การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมไบโรไฮไดรด์

นางสาว มณีรัตน์ องค์วรรณดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-641-9

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

18 ธ.ค. 2545
I19246985

HEAVY METALS REMOVAL FROM ELECTROPLATING WASTEWATER USING SODIUM BOROHYDRIDE

Miss Maneerat Ongwandee

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-641-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมไบโรไฮไดรด์
โดย	นางสาว มณีรัตน์ องค์วรรณดี
ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัชชัย สุมิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชีระ เกรอด)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มณีรัตน์ องค์วรรณดี : การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (HEAVY METALS REMOVAL FROM ELECTROPLATING WASTEWATER USING SODIUM BOROHYDRIDE) อ. ที่ปรึกษา : รศ. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 201 หน้า. ISBN 974-333-641-9.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ โดยการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ในรูปของสารละลายที่เป็นด่าง (SBH) ความเข้มข้น 1.2 % ของ $NaBH_4$ ใน 4 % ของ NaOH กำจัดโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสีย 4 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียจากการชุบทองแดง น้ำเสียจากการชุบนิกเกิล น้ำเสียจากการชุบโครเมียม และน้ำเสียรวม ซึ่งเป็นน้ำเสียจริงที่ได้จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

จากการทดลองพบว่า การบำบัดน้ำเสียจากการชุบทองแดงที่มีความเข้มข้น 550 มก./ล. ทำได้โดยการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยด่างให้มีพีเอชอยู่ในช่วง 4 ถึง 5 แล้วจึงเติม $NaHSO_3$ 5 เท่าของทองแดง และเติม SBH จนได้พีเอชสุดท้ายประมาณ 7 จะสามารถกำจัดทองแดงทั้งหมดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง นอกจากนี้การใช้ปูนขาวปรับพีเอชจะมีผลให้ทองแดงทั้งหมดที่เหลือในน้ำต่ำกว่า 1 มก./ล.ได้

น้ำเสียจากการชุบนิกเกิลที่มีความเข้มข้น 380 มก./ล. ให้ปรับพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 8.5 ด้วยด่าง แล้วจึงเติม $NaHSO_3$ 0.5 เท่าของนิกเกิล และเติม SBH จนได้พีเอชสุดท้ายประมาณ 9 จะสามารถกำจัดนิกเกิลละลายได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

น้ำเสียจากการชุบโครเมียม มีความเข้มข้นโครเมียม นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 1460 180 145 และ 90 มก./ล.ตามลำดับ การบำบัดขั้นแรกให้ทำปฏิกิริยากับ $NaHSO_3$ 3 เท่าของโครเมียม หลังจากนั้นปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 8 ด้วยด่าง เติม SBH ให้ได้พีเอชสุดท้ายประมาณ 9 จะสามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดที่ละลายในน้ำได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

น้ำเสียรวม มีความเข้มข้นนิกเกิล ทองแดง โครเมียม สังกะสี และเหล็ก เท่ากับ 1660 770 250 160 และ 140 มก./ล.ตามลำดับ มีขั้นตอนการบำบัดเช่นเดียวกับน้ำเสียจากการชุบโครเมียม โดยใช้ปริมาณ $NaHSO_3$ 1 เท่าของโครเมียม จากนั้นปรับพีเอชของน้ำเสียเป็น 8 ด้วยด่าง เติม SBH จนได้พีเอชประมาณ 9.2 ถึง 9.5 จะสามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดที่ละลายในน้ำได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง

ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำบัดน้ำเสียด้วย SBH สำหรับน้ำเสียจากการชุบทองแดง การชุบนิกเกิล การชุบโครเมียม และน้ำเสียรวม คิดเป็นเงิน 133 247 446 และ 541 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ตามลำดับ ซึ่งแยกเป็นค่าสารเคมีเท่ากับ 106 242 335 และ 384 บาทตามลำดับ และเป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนเท่ากับ 27 5 111 และ 157 บาทตามลำดับ

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	มณีรัตน์ องค์วรรณดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	อรทัย ชวาลภาฤทธิ์
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

MANEERAT ONGWANDEE : HEAVY METALS REMOVAL FROM ELECTRO-PLATING WASTEWATER USING SODIUM BOROHYDRIDE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT., M.Sc. 201 pp. ISBN 974-333-641-9

This research explores methodology of wastewater treatment with using a stable aqueous solution of sodium borohydride (SBH) containing 1.2 % $NaBH_4$ and 4 % NaOH, removing heavy metals from electroplating, namely copper plating, nickel plating, chromium plating and combined wastewater.

The SBH process for copper waste with concentration 550 mg/l requires initial pH adjustment to 4-5 with caustic, then adding sodium bisulfite at 5 times of amount copper in wastewater. Next SBH is added until the pH of solution increased to 7. This process can remove total copper from wastewater according to effluent Thai industrial standard. Moreover, the pH adjustment with lime can reduce copper less than 1 mg/l.

Similarly, nickel waste with concentration 380 mg/l can be respectively processed with adjusting pH to 8.5 with caustic, adding sodium bisulfite at 0.5 times of amount nickel in wastewater, and adding SBH until the pH of solution increased to 9.

For the chromium plating wastewater containing 1460 mg/l Cr^{6+}, 180 mg/l Ni^{2+}, 145 mg/l Cu^{2+}, and 90 mg/l Zn^{2+}, the process is adding sodium bisulfite at 3 times of amount chromium in wastewater, adjusting pH to 8 with caustic, and then adding SBH until the pH of solution increased to 9.

Like the SBH process for chromium wastewater, the combined wastewater containing 1660 mg/l Ni^{2+}, 770 mg/l Cu^{2+}, 250 mg/l Cr^{6+}, 160 mg/l Zn^{2+} and 140 mg/l Fe^{3+} required the same process except adding sodium bisulfite at 1 time, and the final pH as 9.2-9.5.

The treatment cost of the copper plating, nickel plating, chromium plating and combined wastewater, can be respectively identified as 133, 247, 446 and 541 baht/cubic meter for total cost, as 106, 242, 335 and 384 baht/cubic meter for chemical cost, and as 27, 5, 111 and 157 baht/cubic meter for the sludge cost.

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	มนีรัตน์ องค์วรรณดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา	อรทัย ชวลพฤกษ์
ปีการศึกษา	2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ตลอดจน รศ. ดร. สุรพล สายพานิช รศ. ดร. ชีระ เกรอด และ รศ. ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ที่ได้กรุณาตรวจสอบและให้คำแนะนำต่าง ๆ ในการวิจัย

ขอบคุณ มูลนิธิ ชิน โสภณพานิช และ บัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนการวิจัยครั้งนี้

ขอบคุณ บริษัท สยามซานิทารีฟิตติ้งส์ จำกัด ที่อนุเคราะห์น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย และเจ้าหน้าที่ของบริษัทที่ติดต่อด้วยทุกท่าน ซึ่งช่วยอำนวยความสะดวกและให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยมากมาย

ขอบคุณ ครูห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาโดยตลอด

ขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ ร่วมรุ่นทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือทุกครั้งที่เอ่ยปาก และช่วยให้เวลาตลอด 4 ปีที่ผ่านมามีเรื่องสนุกสนานเกิดขึ้นเสมอ

ท้ายนี้ใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งคอยเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญรูป ..... ฒ
บทที่
1 บทนำ 1
2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย 3
2.1 วัตถุประสงค์ 3
2.2 ขอบเขตการวิจัย 3
3 ทบทวนเอกสาร 4
3.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า 4
3.2 การชุบโลหะประเภทต่าง ๆ 6
3.3 ผลกระทบของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ 9
3.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ 10
3.5 การตกตะกอนทางเคมี 11
3.6 Oxidation-Reduction Technology 17
3.7 Borohydride Reduction 20
3.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 22
3.9 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา 24
4 วิธีดำเนินการวิจัย 30
4.1 ขั้นตอนการทดลอง 30
4.2 วิธีการทดลอง 30
4.3 พารามิเตอร์ 40
4.4 จำนวนชุดการทดลองในขั้นตอนที่ 2 41

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

4.5 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 41

4.6 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ 42

5 ผลการทดลองและวิจารณ์ 44

5.1 วิเคราะห์ลักษณะน้ำเสีย 44

5.2 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของโลหะหนัก 45

5.2.1 การใช้ SBH เพียงอย่างเดียว 45

5.2.2 การใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$ 47

5.3 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก 52

5.3.1 น้ำเสียจากการชุบทองแดง 52

5.3.2 น้ำเสียจากการชุบนิกเกิล 77

5.3.3 น้ำเสียจากการชุบโครเมียม 101

5.3.4 น้ำเสียรวม 112

5.3.5 เปรียบเทียบสภาวะการบำบัดน้ำเสียระหว่างกระบวนการไบโรไฮไดรด์รีดักชันกับการตกตะกอนทางเคมีด้วย NaOH 126

5.4 การบำบัดน้ำเสียโดยใช้แบบจำลอง 131

5.4.1 น้ำเสียจากการชุบทองแดง 132

5.4.2 น้ำเสียจากการชุบนิกเกิล 134

5.4.3 น้ำเสียจากการชุบโครเมียม 137

5.4.4 น้ำเสียรวม 139

5.4.5 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการไบโรไฮไดรด์รีดักชันกับการตกตะกอนทางเคมีด้วยด่าง 141

5.4.6 สรุปการใช้ SBH 143

5.4.7 การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วย SBH แบบแบทช์อย่างง่าย 143

5.5 ความเป็นไปได้ในการนำตะกอนจากการบำบัดน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วย SBH กลับมาใช้ใหม่ 145

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6 สรุปผลการวิจัย	147
6.1 บทสรุป	147
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยครั้งต่อไป	149
รายการอ้างอิง	150
ภาคผนวก	153
ภาคผนวก ก	154
ภาคผนวก ข	158
ภาคผนวก ค	160
ภาคผนวก ง	174
ภาคผนวก จ	183
ประวัติผู้เขียน	200

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ข้อดีและข้อจำกัดของการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์.....16
3.2 สารเคมีที่ใช้สำหรับออกซิไดซ์ไซยาไนด์..... 18
3.3 สารเคมีที่ใช้สำหรับรีดิวซ์ Cr(VI).....19
3.4 ปริมาณของสารเคมีที่ใช้รีดิวซ์ Cr(VI)..... 20
3.5 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของโลหะที่ถูกรีดิวซ์ ต่อ จำนวนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้.....21
3.6 ปริมาณของน้ำเสีย.....28
4.1 หัวข้อที่ใช้เปรียบเทียบ.....38
4.2 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในการวิจัย.....42
5.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการวิจัย..... 44
5.2 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองใช้ SBH กับน้ำเสียทองแดงที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ..... 56
5.3 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$ กับน้ำเสียทองแดง ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ..... 70
5.4 เปรียบเทียบระหว่างการปรับพีเอชน้ำเสียด้วย NaOH กับ $Ca(OH)_2$..... 75
5.5 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองใช้ SBH กับน้ำเสียนิกเกิลที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ..... 82
5.6 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$ กับน้ำเสียนิกเกิล ที่พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ..... 94
5.7 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$ กับน้ำเสียโครเมียม..... 106
5.8 ผลการทดลองปรับพีเอชน้ำเสียโครเมียมด้วย NaOH ก่อนเติม SBH.....107
5.9 สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$ ที่สภาวะการปรับพีเอช ของน้ำเสียรวมขั้นแรกเท่ากับ 5..... 119
5.10 เปรียบเทียบการปรับพีเอชขั้นแรกด้วย NaOH (ก่อนเติม SBH) เท่ากับ 4, 5, 6, 7 และ 8.....120
5.11 เปรียบเทียบการปรับพีเอชขั้นแรกด้วย $Ca(OH)_2$ (ก่อนเติม SBH) เท่ากับ 4, 5, 6, 7 และ 8.....120
5.12 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการชุบทองแดง..... 127
5.13 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการชุบนิกเกิล..... 128
5.14 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากการชุบโครเมียม.....129

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

5.15 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียรวม..... 130
5.16 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียทองแดงที่สภาวะต่าง ๆ..... 133
5.17 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียนิกเกิลที่สภาวะต่าง ๆ..... 136
5.18 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียโครเมียมที่สภาวะต่าง ๆ..... 138
5.19 ผลการทดลองบำบัดน้ำเสียรวมที่สภาวะต่าง ๆ..... 140
5.20 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายระหว่างกระบวนการบำบัดน้ำเสีย 3 วิธี..... 141
6.1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียประเภทต่าง ๆ ด้วย SBH..... 148

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า. 4
3.2 ขั้นตอนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าอย่างง่าย. 5
3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชของสารละลายกับความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์. 13
3.4 ขั้นตอนการชุบทองแดง. 25
3.5 กระบวนการชุบชิ้นงานด้วยนิกเกิล-โครเมียม. 26
3.6 กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงาน. 28
4.1 แผนผังการทดลองการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ SBH 33
4.2 แผนผังการทดลองการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ $NaHSO_3$ ร่วมกับ SBH ปรับพีเอชขั้นแรกด้วย NaOH. 35
4.3 แผนผังการทดลองการบำบัดน้ำเสียโดยใช้ $NaHSO_3$ ร่วมกับ SBH ปรับพีเอชขั้นแรกด้วย $Ca(OH)_2$. 36
4.4 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้ SBH ร่วมกับโพลีเมอร์. 37
4.5 แบบจำลองที่ใช้บำบัดน้ำเสีย. 39
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอชและไออาร์พี (น้ำเสียทองแดง). 45
5.2 ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือที่เวลาต่าง ๆ. 45
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอชและไออาร์พี (น้ำเสียนิกเกิล). 46
5.4 ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือที่เวลาต่าง ๆ. 46
5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอชและไออาร์พี (น้ำเสียทองแดง). 48
5.6 ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือที่เวลาต่าง ๆ. 48
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอชและไออาร์พี (น้ำเสียนิกเกิล). 49
5.8 ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือที่เวลาต่าง ๆ. 49
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอชและไออาร์พี (น้ำเสียโครเมียม). 50
5.10 ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือที่เวลาต่าง ๆ หลังจากเติม SBH. 50
5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้กวนกับค่าพีเอชและไออาร์พี (น้ำเสียรวม). 51
5.12 ความเข้มข้นรวมที่เหลือที่เวลาต่าง ๆ หลังจากเติม SBH. 51
5.13 ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือกับปริมาณ SBH ที่ใช้ ณ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่าง ๆ กัน. . 53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.14 ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือกับพีเอชสุดท้ายของน้ำ ณ พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ กัน..... 54
5.15 พีเอชสุดท้ายของน้ำและค่าโออาร์พีกับปริมาณ SBH ที่ใช้ ณ พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ กัน 55
5.16 ลักษณะของตะกอนทองแดงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเติม SBH จำนวน 1, 2, 3 และ 4 เท่า..... 57
5.17 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 4 ด้วย NaOH และ $Ca(OH)_2$..... 60
5.18 ทองแดงที่เหลือกับปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ ณ สภาวะการกำจัดพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 3 โดยใช้ SBH 3 เท่าเพียงอย่างเดียว..... 61
5.19 ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือกับปริมาณ SBH ที่ใช้ ณ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน..... 64
5.20 ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือกับพีเอชสุดท้ายของน้ำ ณ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน..... 66
5.21 พีเอชสุดท้ายของน้ำและค่าโออาร์พีกับปริมาณ SBH ที่ใช้ ณ พีเอชเริ่มต้น และ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน..... 68
5.22 เปรียบเทียบลักษณะตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียทองแดงด้วยวิธีการต่าง ๆ..... 71
5.23 ลักษณะตะกอนที่เกิดจากการใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$..... 73
5.24 เปรียบเทียบความเข้มข้นทองแดงทั้งหมดที่เหลือระหว่างการใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$ 10 เท่า กับการใช้ SBH อย่างเดียว ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3..... 74
5.25 ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือกับปริมาณ SBH ที่ใช้ ณ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่าง ๆ กัน... 79
5.26 ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือกับพีเอชสุดท้ายของน้ำ ณ พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ กัน..... 80
5.27 พีเอชสุดท้ายของน้ำและค่าโออาร์พีกับปริมาณ SBH ที่ใช้ ณ พีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ กัน.... 81
5.28 นิกเกิลที่เหลือกับปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ ณ สภาวะการกำจัดพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 7 โดยใช้ SBH 1 เท่าเพียงอย่างเดียว..... 83
5.29 ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือกับปริมาณ SBH ที่ใช้ ณ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และปริมาณ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน..... 85
5.30 ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือกับพีเอชสุดท้ายของน้ำ ณ พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน..... 88

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.31 พีเอชสุดท้ายของน้ำและค่าไอออร์พีกับปริมาณ SBH ที่ใช้ ณ พีเอชเริ่มต้นและปริมาณ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน. 91
5.32 ลักษณะของตะกอนนิกเกิลที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเติม $NaHSO_3$ 0.5 เท่า และ SBH จำนวน 1, 2, 3 และ 4 เท่า. 95
5.33 เปรียบเทียบลักษณะตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียนิกเกิลด้วยวิธีการต่าง ๆ. 96
5.34 ลักษณะของตะกอนที่เกิดจากการใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$. 97
5.35 ความสามารถในการละลายของนิกเกิลที่พีเอชต่าง ๆ. 98
5.36 นิกเกิลที่เหลือกับปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ ณ สภาวะการกำจัดพีเอชน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 7 $NaHSO_3$ 1 เท่า และ SBH 1.2 เท่า. 99
5.37 ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือที่ปริมาณ SBH ต่าง ๆ กัน. 101
5.38 ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือกับปริมาณ SBH ที่ใช้ที่ปริมาณ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน 102
5.39 ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือกับพีเอชสุดท้ายของน้ำที่ปริมาณ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน 103
5.40 พีเอชสุดท้ายของน้ำและค่าไอออร์พีกับปริมาณ SBH ที่ใช้ที่ปริมาณ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน. 104
5.41 เปรียบเทียบลักษณะการตกตะกอนที่ได้ด้วยวิธีการบำบัดน้ำเสียโครเมียมโดยการตกตะกอนทางเคมีด้วย NaOH กับการใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$. 108
5.42 ความเข้มข้นโครเมียมละลายที่เหลือที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ กัน โดยใช้ปริมาณ $NaHSO_3$ 2 เท่าของ Cr. 109
5.43 ความสามารถในการละลายของโครเมียมที่พีเอชต่าง ๆ. 109
5.44 โครเมียมที่เหลือกับปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ ณ สภาวะการกำจัด $NaHSO_3$ 2 เท่า และ SBH 0.43 เท่า. 110
5.45 ความเข้มข้นโลหะที่เหลือกับปริมาณ SBH ที่ใช้ที่ปริมาณ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน. 114
5.46 ค่าไอออร์พีกับพีเอชสุดท้ายของน้ำที่ปริมาณ $NaHSO_3$ ต่าง ๆ กัน. 119
5.47 เปรียบเทียบลักษณะตะกอนที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียรวมด้วยการตกตะกอนทางเคมีด้วย NaOH กับการใช้ SBH ร่วมกับ $NaHSO_3$. 120
5.48 เปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 ด้วย NaOH และ $Ca(OH)_2$. 122

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.49 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นโลหะที่เหลือกับปริมาณโพลีเมอร์ที่ใช้ ณ สภาวะการกำจัด $NaHSO_3$ 1 เท่า และพีเอชสุดท้าย 9.5. 124
5.50 ถังปฏิกิริยา. 131
5.51 การบำบัดน้ำเสียทองแดงโดยปรับพีเอชเริ่มต้นเท่า 4 ด้วย NaOH เติม $NaHSO_3$ 5 เท่า และ SBH 2.75 เท่าของจำนวนสตอยชิโอเมตริก. 134
5.52 การบำบัดน้ำเสียนิกเกิลโดยปรับพีเอชเริ่มต้นเท่า 8.5 ด้วย NaOH เติม $NaHSO_3$ 0.5 เท่า และ SBH 0.19 เท่าของจำนวนสตอยชิโอเมตริก. 135
5.53 การบำบัดน้ำเสียโครเมียมโดยใช้ $NaHSO_3$ และ SBH. 137
5.54 การบำบัดน้ำเสียรวมโดยใช้ $NaHSO_3$ และ SBH. 139
5.55 เวลาที่ใช้ในการตกตะกอนเมื่อบำบัดน้ำเสียด้วย SBH กับการตกตะกอนทางเคมีด้วย NaOH. 142
5.56 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสียแบบแบทช์ด้วย SBH. 143
5.57 การสกัดทองแดงด้วยวิธี Wet metallurgical process. 146

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย