การกำจัดทองแดงและนิกเกิลจากน้ำเสียด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมี

นางสาวนิษา โพธิกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาสาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต
แขนงวิชาสาธารณสุขศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
พ.ศ. 2553

Copper and Nickel Removal from Wastewater by Reduction and Precipitation Process

Miss Nisa Potikul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for

the Degree of Master of Public Health in Industrial Environment Management

School of Health Science

Sukhothai Thammathirat Open University

2010

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดทองแดงและนิกเกิลจากน้ำเสียด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมี

ชื่อและนามสกุล นางสาวนิษา ไพธิกุล

แขนงวิชา สาธารณสุขศาสตร์

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

อาจารย์ที่ปรึกษา 1. รองศาสตราจารย์ ดร. ศริศักดิ์ สุนทรไชย

2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จารนัย พณิชยกุล

วิทยานิพนธ์นี้ ได้รับความเห็นชอบให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรระดับปริญญาโท เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

มัลลิกา ปัญญาคะโป ..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. มัลลิกา ปัญญาคะโป)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ศริศักดิ์ สุนทรไชย)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จารนัย พณิชยกุล)

..... ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุจินต์ วิสาธีรานนท์)

ชื่อวิทยานิพนธ์ การกำจัดทองแดงและนิกเกิลจากน้ำเสียด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมี

ผู้วิจัย นางสาวนิษา โพธิกุล **รหัสนักศึกษา** 2475101438 **ปริญญา** สาธารณสุขศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม) **อาจารย์ที่ปรึกษา** (1) รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริศักดิ์ สุนทรไชย (2) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จารนัย พณิชยกุล **ปีการศึกษา** 2553

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้วัตถุประสงค์เพื่อ (1) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารคีเลตอีดีทีเอและไม่มีสารคีเลตอีดีทีเอด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมี และ (2) เพื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการกำจัดทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารคีเลตอีดีทีเอและไม่มีสารคีเลตอีดีทีเอ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในการกำจัดทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารคีเลตอีดีทีเอและไม่มีสารคีเลตอีดีทีเอโดยใช้ชุดเครื่องมือถังปฏิกิริยาจำลอง สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ สารรีดิวซ์คือ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ และปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสียให้อยู่ระหว่าง 6 - 8 และ 8-11 สำหรับน้ำเสียทองแดงและน้ำเสียนิกเกิลตามลำดับ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ ร้อยละและค่าเฉลี่ย

ผลการวิจัยพบว่า (1) สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารคีเลตอีดีทีเอโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50 เท่าและโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอช 8 เหลือความเข้มข้นของทองแดง 0.93 มิลลิกรัม/ลิตร และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.10 เท่า โซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอช 11 เหลือความเข้มข้นของนิกเกิล 11.80 มิลลิกรัม/ลิตร สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่ไม่มีสารคีเลตอีดีทีเอเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 1.50 และ 1.76 เท่าโดยโมลของทองแดงและนิกเกิล เหลือความเข้มข้นทองแดง 0.34 มิลลิกรัม/ลิตร และนิกเกิล 0.08 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ และ (2) ค่าใช้จ่ายในการกำจัดทองแดงและนิกเกิลจากน้ำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสารคีเลตอีดีทีเอคือ 4.61 และ 10.97 บาท/ลิตร ส่วนค่าใช้จ่ายในการกำจัดทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียที่ไม่มีสารคีเลตอีดีทีเอคือ 0.03 และ 0.04 บาท/ลิตร ตามลำดับ

คำสำคัญ ทองแดง นิกเกิล อีดีทีเอ การตกตะกอน วิธีรีดักชัน

Thesis title: Copper and Nickel Removal from Wastewater by Reduction and Precipitation Process
Researcher: Miss Nisa Potikul; **ID:** 2475101438;
Degree: Master of Public Health (Industrial Environment Management);
Thesis advisors: (1) Dr. Sarisak Soonthornchai, Associate Professor;
(2) Dr. Charanai Panichajakul, Assistant Professor; **Academic year:** 2010

Abstract

The objectives of this research were : (1) to determine optimal condition in the removal of copper and nickel from synthetic wastewater with and without EDTA by reduction and precipitation processes; and (2) to compare chemical expenditures in the removal of copper and nickel from the wastewater with and without EDTA.

This experimental research on the removal of copper and nickel from the wastewater with and without EDTA was conducted by Jar test. The precipitating agent was sodium hydroxide and the reducing agents were sodium borohydride and sodium bisulfate. The wastewater pH was varied in the range of 6-8 and 8-11 for copper and nickel removal, respectively. The data were analyzed by percentage and mean.

The results of this study were that : (1) the optimal condition for removal of copper and nickel from the wastewater with EDTA by using sodium borohydride 0.50 mole and sodium bisulfate 0.75 mole for each mole of copper at pH 8 was reduced to 0.93 mg/L for copper, and by using sodium borohydride 1.10 mole and sodium bisulfate 1.54 mole for each mole of nickel at pH 11 was reduced to 11.88 mg/L for nickel. The optimal condition for copper and nickel removal from the wastewater without EDTA by using sodium hydroxide 1.50 and 1.76 moles for each mole of copper and nickel was reduced to 0.34 mg/L and 0.08 mg/L, respectively; and (2) the removal expenditures of copper and nickel from the wastewater with EDTA were 4.61 and 10.97 baht/L and those of the wastewater without EDTA were 0.03 and 0.04 baht/L, respectively.

Keywords: Copper, Nickel, Sodium borohydride, Precipitation, Reduction.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร. ศริศักดิ์ สุนทรไชย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จารนัย พณิชยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำ เสนอแนะแนวทางในการวิจัยตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆในการวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณคุณศุภชัย ประสพโชค ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ชุดเครื่องมือถังปฏิกิริยาจำลองตลอดการทดลอง คุณวราวุฒิ ประชาศิริสกุล และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทางเคมีบริษัท พานาโซนิค อิเล็คทริค เวิร์คส์ (อยุธยา) จำกัด ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ และช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้ใคร่ขอกราบขอบพระคุณ มารดา พี่ชาย และน้องชาย ที่เป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

นิษา โพธิกุล

มิถุนายน 2554

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญตาราง ..... ญ
สารบัญภาพ ..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ 1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
วัตถุประสงค์การวิจัย 3
กรอบแนวคิดการวิจัย 3
สมมติฐานการวิจัย 4
ขอบเขตของการวิจัย 5
นิยามศัพท์เฉพาะ 5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 7
กระบวนการชุบโลหะ 7
ปัญหามลพิษทางน้ำและปัญหาสุขภาพ 12
สารประกอบเชิงซ้อน 21
กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี 23
สมดุลการละลายของสารประกอบที่ละลายน้ำได้ 29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 33
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 37
รูปแบบการวิจัย 37
ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง 37
ตัวแปรของการวิจัย 37
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 38
วิธีดำเนินการทดลอง 39
การเก็บรวบรวมข้อมูล 45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

การวิเคราะห์ข้อมูล 45
การคำนวนค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 45
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 47
ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 47
ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 48
ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ 50
ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียม-ไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ 52
ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียม-ไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ 53
ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียม-ไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.75 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ 55
ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียม-ไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ 56
ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 59
ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 60
ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ 62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.66 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ 63
ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ 65
ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ 66
ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.20 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ 67
สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 69
บทที่ 5 สรุปการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 71
สรุปการวิจัย 71
อภิปรายผล 74
ข้อเสนอแนะ 79
บรรณานุกรม 81
ภาคผนวก 85
ก หลักการพื้นฐานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอิมิสชันสเปกโตรสโคปี 86
ข ผลการทดลอง 90
ค การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย 105
จ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) 116
ประวัติผู้วิจัย 121

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 จำนวนตัวอย่างในการทดลอง 4

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างโลหะที่ใช้เคลือบชิ้นงานด้วยวิธีการชุบไฟฟ้า 11

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายตามทฤษฎีของสารประกอบไฮดรอกไซด์และซัลไฟต์ของโลหะบางชนิดในน้ำบริสุทธิ์ที่ 25 องศาเซลเซียส 26

ตารางที่ 2.3 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานในสารละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 27

ตารางที่ 2.4 ปริมาณสารเคมีที่ใช้รีดิวส์โครเมียม (6^{+}) 28

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายได้ของเกลือที่ละลายน้ำได้น้อยมากที่ 25 องศา-เซลเซียส 31

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคตไอออนกับอีดีทีเอ 33

ตารางที่ 4.1 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะทองแดงโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 48

ตารางที่ 4.2 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 50

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าใช้จ่ายในการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงที่สภาวะต่างๆ 58

ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะนิกเกิลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 60

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 62

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าใช้จ่ายในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของทองแดงที่สภาวะต่างๆ 69

ตารางที่ 4.7 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดหนักโลหะทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสีย 70

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า 8
ภาพที่ 2.2 แผนผังรูปแบบขั้นตอนการชุบโลหะ 9
ภาพที่ 2.3 สารประกอบโคออดิเนชันของเหล็กและแมงกานีส 22
ภาพที่ 2.4 วิธีการตกตะกอนทางเคมี 24
ภาพที่ 2.5 สภาพการละลายได้ของโลหะไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ 25
ภาพที่ 3.1 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 40
ภาพที่ 3.2 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 42
ภาพที่ 3.3 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์, โซเดียมไบซัลไฟต์ และปรับค่าพีเอช 44
ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ 47
ภาพที่ 4.2 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ 49
ภาพที่ 4.3 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ 51
ภาพที่ 4.4 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกันร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดง 52
ภาพที่ 4.5 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกันร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง 54
ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกันร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.75 เท่าโดยโมลของทองแดง 55
ภาพที่ 4.7 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกันร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดง 57
ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ 59
ภาพที่ 4.9 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ 61
ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ 62
ภาพที่ 4.11 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกันร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.66 เท่าโดยโมลของนิกเกิล 64

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.12 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกัน ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล 65
ภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิล 66
ภาพที่ 4.14 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.20 เท่าโดยโมลของนิกเกิล 68

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยกำลังก้าวเข้าสู่ประเทศอุตสาหรรมใหม่ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ก็เป็นหนึ่งในหลายอุตสาหกรรมที่สร้างรายได้จำนวนมหาศาลให้กับประเทศไทย เนื่องจากสินค้าต่างๆ ที่ใช้อุปโภคในปัจจุบันส่วนใหญ่มักจะมีชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบสำคัญ เช่น คอมพิวเตอร์ กล้องดิจิตอล โทรศัพท์มือถือ รวมทั้งยังใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญต่างๆ ในรถยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทยเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษด้านสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน ปัญหามลพิษทางน้ำซึ่งเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นปัญหาหนึ่งที่สำคัญ เนื่องจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่มักมีกระบวนการผลิตที่ต้องทำการชุบโลหะเพื่อให้เกิดความแข็งแรง สวยงาม คงทน การนำไฟฟ้าและป้องกันการกัดกร่อนของชิ้นส่วน ซึ่งกระบวนการชุบโลหะจำเป็นต้องใช้น้ำสำหรับล้างชิ้นงานในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หากไม่มีการบำบัดให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานก่อน โลหะหนักที่ปล่อยออกมากับน้ำเสียจากการชุบโลหะได้แก่ ดีบุก เงิน สังกะสี โครเมียม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นิกเกิล และทองแดง จัดเป็นโลหะหนักที่ใช้อย่างแพร่หลายในโรงงานชุบโลหะ จึงทำให้เกิดปัญหามลพิษจากโลหะหนักในแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ประเทศไทยกำลังประสบอยู่ เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายจากโลหะหนักทั้งสองชนิดที่อาจปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ กระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้มีการกำหนดค่ามาตรฐานนิกเกิลและทองแดงในน้ำเสียคือ ให้มีนิกเกิล และทองแดงได้ไม่เกิน 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการเก็บข้อมูลน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่งในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาพบว่า น้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะมีความเข้มข้นของ นิกเกิล และทองแดงอยู่ระหว่าง 100-200 และ 350-500 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะที่นิยมใช้กันมากคือ การตกตะกอนทางเคมีด้วยด่างที่นิยมใช้คือ โซดาไฟ และปูนขาว เพราะเป็นกระบวนการบำบัดที่ควบคุมระบบได้ง่ายด้วยการปรับค่าพีเอช (pH) ของน้ำเสีย และสารเคมีที่ใช้มีราคาถูกกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการบำบัดน้ำเสียแบบอื่น อย่างไรก็ตาม วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนทางเคมีดังกล่าวมีข้อเสีย

ที่สำคัญหลายประการคือ กรณีที่น้ำเสียมีสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ และสารคีเลต (chelating agent) เช่น ไซยาไนด์ อีดีทีเอ (EDTA) เอ็นทีเอ (NTA) หรือสารประกอบเชิงซ้อนจะทำให้การกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียทำได้ยากขึ้น เนื่องจากสารคีเลตจะไปขัดขวางไม่ให้โลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเสียตกตะกอน หรือตกตะกอนได้ช้ากว่าปกติ ทำให้ต้องใช้สารเคมีในการตกตะกอนมากกว่าปกติ เป็นสาเหตุหนึ่งของการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและเป็นผลให้ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง นอกจากนี้ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณมาก ลักษณะของตะกอนอุ้มน้ำ การรีดน้ำออกจากตะกอนทำได้ยาก ทำให้การกำจัดตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นทำได้ค่อนข้างยาก

การกำจัดโลหะหนักโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีในรูปโลหะซัลไฟด์สามารถแก้ข้อเสียของการตกตะกอนด้วยสารประเภทไฮดรอกไซด์ได้ แต่มีปัญหาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เป็นอันตรายระหว่างกระบวนการบำบัด นอกจากนี้ตะกอนที่เกิดขึ้นยังมีขนาดเล็ก และการควบคุมระบบบำบัดก็ยุ่งยากกว่า

นอกจากการตกตะกอนทางเคมีแล้ว ยังมีกระบวนการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในต่างประเทศ เช่น กระบวนการรีดักชันทางเคมี การแยกด้วยกระแสไฟฟ้า กระบวนการดังกล่าวยังสามารถใช้เพื่อนำโลหะมีค่า เช่น ทอง เงิน ทองแดง กลับคืนมา สารที่สามารถรีดิวซ์โลหะหนัก ได้แก่ ไฮดราซีน (N_2H_2) โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) และฟอร์มัลดีไฮด์ (HCOH) การใช้ปฏิกิริยารีดักชันในการบำบัดน้ำเสีย จะได้ตะกอนที่ค่อนข้างอัดตัวกันแน่น สามารถแยกออกจากสารละลายโดยการกรอง การตกตะกอน และการปั่นเหวี่ยง ปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมส่วนมากคือ การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำหน้าที่เป็นสารรีดิวส์ โดยจะรีดิวส์แคตไอออนของโลหะให้เป็นโลหะที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย และตกตะกอนลงมา ทำให้สามารถกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียให้เหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ ซึ่งลักษณะของตะกอนที่เกิดขึ้นจะอัดตัวกันแน่น ตกตะกอนได้เร็ว และมีปริมาณโลหะหนักในตะกอนมากกว่าการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์

การวิจัยนี้จะศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากการชุบโลหะประเภทอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 4 ชนิด ได้แก่น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง นิกเกิล และน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่มีการเติมสารอีดีทีเอ น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่มีการเติมสารอีดีทีเอ ซึ่งอีดีทีเอที่เติมลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนของสารคีเลตหรือลิแกนด์ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะในน้ำเสีย สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นน่าจะมีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการตกตะกอน และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ในการรีดิวซ์ รวมทั้งประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียของแต่ละกระบวนการที่ศึกษาเพื่อให้ได้

กระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะประเภทอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้ได้เกณฑ์มาตรฐานและประหยัดค่าใช้จ่าย

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

2.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมสารอีดีทีเอ ด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียม-ไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์

2.2 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียของแต่ละกระบวนการ

3. กรอบแนวคิดการวิจัย

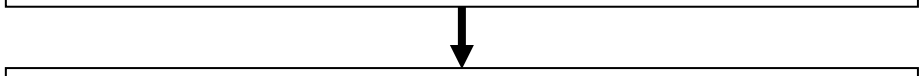
ชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์

1. น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง 1000 มิลลิกรัม/ลิตร
2. น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง 1000 มิลลิกรัม/ลิตร + อีดีทีเอ
3. น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล 1000 มิลลิกรัม/ลิตร
4. น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล 1000 มิลลิกรัม/ลิตร + อีดีทีเอ

ตัวแปรต้น

- โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างเดียว
- โซเดียมโบโรไฮไดรด์อย่างเดียว
- โซเดียมโบโรไฮไดรด์และปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
- โซเดียมไบซัลไฟต์ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์และปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

หมายเหตุ จำนวนสารเคมีที่เติมจำนวน 0.50-1.25 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสีย และจำนวนสารเคมีที่เติมจำนวน 0.44-1.10 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสีย



ตัวแปรตาม

1. ความเข้มข้นของทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดลดลง
2. เพิ่มประสิทธิภาพของการกำจัดทองแดงและนิกเกิล
3. ลดค่าใช้จ่ายในการบำบัด

จำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 จำนวนตัวอย่างในการทดลอง

การทดลอง	ประเภทของน้ำเสีย (แบบ)	สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน		การปรับค่าพีเอช (แบบ)	จำนวนการทำซ้ำ (ครั้ง)	จำนวนตัวอย่างในการทดลอง (ตัวอย่าง)
		ชนิดของสารเคมี (ชนิด)	จำนวนที่เติม (โมล)			
โซเดียมไฮดรอกไซด์และไม่ปรับค่าพีเอช	4	1	8	1	3	96
โซเดียมโบโรไฮไดรด์และไม่ปรับค่าพีเอช	4	1	8	1	3	96
โซเดียมโบโรไฮไดรด์และปรับค่าพีเอช	4	1	4	4	3	192
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์และปรับค่าพีเอช	4	2	4	4	3	384

4. สมมติฐานการวิจัย

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมี สามารถบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีทองแดง นิกเกิล และสารคีเลต (chelating agent) โดยคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง และประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดมากกว่าการตกตะกอนทางเคมีด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์

5. ขอบเขตของการวิจัย

5.1 น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการจำนวน 4 ประเภทคือ

5.1.1 น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร

5.1.2 น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีอีดีทีเอ (ethylenediamine tetraacetic acid; EDTA) จำนวน 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง เพื่อในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน

5.1.3 น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร

5.1.4 น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีอีดีทีเอจำนวน 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล เพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน

5.2 ตกตะกอนโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 0.50-2.25 เท่าของจำนวนโมลของทองแดงในน้ำเสียและ 0.44-1.98 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสีย

5.3 รีดิวซ์และตกตะกอนโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50-1.25 เท่าของจำนวนโมลของทองแดงในน้ำเสียและ 0.44-1.10 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสีย

5.4 รีดิวซ์และตกตะกอนโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50-1.25 เท่าของจำนวนโมลของทองแดงและ 0.44-1.10 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.75-2.50 เท่าของจำนวนโมลของทองแดงและ 0.66-2.20 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสีย

5.5 การปรับเปลี่ยนพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับน้ำเสียทองแดงในช่วง 6-8 และน้ำเสียนิกเกิลในช่วง 8-11

6. นิยามศัพท์เฉพาะ

6.1 โลหะหนัก หมายถึง โลหะทองแดงและโลหะนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการเตรียมในห้องปฏิบัติการ

6.2 น้ำเสีย หมายถึง น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่มีการเติมสาร EDTA น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิล และน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ

6.3 สารคีเลต หมายถึง สารอินทรีย์ได้แก่ สารอีดีทีเอ ซึ่งสามารถจับกับแคตไอออนของโลหะทองแดง นิกเกิล โดยสารคีเลตจะล้อมแคตไอออนของโลหะไว้ไม่ให้แอนไอออนหรือประจุลบจากสารอื่นเข้าทำปฏิกิริยาได้

6.4 การตกตะกอนสารเคมี หมายถึง การตกตะกอนทางเคมีของโลหะโดยการเติมสารที่ทำให้เกิดตะกอน ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์

6.5 ปฏิกิริยารีดักชัน หมายถึง ปฏิกิริยาการเพิ่มอิเล็กตรอนให้อะตอมโลหะโดยการเติมสารรีดิวซ์ ได้แก่ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ไซเดียมไบซัลไฟต์

2. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมสารอีดีทีเอ ด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ปริมาณสารเคมีและระดับพีเอชเท่าใด ที่จะสามารถกำจัดทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะประเภทอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ทองแดงและนิกเกิล เป็นโลหะหนักที่นิยมนำมาใช้ในการชุบเคลือบโลหะทั้งแบบที่ใช้กระแสไฟฟ้าและการชุบเคลือบโลหะแบบที่ไม่ใช้กระแสไฟฟ้า ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติในการนำไปประยุกต์ใช้งาน กระบวนการชุบโลหะทั้งแบบใช้กระแสไฟฟ้าและไม่ใช้กระแสไฟฟ้า จะใช้น้ำในการทำความสะอาดชิ้นงานหรือในกระบวนการ น้ำดังกล่าวจึงมีโลหะหนักปนเปื้อน ซึ่งต้องทำการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ การบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะมีหลายวิธี ส่วนมากใช้วิธีเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้โลหะหนักในน้ำเสียที่ละลายน้ำตกตะกอนลงมา ทำให้สามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งสารเคมีที่นำมาเติมขึ้นอยู่กับชนิดหรือลักษณะของน้ำเสีย รวมทั้งกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วย นอกจากนี้ยังมีวิธีบำบัดน้ำเสียแบบอื่นๆ เช่น การรวมตะกอน การกรอง กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ การเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้โลหะหนักในน้ำเสียถูกรีดิวซ์ให้อยู่ในรูปโลหะที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อย เพื่อให้คุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

1. กระบวนการการชุบโลหะ

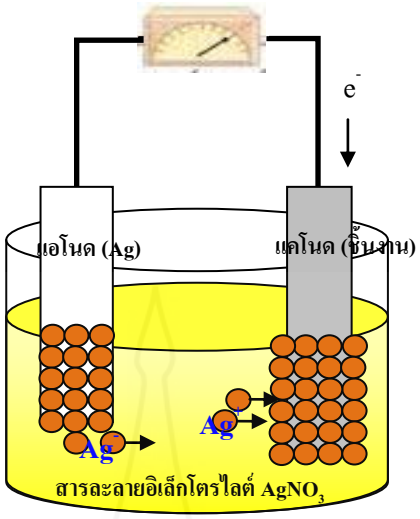
การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (electroplating) คือ กระบวนการนำชิ้นงานโลหะที่ต้องการชุบจุ่มลงไปในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ จากนั้นผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปยังชิ้นงานที่อยู่ที่ขั้วลบ ส่วนที่ขั้วบวกแขวนตัวล่อ เรียกว่า แอโนด ส่วนมากแอโนดจะเป็นโลหะประเภทเดียวกับโลหะที่ต้องการชุบ แคตไอออนของโลหะซึ่งมีประจุบวกในสารละลายอิเล็กโตรไลต์วิ่งไปเกาะที่ชิ้นงานทำให้เกิดเป็นชั้นโลหะบางๆเคลือบผิวด้านนอกของชิ้นงาน และเกิดแก๊สออกซิเจนขึ้น ตัวอย่างวิธีการชุบการชิ้นงานด้วยโลหะเงินด้วยไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 2.1 ใช้แท่งเงินเป็นแอโนด ชิ้นงานเป็นแคโทด และใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดปฏิกิริยา

ขั้วแอโนด: แท่งเงิน

$$Ag(s) \longrightarrow Ag^{+}(aq)$$

ขั้วแคโทด: ชิ้นงาน

$$Ag^{+}(aq) + e^{-} \longrightarrow Ag(s)$$

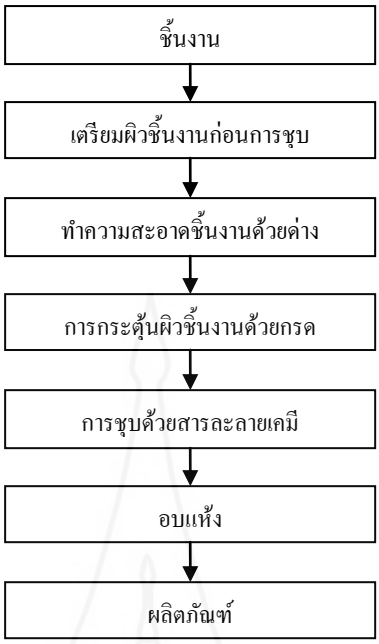


ภาพที่ 2.1 วิธีการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของการชุบโลหะคือการเพิ่มความสวยงามให้กับชิ้นงาน ให้เป็นประกายแวววาวหรือมีสีตามที่ต้องการ เพิ่มคุณสมบัติของผิวชิ้นงานให้ดีขึ้น เช่น การเพิ่มความแข็งแรง ป้องกันการกัดกร่อน ยืดอายุการใช้ของงานผลิตภัณฑ์ การนำไฟฟ้า การสะท้อนแสง การทนทานต่อแรงบิด การช่วยในงานเชื่อมประสานโลหะ ความทนทานต่อสารเคมี ความหนาของชิ้นงานในกรณีที่ชิ้นงานเกิดการกัดกร่อนขึ้นแล้ว เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะกับเนื้อยางพาราในอุตสาหกรรมยางรถยนต์

สารละลายเคมีสำหรับชุบโลหะหรืออิเล็กโตรไลต์ แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่หนึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นเพียงสะพานเพื่อให้กระแสไหลผ่านเท่านั้น เช่น โลหะต่างๆ แกรไฟต์ ผงบรอนซ์ เป็นต้น กลุ่มที่สอง เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตัวเองจะแยกสลายออกเป็นอนุภาคเล็กๆ ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เช่น สารละลายกรดเจือจาง สารละลายของเกลือต่างๆ เป็นต้น

การชุบโลหะจะมีความซับซ้อนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่เป็นวัตถุดิบ ชนิดของผิวโลหะที่ต้องการและการนำไปใช้งาน ขั้นตอนการชุบโลหะแสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แผนผังขั้นตอนการชุบโลหะ

การเตรียมผิวและล้างทำความสะอาดผิวชิ้นงาน (cleaning) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆ เช่นคราบไขมัน คราบน้ำมันจากการขึ้นรูปของชิ้นงาน คราบฝุ่นผง เศษโลหะขนาดเล็ก เศษสนิมที่เกาะติดไม่แน่นมาก เพื่อเตรียมพื้นผิวชิ้นงานให้สะอาดก่อนเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า มีขั้นตอนการล้างทำความสะอาดชิ้นงานแบบใช้ไฟฟ้าที่เรียกว่า "อิเล็กโตรคลีน (electroclean)" เป็นการทำความสะอาดโดยใช้กระแสไฟฟ้าและสารละลายด่าง ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการจุ่มล้าง (dipclean) แต่การจุ่มล้างก็มีการประยุกต์ใช้ร่วมด้วยในกรณีชิ้นงานสกปรกมากหรือมีรูปร่างซับซ้อน ขั้นตอนอิเล็คโตรคลีนการใช้ด่างและความร้อนช่วยด้วย

การกระตุ้นเตรียมพื้นผิวชิ้นงาน (surface activation) เพื่อให้พร้อมสำหรับการชุบเคลือบโลหะนิยมใช้สารละลายกรด จึงมักเรียกกันว่าเป็น "การกระตุ้นผิวชิ้นงานด้วยกรด (acid activation)" ซึ่งกรดที่นิยมใช้กระตุ้นผิวชิ้นงานที่เป็นเหล็กคือกรดไฮโดรคลอริก ส่วนชิ้นงานที่เป็นทองเหลือง ทองแดง นิยมใช้ กรดซัลฟูริก หรือกรดกำมะถัน การกระตุ้นผิวชิ้นงานด้วยกรดนี้ก็เพื่อเป็นการกำจัดฟิล์มออกไซด์ของโลหะที่เคลือบ กัดกร่อนผิวหน้าชิ้นงานให้ขรุขระเล็กน้อยเพื่อให้โลหะเกิดการชุบเคลือบและยึดติดที่ดี อีกทั้งยังสามารถกำจัดเศษสนิมที่ติดมากับชิ้นงานให้หลุดออกด้วย

การอบแห้ง (drying) ชิ้นงานผ่านกระบวนการผลิตที่มีการใช้สารละลายชุบเคลือบต่างๆ ในขั้นตอนสุดท้ายก่อนจะได้ชิ้นงานที่พร้อมใช้ ต้องทำให้ชิ้นงานได้คุณภาพ สะอาด และ

แห้งสนิท เพราะจะถูกนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นชิ้นงานที่แห้งสนิทจึงสำคัญมาก ชิ้นงานถูกทำให้แห้งโดยการผ่านลมเข้าไปสัมผัสขดลวดความร้อนซึ่งจะทำให้ได้อากาศร้อน จากนั้นจึงผ่านอากาศร้อนไปที่ชิ้นงาน สารละลายที่ติดอยู่บนชิ้นงานจะระเหยไปจนหมด อุณหภูมิที่ใช้ต้องสูงกว่าจุดเดือดของสารละลายที่ติดอยู่บนชิ้นงาน เช่น ถ้าของเหลวที่ติดอยู่บนชิ้นงานเป็นน้ำ อุณหภูมิการอบแห้งควรใช้ค่าประมาณ 100 องศาเซลเซียส เพราะเป็นอุณหภูมิที่น้ำกลายเป็นไอ (การตั้งค่าอุณหภูมิอาจสูงกว่าหรือต่ำกว่านี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบหรือวิธีการอบแห้ง)

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากสามารถนำโลหะและอโลหะหลายชนิดมาทำการเคลือบผิว ในขณะเดียวกันก็สามารถเลือกโลหะที่จะนำมาเคลือบผิวได้หลากหลายชนิดด้วย ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างโลหะที่ใช้เคลือบชิ้นงานด้วยวิธีการชุบไฟฟ้า

โลหะที่ใช้เคลือบผิวชิ้นงาน (coating metal)	กลุ่มโลหะที่ใช้ทำชิ้นงาน (base material group)	วัสดุโลหะชิ้นงาน[1] (base material)
ทองแดง	โลหะกลุ่มเหล็ก	เหล็กกล้า
	โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	สังกะสี
	พลาสติกบางชนิด	พลาสติกทนความร้อน(ABS)
		พลาสติกโพลีโพรพิลีน
โลหะทองแดงผสม		
- ทองสัมฤทธิ์	กลุ่มเหล็ก	เหล็ก เหล็กกล้า
ทองแดง-ดีบุก	โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	ทองแดง สังกะสี อลูมิเนียม
- ทองเหลือง	พลาสติกบางชนิด	พลาสติกทนความร้อน
ทองแดง-สังกะสี		
นิกเกิล	โลหะกลุ่มเหล็ก	เหล็ก
	โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	ทองแดง
	พลาสติกบางชนิด	พลาสติกทนความร้อน
		พลาสติกโพลีโพรพิลีน
โครเมียม	โลหะกลุ่มเหล็ก	เหล็ก
	โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	ทองแดง ทองเหลือง สังกะสี
	พลาสติกบางชนิด[2]	พลาสติกทนความร้อน
		พลาสติกโพลีโพรพิลีน
ดีบุก	โลหะกลุ่มเหล็ก	เหล็ก เหล็กหล่อ
	โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	ทองแดง
โลหะดีบุกผสม		
- ดีบุก-นิกเกิล	โลหะกลุ่มเหล็ก	เหล็ก ทองแดง ทองสัมฤทธิ์
- ดีบุก-สังกะสี	โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	
สังกะสี	กลุ่มเหล็ก	เหล็ก ชุบเคลือบสังกะสีด้วยไฟฟ้า
โลหะเงิน	โลหะกลุ่มเหล็ก	เหล็ก
	โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	ทองแดง นิกเกิล
	พลาสติกบางชนิด[2]	พลาสติกทนความร้อน
		พลาสติกโพลีโพรพิลีน
โลหะทอง	โลหะนอกกลุ่มเหล็ก	ทองแดง ทองเหลือง นิกเกิล โลหะเงิน

หมายเหตุ 1. ชนิดของวัสดุและโลหะที่ใช้เป็นชิ้นงานก่อนชุบ

2. พลาสติกที่เคลือบด้วยสารตัวนำไฟฟ้า สามารถนำมาชุบโลหะเคลือบที่ผิวชิ้นงานได้

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2551: 4)

การชุบโลหะแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (electroless Plating) คือ กระบวนการจับตัวของโลหะที่ผิวหน้าวัตถุที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีโดยไม่ใช้กระแสไฟฟ้า เช่น การชุบทองแดง และนิกเกิล แบบไม่ใช้กระแสไฟฟ้าลงบนแผ่นวงจรพิมพ์

การชุบโลหะโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและไฟฟ้าเคมี (chemical and electrochemical conversion) ขึ้นที่ผิวหน้าของชิ้นงาน อาจมีการใช้กระแสไฟฟ้าหรือไม่ก็ได้ เพื่อทำให้เกิดชั้นป้องกันผิวหรือเกิดชั้นผิวที่สวยงาม ได้แก่ การชุบโลหะด้วยโครเมียม การชุบรองพื้นด้วยฟอสเฟต ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำก่อนการทาสีหรือพ่นสี การจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายเกลือโลหะหรือสารละลายกรด เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นออกไซด์ของโลหะ ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน กระบวนการจุ่มชิ้นงานลงในสารละลายกรด เช่น กรดดินประสิว (nitric acid) หรือสารละลายของกรดดินประสิวกับเกลือโซเดียมไดโครเมตใช้สำหรับป้องกันการผุกร่อนและช่วยยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

การชุบโลหะแบบอื่น ๆ ที่ไม่จัดอยู่ใน 3 กลุ่มข้างต้น เช่น การชุบสังกะสีแบบจุ่มร้อน (hot dipped galvanizing) เพื่อเคลือบผิวเหล็กหรือเหล็กกล้า กระบวนการทำให้ผิวของโลหะด้านนอกแข็ง (surface hardening) เพื่อทำให้ผิวด้านนอกของวัตถุมีความแข็งมากกว่าเนื้อวัตถุที่อยู่ภายใน เป็นวิธีการปรับปรุงผิวโลหะให้มีความแข็งเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้มีความทนทาน และสามารถต้านทานการสึกกร่อนได้ดี

2. ปัญหามลพิษทางน้ำและปัญหาสุขภาพ

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้งานจากกิจกรรมต่างๆ และได้รับการปนเปื้อนจากสารปนเปื้อน หรือสารมลพิษ ไม่ว่าจะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ โลหะหนัก เชื้อโรค ไขมัน น้ำมัน ความร้อน สารอาหารของพืช สี และความขุ่น ทั้งในรูปของสารละลายและสารแขวนลอย เมื่อน้ำเสียปนเปื้อนกับแหล่งน้ำ ไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำผิวดิน แหล่งน้ำใต้ดิน หรือทะเลและชายฝั่ง จะก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำและปัญหาต่อสุขภาพอนามัย ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถแยกตามลักษณะของสารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

2.1 สารอินทรีย์

สารอินทรีย์ หมายถึง สารเคมีที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ทั้งที่ได้มาจากธรรมชาติและสังเคราะห์ขึ้น เช่น ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ยูเรีย สารประกอบบางชนิดมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบแต่ไม่จัดว่าเป็นสารอินทรีย์ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เกลือคาร์บอเนต และเกลือไบคาร์บอเนต สารอินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ สารอินทรีย์ที่

จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ (biodegradable organic) สารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ (non-biodegradable organic) เช่น กรดแทนนิค กรดลิกนิน เซลลูโลส สารอินทรีย์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมีขึ้นเพื่อใช้ในจุดประสงค์ต่างๆ และถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำ สารอินทรีย์เหล่านี้มักเจือปนในปริมาณน้อย แต่มีอันตรายต่อผู้ได้รับตัวอย่างสารดังกล่าวได้แก่ สารซักล้าง สารปราบศัตรูพืช สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจากการฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน ฟีนอล

สารอินทรีย์เป็นปัญหาหลักของมลพิษทางน้ำ เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้เป็นส่วนใหญ่จึงมีความต้องการออกซิเจนเพื่อให้จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายดำรงชีวิต ถ้าในแหล่งน้ำมีปริมารสารอินทรีย์มากเกินไป จุลินทรีย์จะนำออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำมาใช้จนปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำขาดแคลน ส่งผลให้แหล่งน้ำอยู่ในสภาวะขาดออกซิเจนและส่งกลิ่นเน่าเหม็น

ในปัจจุบันนิยมวัดปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำด้วยค่า บีโอดี (biochemical oxygen demand; BOD) และ ซีโอดี (chemical oxygen demand; COD) ซึ่งเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำที่สภาวะกำหนด

2.2 สารพิษ

สารพิษที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำมักเกิดจากการทิ้งของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษปนเปื้อนอยู่ สารเหล่านี้จะสามารถสะสมและถ่ายทอดไปตามห่วงโซ่อาหารในสัตว์น้ำ ซึ่งสามารถขยายปริมาณมากขึ้นจนถึงระดับที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคสัตว์น้ำได้ สารพิษที่อาจถูกถ่ายทอดในห่วงโซ่อาหาร เช่น สารหนู ไซยาไนด์ สารกัมมันตภาพรังสี

2.3 โลหะหนัก

โดยทั่วไปหมายถึงโลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ เป็นโลหะที่อยู่ในกลุ่มทรานซิชัน ซึ่งมีทั้งธาตุที่สำคัญ เช่น เหล็ก เงิน ทองแดง ดีบุก ไปจนถึงธาตุที่เป็นพิษ เช่น แคดเมียม ตะกั่ว ปรอท คุณสมบัติของโลหะหนักคือสามารถนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีลักษณะเป็นเงา มันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆได้และสะท้อนแสงได้ดี คุณสมบัติทางเคมีของโลหะหนักคือมีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้น โลหะหนักจึงสามารถรวมตัวได้กับสารอื่นๆเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ที่มีความเสถียรกว่าโลหะอิสระ

โลหะหนักเป็นสารพิษกลุ่มใหญ่พวกหนึ่งที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตมากที่สุด อาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ หรือเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม ถึงแม้นจะทราบว่าโลหะหนักเป็นสารอันตรายแต่มนุษย์ก็ยังจำเป็นต้องใช้เพื่อประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง รวมทั้งใช้ในชีวิตประจำวัน โลหะหนักมีหลายชนิดแต่ส่วนใหญ่คุณสมบัติในการเกิดพิษนั้นคล้ายคลึงกัน โลหะหนักที่ทำให้เกิดโรคมะเร็งในสัตว์ทดลอง ได้แก่ ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม นิเกิล เบอริเลียม และเซเล

เนียม โลหะหนักที่สร้างปัญหาให้แก่ชุมชนและสิ่งแวดล้อมมากที่สุดคือ ปรอทและตะกั่ว จึงมีการศึกษาโลหะหนักทั้งสองนี้มากกว่าโลหะหนักอื่นๆ ถัดไป คือ แคดเมียม นิเกิล ถ้ามีโลหะหนักที่สะสมในอากาศ น้ำและอาหารในปริมาณมากเกินระดับ อันตรายจะเกิดขึ้นกับมนุษย์และสัตว์จนยากเกินกว่าจะสามารถแก้ไขได้ ตัวอย่างโลหะหนักที่ทำให้เกิดพิษ

2.3.1 ทองแดง (copper) มีสัญลักษณ์ธาตุคือ Cu เลขอะตอม 29 อยู่หมู่ 11 คาบ 4 ในตารางธาตุ คุณสมบัติทางกายภาพของทองแดง ได้แก่น้ำหนักอะตอม 63.57 ความถ่วงจำเพาะ 8.94 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลว 1083 องศาเซลเซียส และจุดกลายเป็นไอ 2325 องศาเซลเซียส เกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของทองแดงบริสุทธิ์หรือสินแร่โดยรวมตัวอยู่กับหิน ทราย ดินหรือดินเหนียว

สินแร่ทองแดงแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ ทองแดงบริสุทธิ์ตามธรรมชาติซึ่งมีทองแดงอยู่ถึงร้อยละ 99 แร่ซัลไฟด์ ทองแดงรวมตัวกับกำมะถันเป็นทองแดงซัลไฟด์ แร่ออกไซด์ทองแดงรวมตัวกับออกซิเจนอยู่ในรูปของออกไซด์ แหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญของโลกได้แก่ เทือกเขาร็อกกีในประเทศสหรัฐอเมริกา แนวลาดด้านตะวันตกของภูเขาแอนดีสในประเทศชิลีและเปรู เทือกเขาในทวีปแอฟริกาบริเวณประเทศคองโก ตอนเหนือของประเทศโรดีเซีย และประเทศแคนาดา แหล่งแร่สำคัญเหล่านี้มีแร่ทองแดงรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของทองแดงทั่วโลก แหล่งแร่ทองแดงที่นับว่าใหญ่ที่สุดอยู่ในประเทศชิลี นอกจากนี้ยังมีในบางแห่งของทวีปยุโรป ประเทศออสเตรเลีย และแอฟริกาใต้ ประเทศไทยมีแร่ทองแดงอยู่โดยทั่วไป ทั้งภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ แหล่งแร่ทองแดงที่สำคัญ ได้แก่ แหล่งขนงพระและแหล่งจันทึก จังหวัดนครราชสีมา ที่อำเภองาว จังหวัดลำปาง อำเภอเมือง จังหวัดแพร่ อำเภอโคกกระเทียมจังหวัดลพบุรี อำเภอพนมสารคาม จังหวัดฉะเชิงเทรา และยังมีแหล่งอื่นๆ ที่กำลังสำรวจอยู่ ไม่ปรากฏว่ามีแหล่งใดมีปริมาณแร่มากพอที่จะตั้งโรงถลุงทองแดงได้

ในการถลุงแร่ทองแดงจะนำเอาสินแร่ที่ขุดได้มาร่อนแยกดินทรายออก ก่อนที่จะนำไปถลุงในเตาถลุงแบบนอน (reverberatory furnace) หรือเตาถลุงแบบพ่นลม และเครื่องเปลี่ยนทองแดง (copper converter) ตามลำดับ แยกแร่ทองแดงซัลไฟด์ไปย่างต่างหาก เพื่อลดปริมาณกำมะถันก่อนนำไปเข้าเตาถลุงแบบนอน กรรมวิธีนี้เรียกว่า การย่างไฟ (roasting)

อุณหภูมิในเตาถลุงแบบนอนอยู่ในช่วง 800-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าที่ใช้ถลุงเหล็ก แร่ทองแดงจะเปลี่ยนรูปไปเป็นออกไซด์และหลอมรวมตัวกัน เรียกว่า แมตที (matte) นำแมตทีหลอมเหลวไปเข้าตัวเปลี่ยน พ่นลมนาน 4-20 ชั่วโมง (นานกว่าการถลุงเหล็ก) ต่อน้ำหนักของแมตที 12-200 ตัน การที่พ่นลมเข้าไปในตัวเปลี่ยน เพื่อให้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับเหล็กและกำมะถัน

ซึ่งเป็นสารเจือปนกลายเป็นกากหรือตะกรัน และเพื่อให้ทองแดงออกไซด์ทำปฏิกิริยากับทองแดงซัลไฟด์ได้โลหะทองแดง

ทองแดงที่ได้ยังไม่บริสุทธิ์ มีเนื้อทองแดงประมาณร้อยละ 97-98 เนื่องจากยังมีซัลไฟด์และออกไซด์ของทองแดงปนอยู่บ้าง ทองแดงที่ได้นี้เรียกว่า ทองแดงบลิสเตอร์ (blister copper) กระบวนการต่อไปคือการทำให้บริสุทธิ์ยิ่งขึ้น ดังนี้

1. นำทองแดงบลิสเตอร์ไปหลอมใหม่ในเตาถลุงแอโนด ใช้ลมพ่นเข้าไปเพื่อให้ออกซิเจนทำปฏิกิริยากับทองแดงซัลไฟด์ที่ยังเหลือ จนกลายเป็นทองแดงออกไซด์
2. เมื่อทองแดงซัลไฟด์เปลี่ยนรูปเป็นออกไซด์หมดแล้ว โรยถ่านไม้ หรือผงถ่านหินลงบนผิวทองแดงที่กำลังหลอมเหลวอยู่ ใช้ไม้สดๆ กวน วิธีนี้เรียกว่าโพลิง (poling) หลังจากนั้นเอาทองแดงไปหล่อเป็นแท่ง
3. ทองแดงที่ได้จะมีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 99 อาจมีเงินและทองเจือปนอยู่ นำไปทำให้บริสุทธิ์โดยการแยกด้วยไฟฟ้า จะได้ทองแดงบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.95

แร่ทองแดงที่พบตามธรรมชาติมีชนิด แต่ที่สำคัญต่อการผลิตโลหะทองแดงส่วนมากเป็นแร่ซัลไฟด์ซึ่งมีสองชนิดคือ แร่ทองแดงคาลโคไซต์ (chalcocite, Cu_2S) มีทองแดงประมาณร้อยละ 79.8 และแร่ทองแดงคาลโคไพไรต์ (chalcopyrite, $CuFeS_2$) มีทองแดงประมาณร้อยละ 34.5 นอกจากแร่ซัลไฟด์แล้วยังมีแร่ทองแดงออกไซด์ (Cu_2O) แต่ปริมาณที่พบมีน้อย แร่ทองแดงอีกชนิดหนึ่งที่เป็นแร่ทองแดงคาร์บอเนต $CuCO_3$ (OH_2) เรียกกันทั่วไปว่า malachite มีสีเขียวสวยงามมาก สำหรับประเทศไทยนั้นแร่ทองแดงพบที่จังหวัดเลย หนองคาย ขอนแก่น นครราชสีมา ตาก อุตรดิตถ์ แพร่ น่าน ลำปาง ลำพูน เพชรบูรณ์ ลพบุรี ฉะเชิงเทรา และกาญจนบุรี แต่ยังไม่มีการนำมาผลิตเป็นทองแดง

ในสหรัฐอเมริกาทองแดงที่ผลิตขึ้นมากกว่า 2.5 ล้านปอนด์ต่อปี ส่วนใหญ่ถลุงจากแร่คาลโคไพไรต์ ซึ่งเป็นของผสมระหว่าง CuS กับ FeS ที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 โดยมวล เพื่อที่จะถลุงเอาทองแดงที่มีอยู่ในปริมาณน้อยออกจากแร่คาลโคไพไรต์ จึงต้องอาศัยวิธีโลหะวิทยาหลายขั้นตอน รวมถึงขั้นตอนที่ทำให้ได้ทองแดงบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.99

การเตรียมโลหะทองแดงสามารถเตรียมได้โดยวิธีการถลุง การถลุงทองแดงทำได้โดยการเผาแร่คาลโคไพไรต์ในอากาศ ซึ่งเรียกว่า การย่างแร่ จะได้คอปเปอร์ (I) ซัลไฟด์ ไอร์ออน (II) ออกไซด์ และแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ดังสมการ

$$2CuFeS_2(s) + 4O_2(g) \longrightarrow Cu_2S(s) + 2FeO(s) + 3SO_2(g)$$

แยกแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออก จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่เหลือไปเผารวมกับซิลิกาในเตาถลุง FeO จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาได้กากตะกอนดังสมการ

$$FeO(s) + SiO_2(s) \longrightarrow FeSiO_3(s)$$

ส่วนคอปเปอร์ (II) ซัลไฟด์ เมื่ออยู่ที่อุณหภูมิสูงจะสลายตัวได้เป็นคอปเปอร์ (I) ซัลไฟด์ ในสถานะของเหลวซึ่งสามารถแยกออกได้ และในขั้นสุดท้ายเมื่อแยกคอปเปอร์ (I) ซัลไฟด์ในอากาศ บางส่วนจะเปลี่ยนเป็นคอปเปอร์ (I) ออกไซด์ดังสมการ

$$2Cu_2S(s) + 3O_2(g) \longrightarrow 2Cu_2O(s) + SO_2(g)$$

คอปเปอร์ (I) ออกไซด์กับคอปเปอร์ (I) ซัลไฟด์ จะทำปฏิกิริยากันโดยมีซัลไฟด์ไอออนเป็นตัวรีดิวซ์ได้โลหะทองแดงที่เกิดขึ้นดังสมการ

$$2Cu_2O(s) + Cu_2S(s) \longrightarrow 6Cu(l) + SO_2(g)$$

โลหะทองแดงที่ได้ยังมีสิ่งเจือปนจึงต้องนำไปทำให้บริสุทธิ์ก่อน โดยทั่วไปจะใช้วิธีแยกสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้า

ประโยชน์ของทองแดง ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรมเป็นที่สองรองจากเหล็ก เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงใช้ทำอุปกรณ์เครื่องถ่ายเทความร้อน เช่น ทำเครื่องควบแน่น (condenser) หอกลั่น ทองแดงมีสภาพต้านทาน (resistivity) ต่ำเป็นที่สองรองจากเงิน จึงเป็นสื่อไฟฟ้าอย่างดี ปริมาณทองแดงจำนวนมากกว่าครึ่งหนึ่งที่ผลิตได้ในโลกใช้ในกิจการอุตสาหกรรมไฟฟ้า เช่น ทำสายไฟฟ้า ลวดที่ใช้ในกิจการไฟฟ้าและใช้เป็นสื่อนำความร้อน โลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล มีความเหนียว ทนต่อการกัดกร่อนได้ดีโดยเฉพาะในน้ำทะเลจึงใช้ทำท่อในระบบกลั่น อุปกรณ์ภายในเรือ ใช้ทำท่อในอุปกรณ์ตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะหลายชนิด เช่นโลหะผสมระหว่างทองแดง นิกเกิล และสังกะสี หรือเรียกว่า เงินนิกเกิลหรือเงินเยอรมัน ใช้ทำเครื่องใช้ต่างๆ ทองบรอนซ์ (หรือบรอนซ์) ทองสัมฤทธิ์ (หรือทองสำริด) โลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก ถ้ามีดีบุกผสมอยู่ระหว่างร้อยละ 0.8-10โดยมวล และมีการเติมฟอสฟอรัสเล็กน้อย เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะมีความแข็งกว่าทองแดง เมื่อเย็นตัวมีความแข็งแรง มีสภาพ

การนำไฟฟ้าที่ดี และไม่ถูกกัดกร่อน ทองเหลืองเป็นโลหะผสมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก มีสังกะสีผสมอยู่ร้อยละ 20-45 โดยมวล ทองเหลืองมีความแข็งและความแข็งจะเพิ่มขึ้นเมื่อส่วนผสมของสังกะสีเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ง่ายต่อการตีแผ่ให้เป็นแผ่น ขึ้นรูปง่าย ทองเหลืองจึงถูกนำมาใช้ในการทำท่อ ลิ้นปิด-เปิด และตัวเชื่อม

อันตรายจากทองแดง กลไกการเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ร้อยละ 30 โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นไส้อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กดระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรืออาการภาวะทองแดงคั่งในร่างกาย (Wilson's diseases) คือ ร่างกายสั่นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก

การแก้ไขการเกิดพิษและวิธีการป้องกันการเกิดพิษ การป้องกันทางผิวหนัง ควรสวมเสื้อผ้าที่รัดกุมและมีเครื่องป้องกันร่างกาย ก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารพิษทุกครั้ง เมื่อสารพิษถูกผิวหนังให้รีบล้างออกด้วยสบู่และน้ำสะอาด ถ้าสารพิษกระเด็นหรือหกเปื้อนเสื้อผ้า ต้องรีบเปลี่ยนเสื้อผ้าทันที แล้วล้างผิวด้วยสบู่และน้ำสะอาด จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาล การป้องกันทางดวงตา ควรมีเครื่องป้องกันสายตาที่เหมาะสมก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวกับสาร ไม่ควรสวมคอนแทคเลนส์ ขณะทำงานเกี่ยวข้องกับสารเคมี เมื่อสารพิษกระเด็นเข้าตา ต้องรีบล้างออกด้วยน้ำสะอาดจำนวนมากสลับกับการค่อยๆกระพริบตาขึ้น-ลง จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที การป้องกันระบบทางเดินหายใจ เมื่อรับเอาสารเข้าไปเป็นจำนวนมาก ต้องรีบเคลื่อนย้ายผู้ได้รับสารออกจากบริเวณนั้น ไปสู่บริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ถ้าหยุดหายใจให้รีบทำการผายปอด แล้วรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที กรณีกินสารพิษเข้าไปควรรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

2.3.2 นิกเกิล (nickel) มีสัญลักษณ์คือ Ni เลขอะตอม 28 อยู่ในตารางธาตุเป็นธาตุที่ 3 ในคาบที่ 4 ของหมู่ VIII ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน น้ำหนักอะตอม 58.6934 จุดหลอมเหลว 1455 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2730 องศาเซลเซียส เลขออกซิเดชันสามัญ +2, +3 นิกเกิลเป็นโลหะชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความมันวาวคล้ายเงิน มีคุณสมบัติในการนำความร้อนและการนำไฟฟ้าต่ำ แต่มีความทนทานต่อการสึกกร่อนและความร้อนสูง อยู่กลุ่มเดียวกับเหล็กมีความแข็งแต่ตี

เป็นแผ่นได้ ในธรรมชาติจะทำปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถันเกิดเป็นแร่มิลเลอร์ไรต์ (millerite) ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหนูจะเกิดเป็นแร่นิกกอไลต์ (niccolite) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารหนูและกำมะถันจะเป็นก้อนนิกเกิลกลานซ์ (nickel Glance)

แร่นิกเกิลถูกค้นพบครั้งแรก ในประเทศรัสเซีย นิกเกิลสกัดได้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1751 โดย Cronstedt ต่อมาในปี ค.ศ. 1804 Richter สามารถเตรียมนิกเกิลที่ค่อนข้างบริสุทธิ์และได้ศึกษาถึงสมบัติของนิกเกิล และในปี ค.ศ. 1870 Fleitmann ได้พบว่าถ้าผสมแมกนีเซียมเล็กน้อยกับนิกเกิล จะสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้

โลหะนิกเกิล ได้มาจากการถลุงสินแร่นิกลิเฟอรัส ลิโมไนต์ (nickliferous limonite) และ เพนด์แลนไดท์ (pentlandite) แล้วผ่านกระบวนการสกัดให้ได้นิกเกิล ที่บริสุทธิ์ขึ้นด้วยกระบวนการมอนด์ (Mond's process) ซึ่งมีการใช้ นิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นของเหลวที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ระคายเคือง และระเหยได้ดี (จุดเดือด 44 องศาเซลเซียส) กระบวนการมอนด์มีความเสี่ยงด้านการรับสัมผัสกับนิกเกิลและเกิดอันตรายต่อคนงาน จากการที่นิกเกิลเป็นโลหะที่มีสีเงิน มันวาว การใช้งานจึงมักนำมาทำเหล็กกล้า โลหะผสม และเป็นโลหะที่ยืดงอได้ การใช้ประโยชน์นิกเกิลจึงเกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย

แร่นิกเกิลแบ่งออกตามการเกิดได้ 3 ชนิด คือ

1. แร่ออกไซด์ เกิดแบบทุติยภูมิในศิลาแลงจากการที่นิกเกิลจากการผุพังของหินอัลตราเบสิก เช่น แร่การ์เนียไรต์
2. แร่ซัลไฟด์ เกิดแบบปฐมภูมิในหินอัตราเบสิกและหินเบสิก เช่น แร่เพนต์แลนไดต์ แร่มิลเลอร์ไลต์
3. แร่ที่ไม่ใช่ออกไซด์และซัลไฟด์ เช่น แร่นิกโคไลต์ และอุกกาบาต

ประโยชน์ของนิกเกิล ใช้ทำเหล็กกล้าและอัลลอยกันสนิมชนิดต่างๆ ทำแม่เหล็ก เครื่องยนต์ ทำเหรียญกษาปณ์ ทำเครื่องประดับ แบตเตอรี่ อุปกรณ์ทางการแพทย์ และทันตกรรม เช่น ฟันเทียม และครอบฟัน เครื่องกระตุ้นหัวใจชนิดฝังในตัวผู้ป่วยเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง ได้แก่ ความเงา ความทนต่อการกัดกร่อน ความทนต่อความร้อน ใช้ผลิตแบตเตอรี่ เช่น แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮดราย (nickel metal hydride) แบตเตอรี่แบบนิกเกิลแคดเมียม (nickel cadmium) ทำเหรียญกษาปณ์ ใช้ชุบหรือเคลือบโลหะเพื่อป้องกันสนิม ใช้เป็นตัวเร่ง (raney nickel) สำหรับปฏิกิริยาบางประเภท เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของน้ำมันพืช แบตเตอรี่สะสมแบบอัลคาไลน์ อิเลกโทรดของเซลล์เชื้อเพลิง อุตสาหกรรมเซรามิกส์ และใช้เป็นโลหะประดับ

อันตรายจากนิกเกิล นิกเกิลอาจถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย ทางการหายใจ ทางผิวหนัง และจากทางเดินอาหาร ภาวะพิษของนิกเกิล เกิดจากการรับสัมผัสทางการหายใจและจากอาชีพเป็นหลัก

ในการถูกดูดซึมมากน้อยเพียงใดขึ้นกับความสามารถในการละลายน้ำของสารประกอบนิกเกิล สารที่ละลายน้ำได้ดี ได้แก่ นิกเกิลคาร์บอนิล เป็นสารประกอบที่ถูกดูดซึมได้ดีกว่าสารประกอบที่ละลายในน้ำได้น้อยมากเช่น นิกเกิลออกไซด์และนิกเกิลซัลไฟด์ นิกเกิลถูกกำจัดจากร่างกายทางปัสสาวะ

การสัมผัสนิกเกิลคาร์บอนิลทางการหายใจจะทำให้เกิดอาการไข้ ไอ เจ็บหน้าอก หายใจลำบาก ปวดศีรษะ หลังจากนั้น 12-36 ชั่วโมงอาจเกิดภาวะปอดอักเสบเฉียบพลัน ซึ่งอาจทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตจากภาวะการหายใจล้มเหลว การฟื้นตัวจากภาวะปอดอักเสบใช้เวลาหลายสัปดาห์ถึงหลายเดือน ซึ่งผู้ป่วยจะยังคงมีอาการอ่อนเพลียและเหนื่อยง่ายในระยะยาว

การสัมผัสนิกเกิลที่ผิวหนัง อาจทำให้เกิดภาวะผิวหนังอักเสบ หรือเป็นผื่นแพ้ในส่วนอื่นๆของร่างกาย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาภูมิแพ้ ผู้ป่วยที่แพ้จะเกิดผื่นได้แม้สัมผัสนิกเกิลเพียงเล็กน้อย

ผู้ที่ดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนนิกเกิล อาจมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง ท้องเสีย และอาจก่อให้เกิดมะเร็งในโพรงจมูกและปอดเพิ่มขึ้นในกลุ่มคนงานที่รับสัมผัสนิกเกิล

2.4 สารอาหารของพืช

พืชต้องการแร่ธาตุและสารอาหาร (nutrient) หลายชนิดในการเจริญเติบโต สารบางชนิดที่พืชต้องการในปริมาณไม่มากแต่ขาดไม่ได้เรียกว่า ธาตุที่เป็นส่วนสำคัญของวิตามินหรือฮอร์โมน (Trace Elements) เช่น เหล็ก ทองแดง สังกะสี ในขณะที่สารอาหารบางชนิดต้องการมากจึงจัดเป็นสารอาหารที่สำคัญได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งคาร์บอนจัดเป็นสารอาหารที่มีปริมาณเหลือเฟือเนื่องจากสามารถหาได้จากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ

2.5 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์บางชนิดจะไม่ก่อให้เกิดโรคแต่ก็อาจทำให้เกิดรส กลิ่นหรือสีที่ไม่พึงประสงค์ ในทางปฏิบัตินิยมใช้แบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์ม (coliform group) เป็นดัชนีที่บ่งชี้การปนเปื้อนเชื้อโรคในน้ำ เนื่องจากโคลิฟอร์มแบคทีเรียมีแหล่งกำเนิดในทางเดินอาหารของสัตว์เลือดอุ่น และมักจะพบในอุจจาระ อีกทั้งยังสามารถอาศัยในสิ่งแวดล้อมภายนอกร่างกายได้นานกว่าเชื้อโรค สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ง่าย จึงนิยมใช้เป็นดัชนีตรวจวิเคราะห์เป็นประจำ ในการวัดปริมาณแบคทีเรียโคลิฟอร์มจะใช้วิธี มัลติเพิลทู้บเทคนิค (multiple tube technique) อาศัยการเปรียบเทียบเชิงสถิติมาเป็นจำนวนตัวเลข ที่มีหน่วยเป็น MPN/100 (MPN, Most Probable Number)

2.6 ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของน้ำเสีย สามารถแบ่งได้ดังนี้

2.6.1 ของแข็งทั้งหมด (total solid; TS) หมายถึง ปริมาณของแข็งหรือสารทั้งหมดที่อยู่ในน้ำ หาได้จากปริมาณสารที่ระเหยน้ำออกทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

2.6.2 ของแข็งจมตัวได้ (settleable solids) หมายถึง ของแข็งที่จมตัวสู่ก้นภาชนะเมื่อตั้งทิ้งในเวลา 1 ชั่วโมง มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อลิตร

2.6.3 ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (total dissolved solids; TDS) หมายถึงของแข็งที่สามารถผ่านกระดาษกรองใยแก้วมาตรฐาน แล้วยังคงเหลืออยู่ หลังจากระเหยไอน้ำจนแห้ง แล้วอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

2.6.4 ของแข็งแขวนลอย (suspended solid; SS) หมายถึง ส่วนของแข็งที่เหลือค้างบนกระดาษกรองใยแก้วมาตรฐาน หลังจากกรองน้ำตัวอย่างและอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

2.6.5 ของแข็งระเหยง่าย (volatile solids; VS) หมายถึงส่วนของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ วิเคราะห์โดยนำกระดาษกรองที่วิเคราะห์หาของแข็งที่แขวนลอยแล้ว หรือถ้วยกระเบื้องระเหยที่วิเคราะห์ของแข็งละลายทั้งหมด ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส น้ำหนักที่หายไปคือ น้ำหนักของของแข็งที่ระเหยง่าย

2.6.6 อุณหภูมิ หมายถึง ความร้อน-เย็นของน้ำ อุณหภูมิของน้ำจะสูงกว่าอุณหภูมิในบรรยากาศ ยกเว้นในฤดูร้อน อุณหภูมิของน้ำ มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ การเจริญเติบโตของสัตว์และพืชน้ำ มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าอุณหภูมิ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอย่างหนึ่ง มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำ โดยจุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส และหยุดการเติบโตที่ 50 องศาเซลเซียส มีผลต่อการละลายของออกซิเจนในน้ำ ออกซิเจนละลายในน้ำได้ 7.54-9.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความดันบรรยากาศ

2.6.7 สี หมายถึง น้ำเสีย ที่ปล่อยจากชุมชนจะ มีสีเทาปนน้ำตาลอ่อน เมื่อไม่มีการบำบัด จะเปลี่ยนเป็นสีเทาหรือสีดำ น้ำเสียจากอุตสาหกรรม ส่วนใหญ่มีสีเทา เทาเข้ม หรือสีดำ ซึ่งเกิดจากพวกซัลไฟต์ของโลหะ อุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดสีในน้ำเสีย เช่น โรงงานกระดาษ โรงงานฟอกย้อม สีอาจเกิดจากสาหร่าย หรือสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในน้ำ

2.6.8 ความขุ่น (turbidity) หมายถึง สมบัติทางแสงของสารแขวนลอยซึ่งทำให้แสงกระจาย และถูกดูดกลืนมากกว่าที่จะยอมให้แสงผ่านเป็นเส้นตรง ความขุ่นของน้ำเกิดจากมีสารแขวนลอยต่าง ๆ เช่น ดิน ดินตะกอน แพลงค์ตอน สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ และสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ที่มีขนาดเล็ก

2.6.9 กลิ่น หมายถึง กลิ่นของน้ำเสียชุมชน ในระยะแรกมีกลิ่นเหม็นอับ เนื่องจากสารประกอบซัลไฟต์ น้ำเสียอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมเคมี ยา อาหาร กลิ่นของมันเกิดจาก

สารฟีนอล แอมโมเนีย แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายที่ไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้เกิดกลิ่น

2.6.10 รส หมายถึง รสของน้ำเสีย ซึ่งปกตินำ้ไม่มีรส

2.6.11 การนำไฟฟ้า บอกถึงความสามารถของน้ำที่จะให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นและชนิดของไอออนที่มีอยู่ในน้ำ และอุณหภูมิในขณะทำการวัด ไม่ได้เป็นการบอกถึงไอออนตัวใดตัวหนึ่งโดยเฉพาะ สารประกอบอนินทรีย์ของกรด ด่างและเกลือ สารมารถนำไฟฟ้าได้ดี

3. สารประกอบเชิงซ้อน

สารประกอบเชิงซ้อน หรือสารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination compounds) เป็นสารที่ประกอบด้วยโลหะไอออนอะตอมกลาง (central metal ion) ที่ถูกล้อมรอบด้วยลิแกนด์ (ligand) โดยถูกยึดกันด้วยพันธะโคออร์ดิเนตโควาเลนต์ ลิแกนด์ที่พบเสมอได้แก่ H_2O, NH_3, F^-, Cl^-, I^-, SO_4^{2-}, NO^{3-}, CN^-, H^+

สารประกอบเชิงซ้อนเป็นสารประกอบที่องค์ประกอบทั้งหมดหรือเพียงบางส่วนมีโครงสร้างซับซ้อนกว่าสารประกอบเคมีสามัญ ส่วนต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบเชิงซ้อน ได้แก่ ไอออนเชิงซ้อน ประกอบด้วยอะตอมของโลหะหรือไอออนที่อยู่ตรงกลางที่เกิดพันธะแบบโคออดิเนตกับลิแกนด์ เช่น $[Co(NH_3)_6]^{3+}$ อะตอมหรือไอออนที่อยู่ตรงกลาง ส่วนมากได้แก่โลหะทรานซิชัน เช่น Cu, Cr, Mn

เลขโคออร์ดิเนชัน (coordination number, CN) หมายถึง จำนวนลิแกนด์ที่ต่อโดยตรงกับอะตอมหรือไอออนกลาง เลขโคออร์ดิเนชันของสารเชิงซ้อนที่พบมากคือ 2,4 และ 6 ลิแกนด์ที่ใช้อิเล็กตรอนคู่ว่างเพียง 1 คู่ เกิดพันธะโคออร์ดิเนตโควาเลนท์กับโลหะไอออนกลางเรียกว่า โมโนเดนเทตลิแกนด์ (monodentate ligand) ถ้าใช้อิเล็กตรอนมากกว่า 1 คู่ เรียก โพลีเดนเทตลิแกนด์ (polydentate ligand) หรือสารคีเลต (chelating agent) เช่น $C_2O_4^{2-}$ และ CO_2 ซึ่งใช้คู่อิเล็กตรอน 2 คู่ เกิดพันธะโคออร์ดิเนต เรียก ไบเดนเทตลิแกนด์ (bidentate ligand)

โคออร์ดิเนชันสเฟียร์ (coordination sphere) เป็นกลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดโครงสร้างเชิงซ้อน เมื่อเขียนสูตรกลุ่มอะตอมเหล่านี้จะอยู่ในเครื่องหมาย [ ] เช่น $[Cu(NH_3)_4]Cl_2$ จะเห็นลิแกนด์ NH_3 และ Cu จะอยู่ภายในโคออร์ดิเนชันสเฟียร์ ส่วน Cl ไม่อยู่ในโคออร์ดิเนชันสเฟียร์และไม่จัดว่าเป็นลิแกนด์ แต่ถือว่าเป็นไอออนลบธรรมดา

ลิแกนด์ ได้แก่ อะตอม หรือกลุ่มอะตอมที่ยึดเหนี่ยวกับอะตอมหรือไอออนของโลหะที่อยู่ตรงกลางของสารประกอบเชิงซ้อน ลิแกนด์จะสร้างพันธะกับอะตอมกลางและเป็นตัวให้อิเล็กตรอนคู่ในการสร้างพันธะ อะตอมใดของลิแกนด์เป็นอะตอมที่ให้อิเล็กตรอนคู่จะเรียกอะตอมนั้นว่า donor atom โดยปกติพันธะระหว่างอะตอมกลางกับลิแกนด์เป็นพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์ ดังนั้นจึงเรียกสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้อีกชื่อหนึ่งว่า สารประกอบโคออร์ดิเนชัน เช่น MnO^{4-} มีแมงกานีสเป็นอะตอมกลาง มีออกซิเจนล้อมรอบ $Fe(CN)_6^{3-}$ มีเหล็กเป็นอะตอมกลางและมีไซยาไนด์ไอออนล้อมรอบแสดงดังภาพที่ 2.3

ภาพที่ 2.3 สารประกอบโคออดิเนชันของเหล็กและแมงกานีส

ที่มา :Tu70, (2551: 1)

ธาตุทรานซิชันส่วนใหญ่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนหรือไอออนเชิงซ้อนที่มีสีต่างๆ ธาตุทรานซิชันอาจเกิดสารประกอบที่มีธาตุองค์ประกอบเหมือนกันได้มากกว่าหนึ่งชนิด เช่น โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) มีสีส้ม โพแทสเซียมโครเมตK_2CrO_4 มีสีเหลือง ซึ่งการเกิดสีของสารประกอบทรานซิชันนี้นอกจากขึ้นอยู่กับเลขออกซิเดชันของธาตุทรานซิชันแล้ว ยังขึ้นอยู่กับลิแกนด์ที่มาล้อมรอบอะตอมของธาตุทรานซิชันด้วย

ประโยชน์ของสารประกอบเชิงซ้อนมีหลายด้าน ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมีทั้งงานคุณภาพวิเคราะห์ และปริมาณวิเคราะห์ แก้ความกระด้างของน้ำโดยจะรวมตัวกับ Ca^{2+},Mg^{2+}, Fe^{2+} ซึ่งเป็นอิออนที่เป็นสาเหตุแห่งความกระด้างของน้ำ ป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก ถ้าให้เหล็กอยู่ในที่ชื้นและสัมผัสกับออกซิเจนจะทำให้เหล็กขึ้นสนิมได้ คือเกิดเหล็กออกไซด์ ($Fe_2O_3.xH_2O$) ซึ่งเป็นสารที่มีสีน้ำตาลอมแดง แต่ถ้าให้เหล็กทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นลิแกนด์จนเกิดเป็นสารประกอบโคออร์ดิเนชันขึ้นแล้ว ก็จะป้องกันไม่ให้เหล็กนั้นมีโอกาสอยู่ในรูปเหล็กออกไซด์กรณีที่เหล็กขึ้นสนิมอยู่แล้ว ก็เปลี่ยนให้เป็นไอออนเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ แล้วจึงล้างสนิมออกจากผิวเหล็ก ในปัจจุบันนี้วงการอุตสาหกรรมมีวิธีป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กโดยการเปลี่ยนให้เป็นสารเชิงซ้อนหรือไอออนเชิงซ้อน ใช้ในอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เช่น การชุบโลหะด้วยเงินหรือทอง

ทำให้ผลิตภัณฑ์สวยงาม ผิวเรียบ เป็นมัน น่าใช้ สามารถนำไฟฟ้าได้ดี สารละลายที่นิยมใช้ในการชุบเงินและทอง คือซิลเวอร์ไซยาไนด์และโพแทสเซียมไซยาไนด์

4. กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี เป็นกระบวนการกำจัดหรือแยกสารต่างๆที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยการเติมสารเคมีต่างๆลงไปในน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้เกิดการแยกสารปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพวิธีการบำบัดน้ำเสียทางเคมีประกอบด้วยกลไกต่างๆที่จะนำไปสู่การแยกมลสารออกจากน้ำเสียดังนี้

1. การทำให้เป็นกลางโดยการเติมกรดหรือเบสเพื่อปรับพีเอชให้เหมาะสมตามมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรมที่ผ่านการบำบัดแล้ว ต้องปรับพีเอชให้มีค่าระหว่าง 5-9 สารเคมีที่นิยมใช้ได้แก่ กรดซัลฟูริก กรดเกลือ โซดาไฟ และปูนขาว
2. การทำให้ตะกอนขนาดเล็กมีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถตกตะกอนได้ง่าย (Coagulation and Flocculation)
3. การทำให้มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย เช่น ไอออนโลหะหนักเปลี่ยนเป็นมลสารที่ไม่ละลายน้ำ วิธีนี้เรียกว่าการตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation)
4. การเพิ่มหรือลดออกซิเจน (ออกซิเดชัน-รีดักชัน) โดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้สารที่เป็นพิษนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบใหม่ที่ไม่มีพิษ สารเคมีที่เติมลงไปแบ่งเป็นสารที่เติมออกซิเจน (oxidizing agent) เช่น คลอรีน โอโซน ไฮโปคลอไรด์ เปอร์แมงกาเนต และสารที่ลดออกซิเจน (reducing agent) เช่นซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เฟอร์รัสซัลเฟต

ตัวอย่างการกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ สารออกซิไดซ์ที่ใช้กันส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สคลอลีน หรือโซเดียมไฮโปคลอไรต์ นอกจากนี้ยังมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต สารออกซิไดซ์ดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปไซยาไนด์เป็นไซนาเนตในขั้นที่ 1 และเมื่อเพิ่มปริมาณสารออกซิไดซ์ ไซยาเนตจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นคาร์บอเนตและแก๊สไนโตรเจนในขั้นที่ 2 แต่โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนตจะทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ในขั้นที่ 1 เท่านั้น

ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยสารไฮโปคลอไรต์ แสดงดังสมการ

ปฏิกิริยาขั้นที่ 1

$$CN^- + NaOCl + H_2O \longrightarrow CNCl + NaOH + OH^-$$

$$CNCl + NaOH + OH^- \longrightarrow CNO^- + NaCl + H_2O$$

ปฏิกิริยาขั้นที่ 2

$$2CNO^- + 3NaOCl + H_2O \longrightarrow N_2 + 2HCO_3^- + 3NaCl$$

5. การเติมคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีน เพื่อฆ่าเชื้อโรคที่เป็นแบคทีเรีย ไวรัส สารเคมีที่นิยมใช้ เช่น ไฮไปคลอไรด์, แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ เป็นต้น เมื่อเติมคลอรีนลงไปในน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow HOCl + H^+ + Cl^-$$

$$HOCl \rightleftharpoons H^+ + OCl^-$$

ที่พีเอชต่ำๆ จะเกิด HOCl ซึ่งมีประสิทธิภาพในการฆ่าเชื้อโรคดีกว่า OCl^- มาก ถ้าใช้ $Ca(OCl)_2$ ละลายน้ำจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

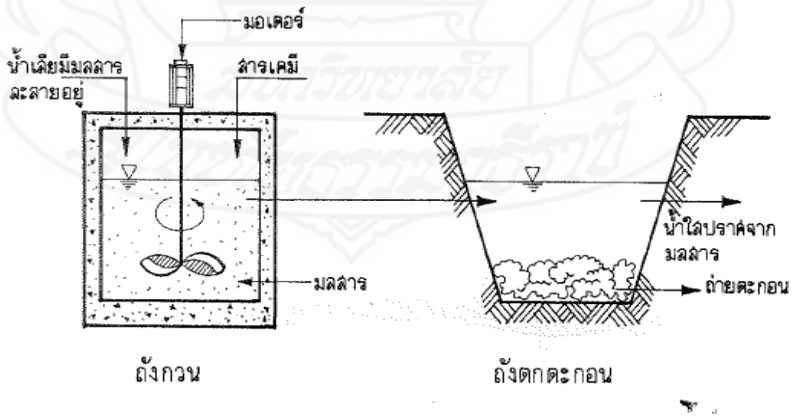
$$Ca(OCl)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2OCl^-$$

4.1 การตกตะกอนทางเคมี

กระบวนการตกตะกอนทางเคมี คือกระบวนการเปลี่ยนสภาพของโลหะหรือสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำให้เป็นโลหะที่ไม่ละลายน้ำ หรือเกลือของสารอนินทรีย์ที่ไม่ละลายน้ำ (ตะกอน) โดยการเติมสารเคมีผสมกับน้ำเสีย ทำให้เกิดการตกตะกอน สารที่เติมส่วนใหญ่จะเป็นด่าง ใช้เติมลงในสารละลายเพื่อปรับค่าพีเอช เพื่อให้ผลคูณสภาพการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ต่ำกว่าค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายของมัน ซึ่งจะทำให้เกิดการตกตะกอนดังแสดงภาพที่ 2.4

การใช้โซดาไฟเป็นสารตกตะกอนสำหรับนิกเกิล เพื่อให้ตกตะกอนในรูปของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

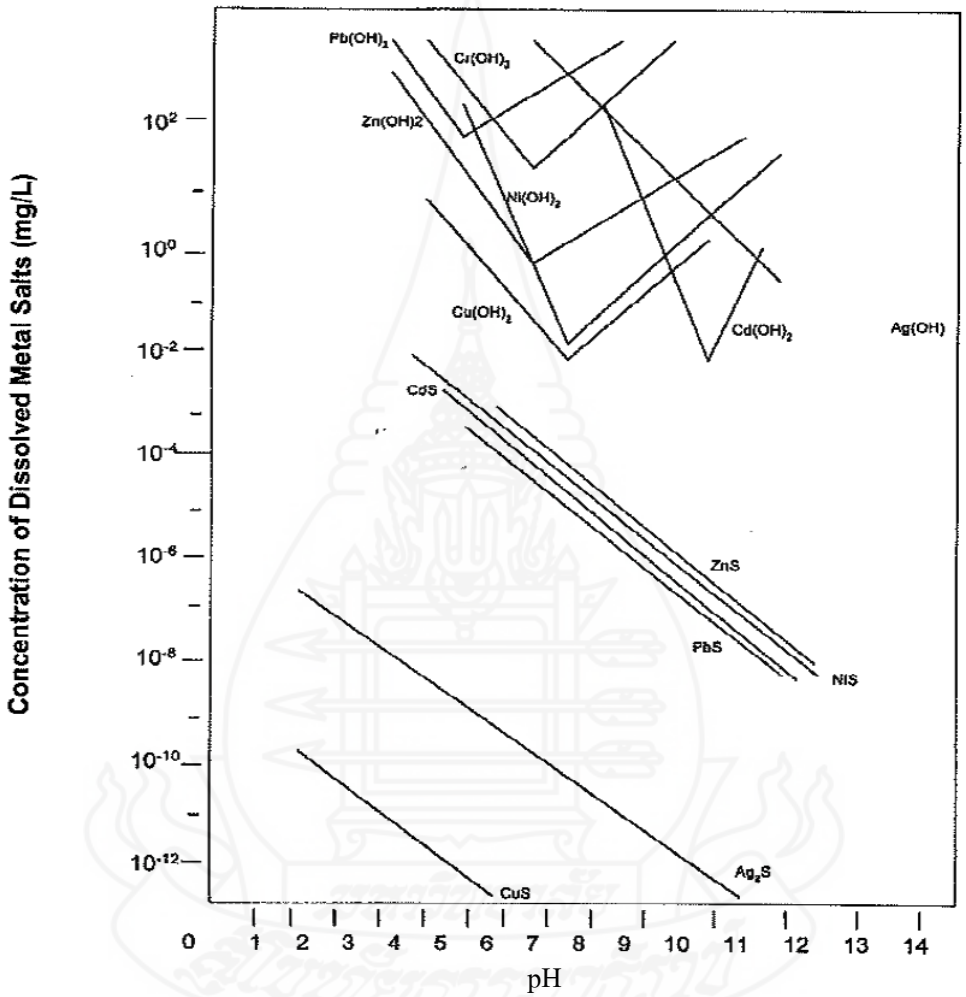
$$Ni^{+2} + 2NaOH \longrightarrow 2Na^+ + Ni(OH)_2\ (s)$$



ภาพที่ 2.4 วิธีการตกตะกอนทางเคมี

ที่มา : เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2539: 122)

จากกราฟความสามารถในการละลายสำหรับโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์ ดังภาพที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าโลหะซัลไฟด์จะตกตะกอนในช่วงที่กว้างกว่าโลหะไฮดรอกไซด์ คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์และนิกเกิลไฮดรอกไซด์จะตกตะกอนที่พีเอชประมาณ 7-8 ส่วนคอปเปอร์ซัลไฟต์จะตกตะกอนที่พีเอชประมาณ 7 นิกเกิลซัลไฟต์ตกตะกอนที่พีเอชประมาณ 12-13



ภาพที่ 2.5 สภาพการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และ ซัลไฟด์ ที่ค่าพีเอชต่างๆ

ที่มา : U.S. Army Corps of Engineers (2001: 2-2)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ สามารถกำจัด แคดเมียม โครเมียม(+3) ทองแดง เหล็ก แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ส่วนการตกตะกอนซัลไฟด์สามารถกำจัด แคดเมียม โครเมียม

(+6) โคบอลต์ ทองแดง เหล็ก ปรอท แมงกานีส นิกเกิล ซิลเวอร์ ดีบุก และสังกะสี การตะตะกอนคาร์บอเนตสามารถกำจัดนิกเกิล แคดเมียม ตะกั่ว และ สังกะสีได้

ค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายของตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ แสดงดังตารางที่ 2.2 การละลายขึ้นอยู่กับความเข้มข้น (หรือมิลลิกรัม) ของไอออนโลหะในสารละลาย ค่าดังกล่าวนี้ใช้ในการออกแบบหรือคาดคะเนการตกตะกอนของไอออนโลหะตามทฤษฎีของการละลาย

ตารางที่ 2.2 ค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายตามทฤษฎีของสารประกอบไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ของโลหะบางชนิดในน้ำบริสุทธิ์ที่ 25 องศาเซลเซียส

โลหะ	ไฮดรอกไซด์	ซัลไฟด์
แคดเมียม	2.3×10^{-5}	6.7×10^{-10}
โครเมียม	8.4×10^{-4}	ไม่ตกตะกอน
โคบอลต์	2.2×10^{-1}	1.0×10^{-8}
ทองแดง	2.2×10^{-2}	5.8×10^{-18}
เหล็ก	8.9×10^{-1}	3.4×10^{-5}
ตะกั่ว	2.1	3.8×10^{-9}
แมงกานีส	1.2	2.1×10^{-3}
ปรอท	3.9×10^{-4}	9.0×10^{-20}
นิกเกิล	6.9×10^{-3}	6.9×10^{-8}
เงิน	13.3	7.4×10^{-12}
ดีบุก	1.1×10^{-4}	3.8×10^{-8}
สังกะสี	1.1	2.3×10^{-7}

ที่มา : U.S. Army Corps of Engineers (2001:2-3)

4.2 วิธีรีดักชัน

การเกิดรีดักชันทางเคมี เป็นกระบวนการที่เกิดปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับการเพิ่มอิเล็กตรอนของอะตอม ทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพของมลสารที่อยู่ในน้ำจากมลสารที่มีพิษมากไปเป็นมลสารที่มีพิษน้อย ไม่มีพิษ หรืออยู่ในสถานะโลหะธาตุในกรณีที่เป็นโลหะหนัก ซึ่งทำให้นำ

โลหะกลับมาใช้ใหม่ได้ และอาจใช้เป็นมาตรฐานการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น กรณีที่กฎหมายมีความเข้มงวดมากขึ้น มลสารที่สามารถถูกกำจัดด้วยวิธีรีดักชันทางเคมีได้แก่ โครเมียม ทองแดง ปรอท เงิน

ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (E^0) ใช้บอกความสามารถในการให้หรือรับอิเลคตรอน ของสารเคมีในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ เช่น สารที่มีค่า E^0 เป็นบวกมาก แสดงว่าสามารถรับอิเลคตรอนได้ดี เกิดรีดักชันได้ง่าย จัดว่าเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง สามารถออกซิไดซ์สารที่มี E^0 ต่ำกว่าได้ ส่วนสารที่มีค่า E^0 เป็นลบมาก แสดงว่าสามารถให้อิเลคตรอนได้ดี เกิดออกซิเดชันได้ง่าย ตัวอย่างค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานในสารละลายบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐานในสารละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Eo(V))
$H_2(g) + 2e^- \longrightarrow 2H^-$	-2.25
$2H_2O(l) + 2e^- \longrightarrow H_2(g) + 2OH^-(aq)$	-0.83
$Ni^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Ni(s)$	-0.26
$Fe^{3+}(aq) + 3e^- \longrightarrow Fe(s)$	-0.04
$HSO_4^- + 3H^+ + 2e^- \longrightarrow SO_2(aq) + 2H_2O$	0.16
$SO_4^{2-}(aq) + 4H^+(aq) + 2e^- \longrightarrow SO_2(g) + 2H_2O(l)$	0.17
$Cu^{2+}(aq) + 2e^- \longrightarrow Cu(s)$	0.37
$H_2SO_3(aq) + 4H^+(aq) + 4e^- \longrightarrow S(s) + 3H_2O(l)$	0.45
$Ni(OH)_3(s) + e^- \longrightarrow Ni(OH)_2(s) + OH^-(aq)$	0.48
$Cu^+(aq) + e^- \longrightarrow Cu(s)$	0.52
$Ag^+(aq) + e^- \longrightarrow Ag(s)$	0.80
$Cu^{2+}(aq) + I^-(aq) + e^- \longrightarrow CuI(s)$	0.86

ที่มา : Bard A. J., Parsons R., and Jordan J. (1985: 267)

สารเคมีที่นิยมใช้เป็นสารรีดิวซ์ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีรีดักชันเช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์

4.2.1 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (sulfur dioxide)

สารชนิดนี้มีการใช้อย่างกว้างขวางในการบำบัดโครเมียม เนื่องจากใช้ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสารเคมีชนิดอื่น ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณสารเคมีที่ใช้รีดิวส์โครเมียม (6+)

สารเคมี	ปริมาณที่ต้องการ (lb/lb or kg/kg)
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	1.9
โซเดียมไบซัลไฟต์	3.0
โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์	2.8
เฟอรัสซัลเฟต	8.8

ที่มา : มณีรัตน์ องค์วรรณดี (2542:20)

ตัวอย่างสมการเคมีในการใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในการรีดิวซ์โครเมียมจาก Cu^{+6} ที่มีพิษสูงไปเป็น Cu^{+3} ที่มีพิษน้อยกว่า

$$3SO_2 + 3H_2O \longrightarrow 3H_2SO_3$$

$$3H_2SO_3 + 2CrO_3 \longrightarrow Cr_2(SO_4)_3 + 3H_2O$$

4.2.2 โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (sodium borohydride)

เทคนิคการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักเจือปน โดยการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารรีดิวส์ เป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง คุ้มค่ากับค่าใช้จ่าย เพราะสามารถนำโลหะหนักที่อยู่ในน้ำทิ้งกลับมาใช้ได้ใหม่ การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์สามารถบำบัดแคตไอออนของโลหะในน้ำทิ้งให้เหลือน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ (Edward, 1991)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมเมทอกไซด์ (sodium methoxide) กับไดบอเรน (diborane) ละลายน้ำได้และจะมีความเสถียรถ้าอยู่ในสภาวะด่าง โซเดียมโบโรไฮไดรด์แบ่งออกเป็น 3 แบบ ได้แก่ แบบเม็ด (granules) ขนาด 10-40 เมช (mesh) แบบก้อน (pellets) ขนาด 7/16 นิ้ว และแบบผง

สารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ใช้เป็นสารรีดิวส์ สำหรับเปลี่ยนไอออนของโลหะที่ละลายน้ำหรือสารประกอบอินทรีย์ของโลหะ (organicmetallic compounds) ให้เป็นโลหะธาตุที่ไม่ละลายน้ำ (M^o) ตามสมการดังนี้

$$BH_4^- + 8OH^- \longrightarrow NaBO_2 + 6H_2O + 8e^- \quad (1)$$

$$8M^+ + 8e^- \longrightarrow 8M^o \quad (2)$$

สมการข้างบนแสดงให้เห็นว่า $NaBH_4$ 1 โมลจะรีดิวส์ไอออนโลหะที่มีวาเลนซี +1 (monovalent metal) ได้ 8 โมล

$$aBH_4 + 8M^+ + 8OH^- \longrightarrow NaBO_2 + 8M_o + 6H_2O \quad (3)$$

สมการที่ 1 แสดงอัตราส่วนจำนวนโมลของโลหะที่ถูกรีดิวส์ต่อจำนวนโมลของโซเดียมโบรไฮไดรด์ในทางทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติแล้วต้องใช้ปริมาณโซเดียมโบรไฮไดรด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากอาจมีสารประกอบอื่นที่โบโรไฮไดรด์รีดิวส์ได้ด้วย และถ้าในน้ำทิ้งมีโลหะในรูปสารประกอบเชิงซ้อนอย่างแก่ (strongly complexed metals) เช่น สารประกอบเชิงซ้อนไซยาไนด์ จำเป็นต้องทำลายสารประกอบเหล่านี้ก่อนที่จะบำบัดด้วยโบโรไฮไดรด์

4.2.3 โซเดียมไบซัลไฟต์ (sodium bisulfite)

โซเดียมไบซัลไฟต์อยู่ในรูปของโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์สามารถละลายน้ำได้และเป็นสารรีดิวซ์ คุณสมบัติของโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 เป็นของเหลวสีเหลืองที่มีกลิ่นของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ละลายน้ำได้และมีจุดเดือดของ 104 องศาเซลเซียส เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดจะเกิดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งเป็นพิษ มีฤทธิ์กัดกร่อน และเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน

โซเดียมไบซัลไฟต์มีบทบาทสำคัญในการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากเป็นตัวรีดิวซ์ ใช้สำหรับลดค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ลดอัตราการกัดกร่อนในวัสดุเหล็ก ใช้ในการรีดิวซ์ของโครเมียม และใช้กำจัดน้ำคลอรีนในน้ำ คลอรีนจะถูกออกซิไดซ์เป็นเกลือคลอไรด์

5. สมดุลการละลายของสารประกอบที่ละลายน้ำได้

สภาพละลายได้ (solubility) ของสารหมายถึง ความสามารถของสารที่ละลายในสารอื่นจนเป็นสารละลายอิ่มตัว

สารประกอบไอออนบางชนิดละลายน้ำได้ดี บางชนิดละลายได้น้อยจนถือว่าไม่ละลาย ดังนั้นเมื่อนำสารประกอบของแข็งที่ละลายน้ำได้น้อยมาละลายน้ำ มันจะละลายได้บางส่วนจนเกิดสารละลายอิ่มตัว ซึ่งเป็นระบบที่มีสมบัติคงที่ แสดงว่าระบบได้เข้าสู่ภาวะสมดุลและเป็นสมดุลไดนามิกเพราะยังคงมีทั้งการเปลี่ยนแปลงไปข้างหน้า (การละลาย) และการเปลี่ยนแปลงย้อนกลับ (ตกผลึก) ที่เกิดในอัตราที่เท่ากัน

5.1 ค่าคงที่สมดุลของสภาพละลายได้ (solubility product constant)

โดยทั่วไปแล้ว เกลือเป็นสารประกอบไอออน (ionic compound) เมื่อละลายน้ำแล้วจะ แตกตัวเป็นไอออน ถ้ามีเกลือมากเกินพอจะเห็นลักษณะเป็นของผสมในน้ำซึ่งมีสมดุลเกิดขึ้นระหว่างของแข็งกับไอออนในสารละลายอิ่มตัว เช่น เกลือแคลเซียมออกซาเลต (calcium oxalate, CaC_2O_4) จะเกิดสมดุลขึ้นดังนี้

$$CaC_2O_4(s) \rightleftharpoons Ca^{2+}(aq) + C_2O_4^{2-}(aq)$$

ค่าคงที่สมดุลของสภาพละลายได้มีค่าเป็น

$$K_c = \frac{[Ca^{2+}][C_2O_4^{2-}]}{[CaC_2O_{4(s)}]}$$

เนื่องจากความเข้มข้นของของแข็งมีค่าคงที่ จะได้

$$K_{sp} = K_c\,[CaC_2O_{4(s)}] = [Ca^{2+}][C_2O_4^{2-}]$$

เมื่อ K_{sp} คือค่าคงที่ผลคูณสภาพละลายได้ (solubility product constant) โดยทั่วไปแล้วค่าคงที่สมดุลสภาพละลายได้เป็นสมบัติของเกลือที่ละลายน้ำได้น้อยมาก (sparingly soluble salt) และมีค่าเท่ากับผลคูณของความเข้มข้นของไอออนที่ได้จากการแตกตัวยกกำลังเลขสัมประสิทธิ์จำนวนโมลในสมการเคมี

ถ้ากำหนดให้ A_xB_y เป็นสูตรทั่วไปของสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยมากและ A^{a+} เป็นไอออนที่มีประจุบวก +a และ B^{b-} เป็นไอออนที่มีประจุลบ -b ดังนั้นเมื่อนำ A_xB_y มาละลายน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงดังสมการ

$$A_xB_y(s) \rightleftharpoons xA^{a+}(aq) + yB^{b-}(aq)$$

ดังนั้น เขียนสมการทั่วไปแสดง K_{sp} ได้ดังนี้

$$K_{sp} = [A^{a+}(aq)]^x[B^{b-}(aq)]^y$$

สมการการแตกตัวของเกลือเลดไอโอไดด์ (lead iodide, PbI_2) ที่ละลายน้ำได้น้อยมากและค่าคงที่ผลคูณการละลายแสดงไว้ดังนี้

$$PbI_2(s) \rightleftharpoons Pb^{2+}(aq) + 2I^-(aq)$$

$$K_{sp} = [Pb^{2+}][I^-]^2$$

ตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายได้ของเกลือที่ละลายน้ำได้น้อยมาบางชนิด ซึ่งค่า K_{sp} เหล่านี้ใช้ทำนายความเข้มข้นของไอออนโลหะที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายได้ของเกลือที่ละลายน้ำได้น้อยมากที่ 25 องศาเซลเซียส

สารประกอบ	สูตร	K_{sp} (at 25 ^{o}C)
คอปเปอร์(I)คลอไรด์	CuCl	1.2×10^{-6}
คอปเปอร์(I)ไซยาไนด์	CuCN	3.2×10^{-20}
คอปเปอร์(II)ไฮดรอกไซด์	$Cu(OH)_2$	2.2×10^{-20}
คอปเปอร์(II)ฟอสเฟต	$Cu_3(PO_4)_2$	1.3×10^{-37}
คอปเปอร์(II)ซัลไฟด์	Cu_2S	2.5×10^{-18}
นิกเกิล(II)คาร์บอเนต	$NiCO_3$	6.6×10^{-9}
นิกเกิล(II)ไฮดรอกไซด์	$Ni(OH)_2$	2.0×10^{-15}
นิกเกิล(II)ฟอสเฟต	$Ni_3(PO_4)_2$	5.0×10^{-31}

ที่มา : Patnaik, Pradyot. (2004: 4.4)

5.2 ค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายได้กับการตกตะกอน

5.2.1 ผลคูณความเข้มข้น (reaction quotient (Q)) สำหรับปฏิกิริยาใด ๆ สามารถใช้ทำนายว่าจะมีการตกตะกอนหรือไม่ จากค่าความเข้มข้นของไอออน (reaction quotient เรียกอีกอย่างว่า ผลคูณไอออน (ion product) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ความเข้มข้นไอออนของโลหะในสารละลายในสภาวะสมดุล) โดยคำนวณค่า Q และเปรียบเทียบกับค่าคงที่สมดุลของการละลาย (K_{sp}) ค่า Q นั้นหาได้ในลักษณะผลคูณการละลายได้ การหาค่า Q คำนวณแบบเดียวกับการหาค่าคงที่ผลคูณสภาพการละลายได้โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนของเกลือที่ละลายน้ำได้น้อยมากในสารละลายแต่ไม่จำเป็นต้องอยู่ในสภาวะสมดุล การพิจารณาทิศทางของปฏิกิริยา

ถ้า $Q < K_{sp}$ ไม่เกิดการตกตะกอน

ถ้า $Q = K_{sp}$ ไม่เกิดการตกตะกอน แต่อยู่ในรูปของสารละลายอิ่มตัว

ถ้า $Q > K_{sp}$ เกิดการตกตะกอน

5.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายและการตกตะกอนของไอออนโลหะ มีดังนี้

1) การเกิดสารประกอบเชิงซ้อน ความสามารถในการละลายมีความสัมพันธ์กับการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในน้ำเสีย ไอออนบวกและไอออนลบในน้ำจะทำปฏิกิริยาเพื่อสร้างสารประกอบไฮดรอกไซด์ ประจุบวกหรือประจุลบอาจจะสร้างสารประกอบ

เชิงซ้อนร่วมกับสารชนิดอื่นในสารละลายได้อีก ซึ่งเป็นการลดความสามารถในการละลาย โดยโมเลกุลหรือไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำแล้วสามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะได้โมเลกุลเหล่านี้เรียกว่า ลิแกนด์ ลิแกนด์พื้นฐานได้แก่ OH^-, CO_3^{2-}, NH_3, F^-, CN^-, $S_2O_3^{2-}$ เช่นเดียวกับสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์อื่นๆอีกมาก น้ำเสียที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะเป็นส่วนประกอบจะมีความยุ่งยากในการบำบัด

2) สารคีเลต ความสามารถในการละลายของโลหะจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารคีเลต โดยสารคีเลตจะสร้างพันธะกับไอออนโลหะเป็นจำนวนมาก หน้าที่หลักของพันธะเหล่านี้คือสร้างวงแหวนในบริเวณที่ไอออนโลหะถูกยึดติดอยู่ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการเกิดเกลือที่ไม่ละลายน้ำ ตัวอย่างสารคีเลท เช่น อีดีทีเอ เอนทีเอ ไซยาไนด์ แอมโมเนีย

3) อุณหภูมิ ความสามารถในการละลายแปรผันตามอุณหภูมิ ความสามารถในการละลายของสารอนินทรีย์และการตกตะกอนของโลหะโดยทั่วไปจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลาย ค่า K_{sp} จะคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งเท่านั้น มักอ้างอิงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

4) การตกตะกอนร่วม ความสามารถในการละลายจริงของโลหะที่ตกตะกอนจะต่ำกว่าค่าในทฤษฎีหากมีการตกตะกอนร่วมเกิดขึ้น เช่นการปรับพีเอชของน้ำเสียทองแดงด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเกิดตะกอนของแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งสามารถดูดซับตะกอนของคอปเปอร์ออกไซด์ที่ลอยอยู่ในน้ำทำให้สามารถตะกอนได้ดีขึ้น

5.3 ค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complexes formation constant, K_f)

สารประกอบเชิงซ้อน เกิดเป็นขั้นตอน โดยปกติไอออนของโลหะละลายในน้ำไอออนโลหะเหล่านั้นจะถูกไฮเดรตด้วยโมเลกุลของน้ำ ค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนหาได้จากสมการ

$$M + Y \longrightarrow MY$$

ค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (K_f) = $[MY]/[M][Y]$

เมื่อ M คือ ไอออนโลหะ
Y คือ แคตไอออน
และ MY คือ สารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น

ถ้า K_f มีค่าสูง แสดงว่า สารประกอบเชิงซ้อนมีเสถียรภาพสูง

ถ้า K_f มีค่าต่ำ แสดงว่า สารประกอบเชิงซ้อนมีเสถียรภาพต่ำ

ตัวอย่างค่าคงที่ของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างของไอออนโลหะบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคตไอออนกับ EDTA

แคตไอออน (Cation)	**ค่าคงที่ (K_f)**
Ag^{+}	$2.1x10^{7}$
Cr^{2+}	$4.0x10^{13}$
Fe^{2+}	$2.1x10^{14}$
Zn^{2+}	$3.2x10^{16}$
Pb^{2+}	$1.1x10^{18}$
Sn^{2+}	$2.0x10^{18}$
Pd^{2+}	$3.2x10^{18}$
Ni^{2+}	$4.2x10^{18}$
Cu^{2+}	$6.3x10^{18}$
Hg^{2+}	$6.3x10^{21}$
Fe^{3+}	$1.3x10^{25}$
Co^{3+}	$2.5x10^{41}$

ที่มา : Henri Reques. (1995:46)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lindsay and Stennick (1986) ศึกษาการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์รีดิวซ์โลหะที่ปนเปื้อน เช่น ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว โคบอลต์ ในระบบบำบัดแบบแบทช์และแบบต่อเนื่องโดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น น้ำล้างและน้ำทิ้งมีสารคีเลต และไม่มีสารคีเลตได้รับการบำบัดด้วยโซเดียมไบซัลไฟต์ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ โดยการใช้โซเดียมโบโรไฮ-

ไดรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 12 ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 40ภายใต้สภาวะค่าพีเอช และโออาร์พี (oxidation-reduction potential, ORP) ที่เหมาะสม และใช้โพลิเมอร์เป็นโคเอกกูแลนท์เอด ผลการทดลองปรากฏว่าด้ตะกอนโลหะที่มีสมบัติอัดตัวกันแน่น ทำให้รีดน้ำออกได้ง่าย และสามารถนำโลหะในตะกอนกลับมาใช้ใหม่ได้ น้ำเสียหลังการบำบัดจะมีปริมาณโลหะน้อยกว่า 1 มก./ล.

Lee and other (1993) ศึกษาผลของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างไอออนของโลหะกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ภายใต้สภาวะการฟอกเยื่อกระดาษ (reductive bleaching) โดยใช้ไอออนของโลหะ เหล็ก ทองแดง แมงกานีส ซึ่งเป็นไอออนที่พบมากในการทำเยื่อกระดาษ จากการศึกษาพบว่าโลหะจะตกตะกอนออกมาเมื่อทำปฏิกิริยากับโซเดียมโบโรไฮไดรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือเมื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว และเมื่อตรวจสอบสภาวะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะด้วยเทคนิคทางเอ็กซเรย์ (x-ray photoelectron spectroscopy) พบว่า Fe(III) ถูกรีดิวซ์เป็น Fe(0) เมื่อเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และถูกรีดิวซ์เป็น Fe(II) เมื่อเติมเฉพาะโซเดียมโบโรไฮไดรด์ร้อยละ 0.038 โดยน้ำหนัก Cu(II) ถูกรีดิวซ์เป็น Cu(I) และบางส่วนกลายเป็น Cu(0) เมื่อเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ร้อยละ 0.038 และ 0.378 ตามลำดับ ส่วนผลที่เกิดกับ Mn(II) ยังไม่แน่ชัด

Jianming Lu and other (1996) ได้ศึกษาการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ โคบอลต์(II) ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์โดยมีการควบคุมอัตราการเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ช่วงอุณหภูมิ 2-35 องศาเซลเซียส และค่าพีเอชจาก 2-7.8 ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยารีดิวซ์โคบอลต์จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสารละลายรีดิวซ์ ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ดีที่สุดโดยไม่มีการตกตะกอนของโคบอลต์ไฮดรอกไซด์คือ โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1 โมล จะรีดิวซ์โคบอลต์(II)ได้จำนวน 1 โมล ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการปรับค่าพีเอชเพิ่ม ที่พีเอชเท่ากับ 2 ผลยังไม่แน่ชัด ที่พีเอช 6 เท่ากับร้อยละ 96 และจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ

มณีรัตน์ องค์วรรณดี (2542) ศึกษาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ความเข้มข้นร้อยละ 1.2 ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 เพื่อกำจัดโลหะหนักที่ละลายในน้ำเสีย 4 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียจากการชุบทองแดง น้ำเสียจากการชุบนิกเกิล น้ำเสียจากการชุบโครเมียมและน้ำเสียรวม ซึ่งเป็นน้ำเสียจริงที่ได้จากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า การบำบัดน้ำเสียจากการชุบทองแดงที่มีความเข้มข้น 550 มก./ล. ทำได้โดยการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียด้วยด่างให้อยู่ในช่วง 4 ถึง 5 แล้วจึงเติม $NaHSO_3$ 5 เท่าของทองแดง และเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์จนได้ค่าพีเอชสุดท้ายประมาณ 7 จะสามารถกำจัด

ทองแดงทั้งหมดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง นอกจากนี้การใช้ปูนขาวปรับค่าพีเอช จะมีผลให้ทองแดงทั้งหมดที่เหลือในน้ำต่ำกว่า 1 มก./ล. น้ำเสียจากการชุบที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล 380 มก./ล. ปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 8.5 ด้วยด่าง แล้วจึงเติม $NaHSO_3$ 0.5 เท่าของนิกเกิล และเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์จนได้ค่าพีเอชสุดท้ายประมาณ 9 จะสามารถกำจัดนิกเกิลละลายได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง น้ำเสียจากการชุบโครเมียม มีความเข้มข้น โครเมียม นิกเกิล ทองแดง และสังกะสี เท่ากับ 1460 180 145 และ 90 มก./ล. ตามลำดับ การบำบัดขั้นแรกให้ทำปฏิกิริยากับ $NaHSO_3$ 3 เท่าของโครเมียม หลังจากนั้นปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเป็น 8 ด้วยด่าง เติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ให้ได้ค่าพีเอชสุดท้ายประมาณ 9 จะสามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดที่ละลายในน้ำได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง น้ำเสียรวมมีความเข้มข้นนิกเกิล ทองแดง โครเมียม สังกะสี และเหล็ก เท่ากับ 1660 770 250 160 และ 140 มก./ล. ตามลำดับ มีขั้นตอนการบำบัดเช่นเดียวกับน้ำเสียจากการชุบโครเมียม โดยใช้ปริมาณ $NaHSO_3$ 1 เท่าของโครเมียม จากนั้นปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเป็น 8 ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์จนได้ค่าพีเอชประมาณ 9.2 ถึง 9.5 จะสามารถกำจัดโลหะหนักทุกชนิดที่ละลายในน้ำได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการบำบัดน้ำเสียด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์สำหรับน้ำเสียจากการชุบทองแดง การชุบนิกเกิล การชุบโครเมียม และน้ำเสียรวม คิดเป็นเงิน 133 247 446 และ 541 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลบ.ม. ตามลำดับ ซึ่งแยกเป็นค่าสารเคมีเท่ากับ 106 242 335 และ 384 บาทตามลำดับ และเป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนเท่ากับ 275 111 และ 157 บาทตามลำดับ

กฤษณ์ เทียรฆประสิทธิ์ และ นุชจริยา อรัญศรี (2544) ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยใช้เบนโทไนท์เพียงอย่างเดียวและใช้เบนโทไนท์ร่วมกับเฟอรัสซัลเฟต มีการศึกษาผลของค่าพีเอช เริ่มต้น และปริมาณเบนโทไนท์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้เบนโทไนท์ในการกำจัดโครเมียมและสังกะสีคือ เบ็นไทไนท์ 0.8 กรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 10 สามารถกำจัดโครเมียมและสังกะสีได้ร้อยละ 99.84 และร้อยละ 99.72 ตามลำดับ และใช้เฟอรัสซัลเฟต 7.023 กรัมต่อลิตร ร่วมกับเบ็นไทไนท์ 0.8 กรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 9 สามารถกำจัดโครเมียมและสังกะสีร้อยละ 99.88 และร้อยละ 99.64 ตามลำดับได้

ณัฐศักดิ์ ธราธารกุลวัฒนา และ ณัฐกร วีระวัฒนานนท์ (2544) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นสารช่วยในการตกตะกอนโลหะทองแดง จากน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัม/ลิตรโดยใช้สารเคมีในการทดลอง 3 ชนิด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ ในการตกตะกอนไอออนทองแดง สำหรับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดทองแดง ผลปรากฏว่าไม่มีสารใดให้ค่าความเข้มข้นของไอออนทองแดงหลังบำบัดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม

สำหรับการทดลองจากน้ำเสียจริงที่ความเข้มข้นทองแดง 110.8 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการทดลองโดยใช้สารตกตะกอนร่วมกันเป็นคู่ คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 4 เท่า ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ 10 เท่าโดยโมลของทองแดงพีเอช 4 ในการตกตะกอนอิออนของทองแดง ทำให้ค่าความเข้มข้นทองแดงที่ต่ำสุดคือ 0.047 มิลลิกรัม/ลิตร แต่เนื่องจากราคาต้นทุนของสารเคมีมีราคาสูง ดังนั้นในการกำจัดโลหะทองแดง เพื่อให้ผ่านตามมาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม สามารถเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมกว่าคือ การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ 1 เท่าโดยโมลของทองแดงร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ 5 เท่าโดยโมลของทองแดงที่ค่าพีเอช 5 ทำให้ความเข้มข้นของทองแดงคือ 1.16 มิลลิกรัม/ลิตร โดยที่สภาวะนี้ราคาต้นทุนของสารเคมีในการกำจัดทองแดงคือ 1.6 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

สุภาวดี และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาการกำจัดทองแดงและการนำกลับทองแดงจากน้ำเสียกระบวนการกัดทองแดงของอุตสาหกรรมผลิตแผ่นวงจรไฟฟ้า ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างวิธีโซเดียมโบโรไฮไดรด์รีดักชัน และการตกตะกอนทางเคมีด้วยไฮดรอกไซด์ การทดลองใช้น้ำเสียที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น 0.43 และมีความเข้มข้นของทองแดงทั้งหมดเป็น 16282.66 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีปริมาณทองแดงละลายอยู่ร้อยละ 99.91 เมื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเป็น 5 และ 7 การเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (SBH) ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$) ในปริมาณ 5 เท่าของทองแดงในน้ำเสีย พบว่าสามารถกำจัดทองแดงทั้งหมดได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง โดยเหลือทองแดงเท่ากับ 0.52 และ 0.85 มิลลิกรัม/ลิตร ภาวะดังกล่าวทำให้ตะกอนอัดตัวแน่น สามารถตกตะกอนได้ดีและมีปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นน้อย อีกทั้งพบทองแดงในตะกอนอบแห้งโดยน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 67.55 และ 45.62 ตามลำดับ กรณีที่ใช้ SBH เพียงอย่างเดียวพบว่า น้ำเสียที่มีค่าพีเอช 5 และ 7 ให้ร้อยละของทองแดงในตะกอนอบแห้งโดยน้ำหนักเท่ากับ 64.97 และ 70.21 ตามลำดับ โดยพบองค์ประกอบในตะกอนในรูปของโลหะทองแดง (Cu^0) คอปเปอร์ (I) ออกไซด์ (Cu_2O) และคอปเปอร์ (II) ออกไซด์ (CuO) สำหรับการตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าที่พีเอช 8 ให้ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงละลายสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 99.98 เหลือทองแดงละลาย 2.84 มิลลิกรัม/ลิตร และมีทองแดงในตะกอนอบแห้งโดยน้ำหนักร้อยละ 48.45 ซึ่งพบผลึกในรูปของ $Cu_4(SO_4).(OH)_6$ และ $Cu(OH)_2$

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (experimental research) ในรูปแบบของแฟคตอเรียล (factorial) โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ ปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมที่ใช้ในการตกตะกอนได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะทองแดง และนิกเกิลจาก รวมทั้งระดับพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักดังกล่าว โดยทำการทดลองแบบทีละแบทช์ (batch study) ในห้องปฏิบัติการที่สภาวะแตกต่างกัน

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการจำนวน 4 ประเภทคือ

2.1 น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร

2.2 น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อีดีทีเอ จำนวน 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง เพื่อในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน

2.3 น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร

2.4 น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่อีดีทีเอ จำนวน 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล เพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน

3. ตัวแปรของการวิจัย

3.1 ตัวแปรคงที่ ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสีย วัดโดยเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอิมิสชันสเปกโตรสโคปีหรือไอซีพี (inductively couple plasma spectrometer; ICPS) (หน่วยวัด คือมิลลิกรัมต่อลิตร)

3.2 ตัวแปรอิสระ ได้แก่

3.1.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไดรด์ เป็นจำนวน 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 และ 2.15 เท่าของจำนวนโมลของทองแดง และ 0.44, 0.66, 0.88, 1.10, 1.32, 1.54, 1.76 และ 1.98 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

3.1.2 ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ เป็นจำนวน 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 และ 2.15 เท่าของจำนวนโมลของทองแดง และ 0.44, 0.66, 0.88, 1.10, 1.32, 1.54, 1.76 และ 1.98 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

3.1.3 ปริมาณโซเดียมไบซัลไฟต์ เป็นจำนวน 0.75, 1.25, 1.75 และ 2.50 เท่าของจำนวนโมลของทองแดง และ 0.66, 1.10, 1.54 และ 2.20 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

3.3 ตัวแปรตาม ได้แก่ ค่าความเข้มข้นของทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการเติมสารเคมีเพื่อให้ตกตะกอนโดยกรองเอาเฉพาะน้ำใสส่วนบน วัดค่าความเข้มข้นของโลหะที่เหลือโดยใช้เครื่อง ICPS หน่วยวัด คือมิลลิกรัมต่อลิตร

4. เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ มีดังนี้

4.1.1 เครื่องชั่งสารเคมีชนิด 4 ตำแหน่ง บริษัทผู้ผลิตเอเอ็นดี ประเทศ ญี่ปุ่น

4.1.2 ปิเปตขนาดต่างๆ

4.1.3 ขวดวัดปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร

4.1.4 ขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

4.1.5 บีกเกอร์ ขนาดต่างๆ

4.1.6 กระบอกตวง ขนาดต่างๆ

4.1.7 เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอิมิสชันสเปกโตรสโคปีหรือไอซีพี บริษัทผู้ผลิต Perkin Elmer รุ่น Optima 4300 DV)

4.1.8 เครื่องวัดค่าพีเอช บริษัทผู้ผลิตยูเทค (Eutech)

4.1.9 ชุดเครื่องมือถังปฏิกิริยาจำลอง (jar test) บริษัทผู้ผลิต VELP SCIENTIPICA รุ่น FP4

4.1.10 นาฬิกาจับเวลาคาซิโอ (Casio)

4.1.11 โถดูดความชื้น

4.1.12 กรวยแก้ว

4.1.13 กระดาษกรองเบอร์ 42 บริษัทผู้ผลิตวัอซแมน (Whatman)

4.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง มีดังนี้

4.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัทผู้ผลิต Merck

4.2.2 โซเดียมไบซัลไฟต์ ($NaHSO_3$) บริษัทผู้ผลิต Merck

4.2.3 โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) บริษัทผู้ผลิต Merck

4.2.4 คอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4.5H_2O$) บริษัทผู้ผลิต Carlo Erba

4.2.5 นิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.6H_2O$) บริษัทผู้ผลิต Carlo Erba

4.2.6 น้ำปราศจากไอออน

4.2.7 สารละลายบัฟเฟอร์ pH 4 และ pH 7

หมายเหตุ สารเคมีที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเกรดสำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการ (laboratory grade)

5. วิธีดำเนินการทดลอง

5.1 การบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

5.1.1 ชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4.5H_2O$) จำนวน 3.93 กรัมแล้วละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ทำเช่นเดียวกันทั้งหมดจำนวน 4 บีกเกอร์

วิธีการคำนวน

มวลโมเลกุลของ $CuSO_4.5H_2O$ = 249.5 กรัม/โมล

มีทองแดง = 63.5 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ $CuSO_4.5H_2O$ = 249.5/63.5 = 3.93 กรัม

ทองแดง 1000 มิลลิกรัม/ลิตร = 1/63.5 = 0.0157 โมล

5.1.2 เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 และ 2.15 โดยโมลของทองแดง ลงในบีกเกอร์แต่ละใบ ซึ่งบีกเกอร์แต่ละใบจะมีทองแดงอยู่ 1000 มิลลิกรัม หรือ 1.57×10^{-2} โมล ดังนั้นจะต้องเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 8×10^{-3}, 12×10^{-3}, 16×10^{-3}, 20×10^{-3}, 24×10^{-3}, 28×10^{-3}, 32×10^{-3} โมล และ 36×10^{-3} ตามลำดับ

5.1.3 นำมากวนเร็วประมาณ 10 นาทีด้วยถังปฏิกิริยาจำลองที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาทีพร้อมกันทั้ง 4 ตัวอย่าง

5.1.4 ตั้งทิ้งไว้จนตกตะกอนประมาณ 20 นาที

5.1.5 เทน้ำใสส่วนบนลงบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 24

5.1.6 นำน้ำเสียที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาทองแดงโดยใช้เครื่องไอซีพี

5.1.7 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.1.2-5.1.6 โดยเปลี่ยนในข้อ 5.1.1 เป็น

1) สารละลายของคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4.5H_2O$) จำนวน 3.93 กรัมและอีดีทีเอจำนวน 0.025 โมลของทองแดง หรือ 0.147 กรัม

2) สารละลายของนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.6H_2O$) จำนวน 4.478 กรัม

วิธีคำนวณ

มวลโมเลกุลของ $NiSO_4.6H_2O$ = 262.86 กรัม/โมล

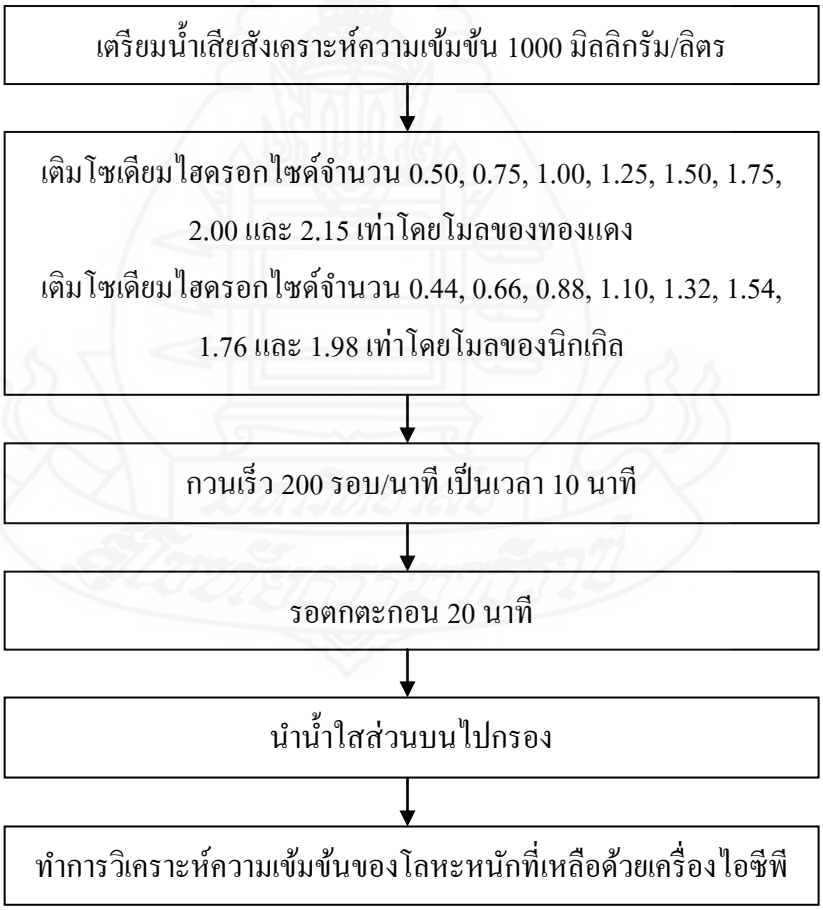
มีนิกเกิล = 58.70 กรัม

ดังนั้นต้องใช้ $NiSO_4.6H_2O$ = 262.86/58.70 = 4.478 กรัม

นิกเกิล 1000 มิลลิกรัม/ลิตร = 1/58.70 = 0.017 โมล

3) สารละลายของนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.6H_2O$) จำนวน 4.478 กรัมและอีดีทีเอจำนวน 0.022 โมลของนิกเกิล หรือ 0.140 กรัม

5.1.8 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์แสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

5.2 การบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

5.2.1 ชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4.5H_2O$) จำนวน 3.93 กรัมแล้วละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร ทำเช่นเดียวกันทั้งหมดจำนวน 4 บีกเกอร์

5.2.2 เตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 และ 2.15 เท่าโดยโมลของทองแดง ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ จำนวน 5 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงในบีกเกอร์แต่ละใบ บีกเกอร์แต่ละใบจะมีทองแดงอยู่ 1000 มิลลิกรัมหรือ 1.57×10^{-2} โมล ดังนั้นต้องเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 8×10^{-3}, 12×10^{-3}, 16×10^{-3},20×10^{-3}, 24×10^{-3}, 28×10^{-3}, 32×10^{-3}โมล และ 36×10^{-3} โมล ตามลำดับ

5.2.3 นำมากวนเร็วประมาณ 10 นาทีด้วยถังปฏิกิริยาจำลอง ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาทีพร้อมกันทั้ง 4 ตัวอย่าง

5.2.4 ตั้งทิ้งไว้จนตกตะกอนประมาณ 20 นาที

5.2.5 เทน้ำใสส่วนบนลงบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรองกรองเบอร์ 24

5.2.6 นำน้ำเสียที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาทองแดงโดยใช้เครื่องไอซีพี

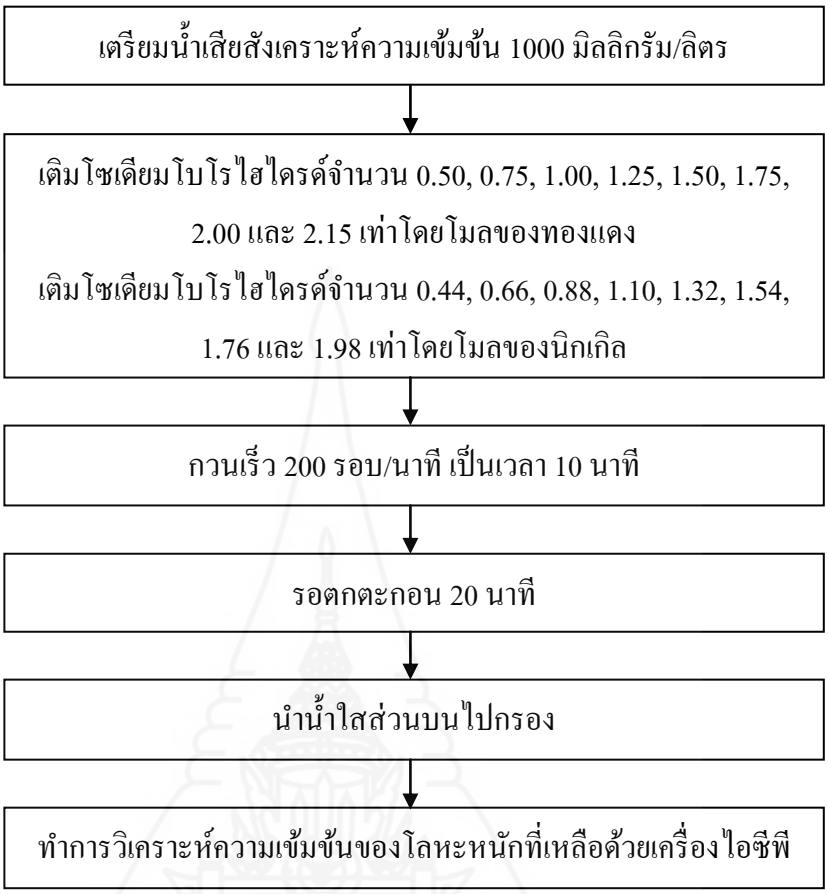
5.2.7 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.2.2-5.2.6 โดยเปลี่ยนในข้อ 5.2.1 เป็น

1) สารละลายของคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4.5H_2O$) จำนวน 3.93 กรัมและอีดีทีเอจำนวน 0.025 โมลของทองแดง หรือ 0.147 กรัม

2) สารละลายของนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.6H_2O$) จำนวน 4.478 กรัม

3) สารละลายของนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.6H_2O$) จำนวน 4.478 กรัมและอีดีทีเอจำนวน 0.022 โมลของนิกเกิล หรือ 0.140 กรัม

5.2.8 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์แสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

5.3 การบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์และโซเดียมไบซัลไฟต์ปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.3.1 ชั่งคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4.5H_2O$) จำนวน 3.93 กรัมแล้วละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนเทลงขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร จากนั้นเทลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร จำนวน 16 บีกเกอร์

5.3.2 ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 6 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

5.3.3 เตรียมสารละลายโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50, 0.75, 1.00 และ1.25 เท่าโดยโมลของทองแดงในโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ จำนวน 5 มิลลิลิตร จำนวน 4 ชุด สำหรับค่าพีเอช 6, 7, 8 และ 9 บีกเกอร์แต่ละใบจะมีทองแดงอยู่ 1000 มิลลิกรัม หรือ 1.57×10^{-2} โมล ดังนั้นต้องเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ จำนวน 8×10^{-3}, 12×10^{-3}, 16×10^{-3}โมลและ 20×10^{-3} โมล ตามลำดับ

5.3.4 นำมากวนเร็วประมาณ 10 นาทีด้วยถังปฏิกิริยาจำลอง ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาทีพร้อมกันทั้ง 4 ตัวอย่าง

5.3.5 ตั้งทิ้งไว้จนตกตะกอนประมาณ 20 นาที

5.3.6 เทน้ำใสส่วนบนลงบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง

5.3.7 นำน้ำเสียที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาทองแดงโดยใช้เครื่องไอซีพี

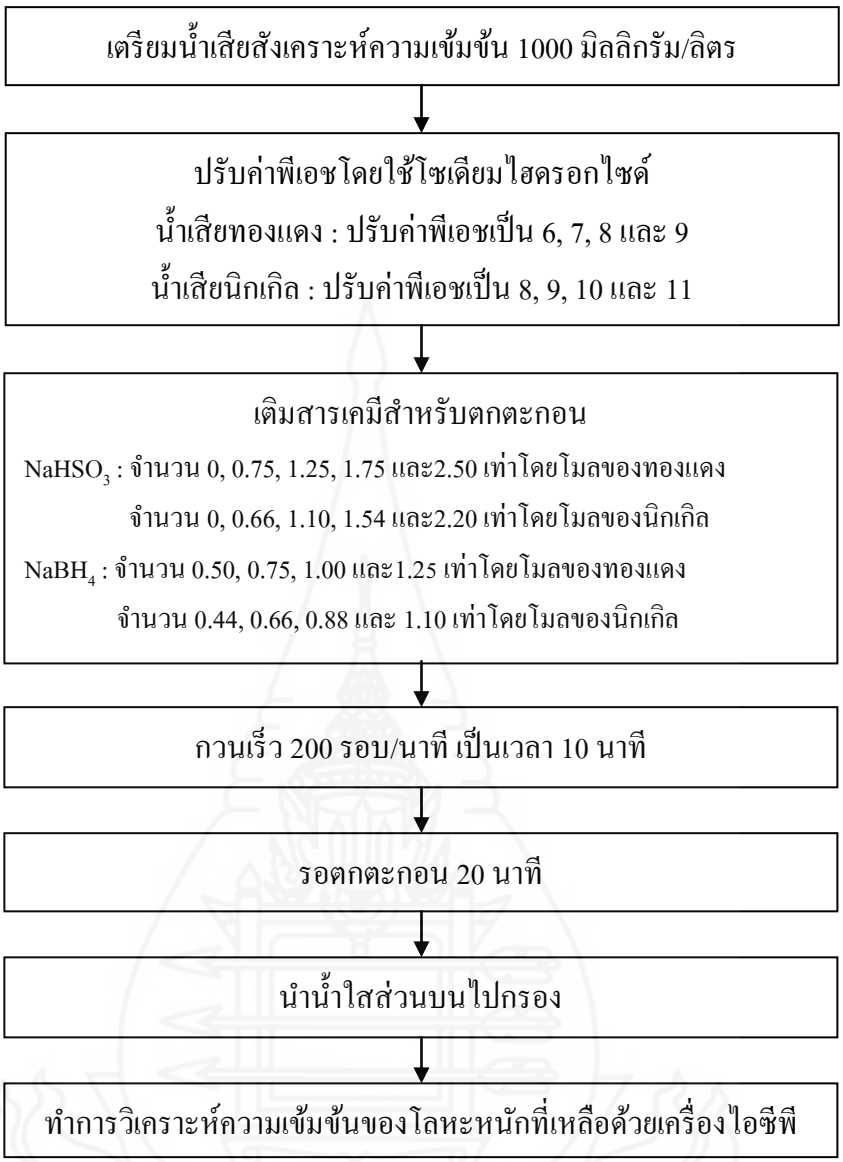
5.3.8 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 5.2.2-5.2.6 และเติมโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.75, 1.25, 1.75 และ2.50 เท่าโดยโมลของทองแดงหลังจากปรับค่าพีเอชของน้ำเสีย โดยเปลี่ยนชนิดของน้ำเสียในข้อ 5.3.1 เป็น

1) สารละลายของคอปเปอร์ซัลเฟต ($CuSO_4.5H_2O$) จำนวน 3.93 กรัมและอีดีทีเอจำนวน 0.025 โมลของทองแดง หรือ 0.147 กรัม

2) สารละลายของนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.6H_2O$) จำนวน 4.478 กรัม

3) สารละลายของนิกเกิลซัลเฟต ($NiSO_4.6H_2O$) จำนวน 4.478 กรัมและอีดีทีเอจำนวน 0.022 โมลของนิกเกิล หรือ 0.140 กรัม

5.3.9 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์และโซเดียมไบซัลไฟต์ปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แผนผังการทดลองบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์และโซเดียมไบซัลไฟต์ปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

6. การเก็บรวมรวมข้อมูล

6.1 ตรวจสอบเอกสารการสอบเทียบเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เครื่องชั่งสารเคมีชนิด 4 ตำแหน่ง เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอิมิสชันสเปกโตรสโคปีหรือไอซีพี และเครื่องวัดค่าพีเอช

6.2 การบันทึกข้อมูล บันทึกข้อมูลที่ได้จากการทดลองลงในแบบฟอร์มที่สร้างขึ้น

7. การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลจากการวิจัยนี้เป็นข้อมูลการวิจัยเชิงทดลอง โดยจะหาประสิทธิภาพกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียจากการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของการกำจัด (\% Removal)} = \frac{(\text{โลหะหนักในน้ำเสียก่อนบำบัด} - \text{โลหะหนักในน้ำเสียหลังบำบัด})}{\text{โลหะหนักในน้ำเสียก่อนบำบัด}} \times 100$$

7.1 วิเคราะห์ปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิดในการกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตและกราฟเส้น

7.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิด ที่ค่าพีเอชต่างๆ ด้วยสถิติ ร้อยละ

7.3 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิด

8. การคำนวนค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการทดลองนี้จะคิดจากค่าบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นต่อปริมาณน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์ลิตร

8.1 วิธีการคำนวนค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

ค่าบำบัดน้ำเสีย = ปริมาณ NaOH ที่ใช้ (กรัม) x ราคา NaOH (บาท/กรัม)

วิธีการคำนวนค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

กรณีไม่ปรับค่าพีเอช

ค่าบำบัดน้ำเสีย = ปริมาณ $NaBH_4$ ที่ใช้ (กรัม) x ราคา $NaBH_4$ (บาท/กรัม)

กรณีปรับค่าพีเอช

ค่าบำบัดน้ำเสีย = [ปริมาณ $NaBH_4$ ที่ใช้ (กรัม) x ราคา $NaBH_4$ (บาท/กรัม)] +
[ปริมาณ NaOH ที่ใช้ (กรัม) x ราคา NaOH (บาท/กรัม)]

8.2 วิธีการคำนวนค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์และปรับค่าพีเอชโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

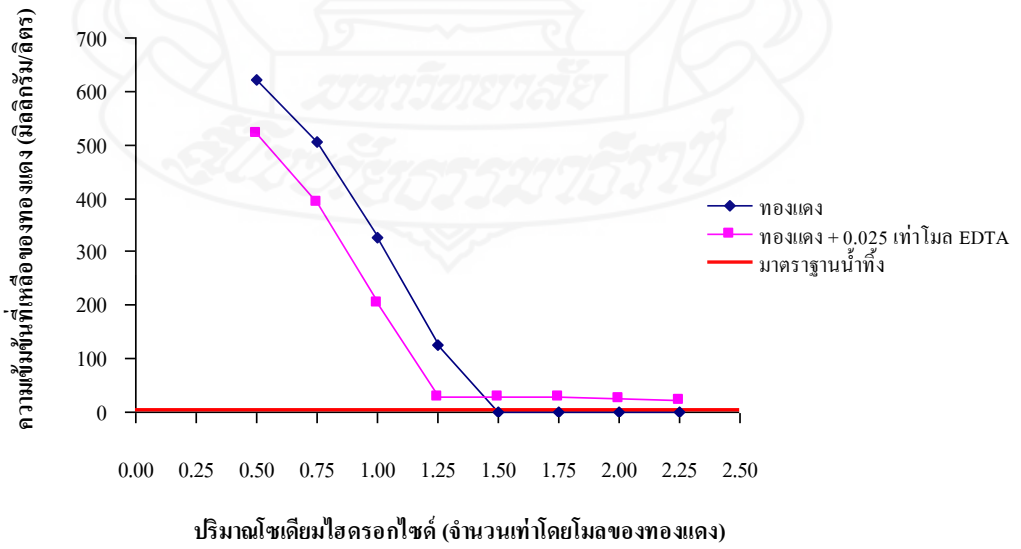
ค่าบำบัดน้ำเสีย = [ปริมาณ $NaBH_4$ ที่ใช้ (กรัม) x ราคา $NaBH_4$ (บาท/กรัม)] +
[ปริมาณ $NaHSO_3$ ที่ใช้ (กรัม) x ราคา $NaHSO_3$ (บาท/กรัม)] +
[ปริมาณ NaOH ที่ใช้ (กรัม) x ราคา NaOH (บาท/กรัม)]

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลจากการศึกษาถึงปริมาณที่เหมาะสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ใช้ในการกำจัดทองแดง นิกเกิลในน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง 0.022 เท่าโดยโมลของโลหะนิกเกิล รวมทั้งค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็น 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ปริมาณโซเดียมไบซัลไฟต์เป็น 0.75, 1.25, 1.75 และ2.50 เท่าโดยโมลของทองแดง 0.66, 1.10, 1.54 และ 2.20 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ปรับค่าพีเอช เป็น 4 ระดับ คือ 6, 7, 8 และ 9 สำหรับโลหะทองแดง และ ปรับค่าพีเอช เป็น 9, 10, 11 และ 12 สำหรับโลหะนิกเกิล รายละเอียดในการดำเนินการทดลองได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 หัวข้อที่ 5.1 – 5.3 ตามลำดับ

1. ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-1 สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือของทองแดงกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการกำจัดโลหะทองแดงในน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง แสดงในภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ

จากผลการทดลอง การกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณตั้งแต่ 1.50, 1.75, 2.00 และ 2.15 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมีค่า 0.34, 0.17, 0.12 และ 0.07 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.03, 0.03, 0.04 และ 0.04 บาท/ลิตร ตามลำดับ

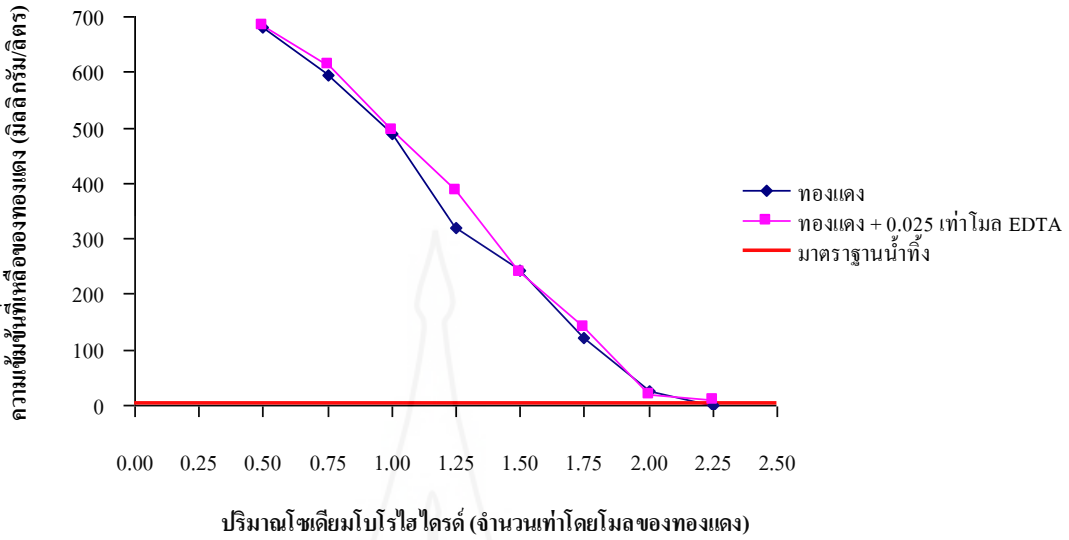
การกำจัดทองแดงในน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในปริมาณ 2.15 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 23.09 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.041 บาท/ลิตร ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะทองแดงโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

จำนวนโมลของ NaOH (เท่าโดยโมลของทองแดง)	ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือ (มก./ล)		ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ล)
	ทองแดง	ทองแดง+อีดีทีเอ	
0.50	622.10	522.60	0.01
0.75	506.70	391.70	0.01
1.00	327.30	203.60	0.02
1.25	124.50	27.07	0.02
1.50	0.34	26.87	0.03
1.75	0.17	26.78	0.03
2.00	0.12	26.45	0.04
2.25	0.07	23.09	0.04

2. ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-2 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือทองแดงกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง แสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ

จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮ-ไดรด์ปริมาณ 2.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงน้อยสุดเท่ากับ 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 20.18 บาท/ลิตร

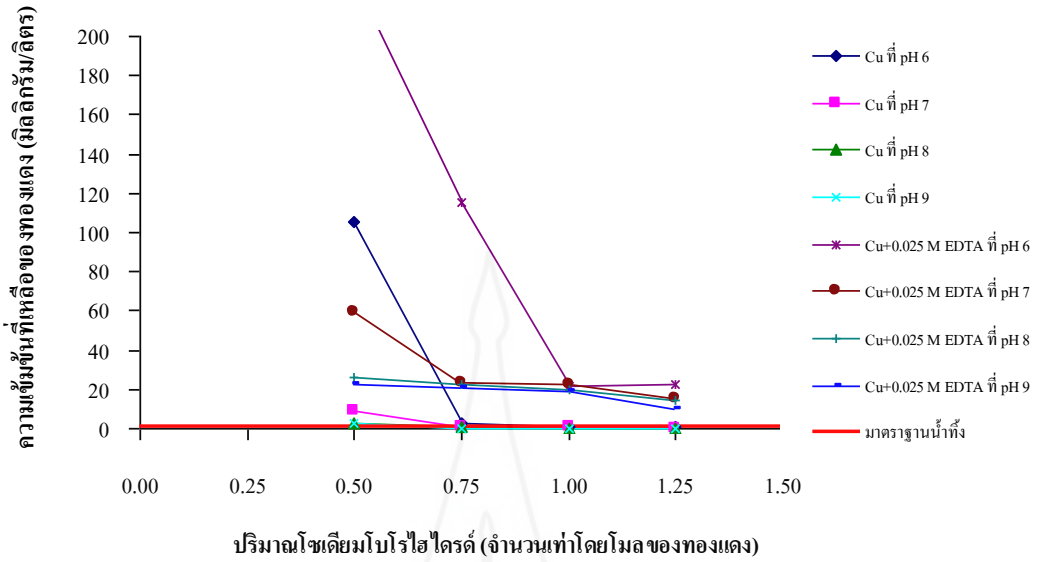
การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เพียงอย่างเดียวในปริมาณ 2.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงน้อยสุด 8.35 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 20.18 บาท/ลิตรแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะทองแดง โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

จำนวนโมลของ $NaBH_4$ (เท่าโดยโมล ของทองแดง)	ความเข้มข้นทองแดงที่เหลือ (มก./ล)		ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ล)
	ทองแดง	ทองแดง+อีดีทีเอ	
0.50	681.1	682.9	4.48
0.75	595.3	614.8	6.73
1.00	490.4	495.2	8.97
1.25	318.8	385.3	11.21
1.50	241.8	240.1	13.45
1.75	122	140.5	15.7
2.00	24.04	20.11	17.94
2.25	0.03	8.35	20.18

3. ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-3 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะทองแดงกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ในการกำจัดโลหะทองแดงในน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง แสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ

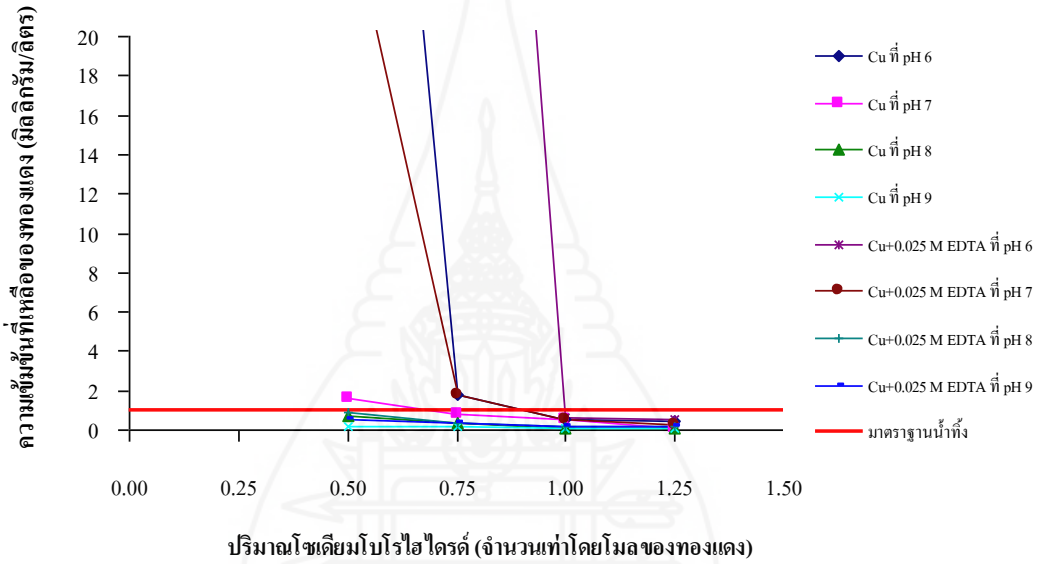
จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียโดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 1.11 และ 1.09 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 1.05, 0.68 และ 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.47, 0.12 และ 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.17, 0.07 และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร

การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณ 2.25 เท่าโดยโมลของทองแดง ทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 22.86, 15.34, 14.01 และ 9.61 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.3

4. ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-4 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะทองแดงกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัล-ไฟต์ที่ปริมาณ 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดง ที่พีเอช 6, 7, 8 และ 9 ในการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง แสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกันร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดง

จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ปริมาณ 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดง ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณตั้งแต่ 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 1.76, 0.54 และ 0.44 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 1.64, 0.79, 0.53 และ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.72, 0.34, 0.07 และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับปรับพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75,

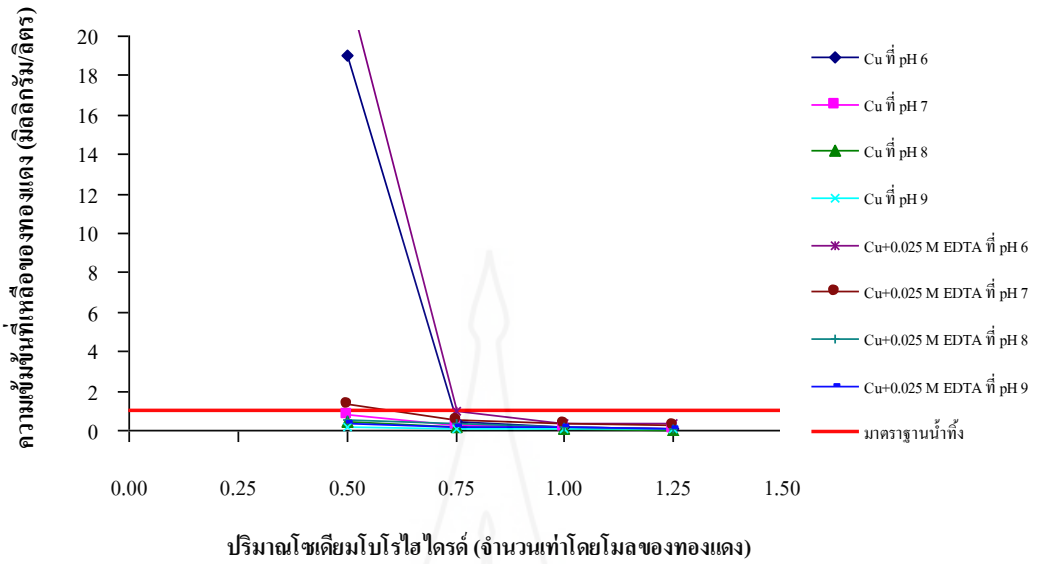
1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.20, 0.14, 0.06 และ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ปริมาณ 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดง ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณตั้งแต่ 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.67 และ 0.52 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 1.79, 0.54 และ 0.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.93, 0.36, 0.22 และ 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.52, 0.37, 0.22 และ 0.18 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.3

5. ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-5 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะทองแดงกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ในการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง แสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกัน ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง

จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ปริมาณ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณตั้งแต่ 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.42, 0.16 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.77, 0.27, 0.15 และ 0.07 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.47, 0.19, 0.06 และ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.17, 0.11, 0.06 และ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

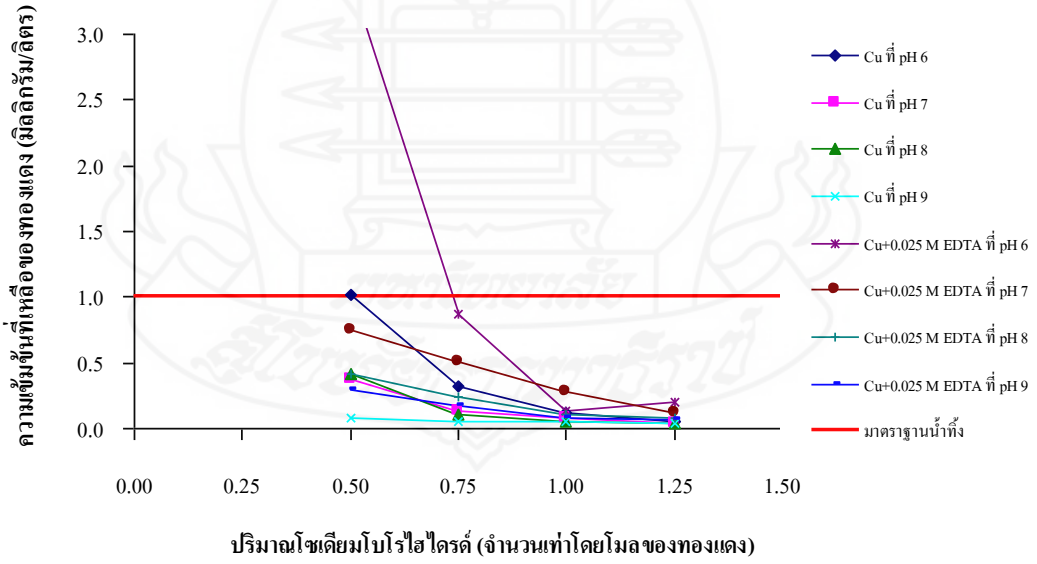
การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ปริมาณ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณตั้งแต่ 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.95, 0.37 และ 0.36 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25

เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 1.37, 0.52, 0.36 และ 0.23 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.51, 0.33, 0.14 และ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.38, 0.20, 0.14 และ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.3

6. ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.75 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-6 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะทองแดงกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัล-ไฟต์ที่ปริมาณ 1.75 เท่าโดยโมล ของทองแดง ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ในการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง แสดงในภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกัน ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.75 เท่าโดยโมลของทองแดง

จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ปริมาณ 1.75 เท่าโดยโมลของทองแดง ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณตั้งแต่ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 1.02, 0.33, 0.12 และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.38, 0.14, 0.08 และ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.41, 0.11, 0.05 และ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบ-โรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.08, 0.06, 0.05 และ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

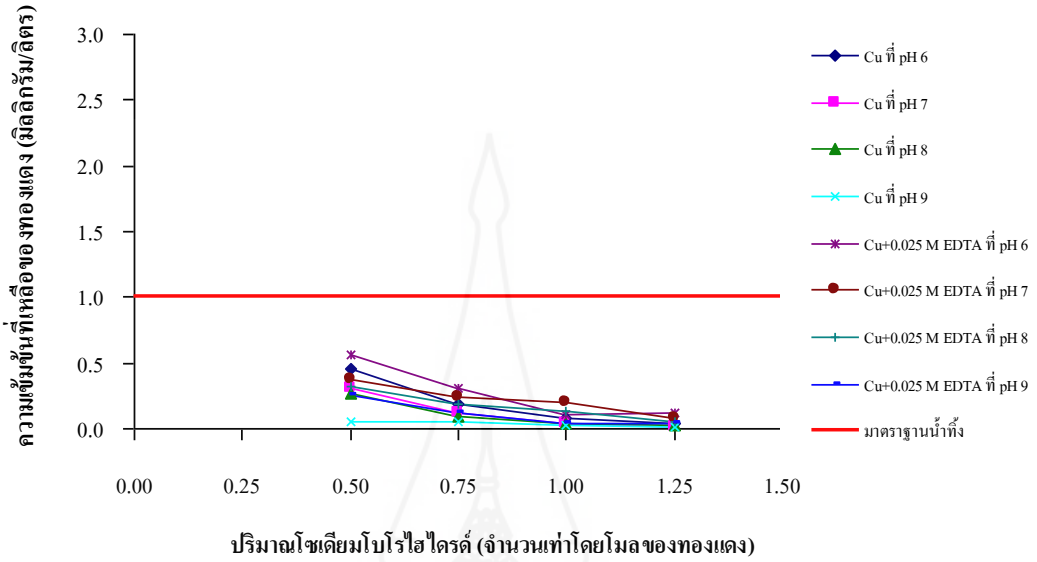
การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ปริมาณ 1.75 เท่าโดยโมลของทองแดง ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณตั้งแต่ 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.86, 0.13 และ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ปริมาณ0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.75, 0.50, 0.26 และ 0.12 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.42, 0.25, 0.11 และ 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.29, 0.17, 0.08 และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.3

7. ผลการทดลองการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-7สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะทองแดงกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัล-

ไฟต์ที่ปริมาณ 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดง ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ในการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่การเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง แสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกัน ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดง

จากผลการทดลองการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ปริมาณ 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดง ปรับพีเอชเท่ากับ 6 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ปริมาณตั้งแต่ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.46, 0.19, 0.08 และ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.31, 0.12, 0.04 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.27, 0.09, 0.04 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.05, 0.05, 0.03 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร

การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ปริมาณ 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดง ปรับพีเอชเท่ากับ 6, 7, 8 และ 9 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณตั้งแต่ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมล

ของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.56, 0.31, 0.11 และ 0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 7 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.37, 0.25, 0.20 และ 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮ-ไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงมี 0.32, 0.18, 0.13 และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.50, 0.75, 1.00 และ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะทองแดงเท่ากับ 0.25, 0.13, 0.04 และ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

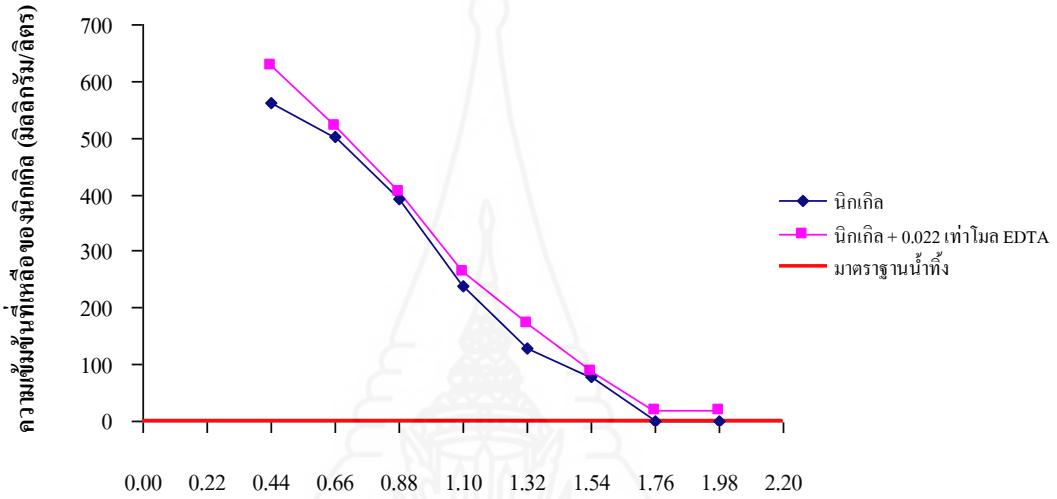
ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าใช้จ่ายในการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียและทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงที่สภาวะต่างๆ

ค่าพีเอช	จำนวนโมลของ $NaBH_4$	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียรวม (บาท/ลิตร)				
		$NaHSO_3$ 0 เท่าโมล	$NaHSO_3$ 0.75 เท่าโมล	$NaHSO_3$ 1.25 เท่าโมล	$NaHSO_3$ 1.75 เท่าโมล	$NaHSO_3$ 2.50 เท่าโมล
6	0.50	4.51	4.60	4.67	4.73	4.83
	0.75	6.75	6.84	6.91	6.97	7.06
	1.00	8.98	9.08	9.14	9.20	9.30
	1.25	11.22	11.32	11.38	11.44	11.54
7	0.50	4.51	4.61	4.68	4.75	4.86
	0.75	6.75	6.85	6.92	6.99	7.10
	1.00	8.99	9.09	9.16	9.23	9.33
	1.25	11.22	11.33	11.40	11.47	11.57
8	0.50	4.51	4.61	4.69	4.77	4.88
	0.75	6.75	6.86	6.93	7.01	7.12
	1.00	8.99	9.10	9.17	9.25	9.36
	1.25	11.23	11.34	11.41	11.49	11.60
9	0.50	4.51	4.62	4.70	4.78	4.90
	0.75	6.75	6.87	6.94	7.02	7.14
	1.00	8.99	9.11	9.19	9.26	9.37
	1.25	11.24	11.35	11.43	11.50	11.61

8. ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-8 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะนิกเกิลกับปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ ของการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล แสดงในภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.8 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ

จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียง ปริมาณ 1.76 และ 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมีค่า 0.08 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.04 บาท/ลิตร

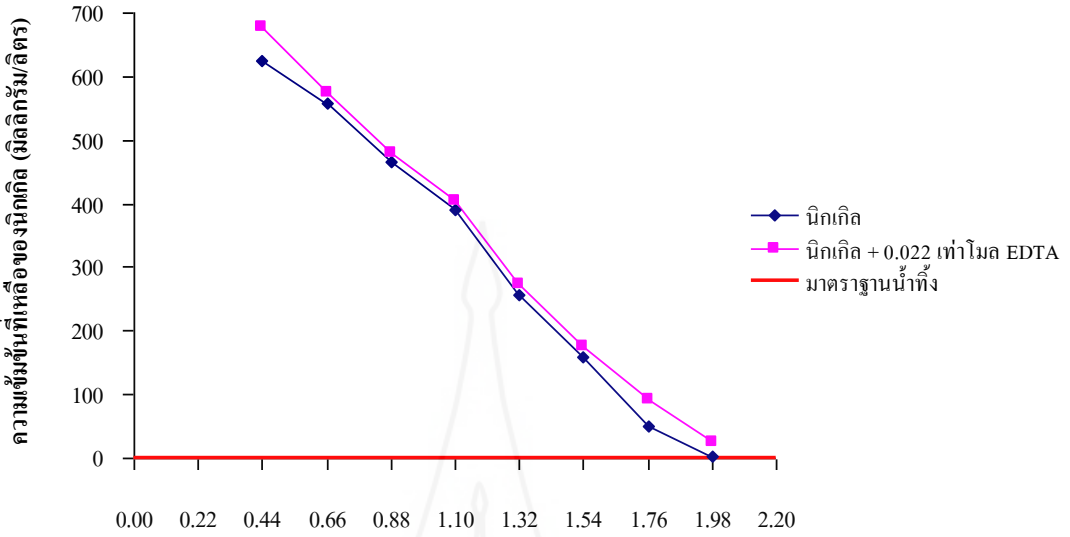
การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 19.85 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.04 บาท/ลิตร ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะนิกเกิล โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

จำนวนโมลของ NaOH (เท่าโดยโมลของนิกเกิล)	ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือ (มก./ล)		ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ล)
	นิกเกิล	นิกเกิล+อีดีทีเอ	
0.44	562.60	628.20	0.01
0.66	502.90	521.50	0.01
0.88	393.60	405.70	0.02
1.10	238.80	264.20	0.02
1.32	127.80	172.50	0.03
1.54	76.99	87.30	0.03
1.76	0.08	19.80	0.04
1.98	0.02	19.85	0.04

9. ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-9 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะนิกเกิลกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ของการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล แสดงในภาพที่ 4.9



ภาพที่ 4.9 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ

จากผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณ 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 3.45 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 19.17 บาท/ลิตร

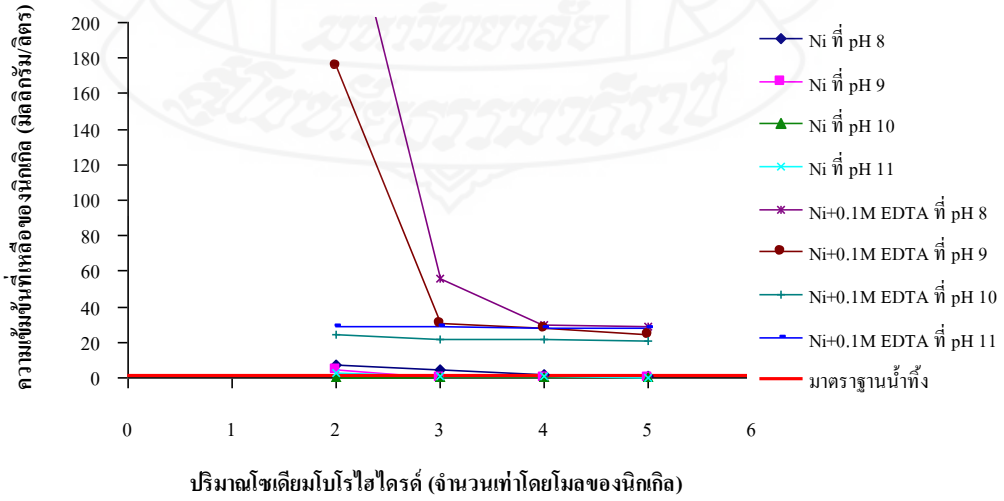
การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.22 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ปริมาณ 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 23.84 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 19.17 บาท/ลิตร ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายในการตกตะกอนโลหะนิกเกิล โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

จำนวนโมลของ $NaBH_4$ (เท่าโดยโมลของนิกเกิล)	ความเข้มข้นนิกเกิลที่เหลือ (มก./ล)		ค่าใช้จ่ายรวม (บาท/ล)
	นิกเกิล	นิกเกิล+อีดีทีเอ	
0.44	625.60	676.70	4.26
0.66	556.40	574.30	6.39
0.88	466.70	479.40	8.52
1.10	389.80	405.70	10.65
1.32	255.20	273.60	12.78
1.54	159.30	176.40	14.91
1.76	49.44	91.01	17.04
1.98	3.45	23.84	19.17

10. ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-10 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะนิกเกิลกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ของการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล แสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ

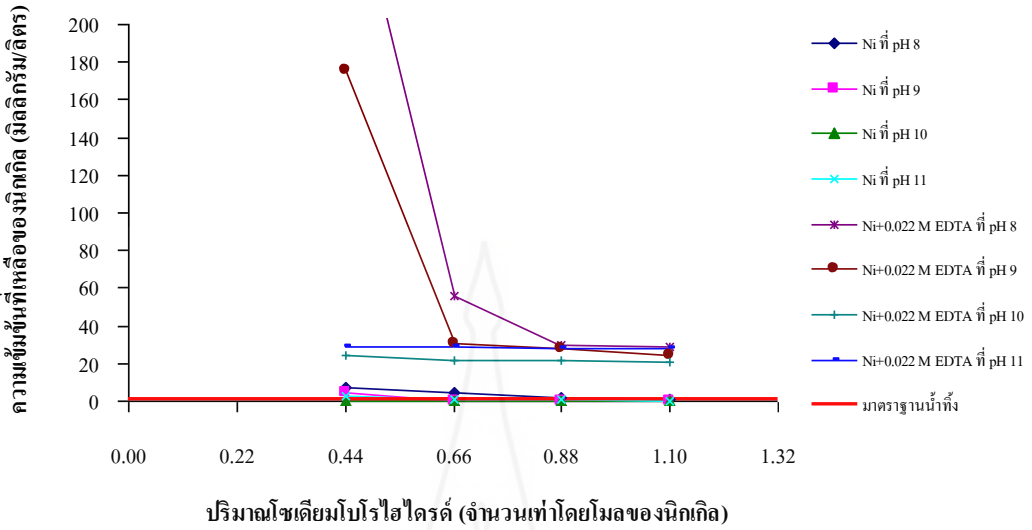
จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยปรับพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.92 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.66, 0.88 และ 0.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.40, 0.28 และ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 10 และใช้โซเดียม-โบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.17, 0.11, 0.03 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 11 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.87 และ 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับพีเอชเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมีค่า 22.98, 24.41, 21.07 และ 27.99 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.6

11. ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.66 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-11 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะนิกเกิลกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.66 เท่าโดยโมล ของนิกเกิล ที่ค่าพีเอช 8, 9, 10 และ 11 ของการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล แสดงในภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกัน ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.66 เท่าโดยโมลของนิกเกิล

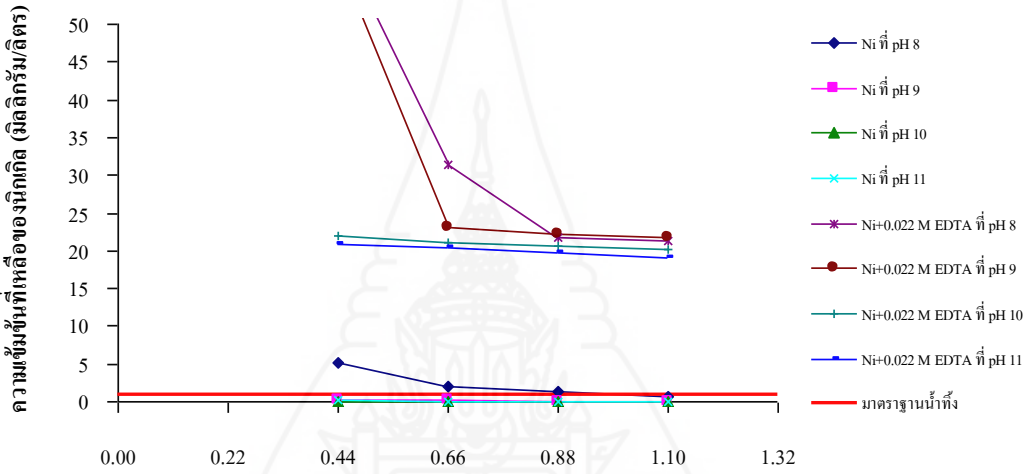
จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.66 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.78 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.28, 0.15, 0.09 และ 0.06 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 10 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.04, 0.03, 0.01 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 11 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.15, 0.06, 0.02 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.66 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณ 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมีค่า 21.27, 21.86, 21.19 และ 19.02 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.6

12. ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-12 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะนิกเกิลกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัล-ไฟต์ที่ปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมล ของนิกเกิล ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ของการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล แสดงในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆกัน ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล

จากผลการทดลอง การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.621 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.22, 0.13, 0.09 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 10 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.04, 0.02, 0.01, และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอช เท่ากับ 11 และใช้

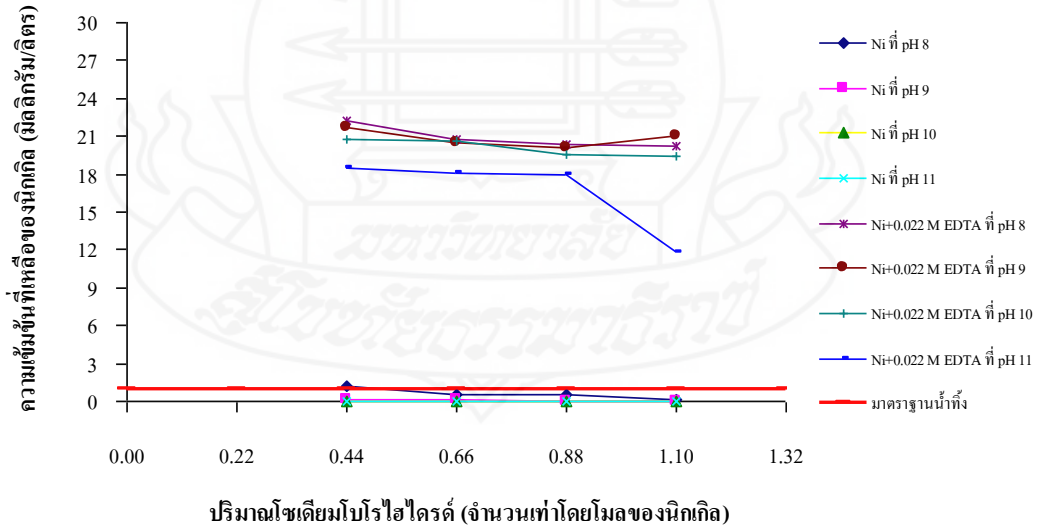
โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.02, 0.02, 0.02 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมีค่า 21.00, 21.25, 19.51 และ 18.59 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.6

13. ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-13 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะนิกเกิลกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.54 เท่าโดยโมล ของนิกเกิล ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ของการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล แสดงในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิล

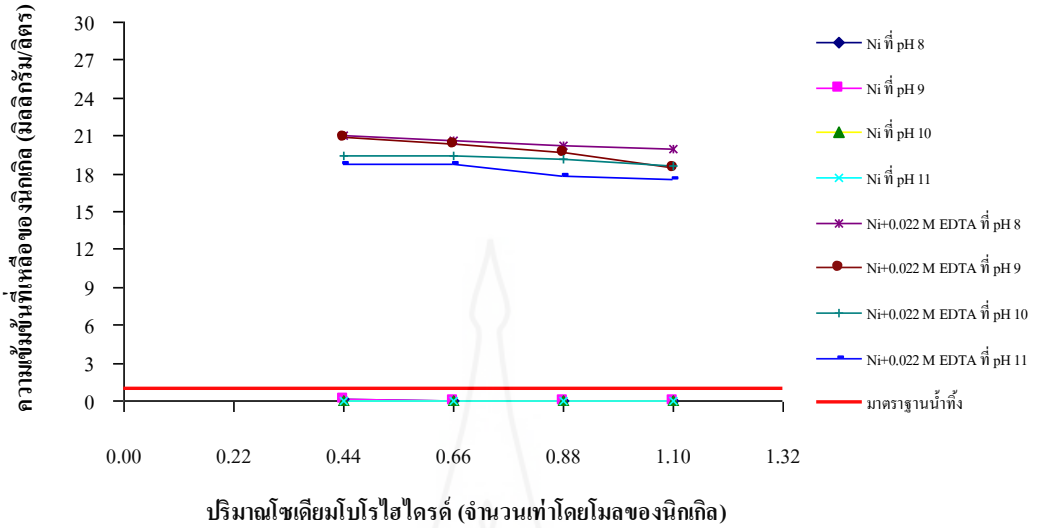
จากผลการทดลอง การกำจัดน้ำเสียที่มีโลหะนิกเกิลโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.51, 0.49 และ 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.12, 0.12, 0.06 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอชเท่ากับ 10 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.03, 0.02, 0.01 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 11 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.02, 0.02, 0.01 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมีค่า 20.26, 21.08, 19.37 และ 11.80 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.6

14. ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.20 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ

ข้อมูลจากภาคผนวกในตารางที่ ข-14 สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่เหลือโลหะนิกเกิลกับปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.20 เท่าโดยโมล ของนิกเกิล ที่ค่าพีเอช 8, 9, 10 และ 11 ของการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล แสดงในภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลที่ปริมาณของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ต่างๆร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.20 เท่าโดยโมลของนิกเกิล

จากผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.20 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับพีเอชเท่ากับ 8 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.11, 0.02, 0.02 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 9 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.09, 0.06, 0.06 และ 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับค่าพีเอชเท่ากับ 10 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.016, 0.015, 0.010 และ 0.008 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ปรับพีเอช เท่ากับ 11 และใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ ในปริมาณ 0.44, 0.66, 0.88 และ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมี 0.02, 0.02, 0.01 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยการใช้โซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล โดยปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8, 9, 10 และ 11 ร่วมกับโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ทำให้ความเข้มข้นที่เหลือของโลหะนิกเกิลมีค่า 19.99, 18.44, 18.59 และ 17.54 มิลลิกรัม/ลิตรตามลำดับ

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สรุปค่าใช้จ่ายในการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของทองแดงที่สภาวะต่างๆ

ค่าพีเอช	จำนวนโมลของ $NaBH_4$	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียรวม (บาท/ลิตร)				
		$NaHSO_3$ 0 เท่าโมล	$NaHSO_3$ 0.66 เท่าโมล	$NaHSO_3$ 1.10 เท่าโมล	$NaHSO_3$ 1.54 เท่าโมล	$NaHSO_3$ 2.20 เท่าโมล
8	0.44	4.29	4.39	4.47	4.55	4.65
	0.66	6.42	6.51	6.6	6.68	6.78
	0.88	8.54	8.64	8.73	8.8	8.9
	1.10	10.67	10.77	10.86	10.93	11.03
9	0.44	4.29	4.4	4.48	4.56	4.66
	0.66	6.42	6.52	6.61	6.69	6.78
	0.88	8.55	8.65	8.74	8.81	8.91
	1.10	10.68	10.78	10.86	10.93	11.04
10	0.44	4.3	4.4	4.48	4.57	4.66
	0.66	6.42	6.53	6.61	6.69	6.79
	0.88	8.55	8.66	8.74	8.82	8.92
	1.10	10.68	10.78	10.87	10.95	11.04
11	0.44	4.32	4.43	4.52	4.59	4.69
	0.66	6.45	6.56	6.64	6.72	6.82
	0.88	8.58	8.68	8.77	8.84	8.95
	1.10	10.71	10.81	10.9	10.97	11.08

15. สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอ

จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์โดยคุณภาพของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งโลหะทองแดงที่เหลือต่ำกว่า 2 มิลลิกรัม/ลิตร และโลหะนิกเกิลเหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตรสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสีย

ชนิดของน้ำเสีย	พีเอช	ปริมาณ NaOH (เท่าโดยโมลของโลหะ)	ปริมาณ $NaBH_4$ (เท่าโดยโมลของโลหะ)	ปริมาณ $NaHSO_4$ (เท่าโดยโมลของโลหะ)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มล./ล.)	ร้อยละการกำจัด	ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย (บาท/ลิตร)
ทองแดง	**ไม่ปรับ**	**1.50**	**-**	**-**	**0.08**	**100.00**	**0.03**
	ไม่ปรับ	1.75	-	-	0.02	100.00	0.03
	ไม่ปรับ	-	2.25	-	0.03	100.00	20.18
	6	-	1.00	-	1.12	99.90	8.98
	7	-	0.75	-	1.05	99.90	6.74
	6	-	0.75	0.75	1.76	99.80	6.84
	7	-	0.50	0.75	1.64	99.80	4.61
ทองแดง + อีดีทีเอ	6	-	1.00	0.75	0.67	99.90	9.08
	7	-	0.75	0.75	1.79	99.80	6.85
	8	**-**	**0.50**	**0.75**	**0.93**	**99.90**	**4.61**
นิกเกิล	**-**	**1.76**	**-**	**-**	**0.08**	**100.00**	**0.04**
		1.98	-	-	0.02	100.00	0.04
	8	-	1.10	-	0.92	99.90	10.67
	9	-	0.66	-	0.40	100.00	6.42
	10	-	0.44	-	0.17	100.00	4.29
	9	-	0.44	0.66	0.28	100.00	4.39
	10	-	0.44	0.66	0.04	100.00	4.40
นิกเกิล+อีดีทีเอ	ไม่มีสภาวะใดที่สามารถกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง						

หมายเหตุ ตัวหนาหมายถึงสภาวะที่ความเข้มข้นของโลหะทองแดงและนิกเกิลหลังการบำบัดผ่านตามมาตรฐานน้ำทิ้งและมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้อยที่สุด

บทที่ 5
สรุปการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาการตกตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ทองแดง นิกเกิล น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงที่มีการเติมสารอีดีทีเอ และน้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลที่มีการเติมสารอีดีทีเอ เพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งอีดีทีเอที่เติมลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนของสารคีเลตหรือลิแกนด์ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะในน้ำเสีย สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นน่าจะมีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก ด้วยกระบวนการรีดักชันและการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการตกตะกอน กับการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สรุปการวิจัย

1.1 วัตถุประสงค์การวิจัย

ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลที่มีการเติมสารอีดีทีเอออกจากน้ำเสีย ด้วยการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และกระบวนการรีดักชันโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์ และเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลที่มีการเติมสารอีดีทีเอ

1.2 วิธีดำเนินการวิจัย

1.2.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากห้องปฏิบัติการจำนวน 4 ประเภทคือ

1) น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร
2) น้ำเสียสังเคราะห์ทองแดงความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีอีดีทีเอจำนวน 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง เพื่อในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน
3) น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร
4) น้ำเสียสังเคราะห์นิกเกิลความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัม/ลิตร ที่มีอีดีทีเอจำนวน 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล เพื่อให้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน

1.2.2 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง การทดลองแบ่งออกเป็นดังนี้

1) การตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 0.50-2.25 เท่าของจำนวนโมลของทองแดงในน้ำเสียและ 0.44-1.98 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสีย

2) รีดิวซ์และตกตะกอนโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50-1.25 เท่าของจำนวนโมลของทองแดงในน้ำเสียและ 0.44-1.10 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสีย

3) รีดิวซ์และตกตะกอนโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50-1.25 เท่าของจำนวนโมลของทองแดงและ 0.44-1.10 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.75-2.50 เท่าของจำนวนโมลของทองแดงและ 0.66-2.20 เท่าของจำนวนโมลของนิกเกิลในน้ำเสีย

1.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลจากการวิจัยนี้เป็นข้อมูลการวิจัยเชิงทดลอง โดยจะหาประสิทธิภาพกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลในน้ำเสียจากการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของการกำจัด (\% Removal)} = \frac{(\text{โลหะหนักในน้ำเสียก่อนบำบัด} - \text{โลหะหนักในน้ำเสียหลังบำบัด})}{\text{โลหะหนักในน้ำเสียก่อนบำบัด}} \times 100$$

1) ***วิเคราะห์ปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิด***ในการกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยค่าเฉลี่ยเลขคณิตและกราฟเส้น

2) ***เปรียบเทียบประสิทธิภาพ***ในการกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิดและค่าพีเอชต่างๆ ด้วยสถิติ ร้อยละ

3) ***เปรียบเทียบค่าใช้จ่าย***ในการกำจัดโลหะทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปริมาณของสารเคมีแต่ละชนิด

1.3 ผลการวิจัย

1.3.1 การกำจัดโลหะหนักโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

ผลการทดลองกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 1.50 เท่าโดยโมลของทองแดง สามารถกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้นเท่ากับ 0.34 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 100.0 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.03 บาท/ลิตร สำหรับน้ำเสียทองแดงที่มีสารละลายอีดีทีเอผสมอยู่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 2.25 เท่าโดยโมลของทองแดงสามารถกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น

23.09 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 97.7 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.04 บาท/ลิตร

ผลการทดลองกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้นเท่ากับ 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 100.0 สำหรับน้ำเสียนิกเกิลที่มีสารละลายอีดีทีเอผสมอยู่ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิลสามารถกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น 19.85 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 98.0 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.04 บาท/ลิตร

1.3.2 การกำจัดโลหะหนักโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

ผลการทดลองกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 2.25 เท่าโดยโมลของทองแดงสามารถกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 100.0 สำหรับน้ำเสียทองแดงที่มีสารละลายอีดีทีเอผสมอยู่ ใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 2.25 เท่าโดยโมลของทองแดงสามารถกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น 8.35 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 99.2 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 20.18 บาท/ลิตร

ผลทดลองตกตะกอนโลหะนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิล สามารถกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น 3.45 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 99.7 สำหรับการทดลองตกตะกอนโลหะนิกเกิลที่มีสารละลายอีดีทีเอผสมอยู่ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิลสามารถกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น 23.84 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 97.6 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 19.17 บาท/ลิตร

1.3.3 การกำจัดโลหะหนักโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์และปรับค่าพีเอช

ผลการทดลองกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียโดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50 เท่าโดยโมลของทองแดงและโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดง ที่ค่า พีเอชเท่ากับ 7 สามารถกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น 1.64 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 99.84 สำหรับการทดลองกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีสารละลายอีดีทีเอผสมอยู่ด้วยโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.50 เท่าโดยโมลของทองแดง และโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดง ที่พีเอชเท่ากับ 8 สามารถกำจัดทองแดง

ออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น 0.93 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 99.91 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 4.61 บาท/ลิตร

ผลการทดลองกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 0.44 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ที่พีเอช 10 สามารถกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้น 0.17 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 99.98 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 4.29 บาท/ลิตร สำหรับการทดลองการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีสารละลายอีดีทีเอผสมอยู่โดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิลและโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ที่พีเอช 11 สามารถกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียให้เหลือความเข้มข้นเท่ากับ 11.80 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 98.8 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 10.97 บาท/ลิตร

2. อภิปรายผล

2.1 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่มีอีดีทีเอ ด้วยการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และกระบวนการรีดักชันโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ โซเดียมไบซัลไฟต์

ผลการทดลองกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ พบว่าสามารถกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียทองแดงด้วยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวจำนวน 1.50 เท่าโดยโมลของทองแดง ทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 4.14 เป็น 8.1 ซึ่งเป็นสภาวะที่โลหะทองแดงละลายน้ำได้น้อยและตกตะกอนอยู่ในรูปของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ตามทฤษฎีสภาพการละลายได้ของโลหะไฮดรอกไซด์ (Cherry, 1982) เหลือความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 0.34 มิลลิกรัม/ลิตร

การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียทองแดงที่มีการเติมสารอีดีทีเอพบว่าไม่สามารถกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียให้เหลือน้อยกว่า 2 มิลลิกรัม/ลิตรตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2539) โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว ถึงแม้จะมีการเติมไปจนทำให้มีค่าพีเอชอยู่ที่ประมาณ 8 ก็ตาม เนื่องจากการเติมอีดีทีเอลงไปจะทำให้ทองแดงอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนทำให้ไม่สามารถตกตะกอนได้ในช่วงพีเอช 8 (Steven, 1994) เมื่อทำการตกตะกอนโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์พบว่าเมื่อมีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 6 (มณีรัตน์, 2542) แล้วเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.00 เท่าโดยโมลของ

ทองแดงจะสามารถกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอให้เหลือความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 1.11 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

จากผลการทดลองพบว่าที่พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น 3.34-4.13 หลังมีการเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ลงไปจนทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้นแต่ไม่เกิน 6 ซึ่งทองแดงส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไอออนที่ละลายน้ำได้ โบโรไฮไดรด์ที่เติมลงไปจะไปรีดิวซ์คอปเปอร์ไอออนให้เป็นโลหะทองแดงได้ตามสมการ

$$BH_4^- + 4Cu^{2+} + 2H_2O \longrightarrow 4Cu^0 + BO_2^- + 8H^+$$

เมื่อเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจนค่าพีเอชของน้ำสูงกว่า 7 จะทำให้ Cu^{2+} สามารถตกตะกอนในรูปคอปเปอร์ (II) ออกไซด์ตามสมการ (Leckie and Davis III, 1980)

$$Cu^{2+} + 2OH^- \longrightarrow CuO_{(s)} + H_2O$$

ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้เร็วและอัดตัวแน่นกว่าการตกตะกอนในรูปคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ เนื่องจากคอปเปอร์ (II) ออกไซด์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 6.3 มากกว่าคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.3

กลไกที่เกิดขึ้นหลังการเติมโซเดียมไบซัลไฟต์และโซเดียมโซเดียมโบโรไฮไดรด์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นโซเดียมเดียมไดไธโอไนต์ ($Na_2S_2O_4$) (Lindsay and Hackman, 1985)

$$8NaHSO_3 + NaBH_4 \longrightarrow 4Na_2S_2O_4 + NaBO_2 + 6H_2O$$

ไดไธโดไนต์ที่เกิดขึ้นบางส่วนจะรีดิวซ์ Cu^{2+} เป็น Cu^+ ดังสมการ

$$Na_2S_2O_4 + 2Cu^{2+} + 2H_2O \longrightarrow 2Cu^+ + 2NaHSO_3 + 2H^+$$

โบโรไฮไดรด์จะรีดิวซ์ Cu^+ ให้เป็น Cu^0 ดังสมการด้านบนซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว

$$NaBH_4 + 8Cu^+ + 2H_2O \longrightarrow 8Cu^0 + NaBO_2 + 8H^+$$

จากผลการทดลองเมื่อมีการเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์และโซเดียมไบซัลไฟต์และมีการปรับค่าพีเอชพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะนักเพิ่มมากขึ้นโดย โซเดียมไบซัลไฟต์จะทำหน้าที่รีดิวซ์สารออกซิไดซ์ต่างๆที่อยู่ในน้ำเสียก่อนเติมโซเดียมโบโรไฮไดรด์เนื่องจากปฏิกิริยาของโซเดียมโบโรไฮไดรด์จะเป็นภาวะรีดักชันและช่วยให้ตะกอนที่เกิดขึ้นรวมตัวกันได้ดี ตะกอนรวมตัวกันได้ดีกว่าการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เพียงอย่างเดียว

การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียนิกเกิลโดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวจำนวน 1.76 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ทำให้ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 5.09 เป็น 10.81 ซึ่งเป็นสภาวะที่โลหะนิกเกิลละลายน้ำได้น้อยและตกตะกอนอยู่ในรูปของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ตามทฤษฎีสภาพการละลายได้ของโลหะไฮดรอกไซด์ (Cherry, 1982) เหลือความเข้มข้นของนิกเกิลเท่ากับ 0.08 มิลลิกรัม/ลิตร

การกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอพบว่าไม่สามารถกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียให้เหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตรตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานไม่ว่าจะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมโบโรไฮไดรด์ โซเดียมไบซัลไฟต์ และปรับพีเอชอยู่ที่ระดับต่างๆ สาเหตุอาจเนื่องมาจากการเติมอีดีทีเอลงไปในน้ำเสียทำให้นิกเกิลอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน โดยอีดีทีเอซึ่งเป็นสารคีเลตอาจจะเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของสารที่เติมลงไปเพื่อให้เกิดการตกตะกอน จากการทดลองสามารถกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมอีดีทีเอให้เหลือความเข้มข้นน้อยที่สุดเท่ากับ 11.80 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อใช้โซเดียโบโรไฮไดรด์ โซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 1.10 และ 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิลตามลำดับ และปรับพีเอชเท่ากับ 11

Flemimg and Ulman, 1985 พบว่าปฏิกิริยาระหว่างนิกเกิลไอออนและโบโรไฮไดรด์ไอออนสามารถเกิดเป็นนิกเกิลโบไรด์ (Ni_2B) หรือโลหะนิกเกิล (Ni^0) ก็ได้ตามสมการการเกิดปฏิกิริยา 3 แบบดังต่อไปนี้

$$Ni^{2+} + 2BH_4 + 4.5H_2O \longrightarrow 0.5Ni_2B + H_3BO_3 + 6.25H_2$$

$$4Ni^{2+} + BH_4 + 2H_2O \longrightarrow 4Ni^0 + BO_2^- + 8H^+ \quad (pH<7)$$

$$4Ni^{2+} + BH_4 + 8OH^- \longrightarrow 4Ni^0 + BO_2^- + 6H_2O \quad (pH>7)$$

Khurana and Gogia, 1997 สรุปผลการทดสอบผิวของตะกอนนิกเกิลที่เกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมโบโรไฮไดรด์กับนิกเกิลคลอไรด์ด้วยวิธี เอ็กซเรย์ โฟโตอิเล็กตรอน

สเปคโตรสโคปี (XPS) พบว่าประกอบไปด้วยโลหะนิกเกิล (Ni^0) นิกเกิลโบไรด์ (Ni_2B) และโซเดียมบอเรต ($NaBO_2$) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของโวเดียมโบโรไฮไดรด์โดยมีนิกเกิลโบไรด์ที่เกิดขึ้นเป็นตัวคะตะลิตส์ดังสมการ

$$NaBH_4 + 2H_2O \xrightarrow{Ni_2B} NaBO_2 + 4H_2$$

ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถตกตะกอนได้เร็วและอัดตัวกันแน่นมากกว่าการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์เนื่องจากนิกเกิลโบไรด์มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 7.4 มากกว่านิกเกิลไฮดรอกไซด์ที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 4.1

จากผลการทดลองพบว่าไม่สามารถกำจัดโลหะหนักนิกเกิลที่มีการเติมสารอีดีทีเอออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ให้เหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตร ตามมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมโบโรไฮไดรด์กับนิกเกิลไอออน (Ni^{2+}) จะเกิดฟองก๊าซจำนวนมาก เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดเป็นนิกเกิลโบไรด์และปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนพาให้ตะกอนบางส่วนแขวนลอย ดังนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจึงมีปริมาณโลหะนิกเกิลเหลืออยู่มากกว่ากรณีการกำจัดโลหะทองแดงที่มีการเติมสารอีดีทีเอออกจากน้ำเสีย

2.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

จากการทดลองพบว่าการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียทองแดงโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับการตกตะกอนมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับการใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ เนื่องจากค่าความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือในน้ำเสียมีค่าใกล้เคียงกัน โดยการใช้โซเดียม-ไฮดรอกไซด์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 2.25 โมลเท่ากันสามารถกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียได้ร้อยละ 100.0 เท่ากัน โดยเหลือความเข้มข้นทองแดงในน้ำเสียเท่ากับ 0.07 และ 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.04 และ 20.81 บาท/ลิตรตามลำดับ ส่วนการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียทองแดงที่มีการเติมสารอีดีทีเอโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์สำหรับการตกตะกอนมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่าความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือในน้ำเสียโดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 2.25 เท่าโดยโมลของทองแดงเท่ากัน สามารถกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียได้ร้อยละ 97.7 และ 99.2 โดยเหลือความเข้มข้นทองแดงในน้ำเสียเท่ากับ 23.09 และ 8.3 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.04 และ 20.81 บาท/ลิตรตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียที่มีการเติมสารอีดีทีเอให้ค่าความเข้มข้นของโลหะทองแดงที่เหลือเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน โดยใช้โซเดียมโบ-

โรไฮไดรด์จำนวน 0.5 โมลของทองแดงร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.75 โมลของทองแดง และปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8 เหลือความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 0.93 มิลลิกรัม/ลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 99.9 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 4.61 บาท/ ลิตร

จากการทดลองพบว่าการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียนิกเกิลโดยใช้โซเดียม-โบโรไฮไดรด์สำหรับการตกตะกอนมีประสิทธิภาพน้อยกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.98 โมลเท่ากันสามารถกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียได้ร้อยละ 100.0 และ 99.7 โดยเหลือความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำเสียเท่ากับ 0.02 และ 3.45 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งแตกต่างจากการกำจัดทองแดงในน้ำเสียทองแดงที่มีการเติมสารอีดีทีเอ ทั้งนี้เนื่องจากที่จำนวนโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิลทำให้ค่าพีเอชสุดท้ายเท่ากับ 7.33 ซึ่งค่าพีเอชที่ระดับดังกล่าวโลหะนิกเกิลยังสามารถละลายน้ำได้ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.04 และ 19.17 บาท/ลิตรตามลำดับ ส่วนการกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียนิกเกิลที่มีการเติมสารอีดีทีเอโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์สำหรับการตกตะกอนมีประสิทธิภาพน้อยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสียโดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิลเท่ากัน สามารถกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียได้ร้อยละ 98.0 และ 97.6 โดยเหลือความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำเสียเท่ากับ 19.85 และ 23.84 มิลลิกรัม ทั้งนี้เนื่องจากที่จำนวนโซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.98 เท่าโดยโมลของนิกเกิลทำให้ค่าพีเอชสุดท้ายเท่ากับ 8.42 ซึ่งค่าพีเอชที่ระดับดังกล่าวโลหะนิกเกิลยังสามารถละลายน้ำได้ ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 0.04 และ 19.17 บาท/ลิตรตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองพบว่าไม่มีสภาวะในการทดลองใดที่สามารถกำจัดโลหะนิกเกิลออกจากน้ำเสียที่มีการเติมสารอีดีทีเอให้ค่าความเข้มข้นของโลหะทองแดงที่เหลือเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ซึ่งสภาวะที่สามารถทำให้ความเข้มข้นของนิกเกิลน้อยสุด เท่ากับ 11.80 มิลลิกรัม/ลิตร ร้อยละของการกำจัดเท่ากับ 98.8 โดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จำนวน 1.10 โมลของนิกเกิลร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 1.54 โมลของนิกเกิลและปรับค่าพีเอชเท่ากับ 11 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียเท่ากับ 10.97 บาท/ลิตร

จากการทดลองพบว่าค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์มีราคาแพงเนื่องจากในการทดลองใช้สารเคมีประเภทใช้สำหรับในห้องทดลอง (laboratory grade) และใช้ทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการ คิดจากปริมาณน้ำเสีย 1 ลิตร ค่าใช้จ่ายดังกล่าวจึงเป็นค่าใช้จ่ายโดยประมาณ หากมีการนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจริง ราคาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นและมีไอออนของโลหะชนิดอื่นๆในน้ำทิ้งจากโรงงาน รวมทั้งราคาสารเคมีที่ใช้ในการบำบัด

น้ำเสีย โดยสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียสามารถใช้สารเคมีประเภทสำหรับอุตสาหกรรม (Commercial Grade) ซึ่งมีราคาถูกกว่า นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้เกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการเติมสารอีดีทีเอเพียงอย่างเดียวเพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน อาจไม่สอดคล้องกับลักษณะของน้ำเสียจริงที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนชนิดอื่น

3. ข้อเสนอแนะ

3.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

จากการทดลองพบว่า การนำโซเดียมโบโรไฮไดรด์มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักทองแดงในน้ำเสีย สามารถกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ และปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 6-9 และยังสามารถกำจัดโลหะหนักทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนได้ด้วย ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากโซเดียมโบโรไฮไดรด์มีราคาสูง ฉะนั้นอาจจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยอย่างอื่นเพิ่มเติม เช่น ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนที่เกิดขึ้น การนำตะกอนกลับมาใช้ใหม่ หรืออาจใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่อยู่ในรูปของสารละลายแทนการใช้ชนิดผงเนื่องจากมีราคาถูกกว่า

การนำโซเดียมโบโรไฮไดรด์มาใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักนิกเกิลในน้ำเสีย สามารถกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากขึ้นเมื่อใช้ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ และปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 8-11 แต่ไม่สามารถกำจัดโลหะหนักนิกเกิลในน้ำเสียที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนให้เหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม/ลิตรได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

การทดลองนี้เป็นการกำจัดทองแดงและนิกเกิลออกจากน้ำเสียในห้องทดลองซึ่งทำการแยกบำบัดน้ำเสียทองแดงและนิกเกิลออกจากกัน สารคีเลตที่ใช้คืออีดีทีเอเพียงชนิดเดียว ดังนั้นผลการทดลองที่ได้เมื่อนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจริงจากโรงงานชุบโลหะที่มีโลหะหนักชนิดอื่นหรือมีสารคีเลตชนิดอื่นปนอยู่ในน้ำเสีย อาจได้ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับการทดลองข้างต้น

3.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

3.2.1 ควรศึกษาการกำจัดโลหะหนักทองแดงและนิกเกิลจากน้ำเสียจริงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ และโซเดียมไบซัลไฟต์

3.2.2 ควรศึกษาการกำจัดโลหะหนักโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดร์กับโลหะหนักชนิดอื่นๆ ที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมชุบโลหะที่มีมูลค่าสูง เช่น เงิน พัลลาเดียม

3.2.3 ควรศึกษาเปรียบเทียบปริมาณของตะกอนการจากกำจัดโลหะหนักโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดร์กับการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ และความเป็นไปได้ในการนำตะกอนการจากกำจัดโลหะหนักโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดร์กลับมาใช้ใหม่

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

หลักการพื้นฐานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอิมิสชันสเปกโตรสโคปี

หลักการพื้นฐานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอิมิสชันสเปกโตรสโคปีหรือ ไอซีพี (Inductively Couple Plasma Spectrometer ; ICPs)

เครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคอิมิสชันสเปกโตรสโคปีหรือ ไอซีพี (ICPS) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณธาตุทั้งที่เป็นโลหะและอโลหะที่ระดับต่ำถึง ppm และ ppb ที่มีหลักการคือ ปล่อยให้แก๊สอาร์กอนผ่านเข้าไปในคบ (torch) ซึ่งประกอบด้วย หลอดที่ทำด้วยควอร์ตซ์ (quartz tube) ซ้อนกัน 3 ชั้น ที่ปลายคบด้านบนจะมีท่อกลวงทำด้วยทองแดงล้อมรอบอยู่ เรียกว่าโหลดคอยล์ (load coil)โดยโหลดคอยล์นี้จะต่อเข้ากับเครื่องส่งความถี่วิทยุ (radio frequency, RF generator) เมื่อให้ความถี่วิทยุ (โดยทั่วไปจะเป็น 700 – 1,500 วัตต์) เข้าไปในโหลดคอยล์ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสลับเคลื่อนที่ไปมาในหลอดทองแดงหรือเกิดการสั่นขึ้น (oscillate) ด้วยอัตราเร็วเท่ากับความถี่ของเครื่องส่ง ในเครื่อง ICPS ส่วนมากจะใช้ความถี่ที่ 27 หรือ 40 เมกะเฮิร์ตซ์ (MHz) และจากการผ่านความถี่วิทยุเข้าไปในหลอดทองแดง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณปลายคบ แล้วทำให้เกิดการชักนำให้มีกระแสไฟฟ้า (Eddy current) ไหลผ่านตัวนำและทำให้ตัวนำมีความร้อนเกิดขึ้น แก๊สอาร์กอนที่ถูกผ่านเข้าไปในแนวตั้งฉาก เพื่อทำให้แก๊สเกิดการหมุนไปรอบหลอดควอร์ตซ์ได้ ซึ่งหลอดควอร์ตซ์นั้นที่อุณหภูมิห้องจะไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำให้เป็นตัวนำด้วยการทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้าออกจากเทสลา (Tesla discharge) ให้ผ่านแก๊สอาร์กอนเสียก่อน เพื่อทำให้แก๊สอาร์กอนแตกตัวได้อิเล็คตรอนเกิดขึ้น สนามแม่เหล็กจะทำหน้าที่ช่วยเร่งให้อิเล็คตรอนเคลื่อนที่เร็วขึ้น ประกอบกับมีหลอดทองแดงทำหน้าที่เป็นขดลวด ทำให้อิเล็คตรอนมีพลังงานเพิ่มมากขึ้น เรียกว่าเกิดเหนี่ยวนาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (inductive coupling) อิเล็คตรอนที่มีพลังงานสูงนี้จะชนกับอะตอมของแก๊สอาร์กอนต่อไป ทำให้เกิดอิเล็คตรอนมากขึ้นไปอีกเป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ กลายเป็นพลาสมา (plasma) จึงเรียกว่า inductively coupled plasma (ICP) ซึ่งการปล่อยประจุจากพลาสมานี้จะให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,000 – 10,000 องศาเคลวิน และมีเสถียร

การเตียมสารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP จะถูกทำให้อยู่ในรูปของสารละลายและฉีดสารละลายนี้เข้าสู่ภายในเครื่องเพื่อเปลี่ยนให้เป็นละออง โดยกระบวนการ นิวบูไลเซชั่น (nebulization) แล้วสารละลายตัวอย่างที่เป็นละอองนี้จะเข้าสู่พลาสมาของ คบไอซีพี (ICP torch) ซึ่งจะทำให้ตัวอย่างแห้งกลายเป็นไอ และกลายเป็นอะตอมหรือไอออน

อะตอมหรือไอออนเหล่านี้ เมื่อได้รับพลังงานจากเปลวของพลาสมาที่มีพลังงานสูงมากก็จะอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น (excited) ซึ่งจะเปล่งพลังงานในรูปแสงที่มีเอกลักษณ์จำเพาะตัวออกมาสามารถใช้จำแนกธาตุได้ โดยแสงที่เกิดขึ้นนี้จะผ่านเข้าไปในเครื่อง spectrometer เพื่อแยกเอาแสงที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการ แล้วให้แสงที่แยกแล้วดังกล่าวตกลงบน detector เพื่อตรวจวัด

ความเข้มของสัญญาณแสง ซึ่งความเข้าของสัญญาณแสงนี้จะถูกวิเคราะห์และแปรผลเป็นความเข้มของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ต่อไป (แม้น อมรสิทธิ์ และคณะ, 2539)

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่อง ICPs มีดังนี้ นิวบูไลเซอร์ สเปรย์แชมเบอร์ แก๊สอาร์กอน คบไอซีพี เครื่องส่งความถี่วิทยุ สเปคโตรมิเตอร์ ไมโครโปรเซลเซอร์ (microprocessor) และคอมพิวเตอร์

นิวบูไลเซอร์ (nebulizer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเปลี่ยนสารละลายตัวอย่างให้เป็นละออง (aerosol) เพื่อให้เข้าสู่พลาสมา กระบวนการนี้นับว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก เพราะจะต้องให้ได้ผลที่มีความแม่นยำและคงที่ การเปลี่ยนสารละลายตัวอย่างให้เป็นละอองที่นิยมใช้กันใน ICP นั้นมีอยู่ 2 แบบเท่านั้น คือ ใช้การควบคุมแบบใช้ลม และ การควบคุมด้วยกลไกอัลตร้าโซนิค (ultrasonic mechanical force) ส่วนมากเครื่อง ICP ที่สร้างในปัจจุบันมักจะการควบคุมแบบใช้ลม ซึ่งคล้าย ๆ กับ นิวบูไลเซอร์ ในเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชัน (AAS) โดยสามารถปรับอัตราไหลของสารละลายได้

ปั๊ม (Pump) สำหรับนิวบูไลเซอร์บางประเภทอาจต้องใช้ปั๊มเพื่อสูบสารละลายไปสู่นิวบูไลเซอร์ได้แก่ แบบบาบิงตัน (Babington type) วี-กรู๊ฟ (V-groove) และอัลตร้าโซนิค (ultrasonic type) สารละลายที่ถูกสูบไปยัง นิวบูไลเซอร์จะใช้อัตราการไหลของสารละลายคงที่ และไม่ขึ้นอยู่กับความหนืดหรือความติงผิวของสารละลาย การควบคุมอัตตาการไหลของสารละลายให้เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับความเร็วที่ต้องการให้สารละลายไปเข้า นิวบูไลเซอร์และ สเปรย์แชมเบอร์ โดยทั่วไปปั๊มที่ใช้กันเป็น เพอริสเตติกปั๊ม (peristaltic pump)

คบพลาสมา (plasma torch) ที่ใช้ในเครื่อง ICP เป็นคบที่มี 3 ชั้น สำหรับให้แก๊สอาร์กอน และละอองสารตัวอย่างผ่านเข้าไป ระยะระหว่างหลอดควอร์ตซ์ 2 ชั้น มีลักษณะแคบเพื่อให้แก๊สอาร์กอนที่ผ่านไปมีความเร็วต่ำ หลอดข้างนอกจะต้องมีการผ่านแก๊สอาร์กอนเข้าไปทางด้านข้าง โดยให้แก๊สหมุนจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน ซึ่งใช้สำหรับทำให้คบเย็น (coolant Flow) หรือ การไหลของพลาสม่า (plasma flow) สำหรับ อาร์กอน-ไอซีพี (Ar-ICP) จะให้แก๊สไหลด้วยอัตราเร็ว 7-15 ลิตร/นาที สำหรับหลอดชั้นกลางซึ่งอยู่ระหว่าง การไหลของพลาสมาและ การไหลของสารตัวอย่างนั้น จะมีการผ่านแก๊สอาร์กอนเข้าไปเพื่อช่วยทำให้พลาสมาแยกออกจากส่วนที่ละอองสารตัวอย่างจะผ่านเข้าไป ทำให้ละอองของสารตัวอย่างเข้าไปพลาสมาได้ง่ายขึ้น ตามปกติจะใช้อัตราการไหลของแก๊สที่ส่วนนี้ประมาณ 1 ลิตร/นาที

สำหรับละอองสารตัวอย่างจะถูกพาเขาไปในพลาสมาทางท่อตรงกลาง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ความเร็วของแก๊สตรงส่วนนี้ประมาณ 1 ลิตร/นาที เรียกว่าการไหลของสารตัวอย่าง หรือ การไหลของนิวบูไลเซอร์

เครื่องส่งความถี่วิทยุ (radio frequency generators) เป็นอุปกรณ์ที่ให้กำลังและช่วยทำให้ การปล่อยพลาสมา เกิดขึ้นติดต่อกันตลอดเวลา กำลังที่ให้นี้มีค่าประมาณ 600-1,800 วัตต์ โดยส่งผ่านโหลดคอยล์ที่พันอยู่รอบคบไปยังพลาสมา โหลดคอลย์จะทำหน้าที่เป็นสายอากาศเพื่อส่งพลังงานวิทยุ ไปยังพลาสมา โดยโหลดคอยล์ (load coil) จะทำด้วยท่อทองแดงเล็ก เมื่อใช้งานท่อทองแดงนี้จะต้องมีน้ำหรือแก๊สไหลผ่านเพื่อทำให้เกิดความเย็น เครื่องส่งความถี่วิทยุ ที่ใช้ในไอซีพีนั้น ส่วนมากจะอยู่ในช่วงความถี่ 27 – 56 เฮิร์ต (MHz)

เครื่องสเปคโตรมิเตอร์ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ หลายอย่างด้วยกัน เช่น ช่องแสงเข้าออก เกรตติง หรือโมโนโครมาเตอร์ และดีเทคเตอร์ ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับเครื่องยูวี-วิสเบิลสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis spectrophotometer)

ลักษณะเฉพาะของไอซีพีที่ถือว่าสำคัญมากของ ICP นั้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ให้อุณหภูมิสูงถึงประมาณ 10000 องศาเคลวิน

2) สารตัวอย่างที่จะวิเคราะห์อยู่ในพลาสมาได้นานพอ โดยทั่วไปจะอยู่ได้นานถึง 2-3 ms ทำให้สารตัวอย่างสามารถแตกตัวเป็นอะตอมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง

3) เมทริกซ์ (matrix) และ ผลกระทบของอินเตอร์อิลิเมนท์ (interelement effect) มีน้อย โดยเฉพาะเมื่ออยู่ในบรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ทำให้อะตอมอิสระที่เกิดขึ้นในพลาสมามี อายุการใช้งาน (lift time) ที่ยาวขึ้น

4) ในกรณีที่ใช้ อาร์กอน-ไอซีพี ทำให้ความหนาแน่นอิเล็คตรอนสูง แม้จะใส่สารบางชนิดที่ไอออไนส์ได้ง่ายเข้าไป ก็ไม่มีผลต่อจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น ดังนั้นการแทรกสอดที่เกิดจากการไอออไนเซชันจะมีผลกระทบน้อย

5) สปีชี่ส์โมเลกุล (molecule species) มีโอกาสเกิดขึ้นหรือไม่เกิดเลย เพราะอุณหภูมิสูงทำให้เกิดฟลูออเรสเซนซ์และการดูดซึม

6) แก๊สที่ใช้เป็นแก๊สเฉื่อยจึงไม่เกิดการระเบิดขึ้น

7) ไม่ต้องใช้ขั้วไฟเลย

ภาคผนวก ข

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองการกำจัดโลหะทองแดงและโลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของทองแดง)	โลหะทองแดง				โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง			
	ค่าพีเอช		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ค่าพีเอช		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
	เริ่มต้น	สุดท้าย			เริ่มต้น	สุดท้าย		
0.50	4.13	4.56	622.10	37.80	3.34	4.82	522.60	47.70
0.75	4.14	4.75	506.70	49.30	3.34	4.94	391.70	60.80
1.00	4.14	4.88	327.30	67.30	3.35	5.21	203.60	79.60
1.25	4.13	5.15	124.50	87.60	3.35	7.37	27.07	97.30
1.50	4.14	8.10	0.34	100.00	3.34	8.59	26.87	97.30
1.75	4.14	8.33	0.17	100.00	3.35	10.30	26.78	97.30
2.00	4.15	10.52	0.12	100.00	3.35	11.17	26.45	97.40
2.25	4.15	11.14	0.07	100.00	3.35	11.49	23.09	97.70

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองการกำจัดโลหะทองแดงและโลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์

ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของทองแดง)	โลหะทองแดง				โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง			
	ค่าพีเอช		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ค่าพีเอช		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
	เริ่มต้น	สุดท้าย			เริ่มต้น	สุดท้าย		
0.50	4.13	3.27	681.10	31.90	3.34	3.33	682.90	31.70
0.75	4.13	3.43	595.30	40.50	3.34	3.47	614.80	38.50
1.00	4.14	3.51	490.40	51.00	3.35	4.30	495.20	50.50
1.25	4.15	3.63	318.80	68.10	3.35	4.16	385.30	61.50
1.50	4.15	3.72	241.80	75.80	3.35	4.27	240.10	76.00
1.75	4.14	4.08	122.00	87.80	3.34	4.52	140.50	86.00
2.00	4.13	4.48	24.04	97.60	3.35	7.34	20.11	98.00
2.25	4.13	8.01	0.03	100.00	3.34	8.19	8.35	99.20

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองการกำจัดโลหะทองแดงและโลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอช 6, 7, 8 และ 9

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของทองแดง)	โลหะทองแดง		โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
6	0.50	105.50	89.50	229.70	77.00
	0.75	2.72	99.70	114.90	88.50
	1.00	1.11	99.90	21.81	97.80
	1.25	1.09	99.90	22.86	97.70
7	0.50	8.71	99.10	59.87	94.00
	0.75	1.05	99.90	23.59	97.60
	1.00	0.68	99.90	22.94	97.70
	1.25	0.28	100.00	15.34	98.50
8	0.50	2.32	99.80	25.92	97.40
	0.75	0.47	100.00	22.93	97.70
	1.00	0.12	100.00	19.59	98.00
	1.25	0.07	100.00	14.01	98.60
9	0.50	2.35	99.80	22.31	97.80
	0.75	0.17	100.00	21.09	97.90
	1.00	0.07	100.00	18.52	98.10
	1.25	0.06	100.00	9.61	99.00

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองการกำจัดโลหะทองแดงและโลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของทองแดง)	โลหะทองแดง		โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
6	0.50	60.45	94.00	92.15	90.80
	0.75	1.76	99.80	72.56	92.70
	1.00	0.54	99.90	0.67	99.90
	1.25	0.44	100.00	0.52	99.90
7	0.50	1.64	99.80	26.76	97.30
	0.75	0.79	99.90	1.79	99.80
	1.00	0.53	99.90	0.54	99.90
	1.25	0.10	100.00	0.27	100.00
8	0.50	0.73	99.90	0.93	99.90
	0.75	0.34	100.00	0.36	100.00
	1.00	0.07	100.00	0.22	100.00
	1.25	0.06	100.00	0.21	100.00
9	0.50	0.20	100.00	0.52	99.90
	0.75	0.14	100.00	0.37	100.00
	1.00	0.06	100.00	0.22	100.00
	1.25	0.05	100.00	0.18	100.00

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองการกำจัดโลหะทองแดงและโลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดง ที่ค่าพีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของทองแดง)	โลหะทองแดง		โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
6	0.50	19.03	98.10	22.47	97.80
	0.75	0.42	100.00	0.95	99.90
	1.00	0.16	100.00	0.37	100.00
	1.25	0.13	100.00	0.36	100.00
7	0.50	0.77	99.90	1.37	99.90
	0.75	0.27	100.00	0.52	99.90
	1.00	0.15	100.00	0.36	100.00
	1.25	0.07	100.00	0.23	100.00
8	0.50	0.47	100.00	0.51	99.90
	0.75	0.19	100.00	0.33	100.00
	1.00	0.06	100.00	0.14	100.00
	1.25	0.04	100.00	0.10	100.00
9	0.50	0.17	100.00	0.38	100.00
	0.75	0.11	100.00	0.20	100.00
	1.00	0.06	100.00	0.14	100.00
	1.25	0.05	100.00	0.12	100.00

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองการกำจัดโลหะทองแดงและโลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.75 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของทองแดง)	โลหะทองแดง		โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
6	0.50	1.02	99.90	3.42	99.70
	0.75	0.33	100.00	0.86	99.90
	1.00	0.12	100.00	0.13	100.00
	1.25	0.06	100.00	0.20	100.00
7	0.50	0.38	100.00	0.75	99.90
	0.75	0.14	100.00	0.50	99.90
	1.00	0.08	100.00	0.28	100.00
	1.25	0.05	100.00	0.12	100.00
8	0.50	0.41	100.00	0.42	100.00
	0.75	0.11	100.00	0.25	100.00
	1.00	0.05	100.00	0.11	100.00
	1.25	0.04	100.00	0.08	100.00
9	0.50	0.08	100.00	0.29	100.00
	0.75	0.06	100.00	0.17	100.00
	1.00	0.05	100.00	0.08	100.00
	1.25	0.04	100.00	0.06	100.00

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองการกำจัดที่มีโลหะทองแดงและโลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดงในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดงที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของทองแดง)	โลหะทองแดง		โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.025 เท่าโดยโมลของทองแดง	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
6	0.50	0.46	100.00	0.56	99.90
	0.75	0.19	100.00	0.31	100.00
	1.00	0.08	100.00	0.11	100.00
	1.25	0.05	100.00	0.13	100.00
7	0.50	0.31	100.00	0.37	100.00
	0.75	0.12	100.00	0.25	100.00
	1.00	0.04	100.00	0.20	100.00
	1.25	0.02	100.00	0.08	100.00
8	0.50	0.27	100.00	0.32	100.00
	0.75	0.09	100.00	0.18	100.00
	1.00	0.04	100.00	0.13	100.00
	1.25	0.03	100.00	0.06	100.00
9	0.50	0.05	100.00	0.25	100.00
	0.75	0.05	100.00	0.13	100.00
	1.00	0.03	100.00	0.04	100.00
	1.25	0.02	100.00	0.04	100.00

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลและโลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของนิกเกิล)	โลหะนิกเกิล				โลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล			
	ค่าพีเอช		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ค่าพีเอช		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
	เริ่มต้น	สุดท้าย			เริ่มต้น	สุดท้าย		
0.44	5.09	7.66	562.60	43.70	3.37	7.58	628.20	37.20
0.66	5.08	7.75	502.90	49.70	3.37	7.75	521.50	47.90
0.88	5.07	7.63	393.60	60.60	3.36	7.82	405.70	59.40
1.10	5.08	7.76	238.80	76.10	3.37	7.95	264.20	73.60
1.32	5.08	7.88	127.80	87.20	3.38	8.22	172.50	82.80
1.54	5.09	8.09	76.99	92.30	3.37	8.40	87.30	91.30
1.76	5.09	10.81	0.08	100.00	3.36	10.38	19.80	98.00
1.98	5.09	11.39	0.02	100.00	3.37	11.29	19.85	98.00

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลและโลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์เพียงอย่างเดียว

ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของนิกเกิล)	โลหะนิกเกิล				โลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล			
	ค่าพีเอช		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ค่าพีเอช		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
	เริ่มต้น	สุดท้าย			เริ่มต้น	สุดท้าย		
0.44	5.08	4.83	625.60	37.40	3.36	4.59	676.70	32.30
0.66	5.07	6.42	556.40	44.40	3.37	6.51	574.30	42.60
0.88	5.07	7.00	466.70	53.30	3.38	6.89	479.40	52.10
1.10	5.08	7.04	389.80	61.00	3.36	7.04	405.70	59.40
1.32	5.09	7.11	255.20	74.50	3.36	7.05	273.60	72.60
1.54	5.08	7.23	159.30	84.10	3.37	7.11	176.40	82.40
1.76	5.08	7.29	49.44	95.10	3.36	7.28	91.01	90.90
1.98	5.09	7.33	3.45	99.70	3.36	8.42	23.84	97.60

ตารางที่ ข-10 ผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลและโลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของนิกเกิล)	โลหะนิกเกิล		โลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
8	0.44	7.10	99.30	292.90	70.70
	0.66	4.22	99.60	56.28	94.40
	0.88	1.57	99.80	29.59	97.00
	1.10	0.92	99.90	28.98	97.10
9	0.44	4.85	99.50	176.00	82.40
	0.66	0.40	100.00	30.41	97.00
	0.88	0.28	100.00	28.31	97.20
	1.10	0.17	100.00	24.41	97.60
10	0.44	0.17	100.00	24.06	97.60
	0.66	0.11	100.00	21.95	97.80
	0.88	0.03	100.00	21.40	97.90
	1.10	0.02	100.00	21.07	97.90
11	0.44	3.03	99.70	28.98	97.10
	0.66	1.03	99.90	28.46	97.20
	0.88	0.87	99.90	28.36	97.20
	1.10	0.21	100.00	27.99	97.20

ตารางที่ ข-11 ผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลและโลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 0.66 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของนิกเกิล)	โลหะนิกเกิล		โลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
8	0.44	5.10	99.50	61.43	93.90
	0.66	1.91	99.80	31.50	96.90
	0.88	1.26	99.90	21.83	97.80
	1.10	0.78	99.90	21.27	97.90
9	0.44	0.28	100.00	58.73	94.10
	0.66	0.15	100.00	23.07	97.70
	0.88	0.09	100.00	22.26	97.80
	1.10	0.06	100.00	21.86	97.80
10	0.44	0.04	100.00	22.06	97.80
	0.66	0.03	100.00	21.14	97.90
	0.88	0.01	100.00	20.57	97.90
	1.10	0.01	100.00	20.19	98.00
11	0.44	0.15	100.00	20.77	97.90
	0.66	0.06	100.00	20.33	98.00
	0.88	0.02	100.00	19.65	98.00
	1.10	0.02	100.00	19.02	98.10

ตารางที่ ข-12 ผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลและโลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของนิกเกิล)	โลหะนิกเกิล		โลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
8	0.44	1.64	99.80	32.01	96.80
	0.66	1.25	99.90	22.52	97.70
	0.88	1.02	99.90	21.44	97.90
	1.10	0.62	99.90	21.00	97.90
9	0.44	0.22	100.00	23.01	97.70
	0.66	0.13	100.00	21.58	97.80
	0.88	0.09	100.00	21.32	97.90
	1.10	0.02	100.00	21.25	97.90
10	0.44	0.04	100.00	21.74	97.80
	0.66	0.02	100.00	21.10	97.90
	0.88	0.01	100.00	20.15	98.00
	1.10	0.01	100.00	19.51	98.00
11	0.44	0.02	100.00	19.09	98.10
	0.66	0.02	100.00	18.94	98.10
	0.88	0.02	100.00	18.82	98.10
	1.10	0.01	100.00	18.59	98.10

ตารางที่ ข-13 ผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลและโลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิล ที่ค่าพีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของนิกเกิล)	โลหะนิกเกิล		โลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
8	0.44	1.16	99.90	22.25	97.80
	0.66	0.51	99.90	20.72	97.90
	0.88	0.49	100.00	20.42	98.00
	1.10	0.15	100.00	20.26	98.00
9	0.44	0.12	100.00	21.76	97.80
	0.66	0.12	100.00	20.44	98.00
	0.88	0.06	100.00	20.12	98.00
	1.10	0.03	100.00	21.08	97.90
10	0.44	0.03	100.00	20.71	97.90
	0.66	0.02	100.00	20.62	97.90
	0.88	0.01	100.00	19.62	98.00
	1.10	0.01	100.00	19.37	98.10
11	0.44	0.02	100.00	18.45	98.20
	0.66	0.02	100.00	18.14	98.20
	0.88	0.01	100.00	17.92	98.20
	1.10	0.01	100.00	11.80	98.80

ตารางที่ ข-14 ผลการทดลองการกำจัดโลหะนิกเกิลและโลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิลในน้ำเสียโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์ที่ปริมาณ 2.20 เท่าโดยโมลของนิกเกิลที่พีเอชต่างๆ

ค่าพีเอช	ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (จำนวนเท่าโดยโมลของนิกเกิล)	โลหะนิกเกิล		โลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ 0.022 เท่าโดยโมลของนิกเกิล	
		ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล)	ร้อยละการกำจัด
8	0.44	0.11	100.00	20.96	97.90
	0.66	0.02	100.00	20.59	97.90
	0.88	0.02	100.00	20.18	98.00
	1.10	0.01	100.00	19.99	98.00
9	0.44	0.09	100.00	20.89	97.90
	0.66	0.06	100.00	20.40	98.00
	0.88	0.06	100.00	19.63	98.00
	1.10	0.02	100.00	18.44	98.20
10	0.44	0.02	100.00	19.47	98.10
	0.66	0.02	100.00	19.43	98.10
	0.88	0.01	100.00	19.12	98.10
	1.10	0.01	100.00	18.59	98.10
11	0.44	0.02	100.00	18.78	98.10
	0.66	0.02	100.00	18.77	98.10
	0.88	0.01	100.00	17.86	98.20
	1.10	0.01	100.00	17.54	98.20

ตารางที่ ข-15 สรุปปริมาณทองแดงที่เหลือและร้อยละของการกำจัดที่สภาวะต่างๆ

พีเอช	ปริมาณ $NaBH_4$ (โมล)	$NaHSO_3$ 0เท่าโมล				$NaHSO_3$ 0.75เท่าโมล				$NaHSO_3$ 1.25เท่าโมล				$NaHSO_3$ 1.75เท่าโมล				$NaHSO_3$ 2.50เท่าโมล			
		Cu		Cu + EDTA		Cu		Cu + EDTA		Cu		Cu + EDTA		Cu		Cu + EDTA		Cu		Cu + EDTA	
		ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด
6	0.50	105.50	89.45	229.70	77.03	60.45	93.96	92.15	90.79	19.03	98.10	22.47	97.75	1.02	99.90	3.42	99.66	0.46	99.95	0.56	99.94
	0.75	2.72	99.73	114.90	88.51	1.76	99.82	72.56	92.74	0.42	99.96	0.95	99.90	0.33	99.97	0.86	99.91	0.19	99.98	0.31	99.97
	1.00	1.11	99.89	21.81	97.82	0.54	99.95	0.67	99.93	0.16	99.98	0.37	99.96	0.12	99.99	0.13	99.99	0.08	99.99	0.11	99.99
	1.25	1.09	99.89	22.86	97.71	0.44	99.96	0.52	99.95	0.13	99.99	0.36	99.96	0.06	99.99	0.20	99.98	0.05	100.00	0.13	99.99
7	0.50	8.71	99.13	59.87	94.01	1.64	99.84	26.76	97.32	0.77	99.92	1.37	99.86	0.38	99.96	0.75	99.93	0.31	99.97	0.37	99.96
	0.75	1.05	99.89	23.59	97.64	0.79	99.92	1.79	99.82	0.27	99.97	0.52	99.95	0.14	99.99	0.50	99.95	0.12	99.99	0.25	99.98
	1.00	0.68	99.93	22.94	97.71	0.53	99.95	0.54	99.95	0.15	99.98	0.36	99.96	0.08	99.99	0.28	99.97	0.04	100.00	0.20	99.98
	1.25	0.28	99.97	15.34	98.47	0.10	99.99	0.27	99.97	0.07	99.99	0.23	99.98	0.05	100.00	0.12	99.99	0.02	100.00	0.08	99.99
8	0.50	2.32	99.77	25.92	97.41	0.73	99.93	0.93	99.91	0.47	99.95	0.51	99.95	0.41	99.96	0.42	99.96	0.27	99.97	0.32	99.97
	0.75	0.47	99.95	22.93	97.71	0.34	99.97	0.36	99.96	0.19	99.98	0.33	99.97	0.11	99.99	0.25	99.98	0.09	99.99	0.18	99.98
	1.00	0.12	99.99	19.59	98.04	0.07	99.99	0.22	99.98	0.06	99.99	0.14	99.99	0.05	99.99	0.11	99.99	0.04	100.00	0.13	99.99
	1.25	0.07	99.99	14.01	98.60	0.06	99.99	0.21	99.98	0.04	100.00	0.10	99.99	0.04	100.00	0.08	99.99	0.03	100.00	0.06	99.99
9	0.50	2.35	99.77	22.31	97.77	0.20	99.98	0.52	99.95	0.17	99.98	0.38	99.96	0.08	99.99	0.29	99.97	0.05	99.99	0.25	99.98
	0.75	0.17	99.98	21.09	97.89	0.14	99.99	0.37	99.96	0.11	99.99	0.20	99.98	0.06	99.99	0.17	99.98	0.05	99.99	0.13	99.99
	1.00	0.07	99.99	18.52	98.15	0.06	99.99	0.22	99.98	0.06	99.99	0.14	99.99	0.05	99.99	0.08	99.99	0.03	100.00	0.04	100.00
	1.25	0.06	99.99	9.61	99.04	0.05	99.99	0.18	99.98	0.05	99.99	0.12	99.99	0.04	100.00	0.06	99.99	0.02	100.00	0.04	100.00

ตารางที่ ข-16 สรุปปริมาณนิกเกิลที่เหลือและร้อยละของการกำจัดที่สภาวะต่างๆ

พีเอช	ปริมาณ $NaBH_4$ (โมล)	$NaHSO_3$ 0เท่าโมล				$NaHSO_3$ 0.66เท่าโมล				$NaHSO_3$ 1.10เท่าโมล				$NaHSO_3$ 1.54เท่าโมล				$NaHSO_3$ 2.20เท่าโมล			
		Ni		Ni + EDTA		Ni		Ni + EDTA		Ni		Ni + EDTA		Ni		Ni + EDTA		Ni		Ni + EDTA	
		ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด	ปริมาณที่เหลือ (ppm)	% การกำจัด
8	0.44	7.10	99.29	292.90	70.71	5.10	99.49	61.43	93.86	1.64	99.84	32.01	96.80	1.16	99.88	22.25	97.78	0.11	99.99	20.96	97.90
	0.66	4.22	99.58	56.28	94.37	1.91	99.81	31.50	96.85	1.25	99.88	22.52	97.75	0.51	99.95	20.72	97.93	0.02	100.00	20.59	97.94
	0.88	1.57	99.84	29.59	97.04	1.26	99.87	21.83	97.82	1.02	99.90	21.44	97.86	0.49	99.95	20.42	97.96	0.02	100.00	20.18	97.98
	1.10	0.92	99.91	28.98	97.10	0.78	99.92	21.27	97.87	0.62	99.94	21.00	97.90	0.15	99.99	20.26	97.97	0.01	100.00	19.99	98.00
9	0.44	4.85	99.52	176.00	82.40	0.28	99.97	58.73	94.13	0.22	99.98	23.01	97.70	0.12	99.99	21.76	97.82	0.09	99.99	20.89	97.91
	0.66	0.40	99.96	30.41	96.96	0.15	99.98	23.07	97.69	0.13	99.99	21.58	97.84	0.12	99.99	20.44	97.96	0.06	99.99	20.40	97.96
	0.88	0.28	99.97	28.31	97.17	0.09	99.99	22.26	97.77	0.09	99.99	21.32	97.87	0.06	99.99	20.12	97.99	0.06	99.99	19.63	98.04
	1.10	0.17	99.98	24.41	97.56	0.06	99.99	21.86	97.81	0.02	100.00	21.25	97.88	0.03	100.00	21.08	97.89	0.02	100.00	18.44	98.16
10	0.44	0.17	99.98	24.06	97.59	0.04	100.00	22.06	97.79	0.04	100.00	21.74	97.83	0.03	100.00	20.71	97.93	0.02	100.00	19.47	98.05
	0.66	0.11	99.99	21.95	97.81	0.03	100.00	21.14	97.89	0.02	100.00	21.10	97.89	0.02	100.00	20.62	97.94	0.02	100.00	19.43	98.06
	0.88	0.03	100.00	21.40	97.86	0.01	100.00	20.57	97.94	0.01	100.00	20.15	97.99	0.01	100.00	19.62	98.04	0.01	100.00	19.12	98.09
	1.10	0.02	100.00	21.07	97.89	0.01	100.00	20.19	97.98	0.01	100.00	19.51	98.05	0.01	100.00	19.37	98.06	0.01	100.00	18.59	98.14
11	0.44	3.03	99.70	28.98	97.10	0.15	99.99	20.77	97.92	0.02	100.00	19.09	98.09	0.02	100.00	18.45	98.16	0.02	100.00	18.78	98.12
	0.66	1.03	99.90	28.46	97.15	0.06	99.99	20.33	97.97	0.02	100.00	18.94	98.11	0.02	100.00	18.14	98.19	0.02	100.00	18.77	98.12
	0.88	0.87	99.91	28.36	97.16	0.02	100.00	19.65	98.04	0.02	100.00	18.82	98.12	0.01	100.00	17.92	98.21	0.01	100.00	17.86	98.21
	1.10	0.21	99.98	27.99	97.20	0.02	100.00	19.02	98.10	0.01	100.00	18.59	98.14	0.01	100.00	11.80	98.82	0.01	100.00	17.54	98.25

ภาคผนวก ค

การคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย

ตารางที่ ค-1 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง ณ พฤษภาคม 2552 (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่ม)

สารเคมี	ขนาดบรรจุ	ราคา	ที่มา
โซเดียมไฮดรอกไซด์	25 กิโลกรัม	28 บาท/กิโลกรัม	บริษัท สยาม พีวีเอส จำกัด
โซเดียมโบโรไฮไดรด์	100 กรัม	14.8 บาท/กรัม	บริษัท เมอร์ค จำกัด ประเทศไทย
โซเดียมซัลไฟต์	25 กิโลกรัม	40 บาท/กิโลกรัม	บริษัท อดิตยา เบอร์ล่า เคมีคัลส์ (ประเทศไทย) จำกัด

ตารางที่ ค-2 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับการปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของทองแดง)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
6	0.50	0.30	4.48	0.68	0.02	4.50	0.72	0.02	4.51
	0.75	0.45	6.73	0.60	0.02	6.74	0.64	0.02	6.75
	1.00	0.61	8.97	0.44	0.01	8.98	0.48	0.01	8.98
	1.25	0.76	11.21	0.36	0.01	11.22	0.40	0.01	11.22
7	0.50	0.30	4.48	0.70	0.02	4.50	0.76	0.02	4.51
	0.75	0.45	6.73	0.62	0.02	6.74	0.68	0.02	6.75
	1.00	0.61	8.97	0.48	0.01	8.98	0.54	0.02	8.99
	1.25	0.76	11.21	0.40	0.01	11.22	0.44	0.01	11.22
8	0.50	0.30	4.48	0.76	0.02	4.51	0.84	0.02	4.51
	0.75	0.45	6.73	0.68	0.02	6.75	0.76	0.02	6.75
	1.00	0.61	8.97	0.52	0.01	8.98	0.60	0.02	8.99
	1.25	0.76	11.21	0.44	0.01	11.22	0.50	0.01	11.23
9	0.50	0.30	4.48	0.84	0.02	4.51	0.92	0.03	4.51
	0.75	0.45	6.73	0.72	0.02	6.75	0.90	0.03	6.75
	1.00	0.61	8.97	0.56	0.02	8.99	0.88	0.02	8.99
	1.25	0.76	11.21	0.52	0.01	11.23	0.86	0.02	11.24

ตารางที่ ค-2 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.75 เท่าโดยโมลของทองแดงและปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของทองแดง)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
6	0.50	0.30	4.48	0.74	0.02	4.60	0.80	0.02	4.60
	0.75	0.45	6.73	0.68	0.02	6.84	0.72	0.02	6.84
	1.00	0.61	8.97	0.52	0.01	9.08	0.56	0.02	9.08
	1.25	0.76	11.21	0.44	0.01	11.32	0.48	0.01	11.32
7	0.50	0.30	4.48	1.08	0.03	4.61	1.12	0.03	4.61
	0.75	0.45	6.73	1.02	0.03	6.85	1.06	0.03	6.85
	1.00	0.61	8.97	0.90	0.03	9.09	0.94	0.03	9.09
	1.25	0.76	11.21	0.84	0.02	11.33	0.88	0.02	11.33
8	0.50	0.30	4.48	1.32	0.04	4.61	1.38	0.04	4.61
	0.75	0.45	6.73	1.28	0.04	6.85	1.34	0.04	6.86
	1.00	0.61	8.97	1.24	0.03	9.10	1.30	0.04	9.10
	1.25	0.76	11.21	1.24	0.03	11.34	1.26	0.04	11.34
9	0.50	0.30	4.48	1.60	0.04	4.62	1.68	0.05	4.62
	0.75	0.45	6.73	1.48	0.04	6.86	1.66	0.05	6.87
	1.00	0.61	8.97	1.36	0.04	9.10	1.66	0.05	9.11
	1.25	0.76	11.21	1.28	0.04	11.34	1.64	0.05	11.35

ตารางที่ ค-3 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 1.25 เท่าโดยโมลของทองแดงและปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของทองแดง)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
6	0.50	0.30	4.48	1.00	0.03	4.67	1.00	0.03	4.67
	0.75	0.45	6.73	0.84	0.02	6.90	0.92	0.03	6.91
	1.00	0.61	8.97	0.56	0.02	9.14	0.74	0.02	9.14
	1.25	0.76	11.21	0.44	0.01	11.38	0.60	0.02	11.38
7	0.50	0.30	4.48	1.60	0.04	4.68	1.64	0.05	4.68
	0.75	0.45	6.73	1.48	0.04	6.92	1.50	0.04	6.92
	1.00	0.61	8.97	1.12	0.03	9.15	1.28	0.04	9.16
	1.25	0.76	11.21	0.92	0.03	11.39	1.20	0.03	11.40
8	0.50	0.30	4.48	1.96	0.05	4.69	2.00	0.06	4.69
	0.75	0.45	6.73	1.88	0.05	6.93	1.92	0.05	6.93
	1.00	0.61	8.97	1.64	0.05	9.17	1.76	0.05	9.17
	1.25	0.76	11.21	1.52	0.04	11.41	1.68	0.05	11.41
9	0.50	0.30	4.48	2.28	0.06	4.70	2.36	0.07	4.70
	0.75	0.45	6.73	2.20	0.06	6.94	2.32	0.06	6.94
	1.00	0.61	8.97	1.96	0.05	9.18	2.28	0.06	9.19
	1.25	0.76	11.21	1.88	0.05	11.42	2.18	0.06	11.43

ตารางที่ ค-4 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 1.75 เท่าโดยโมลของทองแดงและปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของทองแดง)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
6	0.50	0.30	4.48	1.10	0.03	4.73	1.14	0.03	4.73
	0.75	0.45	6.73	0.90	0.03	6.97	0.96	0.03	6.97
	1.00	0.61	8.97	0.52	0.01	9.20	0.68	0.02	9.20
	1.25	0.76	11.21	0.40	0.01	11.44	0.56	0.02	11.44
7	0.50	0.30	4.48	1.96	0.05	4.75	2.00	0.06	4.75
	0.75	0.45	6.73	1.88	0.05	6.99	1.92	0.05	6.99
	1.00	0.61	8.97	1.52	0.04	9.23	1.70	0.05	9.23
	1.25	0.76	11.21	1.28	0.04	11.46	1.52	0.04	11.47
8	0.50	0.30	4.48	2.50	0.07	4.77	2.56	0.07	4.77
	0.75	0.45	6.73	2.36	0.07	7.01	2.44	0.07	7.01
	1.00	0.61	8.97	2.16	0.06	9.24	2.28	0.06	9.25
	1.25	0.76	11.21	2.02	0.06	11.48	2.20	0.06	11.49
9	0.50	0.30	4.48	2.90	0.08	4.78	3.04	0.09	4.78
	0.75	0.45	6.73	2.72	0.08	7.02	2.88	0.08	7.02
	1.00	0.61	8.97	2.40	0.07	9.25	2.70	0.08	9.26
	1.25	0.76	11.21	2.32	0.06	11.49	2.60	0.07	11.50

ตารางที่ ค-5 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะทองแดงโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 2.50 เท่าโดยโมลของทองแดงและปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของทองแดง)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
6	0.50	0.30	4.48	1.48	0.04	4.83	1.56	0.04	4.83
	0.75	0.45	6.73	1.00	0.03	7.06	1.16	0.03	7.06
	1.00	0.61	8.97	0.56	0.02	9.29	0.88	0.02	9.30
	1.25	0.76	11.21	0.36	0.01	11.53	0.76	0.02	11.54
7	0.50	0.30	4.48	2.20	0.06	4.85	2.64	0.07	4.86
	0.75	0.45	6.73	2.12	0.06	7.09	2.48	0.07	7.10
	1.00	0.61	8.97	2.00	0.06	9.33	2.16	0.06	9.33
	1.25	0.76	11.21	1.72	0.05	11.56	2.04	0.06	11.57
8	0.50	0.30	4.48	3.24	0.09	4.88	3.36	0.09	4.88
	0.75	0.45	6.73	2.96	0.08	7.11	3.28	0.09	7.12
	1.00	0.61	8.97	2.72	0.08	9.35	3.16	0.09	9.36
	1.25	0.76	11.21	2.44	0.07	11.59	3.00	0.08	11.60
9	0.50	0.30	4.48	3.72	0.10	4.89	3.80	0.11	4.90
	0.75	0.45	6.73	3.52	0.10	7.13	3.72	0.10	7.14
	1.00	0.61	8.97	3.24	0.09	9.37	3.56	0.10	9.37
	1.25	0.76	11.21	2.84	0.08	11.60	3.44	0.10	11.61

ตารางที่ ค-6 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับการปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของนิกเกิล)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะนิกเกิล			โลหะนิกเกิลที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
8	0.44	0.29	4.26	0.72	0.02	4.28	1.00	0.03	4.29
	0.66	0.43	6.39	0.70	0.02	6.41	0.96	0.03	6.42
	0.88	0.58	8.52	0.68	0.02	8.54	0.84	0.02	8.54
	1.10	0.72	10.65	0.64	0.02	10.67	0.78	0.02	10.67
9	0.44	0.29	4.26	1.08	0.03	4.29	1.14	0.03	4.29
	0.66	0.43	6.39	1.06	0.03	6.42	1.12	0.03	6.42
	0.88	0.58	8.52	1.02	0.03	8.55	1.08	0.03	8.55
	1.10	0.72	10.65	1.00	0.03	10.68	1.04	0.03	10.68
10	0.44	0.29	4.26	1.24	0.03	4.29	1.28	0.04	4.30
	0.66	0.43	6.39	1.20	0.03	6.42	1.24	0.03	6.42
	0.88	0.58	8.52	1.18	0.03	8.55	1.22	0.03	8.55
	1.10	0.72	10.65	1.16	0.03	10.68	1.20	0.03	10.68
11	0.44	0.29	4.26	2.10	0.06	4.32	2.20	0.06	4.32
	0.66	0.43	6.39	2.08	0.06	6.45	2.18	0.06	6.45
	0.88	0.58	8.52	2.04	0.06	8.58	2.16	0.06	8.58
	1.10	0.72	10.65	2.00	0.06	10.71	2.14	0.06	10.71

ตารางที่ ค-7 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 0.66 เท่าโดยโมลของนิกเกิลและปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของนิกเกิล)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
8	0.44	0.29	4.26	1.20	0.03	4.38	1.56	0.04	4.39
	0.66	0.43	6.39	1.12	0.03	6.51	1.32	0.04	6.51
	0.88	0.58	8.52	0.96	0.03	8.63	1.20	0.03	8.64
	1.10	0.72	10.65	0.84	0.02	10.76	1.12	0.03	10.77
9	0.44	0.29	4.26	1.60	0.04	4.39	1.84	0.05	4.40
	0.66	0.43	6.39	1.52	0.04	6.52	1.70	0.05	6.52
	0.88	0.58	8.52	1.28	0.04	8.64	1.56	0.04	8.65
	1.10	0.72	10.65	1.18	0.03	10.77	1.40	0.04	10.78
10	0.44	0.29	4.26	1.84	0.05	4.40	2.00	0.06	4.40
	0.66	0.43	6.39	1.72	0.05	6.53	1.92	0.05	6.53
	0.88	0.58	8.52	1.48	0.04	8.65	1.78	0.05	8.66
	1.10	0.72	10.65	1.36	0.04	10.78	1.68	0.05	10.78
11	0.44	0.29	4.26	2.60	0.07	4.42	3.00	0.08	4.43
	0.66	0.43	6.39	2.48	0.07	6.55	2.92	0.08	6.56
	0.88	0.58	8.52	2.28	0.06	8.67	2.68	0.08	8.68
	1.10	0.72	10.65	2.20	0.06	10.80	2.60	0.07	10.81

ตารางที่ ค-8 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 1.10 เท่าโดยโมลของนิกเกิลและปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของนิกเกิล)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
8	0.44	0.29	4.26	1.88	0.05	4.46	2.44	0.07	4.47
	0.66	0.43	6.39	1.76	0.05	6.58	2.28	0.06	6.60
	0.88	0.58	8.52	1.68	0.05	8.71	2.20	0.06	8.73
	1.10	0.72	10.65	1.60	0.04	10.84	2.16	0.06	10.86
9	0.44	0.29	4.26	2.32	0.06	4.47	2.64	0.07	4.48
	0.66	0.43	6.39	2.30	0.06	6.60	2.60	0.07	6.61
	0.88	0.58	8.52	2.24	0.06	8.73	2.52	0.07	8.74
	1.10	0.72	10.65	2.16	0.06	10.86	2.48	0.07	10.86
10	0.44	0.29	4.26	2.56	0.07	4.48	2.84	0.08	4.48
	0.66	0.43	6.39	2.50	0.07	6.61	2.80	0.08	6.61
	0.88	0.58	8.52	2.44	0.07	8.73	2.74	0.08	8.74
	1.10	0.72	10.65	2.36	0.07	10.86	2.72	0.08	10.87
11	0.44	0.29	4.26	3.62	0.10	4.51	3.96	0.11	4.52
	0.66	0.43	6.39	3.60	0.10	6.64	3.92	0.11	6.64
	0.88	0.58	8.52	3.56	0.10	8.76	3.90	0.11	8.77
	1.10	0.72	10.65	3.52	0.10	10.89	3.84	0.11	10.90

ตารางที่ ค-9 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 1.54 เท่าโดยโมลของนิกเกิลและปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของนิกเกิล)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
8	0.44	0.29	4.26	2.56	0.07	4.53	3.08	0.09	4.55
	0.66	0.43	6.39	2.52	0.07	6.66	3.00	0.08	6.68
	0.88	0.58	8.52	2.44	0.07	8.79	2.92	0.08	8.80
	1.10	0.72	10.65	2.40	0.07	10.92	2.64	0.07	10.93
9	0.44	0.29	4.26	3.00	0.08	4.55	3.42	0.10	4.56
	0.66	0.43	6.39	2.96	0.08	6.68	3.32	0.09	6.69
	0.88	0.58	8.52	2.88	0.08	8.80	3.04	0.09	8.81
	1.10	0.72	10.65	2.76	0.08	10.93	2.90	0.08	10.93
10	0.44	0.29	4.26	3.48	0.10	4.56	3.68	0.10	4.57
	0.66	0.43	6.39	3.32	0.09	6.69	3.60	0.10	6.69
	0.88	0.58	8.52	3.12	0.09	8.81	3.44	0.10	8.82
	1.10	0.72	10.65	3.00	0.08	10.94	3.36	0.09	10.95
11	0.44	0.29	4.26	4.16	0.12	4.58	4.48	0.13	4.59
	0.66	0.43	6.39	4.10	0.11	6.71	4.40	0.12	6.72
	0.88	0.58	8.52	4.08	0.11	8.84	4.34	0.12	8.84
	1.10	0.72	10.65	4.04	0.11	10.97	4.28	0.12	10.97

ตารางที่ ค-10 ราคาสารเคมีที่ใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิลโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ร่วมกับโซเดียมไบซัลไฟต์จำนวน 2.20 เท่าโดยโมลของนิกเกิลและปรับค่าพีเอช

ค่าพีเอช	ปริมาณของ $NaBH_4$ (จำนวนเท่าโดยโมล ของนิกเกิล)	ปริมาณของ $NaBH_4$ (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ $NaBH_4$ (บาท)	โลหะทองแดง			โลหะทองแดงที่มีการเติมอีดีทีเอ		
				ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)	ปริมาณของ NaOH (กรัม)	ค่าใช้จ่ายของ NaOH (บาท)	ค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมด (บาท)
8	0.44	0.29	4.26	3.40	0.10	4.64	3.60	0.10	4.65
	0.66	0.43	6.39	3.24	0.09	6.77	3.52	0.10	6.78
	0.88	0.58	8.52	3.00	0.08	8.89	3.36	0.09	8.90
	1.10	0.72	10.65	2.76	0.08	11.02	3.28	0.09	11.03
9	0.44	0.29	4.26	3.60	0.10	4.65	3.84	0.11	4.66
	0.66	0.43	6.39	3.48	0.10	6.78	3.76	0.11	6.78
	0.88	0.58	8.52	3.24	0.09	8.90	3.64	0.10	8.91
	1.10	0.72	10.65	3.12	0.09	11.03	3.56	0.10	11.04
10	0.44	0.29	4.26	4.00	0.11	4.66	4.08	0.11	4.66
	0.66	0.43	6.39	3.72	0.10	6.78	3.96	0.11	6.79
	0.88	0.58	8.52	3.52	0.10	8.91	3.84	0.11	8.92
	1.10	0.72	10.65	3.30	0.09	11.03	3.76	0.11	11.04
11	0.44	0.29	4.26	5.04	0.14	4.69	5.20	0.15	4.69
	0.66	0.43	6.39	4.90	0.14	6.82	5.12	0.14	6.82
	0.88	0.58	8.52	4.56	0.13	8.94	5.00	0.14	8.95
	1.10	0.72	10.65	4.48	0.13	11.06	4.90	0.14	11.08

ภาคผนวก ง

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

(สำเนา)

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า "ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนด โดยประกาศในราชกิจจานุเบกษาแต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช้วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)" รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรมจึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความ

น้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการโรงงานอุตสาหกรรมที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงานรวมทั้งจากกิจกรรมอื่นในโรงงานอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งต้องเป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ในประกาศนี้

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าดังนี้

2.1 ค่า ทีดีเอส ไม่มากกว่า 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่า ทีดีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร

(3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

(4) โลหะหนักมีค่าดังนี้

4.1 ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.2 เซเลเนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.4 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.5 อาร์เซนิค (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.6 โครเมียม (Chromium)

4.6.1 Hexavalent Chromium ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.6.2 Trivalent Chromium ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.7 บาเรียม (Barium) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.8 นิเกิล (Nickel) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.9 ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.10 สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.11 แมงกานีส (Manganese) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(5) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H2S) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(6) ไซยาไนด์ (Cyanide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

(7) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(8) สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(9) คลอรีนอิสระ (Free Chlorine) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(10) เพสติไซด์ (Pesticide) ต้องไม่มี

(11) อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส

(12) สี ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

(13) กลิ่น ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

(14) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

(15) ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เวลา

5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

(16) ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(17) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและด่างของน้ำ (pH Meter)

(2) การตรวจสอบค่าทีดีเอส ให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

(3) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fibre Filter Disc)

(4) การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้

4.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคดเมียม แบเรียม ตะกั่ว นิเกิล และแมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิค แอบซอฟชั่น สเปคโตร์โฟโตเมตตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไดเร็คแอสไพเรชั่น (Direct Aspiration) หรือวิธีพลาสม่า อีมิสชั่น สเปคโตร์สโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิล พลาสม่า (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิค และเซเลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอฟชั่นสเปคโตร์โฟโตเมตตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไฮไดรด์เจนเนอเรชั่น (Hydride Generation) หรือวิธีพลาสม่า อีมิสชั่น สเปคโตร์สโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิล พลาสม่า (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.3 การตรวจสอบค่าปรอท ให้ใช้วิธีอะตอมมิคแอบซอฟชั่น โคลด์ เวเปอร์ เทคนิค (Atomic Absorption Cold Vapour Technique)

(5) การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการไตเตรท (Titrate)

(6) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีนบาร์บิทูริค แอซิค (Pyridine - Barbituric Acid)

(7) การตรวจสอบค่าฟอร์มาลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Spectrophotometry)

(8) การตรวจสอบค่าสารประกอบฟีนอล ให้ใช้วิธีกลั่น และตามด้วยวิธี 4 – อะมิโน แอนติไพรีน (Distillation, 4 - Aminoantipyrine)

(9) การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอโดเมตริค (Iodometric Method)

(10) การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ ให้ใช้วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas - Chromatography)

(11) การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิวัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ

(12) การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมันให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

(13) การตรวจสอบค่าบีโอดี ให้ใช้วิธีอะไซด์ โมดิฟิเคชั่น (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกันหรือวิธีการอื่นที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมให้ความเห็นชอบ

(14) การตรวจสอบค่าทีเคเอ็น ให้ใช้วิธีเจลดาห์ล (Kjeldahl)

(15) การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลาย โดยโปตัสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate digestion)

ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย ของสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Work Associantion และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดไว้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2539

ไชยวัฒน์ สินธุวงศ์

(นายไชยวัฒน์ สินธุวงศ์)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

ประกาศลงในราชกิจจานุเบกษา ฉบับประกาศทั่วไป เล่ม 113 ตอนที่ 52 ง หน้า 12 - 18 วันที่ 27 มิถุนายน 2539

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวนิษา โพธิกุล
วัน เดือน ปีเกิด	7 ตุลาคม 2522
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (สาขาวิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สถานที่ทำงาน	บริษัท เมเทค คิทามูระ (ประเทศไทย) จำกัด
ตำแหน่ง	วิศวกรอาวุโส

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2551) “อุตสาหกรรมชุบโลหะ” ค้นคืนวันที่ 12 พฤษภาคม 2554 จาก http://www2.diw.go.th/I_Standard/Web/pane_files/Industry26.asp

กระทรวงอุตสาหกรรม (2539) “กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน” ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2539

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์ (2539) *การบำบัดน้ำเสีย* กรุงเทพมหานคร มิตรนราการพิมพ์

ณัฐศักดิ์ ธราธารกุลวัฒนา, ณัฐกร วีระวัฒนานนท์ (2544) "การกำจัดโลหะทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์" ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มณีรัตน์ องค์วรรณดี (2542) "การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์" วิทยานิพนธ์ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์ และมั่นรักษ์ ตัณฑุลเวศม์ (2545) *เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย* กรุงเทพมหานคร โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แม้น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม (2539) *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ* กรุงเทพมหานคร ชวนพิมพ์

สมชาย พวงเพิกศึก และชูศักดิ์ แช่มเกษม (2518) "ทองแดง" ใน *หนังสือสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฉบับเสริมการเรียนรู้* 2

สุภาวดี หอจันทึกและคณะ (2551) "การกำจัดทองแดงออกจากน้ำยากัดทองแดงโดยใช้กระบวนการโบโรไฮไดรด์รีดักชั่น" ปริญญานิพนธ์ สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

_____. (2551) “สารประกอบเชิงซ้อนและลิแกนด์” ค้นคืนวันที่ 12 พฤษภาคม 2554 จาก http://www.oknation.net/blog/benzene/2008/01/21/entry-12

Bard A. J., Parsons R., and Jordan J. (1985). *Standard Potentials in Aqueous Solution*. New York: Marcel Dekker.

C. Gomez-Lahoz, and other. (2003). "Cobalt (II) removal from water by chemical reduction with sodium borohydride" *Water Research.* 6, 27 (July): 985-992.

Cherry, K.F., (1982). *Plating Waste Treatment.* Ann Arbor Science Publishers.

David M. Ayres, Allen P. Davis and Paul M. Gietka (1994). *Removing Heavy Metals from Wastewater*. Engineering Research Center Report University of Maryland.

Department of the army U.S. Corps of Engineers. (2001). *Engineering and Design Precipitation /Coagulation/Flocculation* Washington, DC.

Edward, G.F. (1991). "Chemical oxidation and reduction." In H.M. Freeman (ed.), *Standard Handard Book of Hazardous Waste Treatment and Disposal*. pp. 41-48. U.S. MaGraw-Hill.

Fleming, M.; and Ulman, J. *Sodium Borohydride Environmental Control Application : Reduction of Nickel (II) Complexes in Spent Electroless Plating Baths.* Proceedings of the Electroless Conference IV April 22-24, 1985.

Henri Reques. (1995). *Chemical Water Treatment Principles and Practice*. VCH Publish.

Jianming Lu, D.B. Dreisinger and W.C. Cooper. (1997). "Cobalt precipitation by reduction with sodium borohydride." *Hydrometallurgy.* 45, (November): 305-322.

Khurana, J.; and Gogia, A. (1997). "Synthetically Useful Reactions with Nickel Boride". *Organic Preparations and Procedures International.* 29, 1: 1-32.

Leckie, J. O., and J. A. Davis. (1980). "Aqueous environmental chemistry of copper." in J. 0. Nriagu (ed.), *Copper in the environment. Part 1. Ecological cycling*. pp. 89-105. New York. John Wiley & Sons.

Lee, C. L., and other. (1993). "An X-Ray photoelectron study of the reaction of metal irons with borohydride under reductive bleaching condition." *Tappi Journal.* 76, 129-133.

Lindsay, M. J., and Stennick, R. S. (1996). "Pollution Control using sodium borohydride" Annual Technical Conference-American Electroplaters Society 73rd. ed.: 1-11.

Patnaik, Pradyot. (2004). *Dean's Analytical Chemistry Handbook.* 2nd ed. New York: McGraw-Hill.

Paul N. Cheremisinoff. (1995) *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technology*. Marcel Dekker.

Steven A. Holtzman . (1994). *A comparison of different chemistries with emphasis on an innovative new treatment method*. Advanced Chemical Technology.

Thiokol. (1990?). Removal & Recovery of Heavy and Precious Metal with Sodium Borohydride. *Metal R&R Newsletter.* Denver Ventron Devision.

Wei-Chi Ying, Robert R. Bonk and Michael E. Tucker. (1998). "Treatment of Spent Electroless Nickel Plating Baths". *Hazardous Materials.* 18, 1: 69-89.

Ying Xu Tianyi Xu. (2008). *Heavy Metal Complexes Wastewater Treatment with Chelation Precipitation*. In Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008. The 2nd International Conference 16-18 May 2008. Shanghai.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวนิษา โพธิกุล
วัน เดือน ปีเกิด	7 ตุลาคม 2522
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (สาขาวิศวกรรมเคมี) มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สถานที่ทำงาน	บริษัท เมเทค คิทามูระ (ประเทศไทย) จำกัด
ตำแหน่ง	วิศวกรอาวุโส