การนำสังกะสีกลับคืนจากกากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย
โดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้า

นางสาวพิมลพร โตโภชนพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

RECOVERY OF ZINC FROM RAYON FIBER PRODUCTION FACTORY INDUSTRIAL SLUDGE BY CONTROLLED - POTENTIAL ELECTROLYSIS

Miss Pimonporn Tophochanapun

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การนำสังกะสีกลับคืนจากกากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้า
โดย	นางสาวพิมลพร โตโภชนพันธุ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา)

…… กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)

…… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒิกะ)

พิมลพร โตโภชนพันธุ์ : การนำสังกะสีกลับคืนจากกากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้า. (RECOVERY OF ZINC FROM RAYON FIBER PRODUCTION FACTORY INDUSTRIAL SLUDGE BY CONTROLLED - POTENTIAL ELECTROLYSIS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร. เจริญขวัญ ไกรยา, 118 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำกลับสังกะสีจากกากตะกอนด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่ง ศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดของการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน ได้แก่ ชนิดของตัวสกัด และค่าพีเอช ส่วนที่สอง ศึกษาหาประสิทธิภาพของการนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายสกัด โดยเลือกใช้ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดจากการทดลองส่วนแรกมาทดสอบแปรค่าศักย์ไฟฟ้า ผลของขั้วอ้างอิง พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำสังกะสีกลับคืนระหว่างการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีและไม่มีรอยต่อของสารละลาย

ผลการทดลองส่วนที่ 1 การทดลองละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ ที่ค่าพีเอชต่างๆ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 892.03 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเทียบกับตัวสกัดกรดไฮโดรคลอริก กรดซิตริก และ อีดีทีเอ พบว่าตัวสกัดที่ดีที่สุดคือ H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 สามารถละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุดที่ค่า 873.40 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าการสกัด 97.91%

ผลการทดลองส่วนที่ 2 การทดลองนำสังกะสีกลับคืน สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย เมื่อทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 876.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ นาทีที่ 150 สามารถทำให้สังกะสีในสารละลายลดลงเหลือ 298.50 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นค่าการกำจัด 66.72% และสามารถนำกลับสังกะสีได้ 0.0993 กรัม คิด เป็นค่าการนำกลับ 66.63% และสำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ณ นาทีที่ 30 สังกะสีในสารละลายลดลงเหลือ 17.13 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นค่าการกำจัด 98.05% รวมถึงพบโลหะสังกะสี 0.0299 กรัม หรือคิดเป็นค่าการนำกลับโลหะสังกะสี 20.06% และตะกอน $Zn(OH)_2$ หนัก 0.1648 กรัม ซึ่งคิดเป็นน้ำหนักสังกะสีในรูปตะกอน $Zn(OH)_2$ 0.1048 กรัม หรือ 72.75% Zn

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170505621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEY WORDS : ZINC / SLUDGE / ELECTROLYSIS / RECOVERY

PIMONPORN TOPHOCHANAPUN : RECOVERY OF ZINC FROM RAYON FIBER PRODUCTION FACTORY INDUSTRIAL SLUDGE BY CONTROLLED - POTENTIAL ELECTROLYSIS. ADVISOR : ASST.PROF.KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., CO-ADVISOR : CHAROENKWAN KRAIYA, Ph.D., 118 pp.

The present research studied a zinc exclusion from solid waste by the use of controlled-potential electrolysis. This work is composed of two sections. In the first section, a solvation of Zn from the sludge using various kinds of solvent at different pH was examined. Then, in the second section, the zinc recovery efficiency from the extractant solution was investigated in term of effects from applied potential, reference electrode as well as electrochemical cell type: 1- and 2-compartment cells.

Results of the Zn solvation in the first section indicate that sulfuric acid at pH 1 could extract 97.91% (873.40 mg/L) of Zn^{2+}, and it was considered to be the best extractant among the other tested solvents; hydrochloric acid, citric acid and ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA).

In the second section, 66.72% Zn removal from the H_2SO_4 extractant obtained in the 1-compartment cell after 7 volts potential was applied for 150 minutes. It was found that 0.0993 gram of Zn elemental was recoveried and this accountted for 66.63% Zn recovery. In the 2-compartment cells, 98.05% Zn removal from the H_2SO_4 extraction was achieved within 30 minutes electrolysis. A 0.0299 gram or 20.06% Zn elemental was recoveried along with 0.1648 gram $Zn(OH)_2$ which was accounted as 72.75% Zn component.

Department : Environmental Engineering Student's Signature…….....
Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature…….....
Academic Year : 2011 Co- advisor's Signature…….....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา ผู้ให้คำปรึกษา แนะแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิสุทธิ์ เพียรมนกุล และ อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒิกะ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ทุกๆ ท่านภายในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณบางส่วนจาก ทุนสนับสนุนโครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช (รหัสโครงการ FW002A) และสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษาแห่งชาติ ภายใต้โครงการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ (รหัสโครงการ FW652I)

ขอบคุณอาป๊า อาม้า ครอบครัว ญาติ ๆ เพื่อน ๆ และพี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม 5
2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย 5
2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย 5
2.2.2 บริเวณที่เกิดมลพิษ 7
2.2.3 การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเส้นใย 10
2.3 สังกะสี 11
2.4 การละลายโลหะหนักออกจากกากตะกอน 12
2.4.1 ไฮโดรเมทัลเลอร์จี (Hydrometallurgy) 12
2.4.2 ประเภทของกระบวนการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน 13
2.5 วิธีการกำจัดโลหะหนัก 16
2.5.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE) 16
2.5.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction) 17
2.5.3 รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis) 17

หน้า

2.5.4 การระเหย (Evaporation) 17
2.5.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) 18
2.5.6 การดูดติดผิว (Adsorption) 18
2.5.7 การตกตะกอน (Precipitation) 18
2.5.8 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery) 22
2.6 เซลล์เคมีไฟฟ้า 22
2.6.1 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า 22
2.6.2 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า 23
2.7 หลักการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า 24
2.7.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า 25
2.7.3 โพลาไรเซชัน 28
2.8 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า 29
2.8.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่
(Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode) 29
2.8.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่
(Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode) 30
2.9 ขั้วไฟฟ้า 31
2.9.1 แกรไฟต์ 31
2.9.2 เหล็กกล้าไร้สนิม 32
2.9.3 อะลูมิเนียม 32
2.10 ศักย์ขั้วไฟฟ้า 32
2.10.1 สมการเนินสต์ 33
2.10.2 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°) 34
2.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์เคมีไฟฟ้า 36
2.11.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน 36
2.11.2 ค่าการนำไฟฟ้า 37
2.11.3 กำลังไฟฟ้า 37
2.12 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า 38
2.13 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency (%)) 39

หน้า

2.14 การประยุกต์ใช้เคมีไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า 39
2.15 โวลแทมเมตรี (Voltametry) 41
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 43

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 48
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี 48
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ 48
3.1.2 สารเคมี 49
3.1.3 การเตรียมสารละลายสกัดที่ได้จากละลายตะกอน สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และสะพานเกลือ 50
3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า 50
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย 53
3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 การละลายสังกะสีด้วยตัวสกัด 55
3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2 การใช้กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า 60
3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ 64

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์ 65
4.1 การทดลองส่วนที่ 1 65
4.2.1 พารามิเตอร์ของกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย 65
4.2.2 การละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด 66
4.2 การทดลองส่วนที่ 2 73
4.2.1 โวลแทมเมตรีแบบรอบ (Cyclic Voltammetry) 73
4.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสี และประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีเคมีไฟฟ้าจากสารละลายสกัดในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย 74
4.2.3 เปรียบเทียบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย และแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย 80
4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการกำจัด 88
4.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี 88
4.3.2 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเคมี 88

หน้า

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 90
5.1 สรุปผลการวิจัย 90
5.2 ข้อเสนอแนะ 91
5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม 92

รายการอ้างอิง 93

ภาคผนวก 96
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง 97
ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ 111

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 118

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ผังกระบวนการผลิตเส้นใย 8

2.2 จุดกำเนิดกากของเสียอุตสาหกรรม 9

2.3 ผลการวิเคราะห์กากตะกอน 9

2.4 การใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงาน 10

2.5 เปอร์เซ็นต์สูงสุดของสังกะสีที่ถูกกำจัดออกจากกากตะกอนโดยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ และค่าพีเอชที่เหมาะสม 15

2.6 ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ 21

2.7 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานขั้วไฟฟ้าของสารละลายในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน (SHE) 35

3.1 การศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย 56

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาชนิดของตัวสกัดและผลของพีเอชที่มีต่อการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน 57

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ในสารละลายสกัดโดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย 61

3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ในสารละลายสกัดโดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย 63

3.5 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ 64

4.1 พารามิเตอร์ของกากตะกอนของเสีย(Zinc Clarifier) ของโรงงานอุตสาหกรรมอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย 66

4.2 เปรียบเทียบความสามารถในการละลายสังกะสีของการใช้ตัวสกัดแต่ละชนิด ณ ค่าพีเอชของตัวสกัดแต่ละชนิดของการทดลองกับงานวิจัยอื่น ๆ 70

4.3 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้ตัวสกัดแต่ละชนิดที่ค่าพีเอชที่ดีที่สุดในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนของการทดลองส่วนที่ 1 70

หน้า

4.4 เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน และเมื่อทำการสกัดด้วย H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 71
4.5 ค่ามาตรฐานคุณภาพดินตามประกาศกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (แสดงเฉพาะค่าโลหะหนัก)..... 72
4.6 รูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ 86
4.7 สมดุลมวลของสังกะสีกับรูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้า (แบบมีรอยต่อของสารละลายเปรียบเทียบกับแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย) ต่อประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ 87
4.8 สรุปค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการนำกลับสังกะสีในสารละลายสกัดจากกากตะกอนของเสียโรงงานผลิตเส้นใยด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าเมื่อควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์..... 89
ก.1 ผลการทดลองการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ..... 98
ก.2 ผลการทดลองการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ (Citric และ EDTA) 99
ก.3 ผลการทดลองการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ ในสภาวะที่สามารถละลายสังกะสีออกมาจากกากตะกอนได้มากที่สุด 100
ก.4 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อไม่ต่อขั้วอ้างอิง.....101
ก.5 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อไม่ต่อขั้วอ้างอิง 102
ก.6 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อไม่ต่อขั้วอ้างอิง 103
ก.7 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่าง ๆเมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง.....104

หน้า

ก.8 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง 105
ก.9 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง 106
ก.10 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง 107
ก.11 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง 108
ก.12 ผลเปรียบเทียบรูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้า.....109
ก.13 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน.....110
ก.14 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเมื่อทำการสกัดด้วย H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง 110

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 ผังกระบวนการผลิตเส้นใย 6

2.2 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและกากตะกอนในระบบ 8

2.3 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย 23

2.4 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยมีรอยต่อของสารละลาย
(ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน 24
(ข) ต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ 24

2.5 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า 25

2.6 กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า 26

2.7 การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก 27

2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลา
ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ 30
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา
ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ 30

2.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุม
แบบกระแสไฟฟ้าคงที่ 31

2.10 การจัดเซลล์ที่ประกอบด้วยแคโทดปรอท 41

2.11 โวลแทมโมแกรมแบบรอบทั่วไป 42

3.1 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง 49

3.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย 51

3.3 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย 52

3.4 ผังภาพรวมของการทำวิจัย 54

3.5 ลักษณะของกากตะกอนหลังอบแห้ง 56

3.6 การละลายสังกะสีออกจากตัวอย่างกากตะกอน 58

3.7 ผังแสดงวิธีการทดลองการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน 59

4.1 ตัวอย่างกากตะกอนของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย
ก่อน(ซ้าย)และหลัง(ขวา)อบแห้ง 66

หน้า

4.2 ความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมาจากกากตะกอน เมื่อทำการสกัด
ด้วยตัวสกัดชนิดต่างๆ ที่ค่าพีเอชต่าง ๆเป็นเวลา 24 ชั่วโมง..... 67
4.3 ความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมาจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ
ที่ค่าพีเอชที่สามารถละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุด 68
4.4 ร้อยละของการกำจัดสังกะสีที่ละลายออกมาจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ
ที่ค่าพีเอชที่สามารถละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุด 69
4.5 Cyclic votametry ของสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1
ที่สามารถละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุด 73
4.6 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1
เทียบกับเวลา เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3 และ 7 โวลต์
เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย.....75
4.7 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1
เทียบกับเวลา เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3 และ 7 โวลต์
เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย..... 75
4.8 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1
เทียบกับเวลา เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์
เมื่อต่อขั้วอ้างอิงและไม่ต่อขั้วอ้างอิง 76
4.9 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1
เทียบกับเวลา เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์
เมื่อต่อขั้วอ้างอิงและไม่ต่อขั้วอ้างอิง 77
4.10 ค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อทำการควบคุม
แบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์ตลอดการทดลอง (เส้นประ) และแบบปรับเปลี่ยนค่า
ศักย์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลอง (เส้นทึบ)..... 78
4.11 ความเข้มข้นของสังกะสีสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา
แบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์ตลอดการทดลอง (เส้นประ) และแบบปรับเปลี่ยนค่า
ศักย์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลอง (เส้นทึบ)..... 78
4.12 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา
แบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์ตลอดการทดลอง (เส้นประ) และแบบปรับเปลี่ยนค่า
ศักย์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลอง (เส้นทึบ)..... 79

หน้า

4.13 ความเข้มข้นของสังกะสีสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อเทียบกับแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย 80
4.14 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อเทียบกับแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย 81
4.15 ค่าพีเอชในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อเทียบกับแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย 81
4.16 ลักษณะการเข้าเกาะของสังกะสีที่ขั้วแคโทด เมื่อทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในสารละลาย H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย 84
4.17 ลักษณะขั้วแคโทดก่อน (ซ้าย) และหลัง(ขวา) เมื่อทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในสารละลายสกัดเมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย 85
4.18 ลักษณะของสารละลายสกัดก่อนทดลอง และตะกอนสีขาวที่เกิดขึ้น เมื่อทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ในสารละลายสกัด เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย..... 85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเนื่องจากการขยายตัวในภาคอุตสาหกรรมที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจึงมีการใช้ทรัพยากรเพิ่มขึ้นและก่อให้เกิดของเสียที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้นด้วยเช่นกัน ในปัจจุบันได้มีแนวคิดต่าง ๆ เกิดขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น หลักการเทคโนโลยีสะอาดที่มุ่งเน้นเรื่องการลดของเสียที่แหล่งกำเนิด และการนำกลับมาใช้ซ้ำ ซึ่งทั้ง 2 แนวคิดนี้ได้ช่วยลดปัญหาต้นทุนในการจัดการของเสียได้มากขึ้น ในกระบวนการอุตสาหกรรมต่าง ๆ ของโรงงานหลอมเหล็ก โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้า โรงงานสี และโรงงานฟอกย้อม มักจะก่อให้เกิดของเสียปนเปื้อนโลหะหนัก เช่น สังกะสี ตะกั่ว โครเมียม เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้มักจะปนเปื้อนในกากตะกอนจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นสูง หากมีการปล่อยของเสียเหล่านี้ออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่มีการบำบัด โลหะหนักจากกากตะกอนจะเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และก่อให้เกิดมลภาวะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการแยกโลหะหนักจากกากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมจึงเป็นกระบวนหนึ่งที่จะลดปัญหาโลหะหนักปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมได้

แร่โลหะที่สนใจในงานวิจัยนี้คือสังกะสี เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหรรม เช่น ใช้เป็นขั้วของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม ใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใย และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น สังกะสีสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อคุณภาพของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ คือ ที่ความเข้มข้นของสังกะสีเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนในเลือดของปลา และยังมีผลอันตรายต่อมนุษย์ คือ ถ้ารับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีสังกะสีเจือปนอยู่จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้รับสังกะสีในรูปของสังกะสีออกไซด์ ส่วนทางจมูกนั้นจะได้รับจากการสูดหายใจเอาฝุ่นละอองของสังกะสีเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้ระบบทางเดินหายใจตีบ ปอดอักเสบ และถ้าหายใจเอาสังกะสีออกไซด์มาก ๆ จะทำให้มีอาการอ่อนเพลียหนาวสั่น ปวดตามแขนขา และปวดศีรษะอย่างรุนแรงได้ จึงเป็นสิ่งที่สมควรอย่างยิ่งที่จะศึกษาถึงวิธีการในการบำบัดสังกะสีที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียของกระบวนการผลิตเพื่อลดการปนเปื้อนของสังกะสีในน้ำเสียให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดโดยกระทรวง

อุตสาหกรรม ซึ่งก็คือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงจะสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ หรือการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายสำหรับการประกอบการของอุตสาหกรรมในด้านนี้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการแยกสังกะสีออกจากกากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยวิธีการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด และใช้กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process) เพื่อแยกสังกะสีออกจากสารละลาย ซึ่งจะทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมใน การแยกสังกะสีออกจากกากตะกอน เช่น ชนิดของตัวสกัด ความเข้มข้นของตัวสกัด ปริมาณศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการควบคุมศักย์ไฟฟ้าของระบบให้คงที่ ออกแบบการทดลองโดยทำการหาสภาวะที่ดีที่สุดในการนำกลับสังกะสีโดยการแปรค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ รูปแบบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าตามลำดับ ซึ่งได้ทดลองวิธีต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cell with liquid junction) ซึ่งเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์ กำหนดขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่น แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสีกับวิธีต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย (Cell without liquid junction) สุดท้ายนำสภาวะที่ได้จากการวิจัยที่ดีที่สุดมาเสนอเป็นแนวทางในการออกแบบระบบการนำกลับสังกะสีสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมต่อไป เพื่อเป็นแนวทางในการลดปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในกากตะกอนและเป็นการเพิ่มมูลค่าของสังกะสีในการนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. หาวิธีการที่เหมาะสมในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน
2. หาสภาวะที่เหมาะสมและตัวแปรที่มีผลต่อการนำกลับสังกะสีจากกากตะกอนโดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ได้แก่ รูปแบบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า และค่าศักย์ไฟฟ้าตามลำดับ
3. หาประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีจากกากตะกอนโดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ได้แก่ รูปแบบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า และค่าศักย์ไฟฟ้า ตามลำดับ
4. หาปริมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการกำจัดสังกะสีและการนำกลับสังกะสีจากกากตะกอนของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้การทดลองแบบทีละเท (Batch) โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. กากตะกอนที่นำมาทดลองมาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (Zinc Clarifier) ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย
3. วิธีการทดลองแยกสังกะสีจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและตัวแปรที่มีผลต่อการแยกสังกะสีจากกากตะกอนด้วยตัวทำละลาย ได้แก่ชนิดของตัวสกัด ความเข้มข้นของตัวสกัด และค่าพีเอช เลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปทำการทดลองวิธีทางเคมีไฟฟ้าต่อไป
4. วิธีการแยกสังกะสีด้วยเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร และใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์ แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร ทำการต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีกับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ที่ใช้สะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์ ใช้สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นสารละลายสกัดจากข้อ 3 ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร และใช้ค่าศักย์ไฟฟ้า 3, 7 และ 10 โวลต์
5. ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้ววัดค่าพีเอช และวัดความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีจากกากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยโดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่
2. ได้ลดปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีในกากตะกอน เพื่อให้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานของกากของเสียอันตราย

3. ได้แนวทางในการเพิ่มมูลค่ากากของเสียอันตราย และนำสังกะสีกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ในอนาคต
4. ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการพัฒนา และปรับปรุงวิธีการบำบัดตะกอนของเสียอันตรายในอุตสาหกรรม

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 **ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม** (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง ของที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิต หรือสิ่งของที่เสื่อมสภาพจนใช้การไม่ได้ หรือไม่ต้องการใช้อีกต่อไป ซึ่งอาจมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้

2.2 **โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย** (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2.2.1 **กระบวนการผลิตเส้นใย**

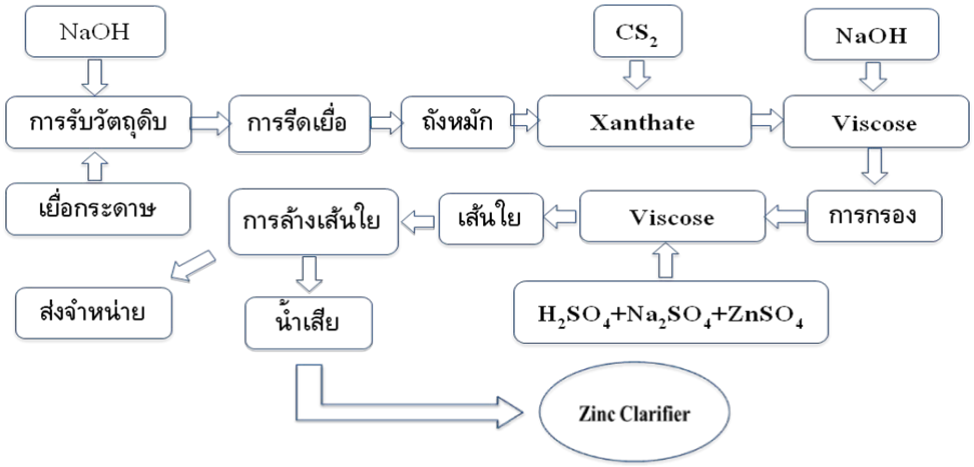
กระบวนการผลิตพอสังเขปของอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการผลิต ดังนี้

1. <u>กระบวนการผลิตเส้นใย</u> จัดว่าเป็นกระบวนการผลิตหลัก โดยการนำเยื่อเซลลูโลสซึ่งอยู่ในรูปแผ่นกระดาษมาผสมกับด่างโซดาไฟในถังกวน เพื่อทำเป็นเยื่อด่าง (Alkali cellulose) แล้วส่งไปยังเครื่องรีดโซดาไฟส่วนเกินออก เพื่อให้ได้เยื่อด่างที่มีอัตราส่วนของด่างโซดาไฟที่เหมาะสม เยื่อด่างจะถูกส่งต่อไปยังถังหมักเพื่อทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสสั้นลงได้ตามที่ต้องการ

จากนั้นเยื่อด่างจะถูกส่งไปทำปฏิกิริยากับสารคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนจากเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสแซนเทส (Cellulose xanthate) และจะถูกนำไปทำละลายต่อด้วยสารละลายด่างโซดาไฟ เกิดเป็นสารละลายที่เรียกว่า “วิสโคส” (Viscose)

สารละลายวิสโคสนี้จะถูกนำไปกรองเพื่อนำส่วนที่ไม่ละลายออก พร้อมกับผ่านกระบวนการดูดฟองอากาศ จากนั้นสารละลายวิสโคสจะถูกปั๊มไปยังบ่อในสารละลายผสมที่ประกอบไปด้วย กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสังกะสีซัลเฟต ($ZnSO_4$)

สารละลายวิสโคสและสารละลายผสมจะถูกฉีดเป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก เส้นใยที่ได้นี้จะถูกนำไปตัดแล้วต้มให้ร้อนเพื่อให้เส้นใยเกิดการเปิดตัวได้ดี จากนั้นจะนำเส้นใยไปล้างสารเคมีก่อนที่จะเข้าสู่การอบแห้งเพื่ออัดเป็นก้อน และส่งจำหน่ายต่อไป ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ผังกระบวนการผลิตเส้นใย

2. <u>กระบวนการผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2)</u> เป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการนำถ่านมาเผาเพื่อไล่ความชื้นและสารระเหยออก หลังจากนั้นนำมาเติมลงในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ ถ่านที่อยู่ในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยการอาร์คของขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว จากนั้นกำมะถันเหลวจะถูกฉีดเข้าไปในเตาผลิตคาร์บอนได-ซัลไฟด์ กำมะถันจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในถ่าน เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งเข้าไปในถัง Sulfur separator เพื่อแยกเอาละอองไอกำมะถันออกจากก๊าซ ส่วนที่เป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกส่งผ่านเข้าระบบควบแน่น ก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกควบแน่นเป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์เหลว และจะถูกนำไปเก็บในถังเก็บ Crude CS_2 ในส่วนนี้จะถูกนำมากลั่นให้เป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่บริสุทธิ์ จากนั้นถึงจะส่งไปใช้ในกระบวนการผลิต

3. <u>กระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)</u> เป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการปั๊มกำมะถันเหลวเข้าสู่เตาเผากำมะถันโดยใช้ลมจาก Blower ในการเผาไหม้ให้เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่อุณหภูมิ 950 ถึง 970 องศาเซลเซียส ก๊าซร้อนที่ได้จะถูกลดอุณหภูมิโดยส่งผ่านหม้อน้ำ ก๊าซที่ลดอุณหภูมิแล้วจะถูกส่งเข้าไปในถัง Converter เพื่อให้ก๊าซ

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยมีสารเร่งปฏิกิริยา ก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ออกจาก Converter จะถูกลดอุณหภูมิก่อนจะส่งเข้าหอจับก๊าซ (Absorption tower) เพื่อจับก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ให้เปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริก ก๊าซที่เหลือจากหอจับก๊าซจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยน้ำ (Water scrubber) เพื่อบำบัดก๊าซ หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยสารละลายด่าง (Caustic scrubber) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ไอน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตสามารถนำไปหลอมละลายกำมะถัน ส่วนลมร้อนและน้ำร้อนสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้

2.2.2 บริเวณที่เกิดมลพิษ

มลพิษที่เกิดจากกระบวนการผลิตมี 3 ประเภท คือ อากาศเสีย น้ำเสีย และกากอุตสาหกรรม

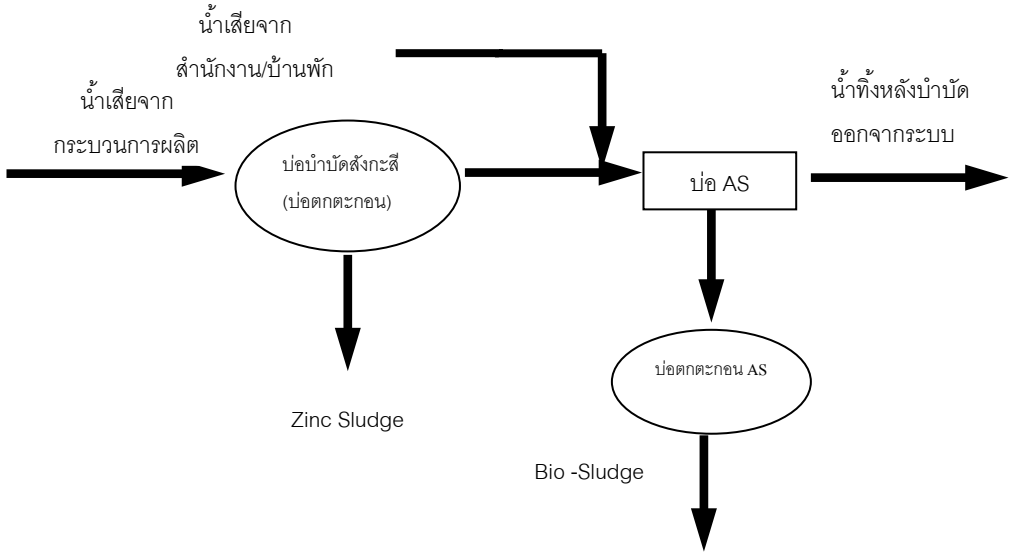
1. <u>มลพิษทางอากาศ</u> ที่สำคัญ คือ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มีจุดที่เกิด 2 แห่ง คือที่เครื่องจักร Spinning machine เป็นผลจาก Side reaction ของปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารละลายวิสโคสให้กลายเป็นเส้นใยและ ที่ถังเก็บสารละลาย Spin bath ซึ่งใช้หมุนเวียนสารละลาย และมลพิษอีกอย่างคือ ฝุ่นเขม่าจากBoilerโดยใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

2. <u>น้ำเสีย</u> มี 2 ประเภท คือ น้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดและมีสารโลหะหนักสังกะสีมีจุดกำเนิดที่ขั้นตอนกระบวนการล้างเส้นใย กับน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกลางหรือด่างและไม่มีสารโลหะหนักสังกะสี เป็นน้ำเสียที่มาจากแหล่งต่าง ๆ ภายในโรงงาน

3.<u>กากของเสียอุตสาหกรรม</u> มี 2 ส่วนที่สำคัญ คือ กากตะกอนของเสียสังกะสี ซึ่งจัดเป็นกากของเสียอันตรายและ กากตะกอนชีวภาพ ซึ่งไม่จัดว่าเป็นกากของเสียอันตราย กากทั้งสองส่วนนี้จะถูกส่งไปกำจัดโดยวิธีการฝังกลบ โดยว่าจ้างบริษัท โปรเฟสชั่นแนลเวสต์เทคโนโลยี (1999) จำกัด (มหาชน) และบริษัท เบตเตอร์เวิลด์กรีน จำกัด (มหาชน) เป็นผู้ดำเนินการโดยแสดงจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและกากตะกอนในโรงงานดังรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 สรุปประเภท ปริมาณและวิธีบำบัดมลพิษที่เกิดจากโรงงาน (เฉพาะกากของเสียอุตสาหกรรม)

มลพิษ	แหล่งที่มา	พารามิเตอร์หลัก	ปริมาณต่อวัน	การบำบัดในปัจจุบัน
กากของเสียอุตสาหกรรม	กากของเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี (Zinc Sludge)	สังกะสี (Zinc)	30 ตัน/วัน	ว่าจ้างบริษัทเอกชนรับไปกำจัด
	กากของเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Bio Sludge)	สารอินทรีย์	13.5 ตัน/วัน	ว่าจ้างบริษัทเอกชนรับไปกำจัด



รูปที่ 2 .2 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและกากตะกอนในระบบ

กากของเสียอุตสาหกรรม ที่เกิดขึ้นภายในโรงงานทั้งอันตรายและไม่อันตรายมีรายละเอียดดังตารางที่ 2.2 ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างกากตะกอน Zinc Sludge และ Bio Sludge โดยผลการตรวจวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 จุดกำเนิดกากของเสียอุตสาหกรรม

มลพิษ	ปริมาณ (ตันต่อปี)	แหล่งกำเนิด/ เครื่องจักร	วิธี/ระบบบำบัด
1.Zinc Sludge	10,851	ระบบบำบัดทางเคมี (การตกตะกอน)	ส่งกำจัดโดยบริษัท โปรเฟสแนล เวสต์ เทคโนโลยี (1999) จำกัด (มหาชน)
2.Bio Sludge	4,950	ระบบบำบัดทางชีวภาพ (Activated Sludge)	ส่งกำจัดโดยบริษัท เบตเตอร์เวิลด์ กรีน จำกัด (มหาชน)
3.กากของเสียอื่นๆ	867	ขี้เถ้าจาก Boiler	ส่งกำจัดโดยบริษัท โปรเฟสแนล เวสต์ เทคโนโลยี (1999) จำกัด (มหาชน)

ที่มา: บริษัท ไทยเรยอน จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์กากตะกอน

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	Units	ค่าตรวจวัด	ค่ามาตรฐาน*
1.Zinc Sludge			
Zinc (on waste)	mg/kg	8130	5000
Zinc (Leachate)	mg/L Zn	0.713	250
2.Bio Sludge			
Zinc (on waste)	mg/kg	5740	5000
Zinc (Leachate)	mg/L Zn	0.439	250

หมายเหตุ: เก็บตัวอย่างวันที่ 14 มิถุนายน 2551

*ค่ามาตรฐานเป็นค่าที่กำหนดเพื่อจัดกากของเสียอยู่ในกลุ่มกากของเสียอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

ผลจากการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2.3 พบว่า กากตะกอนทั้งสองชนิดจัดอยู่ในประเภทกากของเสียอันตราย ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแล้ว กากตะกอน Bio Sludge ควรมีองค์ประกอบของสังกะสีเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าระบบการบำบัด

ทางเคมี (กำจัดสังกะสี) มีประสิทธิภาพไม่ดีนัก ทำให้มีสังกะสีเข้ามาที่ระบบบำบัดทางชีวภาพ กากตะกอน Bio Sludge จึงมีปริมาณสังกะสีปนเปื้อนเป็นจำนวนมาก

2.2.3 การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเส้นใย

สรุปการใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงาน แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 การใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงาน

รายการ	ปริมาณ (ตันต่อเดือน)	ปริมาณ (ตันต่อ 1 ตันผลิตภัณฑ์)
ผลิตภัณฑ์		
เส้นใยเรยอน	11,250	1
เกลือโซเดียมซัลเฟต	8,670	0.77
วัตถุดิบ		
เยื่อกระดาษ	11,600	1.031
โซดาไฟ	6,360	0.565
สารคาร์บอนไดซัลไฟด์	1,800	0.160
กรดซัลฟิวริก	8,720	0.775
สังกะสี	35	0.003
น้ำ Soft Water	675,250	60
น้ำ Hard Water	247,600	22
ของเสีย		
น้ำเสีย	1,181,700	105
อากาศเสีย	7.3 ล้าน ลบ.ม.	650 (ลบ.ม./ตัน)
กากตะกอน Bio Sludge	410	0.037
กากตะกอน Zinc Sludge	900	0.080
กากของเสียอื่นๆ	72	0.006

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

2.3 สังกะสี

สังกะสีเป็นธาตุในกลุ่ม 2 ของตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ธาตุ คือ Zn มีเลขอะตอมเท่ากับ 30 และมีอยู่หลายไอโซโทปในธรรมชาติ ได้แก่ ^{64}Zn, ^{66}Zn, ^{67}Zn, ^{68}Zn และ ^{70}Zn

สังกะสีบริสุทธิ์จะมีความอ่อน ซึ่งสามารถม้วนเป็นแผ่นหรือใช้ทำเป็นแผ่นฟรอยได้ ค่า Oxidation state มีค่าเท่ากับ +2 เมื่ออยู่ในรูปสารประกอบ และจะคงสภาพไม่เปลี่ยนแปลงอยู่ได้จนถึงอุณหภูมิ 225 องศาเซลเซียส ในสภาวะอากาศแห้ง แต่ในสภาวะที่มีความชื้นและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่จะเกิดการออกซิไดซ์ได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเผาในบรรยากาศจะเกิดเป็นออกไซด์ขึ้น คือ ZnO ในบรรยากาศที่เย็นสังกะสีจะไม่ทำปฏิกิริยากับ คลอรีน โบรมีน และฟลูออรีน แต่ในบรรยากาศที่มีความชื้นอาจจะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดเป็นสารประกอบแฮไลด์ขึ้นได้ ผงสังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์เกิดเป็น Zinc sulfide (ZnS) แต่หากทำปฏิกิริยากับอะเซทิลีนจะได้ Zinc carbide (ZnC_2) สังกะสีเป็น Reducing agent ที่แรงสามารถที่จะรีดิวซ์เกลือของแมงกานีส เหล็ก นิเกิล ทองแดง และแคดเมียม เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกจะรีดิวซ์ไอออน NO_3^- ให้กลายเป็นไอออน NH_4^+ และจะทำปฏิกิริยากับกรดอื่น ๆ เกิดเป็นเกลือขึ้น สังกะสีจะละลายในอัลคาไลน์และแอมโมเนีย ซึ่งเกลือของสังกะสีส่วนใหญ่จะละลายน้ำ

ดังนั้นสังกะสีจึงถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหรรม เช่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น ถึงแม้ว่าสังกะสีจะเป็นตัวที่นิยมถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต แต่ก็สามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมได้ถ้าหากเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งสังกะสีเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนในเลือดของปลา ส่วนอันตรายที่เกิดต่อมนุษย์ คือ ถ้ารับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีสังกะสีเจือปนอยู่จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้รับสังกะสีในรูปของสังกะสีออกไซด์ ส่วนทางจมูกนั้นจะได้รับจากการสูดหายใจเอาฝุ่นละอองของสังกะสีเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ปอดอักเสบ และถ้าหายใจเอาสังกะสีออกไซด์มาก ๆ จะทำให้มีอาการอ่อนเพลียหนาวสั่น ปวดตามแขนขา และปวดศีรษะอย่างรุนแรงได้ ดังนั้นจึงมีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ให้มีความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำทิ้งไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.4 การละลายโลหะหนักออกจากตะกอน

2.4.1 **ไฮโดรเมทัลเลอร์จี** (Hydrometallurgy) (บดีพล รุ่งเรืองธรรม, 2543)

เป็นการทำให้โลหะอยู่ในสถานะของเหลวสำหรับใช้ในการนำกลับของโลหะจากสินแร่ธรรมชาติ สินแร่ที่ผ่านการแต่งแร่แล้ว และการหมุนเวียนการใช้ตะกอนจากส่วนที่เหลือตกค้างโดยกระบวนการ Hydrometallurgy จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ กระบวนการชะละลาย การทำให้สารละลายเข้มข้นและทำให้บริสุทธิ์ และการนำกลับของโลหะ

1.<u>กระบวนการชะละลาย (Leaching Process)</u>

การชะละลายเป็นการใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลวไปละลายสารที่อยู่ในของแข็งที่ละลายได้ในตัวทำละลาย ออกมาจากของผสมที่เป็นของแข็ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้เรียกว่า ผลชะละลาย (Leachate) ยกตัวอย่างเช่น การสกัดยูเรเนียมด้วยการชะละลายโดยการใช้กรดซัลฟิวริก หรือโซเดียมคาร์บอเนต การสกัดทองแดงออกจากสินแร่ โดยการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก หรือสารละลายแอมโมเนีย การสกัดทองออกจากสินแร่ด้วยสารละลายโซเดียมไซยาไนด์ โดยตัวแปรที่สำคัญของการชะละลายได้แก่ ศักย์ของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน อุณหภูมิ และค่า pH ของสารละลาย ซึ่งต้องควบคุมเพื่อให้กระบวนการละลายขององค์ประกอบของโลหะที่ต้องการเกิดขึ้นได้ดี และสุดท้ายแล้วจะได้ออกมาในรูปของสารละลาย

2. <u>การทำให้สารละลายเข้มข้นและทำให้บริสุทธิ์ (Concentrated and Purification)</u>

เนื่องจากภายหลังกระบวนการชะละลายเสร็จสิ้นแล้ว สารละลายที่ได้จากการผ่านขั้นตอนการชะละลายจะมีสารชนิดอื่นละลายหรือเจือปนอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้ต้องได้รับการขจัดออกไปก่อนที่จะดำเนินการขั้นตอนการนำกลับโลหะ เพราะหากไม่นำสารเจือปนเหล่านี้ออกจากสารละลายแล้วจะมีผลต่อการแยกโลหะที่ต้องการได้ โดยกระบวนการที่สามารถทำให้สารละลายมีความเข้มข้นและกระบวนการทำให้สารละลายบริสุทธิ์ได้แก่ การกรอง(Filtration), การตกตะกอน (Precipitation), การสกัดโดยตัวทำละลาย (Solvent Extraction) และ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

3. การนำกลับของโลหะ (Metal recovery)

หลังจากผ่านขั้นตอนการทำให้สารละลายมีความเข้มข้น และกระบวนการทำให้สารละลายบริสุทธิ์แล้ว ขั้นตอนสุดท้ายในกระบวนการ Hydrometallurgy คือ กระบวนการนำกลับโลหะ ซึ่งเป็นโลหะที่เราต้องการ ซึ่งอาจจะเหมาะสมกับการขายเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบโดยมักจะถูกผลิตขึ้นได้โดยตรงจากกระบวนการนำกลับของโลหะ วิธีของกระบวนการนำกลับของโลหะชนิดหลัก ๆ ได้แก่ การแยกด้วยไฟฟ้า (electrolysis) และการตกตะกอน (precipitation) เป็นต้น

2.4.2 **ประเภทของกระบวนการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน** (Wong and Henry, 1991)

กระบวนการละลายโลหะหนักออกจากตะกอนที่ใช้นั้น มีอยู่ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ กระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการทางเคมี

1.กระบวนการทางชีวภาพ

เป็นกระบวนการละลายโลหะหนักโดยอาศัยประโยชน์จากกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ของจุลินทรีย์ (Micro – organism) ซึ่งจะก่อให้เกิดกรดขึ้นแล้วกรดที่เกิดขึ้นนี้จะไปละลายโลหะหนักออกจากตะกอนอีกทีหนึ่งโดยจุลินทรีย์ที่ใช้ได้แก่ จุลินทรีย์ในตระกูล (Genus) Thiobacillus เช่น Thiobacillus thiooxidans, Thiobacillus ferrooxidans ซึ่งจัดอยู่ในจุลินทรีย์ที่สร้างอาหารได้เอง โดยใช้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของสาร

2.กระบวนการทางเคมี

เป็นกระบวนการละลายตะกอนด้วยสารเคมี ตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการเคมี คือ กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และสารละลายไฮดรอกไซด์ (-OH) เช่น แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) เป็นต้น การเลือกใช้ตัวทำละลายขึ้นอยู่กับสมบัติทางเคมีและทางฟิสิกส์ของตะกอนโลหะ สารละลายกรดเป็นตัวทำละลายที่นิยมใช้และสามารถละลายโลหะได้เป็นส่วนมาก โดยสมบัติที่มักนำมาใช้พิจารณามีดังต่อไปนี้

- **ชนิดของกรด** กรดเกลือ เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) สามารถละลายโลหะได้ดีกว่ากรดอินทรีย์ มีงานวิจัยที่บ่งบอกว่า ความสามารถในการละลายโลหะสังกะสีของกรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริกและกรดไนตริกมีความแตกต่างกันเล็กน้อยแต่กรดที่นิยมใช้

คือ กรดซัลฟิวริก เนื่องจากเป็นกรดที่มีราคาถูกและง่ายในการกรองแยก (Feltz and Logan, 1985)

- **ปริมาณกรด** ปริมาณกรดที่ต้องการขึ้นอยู่กับชนิดของตะกอนโดยเฉพาะค่าปริมาณสสารแห้ง (Dry Matter) ของตะกอน ซึ่งถ้าปริมาณสสารแห้งมีค่ามาก ปริมาณกรดที่ใช้ในการละลายก็จะมากขึ้นด้วย
- **ค่าความเป็นกรด – เบส (pH)** ความสามารถในการละลายจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลง ค่าพีเอชที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 1 – 2 โดยถ้าค่าพีเอชสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงประมาณ 9 -10 โลหะสังกะสีจะละลายได้น้อยที่สุด
- **ปริมาณของตะกอน** ค่าการละลายของโลหะจะน้อยลงเมื่อปริมาณของตะกอนในกระบวนการเพิ่มขึ้น
- **เวลาในการสัมผัส** เวลาที่ใช้ในการสัมผัสจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายชนิด เช่น ค่าพีเอช ชนิดของกรดและโลหะในตะกอน สำหรับตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดตะกอนแบบไร้ออกซิเจน โดยทำการละลายด้วยกรดที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 2 พบว่า 70 % ของแคดเมียม นิกเกิล แมงกานีส และสังกะสีจะถูกละลายเมื่อเวลาผ่านไป 18 ชั่วโมง แต่มีแค่ 26 % ของทองแดง และ 4 % ของตะกั่วกับโครเมียมเท่านั้นที่ละลาย (Sreekrishnan and Tyagi,1944)
- **ชนิดและความเข้มข้นของโลหะ** โลหะจะละลายได้ง่ายขึ้นเมื่อความเข้มข้นของโลหะในตะกอนมากขึ้น โลหะแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายไม่เท่ากัน ขึ้นกับสถานภาพของโลหะที่อยู่ในตะกอน ถ้าโลหะอยู่ในรูปของสารประกอบอนินทรีย์ จะมีพันธะในการยึดเกาะน้อย จึงสามารถละลายได้ง่ายและรวดเร็วกว่าสารประกอบเชิงซ้อน
- **ความชื้นในตะกอน** ตะกอนที่ผ่านการตกตะกอนเป็นระยะเวลายาวนาน ความชื้นภายในตะกอนจะระเหยออกไป ทำให้อนุภาคภายในตะกอนอยู่ใกล้ชิดกันมากยิ่งขึ้นทำให้ตะกอนมีความเสถียรขึ้นค่าการละลายจึงลดลง
- **ขนาดอนุภาคของตะกอน** ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ จะมีพื้นผิวสัมผัสกับกรดน้อย ทำให้การละลายต่ำกว่าตะกอนที่มีขนาดเล็ก
- **อุณหภูมิ** การละลายโดยส่วนใหญ่ จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน กล่าวคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการละลายจะเพิ่มขึ้น

สืบเนื่องมาจากการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ตัวสกัดหลายชนิดในการกำจัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนปนเปื้อนจากหลายแหล่ง ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าการสกัดเป็น

กระบวนการของการแยกสารปนเปื้อนจากดิน กากตะกอน และตะกอนดินโดยการใช้สารสกัดเคมีเพื่อลดปริมาณของเสียอันตราย สำหรับการบำบัดได้มีการนำใช้ไปในกระบวนการฟื้นฟูของดินปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก สามารถถูกสกัดได้ด้วยกรดอินทรีย์ สารคิเลทติ้งและสารเคมีอนินทรีย์บางตัว หากกรดเพิ่มขึ้นในกากตะกอน โลหะหนักในกากตะกอนสามารถละลายออกมาอยู่ในกรดได้ กระบวนการนี้เกี่ยวกับการแลกเปลี่ยนโปรตอนจากกรดโดยการละลาย (Solubilization) ของโลหะหนักในตะกอนดังแสดงในสมการที่ (1) ดังนั้นปัจจัยสำคัญที่สุดที่มีผลได้แก่ค่าพีเอช ส่วนของสารสกัดที่เป็น chelating agents เช่น EDTA (ethylene diamine tetraacetic acid) ทำงานโดยจับเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก ดังแสดงในสมการที่ (2) ปฏิกิริยาสามารถแสดงดังต่อไปนี้ (Babel and Dacera, 2006) โดยเปอร์เซ็นต์สูงสุดของสังกะสีที่ถูกกำจัดออกจากกากตะกอนโดยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ ณ ค่าพีเอชที่เหมาะสม มีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.5

$$\text{Sludge-M + Acid} \longrightarrow \text{Sludge+ } M^{z+} \text{ + Acid} \qquad (1)$$

$$\text{Sludge-M + EDTA} \longrightarrow \text{Sludge + (M - EDTA) Complex} \qquad (2)$$

ตารางที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์สูงสุดของสังกะสีที่ถูกกำจัดออกจากกากตะกอนโดยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ และค่าพีเอชที่เหมาะสม (Babel and Dacera, 2006)

Extracting agent/pH	Maximum Zn removal efficiency (%)	Reference
Inorganic acids		
H_2SO_4		
pH ~2	72	Jenkins and Scheybeler (1981)
pH 1.5	100	Lo and Chen (1990)
	50	
pH 1.5	66	Blais et al. (1992)
HCl		
pH 2	77	Logan and Feltz (1985)
pH <3	80	Marchioretto et al. (2002)
HNO_3		
pH <3	80	Marchioretto et al. (2002)
pH 3	65	Veeken and Hamelers (1999)
Extracting agent/pH	Maximum Zn removal efficiency (%)	Reference
Chelating agents		
EDTA		
pH ~2	45	Jenkins and Scheybeler (1981)

Extracting agent/pH	Maximum Zn removal efficiency (%)	Reference
pH 1.5	23-26	Lo and Chen (1990)
NTA		
pH 1.5	15	Lo and Chen (1990)
Organic acids		
Citric acid		
pH 3	85	Marchioretto et al. (2002)
pH 3	90	Veeken and Hamelers (1999)
Oxalic acid		
pH 3	70	Veeken and Hamelers (1999)

เมื่อละลายโลหะหนักให้อยู่ในสารละลายแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการกำจัดโลหะหนักเหล่านั้นออกจากสารละลาย ซึ่งปัจจุบันมีกระบวนการบำบัดต่างๆ มากมายที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้เป็นการบำบัดขั้นต่อไป ซึ่งแต่ละกระบวนการมีเทคนิคและข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไปดังนี้

2.5 วิธีการกำจัดโลหะหนัก

กระบวนที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยสรุปวิธีการบำบัดต่างๆได้ดังนี้

2.5.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชื่นชอบหรือถูกดูดจับโดยเรซิ่น (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้มีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ โดยที่เรซิ่นจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่แต่จะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งถ้าเรซิ่นเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคทไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation exchanger) แต่ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion exchanger) วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มี

ปริมาณน้อยและจะต้องทำการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิ่น เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Manahan, 1993)

2.5.2 **ออกซิเดชันและรีดักชัน** (Oxidation and reduction)

กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันเป็นวิธีการทางเคมีอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการบำบัดจะทำการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนลงไปได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรด์ เปอร์แมงกาเนต โครเมตและไนเตรต เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอออน(II) ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

2.5.3 **รีเวิร์ส ออสโมซีส** (Reverse osmosis)

กระบวนการรีเวิร์ส ออสโมซีส เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตด และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน semi permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่จะใช้จึงต้องทนต่อแรงดันได้สูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้น ได้แก่ การปรับค่าพีเอช การแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดส์รุนแรงออก และการกรองสารแขวนลอยออกเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน เป็นต้น

2.5.4 **การระเหย** (Evaporation)

วิธีการระเหยน้ำออกจัดเป็นวิธีที่ง่าย ที่ใช้ในการทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum evaporation) วิธีการบำบัดนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.5.5 **อิเลคโตรไดอะไลซีส** (Electro dialysis)

กระบวนการอิเลคโตรไดอะไลซีสเป็นวิธีการที่ใช้แยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนจะขึ้นอยู่กับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้ใช้ต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการกำจัดได้

2.5.6 **การดูดติดผิว** (Adsorption)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารมลทินที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับสูงได้ และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกำมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่นๆได้ เช่น ตะกั่ว และทองแดง เป็นต้น

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดติดผิว

2.5.7 **การตกตะกอนทางเคมี** (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้

ในการตกตะกอนต้องพิจารณาถึงค่าพีเอช หลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปจะมีพีเอชที่สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ตารางที่ 2.6 ได้แสดงค่าพีเอชที่เหมาะสม และชนิด

ของสารเคมีที่ใช้เติมผสมลงไป เพื่อกำจัดหรือแยกมลสารออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่าในแต่ละมลสารจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้ยังทำให้ตกผลึกในรูปของหินปูน ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนมาก ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นมีราคาแพงกว่าและเกิดอันตรายได้มากกว่าแคลเซียมออกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า จึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแล้วอาจทำการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับค่าพีเอชหรือเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะนั้นมีความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

1. <u>การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)</u>

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยการเติมสารเคมี คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะอิออนที่อยู่ในสารละลาย และจะเกิดปฏิกริยาดังสมการที่ 2-1 โดย M^{++} คือ โลหะอิออน

$$M^{++} + 2NaOH \longleftrightarrow M(OH)_2 + 2Na^{+} \qquad (2\text{-}1)$$

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric property) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชที่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนจากค่าที่โลหะหนักสามารถตกตะกอนเป็นผลึกโลหะไฮดรอกไซด์ได้

ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด ด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้ สภาวะที่

เกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช และสารอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการตกตะกอน (Freeman, 1989)

2. <u>การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)</u>

การตกตะกอนด้วยซัลไฟด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง นอกจากการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ สารเคมีที่มักนิยมใช้ คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอรัสซัลไฟด์ (FeS) โดยทำการเติมลงในสารละลายเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับโลหะอิออน และจะเกิดปฏิกริยาดังสมการที่ 2-2 โดย M^{++} คือ โลหะอิออน

$$M^{++} + Na_2S \longrightarrow MS + 2Na^{+} \qquad (2\text{-}2)$$

ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์ไม่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริค แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์นี้มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide) จึงต้องมีการป้องกันก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการทำให้พีเอชมีค่ามากกว่า 8 ข้อเสียอีกข้อ คือจะมีปริมาณของซัลไฟด์อิออนมากเกินไปในน้ำที่จะปล่อยออก จึงต้องมีการบำบัดขั้นสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำเสียออก (Freeman, 1989)

3. <u>การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate precipitation)</u>

สำหรับโลหะบางตัว เช่น แคดเมียม ตะกั่ว การตกตะกอนคาร์บอเนต ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ และสามารถกรองตะกอนได้มากกว่า

$$M^{++} + Na_2CO_3 \longleftrightarrow MCO_3 + 2Na^{+} \qquad (2\text{-}3)$$

4. <u>การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride precipitation)</u>

โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นรีดิวซิงเอเจนต์ ที่สามารถใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักได้ ปฏิกิริยาที่เกิดจะขึ้นกับค่าพีเอช แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้

$$4M^{++} + NaBH_4 + 2H_2O \longleftrightarrow NaBO_2 + 4M + 8H^{+} \qquad (2\text{-}4)$$

$$4M^{++} + NaBH_4 + 8OH^{-} \longleftrightarrow NaBO_2 + 4M + 6H_2O \qquad (2\text{-}5)$$

กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงพีเอช 8-11 ที่พีเอชต่ำกว่า 8 การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยการไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์ ขณะที่พีเอชมากกว่า 11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง พีเอชที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยการทดสอบความสมดุลของการใช้โบโรไฮไดรด์กับระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา และคุณภาพของน้ำที่ปล่อยออกมา ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย	สารเคมีที่เติมลงไป	ค่าพีเอชที่เหมาะสม	สารเคมีที่ตกตะกอนได้
Aluminum	Lime	5	$Al(OH)_3$
Arsenic	Ferric Chloride	8	$AsCl_2$
Barium	Sodium sulfate	10	$BaSO_4$
Cadmium	Lime	9.5 - 12	$Cd(OH)_2$
Chromic	Lime	8.0 - 9.5	$Cr(OH)_3$
Cupric	Lime	9.0 – 10.0	$Cu(OH)_2$
Ferric	Lime	7	$Fe(OH)_3$
Fluoride	Lime	12	CaF_2
Manganese	Lime	10	$Mn(OH)_2$
Silver	Sodium Chloride	8	AgCl
Selenium	Sodium Sulfide	6.5	SeS_2
Mercury	Sodium Sulfide	8.5	HgS

2.5.8 **การแยกด้วยไฟฟ้า** (Electrolytic recovery)

วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยอิออนของโลหะจะเกิดการรีดักชันที่ขั้วของแคโทด ซึ่งแคโทดที่ใช้ในวัตถุประสงค์นี้มีอยู่ 2 ชนิด คือ conventional metal cathode กับ high surface area cathode (HSAC) แอโนดและแคโทดมักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยที่แคโทดมักจะทำด้วยเหล็กกล้า (Stainless steel) หรือ carbon fiber ส่วนแอโนดมักจะทำด้วย platinized titanium, ruthenized titanium, ตะกั่ว และแกรไฟต์ เป็นต้น การแยกด้วยไฟฟ้าจะทำได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแยกเกิดได้ดีขึ้น ถังที่ใช้ในการแยกควรจะทำให้มีน้ำกระเพื่อมหรือมีการกวนเพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ดีขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่ของแคโทดและแอโนด และอัตราการเคลื่อนย้ายมวล จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเข้าเกาะของโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งเหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำไปขาย โดยประสิทธิภาพของระบบนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90-95 แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง

2.6 **เซลล์เคมีไฟฟ้า**

2.6.1 **ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า**

เซลล์เคมีไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ของเซลล์ คือ เซลล์แกลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก และเซลล์อิเล็กโทรไลต์

1. <u>เซลล์แกลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก</u>

เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า อันเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดโดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ในทางการค้า ตัวอย่างของเซลล์แกลวานิก คือ แบตเตอรี่เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น สำหรับการใช้เซลล์แกลวานิกในการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของการเกิดสมดุล (Equilibrium constant) ของปฏิกิริยาที่เซลล์

2. <u>เซลล์อิเล็กโทรไลต์</u>

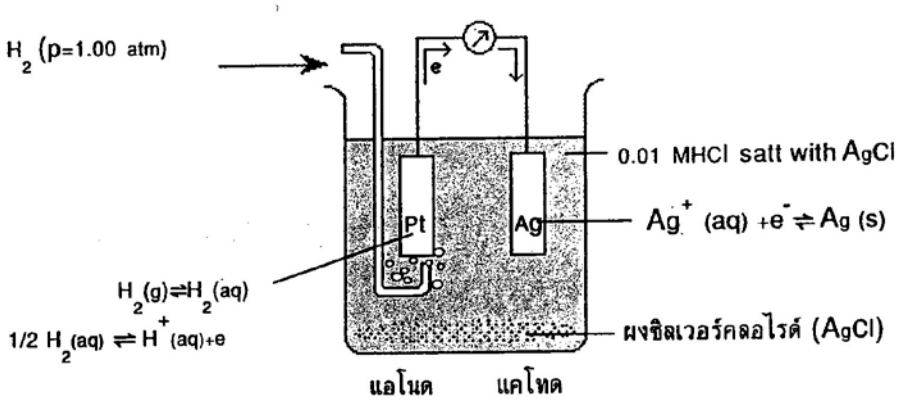
เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ ในด้านการวิเคราะห์เซลล์อิเล็กโทรไลต์ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ต้องการ โดยเทคนิควิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ เช่น โวลแทมเมตรี และอิเล็กโทรแกรวิเมตรี เป็นต้น

2.6.2 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า

ในเซลล์เคมีไฟฟ้า 1 เซลล์ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกันหรือต่างกันก็ได้

1. <u>การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย (Cell without liquid junction)</u>

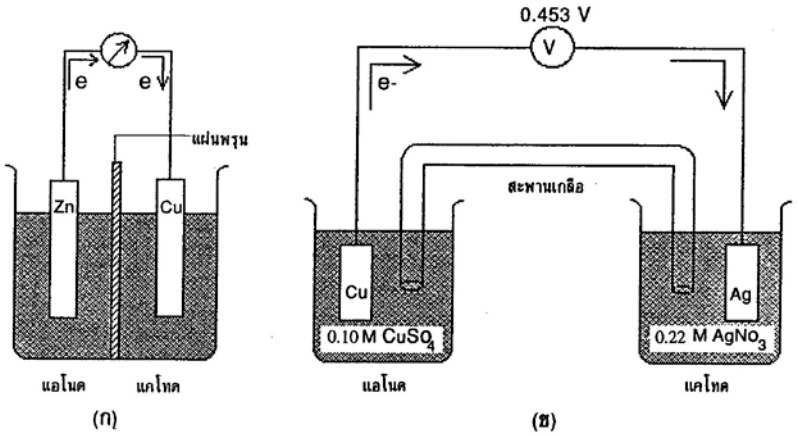
ในรูปที่ 2.3 เป็นแผ่นแพลทินัม (Pt) และแผ่นเงิน (Ag) อยู่ในสารละลาย 0.01 M HCl (กรดไฮโดรคลอริก) ที่อิ่มตัวด้วย AgCl (ซิลเวอร์คลอไรด์) โดยมีท่อผ่าน H_2 (แก๊สไฮโดรเจน) เข้ามาในสารละลายทางแผ่นแพลทินัมตลอดเวลา เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด และแท่งเงินทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด



รูปที่ 2.3 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

2. <u>การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cell with liquid junction)</u>

ในรูปที่ 2.4 แต่ละขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เหมือนกัน โดยอาจต่างกันที่ชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ หรือที่ความเข้มข้น หรือต่างทั้งชนิดและความเข้มข้นของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์ การแยกแต่ละครึ่งเซลล์ออกจากกันทำได้หลายวิธีด้วยกัน ที่ยกตัวอย่างในรูปที่ 2.4-(ก) เป็นการใช้วัสดุรูพรุน เช่น ใยแก้ว เป็นต้น และรูปที่ 2.4-(ข) เป็นการแยกภาชนะของแต่ละครึ่งเซลล์ และเชื่อมด้วยแท่งแก้วบรรจุสารละลายเข้มข้นอิ่มตัว เช่น โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) เป็นต้น แท่งแก้วนี้เรียกว่าสะพานเกลือ (salt bridge) ซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงสารละลายอิเล็กโตร-ไลท์ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดในเซลล์แบบมีรอยต่อสารละลาย ในการแยกสารละลายโดยสะพานเกลือในเชิงวิเคราะห์มีข้อดีกว่าการใช้วัสดุใยแก้ว เพราะช่วยลดค่าศักย์ที่รอยต่อสารละลายได้



รูปที่ 2.4 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยมีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)
(ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน (ข) ต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ

2.7 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการทำวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าจะหมายถึง กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

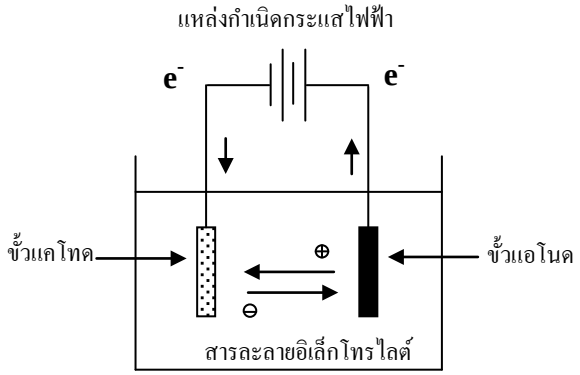
แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2-8 ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกริยารีดักชันจะเรียกว่า ขั้วแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2-9 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีแสดงดังรูปที่ 2.5

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

$$bRed_2 \longrightarrow dOx_2 + ne^- \qquad (2\text{-}8)$$

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

$$aOx_1 + ne^- \longrightarrow cRed_1 \qquad (2\text{-}9)$$



.

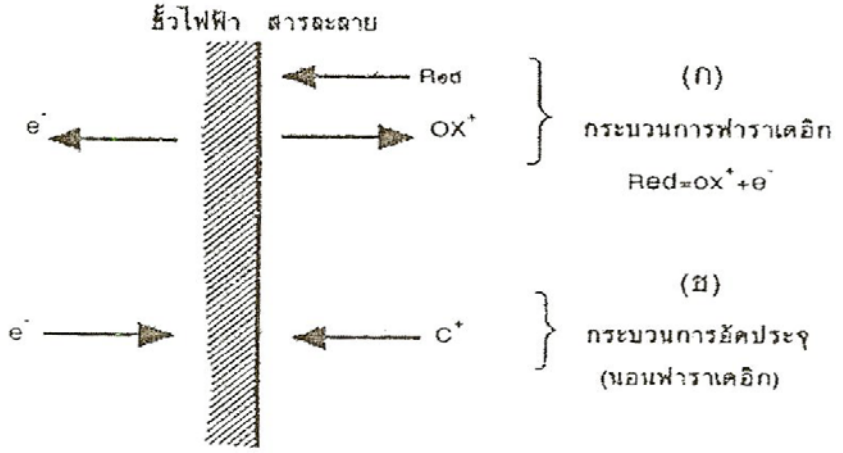
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

2.7.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและคายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) ผลลัพธ์ของการเกิด

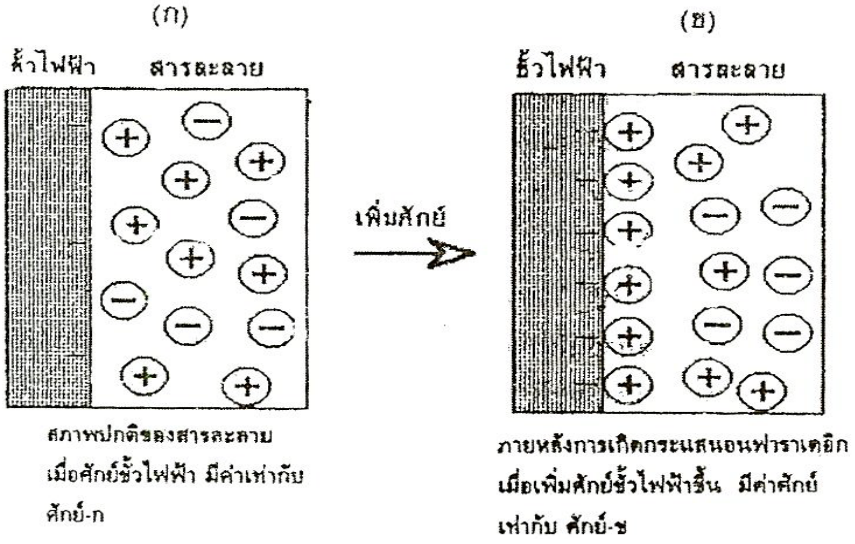
กระบวนการดังกล่าวนี้ที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นได้เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic current)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Non-faradaic process) กระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non-Faradaic current) ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

สำหรับเซล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์ หรือชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี แต่ขึ้นกับสภาวะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหพลวัตหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

ในรูปที่ 2.7 (ก) เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์ –ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลาย มาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายทั่ว ในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.7 (ข) สมมุติให้เท่ากับ –ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์ –ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ทันที โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสที่ไหลชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสจากการอัดเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดย

- ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้

- ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่าสารดีโพลาไรเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนี้ถูกเรียกว่า ขั้วดีโพลาไรซ์

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสในวงจรอย่างต่อเนื่อง และสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจร ขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยาการรับและคายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสและศักย์ย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาไรเซชัน ขณะที่เกิดโพลาไรเซชันขั้วไฟฟ้าถูกโพลาไรซ์ ทำให้กระแสในวงจรลดลง การที่จะทำให้โพลาไรเซชันหมดไป จำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์แก่วงจรนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรนี้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential overvoltage)

2.7.2 **โพลาไรเซชัน**

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. <u>โพลาไรเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration polarization)</u> เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่งสารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยาการนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้น หรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลาย และขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลาย จะมีส่วนทำให้เกิดโพลาไรเซชันขึ้นไม่มากก็น้อย ซึ่งผลของการเกิดโพลาไรเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจร เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรเป็นไปตามปกติ

2. <u>โพลาไรเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization)</u> เกิดขึ้นจากการชะลอลงของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า

เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออนจะส่งผลต่อการเกิดโพลาไรเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะช่วยลดการเกิดโพลาไรเซชันแบบที่กล่าวไว้ได้

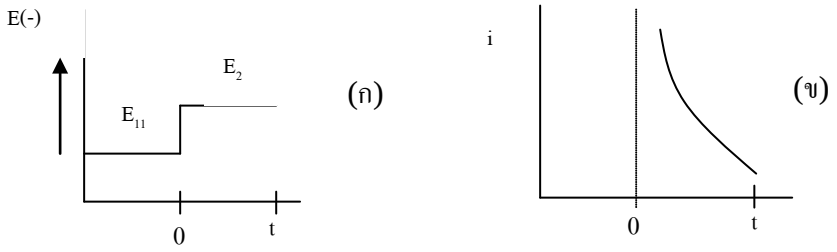
2.8 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

รูปแบบการควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.8.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)

เป็นการควบคุมความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับความต่างศักย์ที่เพียงพอไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลงเพื่อควบคุมความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

โดยที่ E_1 คือ ความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($I = kC$)



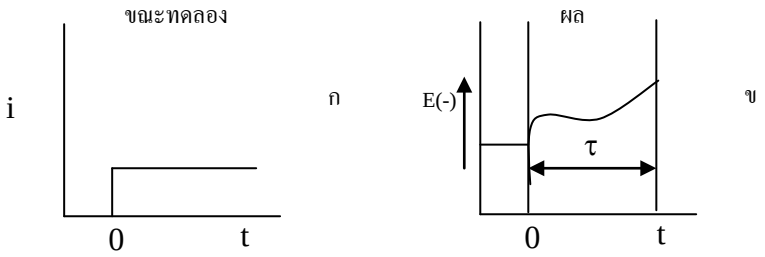
รูปที่ 2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Friedrich, 1962)

2.8.2 **การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่** (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2-10

$$M^{n+} + ne^- \longrightarrow M \qquad (2\text{-}10)$$

ดังนั้นความต่างศักย์จะแปรตามความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/ M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Friedrich, 1962)

2.9 ขั้วไฟฟ้า

ในแต่ละครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

ขั้วไฟฟ้าแบ่งออกเป็นสามประเภทใหญ่ๆ ตามหน้าที่ของขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าเฉพาะที่ไม่แปรตามการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลต่อค่าศักย์ของอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในสารละลายอันเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง และขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxillary electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีหน้าที่ในการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งานโดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร

วัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม และแกรไฟต์ เป็นต้น โดยมีลักษณะและคุณสมบัติในแต่ละชนิด ดังนี้

2.9.1 แกรไฟต์

แกรไฟต์เป็นอันยรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะทึบแสงและเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์แต่จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในระนาบเดียวกันเท่ากับ

1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าได้น้อย

2.9.2 เหล็กกล้าไร้สนิม

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) คือ โลหะผสมเหล็กที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุดร้อยละ 10.5 เป็นองค์ประกอบ โลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อเหล็ก จะเกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ เคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กได้เป็นอย่างดี ปกป้องการกัดกร่อน และไม่ชำรุดง่ายอย่างโลหะทั่วไป

2.9.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากเป็นอันดับ 3 ในเปลือกโลก โดยมีลักษณะเป็นสีขาว น้ำหนักเบา และแข็งมาก แต่ไม่เปราะ จึงสามารถทำให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ตามต้องการ เช่น ใช้ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและน้ำหนักเบา อะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับโลหะตัวอื่นได้อย่างว่องไว มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 และถ้าหาก Al^{3+} อยู่ในน้ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและไฮโดรไลซิสขึ้นได้

2.10 ศักย์ขั้วไฟฟ้า

คำจำกัดความของศักย์ขั้วไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ซึ่งการที่ต้องกำหนดขั้วแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนก็เพื่อไว้อ้างอิงและสามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน และในการกำหนดเครื่องหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC ได้กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาศักย์ไฟฟ้า และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าแอกทิวิตีเป็นหนึ่ง ให้ถือว่า ค่าผลลัพธ์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ขั้วไฟฟ้านั้น ๆ

2.10.1 **สมการเนินสต์** (ลาวัลย์ ศรีพงศ์, 2543)

ในทางปฏิบัติ ศักย์ขั้วไฟฟ้าที่วัดได้จากครึ่งเซลล์หนึ่งๆ (เมื่ออีกครึ่งเซลล์เป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน) แปรเปลี่ยนไปได้ ถ้าสารละลายครึ่งเซลล์ที่ขั้วไฟฟ้านั้นจุ่มอยู่มีความเข้มข้นเปลี่ยนไปโดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ศักย์ขั้วไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอธิบายได้ง่าย ๆ ว่า เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูง ไอออนในสารละลายย่อมมีจำนวนมาก การส่งผ่านอิเล็กตรอนข้ามผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าย่อมเกิดได้ดีขึ้น ทำให้วัดศักย์ได้เพิ่มขึ้น

ในทางทฤษฎี นักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ Walther Nernst พบว่าในปฏิกิริยาเคมีทั่วไป เช่น

$$aA + bB \leftrightarrow cC + dD \qquad (2\text{-}10)$$

สามารถคำนวณค่าศักย์ขั้วไฟฟ้า หรือศักย์เซลล์เคมีไฟฟ้าได้จากสมการ

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\{C\}^c\{D\}^d}{\{A\}^a\{B\}^b} \qquad (2\text{-}11)$$

เมื่อ $K_{eq} = \frac{\{C\}^c\{D\}^d}{\{A\}^a\{B\}^b}$

จะได้

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln K_{eq} \qquad (2\text{-}12)$$

ความสัมพันธ์ของศักย์ขั้วฟ้า หรือศักย์เซลล์เคมีไฟฟ้ากับแอกทิวิตีของตัวทำปฏิกิริยา และผลปฏิกิริยาแสดงได้ด้วยสมการที่เรียกว่า สมการเนินสต์ (Nernst Equation)

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{A_{prod}}{A_{react}} \qquad (2\text{-}13)$$

เมื่อ E = ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คาดคะเน

E^0 = ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน

R = ค่าคงที่ของแก๊ส (*8.314* จูลต่อโมล)

T = อุณหภูมิองศาสัมพัทธ์

F = ค่าคงที่ฟาราเดย์ *(96,491* คูลอมบ์ต่อน้ำหนักสมมูลย์)

A, B, C *และ* D = ค่าแอกทิวิตีของสาร *A, B, C* และ *D*

K_{eq} = ค่าคงที่สมดุล

A_{prod}/A_{react} = อัตราส่วนแอกทิวิตีของผลปฏิกิริยาและตัวทำปฏิกิริยา

2.10.2 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°)

จากที่กล่าวในหัวข้อข้างต้นของศักย์ขั้วไฟฟ้า ที่เซลล์ขั้วไฟฟ้ามีขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วแคโทด และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าแอกทิวิตีเป็นหนึ่งจะถือได้ว่า ค่าผลลัพธ์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ขั้วไฟฟ้านั้นๆ โดยในความหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้านี้ จะหมายถึงศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ซึ่งค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่หาได้ด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะมีค่าเฉพาะของแต่ละครึ่งเซลล์ โดยที่สามารถนำมาเปรียบเทียบถึงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์หนึ่งๆ ที่มีค่าแอกทิวิตีเป็นหนึ่ง ไปสู่ค่าแอกทิวิตีที่ในสภาวะสมดุลได้ โดยมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าคงที่ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°) ดังนี้

1. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าหนึ่งๆ ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพันธ์ โดยที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดเสมอ
2. ตามสัญนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะต้องได้มาจากการเขียนปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น
3. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะไม่ผันแปรตามจำนวนโมลที่เกิดจากการใช้ปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
4. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิ จึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิพร้อมกับค่าของ (E°) ด้วยเสมอ
5. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยตัวเลขและเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายบวกหรือลบจะมีความหมายที่แตกต่างกัน คือ เครื่องหมายบวก จะหมายถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ในที่นี้ขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาจะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ส่วน

เครื่องหมายลบ จะบ่งบอกถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้อยกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานขั้วไฟฟ้าของสารละลายในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน (SHE) (ลาวัลย์ ศรีพงศ์, 2543)

ครึ่งปฏิกิริยา	E^0 (V)
$Cl_2 + 2e^- \leftrightarrow 2Cl^-$	+1.360
$1/2\,O_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2O$	+1.230
$NO_3^- + 4H^+ + 3e^- \leftrightarrow NO + 2H_2O$	+0.960
$NO_3^- + 3H^+ + 3e^- \leftrightarrow HNO_2 + H_2O$	+0.940
$Fe^{3+} + e^- \leftrightarrow Fe^{2+}$	+0.771
$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \leftrightarrow SO_2 + 2H_2O$	+0.170
$2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2$	+0.000
$Ni^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Ni$	-0.250
$Cr^{3+} + e^- \leftrightarrow Cr^{2+}$	-0.410
$Fe^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Fe$	-0.440
$Zn^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Zn$	-0.763
$2H_2O + 2e^- \leftrightarrow H_2 + 2OH^-$	-0.830
$Cr^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Cr$	-0.913
$Al^{3+} + 3e^- \leftrightarrow Al$	-1.660
$Na^+ + e^- \leftrightarrow Na$	-2.714

2.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

การไหลของกระแสที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำเซลล์ไฟฟ้า โดยต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 จูล เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ และจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมบ์ ดังสมการ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{elec}) = \text{คูลอมบ์ x โวลต์} \qquad (2\text{-}14)$$

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุที่อยู่ในหน่วยคูลอมบ์จึงขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปฏิกิริยา โดยทุกๆ 1 โมลของอิเล็กตรอน จะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ หรือ F คูลอมบ์ ซึ่ง F ก็คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ ดังนั้นสมการที่แสดงถึงงานทางไฟฟ้าสุทธิที่มีหน่วยของอิเล็กตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ก็คือ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{elec}) = nF \text{ x โวลต์} \qquad (2\text{-}15)$$

2.11.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งวัดได้ในหน่วยของแอมแปร์ (Amp) โดยจำนวนของกระแสที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด จะถูกวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density, I) ส่วนการวัดกระแสที่ผ่านเข้าไปในวัสดุจะเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ซึ่งโลหะโดยส่วนใหญ่นั้นจะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_f) ซึ่งมีหน่วยเป็น volt/cm ได้คือ

$$\mathbf{I} = \text{ohm x } E_f \qquad (2\text{-}16)$$

$$E_f = \mathbf{I} \text{ /ohm} \qquad (2\text{-}17)$$

$$E_f = V / (R \text{ x ohm}) \qquad (2\text{-}18)$$

โดย ohm = ค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mhos/cm

V = ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น volt

R = ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น mhos

I = ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น amp

2.11.2 ความนำไฟฟ้า

ความนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และ ปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ส่วนความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะหมายถึง ความต้านทานที่เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลท์นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลท์ เป็นไปตามสมการ คือ

$$R = L / (C \times A) \qquad (2\text{-}19)$$

โดย R = ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลท์ มีหน่วยเป็นโอห์ม

L = ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น เซนติเมตร

C = ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลท์ มีหน่วยเป็น ซีเมน

A = พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลท์ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

2.11.3 กำลังไฟฟ้า

ปริมาณไฟฟ้า Q คูลอมบ์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านในเวลา t วินาที

$$Q = I \times t \qquad (2\text{-}20)$$

พลังงานไฟฟ้า (W) จะหมายถึง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานในเวลา t วินาที โดยที่ตัวต้านทานนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น E โวลต์

$$W = E I \times t \qquad (2\text{-}21)$$

$$W = E \times Q \qquad (2\text{-}22)$$

กำลังไฟฟ้า (Watt, P) คำนวนได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

$$P = W / t \qquad (2\text{-}23)$$

2.12 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (อินทิรา หาญพงษ์พันธ์, 2539)

มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แคโทด ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยใช้ปริมาณไฟฟ้าที่เท่ากันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อทำให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังสมการที่ 2-24

$$F\ (\text{Faraday}) = e \times N \qquad (2\text{-}24)$$

$$F\ (\text{Faraday}) = (1.62 \times 10^{-19}) \times (6.02 \times 10^{23}) \qquad (2\text{-}25)$$

$$F\ (\text{Faraday}) = 96{,}487\ \text{C mol}^{-1} \qquad (2\text{-}26)$$

หรือ $$1\ \text{Faraday} = 96{,}500\ \text{C mol}^{-1} \qquad (2\text{-}27)$$

$$X\ \text{Coulomb} = \mathrm{I}\ (\text{ampere}) \times t\ (\text{second}) \qquad (2\text{-}28)$$

เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้โดยการใช้กฎของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = M\,\mathrm{I}\,t / nF \qquad (2\text{-}29)$$

โดย W = มวลของสารที่ควรจะเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี มีหน่วยเป็น gram
n = จำนวนโมลของตัวออกซิไดส์ตามสมการเคมี มีหน่วยเป็น eq/mol
M = มวลโมเลกุล มีหน่วยเป็น gram/mol
I = ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง มีหน่วยเป็น amp

2.13 **ประสิทธิภาพเชิงกระแส** (Current efficiency)

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมี นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เพราะ กระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงสุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับว่าเป็นกระบวนการที่ดี โดยประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จากสมการที่ 2-30

$$\text{Current efficiency (t) \%} = \frac{nF(C_o - C_t)\,V \times 100\%}{\int_0^t I(t)\,dt} \qquad (2\text{-}30)$$

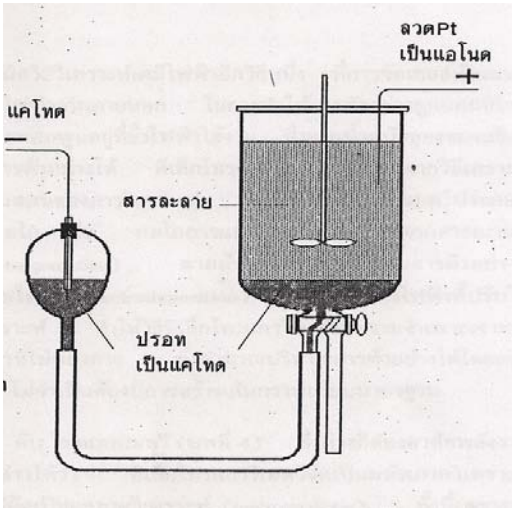
โดย n = ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล
F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์/eq)
C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
C_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)
V = ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
$I_{(t)}$ = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

2.14 **การประยุกต์ใช้เคมีไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า** (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

ประโยชน์สำคัญที่ถือเป็นลักษณะเด่นของการวิเคราะห์แบบควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า คือ การที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณแต่ละโลหะในสารผสม แม้แต่โลหะนั้นมีค่าศักย์มาตรฐานต่างกันเพียงมิลลิโวลต์ โดยไม่เกิดการร่วมพอกพูนของโลหะที่ไม่ต้องการ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์หาปริมาณของทองแดง บิสมัท ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี และดีบุก ที่รวมกันอยู่ในสารตัวอย่างโดยให้เกิดการพอกพูนของแต่ละโลหะบนขั้วแพลทินัมที่เป็นแคโทด ณ ศักย์เหมาะสมที่ควบคุมไว้ดังนี้ เริ่มแรกเป็นการทำให้สารละลายตัวอย่างอยู่ในสภาวะสเทิน และเติมสารละลายทาร์เทรตเพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับดีบุก (Sb) ทำการควบคุมศักย์ของขั้วแคโทดที่ – 0.2 V

(ขั้วแพลทินัม เทียบกับ SCE) ทองแดง (Cu) เกิดพอกพูนบนขั้วแคโทดจนสมบูรณ์ก่อนโลหะอื่นๆ ทำการชั่งหาน้ำหนัก Cu ที่พอกพูน นำขั้วแคโทด (ขณะที่เป็นแพลทินัมที่เคลือบหรือพอกด้วยทองแดง) กลับต่อเข้ากับวงจร แล้วควบคุมศักย์ที่ขั้วแคโทดให้เป็น -0.4 V ซึ่งบิสมัท (Bi) จากสารละลายสามารถเกิดปฏิกิริยาและจับบนขั้วแคโทดจนหมด เมื่อได้น้ำหนักของ Bi เริ่มปฏิกิริยาใหม่โดยปรับศักย์ขั้วแคโทดเป็น -0.6 V ตะกั่ว (Pb) เกิดปฏิกิริยาได้ที่ศักย์นี่ และจับบนขั้วแคโทดจนหมด หลังจากนี้ ปรับสารละลายตัวอย่างซึ่งขณะนี้เหลือเพียงแคดเมียม สังกะสี และดีบุก ให้มีสภาวะด่างด้วยแอมโมเนีย โดยแคดเมียม (Cd) และสังกะสี (Zn) เกิดการพอกพูนได้ที่ศักย์ -1.2 และ -1.5 V ตามลำดับ ปรับสภาวะสารละลายตัวอย่างใหม่ให้เป็นกรด เพื่อสลายสารเชิงซ้อนของดีบุก และปรับศักย์ขั้วไฟฟ้าอีกครั้งเป็น -0.65 V ซึ่งดีบุกสามารถเกิดการพอกพูนบนขั้วแคโทดได้เฉพาะการพอกพูนของดีบุกที่ควรต้องใช้ขั้วแพลทินัมเท่านั้น เพราะที่ศักย์ (-0.65V) นี้ สังกะสีที่จับบนขั้วแคโทดกลับละลายออกมาได้ ส่วนการพอกพูนของโลหะอื่นๆ ที่กล่าวมาภายหลังการชั่งหาน้ำหนักสารพอกพูน สามารถนำขั้วแคโทดนั้นมาใช้ต่อโดยไม่ต้องล้างโลหะที่พอกอยู่ออก

นอกจากการใช้การควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้าในการวิเคราะห์หาปริมาณ ยังอาจใช้การควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้าในการทำให้สารตัวอย่าง (มีโลหะที่ต้องการหรือไม่ต้องการผสมด้วย) มีความบริสุทธิ์ปราศจากสิ่งรบกวนต่างๆ เพื่อนำสารตัวอย่างนั้นไปวิเคราะห์หาปริมาณ ด้วยเทคนิควิธีวิเคราะห์อื่นๆ เช่น โพลาโรกราฟีย์ เป็นต้น ในการเตรียมสารตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีวิเคราะห์อื่น ๆ อาจใช้แพลทินัมเป็นขั้วแคโทดตามปกติ หรือใช้ปรอทเป็นขั้วแคโทด เรียกแคโทดปรอท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของสารตัวอย่าง โดยถ้าการเตรียมสารตัวอย่างเป็นการแยกโลหะที่มีอยู่ในปริมาณมาก ออกจากส่วนที่ต้องการ ที่มีปริมาณน้อยกว่า สามารถใช้แพลทินัมเป็นขั้วแคโทด โดยให้โลหะทีมีปริมาณมากพอกพูนอยู่ที่ขั้วแคโทด เหลือส่วนอื่นๆ ของสารตัวอย่างซึ่งนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิธีวิเคราะห์อื่นได้ เช่น การพอกพูนของ ทองแดง บิสมัท และแอนติโมนีจากสารละลายกรดของตัวอย่างโลหะอัลลอยด์ ที่ -0.35 V บนขั้วแพลทินัม เหลือส่วนของดีบุก ตะกั่ว และนิกเกิล ซึ่งมีอยู่เพียงปริมาณน้อยในสารละลาย นำไปวิเคราะห์หาปริมาณด้วยโวลแทมเมตรีได้



รูปที่ 2.10 การจัดเซลล์ที่ประกอบด้วยแคโทดปรอท (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

ถ้าสารตัวอย่างประกอบด้วยโลหะต่าง ๆ ที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณเพียงบางชนิด หรือสารตัวอย่างมีโลหะเป็นสิ่งปะปนที่ต้องการแยกออก การใช้แคโทดปรอท ดังตัวอย่างการจัดเซลล์ในรูปที่ 2.10 มักให้ผลตามต้องการ การใช้ปรอทเป็นขั้วไฟฟ้ามีข้อดีกว่าแพลทินัม ตรงที่ศักย์เกินตัวในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนมีค่าค่อนข้างสูง ทำให้ไม่มีการรบกวนของแก๊สไฮโดรเจนระหว่างการใช้แคโทดปรอท โดยให้เกิดการแยกโลหะบางชนิดในรูปโลหะเจือปรอทละลายอยู่ในชั้นของปรอท ถ้าส่วนที่เหลือในสารละลายตัวอย่างเป็นส่วนที่ต้องการ สามารถนำไปวิเคราะห์ได้เลย แต่ถ้าส่วนที่ละลายในปรอทเป็นส่วนที่ต้องการ ก็สามารถนำไปกลั่นแยกปรอทออกได้ ตัวอย่างการวิเคราะห์ที่ใช้แคโทดปรอท เช่น การแยกโลหะที่ปะปนในสารละลายตัวอย่างของเอ็นไซม์ หรือการแยกทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียม จากสารละลายยูเรเนียม ในรูปเจือปรอท แล้วจึงนำไปกลั่นแยกปรอทออก เหลือโลหะที่แยกออกมาได้ เป็นต้น

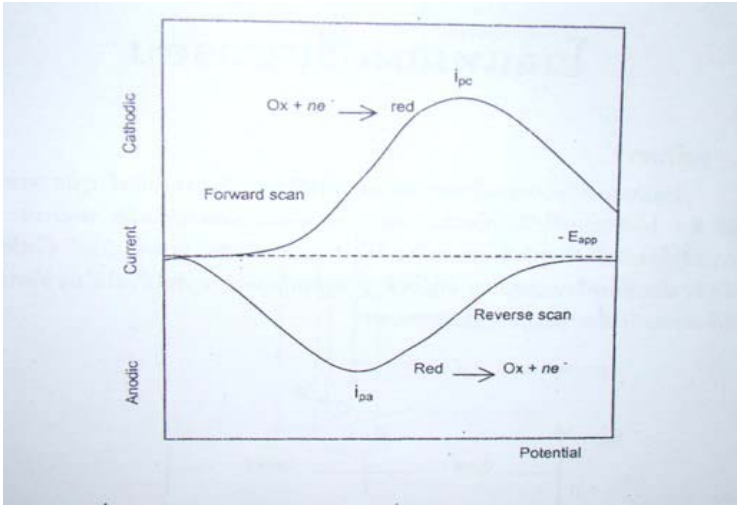
2.15 **เทคนิคโวลแทมเมตรี** (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

โวลแทมเมตรี (Voltametry) เป็นชื่อรวมของกลุ่มวิธีการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า ที่ข้อมูลของการวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์ของการเกิดกระแส กับการให้พลังงานศักย์แก่วงจรภายใต้สภาวะการทดลองที่เกิดกระบวนการนอนฟาราเดอิก หรือเกิดโพลาไรเซชันขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยทำให้ขั้วไฟฟ้าใช้งานมีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวน้อยเรียกว่า "ขั้วไฟฟ้าจุลภาค (Microelectrode)" กล่าวคือ การทำโวลแทมเมตรีเป็นการให้พลังงานในรูปศักย์แก่วงจร เพื่อให้

เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่าง ดังนั้นการจัดเซลล์ของวงจรเป็นแบบอิเล็กโทรไลต์ และการไหลของกระแสอยู่ภายใต้สภาวะการเกิดโพลาไรเซชันเนื่องจากความเข้มข้น

โวลแทมโมแกรม (Voltammogram) คือเส้นกราฟที่ได้จากการพลอตระหว่างกระแสที่วัดได้ กับขั้วไฟฟ้าจุลภาค ข้อมูลของการวิเคราะห์ที่ได้จากโวลแทมโมแกรม คือ ค่ากระแสจำกัด (i1) ซึ่งเป็นค่าที่แปรตามความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าจุลภาค ใช้ค่านี้ในการหาปริมาณสารตัวอย่างได้ ลักษณะเฉพาะของกระแสจำกัด คือ เป็นกระแสฟาราเดอิกที่มีค่าไม่ขึ้นกับการแปรของศักย์ที่ให้กับวงจร และค่าของกระแสถูกจำกัดด้วยอัตราเร็วของการที่สารตัวอย่างถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า

ข้อมูลของโวลแทมโมแกรมแบบรอบ เป็นการสแกนศักย์ไฟฟ้าให้กับระบบที่ใช้อิเล็กโทรดแบบนิ่งขนาดเล็กในสารละลายที่ไม่มีการคนกวน ซึ่งทำให้ได้โวลแทมโมแกรมแบบรอบที่เป็นการพล็อตระหว่างกระแสที่เกิดขึ้นกับศักย์ฟ้าที่ให้ การตอบสนองอยู่ในรูปกระแสของการสแกนไปข้างหน้ามีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โวลแทมโมแกรมแบบรอบทั่วไป (ลาวัลย์ ศรีพงศ์, 2543)

เนื่องจากประโยชน์ของโวลแทมโมแกรม ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงได้ใช้โวลแทมโมแกรมมาช่วยในการค้นหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลอง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองโดยรูปแบบการจัดวางเซลล์เป็นแบบมีรอยต่อ และแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย รวมถึงการเลือกวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้า เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดในการนำกลับสังกะสีจากกากตะกอนจากถังตกตะกอนทางเคมี (Zinc Clarifier) ของโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน

2.16 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Scott และคณะ (1997) ได้ศึกษาถึงการนำกลับของโลหะดีบุก ตะกั่ว และทองแดง จากสารละลายที่ได้จากการล้างแผงวงจรไฟฟ้า โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร ในการศึกษานี้มีสองวิธีในการนำกลับโลหะ วิธีการแรก คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการนำกลับโลหะทั้งหมด วิธีการที่สอง คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการเกิดการพอกพูนของทองแดง และทำให้เกิดการตกตะกอนของดีบุกและตะกั่ว ซึ่งนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเข้าเตาเผา การใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร เพราะว่าสามารถใช้ในการนำกลับโลหะโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีได้ และลดการเกิดหมอกระหว่างการล้างแผงวงจร ในวิธีการแรกแยกดีบุกออกจากสารละลายด้วยวิธีการกรอง เนื่องจากเกิดไฮเดรตทินด์ออกไซด์ ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และนำกลับได้โดยการใช้ไฟฟ้าเคมี โดยให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไททาเนียมเป็นขั้วแอโนด หลังจากที่มีการแยกดีบุกแล้วสารละลายที่มีไอออนของทองแดงและตะกั่วจะสามารถนำกลับด้วยการพอกพูนของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับดีบุก และจะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสำหรับการนำกลับของโลหะ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่เป็นการประหยัดถ้าหากเทียบกับการตกตะกอนด้วยด่าง อีกตัวเลือกหนึ่งของการนำกลับทองแดงโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยรวมกันกับการตกตะกอนดีบุกและตะกั่ว ก่อนที่จะมีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือ $PbSO_4$ และ SnO_2 จะถูกส่งไปเผา เพื่อที่จะผลิตโลหะผสมขึ้นมา วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเหมือนกับการนำกลับโลหะทั้งหมดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี เพราะว่าในการเผานั้นจะเกิดก๊าซ และเกิดกากโลหะขึ้น

Fourcade และ Tzedakis (2000) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดน์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน การศึกษาถึงปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่าของกระแส ณ จุดศักย์ต่าง ๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดติดของซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดน์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สองซิลเวอร์ไอโอไดน์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่ากระแส 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สาม คือ การเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งของซิลเวอร์ไอโอไดน์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนหลักเมื่อเทียบกับในสองขั้นตอนแรกเพราะใช้ค่ากระแสมากที่สุด คือ 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

มะลิ หุ่นสม (2544) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เพื่อการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรก คือ การนำกลับคืนของโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับของโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่สามเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่า โลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียม และนิกเกิล ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10, 90 และ 190 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

หทัยรัตน์ ซื้อสุวรรณ (2544) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าเพื่อแยกโลหะหนักออกจากตะกอน กระบวนการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ละลายโลหะหนักออกจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสีย และการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า พบว่าในขั้นตอนการละลายตะกอน ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายโลหะหนักออกจากตะกอน ปริมาณตะกอนแห้งประมาณร้อยละ 0.7 โดยมวลต่อปริมาตรกรดซัลฟิวริก คือ ประมาณ 1.0 โดยมีค่าความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดโดยประมาณดังนี้ ทองแดง 70 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิล 95 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสี 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และโรเมียม 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้นตอนการกำจัดโลหะ พบว่า มากกว่าร้อยละ 90 ทองแดงสามารถแยกออกมาได้ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด และโลหะชนิดอื่นๆ ที่เหลือในสารละลายถูกกำจัดออกด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electroprecipitation) พบว่า สามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมได้เกือบร้อยละ 100 และกำจัดสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 80 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110-130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยพลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 25-30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร

Carlos และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของทาร์เทรต ต่อการเกิดการพอกพูนของทองแดงและดีบุก ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมีจากสารละลายที่ไม่มีไซยาไนด์ การพอกพูนของทองแดงและดีบุกที่ขั้วไฟฟ้า พบว่า ที่ศักย์ไฟฟ้า 0.31 โวลท์ ทองแดงจะพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า ร้อยละ 66-68.5 ในขณะที่ดีบุกพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าร้อยละ

31.5-34 และที่ศักย์ไฟฟ้า -0.64 โวลท์ ทองแดงจะพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าร้อยละ 45-51 ในขณะที่ดีบุกพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าร้อยละ 49-55 และจากการศึกษา จะพบว่าทาร์เทรตจะเพิ่มอัตราการเกิดผลึก และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าของกระแสที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า ทั้งที่มีและไม่มีทาร์เทรตเกิดขึ้นที่ 11 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตาม การมีทาร์เทรตจะทำให้เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าในการเกิดการพอกพูนของโลหะที่ขั้วไฟฟ้า นำไปสู่การใช้พลังงานที่ต่ำกว่าในการเกิดการพอกพูนของโลหะที่ขั้วไฟฟ้า และนำไปสู่การใช้พลังงานที่ต่ำกว่าตามไปด้วย

ศุภศันส์ สกุลตั้ง (2548) ได้ทำการศึกษาแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่เมื่อหมดอายุการใช้งานแล้ว องค์ประกอบภายในของแบตเตอรี่เหล่านี้ซึ่งประกอบด้วยโลหะหลายชนิด เช่น นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม ทองแดง แลนทานัม และอื่นๆ ล้วนเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตทั้งสิ้น งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำโลหะนิกเกิลและโคบอลต์กลับคืนโดยการชะละลายและการตกตะกอน การทดลองจะเริ่มต้นโดยวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณโลหะภายในแบตเตอรี่ หลังจากนั้นจะทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการชะละลาย ได้แก่ ชนิดของกรด (ซัลฟิวริก ไนตริก และไฮโดรคลอริก) ความเข้มข้นของกรด (1 – 6 โมลต่อลิตร) อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด (10- 40 กรัมต่อลิตร) อุณหภูมิ (30 -90 องศาเซลเซียส) เวลา (5 -120 นาที) พบว่า กรดไฮโดรคลอริกมีประสิทธิภาพในการชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ได้ดีกว่ากรดซัลฟิวริกและไนตริก และภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชะละลาย คือ กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างขั้วไฟฟ้าต่อกรด 15 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เวลา 60 นาที สามารถชะละลายโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ได้ร้อยละ 99 และ 90 ตามลำดับ ปฏิกิริยาการชะละลายโลหะทั้งสองชนิดนี้เป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic reaction) และเป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาโดยกระบวนการเชิงกายภาพ มีค่าพลังงานการกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาการชะละลายสำหรับโลหะนิกเกิลและโคบอลต์เท่ากับ 0.34 และ 0.52 กิโลจูลต่อโมล ตามลำดับ และค่าพีเอที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนร่วมกันของโลหะนิกเกิลและโคบอลต์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร เท่ากับ 11

Garcia-Gabaldon (2005) ได้ทำการศึกษาการนำกลับดีบุกและทองคำขาว โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยกระบวนการควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ถังปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีมีไดอะแฟรมเซรามิกถูกใส่เข้าไป เมื่อไม่มีทองคำขาวอยู่ศักย์ขั้วไฟฟ้าจะเป็นลบมากกว่า การเปลี่ยนรูปของดีบุกมีมากขึ้นเพราะว่าที่ขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีลักษณะไม่ราบเรียบและเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้น ในขณะเดียวกันประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าลดลง และพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับดีบุกก็มีค่าเพิ่ม

มากขึ้น เพราะว่าเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด เงื่อนไขของการทดลอง คือ ศักย์ที่ขั้วแคโทดประมาณ -1.0 โวลท์ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ที่อิ่มตัวด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ ไอออนดีบุกจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและเกิดเป็นดีบุก ไอออนของทองคำขาวส่งผลต่อการเกิดการพอกพูนของดีบุก ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.4 โวลท์ การนำกลับของโลหะทั้งสองมีความเป็นไปได้ที่จะถูกแยกออกจากกัน การมีไอออนทองคำขาวอยู่จะเพิ่มให้เกิดการพอกพูนของดีบุกที่ศักย์เป็นบวกมากกว่า -0.6 โวลท์ ที่ค่าศักย์ดังกล่าวถือเป็นค่าที่ต่ำที่สุดของพลังงานที่ใช้ และทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่ามากกว่าร้อยละ 70 อีกทั้งเป็นค่าที่ดีของการเปลี่ยนสภาพในรูปไอออนของทั้งดีบุกร้อยละ 100 และทองคำขาวได้มากกว่าร้อยละ 90

Havlik (2005) ทำการศึกษาการนำกลับสังกะสีและเหล็กจากตะกอนจากเตาหลอมโลหะไฟฟ้า ที่ความดันปกติ โดยทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 20 – 80 องศาเซลเซียส ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 300 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักตะกอน 10 กรัม ใช้เวลาในการละลายตะกอน 60 นาทีสามารถแยกสังกะสีได้ร้อยละ 68 และแยกเหล็กได้ร้อยละ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า สามารถแยกสังกะสีได้ดีกว่าแยกเหล็กมากโดยที่อุณหภูมิไม่มีผลต่อการละลายสังกะสีและเหล็กมากนัก

Ahmed และคณะ (2008) ทำการศึกษาการแยกโลหะหนักออกจากตะกอนจากโรงงานหลอมทองแดง โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าทรงกระบอกชนิดไหลเวียน โดยศึกษาหาค่าพีเอช อัตราส่วนการนำกลับของโลหะหนักที่เหมาะสม พลังงานที่ใช้ไป โดยในการทดลองนี้ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกเป็นตัวทำละลาย ซึ่งพบว่า สามารถแยกโลหะสังกะสีได้ร้อยละ 76 โดยใช้พลังงานไฟฟ้าไป 80.51 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัมสังกะสี ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5

Emamjomeh และ Savakumar (2008) ได้ทำการศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ และใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ร้อยละ 99 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแส 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 6 อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ขาเข้าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

Pascaline และคณะ (2008) ทำการศึกษากระบวนการชะละลายสังกะสีจากกากตะกอนด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.2 โมลต่อลิตร และการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ single – cell แบบสามส่วน ชนิดไหลวน ในการศึกษานี้ใช้ขั้วซัลฟิวริก/ซัลเฟต หลังจากทำการทดลองใช้เวลา 6 ชั่วโมง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.5 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ซึ่งสามารถแยกสังกะสีออกไซด์ออกจากตะกอนได้ร้อยละ 97 และแยกสังกะสีออกจากสารละลายในรูปของสารประกอบโลหะได้ร้อยละ 70

ศิวัช ตั้งประเสริฐ (2550) ทำการศึกษาการนำโลหะเชิงพาณิชย์กลับคืนจากของเสียของโรงงานถลุงสังกะสีด้วย 3 ขั้นตอนง่าย ๆ เริ่มต้นโดยการสุ่มตัวอย่างของเสียของแข็งที่ได้รับจากโรงงานถลุงสังกะสีเพื่อเป็นตัวแทนของสารตัวอย่างทั้งหมดแล้วนำตัวอย่างของแข็งมาละลายด้วยกรดไนตริก กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดฟอสฟอริก ที่ความเข้มข้นของกรดแต่ละชนิดคือ 4.00, 2.00, 1.00, 0.50 และ 0.10 โมลาร์ จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พ-ชันสเปกโทรเมตรี พบว่ากรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 4.00 โมลาร์คือสภาวะที่ดีที่สุดที่สามารถละลายโลหะในตัวอย่างของแข็งได้ทุกตัวยกเว้นตะกั่วที่ไม่ละลาย สุดท้ายนำสารละลายที่ได้มาเจือจางด้วยน้ำ 4 เท่าโดยปริมาตร แล้วสกัดโลหะที่ต้องการด้วยสารสกัดอินทรีย์ 2 ชนิดคือร้อยละ 25 โดยปริมาตรของบิส(ทู-เอสทิลเฮกซิล)ฟอสเฟต (ดีทูอีเอชพีเอ) และกรดเนฟทานิค ในของผสม1 เปอร์เซนต์โดยปริมาตรของเดคะนอลในน้ำมันก๊าด ผลการทดลองพบว่าสังกะสีไอออนถูกสกัดได้ดีด้วยดีทูอีเอชพีเอเมื่อใช้อัตราส่วนวัฏภาคน้ำต่อวัฏภาคสารสกัดอินทรีย์ (เอ/โอ) 1 : 1 ที่ความเป็นกรด-เบส 1.07 ทองแดงถูกสกัดได้ดีด้วยเนฟทานิคเมื่อใช้อัตราส่วน(เอ/โอ) 1 : 3 ที่ความเป็นกรด-เบส 3.30 และไอออนของนิกเกิลกับโคบอลต์ถูกสกัดได้ดีด้วยดีทูอีเอชพีเอเมื่อใช้อัตราส่วน(เอ/โอ) 1 : 3 ที่ความเป็นกรด-เบส 2.44 โดยได้ร้อยละกลับคืนของโลหะคือ 63.21, 80.24, 54.99 และ 66.57 ตามลำดับ

สหรัฐ เชาว์รูปดี (2010) ทำการศึกษาการกำจัดสังกะสีโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชเท่ากับ 2 ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 250-4,000 มิลลิแอมแปร์ พบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงกระแสที่เกิดขึ้นของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานมีรูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมกว่าการวางขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เนื่องจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานทำให้แนวโน้มของการเกิดประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มสูงขึ้นหรือคงที่ยาวนานที่สุดมากกว่าในตลอดของช่วงเวลาในการกักเก็บ

บทที่ 3

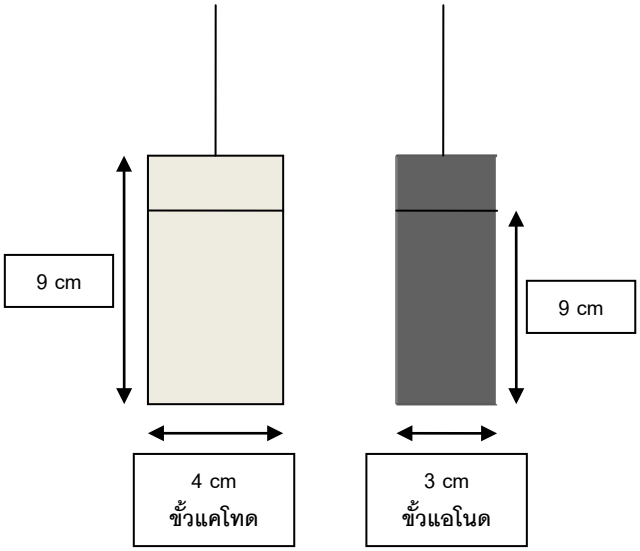
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply): GW, INSTEK
2. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS): GBC, Avanza
3. เครื่องวัดค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้า (pH/Conductivity meter): Mettler Toledo, Seven Multi pH/Conductivity
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digits Balance): Mettler-Toledo, Dragon 204
5. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer): VELP, ARED
6. ถังปฏิกิริยาทำจากอะครีลิค ขนาด (กว้าง × ยาว × สูง) 5 × 11 × 13 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดเท่ากับ 85 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
7. กระดาษกรองเบอร์ 5 (Filter paper): Whatman No. 5
8. กระดาษทรายเบอร์ 0 (Sandpaper): T.O.A. No. 0
9. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
10. ขั้วไฟฟ้าแคโทด มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร และขั้วไฟฟ้าแอโนด มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 สารเคมี

1. สังกะสี (II) ซัลเฟต (Zinc (II) sulphate, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)
2. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)
3. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4)
4. กรดไนตริก (Nitric Acid, HNO_3)
5. กรดซิตริก ($C_6H_8O_7$)
6. เอธิลลีนไดเอมีนเตตระเอซิติก เอซิด (Ethylene Diamine Tetraacetic Acid: EDTA, $C_{10}H_{16}N_2O_8$)
7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH)
8. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)
9. ผงวุ้น (Agar Powder)

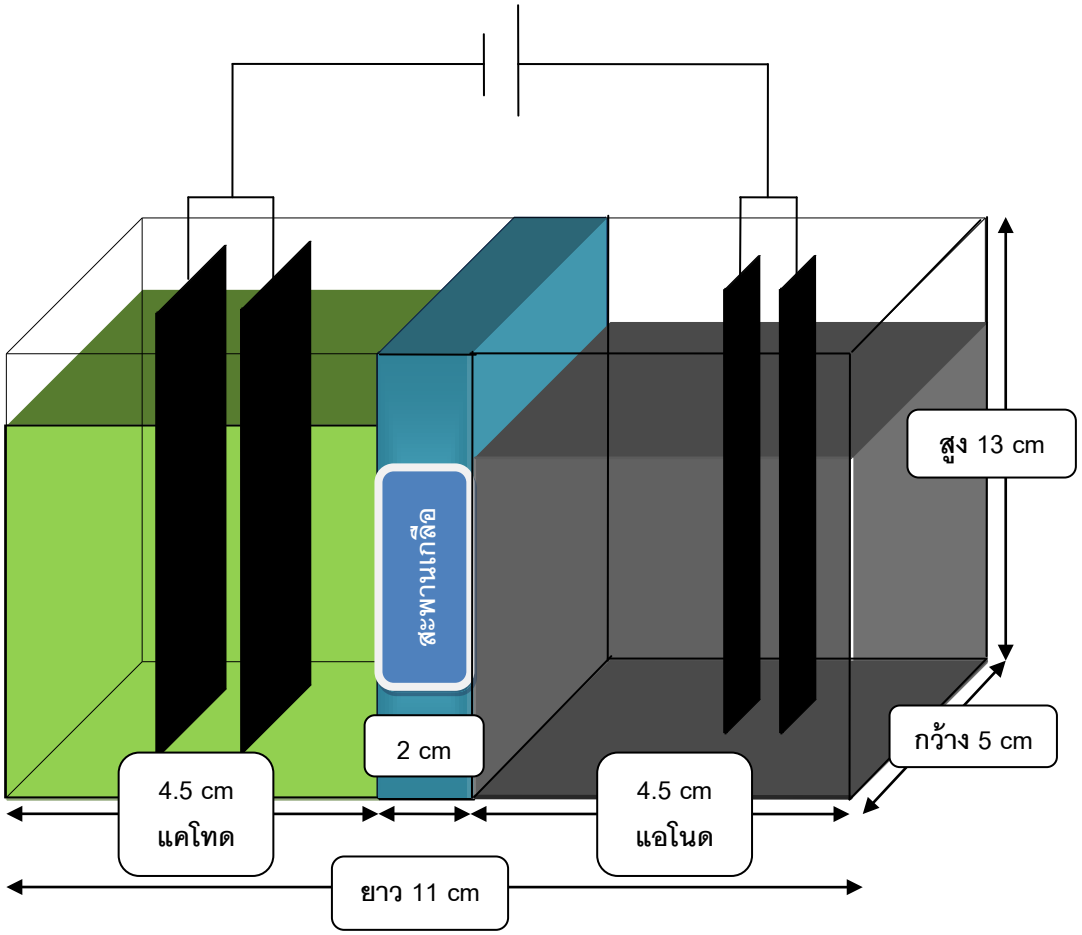
3.1.3 การเตรียม สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และสะพานเกลือ

1. สารละลายสกัดที่ได้จากการละลายกากตะกอนของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยโดยนำกากตะกอนอบแห้ง 2 กรัมมาละลายด้วยตัวทำละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์
   - NaCl ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เตรียมจากการชั่ง NaCl 117 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
3. สารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์ เตรียมจากการชั่ง NaCl 292.5 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
4. สะพานเกลือ เตรียมจากการนำสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์จากข้อ 3. ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด หลังจากนั้นนำมาผสมกับผงวุ้น 5 กรัม คนให้สารละลายเข้ากัน ต้มต่อไปอีก 30 วินาที จนกระทั่งสารละลายข้นหนืด แล้วบรรจุลงในถังปฏิกิริยาตรงบริเวณที่ใส่สะพานเกลือ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายภายในถังปฏิกิริยาแข็งเป็นวุ้น (ศรัณญู ศรีธัญรัตน์, 2553)

3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

1. <u>จัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cell with liquid junction)</u> ดังแสดงในรูปที่ 3.2

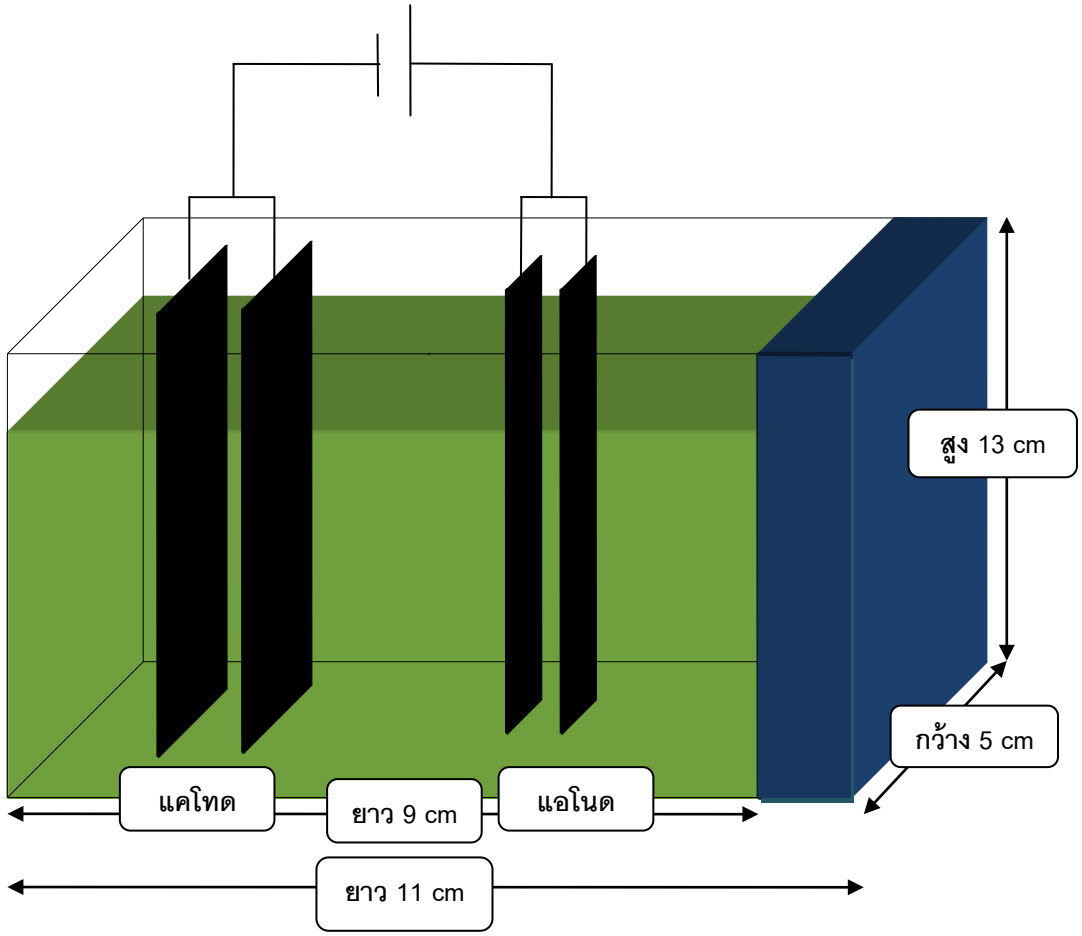
   1. เชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์
   2. ในถังปฏิกิริยา ครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ส่วนครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดบรรจุสารละลายสกัด ปริมาตร 170 มิลลิลิตร
   3. ขั้วบวกและขั้วลบ นำมาต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าแอโนด (แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแกรไฟต์) ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทด (แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแกรไฟต์) ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

2. จัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย (Cell without liquid junction) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

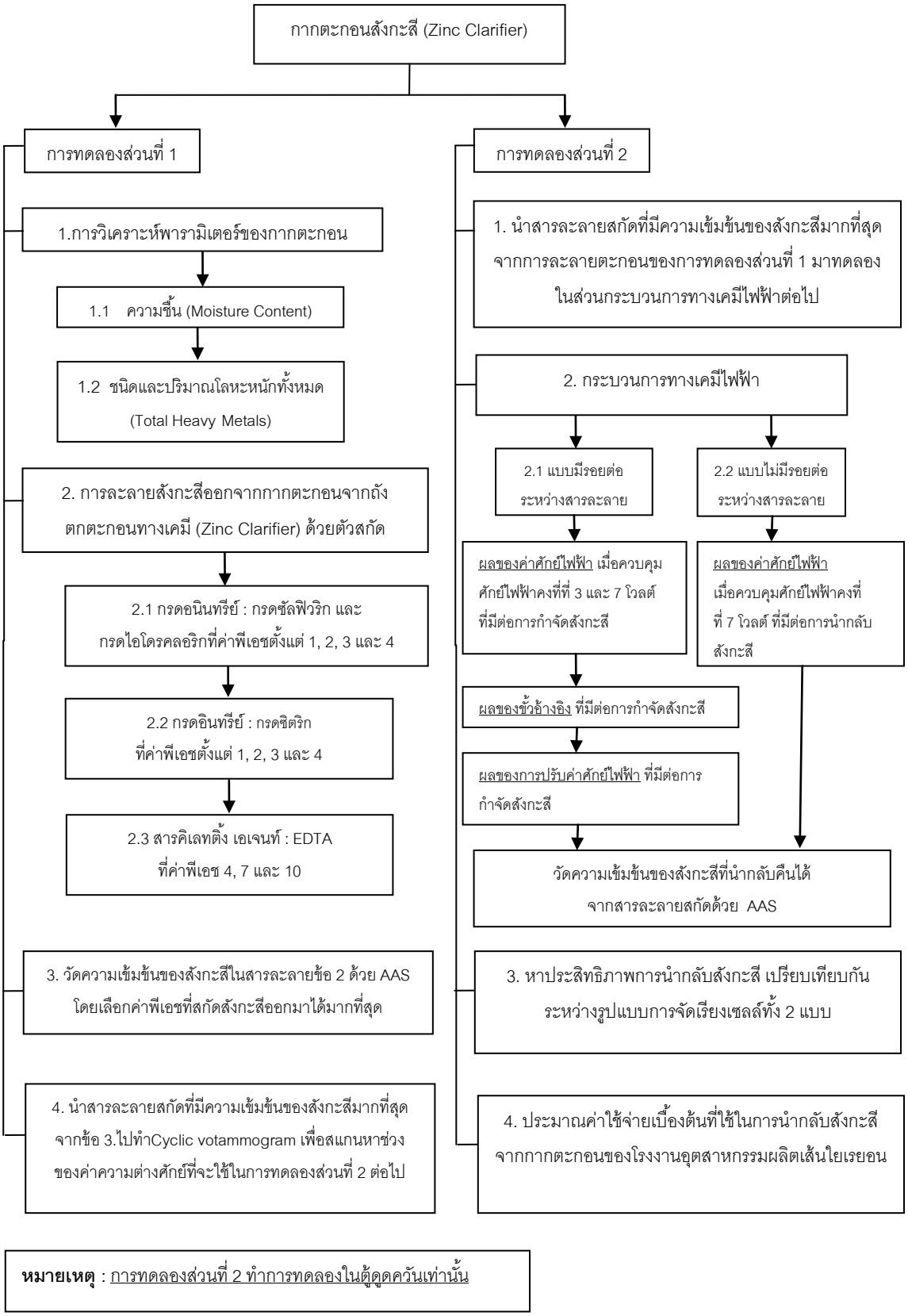
1. บรรจุสารละลายสังเคราะห์หรือสารละลายสกัด ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในถังปฏิกิริยา
2. ในถังปฏิกิริยา ขั้วบวกและขั้วลบนำมาต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าแอโนด (แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแกรไฟต์) ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทด (แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแกรไฟต์) ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดของการละลายสังกะสีในสารละลายสกัด (Extracting agent) ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ 0.10 M ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA), กรดซัลฟิวริก(H_2SO_4), กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และ กรดซิตริก (Citric Acid) ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ โดยนำกากตะกอนอบแห้งน้ำหนักประมาณ 2 กรัมมาละลายด้วยตัวทำละลายปริมาตร 100 มิลลิลิตร ทำการทดลองที่ค่าพีเอช 1, 2, 3 และ 4 ในสารละลายสกัด H_2SO_4, HCl และ Citric Acid และที่ค่าพีเอช 4, 7 และ 10 ในสารละลายสกัด EDTA คนสารละลายด้วยเครื่องคนแม่เหล็กเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กรองส่วนที่เป็นของแข็งออก และทำการตรวจวัดปริมาณของสังกะสีที่ละลายออกมาอยู่ในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS สำหรับการทดลองส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพของการนำสังกะสีกลับคืนโดยใช้วิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาตัวแปรที่สำคัญตามลำดับดังนี้ ได้แก่ รูปแบบการจัดเรียงเซลล์ ระหว่างเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายและ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สามารถกำจัดสังกะสีได้มากที่สุดโดยเลือกใช้ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดจากการทดลองส่วนที่ 1 มาทำการทดสอบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการทดลองที่ใช้โดยทั่วไปซึ่งจะจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย สุดท้ายทำการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการนำสังกะสีกลับคืน วิธีการดำเนินการวิจัยทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผังภาพรวมของการทำวิจัย

3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 การละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด

1. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

1.1 **ความชื้น** (Moisture Content)

ความชื้น แสดงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุใช้เพื่อแปลงค่าโลหะหนักที่ได้เป็นหน่วยต่อน้ำหนักเปียกดำเนินการโดย ชั่งน้ำหนักตัวอย่างแล้วนำตัวอย่างมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศา-เซลเซียส ระยะเวลาประมาณ 24 ชั่วโมงหรือจนแห้งแล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นแล้วจึงชั่งน้ำหนักอีกที แล้วหาอัตราส่วนของน้ำที่หายไปต่อปริมาณของน้ำทั้งหมด การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM D 2216-98 โดยลักษณะของกากตะกอนหลังอบแห้ง แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.5

1.2 **ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด** (Total Heavy Metals)

ทำการย่อยสลายตัวอย่างโดยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3051A โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม ใส่ลงในหลอดเวสเซล
2. เติมกรดไนตริก 9±0.1 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก 3±0.1 มิลลิลิตร
3. ปิดฝาหลอดเวสเซล จากนั้นนำเข้าเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกอุณหภูมิ 0-180 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 5.5 นาที ช่วงที่ 2 อุณหภูมิคงที่ 180 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 9.5 นาที และช่วงที่ 3 ช่วงลดอุณหภูมิ ใช้เวลา 5-15 นาที
4. เมื่อถึงเวลาที่กำหนด นำหลอดเวสเซลออกจากเครื่อง ทิ้งให้เย็น
5. นำสารละลายมากรอง และปรับปริมาตรให้เป็น 100 มิลลิลิตร
6. นำไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP

ตารางที่ 3.1 การศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย

หัวข้อที่ศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. ความชื้น 2. ชนิดและปริมาณของโลหะหนัก	1.ASTM D 2216-98 2.เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ ของ US EPA SW-846 Method 3051A และ เครื่อง ICP

รูปที่ 3.5 ลักษณะของกากตะกอนหลังอบแห้ง

2. การละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองเพื่อหาชนิดของตัวสกัด และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน โดยการเลือกใช้ตัวสกัด (Extracting agent) ชนิดต่าง ๆ ดังนี้

2.1 กรดอนินทรีย์ (Inorganic acid) เลือก กรดซัลฟิวริก และกรดไฮโดรคลอริก

2.2 กรดอินทรีย์ (Organic acid) เลือก กรดซิตริก

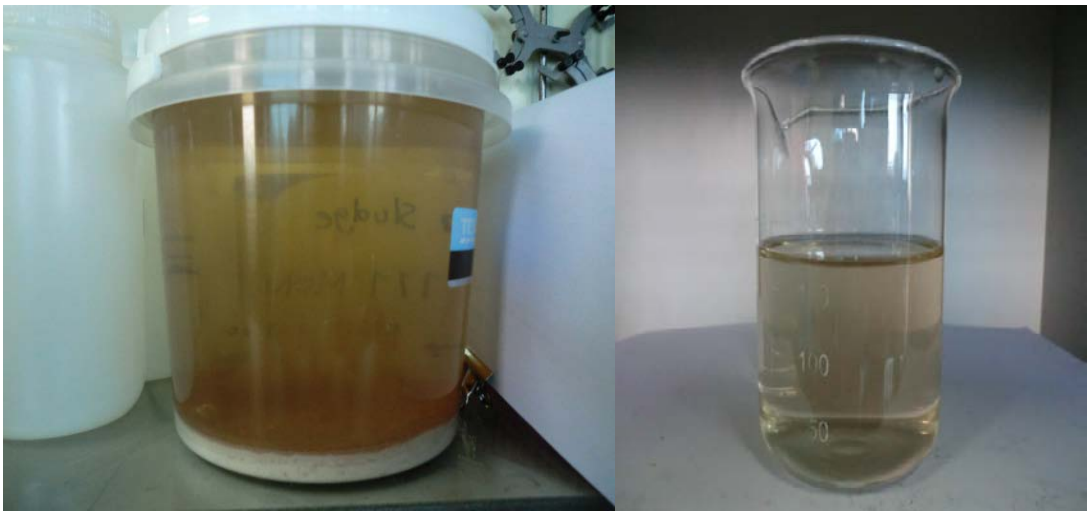
2.3 สารคิเลทติ้ง เอเจนท์ (Chelating agent) เลือก EDTA

ทำการแปรค่าพีเอช เพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และมีวิธีการทดลองดังแสดงในผังการทดลองรูปที่ 3.7 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

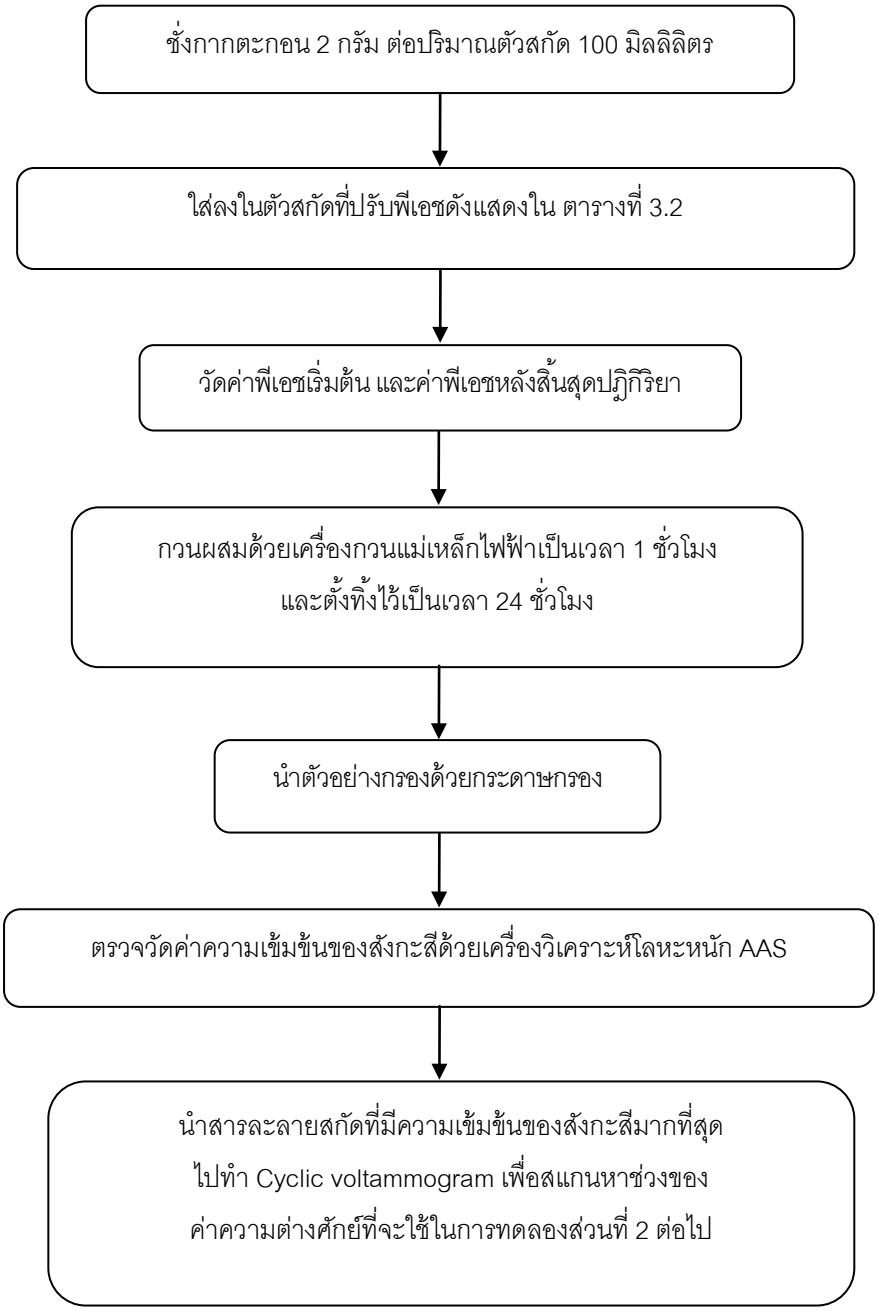
1. ละลายกากตะกอนหนัก 2 กรัม ในตัวสกัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ (ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.2)
2. ทดสอบที่ค่าพีเอชต่าง ๆ (ดังแสดงตารางที่ 3.2) โดยวัดค่าพีเอชเริ่มต้น
3. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
4. วัดค่าพีเอชหลังสิ้นสุดปฏิกิริยา
5. นำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5
6. ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
7. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาชนิดของตัวสกัดและผลของพีเอชที่มีต่อการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน

ตัวแปรคงที่	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. อุณหภูมิ 2. เวลา	1. อุณหภูมิห้อง 2. 24 ชั่วโมง
ตัวแปรอิสระ	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. กรดอนินทรีย์ : กรดซัลฟิวริก และกรดไฮโดรคลอริก	1. พีเอช 1, 2, 3และ 4
2. กรดอินทรีย์ : กรดซิตริก	2. พีเอช 1, 2, 3และ 4
3. สารคิเลทติ้ง เอเจนท์ : EDTA	3. พีเอช 4, 7 และ 10
ตัวแปรตาม	**ค่าที่ทำการวัด**
1. ประสิทธิภาพในการละลายสังกะสี	1. ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด



รูปที่ 3.6 การละลายสังกะสีออกจากตัวอย่างกากตะกอน



รูปที่ 3.7 ผังแสดงวิธีการทดลองการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน

3.2.2 **การทดลองส่วนที่ 2 การใช้กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า** (Electrochemical process) **เพื่อนำสังกะสีออกจากสารละลายตัวสกัด**

จากการทดลองส่วนที่ 1 เมื่อเลือกตัวแปรที่เหมาะสมได้จากสารละลายสกัดที่มีค่าความเข้มข้นของสังกะสีมากที่สุดแล้วจึงนำสารละลายสกัดนั้น ไปสแกนหาช่วงของความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อนำมาใช้ในการทดลองที่ 2 ต่อไป โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 2 แสดงในตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดและประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ได้แก่ การจัดวางรูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้า (การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายเปรียบเทียบกับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย) ขั้วอ้างอิง และค่าศักย์ไฟฟ้า

2.1 **การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย**

มีวัตถุประสงค์เพื่อ*หาประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีในสารละลายสกัด* โดยเลือกค่าสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองในส่วนที่ 1 มาทำการทดสอบกับสารละลายสกัด โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. นำขั้วแคโทดไปอบแห้ง และชั่งน้ำหนักขั้วแคโทด
2. เชื่อมต่อครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์
3. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
4. บรรจุสารสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
5. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร โดยที่กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
6. ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3, 7 และ 10 โวลต์ โดยควบคุมค่าความศักย์ไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
7. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
8. วัดค่าพีเอช วัดค่าการนำไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที

9. จากนั้นนำตัวอย่างหลังผ่านการนำกลับสังกะสีที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS และชั่งน้ำหนักขั้วแคโทด เพื่อคำนวณหาปริมาณของสังกะสีที่นำกลับคืนได้ โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 2.1 แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ในสารละลายสกัด โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

ตัวแปรคงที่	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย
2. ชนิดของสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด	2. โซเดียมคลอไรด์
3. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด	3. สารละลายสกัด
4. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แกรไฟต์
5. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแอโนด	5. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
6. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	6. แกรไฟต์
7. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทด	7. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
8. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแอโนด	8. 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
9. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด	9. 4 × 9 ตารางเซนติเมตร
10. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	10. 170 มิลลิลิตร ทั้งฝั่งแอโนดและแคโทด
11. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์	11. 2 โมลาร์
12. เวลาเก็บกัก	12. 30 นาที
13. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	13. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1.ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ 2.ขั้วอ้างอิง	1. 3, 7 และ10โวลต์ 2.ต่อและไม่ต่อขั้วอ้างอิง
ตัวแปรตาม	**ค่าที่ทำการวัด**
1. ประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสี	1. น้ำหนักของสังกะสีที่นำกลับคืนได้ น้ำหนักของตะกอนสังกะสีและความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลายสกัด

2.2 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

มีวัตถุประสงค์เพื่อ*เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีในสารละลายสกัดกับวิธีการทดลองที่ใช้โดยทั่วไปที่มีการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย* โดยเลือกค่าสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองในส่วนที่ 2.1 มาทำการทดสอบ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. บรรจุสารละลายสกัด ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในถังปฏิกิริยา
2. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด เป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร โดยที่กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
3. ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 และ 10 โวลต์ โดยควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
4. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
5. วัดค่าพีเอช และเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 30 นาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
6. จากนั้นนำตัวอย่างหลังผ่านการนำกลับสังกะสีที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS และชั่งน้ำหนักของสังกะสีที่นำกลับคืนได้ โดยตัวแปรที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 2.2 แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ในสารละลายสกัด โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

ตัวแปรคงที่	**ช่วงที่ทำการควบคุม**
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย
2. สารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	2. สารละลายสกัด
3. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	3. แกรไฟต์
4. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
5. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	5. แกรไฟต์
6. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทด	6. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
7. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแอโนด	7. 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
8. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด	8. 4 × 9 ตารางเซนติเมตร
9. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	9. 340 มิลลิลิตร
10. ค่าศักย์ไฟฟ้า	10. ค่าที่เหมาะสมจากการทดลอง 2.1 (7 และ 10โวลต์)
11.ขั้วอ้างอิง	11.ต่อขั้วอ้างอิง
12. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์	12. 2 โมลาร์
13. เวลาเก็บกัก	13. 2 ชั่วโมง
14. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	14. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	**ค่าที่ทำการวัด**
1. ประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสี	1. น้ำหนักของสังกะสีที่นำกลับคืนได้ และความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลายสกัด

3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการทำวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าพีเอช และความเข้มข้นของสังกะสี

ตารางที่ 3.5 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัดค่า
ค่าพีเอช	pH meter
ความเข้มข้นของสังกะสี	AAS, Direct Aspiration

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการนำกลับสังกะสีจากกากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอนโดยใช้วิธีการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ และนำกลับสังกะสีด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน ของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน และ 2) ประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีในสารละลายสกัด โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่

4.1 การทดลองส่วนที่ 1 การละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด

เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอนโดยทำการศึกษา 2 ส่วน คือศึกษาหาพารามิเตอร์ของกากตะกอน เพื่อระบุชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดที่มีอยู่ในกากตะกอน และศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด เพื่อหาชนิดของตัวสกัด และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุด

4.1.1 พารามิเตอร์ของกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

ผลการศึกษาพารามิเตอร์ของกากตะกอน พบว่า กากตะกอนของเสียมีสีน้ำตาลอ่อน มีกลิ่นเหม็น โดยทำการวัดความชื้น (Moisture Content) พบว่า มีค่าอยู่ที่ 58.88 % ส่วนชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดที่มีอยู่ในกากตะกอนตรวจพบ ปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีมากที่สุด แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 ลักษณะของตัวอย่างกากตะกอนแสดงไว้ในรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของกากตะกอนของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	**ตรวจพบ**											
ลักษณะภายนอก	สีน้ำตาลอ่อน มีกลิ่นเหม็น											
ความชื้น (%)	58.88											
พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	**ปริมาณโลหะ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)**											
ชนิดของโลหะ	Al	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mn	Ni	Pb	Zn
(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	1037	17	3030	1	32	4	1274	239	115	20	43	44730

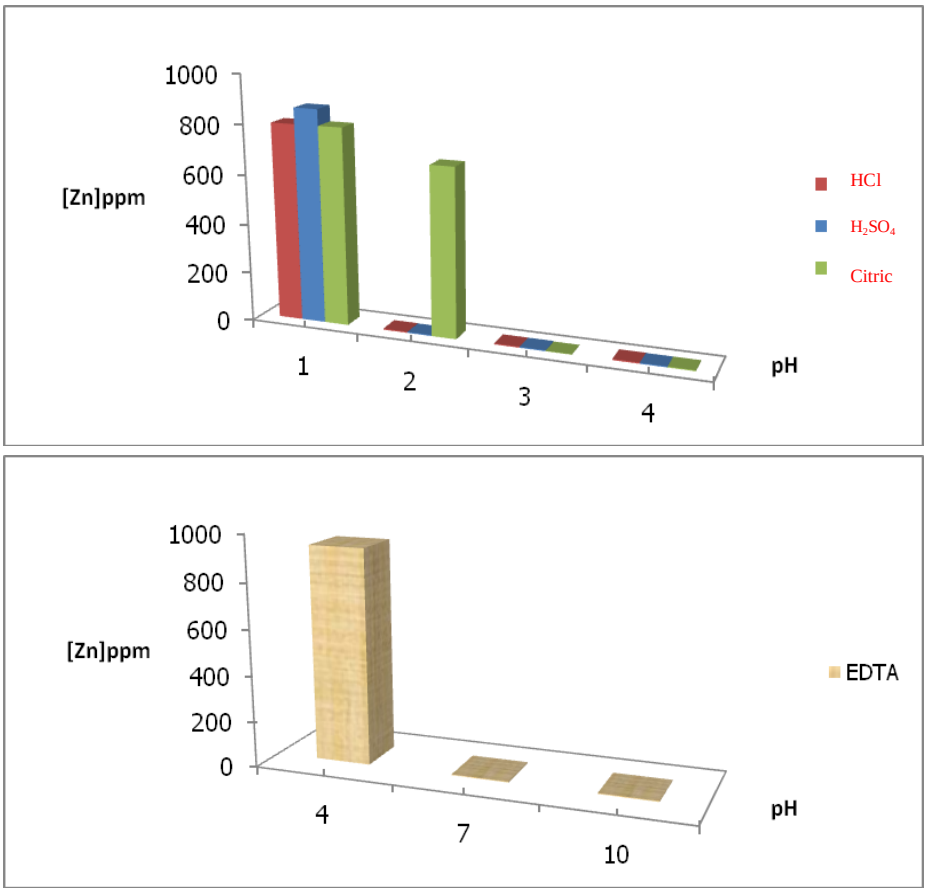
ที่มา : ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะโดยใช้เครื่อง ICP

รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกากตะกอนของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน ก่อนอบแห้ง (รูปซ้าย) และหลังอบแห้ง (รูปขวา)

4.1.2 การละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด

การละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ ที่มีความสามารถในการละลายได้แตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาหาชนิดของตัวสกัด และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอน ระยะเวลาที่ใช้ในการสกัด 24 ชั่วโมง โดยการเลือกใช้ตัวสกัด (Extracting agent) ชนิดต่าง ๆ ดังนี้

1. กรดอนินทรีย์ (Inorganic acid) เลือก กรดซัลฟิวริก และกรดไฮโดรคลอริก
2. กรดอินทรีย์ (Organic acid) เลือก กรดซิตริก
3. สารคิเลทติ้ง เอเจนท์ (Chelating agent) เลือก EDTA



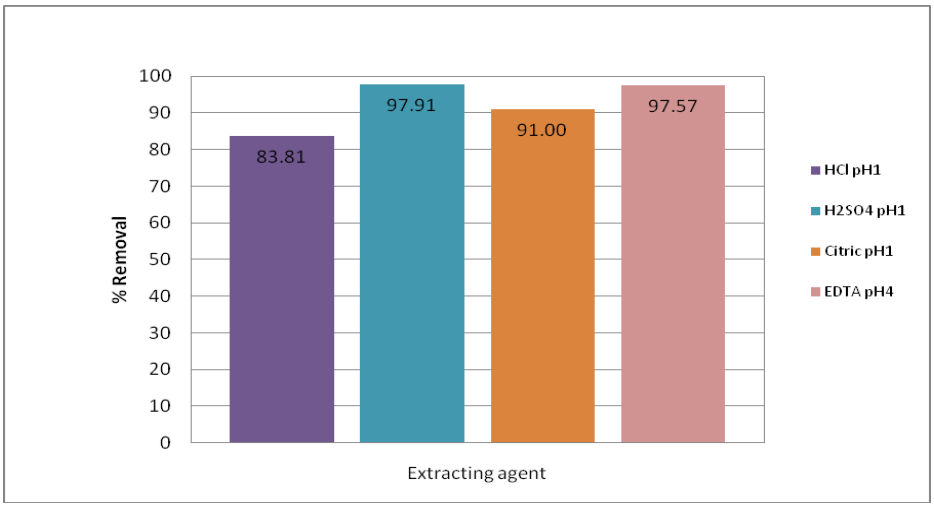
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมาจากกากตะกอน เมื่อทำการสกัดด้วยตัวสกัดชนิดต่างๆ ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ตัวสกัดกรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก และกรดซิตริกที่ค่าพีเอช 1 สกัดสังกะสีออกจากกากตะกอนที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีอยู่ที่ 892.03 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การละลายของสังกะสีออกมาจากกากตะกอนมากที่สุดเมื่อเทียบกับที่ค่าพีเอช 2 ถึง 4 โดยมีความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ที่ 873.40, 747.60 และ 811.77 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และสำหรับตัวสกัด EDTA พบว่าที่ค่าพีเอช 4 สามารถละลายสังกะสีออกมา

จากกากตะกอนได้มากกว่าที่พีเอช 7 และ 10 โดยมีความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ที่ 870.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3

รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมาจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ ณ ค่าพีเอชของตัวสกัดแต่ละชนิดที่สามารถละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุด

เมื่อคิดเป็นค่าร้อยละการสกัดของตัวสกัดแต่ละชนิด พบว่าตัวสกัดกรดซัลฟิวริกที่ค่าพีเอช 1 สามารถสกัดสังกะสีออกจากกากตะกอนได้ดีที่สุด โดยรูปที่ 4.4 แสดงค่าร้อยละของสังกะสีที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ จากการทดลองพบว่า ตัวสกัดกรดซัลฟิวริกที่ค่าพีเอช 1 สามารถละลายสังกะสีออกมาได้มากที่สุด ที่ 97.91%, ตัวสกัด EDTA ที่ค่าพีเอช 4 ที่ 97.57%, กรดซิตริกที่ค่าพีเอช 1 ที่ 91.00% และ กรดไฮโดรคลอริกที่ค่าพีเอช 1 สามารถละลายสังกะสีออกมาได้น้อยที่สุดคิดเป็น 83.81%



รูปที่ 4.4 ร้อยละของการกำจัดสังกะสีที่ละลายออกมาจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ ณ ค่าพีเอชของตัวสกัดแต่ละชนิดที่สามารถละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุด

จากผลการทดลองส่วนที่ 1 การละลายสังกะสีในสารละลายสกัดชนิดต่าง ๆ ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ พบว่า H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 และ EDTA 0.10 M ที่ค่าพีเอช 4 สามารถละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุด ดังผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น สังกะสีสามารถละลายออกจากกากตะกอนได้น้อยลง และสังกะสีละลายได้ทั้งหมด เมื่อค่าพีเอชอยู่ในช่วง 1-2 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ (Babel and Dacera, 2006) ซึ่งได้ทำการรวบรวมสภาวะที่ดีที่สุดของตัวสกัดที่สามารถสกัดสังกะสีออกจากกากตะกอนแต่ละชนิดซึ่งมีแหล่งที่มาแตกต่างกัน จึงทำให้เกิดความแตกต่างขององค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของกากตะกอน ซึ่งอาจส่งผลให้เห็นว่าการทดลองบางส่วนไม่สอดคล้องกันงานวิจัยที่ผ่านมา สำหรับตัวสกัดที่เป็นกรดชนิดต่าง ๆ ส่วนในสารละลายสกัด EDTA พบว่า ถ้าค่าพีเอชสูงขึ้น สังกะสีสามารถละลายออกจากกากตะกอนได้น้อยลงเช่นเดียวกัน

นอกจากนี้จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ค่าพีเอช 1 ความสามารถในการละลายสังกะสีของกรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก รวมถึงกรดซิตริก มีความแตกต่างกันเล็กน้อย โดยทั้ง H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 และ EDTA 0.10 M ที่ค่าพีเอช 4 สามารถใช้สกัดสังกะสีออกมาได้ด้วยความสามารถพอ ๆ กัน จึงสามารถเลือกใช้ได้ทั้ง 2 ตัว ผลเปรียบเทียบดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 และทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการละลายสังกะสีที่ใช้ในการทดลอง ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความสามารถในการละลายสังกะสีของการใช้ตัวสกัดแต่ละชนิด ณ ค่าพีเอชของตัวสกัดแต่ละชนิดของการทดลองกับงานวิจัยอื่น ๆ (Babel and Dacera, 2006)

Extracting agent/pH	Babel and Dacera,	Extracting/pH	**งานวิจัยนี้**
$H_2 SO_4$	Zn removal (%)	$H_2 SO_4$	Zn removal (%)
pH ~2	72	pH 1	98
pH 1.5	100	pH 2	0.4
	50	pH 3	0.4
	66	pH 4	0.5
HCl		HCl	
pH 2	77	pH 1	84
pH <3	80	pH 2	0.5
		pH 3	0.5
		pH 4	0.6
EDTA		EDTA	
pH ~2	45	pH 4	98
pH 1.5	26	pH 7	0.4
	23	pH 10	0.4
Citric acid		Citric acid	
pH 3	85	pH 1	91
pH 3	90	pH 2	77
		pH 3	0.3
		pH 4	0.4

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของการใช้ตัวสกัดแต่ละชนิด ณ ค่าพีเอชของตัวสกัดแต่ละชนิดที่สามารถละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนได้มากที่สุด (การทดลองส่วนที่ 1)

ตัวสกัด	**ราคา (บาทต่อ1ลิตร)**	**ร้อยละการละลายของสังกะสี**	**ความเข้มข้นสังกะสี (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)**
กรดซัลฟิวริกที่ค่าพีเอช 1	8.78	98	43,795
กรดไฮโดรคลอริกที่ค่าพีเอช 1	12.33	84	37,488
กรดซิตริกที่ค่าพีเอช 1	53.80	91	40,704
EDTAที่ค่าพีเอช 4	74.81	98	43,643

หมายเหตุ : ราคาสารเคมีเกรดสำหรับงานวิเคราะห์

จากผลการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งได้นำสารละลายสกัดไปทำการทดลองส่วนที่ 2 ต่อไป ส่วนกากตะกอนที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองได้นำไปทำการตรวจสอบปริมาณโลหะ โดยใช้เครื่อง XRF และทำการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานคุณภาพดิน เนื่องจากตรวจพบว่ามีปริมาณสังกะสีที่เหลืออยู่มีค่า 3,133 mg/kg ในกากตะกอนหลังทำการสกัดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน(ค่ามาตรฐานเป็นค่าที่กำหนดเพื่อจัดกากของเสียอยู่ในกลุ่มกากของเสียอันตราย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 กำหนดไว้ไม่เกิน 5,000 mg/kg) ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าว ทำให้สามารถจัดการกับกากตะกอนเพื่อใช้ทางการเกษตรได้ต่อไป โดยแสดงผลวิเคราะห์เปรียบเทียบปริมาณโลหะของกากตะกอนของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน(ก่อนทำการสกัด) และองค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเมื่อทำการสกัดด้วย H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง(หลังทำการสกัด) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4 และค่ามาตรฐานคุณภาพดินตามประกาศกรมควบคุมมลพิษกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน (ก่อนทำการสกัด) และกากตะกอนเมื่อทำการสกัดด้วย H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (หลังทำการสกัด)

ชนิดของโลหะ	**ก่อนทำการสกัด**	**หลังทำการสกัด**
	(mg/kg)	**(mg/kg)**
Fe	909	245
Zn	49,570	3,133

ที่มา : ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะ โดยใช้เครื่อง XRF

ตารางที่ 4.5 ค่ามาตรฐานคุณภาพดินตามประกาศกรมควบคุมมลพิษกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (แสดงเฉพาะค่าโลหะหนัก)

ชนิดของโลหะ	**มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอยู่อาศัยและเกษตรกรรม**	**มาตรฐานคุณภาพดินที่ใช้ประโยชน์เพื่อการอื่นนอกเหนือจาก การอยู่อาศัยและเกษตรกรรม**
	(mg/kg)	(mg/kg)
1) สารหนู (Arsenic)	ต้องไม่เกิน 3.9	ต้องไม่เกิน 27
2) แคดเมียมและสารประกอบแคดเมียม (Cadmium and compounds)	ต้องไม่เกิน 37	ต้องไม่เกิน 810
3) โครเมียมชนิดเฮ็กซาวาเลนท์ (Hexavalent Chromium)	ต้องไม่เกิน 300	ต้องไม่เกิน 640
4) ตะกั่ว (Lead)	ต้องไม่เกิน 400	ต้องไม่เกิน 750
5) แมงกานีสและสารประกอบแมงกานีส (Manganese and compounds)	ต้องไม่เกิน 1,800	ต้องไม่เกิน 32,000
6) ปรอทและสารประกอบปรอท (Mercury and compounds)	ต้องไม่เกิน 23	ต้องไม่เกิน 610
7) นิกเกิลในรูปของเกลือที่ละลายน้ำได้ (Nickel, soluble salts)	ต้องไม่เกิน 1,600	ต้องไม่เกิน 41,000
8) ซีลีเนียม (Selenium)	ต้องไม่เกิน 1,600	ต้องไม่เกิน 41,000

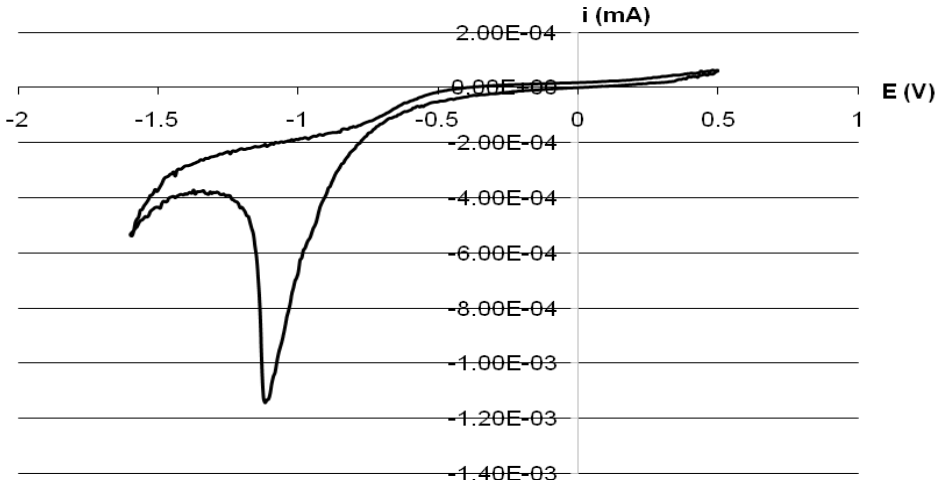
ที่มา : ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 25 (พ.ศ. 2547) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพดิน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 121 ตอนพิเศษ 119 ง ลงวันที่ 20 ตุลาคม 2547

4.2 การทดลองส่วนที่ 2 การใช้กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical process) เพื่อนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด

เป็นการศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดและประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ประกอบด้วยการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสี อันได้แก่ 1) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม 2) ขั้วอ้างอิง และ 3) การปรับค่าศักย์ไฟฟ้าตามช่วงเวลาต่าง ๆ และทำการศึกษาเปรียบเทียบผลอันเนื่องมาจากรูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี (การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายเปรียบเทียบกับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย)

4.2.1 โวลแทมเมตรีแบบรอบ (Cyclic Voltammetry)

โวลแทมแทมเมตรีแบบรอบเป็นการให้ศักย์ไฟฟ้ากับระบบผ่านอิเล็กโทรดขนาดเล็กที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่ไม่มีการคนกวน ซึ่งทำให้ได้โวลแทมโมแกรมแบบรอบที่เป็นการพล๊อตระหว่างกระแสที่เกิดขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ให้ โดยรูปที่ 4.5 แสดงโวลแทมโมแกรมของสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1



รูปที่ 4.5 โวลแทมโมแกรมแบบรอบ (Cyclic voltammogram) ของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1

ในรูปที่ 4.5 พีกปรากฏที่ตำแหน่ง -1 โวลต์ (เครื่องหมายลบ หมายถึงว่าเป็นปฏิกิริยารีดักชัน) เป็นพีกอันเนื่องมาจากปฏิกิริยารีดักชันของสังกะสีดังสมการที่ (4.1) ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดักชันของสังกะสีไอออน (Zn^{2+}) ในสารละลายเปลี่ยนไปเป็นโลหะสังกะสี Zn(s) ที่มีความบริสุทธิ์เหมาะสำหรับการนำกลับสังกะสีตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนั้นควรควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้า (E) ที่ขั้วแคโทดให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 1 โวลต์เพื่อให้ปฏิกิริยาดังกล่าวดำเนินไปได้ด้วยอัตราเร็วที่สูงที่สุด

$$Zn^{2+} + 2e^{-} \longrightarrow Zn(s) \qquad (4.1)$$

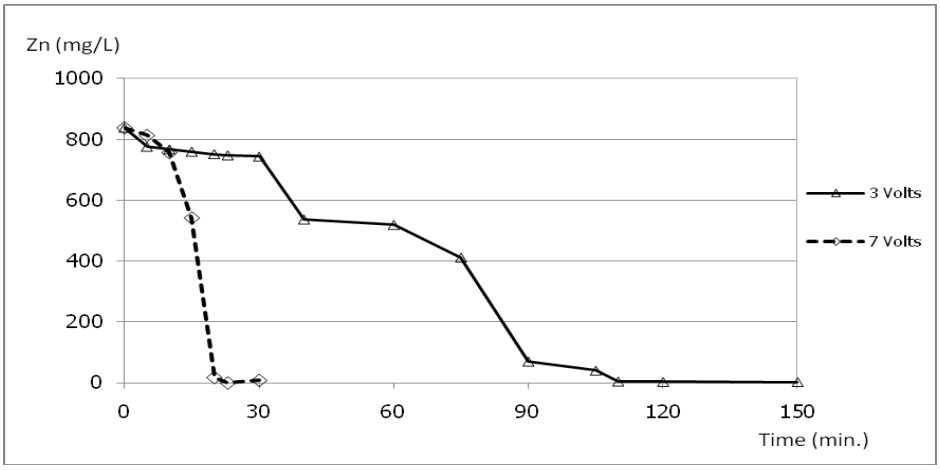
4.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสี และประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัดในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

เป็นการศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดและประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ โดยจากผลการทดลองส่วนที่ 1 ตัวสกัดที่ดีที่สุดคือ H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ดังนั้นจึงใช้สารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ที่ให้ผลการสกัดสังกะสีออกมามากที่สุดตลอดการทดลองส่วนที่ 2 ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย 1) ค่าศักย์ไฟฟ้า 2) ขั้วอ้างอิง และ 3) การปรับค่าศักย์ไฟฟ้า

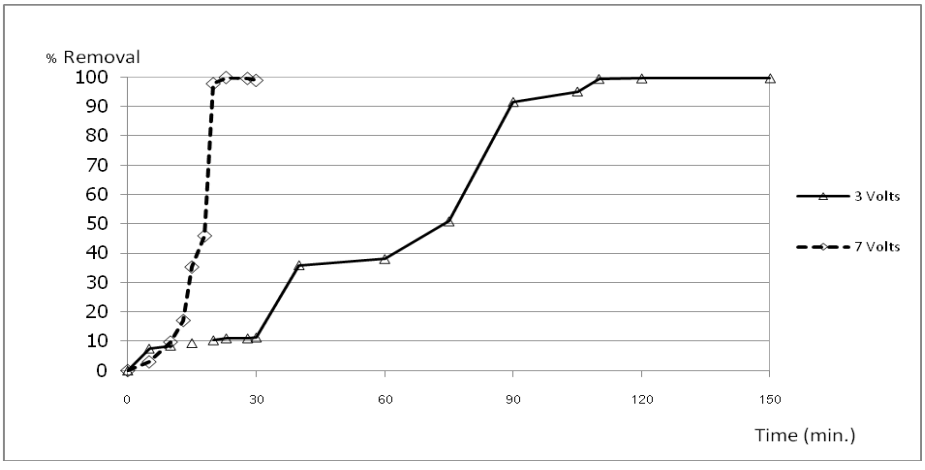
4.2.2.1 ผลของค่าศักย์ไฟฟ้า (3 โวลต์ และ7 โวลต์)

จากการทดลองสแกนหาช่วงของค่าความต่างศักย์ในหัวข้อ 4.2.1 ในรูปที่ 4.5 ทำให้ทราบว่าควรทำการทดลองที่ค่าศักย์ไฟฟ้ามากกว่า 1 โวลต์ ดังนั้นจึงแปรค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 3 โวลต์ และ7 โวลต์ (คงที่ตลอดการทดลอง)โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีในสารละลายสกัดมีค่า 838.60 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายลดลงเร็วขึ้นเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ลดลงของสังกะสี และรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3 โวลต์ เป็นเวลา 150 นาทีปริมาณสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ลดลงเหลือ 2.96 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดสังกะสีที่ 99.65% และค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์

ณ นาทีที่ 23 ปริมาณสังกะสีในสารละลายลดลงเหลือเพียง 0.47 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดสังกะสีที่ 99.94% จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า อัตราการลดลงของสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ค่าศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ใช้เวลาในการกำจัดสังกะสีน้อยลง



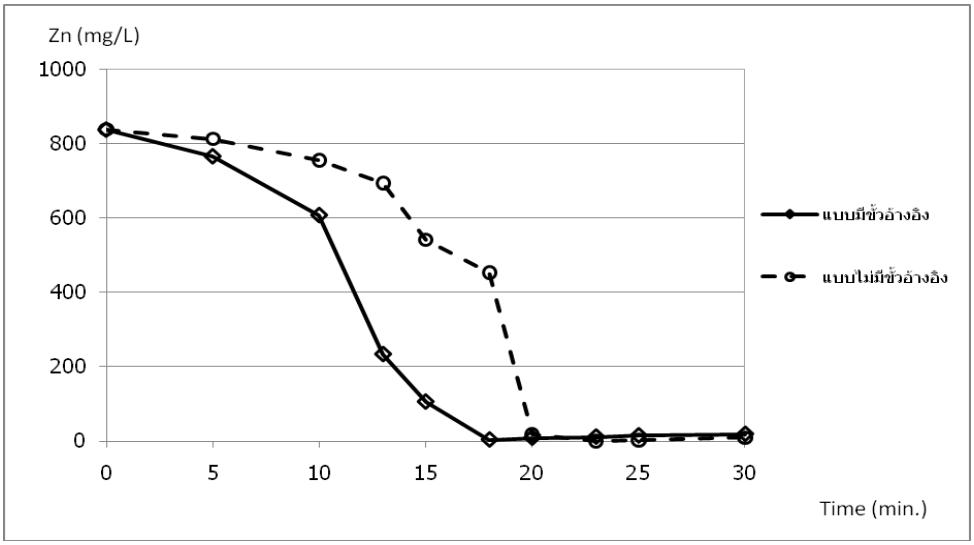
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลาเมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3 และ 7 โวลต์ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายและไม่มีขั้วอ้างอิง



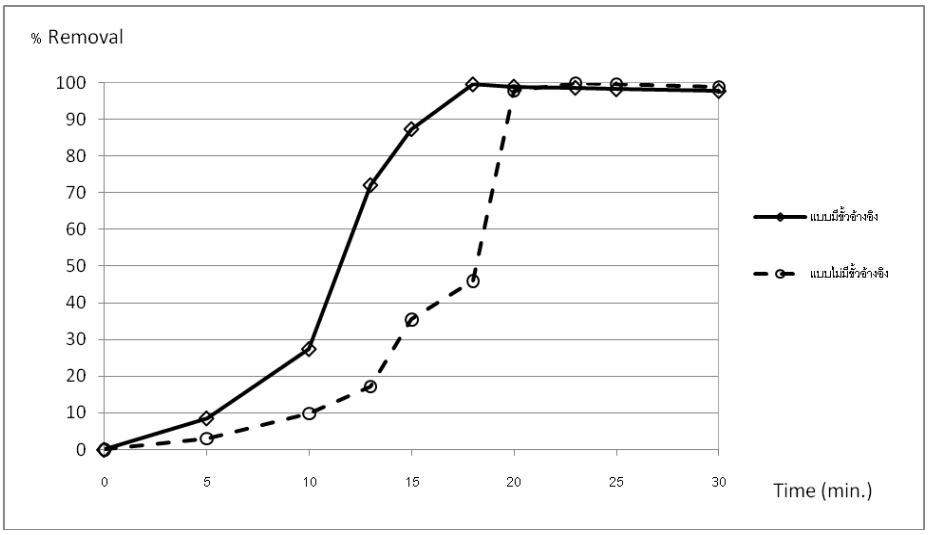
รูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลาเมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3 และ 7 โวลต์ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายและไม่มีขั้วอ้างอิง

4.2.2.2 **ผลของขั้วอ้างอิง** (reference electrode)

ศึกษาผลของขั้วอ้างอิงในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 838.60 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายที่มีการต่อขั้วอ้างอิงและไม่ต่อขั้วอ้างอิง โดยผลการทดลองได้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ พบว่านาทีที่ 18 ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อแบบมีขั้วอ้างอิงมีค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัดเหลืออยู่เพียง 3.61 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดสังกะสีที่ 99.57% ในขณะที่เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายแบบที่ไม่มีขั้วอ้างอิง มีค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัดเหลืออยู่ถึง 453.25 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดสังกะสีเพียง 45.97% ที่เวลาเดียวกัน และต้องใช้เวลา 23 นาที จึงสามารถนำกลับสังกะสีได้ 99.95% เห็นได้ว่าในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายแบบมีขั้วอ้างอิงใช้เวลาในการกำจัดสังกะสีน้อยกว่าแบบที่ไม่มีขั้วอ้างอิง จึงมีความเป็นไปได้ว่าการมีขั้วอ้างอิงช่วยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับระบบมีค่าแน่นอน ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงในระหว่างการทดลอง ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เข้าสู่ระบบเป็นค่าที่ถูกต้องอย่างแท้จริง ดังนั้นการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีขั้วอ้างอิงจึงถูกเลือกใช้ในการทดลองต่อ ๆ ไป



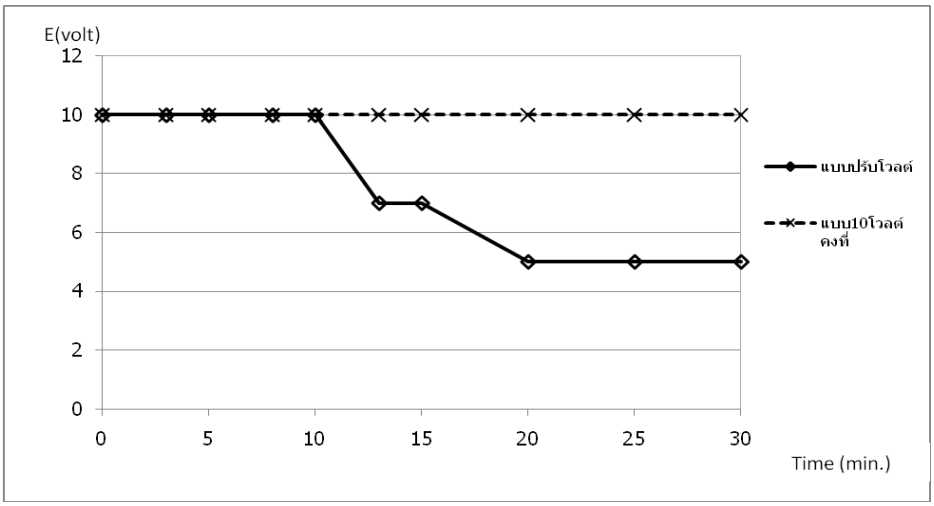
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อแบบมีขั้วอ้างอิง (เส้นทึบ) และแบบไม่มีขั้วอ้างอิง (เส้นประ)



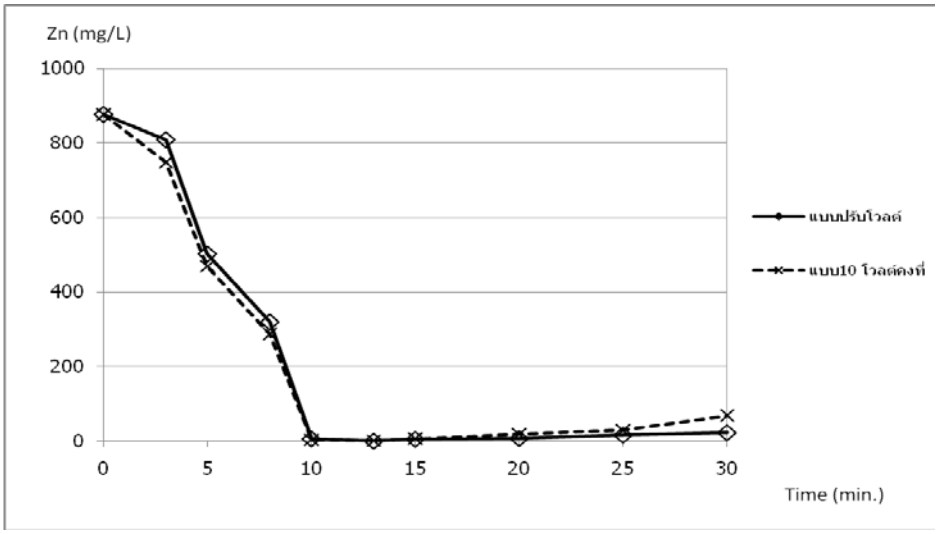
รูปที่ 4.9 ร้อยละการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อแบบมีขั้วอ้างอิง (เส้นทึบ) และแบบไม่มีขั้วอ้างอิง (เส้นประ)

4.2.2.3 ผลของการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพของการกำจัดสังกะสี

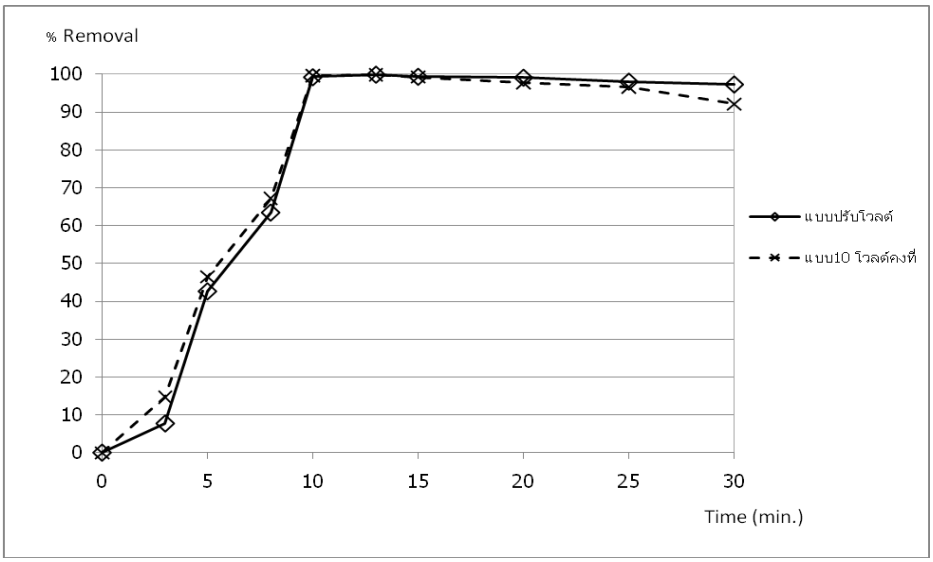
เนื่องจากผลการทดลองที่ผ่านมาดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อแบบมีขั้วอ้างอิง พบว่าช่วงปลายของการทดลองหลังจากที่ค่าความเข้มข้นสังกะสีลดลงจนเหลือ 3.61มิลลิกรัมต่อลิตร ณ นาทีที่18แล้วต่อมาในนาทีที่ 30 กลับมีค่าความเข้มข้นสังกะสีเพิ่มขึ้นเป็น 18.77 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่ามีการละลายของสังกะสีกลับมาอยู่ในสารละลายอีก จึงได้ทำการเปรียบเทียบอัตราการลดลง และประสิทธิภาพของการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์ตลอดการทดลองและปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลองเพื่อลดความเป็นไปได้ของการละลายกลับของสังกะสีมาอยู่ในสารละลายอีก โดยแสดงผลความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 และร้อยละการกำจัดสังกะสี ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อทำการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลองไว้ในรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 ค่าศักย์ไฟฟ้าในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อทำการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์ตลอดการทดลอง (เส้นประ) และแบบปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลอง (เส้นทึบ)



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อทำการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์ตลอดการทดลอง (เส้นประ) และแบบปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลอง (เส้นทึบ)

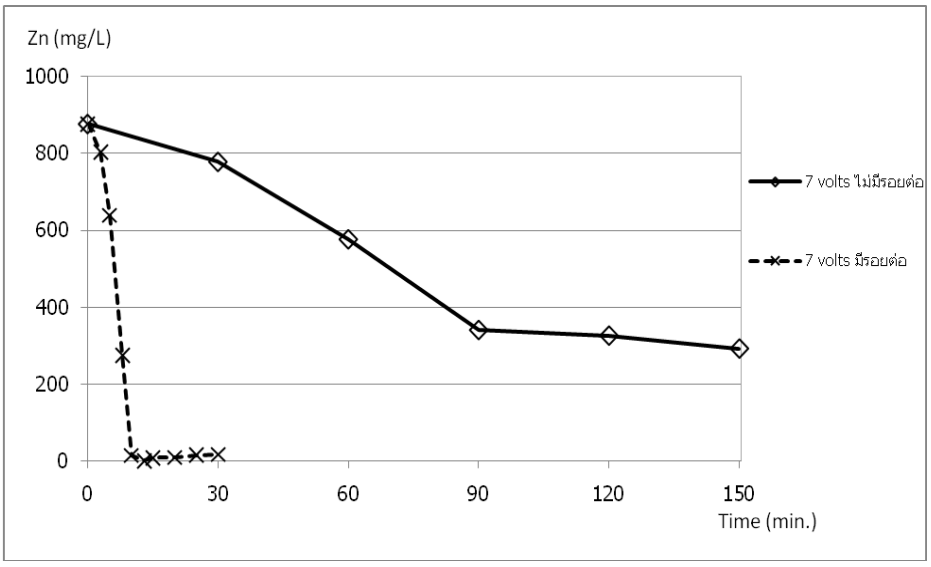


รูปที่ 4.12 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อทำการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์ตลอดการทดลอง (เส้นประ) และแบบปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาของการทดลอง (เส้นทึบ)

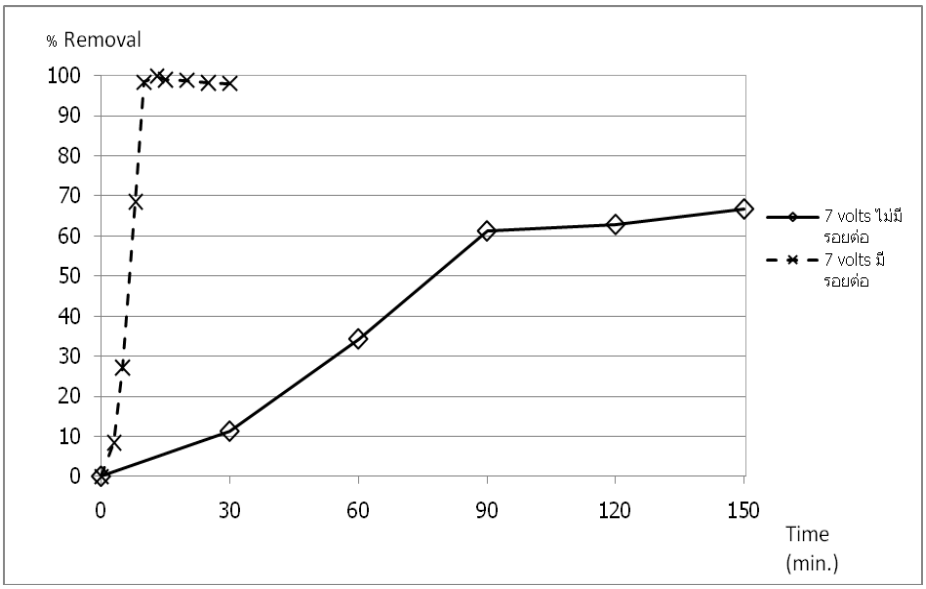
ในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 แสดงการลดลงของความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายสัมพันธ์กับเวลาที่เพิ่มขึ้น และร้อยละการกำจัดสังกะสีที่เพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับเวลาที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 มีค่า 876.63 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์ตลอดการทดลอง พบว่านาทีที่ 13 ปริมาณสังกะสีในสารละลายมีค่า 0.96 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัด 99.89% จนถึงนาทีที่ 30 พบว่าปริมาณสังกะสีในสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 69.18 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการนำกลับ 92.11% สำหรับการทดลองเมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ เป็นเวลา 10 นาทีปริมาณสังกะสีในสารละลายมีค่า 6.43 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการนำกลับ 99.27% จากนั้นปรับลดศ่า ศักย์ไฟฟ้าลงจาก 10 โวลต์ เป็น 7 โวลต์ เป็นเวลา 5 นาที จากนาทีที่ 10 ถึงนาทีที่ 15 ปริมาณสังกะสีในสารละลายมีค่า 5.38 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการนำกลับ 99.39% และเมื่อทำการปรับลดค่าศักย์ไฟฟ้าลงจาก 7 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ ตั้งแต่นาทีที่ 15 เป็นต้นไป จนถึงนาทีที่ 30 พบว่าปริมาณสังกะสีในสารละลายมีค่า 23.22 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการนำกลับ 97.35% จากผลการทดลองเห็นได้ว่าขณะที่ทำการปรับค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงปลายให้ลดลงเป็น 5 โวลต์ สามารถช่วยให้การละลายกลับคืนของสังกะสีเกิดได้ช้าลง

4.2.3 เปรียบเทียบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย และแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

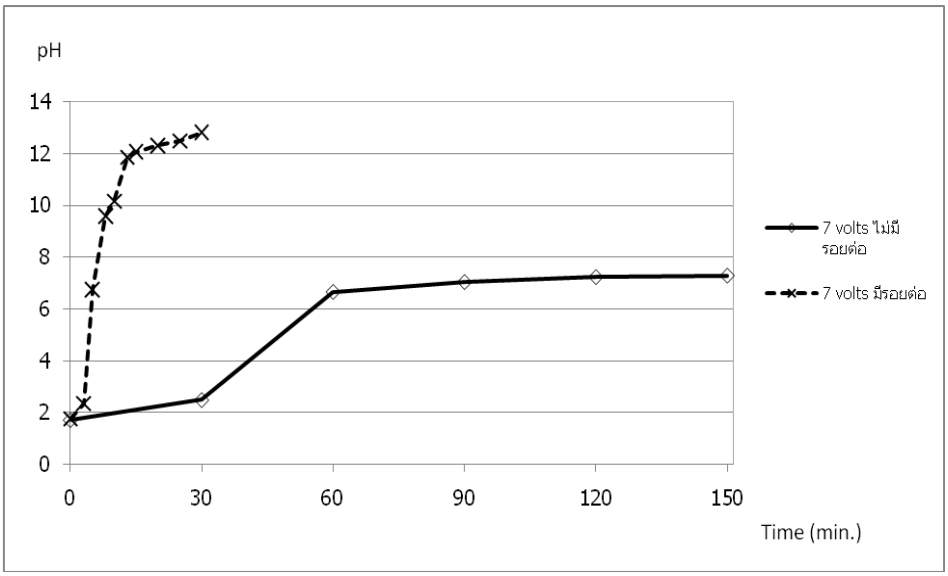
ในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ที่มีค่าความเข้มข้นของสังกะสีเริ่มต้น 876.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสี โดยใช้เซลล์เคมีไฟฟ้า 2 รูปแบบคือ การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย และการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย โดยเซลล์เคมีไฟฟ้าทั้งสองมีขั้วอ้างอิงและทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ซึ่งผลการทดลองความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด ร้อยละการกำจัดสังกะสี และค่าพีเอชเมื่อเทียบกับเวลา แสดงไว้ดังรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลาเมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อเทียบกับแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย



รูปที่ 4.14 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อ เทียบกับแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย



รูปที่ 4.15 ค่าพีเอชในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เทียบกับเวลา เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อ เทียบกับแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

จากผลการทดลองเมื่อทำการทดลองแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ พบว่าในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อสามารถลดปริมาณสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ได้เร็วกว่าเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบที่ไม่มีรอยต่อ แสดงในรูปที่ 4.15 ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อพบว่า สังกะสีในสารละลายลดลงจนเหลือปริมาณ 1.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ในนาทีที่ 13 หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัด 99.88% ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ในขณะที่เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อ พบความเข้มข้นของสังกะสีลดลงเหลือ 298.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ นาทีที่ 150 หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัด 66.72% นั่นแสดงว่าเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อสามารถลดปริมาณสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ได้เร็วกว่าเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบที่ไม่มีรอยต่อ โดยสามารถกำจัดสังกะสีออกได้เกือบหมดในเวลาเพียง 13 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบที่ไม่มีรอยต่อที่ต้องใช้เวลานานถึง 150 นาที ยังเหลือสังกะสีตกค้างอยู่ในสารละลายอีกกว่า 30%

สำหรับรูปแบบการต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายที่ลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อให้เวลาในการผ่านค่าศักย์ไฟฟ้านานขึ้น จากลักษณะที่เกิดขึ้นในการทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้ การลดลงของปริมาณสังกะสีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดักชั่นบนขั้วแคโทด ดังแสดงในสมการที่ 3 โดยในขณะทำการทดลอง ที่ขั้วแคโทดสามารถสังเกตเห็นสังกะสีมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าขั้วอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อเวลาผ่านไปสังกะสีจะรวมตัวที่ผิวขั้วมากขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.16 แต่ลักษณะการเข้าเกาะเกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอที่บริเวณผิวหน้าขั้ว เนื่องจากการรบกวนของฟองแก๊สต่อการเข้าเกาะของสังกะสี ซึ่งผลที่เกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวมานี้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากไอออนชนิดอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในสารละลาย จากข้อมูลที่กล่าวมาทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าในขณะทำการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ มีปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งปฏิกิริยาที่ดำเนินไป โดยความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาเหล่านี้ได้ถูกนำเสนอไว้ในสมการที่ 1 ถึง 7 (ลาวัลย์ ศรีพงศ์, 2543)

ปฏิกิริยาบนขั้วแคโทด

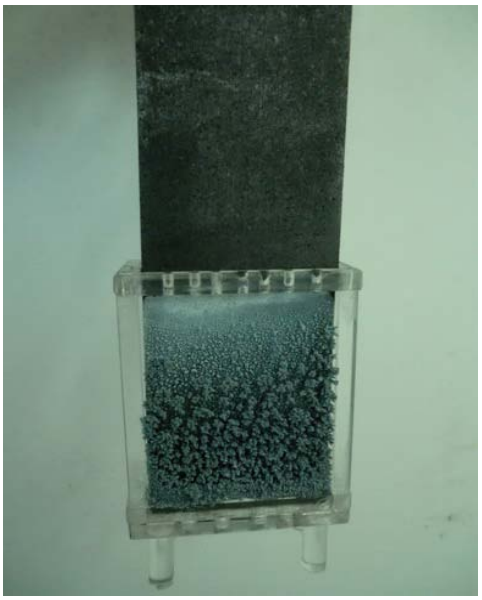
$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^-$	$\longrightarrow$	$SO_{2(g)} + 2H_2O$	$E^0 = 1.70$	(1)
$2H^+ + 2e^-$	$\longrightarrow$	$H_{2(g)}$	$E^0 = 0$	(2)
$Zn^{+2} + 2e^-$	$\longrightarrow$	$Zn_{(s)}$	$E^0 = -0.76$	(3)
$2H_2O + 2e^-$	$\longrightarrow$	$H_{2(g)} + 2OH^-$	$E^0 = -0.828$	(4)
$Zn^{2+} + 2OH^-$	$\longrightarrow$	$Zn(OH)_{2(s)}$		(5)

ปฏิกิริยาบนขั้วแอโนด

$$2Cl^- \longrightarrow Cl_{2(g)} + 2e^- \qquad E^0_{ox} = -1.36 \qquad (6)$$

$$2H_2O \longrightarrow O_{2(g)} + 4H^+ + 4e^- \qquad E^0_{ox} = -1.23 \qquad (7)$$

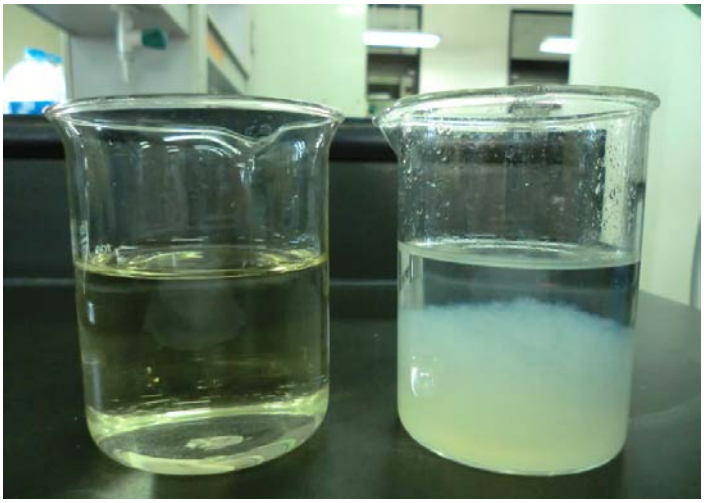
ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ช่วงต้นของการทดลองแบบควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วแคโทด ได้แก่ ปฏิกิริยาที่ (1) ถึง(3) เนื่องจากในช่วงเวลานี้ SO_4^{2-}, H^+และ Zn^{2+} ไอออนในสารละลายมีปริมาณมาก อีกทั้งค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในการเกิดรีดักชันของไอออนมีค่าสูง ทำให้ปฏิกิริยาที่ (1) และ (3) สามารถดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว และเนื่องจากสารละลายในเบื้องต้นมีค่าพีเอชค่อนข้างต่ำ ทำให้มีปริมาณ H^+ ในสารละลายอยู่มาก ดังนั้นปฏิกิริยาที่ (2) จึงเกิดขึ้นได้ดี สำหรับฝั่งของขั้วแอโนด Cl^- สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายที่สุด โดยสังเกตจากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน และด้วยปริมาณที่มีอยู่มากของ Cl^- ในสารละลาย ซึ่งผลของการดำเนินไปของปฏิกิริยานี้สอดคล้องกับการลดลงของปริมาณไอออนสังกะสีในสารละลาย ซึ่งสังกะสีที่เกาะอยู่ที่ขั้วแคโทดมีความบริสุทธิ์ เป็นของแข็งที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ใหม่ เมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า ค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงไปไม่มาก และค่อนข้างคงที่อยู่ที่ระหว่าง 6.67 ถึง 7.29 ตั้งแต่นาทีที่ 60 จนถึงนาทีที่ 150 ค่าพีเอชที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเป็นผลมาจากการเกิด H^+ ที่ฝั่งขั้วแอโนด (ปฏิกิริยาที่ 7) การเกิด OH^- ที่ขั้วแคโทด (ปฏิกิริยาที่ 4) ทำให้เกิดการผสมกันในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย จึงเป็นผลให้ค่าพีเอชไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ดังนั้นโอกาสเกิดปฏิกิริยาที่ (5) จึงมีน้อยมาก ทำให้ปฏิกิริยาเดียวที่จะกำจัดสังกะสีออกจากสารละลายได้ จึงเหลือแค่ปฏิกิริยาเดียว คือ ปฏิกิริยาที่ (3) จึงทำให้เห็นว่าสังกะสี Zn(s) ส่วนใหญ่มาเกาะที่ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แต่กว่าจะเกิดต้องใช้เวลานานพอสมควร



รูปที่ 4.16 ลักษณะการเข้าเกาะของสังกะสีที่ขั้วแคโทด เมื่อทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ใน สารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

ส่วนกรณีรูปแบบการต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย การที่อัตราการลดลงของปริมาณสังกะสีมากขึ้นเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ให้มีค่าสูงขึ้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ การลดลงของปริมาณสังกะสีเกิดขึ้นจากสองปฏิกิริยา ได้แก่ 1) ปฏิกิริยารีดักชันของ Zn^{2+} เกิดเป็นโลหะสังกะสีบนขั้วไฟฟ้าแคโทดในปฏิกิริยาที่ (3) และ 2) ปฏิกิริยารีดักชันของ H_2O เกิด OH^- และ $H_{2(g)}$ ในปฏิกิริยาที่ (4) ทำให้สารละลายมีสภาวะเป็นเบสและเกิดตะกอนสีขาวของ $Zn(OH)_2$ ดังปฏิกิริยาที่ (5) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเกิดขึ้นพร้อม ๆ กัน ส่วนฝั่งของขั้วแอโนด Cl^- สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นได้ง่ายที่สุด และเมื่อพิจารณาในรูปที่ 4.15 พบว่า ค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยนาทีที่ 5 ค่าพีเอชอยู่ที่ 6.76 และเพิ่มขึ้นเป็น 11.85 เมื่อถึงนาทีที่ 13 ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็ว สอดคล้องกับการลดลงของปริมาณสังกะสีที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น เนื่องมาจาก Zn ส่วนหนึ่ง เกิดไปตกตะกอนในรูป $Zn(OH)_2$ และมีบางส่วนเกิดเป็น Zn(s) และด้วยปฏิกิริยาทั้งสองเกิดไปพร้อม ๆ กัน จึงส่งผลให้การกำจัด Zn จากสารละลายเกิดได้เร็ว ทำให้ใช้เวลาในการทดลองไม่นานเมื่อเทียบกับผลการทดลองเมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย โดยลักษณะของสังกะสีที่เกาะที่ขั้วแคโทด และตะกอน $Zn(OH)_2$ แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ตามลำดับ

รูปที่ 4.17 ลักษณะขั้วแคโทดก่อน (ซ้าย) และหลัง (ขวา) เมื่อทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย



รูปที่ 4.18 ลักษณะของสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ก่อนทดลอง (ซ้าย) และตะกอนสีขาวที่เกิดขึ้น (ขวา) เมื่อทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายที่ 7 โวลต์ มีอัตราการลดลงของสังกะสีช้ากว่าเมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ 7 โวลต์ ซึ่งได้ทำการหาน้ำหนักของสังกะสีที่เกิดขึ้น โดยวิธีการชั่งน้ำหนักขั้วแคโทด

ก่อน และหลังการทดลอง เพื่อหาน้ำหนักของสังกะสี ($Zn^{(0)}$) พบว่าในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ณ นาทีที่ 150 พบโลหะสังกะสี 0.0993 กรัม และสำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ณ นาทีที่ 30 พบโลหะสังกะสี 0.0299 กรัม รวมกับน้ำหนักตะกอน $Zn(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นอีก 0.1648 กรัม (คิดเป็นน้ำหนัก Zn^{2+} 0.1084 กรัม ในตะกอน $Zn(OH)_2$) โดยได้แสดงผลไว้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 รูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่

หัวข้อ	**แบบมีรอยต่อของสารละลาย**	**แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย**
1. ความเข้มข้น Zn^{2+} เริ่มต้น	876.63 mg/L (0.1490 g ในเซลเคมีไฟฟ้า)	876.63 mg/L (0.1490 g ในเซลเคมีไฟฟ้า)
2. ค่าพีเอชเริ่มต้น	1.76	1.73
3. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	แกรไฟต์	
4. ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	7	7
5. ความเข้มข้น NaCl	2 M	
6. ร้อยละการกำจัด Zn^{2+}	98.05	66.72
7. น้ำหนัก Zn^{2+} ในรูปตะกอน $Zn(OH)_2$ (g)	0.1084	-
8. น้ำหนัก $Zn^{(0)}$ (g)	0.0299	0.0993
9. ร้อยละการนำกลับ $Zn^{(0)}$	20.06	66.63
10. ประสิทธิภาพการนำกลับ $Zn^{(0)}$	3.32%	1.58%
11.เวลาที่ใช้ในการนำกลับ $Zn^{(0)}$	30 นาที	150 นาที

*ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

จากผลสรุปเปรียบเทียบที่แสดงดังตารางที่ 4.6 พบว่า รูปแบบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยใช้สะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลองนี้จึงมีความเหมาะสมในการกำจัดสังกะสีเนื่องจากมีร้อยละการกำจัดสังกะสีในสารละลายเข้าใกล้ 100% ในระยะเวลาที่รวดเร็ว แต่มีร้อยละการนำกลับสังกะสีเพียง

20.06% เมื่อเทียบกับการจัดรูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ไม่มีรอยต่อของสารละลาย จึงเห็นได้ว่าการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อมีความเหมาะสมในการนำกลับสังกะสีมากกว่า เนื่องจากมีร้อยละการนำกลับสังกะสีที่สูงกว่าอยู่ที่ 66.63% และคิดเป็นร้อยละการกำจัดสังกะสีในสารละลาย 66.72% ในเวลาการกำจัด 150 นาที โดยแสดงสมดุลมวลทั้งหมดไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 สมดุลมวลของสังกะสีกับรูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้า (แบบมีรอยต่อของสารละลายเปรียบเทียบกับแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย) ต่อประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์

แบบมีรอยต่อของสารละลาย					**แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย**			
เข้า	ออก				เข้า	ออก		
Zn^{2+}	Zn^{2+}	$Zn(OH)_2$	$Zn^{(0)}$	รวม	Zn^{2+}	Zn^{2+}	$Zn^{(0)}$	รวม
876.63 mg/L(0.17L)	17.13 mg/L(0.17L)	0.1648 g	0.0299 g		876.63 mg/L(0.17L)	291.73 g	0.0993 g	
Zn	Zn	Zn	Zn		Zn	Zn	Zn	
0.1490 g	0.0029 g	0.1084 g	0.0299 g	0.1412 g	0.1490 g	0.0496 g	0.0993 g	0.1489 g
0.002279 mole	0.000045 mole	0.0017 mole	0.00046 mole	0.002159 mole	0.002279 mole	0.00076 mole	0.001518 mole	0.002276 mole
ร้อยละของสังกะสีขาออก				94.74	ร้อยละของสังกะสีขาออก			99.88

สรุปสภาวะที่ดีที่สุดในการนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพี-เอช 1 โดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ที่ 7 โวลต์ พบว่า การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายมีความสามารถในการนำสังกะสีกลับคืนที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสังกะสีที่นำกลับได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของตะกอน $Zn(OH)_2$ แต่สามารถกำจัดสังกะสีโดยใช้เวลาในการกำจัดที่เร็วกว่าเพียง 13 นาที และมีค่าประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสีที่เวลา 30 นาทีอยู่ที่ 3.32% เมื่อเทียบกับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ซึ่งสามารถนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายได้ราว 70% ณ เวลา 150 นาที คิดเป็นค่าประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี 1.58% เมื่อค่าประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสีเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสังกะสีที่สามารถนำกลับได้กับเวลาและกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ดังนั้นการที่มีค่า

ประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสีสูง ย่อมหมายถึงสามารถนำกลับสังกะสีได้ปริมาณมาก หรืออีกนัยหนึ่งคือใช้เวลาในการนำกลับที่น้อยกว่าได้เช่นเดียวกัน คาดว่าการที่สามารถนำกลับสังกะสีให้ได้ทั้งหมดสำหรับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อต้องเพิ่มระยะเวลาของการทดลองให้ยาวนานยิ่งขึ้น จึงจะสามารถนำกลับสังกะสีได้ทั้งหมด

4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการกำจัด

จากผลการทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดในการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ทำการศึกษาหาค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้ คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของตัวสกัดและที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด (โซเดียมคลอไรด์) และคำนวณค่าไฟฟ้าที่ต้องใช้ จากนั้นทำการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายสกัดจากกากตะกอนของเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ข) โดยราคาที่คำนวณได้จะคิดเฉพาะค่าใช้จ่ายในการนำกลับสังกะสีซึ่งไม่รวมค่าอุปกรณ์

4.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

ในการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนที่ค่าพีเอชเป็น 1 ด้วยกรดซัลฟิวริก ค่าสารเคมีมีค่า 430 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสารเคมีที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2 โมลาร์ มีค่า 1,392 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และค่าสะพานเกลือ 80 บาท คิดเป็นค่าใช้จ่ายสารเคมีรวมทั้งสิ้น 1,902 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

4.3.2 ค่าใช้จ่ายด้านเคมีไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายในการนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายสกัดจากกากตะกอนของเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ จะคำนวณค่าไฟฟ้าโดยไม่ได้คำนวณถึงต้นทุนที่ใช้ทั้งหมดในการบำบัด เพราะการทดลองนี้เป็นการทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าใช้จ่ายที่ใช้เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้าเมื่อควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์สำหรับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายคิดเป็น 76 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในเวลาการกำจัด 30

นาที และ 530 บาทต่อลูกบาศก์เมตรใน เวลาการกำจัด 150 นาทีสำหรับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

ตารางที่ 4.8 สรุปค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการนำกลับสังกะสีในสารละลายสกัดจากกากตะกอนของเสียโรงงานผลิตเส้นใยด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าเมื่อควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์

ค่าใช้จ่าย	แบบมีรอยต่อของสารละลาย	แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย
1.ค่ากรดซัลฟิวริก	430.00 บาท/m^3	430.00 บาท/m^3
2.ค่าโซเดียมคลอไรด์**	1,392.00 บาท/m^3	1,392.00 บาท/m^3
3.ค่าสะพานเกลือ	80.00 บาท/m^3	-
รวมค่าสารเคมี	**1,902.00 บาท/m^3**	**1,822.00 บาท/m^3**
4.ค่าไฟฟ้า	75.98 บาท/m^3	529.98 บาท/m^3
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	**1,977.98 บาท/m^3**	**2,351.98 บาท/m^3**

*** งานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษา*

1) ค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม ซึ่งจริงๆ แล้วอาจใช้ NaCl น้อยกว่านี้ได้

2) จำนวนครั้งที่สามารถใช้สารละลาย NaCl ซ้ำได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่

1. การละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัด ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 892.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (คิดเป็น 44,730 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ได้สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง ได้แก่ กรดซัลฟิวริกที่ค่าพีเอช 1 สามารถละลายสังกะสีออกมาได้ดีที่สุด โดยความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัดอยู่ที่ 873.40 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการสกัด 97.91%

2. การนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 876.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 1.73 และควบคุมที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 7 โวลต์ พบว่า สามารถกำจัดสังกะสี ณ นาทีที่ 150 ได้ลดลงเหลือ 298.50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 66.72 % และสามารถนำกลับสังกะสีได้ 0.0993 กรัม คิดเป็นร้อยละการนำกลับ 66.63%

3. การนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัดด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 876.63 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 1.76 และควบคุมที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 7 โวลต์ พบว่า สามารถกำจัด ณ นาทีที่ 18 ได้ลดลงเหลือ 1.02 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.88% และนาทีที่ 30 สังกะสีในสารละลายลดลงเหลือ17.13 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 98.05% รวมถึงพบโลหะสังกะสี 0.0299 กรัม รวมกับน้ำหนักตะกอน $Zn(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นอีก 0.1648 กรัม คิดเป็นน้ำหนัก Zn^{2+} ในรูปตะกอน $Zn(OH)_2$ 0.1084 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละการนำกลับโลหะสังกะสี 20.06%

4. รูปแบบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายให้ประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีที่สูงกว่าการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

5. พลังงานที่ใช้ในการทดลองการนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายสกัดจากกากตะกอนของเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายคือ 212 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 530 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากรดซัลฟิวริกสำหรับการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนประมาณ 430 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และค่าโซเดียมคลอไรด์สำหรับเป็นอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดประมาณ 1,392 บาทต่อลูกบาศก์เมตร รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 2,352 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายคือ 30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และค่าไฟฟ้า 76 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่ากรดซัลฟิวริกสำหรับการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนประมาณ 430 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ค่าสะพานเกลือ 80 บาทและค่าโซเดียมคลอไรด์สำหรับเป็นอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดประมาณ 1,392 บาทต่อลูกบาศก์เมตร รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 1,978 บาทต่อลูกบาศก์เมตรโดยค่าใช้จ่ายที่คิดไม่รวมค่าเครื่องมือ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลของไอออนซัลเฟต และไอออนอื่นๆ ที่มีความสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสังกะสีส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการนำกลับสังกะสีด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าลดลง

2. เสนอให้ศึกษาการนำสังกะสีกลับคืนด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า โดยการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าแบบปรับใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ช่วงต่ำ แต่เพิ่มระยะเวลาให้ยาวนานขึ้น

3. เสนอให้ศึกษาการนำสังกะสีกลับคืนด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าด้วยไฟฟ้า โดยการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า

4. เสนอให้ศึกษาผลของความเร็วในการกวนสารละลายต่อการเข้าเกาะของสังกะสีที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด

5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

การขยายสเกล (Scale up) สิ่งที่ควรต้องทราบ ก็คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดสารละลาย (Current density) และพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell volume ratio) โดยจะใช้ค่า Current density ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม และใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายให้มีค่าเท่ากัน (Cameselle และคณะ, 2005)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มิตนราการพิมพ์.

คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ. 2545. การแยกสังกะสีจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีชนิดไซยาไนด์ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

บดีพล รุ่งเรืองธรรม. 2543. จลนพลศาสตร์ของการละลายแมงกานีสจากไพโรลูไซต์ด้วยเฟอร์รัสคลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2552. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต, ภาควิขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2551. โครงการสร้างความเข้มแข็งในการเฝ้าระวังเพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษจากโรงงานในพื้นที่ที่มีความเปราะบางด้านสิ่งแวดล้อม. อ่างทอง. หน้า 82-120.

ลาวัลย์ ศรีพงศ์. 2543. การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.

วรวิทย์ วงศ์นิรามัยกุล. 2544. การละลายของสังกะสีออกจากตะกอนน้ำเสียอิเล็กทรอนิกส์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศิวัช ตั้งประเสริฐ. 2550. การนำโลหะเชิงพาณิชย์กลับคืนจากของเสียของโรงงานถลุงสังกะสี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีอนินทรีย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศุภศันส์ สกุลตั้ง. 2548. การนำโลหะกลับคืนจากแบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่โดยการชะละลายและการตกตะกอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สหรัฐ เชาว์รูปดี. 2552. การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอนโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

หทัยทัต ซื้อสุวรรณ. 2544. การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2539. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Ahmed, B. C., Bhadrinarayana, N. S., Anantharaman N., and Begum, K. M. 2008. Heavy metal removal fromcopper smelting affluent using electrochemical cylindrical flow reactor. Journal of Hazardous Materials 152 :71 – 78.

Babel, S., and Dacera, D. M. 2006. Heavy metal removal from contaminated sludge for land application : A review. Waste Management 26: 988-1004.

Benjamin, M. M. 2002. Water chemistry Singapore: McGraw Hill Book.

Cameselle, C., Pazos, M., and Sanroman, M. A. 2005. Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimization and scale-up. Chemosphere 60: 1080-1086.

Carlos, I. A., Bidoia, E. D., Pallone, E. M. J. A., Almeida, M. R. H., and Souza, C. A. C. 2002. Effect of tartrate content on aging and deposition condition of copper-tin electrodeposits from a non-cyanide acid bath. Surface and Coatings Technology 157: 14-18.

Emamjomeh, M. M., and Sivakumar, M. 2008. Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. Journal of environmental management 90: 1204-1212.

Feltz, R. E., and Logan, T. J. 1985. Residual Calcium Forms in Acid – Extracted Anaerobically Digested Sewage Sludge. J. Environ. Qual 14: 483 – 488.

Fourcade, F., and Tzedakis, T. 2000. Study of the mechanism of the electrochemical deposition of silver from an aqueous silver iodide suspension. Journal of Electroanalytical Chemistry 493: 20-27.

Freeman, H. M. 1989. Handbook of hazardous waste treatment and disposal. USA: McGraw Hill Book.

Friedrich, H. 1962. Ion Exchange. New York: MaGraw-Hill.

Garcia-Gabaldon, M., Perez-Herranz, V., Garcia-Anton, J., and Guinon, J. L. 2005. Electrochemical recovery of tin and palladium from the activating solutions of the electroless plating of polymers Potentiostatic operation. Separation and Purification Technology 45: 183-191.

Havlik T., Turzakova M., Stopicand S., and Friedrich, B. 2005. Atmospheric leaching of EAF dust with Diluted sulphuric acid. Hydrometallurgy 77: 41 – 50.

Manahan, J. 1993. Ion Exchange. Ann Arbor Science Publishers Department of Environmental Engineering Illinois institute of technology. Chicago: 122.

Pascaline, G., Nathalie, L., Francois, L., and Clotilde, B. 2008. Electroleaching and electrodeposition of zine ina single – cell process for the treatment of solid waste. Journal of Hazardous Materials 152: 85 – 92.

Ried, M. 1988. Heavy Metal Removal from Sewage Sludge: Practical Experiences with Acid treatment. Pretreatment in Chemical Water and Wastewater Treatment : 327 – 334.

Scott, K., Chen, X., Atkinson, J. W., Todd, M., and Armstrong, R. D. 1997. Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit boards. Conservation and Recycling 20: 43-55.

Sreekrishnan, T. R., and Tyagi, R. D. 1944. Heavy Metal Leaching from Sewage Sludges: A Techno – economic Ebaluation If the Process Options. Environmental Technology 15: 531 – 543.

Wong, L., and Henry, J. G. 1991. Biological Removal and Chemical Recovery of Metals from Sludges. Biological Degradable Wastes: 309 – 322.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ (HCl และ H_2SO_4)

Extracting agent	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Blank	6.40	12.37	3.09	2.57	1.04	2.23	1.07	0.25
HCl	1.00	2.10	800.80	722.40	719.60	747.60	46.09	83.81
	2.00	12.10	4.53	4.66	4.96	4.72	0.22	0.53
	3.00	12.15	4.14	5.20	5.07	4.80	0.58	0.54
	4.00	12.21	4.83	5.33	5.19	5.12	0.26	0.57
H_2SO_4	1.00	1.63	875.90	869.60	874.70	873.40	3.35	97.91
	2.00	11.92	3.57	3.89	4.04	3.83	0.24	0.43
	3.00	12.04	3.80	3.99	4.32	4.04	0.26	0.45
	4.00	12.20	3.81	4.78	4.93	4.51	0.61	0.51

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ (Citric และ EDTA)

Extracting agent	pH **เริ่มต้น**	pH **สุดท้าย**	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
			ครั้งที่ 1	**ครั้งที่** 2	**ครั้งที่** 3	**เฉลี่ย**		
Blank	6.40	12.37	3.09	2.57	1.04	2.23	1.07	0.25
Citric	1.00	1.88	800.80	846.30	788.20	811.77	30.56	91.00
	2.00	3.82	683.20	694.85	685.20	687.75	6.23	77.10
	3.00	11.83	1.81	3.46	2.58	2.62	0.82	0.29
	4.00	12.13	3.68	3.06	3.98	3.57	0.47	0.40
EDTA	4.00	3.82	906.60	843.60	861.00	870.40	32.53	97.57
	7.00	12.09	3.53	3.19	3.28	3.33	0.18	0.37
	10.00	12.13	3.67	4.02	3.25	3.65	0.39	0.41

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการละลายสังกะสีออกจากกากตะกอนด้วยตัวสกัดชนิดต่าง ๆ ในสภาวะที่สามารถละลายสังกะสีออกมาจากกากตะกอนได้มากที่สุด

Extracting agent	pH เริ่มต้น	pH สุดท้าย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
Blank	6.40	12.37	3.09	2.57	1.04	2.23	1.07	0.25
HCl	1.00	2.10	800.80	722.40	719.60	747.60	46.09	83.81
H_2SO_4	1.00	1.63	875.90	869.60	874.70	873.40	3.35	97.91
Citric	1.00	1.88	800.80	846.30	788.20	811.77	30.56	91.00
EDTA	4.00	3.82	906.60	843.60	861.00	870.40	32.53	97.57

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 3 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อไม่ต่อขั้วอ้างอิง

เวลา (นาที)	I (Amp)	pH	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	0.41	1.55	838.85	838.85	838.85	838.85	0.00	0.00
5	0.39	1.57	781.53	775.16	768.79	775.16	6.37	7.59
10	0.36	1.61	768.79	762.42	768.79	766.67	3.68	8.61
15	0.33	1.66	762.42	756.05	762.42	760.30	3.68	9.36
30	0.27	1.91	743.31	736.94	749.68	743.31	6.37	11.39
60	0.19	3.22	517.29	521.84	517.29	518.80	2.63	38.15
75	0.17	6.07	414.10	408.64	411.37	411.37	2.73	50.96
90	0.13	6.67	68.88	71.61	70.70	70.40	1.39	91.61
105	0.11	7.14	38.85	41.58	41.58	40.67	1.58	95.15
120	0.06	10.32	3.43	3.79	3.43	3.55	0.21	99.58
150	0.05	11.88	2.34	2.52	2.43	2.43	0.09	99.71

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อไม่ต่อขั้วอ้างอิง

เวลา (นาที)	I (Amp)	pH	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.44	1.73	838.85	838.85	838.85	838.85	0.00	0.00
5	1.20	1.94	807.01	819.75	813.38	813.38	6.37	3.04
10	1.06	2.65	758.42	762.97	749.32	756.90	6.95	9.77
13	0.94	3.84	#N/A	685.62	703.82	694.72	12.87	17.18
15	0.90	5.71	535.49	549.14	540.04	541.55	6.95	35.44
18	0.86	7.61	#N/A	458.14	449.04	453.59	6.43	45.93
20	0.87	8.79	18.29	15.56	21.02	18.29	2.73	97.82
23	0.77	10.86	#N/A	0.52	0.43	0.47	0.06	99.94
25	0.72	12.09	2.98	3.07	3.25	3.10	0.14	99.63
30	0.66	12.43	8.80	8.98	8.71	8.83	0.14	98.95

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย เมื่อต่อขั้วอ้างอิง

เวลา (นาที)	I (Amp)	pH	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.93	1.73	838.85	838.85	838.85	838.85	0.00	0.00
5	1.78	2.23	760.20	788.20	751.10	766.50	19.34	8.63
10	1.47	5.67	687.50	452.50	682.00	607.33	134.12	27.60
13	1.38	8.85	337.00	26.20	338.50	233.90	179.88	72.12
15	1.31	9.76	155.00	3.91	157.50	105.47	87.96	87.43
18	1.23	11.15	0.80	9.25	0.78	3.61	4.88	99.57
20	1.20	12.03	3.90	15.55	6.74	8.73	6.07	98.96
23	1.18	12.30	7.69	21.30	5.29	11.43	8.63	98.64
25	1.10	12.40	10.49	23.80	10.05	14.78	7.81	98.24
30	0.99	12.59	13.57	27.60	15.15	18.77	7.68	97.76

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย เมื่อต่อขั้วอ้างอิง

เวลา (นาที)	I (Amp)	pH	Zn^{2+} concentration (mg/L)				SD	Zn^{2+} (mol/L)	Zn^{2+} in cell (g)	Zn^{2+} in cell (mol)	%REMOVAL	Zn^{0} (g)	Zn^{0} (mol)	%RECOVERY	ประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี(%)
			ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย									
0	3.73	1.76	886.9	877.8	865.2	876.63	10.90	0.01340	0.1490	0.002278	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
3	3.67	1.84	817.6	809.2	800.1	808.97	8.75	0.01237	0.1375	0.002103	7.72	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
5	3.47	2.08	492.8	503.3	511.7	502.60	9.47	0.00768	0.0854	0.001306	42.67	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
8	3.23	5.69	322.5	341.5	297	320.33	22.33	0.00490	0.0545	0.000833	63.46	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
10	3.17	6.82	7.05	5.39	6.84	6.43	0.90	0.00010	0.0011	0.000017	99.27	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
13	2.51	9.78	0.43	0.38	0.56	0.46	0.09	0.00001	0.0001	0.000001	99.95	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
15	1.07	10.49	6.45	4.67	5.03	5.38	0.94	0.00008	0.0009	0.000014	99.33	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
20	0.85	11.59	7.13	8.05	7.51	7.56	0.46	0.00012	0.0013	0.000020	98.50	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
25	0.71	11.68	18.76	16.43	14.92	16.70	1.93	0.00026	0.0028	0.000043	94.79	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
30	0.64	12.06	23.5	20.59	25.58	23.22	2.51	0.00036	0.0039	0.000060	97.35	0.0411	0.000628	27.58	3.43

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง

เวลา (นาที)	I (Amp)	pH	Zn2+ concentration (mg/L) ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	Zn2+(mol/L)	Zn2+ in cell (g)	Zn2+ in cell (mol)	%REMOVAL	Zn0(g)	Zn0(mol)	%RECOVERY	ประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี(%)
0	2.28	1.728	886.9	877.8	865.2	876.63	10.90	0.01340	0.1490	0.002278	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
30	2.26	2.497	811.3	746.9	775.6	777.93	32.26	0.01189	0.1322	0.002022	11.26	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	2.09	6.666	576.1	667.1	485.8	576.33	90.65	0.00881	0.0980	0.001498	34.26	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
90	2.08	7.047	344.5	382	293.5	340.00	44.42	0.00520	0.0578	0.000884	61.22	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	1.88	7.237	314.8	306.9	354.6	325.43	25.57	0.00498	0.0553	0.000846	62.88	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
150	1.70	7.291	298.5	286.1	290.6	291.73	6.28	0.00446	0.0496	0.000758	66.72	0.0993	0.001518	66.63	1.58

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง

เวลา (นาที)	I (Amp)	pH	Zn2+ concentration (mg/L) ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	Zn2+(mol/L)	Zn2+ in cell (g)	Zn2+ in cell (mol)	%REMOVAL	Zn0(g)	Zn0(mol)	%RECOVERY	ประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี(%)
0	2.28	1.728	886.9	877.8	865.2	876.63	10.90	0.01340	0.1490	0.002278	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
30	2.26	2.497	811.3	746.9	775.6	777.93	32.26	0.01189	0.1322	0.002022	11.26	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	2.09	6.666	576.1	667.1	485.8	576.33	90.65	0.00881	0.0980	0.001498	34.26	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
90	2.08	7.047	344.5	382	293.5	340.00	44.42	0.00520	0.0578	0.000884	61.22	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	1.88	7.237	314.8	306.9	354.6	325.43	25.57	0.00498	0.0553	0.000846	62.88	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
150	1.70	7.291	298.5	286.1	290.6	291.73	6.28	0.00446	0.0496	0.000758	66.72	0.0993	0.001518	66.63	1.58

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง

เวลา	I	pH	Zn2+ concentration (mg/L)	SD	Zn2+(mol/L)	Zn2+ in	Zn2+ in	%REMOVAL	Zn0(g)	Zn0(mol)	%RECOVERY	ประสิทธิภาพการ

(นาที)	(Amp)		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			cell (g)	cell (mol)					นำกลับสังกะสี(%)
0	2.28	1.728	886.9	877.8	865.2	876.63	10.90	0.01340	0.1490	0.002278	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
30	2.26	2.497	811.3	746.9	775.6	777.93	32.26	0.01189	0.1322	0.002022	11.26	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	2.09	6.666	576.1	667.1	485.8	576.33	90.65	0.00881	0.0980	0.001498	34.26	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
90	2.08	7.047	344.5	382	293.5	340.00	44.42	0.00520	0.0578	0.000884	61.22	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	1.88	7.237	314.8	306.9	354.6	325.43	25.57	0.00498	0.0553	0.000846	62.88	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
150	1.70	7.291	298.5	286.1	290.6	291.73	6.28	0.00446	0.0496	0.000758	66.72	0.0993	0.001518	66.63	1.58

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 10 โวลต์เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายเมื่อต่อขั้วอ้างอิง

เวลา (นาที)	I (Amp)	pH	Zn2+ concentration (mg/L) ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	Zn2+(mol/L)	Zn2+ in cell (g)	Zn2+ in cell (mol)	%REMOVAL	Zn0(g)	Zn0(mol)	%RECOVERY	ประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี(%)
0	2.28	1.728	886.9	877.8	865.2	876.63	10.90	0.01340	0.1490	0.002278	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
30	2.26	2.497	811.3	746.9	775.6	777.93	32.26	0.01189	0.1322	0.002022	11.26	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	2.09	6.666	576.1	667.1	485.8	576.33	90.65	0.00881	0.0980	0.001498	34.26	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
90	2.08	7.047	344.5	382	293.5	340.00	44.42	0.00520	0.0578	0.000884	61.22	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	1.88	7.237	314.8	306.9	354.6	325.43	25.57	0.00498	0.0553	0.000846	62.88	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
150	1.70	7.291	298.5	286.1	290.6	291.73	6.28	0.00446	0.0496	0.000758	66.72	0.0993	0.001518	66.63	1.58

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.12 ผลเปรียบเทียบรูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการนำสังกะสีกลับคืนจากสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้า

เวลา (นาที)	**แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย**				**แบบมีรอยต่อของสารละลาย**			
	Zn^{2+} concentration **(mg/L)**	%REMOVAL	pH	ประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี(%)	Zn^{2+} concentration **(mg/L)**	%REMOVAL	**pH**	ประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี(%)

0	876.63	0	1.728	0	876.63	0	1.76	0
5	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	803.13	8.38	2.35	#N/A
10	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	638.63	27.15	6.76	#N/A
13	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	275.83	68.53	9.59	#N/A
15	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	144.13	83.56	10.16	#N/A
18	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	1.02	99.88	11.85	#N/A
20	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	8.32	98.96	12.07	#N/A
23	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	10.11	98.42	12.32	#N/A
25	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	15.94	94.22	12.49	#N/A
30	777.93	11.26	2.497	#N/A	17.13	98.05	12.82	3.32
60	576.33	34.26	6.666	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
90	340.00	61.22	7.047	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	325.43	62.88	7.237	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
150	291.73	66.72	7.291	1.58	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.13 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนของเสียจากถังตกตะกอนสังกะสีทางเคมี (Zinc Clarifier) จากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	**ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)**									
ชนิดของโลหะ	A_2IO_3	SiO_2	CaO	MgO	SO_3	K_2O	P_2O_5	Cl	Fe_2O_3	ZnO
(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.21	0.95	47.78	1.33	0.95	0.02	0.03	0.05	0.26	6.18

ที่มา : ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะ โดยใช้เครื่อง XRF

ตารางที่ ก.14 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนเมื่อทำการสกัดด้วย H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	**ตรวจพบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)**					
ชนิดของโลหะ	A_2IO_3	SiO_2	CaS	SO_3	Fe_2O_3	ZnO
(ร้อยละโดยน้ำหนัก)	0.08	0.51	98.92	0.01	0.07	0.39

ที่มา : ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะ โดยใช้เครื่อง XRF

ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ

ข.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการนำกลับสังกะสี

การนำกลับสังกะสีด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า มีค่าใช้อยู่หลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า เป็นต้น แต่ไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดนั้นได้ โดยเฉพาะค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า เครื่องกวน เป็นต้น ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลอง ถ้าหากจะนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงแล้วนั้น ต้องมีการปรับปรุงขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

ข.1.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่าไฟฟ้า

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสกัดและที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด ได้แก่ กรดซัลฟิวริกและโซเดียมคลอไรด์ โดยที่กรดซัลฟิวริกราคา 8 บาทต่อกิโลกรัม และโซเดียมคลอไรด์ 12 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

1. ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

สารละลายสกัดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ปรับให้มีค่าพีเอชเป็น 1 ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 98 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 55.55 มิลลิลิตร คิดเป็น 0.43 บาท ดังนั้นจึงเสียค่ากรดซัลฟิวริก 430 บาทต่อน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

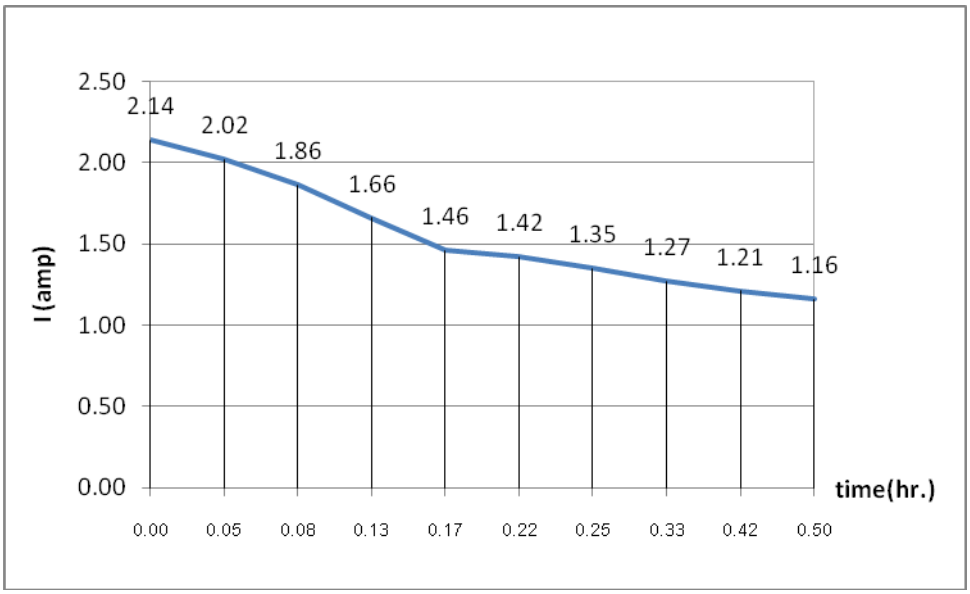
และต่อการนำกลับสังกะสีจากสารละลายสกัด 1 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งต้องใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 1,000 ลิตร คิดเป็นน้ำหนักโซเดียมคลอไรด์ที่ต้องชั่ง 116 กิโลกรัมราคา 1,392 บาท

2. ค่าใช้จ่ายในการทดลองทางไฟฟ้าเคมี

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าเคมี จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ โดยราคาค่าไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

กำลังไฟฟ้า = I (A) x V (volt) x t (hr) / V (m^3)

โดยผลคูณของ I (A) x t (hr) หาจากพื้นที่ใต้กราฟระหว่าง I กับ t ในช่วงเวลาต่าง ๆ



กำลังไฟฟ้า = $\frac{\text{พื้นที่ใต้กราฟระหว่าง I(ampere) กับ t(hour) x V (volt)}}{\text{V } (m^3)}$

= $\frac{0.7381 \text{ (ampere. hour) x 7 volt}}{(170 \times 10^{-6} \text{ } m^3)}$

= 30,392 วัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

= 30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการบำบัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อยูนิต ดังนี้

ค่าไฟฟ้า = พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ x (ราคา/หน่วย)

= 30.39 x 2.5 บาท

= 75.98 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ดังนั้นวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีค่าใช้จ่าย 76 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ข.2 วิธีคำนวณผลการทดลอง

ข.2.1 ร้อยละการกำจัด

$$\% \text{ Removal} = \frac{(W_i - W_t) \times 100\%}{W_i}$$

W_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

W_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

ข.2.2 ร้อยละการนำกลับ

$$\% \text{ Recovery} = \frac{W_t \times 100\%}{W_i}$$

W_i = น้ำหนักสังกะสีในสารละลายสกัดเริ่มต้น (กรัม)

W_t = น้ำหนักสังกะสี ณ เวลาใดๆ (กรัม)

ข.2.3 ค่าประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี

$$\text{Zn Recovery Efficiency (t) \%} = \frac{nFN \times 100\%}{\int_0^t I(t)dt}$$

โดย n = ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์/eq)

N = โมลของสังกะสี ($Zn^{(0)}$)ที่นำกลับได้ (โมล)

$I_{(t)}$ = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ข.2.4 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ ตามการทดลองการกำจัดสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 เมื่อทำการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 7 โวลต์ในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อเมื่อต่อขั้วอ้างอิง

ในที่นี้ จะนำความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายสกัด H_2SO_4 ที่ค่าพีเอช 1 ในเวลา 30 นาที มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่าร้อยละการกำจัด ค่าร้อยละการนำกลับ และค่าประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี

ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีในสารละลายสกัด 876.63 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของสังกะสี 17.13 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{\% Removal} = \frac{(W_i - W_t) \times 100\%}{W_i}$$

แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{(876.63 - 17.13) \times 100\%}{876.63}$$

$$= 98.04\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ร้อยละการกำจัดสังกะสี คือ 98.04%

ตัวอย่างการคำนวณค่าร้อยละการนำกลับสังกะสี

น้ำหนักสังกะสีในสารละลายสกัดเริ่มต้น 0.1490 กรัม
น้ำหนักสังกะสี ณ นาทีที่ 30 0.0299 กรัม

$$\% \text{ Recovery} = \frac{W_t \times 100\%}{W_i}$$

แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{(0.0299) \times 100\%}{0.1490}$$

$$= 20.07\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ร้อยละการนำกลับสังกะสี คือ 20.07%

ตัวอย่างการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี

$$\text{Zn Recovery Efficiency } \% = \frac{nFN \times 100\%}{\int_0^t I(t)dt^*}$$

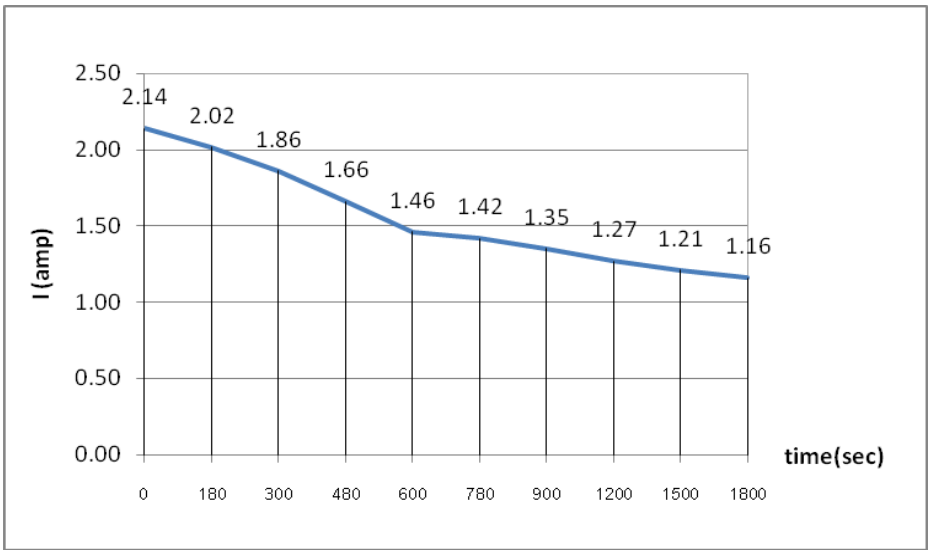
แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{2 \times 96500 \times [(0.0299\text{โมล})/ (65.4\text{กรัม/โมล})] \times 100\%}{2657}$$

$$= 3.32\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ค่าประสิทธิภาพการนำกลับสังกะสี คือ 3.32%

***หมายเหตุ** $\int_0^t I(t)dt$ ได้มาจากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟระหว่างกระแส กับเวลา



พื้นที่ใต้กราฟระหว่าง I(ampere) กับ t(sec)

= (0.5 x (2.14 +2.02) x180 s) + (0.5 x (2.02 +1.86) x120 s) + (0.5 x (1.86+1.66) x180 s)
+ (0.5 x (1.66 +1.46) x120 s) + (0.5 x (1.46+1.42) x180 s) + (0.5 x (1.42 +1.35) x120 s)
+ (0.5 x (1.35+1.27) x300 s) + (0.5 x (1.27 +1.21) x300 s) + (0.5 x (1.21 +1.16) x300 s)

= 374+233+317+187+299+166+393+372+356

= 2657 Amp.s

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิมลพร โตโภชนพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 3 เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดชัยนาท สำเร็จการศึกษา จากโรงเรียนตาคลีประชาสรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ เมื่อปีการศึกษา 2538 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต จากสาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551