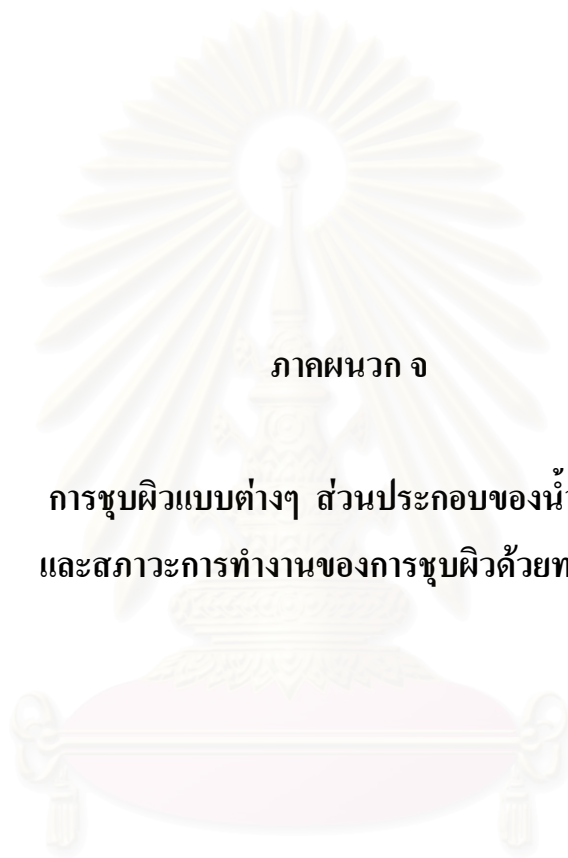
$$\text{ดังนั้น ใน 1 กิโลกรัมของ } \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \text{ มีทองแดงอยู่} = \frac{63.55}{267.55} \times 1,000$$

$$= 237.53 \text{ กรัม}$$

$$\text{ราคาของสารละลายทองแดงในกรดซัลฟิวริก 28,760 มิลลิกรัมต่อลิตร} = \frac{28.75}{237.55} \times 750$$

$$= 90.80 \text{ บาท}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

การชูปิ๋วแบบต่างๆ ส่วนประกอบของน้ำยาชูปิ๋ว
และสภาวะการทำงานของการชูปิ๋วด้วยทองแดง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การชุบทองแดงแบบต่างๆ (สารโรซ พันธ์แพ, 2526)

1. การชุบทองแดงแบบต่างๆ

การชุบทองแดงแบบต่างๆ บางครั้งเรียกว่า การชุบทองแดงแบบไซยาไนด์ นิยมชุบชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นโลหะ เช่น ชิ้นส่วนที่ทำจากสังกะสีผสม จะชุบรองพื้นด้วยทองแดงต่างก่อน แล้วจึงชุบด้วยนิกเกิลและโครเมียมตามลำดับ ซึ่งทองแดงที่จะรองพื้นนี้จะป้องกันหรือกั้นเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างชิ้นงานซึ่งเป็นสังกะสี ผสมกับน้ำยาในถังชุบนิกเกิลซึ่งมีสภาพเป็นกรด และยังช่วยให้ชั้นของนิกเกิลที่จะชุบต่อไปยึดกันติดแน่นดีอีกด้วย สำหรับการชุบด้วยทองแดงแบบต่างๆ จะให้กำลังการเคลือบผิวหรือประสิทธิภาพในการเกาะของทองแดงบนโลหะที่มีรูปร่างต่างๆดีมาก ในปัจจุบันได้แบ่งการชุบทองแดงแบบต่างๆเป็น 3 ชนิด คือ

1.1 แบบสไตรค์

สไตรค์เป็นการชุบผิวทองแดงลงบนโลหะอย่างบางๆก่อนนำไปชุบอย่างอื่นต่อไป ความหนาของการชุบแบบนี้โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 0.5 – 1 ไมโครเมตร (ไมครอน) แต่บางครั้งก็อาจจะหนาถึง 2.5 ไมโครเมตร

สูตรน้ำยาของการชุบแบบสไตรค์เป็นดังนี้

| | |
|---|--------------|
| คอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ (CuCN) | 15 กรัม/ลิตร |
| โซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) | 23 กรัม/ลิตร |
| โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃) | 15 กรัม/ลิตร |

สภาวะการทำงาน

| | |
|--|---------------------------------|
| อุณหภูมิ | 41 – 60 องศาเซลเซียส |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ | 1.0 – 3.2 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วบวก | 0.5 – 1.0 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| ประสิทธิภาพของขั้วลบ | 10 – 60 เปอร์เซ็นต์ |
| ประสิทธิภาพของขั้วบวก | 95 – 100 เปอร์เซ็นต์ |
| อัตราส่วนของพื้นที่ของขั้วบวกต่อขั้วลบ | 3 : 1 |
| แรงเคลื่อนไฟฟ้า | 6 โวลต์ |
| ความหนาสูงสุด | 2.5 ไมโครเมตร |
| ขั้วบวก | โลหะทองแดง |

1.2 แบบบรอกเซลล์

เป็นการชุบร่องพื้นที่ต้องการความหนาของชั้นทองแดงปานกลาง ผิวงานที่ได้จะเป็นลักษณะด้านกึ่งเงา การชุบแบบนี้มักจะนำไปใช้ในการชุบพวกสังกะสีหล่อหรือโลหะอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการความหนามากนัก และการเคลือบผิวที่ดีจะอยู่ในช่วงความหนา 2.5 – 7.5 ไมโครเมตร

สูตรน้ำยาของการชุบแบบบรอกเซลล์เป็นดังนี้

| | |
|---|---------------------------|
| คอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ (CuCN) | 26 หรือ 19 – 45 กรัม/ลิตร |
| โซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) | 35 หรือ 26 – 53 กรัม/ลิตร |
| โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃) | 30 หรือ 15 – 60 กรัม/ลิตร |
| บรอกเซลล์ซอลท์ (NaKC ₄ H ₄ O ₆ ·4H ₂ O) | 45 หรือ 30 – 60 กรัม/ลิตร |

สภาวะการทำงาน

| | |
|--|---------------------------------|
| อุณหภูมิ | 55 – 70 องศาเซลเซียส |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ | 1.6 – 6.5 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วบวก | 0.8 – 3.3 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| ประสิทธิภาพของขั้วลบ | 30 – 70 เปอร์เซ็นต์ |
| ประสิทธิภาพของขั้วบวก | 50 – 70 เปอร์เซ็นต์ |
| อัตราส่วนของพื้นที่ของขั้วบวกต่อขั้วลบ | 2 : 1 |
| แรงเคลื่อนไฟฟ้า | 6 โวลต์ |
| ความหนาสูงสุด | 2.5 ไมโครเมตร |
| ขั้วบวก | โลหะทองแดง |
| กวนน้ำยาโดยการเคลื่อนไหวยขั้วลบดีกว่าการกวนด้วยลมก็ได้ | |

1.2 แบบประสิทธิภาพสูง

การชุบเคลือบด้วยทองแดงแบบนี้ ถ้าใช้สูตรน้ำยาและสภาวะการทำงานตามที่กำหนดจะให้ประสิทธิภาพของขั้วบวกและขั้วลบเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ และอัตราเร็วของการเกาะเคลือบผิวสูงกว่าแบบสไตรค์และแบบบรอกเซลล์ นิยมใช้ชุบร่องพื้นที่ส่วนประกอบที่เป็นเครื่องประดับในยานยนต์ต่างๆ ผิวทองแดงที่เคลือบจะเงางามและเป็นร่องพื้นที่ดีในการชุบเคลือบทับด้วยโลหะอื่นๆต่อไป ในการชุบทางอุตสาหกรรมจะชุบให้หนา 7.5 – 20 ไมโครเมตร และสามารถเคลือบผิวชิ้นงานที่มีรูปทรงต่างๆได้ทั่วถึงดีกว่า 2 แบบแรก

สูตรนำยาของการชุบแบบประสิทธิภาพสูง เป็นดังนี้

| | |
|---|-----------------------------|
| คอปเปอร์ (I) ไซยาไนด์ (CuCN) | 75 หรือ 49 – 127 กรัม/ลิตร |
| โซเดียมไซยาไนด์ (NaCN) | 93 หรือ 62 – 154 กรัม/ลิตร |
| หรือ โปตัสเซียมไซยาไนด์ (KCN) | 115 หรือ 76 – 178 กรัม/ลิตร |
| โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃) | 30 หรือ 15 – 60 กรัม/ลิตร |
| หรือ โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) | 42 หรือ 31 – 52 กรัม/ลิตร |

สภาวะการทำงาน

| | |
|---|----------------------------------|
| อุณหภูมิ | 60 – 80 องศาเซลเซียส |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ | 1.0 – 11.1 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วบวก | 1.5 – 4.0 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| ประสิทธิภาพของขั้วลบ | 99 (บวก) เปอร์เซนต์ |
| ประสิทธิภาพของขั้วบวก | 99 (บวก) เปอร์เซนต์ |
| อัตราส่วนของพื้นที่ของขั้วบวกต่อขั้วลบ | 3 : 2 |
| แรงเคลื่อนไฟฟ้า | 0.75 – 4.0 โวลต์ |
| ความหนาแน่นสูงสุด | ไม่จำกัด |
| ขั้วบวก | โลหะทองแดง |
| กวนน้ำยาโดยการเคลื่อนไหวน้ำขั้วลบหรือการกวนด้วยลมหรือทั้งสองอย่าง | |

2. การชุบทองแดงแบบกรด

การชุบผิวด้วยทองแดงแบบกรดนี้ ใช้สารเคมีราคาถูกง่ายต่อการควบคุมสภาวะการทำงาน การชุบแบบนี้ได้มีการเติมน้ำยาแข็งซึ่งเป็นสารอินทรีย์เคมีเพื่อให้งานมีความเงางาม และเติมน้ำยารักษาระดับความหนาของชั้นทองแดงในบริเวณต่างๆ ให้เท่ากันอีกด้วย การชุบทองแดงแบบกรดนี้อาจจะเป็นการชุบรองพื้นชั้นแรกสำหรับชิ้นงานที่ไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำยาชุบซึ่งมีสภาพเป็นกรด หรืออาจจะเป็นการชุบรองพื้นต่อจากชิ้นงานที่ผ่านการชุบทองแดงแบบด่างมาแล้ว ถ้าหากชิ้นงานเหล่านั้นเป็นวัสดุที่ทำปฏิกิริยากับน้ำยาชุบทองแดงแบบกรด

การชุบทองแดงแบบกรดมีอยู่ 2 ชนิด คือ ชนิดซัลเฟต กับชนิดฟลูออโบเรต ซึ่งทั้งสองชนิดนี้เกลือของทองแดงจะละลายได้ดีในน้ำยาชุบ และได้เติมกรดซัลฟิวริกลงในน้ำยาชุบชนิดซัลเฟตเพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า เติมกรดฟลูออโบริกลงไปให้น้ำยาชุบชนิดฟลูออโบเรตเพื่อช่วยเพิ่มการนำไฟฟ้าเช่นเดียวกัน สำหรับประสิทธิภาพของขั้วบวกและขั้วลบนั้นเกือบจะร้อยเปอร์เซนต์ไม่ว่าจะใช้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าในช่วงปฏิบัติการเป็นเท่าไรก็ตาม ส่วนอัตราเร็วของ

การเกาะจะขึ้นกับการกวนน้ำยาเพื่อไล่ฟองก๊าซอิทธิพลอื่น ๆ ที่มีผลต่อการเกาะของทองแดงบนชิ้นงาน เช่น ความเข้มข้นของเกลือทองแดง กรดอิสระ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ เป็นต้น

สูตรน้ำยาของการชุบทองแดงแบบกรดชนิดซัลเฟต เป็นดังนี้

| | |
|---|------------------------------|
| คอปเปอร์ซัลเฟต ($\text{Cu SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) | 188 หรือ 150 – 250 กรัม/ลิตร |
| กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) | 74 หรือ 45 – 110 กรัม/ลิตร |
| น้ำยาเงา | ตามคู่มือการใช้ของผู้ผลิต |

สภาวะการทำงาน

| | |
|--------------------------|------------------------------|
| อุณหภูมิ | ห้อง (ของบรรยากาศปกติ) |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า | 1 – 20 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| แรงเคลื่อนไฟฟ้า | 1 – 3 โวลต์ |
| ประสิทธิภาพของกระแสไฟฟ้า | 95 – 97 เปอร์เซ็นต์ |
| ขั้วบวก | แท่งโลหะทองแดงบริสุทธิ์ |
| การกวนน้ำ | กวนลม |

สูตรน้ำยาของการชุบทองแดงแบบกรดชนิดฟลูออโบเรต เป็นดังนี้

| | เจือจาง | เข้มข้น | |
|---|---------------------------|-----------|-----------|
| คอปเปอร์ฟลูออโบเรต ($\text{Cu (BF}_4)_2$) | 224 | 448 | กรัม/ลิตร |
| กรดฟลูออโบริก (HBF_4) | 15 | 30 | กรัม/ลิตร |
| กรดบอริก (H_3BO_3) | 15 | 30 | กรัม/ลิตร |
| น้ำยาเงา | ตามคู่มือการใช้ของผู้ผลิต | | |
| พีเอช | 1.2 – 1.7 | 0.2 – 0.6 | |

สภาวะการทำงาน

| | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| อุณหภูมิ | 27 – 50 องศาเซลเซียส |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ | |
| - ที่ 27 องศาเซลเซียส | ไม่เกิน 14 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| - ที่ 50 องศาเซลเซียส | ไม่เกิน 45 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |

3. การชุบทองแดงแบบไฟโรฟอสเฟต

การชุบผิวด้วยโลหะทองแดงตามวิธีนี้จะมีกำลังการเคลือบผิว การป้องกันการกัดกร่อน และให้ความเงางามทนทานดีมาก ไม่มีสารที่เป็นอันตรายในขณะที่ทำการชุบ จากประโยชน์เหล่านี้ ทำให้วิธีการชุบแบบนี้แพร่หลายออกไปอย่างรวดเร็ว ชิ้นงานที่นำมาชุบอาจจะเป็นเหล็กกล้า อะลูมิเนียม สังกะสีผสม เป็นต้น

น้ำยาชุบแบบนี้จะประกอบด้วยคอปเปอร์ไฟโรฟอสเฟต โปตัสเซียมไฟโรฟอสเฟต หรือ โซเดียมไฟโรฟอสเฟต ไนเตรท และแอมโมเนียม โดยเกลือไฟโรฟอสเฟตจะรวมตัวกันเป็น สารประกอบเชิงซ้อนของ $\text{Cu}(\text{P}_2\text{O}_7)_2^{6-}$ เป็นส่วนใหญ่ และมี $\text{Cu}(\text{P}_2\text{O}_7)^{2-}$ อีกเล็กน้อย ในระหว่าง พีเอช 7 ถึง 11 อีออนเชิงซ้อนเหล่านี้จะไม่เปลี่ยนแปลงอะไร เมื่อพีเอชมากกว่า 11 จะทำให้เกิด ตะกอนของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ และถ้าพีเอชต่ำกว่า 7 จะทำให้ $(\text{P}_2\text{O}_7)^{4-}$ เปลี่ยนไปเป็น $(\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7)^{2-}$ หรือ $(\text{HPO}_4)^{2-}$ ทำให้สภาพของสารเชิงซ้อนที่ต้องการถูกทำลายไป

สูตรน้ำยาของการชุบทองแดงแบบกรดชนิดซัลเฟต เป็นดังนี้

| | |
|---|------------------|
| คอปเปอร์ไฟโรฟอสเฟต ($\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$) | 90 กรัม/ลิตร |
| โปตัสเซียมไฟโรฟอสเฟต ($\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$) | 350 กรัม/ลิตร |
| โปตัสเซียมฟอสเฟต (K_3PO_4) | 80 กรัม/ลิตร |
| โปตัสเซียมไนเตรท (KNO_3) | 15 กรัม/ลิตร |
| แอมโมเนีย (NH_3 conc.) | 2 มิลลิลิตร/ลิตร |

สภาวะการทำงาน

| | |
|--|---|
| อุณหภูมิ | 50 – 60 องศาเซลเซียส |
| ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ | 1 – 8 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร |
| พีเอช | 8.0 – 8.8 |
| ประสิทธิภาพของขั้วบวกและขั้วลบ | 100 เปอร์เซ็นต์ |
| อัตราส่วนพื้นที่ผิวของขั้วบวกต่อขั้วลบ | 1:1 – 1:2 |
| การกวนน้ำยา ใช้ลมเป่าในอัตรา | 1 – 1.5 ลูกบาศก์เมตร/นาทิตารางเมตร ของพื้นผิวชิ้นงาน |



ภาคผนวก ฉ

คำมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-47 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

| พารามิเตอร์ | ค่ามาตรฐาน | วิธีวิเคราะห์ |
|--|--|--|
| ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value) | 5.5 – 9.0 | pH meter |
| ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total dissolved Solids) | - ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่ง ร่องรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของ โรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อย ที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเล ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล. | ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง |
| สารแขวนลอย (Suspended Solids) | ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแต่ประเภทของแหล่งร่องรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของ โรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร | กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc) |
| อุณหภูมิ (Temperature) | ไม่เกิน 400 °C | เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่าง |
| สีหรือกลิ่น | ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ | ไม่ได้กำหนด |
| ซัลไฟด์ as H ₂ S | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | Titrate |
| ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN) | ไม่เกิน 0.2 มก./ล. | กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid |

| พารามิเตอร์ | ค่ามาตรฐาน | วิธีวิเคราะห์ |
|---|--|--|
| น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease) | ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 15 มก./ล. | สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน |
| ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | Spectrophotometry |
| สารประกอบฟีนอล (Phenols) | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine |
| คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | Iodometric Method |
| สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide) | ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด | Gas Chromatography |
| ค่าบีโอดี (5 วันที่อุณหภูมิ 20°C Biochemical Oxygen Demand : BOD) | ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม | Azide Modification ที่อุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 5 วัน |
| ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) | ไม่เกิน 100 มก./ล.หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล. | Kjedahl |

| พารามิเตอร์ | ค่ามาตรฐาน | วิธีวิเคราะห์ |
|--|--|--|
| ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD) | ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล. | Potassium Dichromate Digestion |
| โลหะหนัก | | |
| สังกะสี (Zn) | ไม่เกิน 5.0 มก./ล. | Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma, ICP |
| โครเมียมชนิดเฮกซาวาเลนต์ | ไม่เกิน 0.75 มก./ล. | |
| อาร์เซนิก (As) | ไม่เกิน 0.25 มก./ล. | |
| ทองแดง (Cu) | ไม่เกิน 2.0 มก./ล. | |
| ปรอท (Hg) | ไม่เกิน 0.005 มก./ล. | |
| แคดเมียม (Cd) | ไม่เกิน 0.03 มก./ล. | |
| แบเรียม (Ba) | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | |
| เซลีนียม (Se) | ไม่เกิน 0.02 มก./ล. | Atomic Absorption Cold Vapour Technique |
| ตะกั่ว (Pb) | ไม่เกิน 0.2 มก./ล. | |
| นิกเกิล (Ni) | ไม่เกิน 1.0 มก./ล. | |
| แมงกานีส (Mn) | ไม่เกิน 5.0 มก./ล. | Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma, ICP |

แหล่งที่มา ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539)
ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่ง
กำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจา
นุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ช

การสกัดทองแดงออกจากน้ำเสียที่อัตราส่วนน้ำเสียต่อตัวสกัด
(A:O ratio) น้อยกว่า 10:1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-48 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด
น้อยกว่า 10 : 1 ในการทดลองครั้งที่ 1

| อัตราส่วนของ น้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง ในแรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดง (%) |
|-------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 20:1 | 25.0 | 4,495 | 99.45 |
| 30:1 | 25.5 | 4,495 | 99.44 |
| 40:1 | 25.4 | 4,495 | 99.44 |
| 50:1 | 27.0 | 4,493 | 99.40 |
| 60:1 | 50.0 | 4,470 | 98.89 |

ตารางที่ ผ-49 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด
น้อยกว่า 10 : 1 ในการทดลองครั้งที่ 2

| อัตราส่วนของ น้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง ในแรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดง (%) |
|-------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 20:1 | 25.5 | 4,495 | 99.44 |
| 30:1 | 25.3 | 4,495 | 99.44 |
| 40:1 | 25.4 | 4,495 | 99.44 |
| 50:1 | 26.7 | 4,493 | 99.41 |
| 60:1 | 49.9 | 4,470 | 98.90 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-50 ประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด
น้อยกว่า 10 : 1 ในการทดลองครั้งที่ 3

| อัตราส่วนของ น้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง ในแรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดง (%) |
|-------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 20:1 | 25.3 | 4,495 | 99.44 |
| 30:1 | 25.3 | 4,495 | 99.44 |
| 40:1 | 25.3 | 4,495 | 99.44 |
| 50:1 | 26.8 | 4,493 | 99.41 |
| 60:1 | 49.7 | 4,470 | 98.90 |

ตารางที่ ผ-51 ค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพในการสกัดทองแดงของตัวสกัดที่อัตราส่วนของน้ำเสี้ยวต่อ
ตัวสกัดน้อยกว่า 10 : 1

| อัตราส่วนของ น้ำเสี้ยวต่อตัวสกัด | ปริมาณทองแดง ในแรฟไฟเนต (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ปริมาณทองแดง ในเอกซ์แทรค (มิลลิกรัมต่อลิตร) | ประสิทธิภาพ ในการสกัดทองแดง (%) |
|-------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 20:1 | 25.3 | 4,494.8 | 99.44 |
| 30:1 | 25.4 | 4,494.6 | 99.44 |
| 40:1 | 25.4 | 4,494.6 | 99.44 |
| 50:1 | 26.8 | 4,493.2 | 99.41 |
| 60:1 | 49.8 | 4,470.2 | 98.90 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสิรินุช วชิรวัชรินทร์ เกิดวันที่ 5 มกราคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต จากสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปีการศึกษา 2545 และได้เข้าศึกษาต่อ ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย