

การเพิ่มประสิทธิภาพกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียอุตสาหกรรม
โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง



นายพิชิต ลีกุล

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ENHANCEMENT OF ZINC REMOVAL EFFICIENCY FROM INDUSTRIAL WASTEWATER
USING ELECTROCHEMICAL PRECIPITATION PROCESS WITH CONTINUOUS
CONTROLLED CURRENT



Mr. Pichit Leekoon

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสิ่งจากน้ำเสีย
อุตสาหกรรมโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วย
วิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง

โดย

นายพิชิต ลีกุล

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

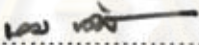
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรรัฐ ใสสถาพันธุ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนริยวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต รัตนธรรมสกุล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรรัฐ ใสสถาพันธุ์)


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


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒน์นิกะ)

พินิจ ลีกุล : การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง (ENHANCEMENT OF ZINC REMOVAL EFFICIENCY FROM INDUSTRIAL WASTEWATER USING ELECTROCHEMICAL PRECIPITATION PROCESSES WITH CONTINUOUS CONTROLLED CURRENT) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. เขมรรัฐ ไอสถาพันธุ์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร. เจริญขวัญ ไกรยา, 103 หน้า

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใยเรยอนเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสังกะสีในปริมาณสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองปรับปรุงวิธีการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใยเรยอนมีปริมาณสังกะสีปนเปื้อน 155 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เอช 1.7 และค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร การทดลองเริ่มต้นจากการศึกษา รูปแบบดังปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับงานทางด้านไฟฟ้าเคมี ผ่านปฏิกิริยารีดักชันของ KMnO_4 และการทดสอบหาวัสดุที่ดีที่สุดที่สามารถใช้เป็นสะพานเกลือได้ทั้งดังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อและไม่มีรอยต่อ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าดังปฏิกิริยาที่มีแผ่นแก้วพูนทำหน้าที่เป็นเหมือนสะพานเกลือ ให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดและได้นำไปใช้สำหรับการทดลองการกำจัดสังกะสีในขั้นต่อไป เหล็ก อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม ถูกนำมาทดสอบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยตรวจวัดความเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช และความเข้มข้นของสังกะสีตลอดระยะเวลาการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมความหนาแน่นกระแส คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้ถึง 98% ภายในเวลา 30 นาที ณ ค่าความหนาแน่นกระแส 37.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร รูปแบบใหม่ของการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าตามเวลาได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ โดยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบใหม่นี้ สามารถลดระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงลงได้มาก พร้อมๆกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัด จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงได้ถึง 98% ภายในเวลา 50 นาที โดยคิดเป็น 100% ประสิทธิภาพเชิงกระแส

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนิสิต..... ^๑ ^๑ _{๑๕๖๓} ลีกุล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

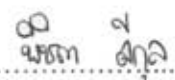

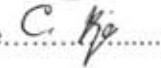
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270414221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ZINC / ELECTROCHEMICAL PROCESSES / CONTROLLED CURRENT / WASTEWATER

PICHIT LEEKOON : ENHANCEMENT OF ZINC REMOVAL EFFICIENCY FROM INDUSTRIAL WASTEWATER USING ELECTROCHEMICAL PRECIPITATION PROCESSES WITH CONTINUOUS CONTROLLED CURRENT. ADVISOR : ASST.PROF.KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., CO-ADVISOR : CHAROENKWAN KRAIYA, Ph.D., 103 pp.

Wastewater from rayon fiber manufacturing process contained high concentration of zinc has been treated using continuous current-controlling electrochemical method. Wastewater containing 155 ppm Zn^{2+} at pH 1.7 with 33.2 mS/cm conductance was used throughout these studies. An investigation begun with a reactor design. Reduction of $KMnO_4$ were employed to indicate whether the reactor with or without salt bridge would provide a better result. Many materials made for salt bridge were also tested. Then, a reactor with sintered glass, as a salt bridge, was chosen for Zn removal process. Aluminum, iron, graphite and stainless steel were examined as a possibly cathode material to use for the Zn removal process. The pH and zinc concentration were monitored. From the results, a suitable electrode for the Zn removal using the controlled current density method was stainless steel which could eliminate 98% of Zn within 30 min when $37.5 A/m^2$ current density was applied. A new aspect of adjusting controlled-current vs. time during the electrolysis course was proposed. It shows a benefit in less-time consuming in Zn removal process at great improvement in the current efficiency. The results revealed that 98% of Zn removal was achieved within 50 min electrolysis with 100% current efficiency at the highest.

Department	<u>Environmental Engineering</u>	Student's Signature..... 
Field of Study	<u>Environmental Engineering</u>	Advisor's Signature..... 
Academic Year	<u>2010</u>	Co- advisor's Signature..... 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนอาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ และ อาจารย์ ดร.พรพนวดี สุวัฒน์ิกะ ที่ได้ให้คำชี้แนะ คำปรึกษา และแก้ไขวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจาก ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และงบประมาณบางส่วนจาก ทุนสนับสนุนโครงการส่งเสริมการทำงานวิจัยเชิงลึกในสาขาวิชาที่มีศักยภาพสูง กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช (FW002A) และโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (หมายเลขโครงการ FW652I)

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สังกะสี.....	4
2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย.....	5
2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย.....	5
2.2.2 การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเส้นใย.....	7
2.2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใย.....	8
2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	9
2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE).....	9
2.3.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction).....	9
2.3.3 รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis).....	10
2.3.4 การระเหย (Evaporation).....	10
2.3.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electro dialysis).....	10
2.3.6 การดูดติดผิว (Adsorption).....	10

	หน้า
2.3.7 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation).....	11
2.3.8 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery).....	15
2.4 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี.....	15
2.4.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	16
2.4.2 สะพานเกลือ.....	19
2.4.3 โพลาริเซชัน.....	19
2.5 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี.....	20
2.5.1 โมนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell).....	21
2.5.2 โมนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel).....	21
2.5.3 โมนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series).....	22
2.5.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode).....	22
2.6 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	23
2.6.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode).....	23
2.6.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode).....	24
2.7 ขั้วไฟฟ้า.....	24
2.7.1 แพลทินัม (Platinum).....	25
2.7.2 ไททาเนียม.....	25
2.7.3 อะลูมิเนียม.....	25
2.7.4 เหล็ก.....	26
2.7.5 แกรไฟต์.....	26
2.8 ศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	26
2.8.1 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^0).....	27
2.8.2 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (E_R).....	28
2.8.3 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน (E_p, η).....	28
2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า.....	28
2.9.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน.....	29

2.9.2 ความนำไฟฟ้า.....	29
2.9.3 กำลังไฟฟ้า.....	30
2.10 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า.....	31
2.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency).....	32
2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	32
2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี.....	38
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	38
3.1.2 สารเคมี.....	39
3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง.....	39
3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	40
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.2.1 การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิกรณ์.....	42
3.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี จากน้ำเสีย.....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	46
4.1 การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิกรณ์.....	46
4.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย.....	49
4.2.1 ชนิดของขั้วไฟฟ้า.....	49
4.2.2 ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า.....	51
4.2.3 พีเอช.....	54
4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแส.....	57
4.4 การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงด้วยวิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง.....	61
4.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด.....	68
4.5.1 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับอุปกรณ์และสารที่ใช้ซ้ำๆ ได้.....	68

4.5.2 ค่าใช้จ่ายที่แปนผันตามปริมาตรของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด.....	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรม.....	74
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	80
ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	103

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	7
2.2	8
2.3	14
3.1	44
4.1	60
4.2	62
4.3	64
4.4	67
4.5	71
4.6	72
ก.1	81
ก.2	82

ตารางที่	หน้า
ก.3 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์.....	83
ก.4 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์.....	84
ก.5 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์.....	85
ก.6 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 2,500 มิลลิแอมแปร์.....	86
ก.7 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 3,000 มิลลิแอมแปร์.....	87
ก.8 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 4,500 มิลลิแอมแปร์.....	88
ก.9 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 1.....	89
ก.10 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 2.....	90
ก.11 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 3.....	91

ตารางที่	หน้า
ก.12 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ ทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยน ค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 4.....	92
ก.13 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 1.....	93
ก.14 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 2.....	94
ก.15 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 3.....	95
ก.16 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 4.....	96

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	กระบวนการผลิตเส้นใย..... 6
2.2	องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี..... 16
2.3	กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า..... 17
2.4	การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก..... 18
2.5	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว..... 21
2.6	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน..... 21
2.7	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม..... 22
2.8	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์..... 22
2.9	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่..... 23
2.10	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลา ในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่..... 24
3.1	ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (ซ้าย) ขั้วแคโทด (ขวา) ขั้วแอโนด..... 39
3.2	การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าขั้วลบ แบบต่อขนานจำนวน 10 แผ่น และขั้วบวกจำนวน 2 แผ่นซ้อนกัน ลักษณะขั้วไฟฟ้า แบบแผ่นที่บ..... 41
3.3	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าขั้วลบแบบต่อขนานจำนวน 10 แผ่น..... 42
3.4	วิธีการทดลองการหาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เหมาะสม สำหรับการกำจัดสังกะสี..... 44
3.5	การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เวลา และประสิทธิภาพ ในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์..... 45

รูปที่	หน้า
3.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เวลา และประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริง.....	45
4.1 ค่าความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ในถังปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายและแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยกระดาษเซลลูลอสเฟน แผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) และอุ่นอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาที.....	47
4.2 สีของสารละลายในถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อด้วยกระดาษเซลลูลอสเฟน (หลอดขวา) หลังการกำจัด $KMnO_4$ เมื่อผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาทีเทียบกับน้ำกลั่น (หลอดซ้าย).....	48
4.3 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้ขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และเหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 mA.....	49
4.4 ค่าร้อยละการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้ขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และเหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 mA.....	50
4.5 ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียดังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด.....	52
4.6 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียดังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด.....	53
4.7 ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	55
4.8 แผนภาพการละลายของ $Zn(OH)_2$	57
4.9 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร บนขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม.....	58
4.10 การลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลา เมื่อใช้การปรับเปลี่ยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.1.....	59
4.11 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1.....	60

รูปที่		หน้า
4.12	การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเทียบกับเวลา เมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1 กับน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์.....	63
4.13	การลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.3.....	65
4.14	ค่าร้อยละการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.3.....	65
4.15	ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.3.....	67

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แร่โลหะหนักจัดเป็นทรัพยากรที่มีอยู่หรือเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยมีบทบาทและความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรมและพลังงาน ซึ่งทรัพยากรของแร่โลหะหนักโดยส่วนใหญ่แล้วมีอยู่ตามผิวดิน และใช้ระยะเวลาในการเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ปริมาณของแร่โลหะหนักจึงค่อยๆลดน้อยถอยลง เนื่องจากการนำไปใช้ประโยชน์จากความต้องการของมนุษย์ในปริมาณที่สูงและต่อเนื่อง ทั้งนี้ยังอาจส่งผลกระทบต่อธรรมชาติจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย ดังนั้นจึงควรมีมาตรการในการอนุรักษ์และป้องกันแร่โลหะหนักคือ การใช้แร่โลหะอย่างประหยัด การนำแร่โลหะที่ใช้แล้วกลับมาใช้อีก และการเลือกวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียอย่างถูกวิธี เป็นต้น

ปัจจุบันความเจริญก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมภายในประเทศเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น โดยมีอุตสาหกรรมบางชนิดใช้แร่โลหะหนักเป็นส่วนผสมในกระบวนการผลิต เช่น โรงงานชุบโลหะ โรงงานผลิตแบตเตอรี่ โรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้า และโรงงานผลิตเส้นใย เป็นต้น ซึ่งโรงงานเหล่านี้มีการใช้ปริมาณของแร่โลหะหนักในปริมาณที่สูงและได้ปล่อยน้ำเสียจำนวนมากที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จึงส่งผลให้แหล่งน้ำธรรมชาติมีคุณภาพที่เสื่อมโทรมมากขึ้น

การตระหนักถึงการลดปริมาณการใช้ทรัพยากรแร่โลหะหนัก และวิธีที่เลือกใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง กระบวนการที่สามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การกำจัดโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) การใช้วิธีออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction) การใช้วิธีรีเวิร์สออสโมซิส (Reverse osmosis) การระเหย (Evaporation) การใช้วิธีอิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) และการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดย

วิธีการตกตะกอนทางเคมีนั้นจัดเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และรวดเร็ว ส่วนวิธีทางไฟฟ้าเคมี จัดเป็นวิธีที่ใช้กันมากเนื่องจากไม่ใช้สารเคมีมาช่วยในการกำจัดและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง (Scott และคณะ, 1997) อีกทั้งโลหะหนักที่ได้กลับคืนมาจะอยู่ในรูปที่บริสุทธิ์สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ในกระบวนการผลิต

แร่โลหะที่สนใจในงานวิจัยนี้คือสังกะสี เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม ใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใย และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น สังกะสีสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อคุณภาพของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ คือ ที่ความเข้มข้นของสังกะสีเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนในเลือดของปลา และยังมีผลอันตรายต่อมนุษย์ คือ ถ้ารับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีสังกะสีเจือปนอยู่จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้รับสังกะสีในรูปของสังกะสีออกไซด์ ส่วนทางจมนั้นจะได้รับจากการสูดหายใจเอาฝุ่นละอองของสังกะสีเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ปอดอักเสบ และถ้าหายใจเอาสังกะสีออกไซด์มาก ๆ จะทำให้มีอาการอ่อนเพลียหนาวสั่น ปวดตามแขนขา และปวดศีรษะอย่างรุนแรงได้ จึงเป็นสิ่งที่สมควรอย่างยิ่งที่จะศึกษาถึงวิธีการในการบำบัดสังกะสีที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียของกระบวนการผลิตเพื่อลดการปนเปื้อนของสังกะสีในน้ำเสียให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งก็คือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงจะสามารถปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ หรือการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายสำหรับการประกอบการของอุตสาหกรรมในด้านนี้

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ถึงวิธีการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยเลือกใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง โดยทำการศึกษาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมและเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าแต่ละชนิดในการกำจัดสังกะสี ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน การควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่องจะช่วยทำให้แนวโน้มของการเกิดประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มสูงขึ้นหรือคงที่ยาวนานที่สุดตลอดของช่วงเวลาในการกักเก็บ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาข้อผิดพลาดที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีและเปรียบเทียบข้อผิดพลาดหลักอะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิมในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใย
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงตลอดการทดลองในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมกระแส
3. หาปริมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การทดลองเป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดลองกำจัดสังกะสี จากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอนและน้ำเสียสังเคราะห์โดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบทีละเท (Batch) โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. เปรียบเทียบวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี โดยใช้ข้อผิดพลาด 4 ชนิด คือ ข้อผิดพลาดหลักอะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เวลา และประสิทธิภาพที่เหมาะสมของวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี โดยการทดลองในช่วงของกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 680 ถึง 5,000 มิลลิแอมแปร์
4. ทดสอบและกำหนดสภาวะของการควบคุมปริมาณกระแสและเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของการกำจัดสังกะสีสูงที่สุดอย่างต่อเนื่อง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นแนวทางในการแปรเปลี่ยนกระแสเทียบกับเวลา เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงอย่างต่อเนื่องในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีควบคุมกระแส
2. เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีในการนำโลหะมีค่าอื่น ๆ ออกจากน้ำเสียโรงงานได้
3. เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกชนิดและรูปแบบข้อผิดพลาดที่เหมาะสมในการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี และปรับปรุงวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สังกะสี

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

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

ดังนั้นสังกะสีจึงถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น ถึงแม้ว่าสังกะสีจะเป็นตัวที่นิยมถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต แต่ก็สามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อมได้ถ้าหากเกิดการปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำ ซึ่งสังกะสีเพียง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำจะมีผลต่อปริมาณออกซิเจนในเลือดของปลา ส่วนอันตรายที่เกิดต่อมนุษย์ คือ ถ้ารับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีสังกะสีเจือปนอยู่จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้รับสังกะสีในรูปของสังกะสีออกไซด์ ส่วนทางจมนั้นจะได้รับจากการสูดหายใจเอาฝุ่นละอองของสังกะสีเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ปอดอักเสบ และถ้าหายใจเอาสังกะสีออกไซด์

มาก ๆ จะทำให้มีอาการอ่อนเพลียหนาวสั่น ปวดตามแขนขา และปวดศีรษะอย่างรุนแรงได้ ดังนั้น จึงมีการกำหนดมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ให้มีความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำทิ้งไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย

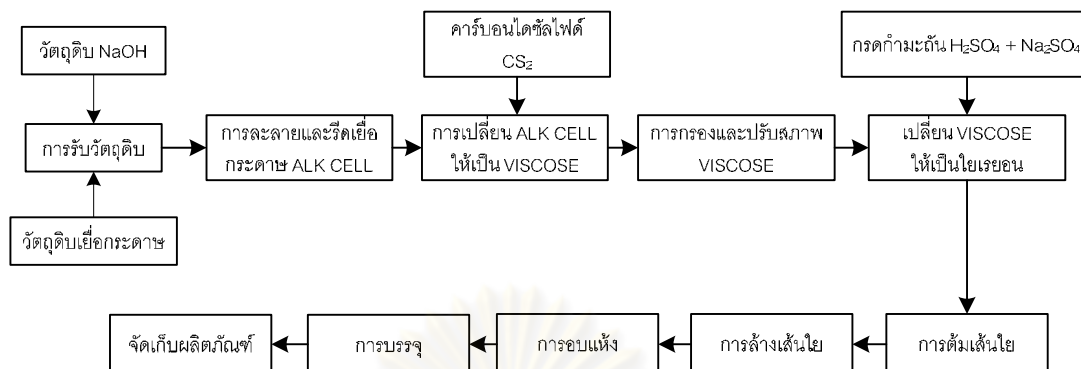
กระบวนการผลิตพอลีเอสเตอร์ของอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย แบ่งออกเป็น 3 กระบวนการผลิต ดังนี้

1. กระบวนการผลิตเส้นใย จัดว่าเป็นกระบวนการผลิตหลัก โดยการนำเยื่อเซลลูโลสซึ่งอยู่ในรูปแผ่นกระดาษมาผสมกับด่างโซดาไฟในถังกวน เพื่อทำเป็นเยื่อด่าง (Alkali cellulose) แล้วส่งไปยังเครื่องรีดโซดาไฟส่วนเกินออก เพื่อให้ได้เยื่อด่างที่มีอัตราส่วนของด่างโซดาไฟที่เหมาะสม เยื่อด่างจะถูกส่งต่อไปยังถังหมักเพื่อทำให้โมเลกุลของเซลลูโลสสั้นลงได้ตามที่ต้องการ

จากนั้นเยื่อด่างจะถูกส่งไปทำปฏิกิริยากับสารคาร์บอนไดออกไซด์ (CS_2) ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนจากเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสแซนเทต (Cellulose xanthate) และจะถูกนำไปทำละลายต่อด้วยสารละลายด่างโซดาไฟ เกิดเป็นสารละลายที่เรียกว่า “วิสโคส” (Viscose)

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

สารละลายวิสโคสและสารละลายผสมจะถูกฉีดเป็นเส้นใยที่มีความยาวต่อเนื่องเป็นจำนวนมาก เส้นใยที่ได้นี้จะถูกนำไปตัดแล้วต้มให้ร้อนเพื่อให้เส้นใยเกิดการเปิดตัวได้ดี จากนั้นจะนำเส้นใยไปล้างสารเคมีก่อนที่จะเข้าสู่การอบแห้งเพื่ออัดเป็นก้อน และส่งจำหน่ายต่อไป ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ผังกระบวนการผลิตเส้นใย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2. กระบวนการผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS₂) เป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการนำถ่านมาเผาเพื่อไล่ความชื้นและสารระเหยออก หลังจากนั้นนำมาเติมลงในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ ถ่านที่อยู่ในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์จะให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าโดยการอาร์คของขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว จากนั้นกำมะถันเหลวจะถูกฉีดเข้าไปในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ กำมะถันจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในถ่าน เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งเข้าไปในถัง Sulfur separator เพื่อแยกเอาละอองไอกำมะถันออกจากก๊าซ ส่วนที่เป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะถูกส่งผ่านเข้าระบบควบแน่น ก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกควบแน่นเป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์เหลว และจะถูกนำไปเก็บในถังเก็บ Crude CS₂ ในส่วนนี้จะถูกนำมากลั่นให้เป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่บริสุทธิ์ จากนั้นจึงจะส่งไปใช้ในกระบวนการผลิต

3. กระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) เป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการป้อนกำมะถันเหลวเข้าสู่เตาเผากำมะถันโดยใช้ลมจาก Blower ในการเผาไหม้ให้เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ที่อุณหภูมิ 950 ถึง 970 องศาเซลเซียส ก๊าซร้อนที่ได้จะถูกลดอุณหภูมิโดยส่งผ่านหม้อน้ำ ก๊าซที่ลดอุณหภูมิแล้วจะถูกส่งเข้าไปในถัง Converter เพื่อให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) โดยมีสารเร่งปฏิกิริยา ก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ออกจาก Converter จะถูกลดอุณหภูมิก่อนจะส่งเข้าหอจับก๊าซ (Absorption tower) เพื่อจับก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ให้เปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริก ก๊าซที่เหลือจากหอจับก๊าซจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยน้ำ (Water scrubber) เพื่อบำบัดก๊าซ หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยสารละลายด่าง (Caustic scrubber) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ไอน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตสามารถนำไปหลอมละลายกำมะถัน ส่วนลมร้อนและน้ำร้อนสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้

2.2.2 การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเส้นใย

การใช้วัตถุดิบของอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย สามารถสรุปการใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงาน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงานผลิตเส้นใย

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
สารคาร์บอนไดออกไซด์	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

2.2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใย

กระบวนการผลิตเส้นใยตามที่ได้กล่าวมานั้นจะทำให้เกิดน้ำเสีย 2 ประเภท คือ น้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดและมีโลหะหนักสังกะสี กับน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกลางหรือด่างแต่ไม่มีสารโลหะหนักสังกะสีปนเปื้อน

1. น้ำเสียประเภทแรก มีจุดกำเนิดที่ขั้นตอนกระบวนการล้างเส้นใย ซึ่งเป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการเกิดเส้นใย การตัดเส้นใยเป็นท่อนๆ แล้วต้มเส้นใยให้ร้อนจนเปิดตัวได้ดี น้ำที่ผ่านการล้างเส้นใยนี้จะมีสภาพเป็นกรดเพราะมีสารละลายเคมีเจือปนอยู่ คือ กรดซัลฟิวริก โซเดียมซัลเฟต และสังกะสีซัลเฟต ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตเส้นใย

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ปริมาณความเข้มข้น
พีเอช		1.7
ไนโตรเจน	mg/l N	5
ฟอสเฟต	mg/l P	3.2
บีโอดี	mg/l	1,900
ซีโอดี	mg/l	3,440
ไขมัน	mg/l	5.7
ของแข็งทั้งหมด	mg/l	23,700
ของแข็งละลายน้ำ	mg/l	23,600
ของแข็งแขวนลอย	mg/l	100
สังกะสี	mg/l Zn	155

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551

2. น้ำเสียประเภทที่สอง เป็นน้ำเสียที่มาจากแหล่งต่างๆ ภายในโรงงาน เช่น น้ำล้างในกระบวนการผลิตที่ไม่มีสารโลหะหนักสังกะสี น้ำเสียจากระบบหล่อเย็น น้ำเสียจากการล้างเครื่องกรอง และน้ำเสียจากกิจกรรมอื่นๆ เป็นต้น

2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยสรุปวิธีการบำบัดต่างๆ ได้ดังนี้

2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชื่นชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้มีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ โดยที่เรซินจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่แต่จะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งถ้าเรซินเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคทไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation exchanger) แต่ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion exchanger) วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและจะต้องทำการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Manahan, 1993)

2.3.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction)

กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันเป็นวิธีการทางเคมีอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการบำบัดจะทำการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนลงไปได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต ไครเมตและไนเตรต เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอออน(II) ซัลเฟต โซเดียม-เมตาไบซัลเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

2.3.3 รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis)

กระบวนการรีเวิร์ส ออสโมซิส เป็นการแยกไอออนออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตด และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน semi permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้จึงต้องทนต่อแรงดันได้สูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้น ได้แก่ การปรับค่าพีเอช การแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดส์รุนแรงออก และการกรองสารแขวนลอยออกเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรนเป็นต้น

2.3.4 การระเหย (Evaporation)

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

2.3.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electro dialysis)

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

2.3.6 การดูดติดผิว (Adsorption)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารมลทินที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับสูงได้ และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็น

ถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรง ภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่นๆได้ เช่น ตะกั่ว และทองแดง เป็นต้น

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ adsorbate เรียกว่า adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดติดผิว

2.3.7 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้

ในการตกตะกอนต้องพิจารณาถึงค่าพีเอช หลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปจะมีพีเอชที่สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ตารางที่ 2.2 ได้แสดงค่าพีเอชที่เหมาะสม และชนิดของสารเคมีที่ใช้เติมผสมลงไป เพื่อกำจัดหรือแยกมลสารออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่าในแต่ละมลสารจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

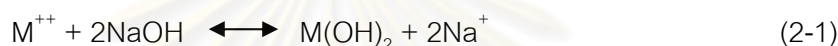
สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดผลึกในรูปของหินปูน ซึ่งจะก่อให้เกิดตะกอนมาก ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นมีราคาแพงกว่าและเกิดอันตรายได้มากกว่าแคลเซียมออกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า จึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแล้วอาจทำการเปลี่ยนแปลงสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะ

หนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับค่าพีเอชหรือเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะนั้นมีความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยการเติมสารเคมี คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนที่อยู่ในสารละลาย และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2-1 โดย M^{++} คือโลหะไอออน

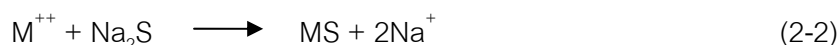


การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric property) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชที่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนจากค่าที่โลหะหนักสามารถตกต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

ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด ด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้ สภาวะที่เกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช และสารอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการตกตะกอน (Freeman, 1989)

2. การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

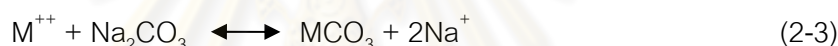
การตกตะกอนด้วยซัลไฟด์เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง นอกจากการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ สารเคมีที่มักนิยมใช้ คือ โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) โดยทำการเติมลงในสารละลายเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับโลหะไอออน และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2-2 โดย M^{++} คือ โลหะไอออน



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

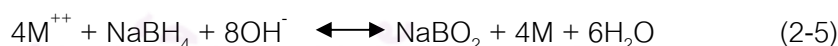
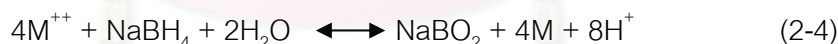
3. การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate precipitation)

สำหรับโลหะบางตัว เช่น แคลเซียม ตะกั่ว การตกตะกอนคาร์บอเนต ทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ และสามารถกรองตะกอนได้มากกว่า



4. การตกตะกอนไฮไดรด์โซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium Borohydride precipitation)

ไฮไดรด์โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นรีดิวซิงเอเจนต์ ที่สามารถใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับค่าพีเอช แสดงปฏิกิริยาได้ดังนี้



กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงพีเอช 8- 11 ที่พีเอชต่ำกว่า 8 การใช้ไฮไดรด์โซเดียมโบโรไฮไดรด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยการไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์ ขณะที่พีเอชมากกว่า 11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง พีเอชที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยการทดสอบความสมดุลของการใช้โบโรไฮไดรด์กับระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา และคุณภาพของน้ำที่ปล่อยออกมา (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 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

5. ความสามารถในการละลาย

เมื่อพิจารณาสมดุลในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และค่าคงที่สมดุลที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้



$$K_{sp} = \{M^{n+}\}\{OH^-\}^n / \{M(OH)_{n(s)}\} \quad (2-7)$$

ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับของแข็งจะถูกเขียนโดยของแข็งเป็นสารตั้งต้น โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี ค่าคงที่สมดุลถูกแสดงด้วยตัวห้อย S แล้วตามด้วยจำนวนลิแกนด์ เขียนเป็นสัญลักษณ์ K_{si} ซึ่งจะถูกใช้แสดงถึงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่มีของแข็งเป็นสารตั้งต้น ที่

มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี และสารเชิงซ้อนที่มีจำนวน i ลิแกนด์เป็นผลิตภัณฑ์ (Benjamin, 2002)

2.3.8 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

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

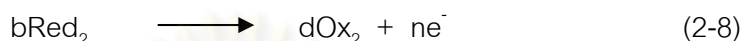
2.4 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการทำวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าจะหมายถึง กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

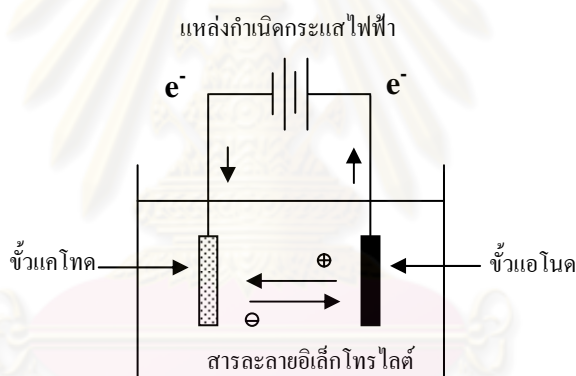
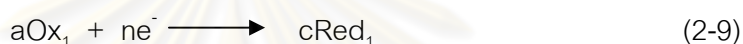
แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ดังสมการที่

2-3 ส่วนชั่วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่า ชั่วแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ 2-4 องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีแสดงดังรูปที่ 2.2

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

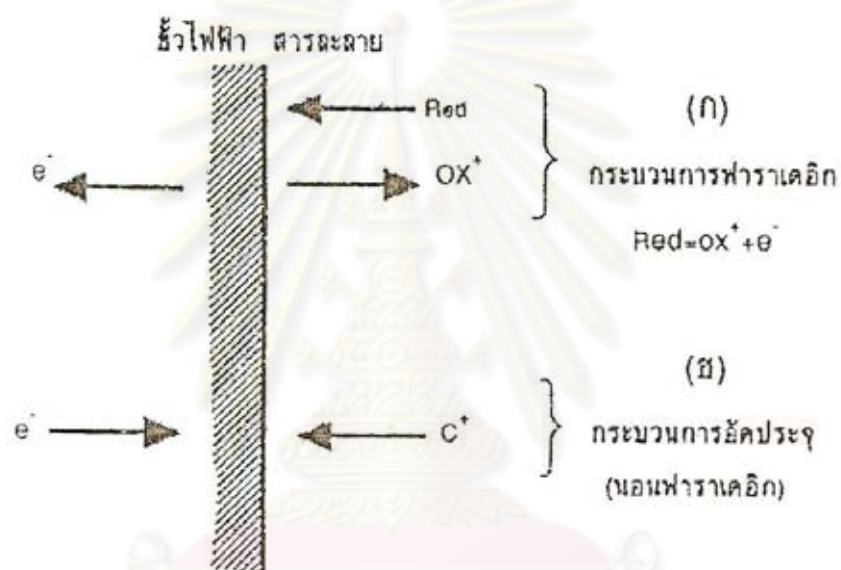


รูปที่ 2.2 องค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

2.4.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

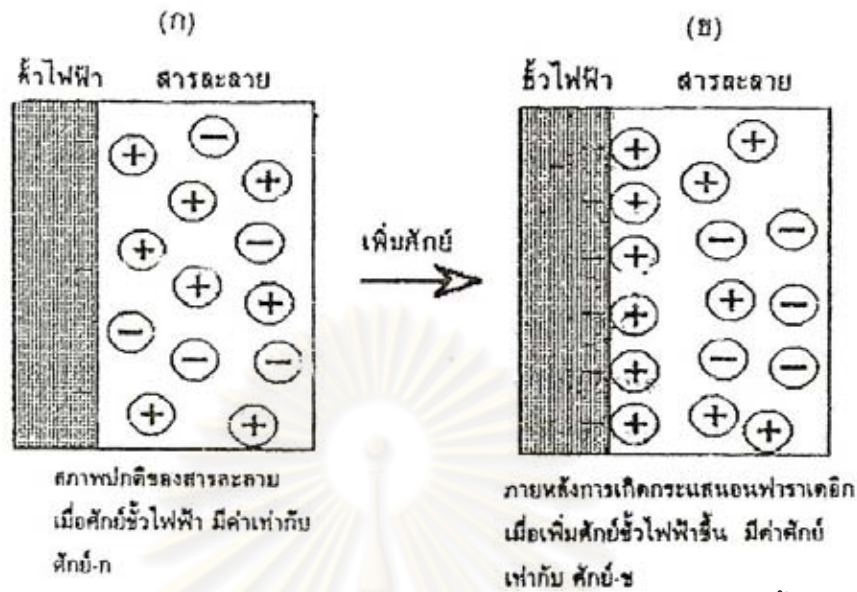
ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและคายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์) เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการดังกล่าวนี้ที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรของเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นได้ เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic current)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) กระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non-Faradaic current) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์ หรือชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี แต่ขึ้นกับสถานะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้างดรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539)

ในรูปที่ 2.4 (ก) เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์ -ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลาย มาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายตัว ในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.4 (ข) สมมุติให้เท่ากับ -ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์ -ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ที่ โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสที่ไหลชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสจากการอัดเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดย

- ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้

- ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนพาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสพาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารดีโพลาไรเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนั้นถูกเรียกว่า ขั้วดีโพลาไรซ์

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

2.4.2 สะพานเกลือ

สะพานเกลือใช้เชื่อมต่อระหว่างสองครึ่งเซลล์ ซึ่งสะพานเกลือทำจากหลอดแก้วรูปตัวยู ภายในบรรจุอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารในเซลล์และมีไอออนบวก ไอออนลบ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้เคียงกัน หรือทำจากกระดาษกรองชุบอิเล็กโทรไลต์ โดยสะพานเกลือทำหน้าที่เป็นตัวกลางที่เชื่อมต่อระหว่างครึ่งเซลล์ทั้งสอง และเป็นสิ่งที่ป้องกันการเกิดการผสมของประจุ โดยไอออนบวกจากสะพานเกลือจะเคลื่อนที่ไปยังครึ่งเซลล์ที่มีประจุลบมาก ในทางตรงกันข้ามไอออนลบก็จะเคลื่อนที่ไปยังครึ่งเซลล์ที่มีประจุบวกมาก จึงทำให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปได้ในเวลาที่มากขึ้น สะพานเกลือมีหลายชนิด ทั้งสะพานเกลือที่อยู่ในหลอดแก้ว สะพานเกลือที่เป็นกระดาษกรอง และสะพานเกลือที่เป็นแผ่นแก้วพูน

2.4.3 โพลาไรเซชัน

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. โพลาริเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration polarization) เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่งสารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้น หรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลาย และขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลาย จะมีส่วนทำให้เกิดโพลาริเซชันขึ้นไม่มากนักน้อย ซึ่งผลของการเกิดโพลาริเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจร เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจรเป็นไปตามปกติ

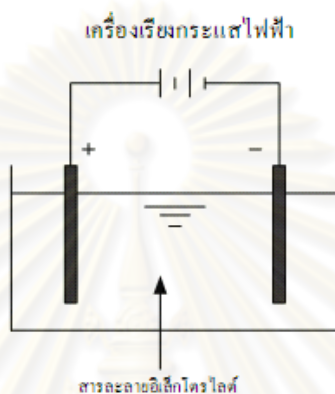
2. โพลาริเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization) เกิดขึ้นจากการชะลอลงของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออนจะส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดความหนาแน่นของกระแสที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันแบบที่กล่าวไว้ได้

2.5 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง (Mollah, 2004) สำหรับการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 4 รูปแบบ ดังนี้

2.5.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell)

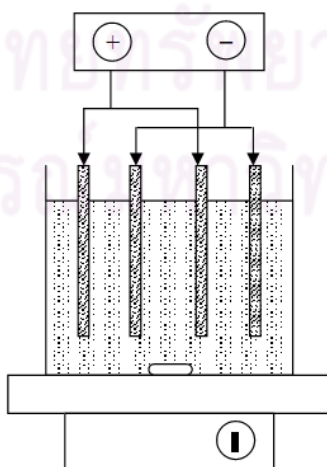
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งการจัดเรียงแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ และมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามาก



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Pretourius, 1991)

2.5.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel)

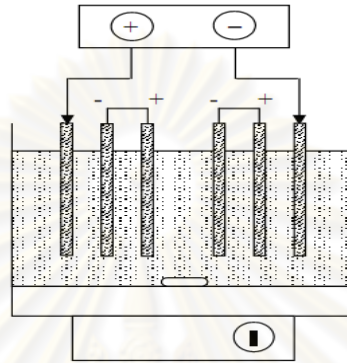
กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมโนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)

2.5.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series)

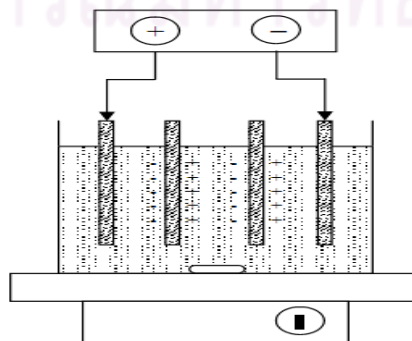
มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกันโดยมีการเชื่อมจุดอิเล็กโทรดเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละอิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)

2.5.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode)

มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะการใช้งาน



รูปที่ 2.8 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Chen, 2004)

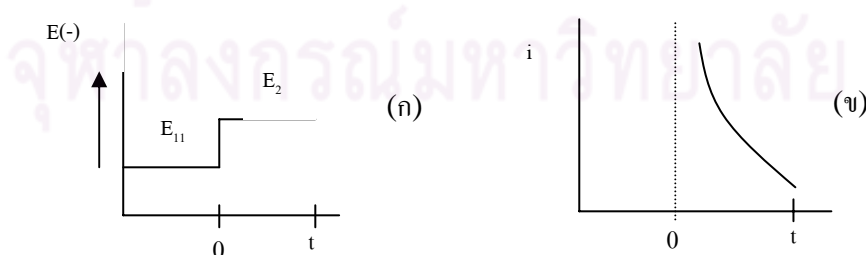
2.6 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

รูปแบบการควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.6.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)

เป็นการควบคุมความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับความต่างศักย์ที่เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (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 2.9 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i = kC$)



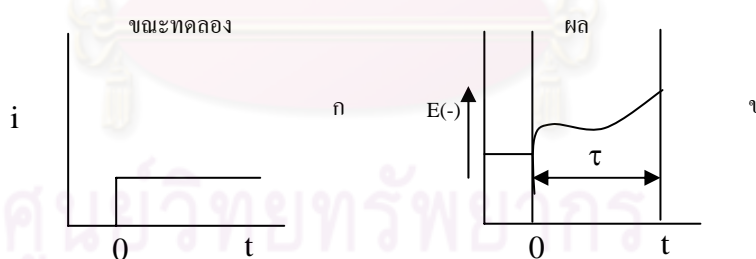
รูปที่ 2.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(Friedrich, 1962)

2.6.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2-5



ดังนั้นความต่างศักย์จะแปรตามความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งคำนวณสัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(Friedrich, 1962)

2.7 ขั้วไฟฟ้า

ในแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อบริเวณสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

วัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น แพลทินัม ไททาเนียม อะลูมิเนียม เหล็ก และแกรไฟต์ เป็นต้น โดยมีลักษณะและคุณสมบัติในแต่ละชนิด ดังนี้

2.7.1 แพลทินัม (Platinum)

คุณสมบัติโดยทั่วไปของแพลทินัม คือ มีจุดเดือด 3,827 องศาเซลเซียส และจุดหลอมเหลว 1,770 องศาเซลเซียส ซึ่งนับว่าสูงมาก เลขออกซิเดชันมีค่าตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญ คือ +2 ถึง +4 เท่านั้น แพลทินัมเป็นโลหะที่มีลักษณะเป็นเงา สีมันวาว และมีความอ่อนกว่าธาตุชนิดอื่นๆ จึงสามารถดัดให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ คล้ายกับเงินและทอง คุณสมบัติในการนำความร้อนและไฟฟ้าดีมาก และไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา จึงเหมาะกับการนำไปทำขั้วไฟฟ้า เบ้าทนไฟ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูงและต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง แต่ไม่ถูกนิยมนำมาใช้เนื่องจากมีราคาแพงมาก

2.7.2 ไททาเนียม

ไททาเนียมเป็นโลหะธาตุทรานซิชันอยู่หมู่เดียวกับเซอร์โคเนียมและฮาฟเนียม โดยมีลักษณะเป็นสีขาวคล้ายเงิน แข็ง และไม่เปราะ และบรรดาโลหะในหมู่ธาตุทรานซิชันทั้งหมดพบว่าไททาเนียมมีความหนาแน่นน้อยที่สุด ที่อุณหภูมิปกติไททาเนียมจะไม่ไวต่อการทำปฏิกิริยา แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ไททาเนียมจะทำปฏิกิริยารุนแรงกับโลหะ เกิดเป็นสารประกอบต่างๆ เช่น $TiCl_4$ หรือ TiO_2 เป็นต้น และยังสามารถทำปฏิกิริยากับไอน้ำเกิดเป็นไดออกไซด์กับไฮโดรเจน เลขออกซิเดชันของไททาเนียมมีตั้งแต่ +2 ถึง +4 แต่ที่สำคัญและเสถียรที่สุดในสภาวะต่างๆ คือ +4

2.7.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากเป็นอันดับ 3 ในเปลือกโลก โดยมีลักษณะเป็นสีขาว น้ำหนักเบา และแข็งแรง แต่ไม่เปราะ จึงสามารถทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เช่น ใช้ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและน้ำหนักเบา อะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับโลหะตัวอื่นๆ ได้อย่างรวดเร็ว มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 และถ้าหาก Al^{+3} อยู่ในน้ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและไฮโดรไลซิสขึ้นได้

2.7.4 เหล็ก

เหล็กเป็นโลหะที่มีอยู่ในเปลือกโลกและถูกพบมากเป็นอันดับ 2 รองลงมาจากอะลูมิเนียม โดยมีลักษณะเป็นโลหะแข็ง มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวค่อนข้างสูง และมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาที่ปานกลาง เลขออกซิเดชันของเหล็กที่พบบ่อยและมีความเสถียรมีค่า +2 และ +3 อยู่ปนกันไป แต่เหล็กที่มีเลขออกซิเดชัน +2 นั้นมีความเสถียรมากและมีความสามารถในการเกิดเกลือต่างๆกับแอนไอออนที่เสถียรได้ สารประกอบที่มี Fe^{+2} เป็นส่วนประกอบนั้นเมื่ออยู่ในน้ำหรือสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไอออน $(\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6)^{+2}$ และสามารถถูกออกซิไดส์ด้วยอากาศหรือออกซิเจนกลายเป็น Fe^{+3} ซึ่งแสดงสมบัติเป็นกรด เนื่องจาก Fe^{+3} มีขนาดไอออนเล็กและมีจำนวนประจุมาก ทั้ง Fe^{+2} และ Fe^{+3} สามารถทำปฏิกิริยากับสารที่ให้อิเล็กตรอนและเกิดสารเชิงซ้อนได้ ส่วนค่าออกซิเดชันที่สูงกว่านี้ก็ถูกพบแต่ไม่เสถียร เหล็กสามารถทำปฏิกิริยารวมกับอโลหะได้เกือบทั้งหมดเมื่อทำให้ร้อน แต่จะไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเมื่ออยู่ในรูปสารละลาย เหล็กเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรง โดยถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นจะพบว่าที่ผิวของเหล็กจะมีสีน้ำตาลเกิดขึ้นที่เรียกว่าสนิมเหล็ก

2.7.5 แกรไฟต์

แกรไฟต์เป็นอันธรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะที่บดแสงและเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์บอนด์แต่จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าได้น้อย

2.8 ศักย์ขั้วไฟฟ้า

คำจำกัดความของศักย์ขั้วไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ซึ่งการที่ต้องกำหนดขั้วแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนก็เพื่อให้อ้างอิงและสามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน และในการกำหนดเครื่องหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้า

ตาม IUPAC ได้กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้า และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าแอกทิวิตีเป็นหนึ่ง ให้ถือว่า ค่าผลลัพธ์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ขั้วไฟฟ้านั้นๆ

2.8.1 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°)

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

1. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าหนึ่งๆ ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ โดยที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดเสมอ
2. ตามสัจนิยมของไฟฟ้าเคมี ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะต้องได้มาจากการเขียนปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น
3. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะไม่ผันแปรตามจำนวนโมลที่เกิดจากการใช้ปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
4. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิ จึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิพร้อมกับค่าของ (E°) ด้วยเสมอ
5. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยตัวเลขและเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายบวกหรือลบจะมีความหมายที่แตกต่างกัน คือ เครื่องหมายบวก จะหมายถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ในที่นี้ขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาจะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ส่วนเครื่องหมายลบ จะบ่งบอกถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้อยกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

2.8.2 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (E_R)

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ การที่กระแสจะไหลครบวงจรของเซลล์ได้นั้น ต้องมีพลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งที่เพียงพอต่อการเอาชนะความต้านทานของวงจร ซึ่งศักย์ไฟฟ้าจำนวนนี้คือ ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential) โดยมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสกับความต้านทาน (IR) ดังนั้นค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม จึงต้องมีเทอมของศักย์ไฟฟ้าจากความต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_R \quad (2-11)$$

2.8.3 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน (E_p, η)

โพลาริเซชันเกิดขึ้นได้ 2 แบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4.2 คือ เกิดเนื่องจากผลของความเข้มข้นและแบบจลน์ ซึ่งต้องแก้ไขโดยการเพิ่มประมาณของกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นหรือทำการเพิ่มศักย์ของวงจรให้สูงขึ้น ศักย์ที่ถูกเพิ่มนี้จะเรียกว่า 'ศักย์เกินตัว' (Overpotential, η) จึงทำให้ค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวมต่างจากค่าอุณหพลวัตจากการคำนวณ ดังนั้นถ้ามีโพลาริเซชันเกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ การแสดงค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม เป็นดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_R - \eta \quad (2-12)$$

2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

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

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (2-13)$$

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

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ (} W_{\text{elec}} \text{)} = nF \times \text{โวลต์} \quad (2-14)$$

2.9.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน

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

$$I = \text{ohm} \times E_f \quad (2-15)$$

$$E_f = I/\text{ohm} \quad (2-16)$$

$$V = IR \quad (2-17)$$

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

โดย	ohm	=	ค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mhos/cm
	V	=	ความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น volt
	R	=	ความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น mhos
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น amp

2.9.2 ความนำไฟฟ้า

ความนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และ ปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ส่วนความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะหมายถึง ความ

ต้านทานที่เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นไปตามสมการ คือ

$$R = L / (C \times A) \quad (2-19)$$

โดย R = ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น โอห์ม
 L = ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
 C = ค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น ซีเมน
 A = พื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

2.9.3 กำลังไฟฟ้า

ปริมาณไฟฟ้า Q คูลอมป์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านในเวลา t วินาที

$$Q = I \times t \quad (2-20)$$

พลังงานไฟฟ้า (W) จะหมายถึง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานในเวลา t วินาที โดยที่ตัวต้านทานนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น E โวลต์

$$W = E I \times t \quad (2-21)$$

$$W = E \times Q \quad (2-22)$$

กำลังไฟฟ้า (Watt, P) คำนวณได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

$$P = W / t \quad (2-23)$$

2.10 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (อินทิตรา หาญพงษ์พันธ์, 2539)

มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แคโทด ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยใช้ปริมาณไฟฟ้าที่เท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้ไอเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังสมการที่ 2-23

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

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

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

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

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

เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้โดยการใช้กฎของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = M I t / nF \quad (2-29)$$

โดย	W	=	มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี (กรัม)
	n	=	จำนวนโมลของตัวออกซิไดส์ตามสมการเคมี
	M	=	มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์)
	t	=	เวลา (วินาที)
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์ต่อโมล)

2.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency)

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมี นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เพราะ กระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงสุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับว่าเป็นกระบวนการที่ดี โดยประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จากสมการที่ 2-30

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

โดย	n	=	ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์/โมล)
	C_o	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)
	C_t	=	ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)
	V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
	$I(t)$	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายเทียบกับปริมาณพลังงานหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ ค่าประสิทธิภาพยิ่งสูงประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจะสูงตามไปด้วย

2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุไอออน ความสามารถของไอออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ ประจุบนไอออนและขนาดไอออน

3. อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้ว ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า และจำนวนกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยจะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
6. จำนวนประจุของไอออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ

2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเตรียมขั้วไฟฟ้า

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 โดยให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไททานเนียมเป็นขั้วแอโนด หลังจากที่มีการแยกดีบุกแล้วสารละลายที่มีไอออนของทองแดงและตะกั่วจะสามารถนำกลับด้วยการพอกพูนของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับดีบุก และจะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสำหรับการนำกลับของโลหะ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่เป็นการประหยัดถ้าหากเทียบกับการตกตะกอนด้วยต่าง อีกตัวเลือกหนึ่งของการนำกลับทองแดงโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยรวมกันกับการตกตะกอนดีบุกและตะกั่ว ก่อนที่จะมีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือ $PbSO_4$ และ SnO_2 จะถูก

ส่งไปเผา เพื่อที่จะผลิตโลหะผสมขึ้นมา วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเหมือนกับการนำกลับโลหะทั้งหมดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี เพราะว่าการเผานั้นจะเกิดก๊าซ และเกิดกากโลหะขึ้น

ช่วงกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมและขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้

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

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

คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ (2545) ได้ศึกษาถึงการแยกสังกะสีออกจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงชุบเพชรเกษมซึ่งใช้

น้ำยาชุบสังกะสีชนิดโซดาไนต์ และน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ขั้วแคโทดเป็นแสดนเลสสตีล และ ตะกั่วจากโรงงานแบตเตอรี่รถยนต์เป็นขั้วแอโนด จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการแยก สังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 500 ส่วนในล้านส่วน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร เท่ากับร้อยละ 96.7 และมี ประสิทธิภาพของกระแสเท่ากับร้อยละ 7.08 ในส่วนของน้ำเสียจริงที่ความหนาแน่นของกระแส 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีเท่ากับร้อยละ 97.9 และมี ประสิทธิภาพของกระแสเท่ากับร้อยละ 8.26

Garcia-Gabaldon (2005) ได้ทำการศึกษาการนำกลับดีบุกและทองคำขาว โดย วิถีทางไฟฟ้าเคมี โดยกระบวนการควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ถึงปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมีมีไดอะแฟรม เซรามิกถูกใส่เข้าไป เมื่อไม่มีทองคำขาวอยู่ศักย์ขั้วไฟฟ้าจะเป็นลบมากกว่า การเปลี่ยนรูปของดีบุก มีมากขึ้น เพราะว่าขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยมีลักษณะไม่ราบเรียบและเกิดก๊าซไฮโดรเจน ขึ้น ในขณะที่เดียวกันประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าลดลง และพลังงานจำเพาะที่ใช้สำหรับดีบุกก็มีค่า เพิ่มขึ้น เพราะว่าเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด เงื่อนไขของการทดลอง คือ ศักย์ที่ขั้วแคโทด ประมาณ -1.0 โวลต์ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง คือ ซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ ที่อิมมัวด้วยโพแทสเซียมคลอไรด์ ไอออนดีบุกจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและเกิดเป็นดีบุก ไอออนของทองคำขาวส่งผลต่อการเกิด การพอกพูนของดีบุก ที่ศักย์ไฟฟ้า -0.4 โวลต์ การนำกลับของโลหะทั้งสองมีความเป็นไปได้ที่จะถูก แยกออกจากกัน การมีไอออนทองคำขาวอยู่ จะเพิ่มให้เกิดการพอกพูนของดีบุกที่ศักย์เป็นบวก มากกว่า -0.6 โวลต์ ที่ค่าศักย์ดังกล่าวถือเป็นค่าที่ต่ำที่สุดของพลังงานที่ใช้ และทำให้ประสิทธิภาพ เชิงกระแสมีค่ามากกว่า 70% อีกทั้งเป็นค่าที่ดีของการเปลี่ยนสภาพในรูปไอออนของทั้งดีบุก 100% และทองคำขาวได้มากกว่า 90%

ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี

ศรายุทธ ลาภพูนผล (2549) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย สังเคราะห์โดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย ศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างขั้ว พื้นที่ผิว อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้ กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ แบบขนาน ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดมากกว่าร้อยละ 99 ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ระยะระหว่าง

ชั่ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเสียเข้าถัง 21.11 มิลลิลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

ขนาดและพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้

อภิรดี สุนทรภา (2549) ได้ทำการศึกษากการประยุกต์ใช้การตกตะกอนทางเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ และวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง เพื่อการนำกลับของดีบุก ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกศึกษากการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ พบว่าที่พีเอช 3 สามารถนำกลับดีบุกได้ 56.03% และที่พีเอช 2 สามารถนำกลับดีบุกได้ 79.68% ตามลำดับ ส่วนที่สองศึกษาวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ชนิดขั้วแอโนดเป็นแกรไฟต์และขั้วแคโทดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถนำกลับดีบุกได้ 100% โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 6.5 x 12 ตารางเซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร ส่วนที่สามศึกษาวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริงโดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่สองมาทำการทดสอบ พบว่า ให้ค่าการนำกลับดีบุก 86.86%

รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

Emamjomeh และ Savakumar (2008) ได้ทำการศึกษากการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ และใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์ร้อยละ 99 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแส 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พีเอชเท่ากับ 6 อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความเข้มข้นฟลูออไรด์ขาเข้าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

สหรัฐ เซาร์รูปดี (2010) ทำการศึกษากการกำจัดสังกะสีโดยใช้กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชเท่ากับ 2 ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 250-4,000 มิลลิแอมแปร์ พบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงกระแสที่เกิดขึ้นของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานมีรูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมกว่าการวางขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว เนื่องจากการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนานทำให้แนวโน้มของการเกิดประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มสูงขึ้นหรือคงที่ยาวนานที่สุดมากกว่าในตลอดของช่วงเวลาในการกักเก็บ

สรุปเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การเตรียมขั้วไฟฟ้า ควรใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างขั้วไฟฟ้า
2. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่นิยมใช้คือตั้งแต่ 10 ถึง 200 แอมแปร์ต่อตาราง
เมตร
3. ขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้ในการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีคือ แกรไฟต์ เหล็ก เงิน
อะลูมิเนียม สแตนเลสสตีล ตะกั่ว
4. ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีคือ กระแสไฟฟ้า ความหนาแน่น
กระแสไฟฟ้า พื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรสารละลาย (A/V)
5. รูปแบบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่นิยมคือการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบขนาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

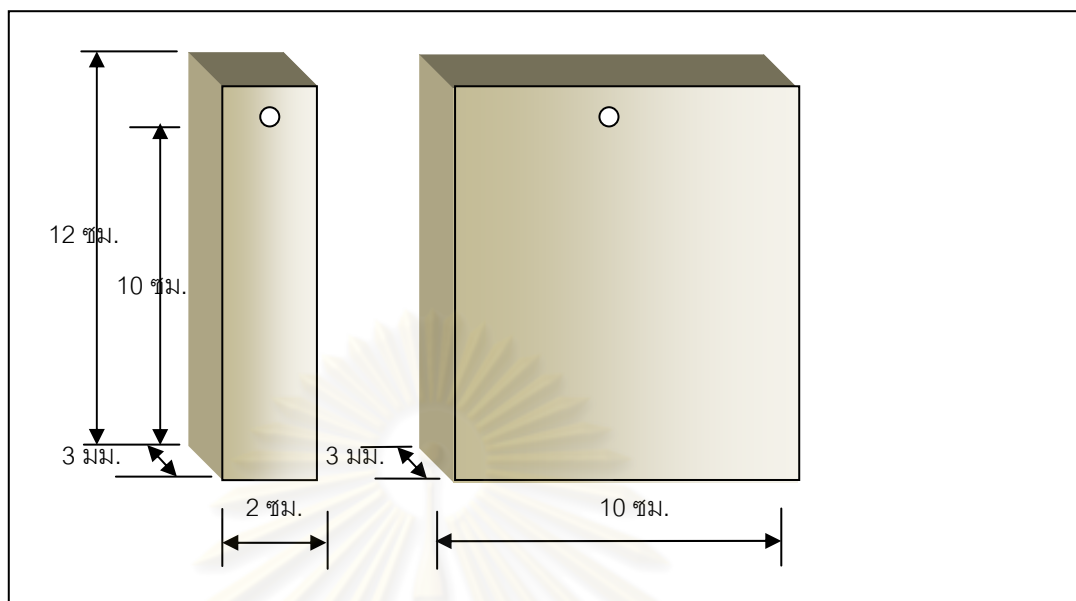
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการ
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digital balance) : Mettler-Toledo, Dragon 204
2. เครื่องวัดค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้า (pH/Conductor meter) : Mettler Toledo, model Seven Multi pH/Conductivity
3. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) : GBC, Avanza
4. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer) : VELP, ARED
5. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply) : GW, INSTEK
6. กระดาษกรอง (Filter paper) : Whatman No.41
7. กระดาษทรายเบอร์ 0 (Sandpaper) : T.O.A. No. 0
8. ถังปฏิกิริยาทำจากอะครีลิกขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 7 x 14 x 13 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความจุ 1,274 มิลลิลิตร และมีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell Volume Ratio; A/V) ฝั่งขั้วแคโทดเท่ากับ 42 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
9. อุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
10. ขั้วไฟฟ้า มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยขั้วเหล็ก อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 2 x 10 ตารางเซนติเมตร และขั้วแกรไฟต์ขนาด 10 x 10 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (ซ้าย) ขั้วแคโทด (ขวา) ขั้วแอโนด

3.1.2 สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl) : Carlo ERBA
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) : Carlo ERBA
3. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl) : QP Panreac
4. สังกะสีคลอไรด์ (Zinc Chloride, $ZnCl_2$) : Ajax

3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

น้ำเสียสังเคราะห์

เตรียม Zn ให้มีความเข้มข้นเท่ากับ 155 มิลลิกรัมต่อลิตร (2.4 มิลลิโมลต่อลิตร) โดยตักสาร $ZnCl_2$ ในปริมาณ 21.2 กรัม ละลายลงในน้ำกลั่น 950 มิลลิลิตร จากนั้นปรับพีเอชให้มีค่าเป็น 1.6 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และทำการปรับความนำไฟฟ้า ให้มีค่า 33.2 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร ด้วยโซเดียมคลอไรด์ เพื่อให้ได้ค่าความนำไฟฟ้าใกล้เคียงกับน้ำเสียจริง สุดท้ายปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1,000 มิลลิลิตร

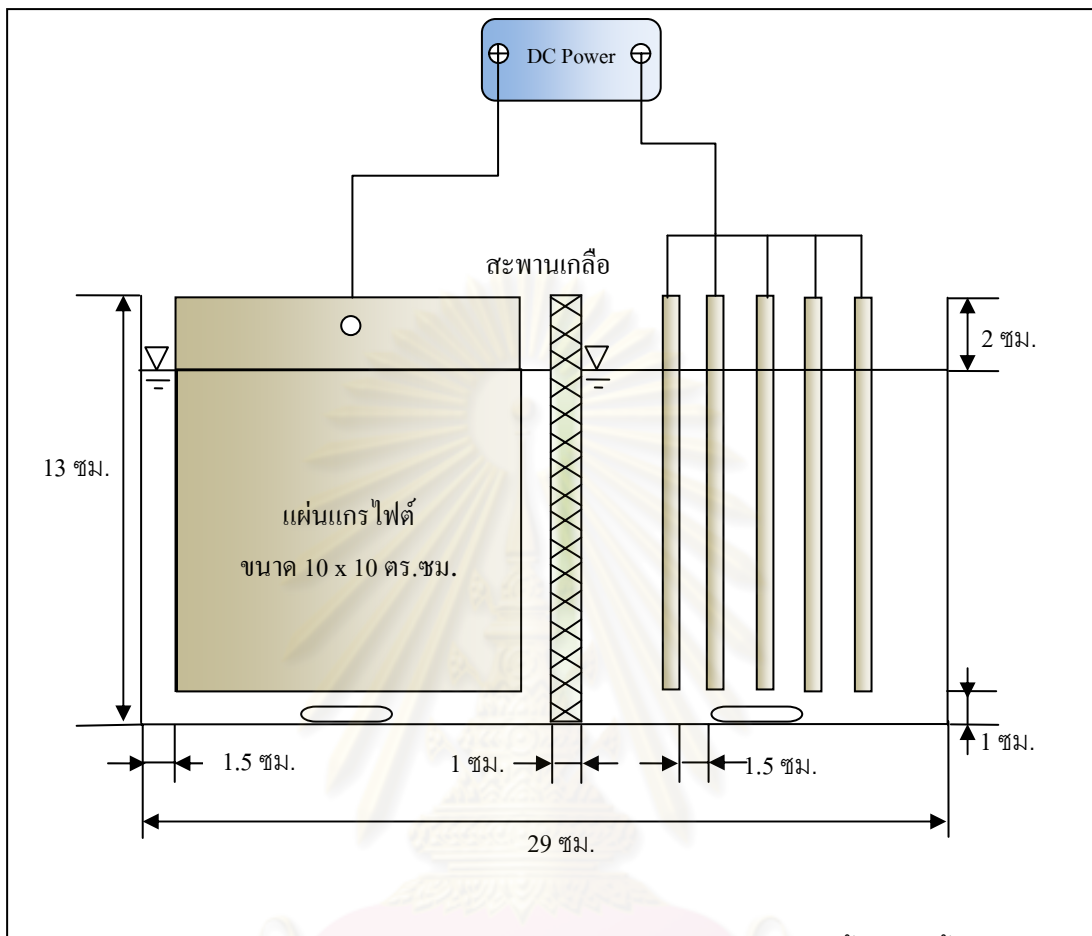
น้ำเสียจริง

น้ำเสียจริงเป็นน้ำที่เก็บจากส่วนปล่อยทิ้งจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย มีปริมาณสังกะสีเฉลี่ย 155 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการเก็บตัวอย่างน้ำ 5 ครั้ง ในปี พ.ศ.2551-2553

3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

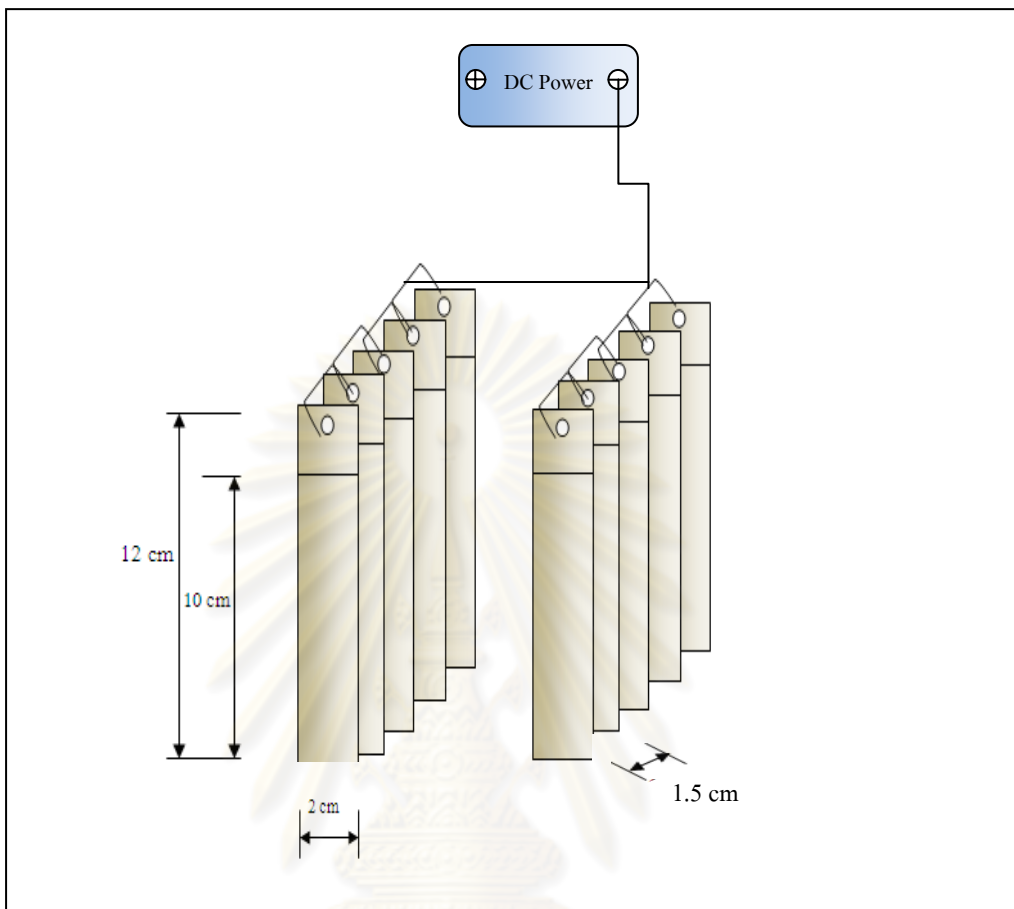
การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์ต่อขนาน

1. ผังแอโนดเตรียมสารละลาย NaCl เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 950 มิลลิลิตร บรรจุลงในถังปฏิกิริยาขนาด 1,274 มิลลิลิตร และผังแคโทดบรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ลงในถังปฏิกิริยาขนาด 1,274 มิลลิลิตร ปริมาตร 950 มิลลิลิตร ที่เชื่อมกลางด้วยแผ่นแก้วพูน
2. ต่อแผ่นแกรไฟต์ ที่มีขนาด 10 x 10 ตร.ซม. จำนวน 2 แผ่น เข้าที่ขั้วบวก (แอโนด) และเข้าที่ขั้วลบ (แคโทด) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ต่อแผ่นเหล็ก (แล้วปรับเปลี่ยนเป็นอะลูมิเนียมแกรไฟต์ และ เหล็กกล้าไร้สนิม) ขนาด 2 x 10 ตร.ซม. จำนวน 10 แผ่น (จำนวน 2 แถว แถวละ 5 แผ่น)



รูปที่ 3.2 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าขั้วลบแบบต่อขนานจำนวน 5 แผ่นซ้อนกัน (รวมเป็น 10 แผ่น) และขั้วบวกจำนวน 2 แผ่นซ้อนกัน ลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบแผ่นที่บ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าขั้วลบแบบต่อขนานจำนวน 10 แผ่น

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

3.2.1 การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิกิริยา

ถังปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย และแบบมีรอยต่อของสารละลาย ด้วยกระดาษเซลล์โลเฟน แผ่นแก้วพรุนเบอร์ 4 (sintered glass) ขนาดรูพรุน 10 ไมโครเมตร และ ฐานอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์นำมาใช้ทดสอบและเปรียบเทียบผล บรรจุขั้วไฟฟ้า แคโทด (ขั้วลบ) ที่ทำจากแผ่นทองแดงขนาด 2 x 4 ตารางเซนติเมตร ลงในสารละลาย KMnO_4 ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และบรรจุขั้วไฟฟ้าแอโนด (ขั้วบวก) ที่ทำจากแผ่นทองแดงขนาดเดียวกัน ลงในสารละลาย NaCl เข้มข้น 3 โมลาร์ ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ทำการให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่แก่ระบบที่ 10 โวลต์ เป็นเวลา 20 นาที กรองสารละลายด้วยกระดาษ

กรองเบอร์ 41 จากนั้นทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้น KMnO_4 ด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร

3.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย

น้ำเสียสังเคราะห์ของโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ปริมาตร 950 มิลลิลิตร ที่มีสังกะสี 155 มิลลิกรัมต่อลิตร (2.4 มิลลิโมลต่อลิตร) ค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าพีเอช 1.7 ลงในถังปฏิกรณ์ถังแคโทดที่มีขั้วไฟฟ้าขนาด 2×10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 10 แผ่น บรรจุอยู่ และบรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลต่อลิตร (117,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ปริมาตร 950 มิลลิลิตร ลงในถังปฏิกรณ์ถังแอโนดที่มีขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์ขนาด 10×10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น การทดลองกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์นี้ ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีแบ่งออกได้เป็นส่วนหลักๆ ดังนี้

3.2.2.1 ศึกษาหาชนิดของขั้วแคโทดที่ให้ผลการกำจัดสังกะสีที่ดีที่สุด โดยทำการควบคุมกระแสคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมป์ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (PC Power GW, INSTEK) และปรับเปลี่ยนขั้วแคโทดเป็นชนิดเหล็ก อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ทำการตรวจวัดค่าพีเอชด้วยเครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter Denver Instrument, model 215) และวัดค่าความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrophotometer, GBC Avanza) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.4

3.2.2.2 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า นำขั้วไฟฟ้าที่เลือกได้ในหัวข้อ 3.2.2.1 มาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เวลา ในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 17-125 แอมป์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ทำการตรวจวัดค่าต่างๆตามการทดลองหัวข้อ 3.2.2.1

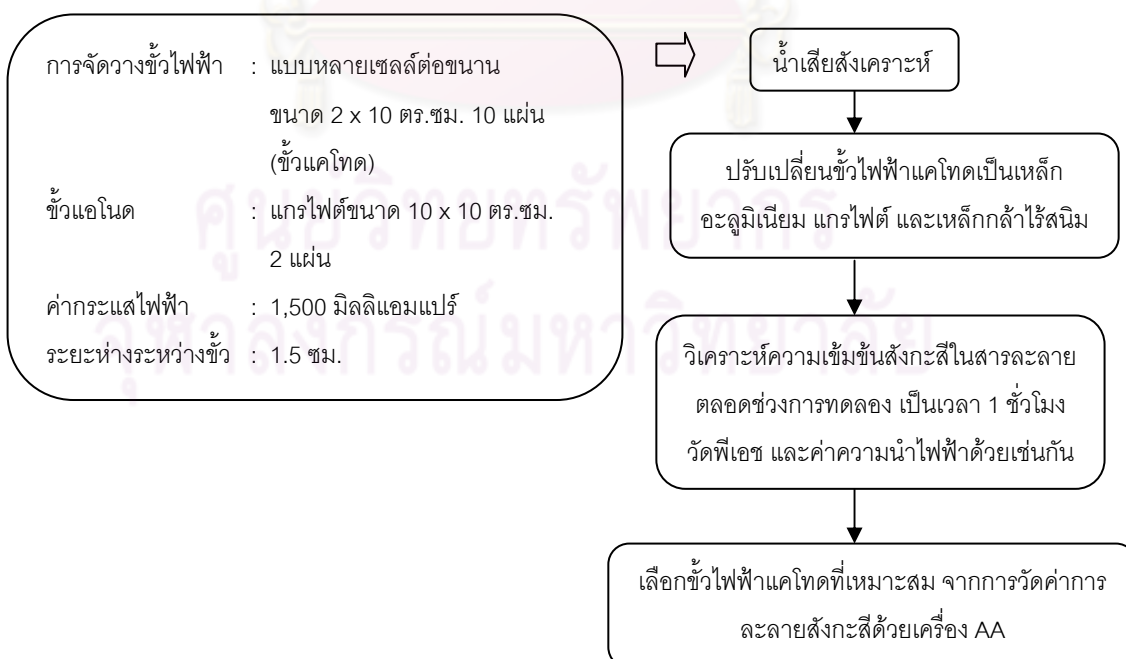
3.2.2.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแส: ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส เวลา และประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์

3.2.2.4 นำ model ที่ได้ไปใช้กับน้ำเสียจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.6

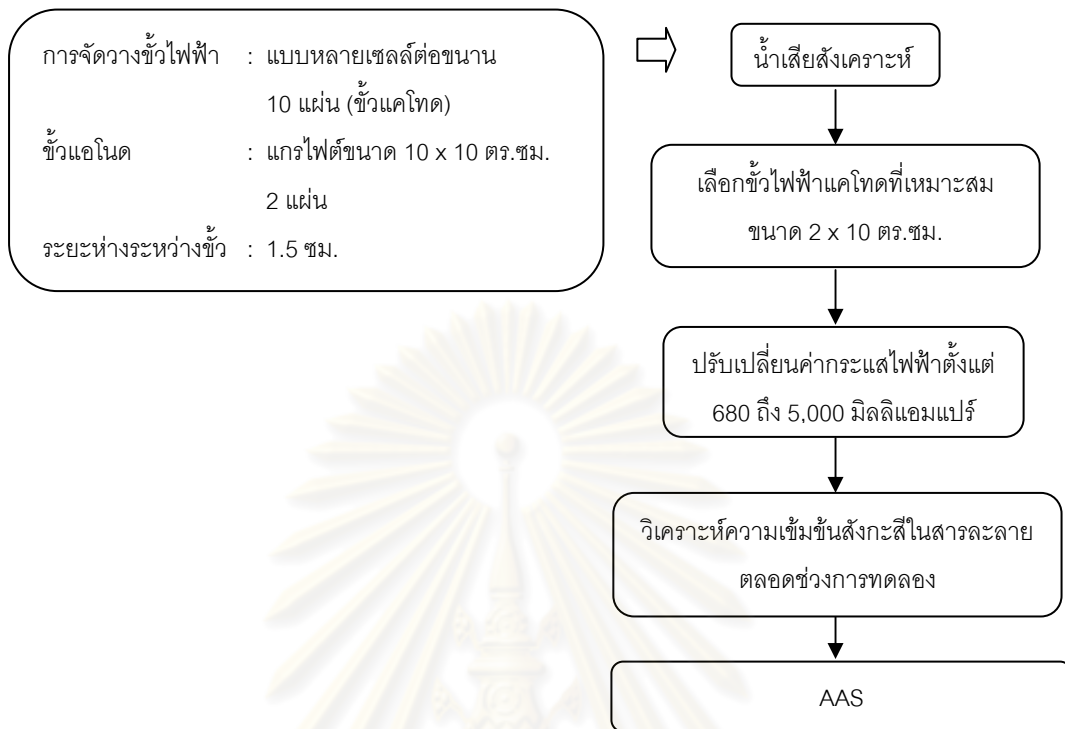
3.2.2.5 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า ที่มีต่อการกำจัดสิ่งก่สน้ำเสีย
สังเคราะห์เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าขั้วลบแบบเซลล์ขนาน 10 แผ่น และขั้วบวก
2 แผ่น

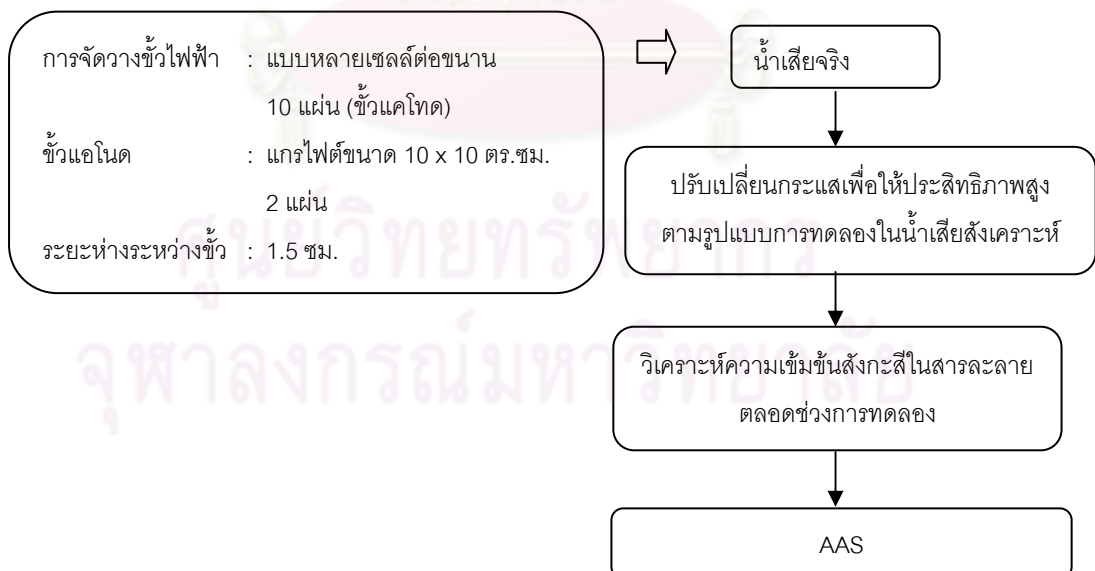
ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดและขนาดพื้นที่ของขั้วแอโนด 2. ชนิดและขนาดพื้นที่ของขั้วแคโทด	1. แกรไฟต์ 10 x 10 ตร.ซม. 2.1 แกรไฟต์ 2.2 อะลูมิเนียม } 2 x 10 ตร.ซม. 2.3 เหล็ก 2.4 เหล็กกล้าไร้สนิม
3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขั้วลบ 4. เวลาเก็บกัก 5. พีเอชตั้งต้น	3. 1.5 เซนติเมตร 4. 1 ชั่วโมง 5. 1.6
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. กระแสไฟฟ้า	1. 1,500 มิลลิแอมแปร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัด	1. ค่าความเข้มข้นของสิ่งก่สน้ำเสีย
ตัวแปรที่ไม่ได้ควบคุม	1. อุณหภูมิ 2. พีเอช 3. ความนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 วิธีการทดลองการหาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดสิ่งก่สน้ำเสีย



รูปที่ 3.5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เวลา และประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์



รูปที่ 3.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เวลา และประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริง

บทที่ 4

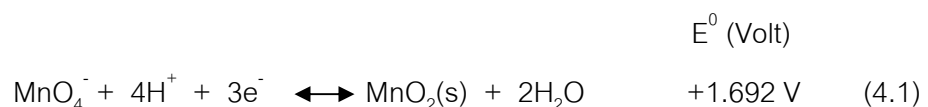
ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 155 มิลลิกรัมต่อลิตร (2.4 มิลลิโมลต่อลิตร) ค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และค่าพีเอช 1.7 โดยใช้การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเชิงกระแสเพิ่มสูงขึ้นหรือคงที่ยาวนานที่สุดตลอดช่วงเวลาในการกักเก็บ

ผลการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีและประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน แบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิริยา ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงด้วยวิธีปรับค่าความหนาแน่นกระแสอย่างต่อเนื่อง และการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

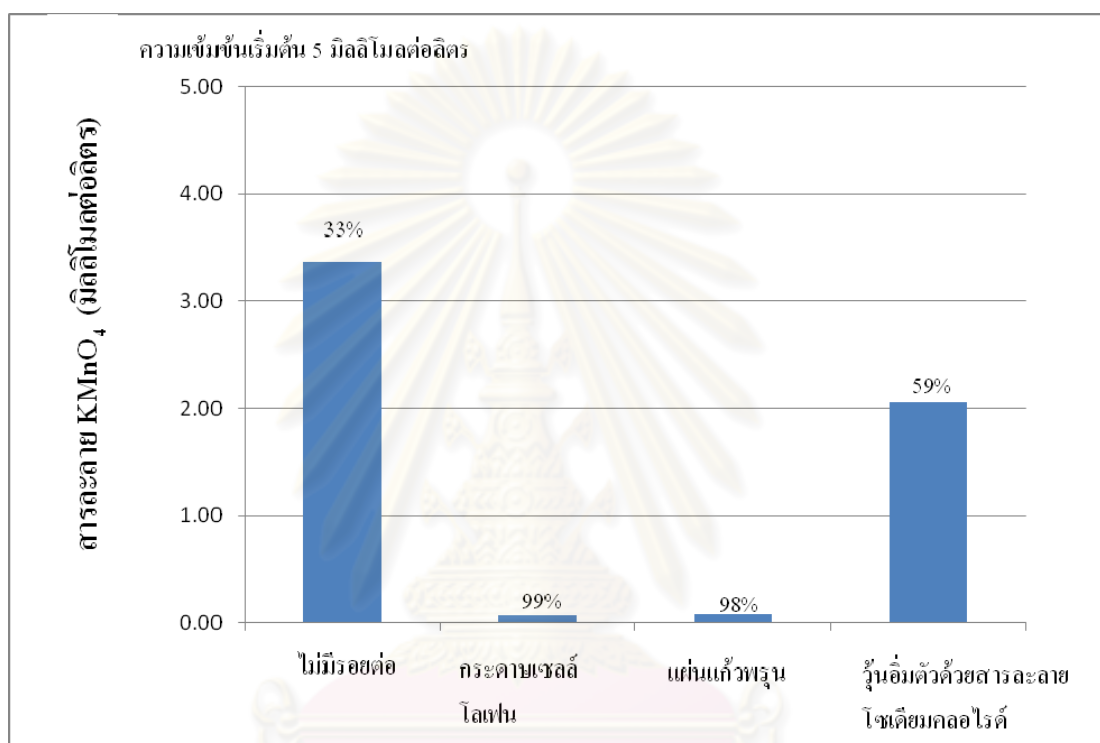
4.1 การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิริยา

ถังปฏิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย และแบบมีรอยต่อของสารละลาย ด้วยกระดาษเซลลูลอสเฟน แผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) และวุ้นอิมตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ถูกทดสอบและเปรียบเทียบผล โดยอาศัยการติดตามการดำเนินไปของปฏิริยารีดักชันของ KMnO_4 (สมการที่ 4.1) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิโมลต่อลิตร หลังทำการผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์ เป็นเวลา 20 นาทีแก่ระบบ ทำการตรวจวัดความเข้มข้นของ KMnO_4 ที่เหลืออยู่ในสารละลายด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) ค่าความเข้มข้นของ KMnO_4 ที่วัดได้ถูกนำมาแสดงไว้ในรูปที่ 4.1



เลือกใช้ KMnO_4 มาทดสอบในขั้นตอนการออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิริยา เนื่องจากเป็นสารเคมีที่สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงได้ง่ายเนื่องจากมีสีม่วงเข้ม และวัดค่าความ

เข้มข้นที่เปลี่ยนไปได้ง่ายโดยใช้เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร และใช้ขั้วทองแดงเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเนื่องจากขั้วทองแดงหาได้ง่าย ราคาถูก และสามารถตัดขนาดได้ตามต้องการเนื่องจากมีความบางและอ่อนนุ่มเป็นรูปได้



รูปที่ 4.1 ค่าความเข้มข้นของ KMnO_4 ในถังปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย และแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยกระดาษเซลล์โลเฟน แผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) และรู้นิ่มตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาที

จากผลการทดลองพบว่าปฏิกริยารีดักชันของ KMnO_4 เกิดขึ้นได้เพียง 33% ในถังปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีดำเนินการของปฏิกริยาเดียวกันนี้ ในถังปฏิกริยาที่มีรอยต่อของสารละลายทั้ง 3 แบบ โดยในถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อสารละลายที่ทำจากกระดาษเซลล์โลเฟน แผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) และรู้นิ่มตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบการดำเนินการของปฏิกริยารีดักชันของ KMnO_4 99%, 98% และ 59% ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการควบคุมศักย์ไฟฟ้าที่ค่าเดียวกัน ระยะเวลาเท่ากัน

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ทำด้วย กระจกเซลล์โลเฟน และแผ่นแก้วพรุนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) ซึ่งมีค่าการดำเนินไปของ ปฏิกิริยาที่สูงถึง 99% และ 98% ตามลำดับ พบว่าถึงปฏิกิริยาที่มีกระจกเซลล์โลเฟนเป็น องค์ประกอบ พบการเปื่อยยุ่ยของกระจกเซลล์โลเฟน และเมื่อทิ้งสารละลายไว้ในถังปฏิกิริยา นานเกิน 1 ชั่วโมง พบการปนเปื้อนของสารสีเขียวลงมาในสารละลายดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สีของสารละลายในถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อด้วยกระจกเซลล์โลเฟน

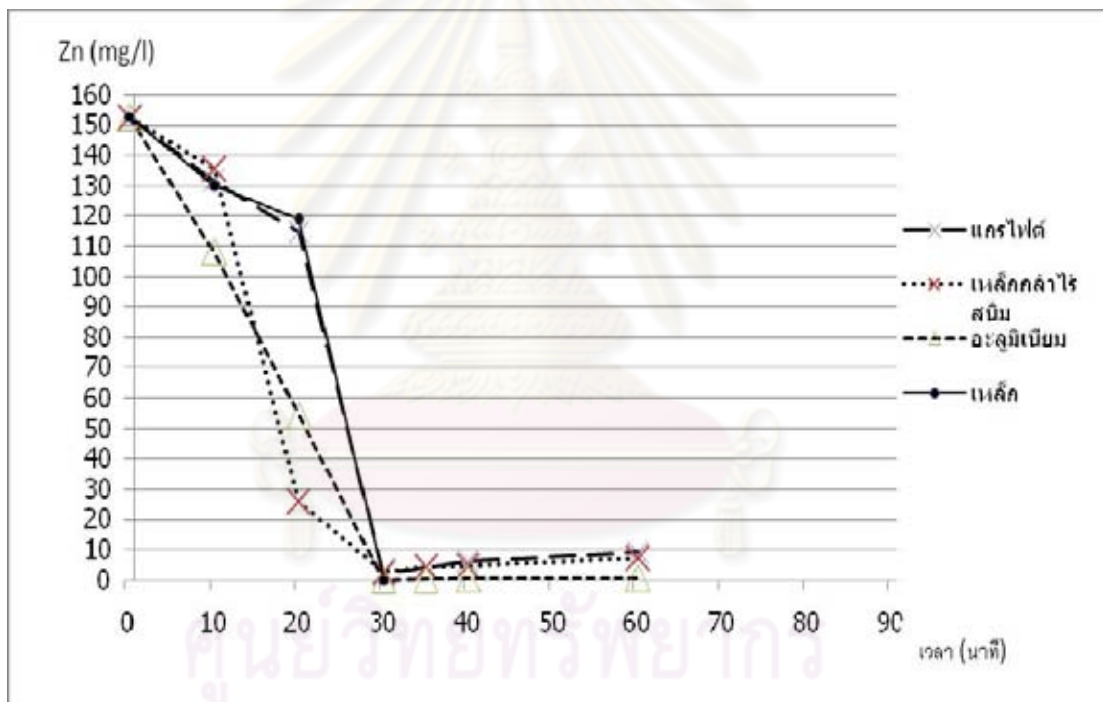
(หลอดขวา) หลังการกำจัดสี KMnO_4 เมื่อผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาทีเทียบกับ น้ำกลั่น (หลอดซ้าย)

จากรูปที่ 4.2 สีเขียวเหลืองที่ออกมาในสารละลาย คาดว่าเป็นสารที่ละลาย ออกมาจากกระจกเซลล์โลเฟน เนื่องจากกระจกเซลล์โลเฟนเป็นวัสดุที่ทำจากเซลลูโลส (cellulose) ในไม้หรือพืชเส้นใยอื่น ๆ เคลือบด้วยสารป้องกันความชื้นอัน ได้แก่ ไนโตรเซลลูโลส โพลีไวนิลคลอไรด์ ไวนิลโคพอลิเมอร์ และโพลีเอทิลีน ซึ่งสารเหล่านี้อาจทำปฏิกิริยากับสารละลาย KMnO_4 หรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไป จึงทำให้ปล่อยสีเขียวเหลืองออกมา (รูปที่ 4.2) ดังนั้นถึง ปฏิกิริยาที่มีกระจกเซลล์โลเฟนเป็นองค์ประกอบจึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีสถานะความเป็นกรดสูง ถึงแม้อัตราการดำเนินไปของปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ด้วยเหตุผลดังกล่าว ทำให้ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อสารละลายที่ทำด้วยแผ่นแก้วพรุนจึงมีความ เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับการทดสอบการกำจัดสีออกจากน้ำเสียอุตสาหกรรมในลำดับต่อไป

4.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย

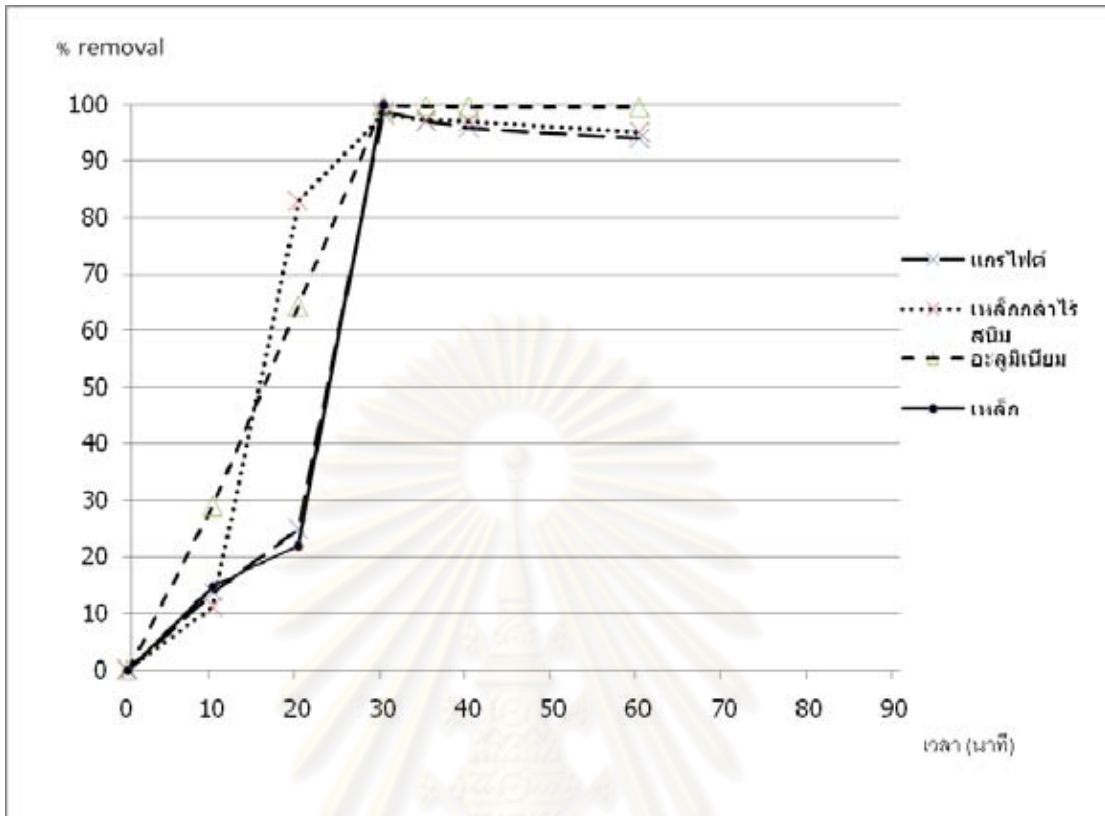
4.2.1 ชนิดของขั้วไฟฟ้า

บรจน้ำเสียสังเคราะห์ลงในถังปฏิกิริยาที่มีรอยต่อสารละลายที่ทำมาจากแผ่นแก้วพอรุน ให้กระแสไฟฟ้าคงที่ 1,500 mA แก่ระบบ ผ่านขั้วไฟฟ้าแคโทดชนิดต่างๆ ได้แก่ เหล็ก อะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาที (รูปที่ 4.3) ซึ่งคิดเป็น 100%, 100%, 99% และ 98% ของ การกำจัดสังกะสี ตามลำดับ (รูปที่ 4.4)



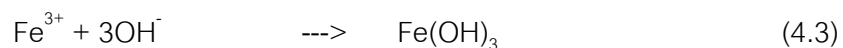
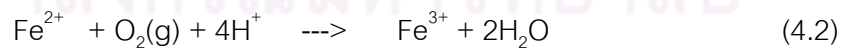
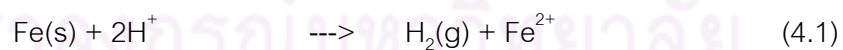
รูปที่ 4.3 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้ขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์

เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และเหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 mA



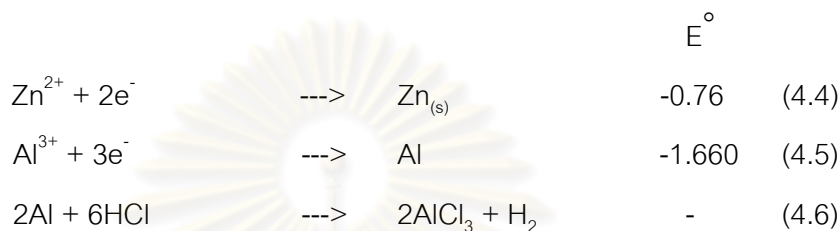
รูปที่ 4.4 ค่าร้อยละการกำจัดสิ่งก่สียเทียบกับเวลาเมื่อใช้ขั้วแคโทด เป็นแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และเหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 mA

จากผลการทดลองพบว่า ขั้วเหล็กและอะลูมิเนียมให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัด สิ่งก่สียสูงที่สุด แต่จากการสังเกตลักษณะของสารละลาย พบตะกอนสีส้มแดงของเหล็กไอออน เกิดขึ้นตั้งแต่ 10 นาทีแรกที่เริ่มทำการทดลอง เป็นผลมาจากการละลายของขั้วเหล็กตามปฏิกิริยา ที่ 4.1 ถึง 4.3



ขั้วเหล็กเมื่ออยู่ในสารละลายกรดจะละลายออกมาในรูป Fe^{2+} จากนั้น Fe^{2+} ซึ่งไม่ ค่อยอยู่ตัว สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศในสภาวะกรด แล้วถูกออกซิไดส์เปลี่ยนเป็น Fe^{3+} (ทำให้สารละลายมีสีเหลืองส้มจางๆ) เมื่อมี Fe^{3+} เกิดขึ้นในสารละลาย ร่วมกับมี OH^- เกิดขึ้น ในสารละลายด้วย Fe^{3+} จะทำปฏิกิริยาได้ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (ทำให้สารละลายมีตะกอนสีน้ำตาลแดง)

ดังนั้นข้อเท็จจริงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการกำจัดสังกะสีหรือโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่มีสถานะความเป็นกรดสูง เมื่อพิจารณาข้ออะลูมิเนียม ซึ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดสังกะสีสูงสุดเหมือนข้อเท็จจริงเช่นกัน พบว่าข้ออะลูมิเนียมมีลักษณะบางลงหลังทำการทดลอง ซึ่งแสดงถึงการละลายหรือการกัดกร่อนของข้อตามปฏิกิริยาที่ 4.4 ถึง 4.6



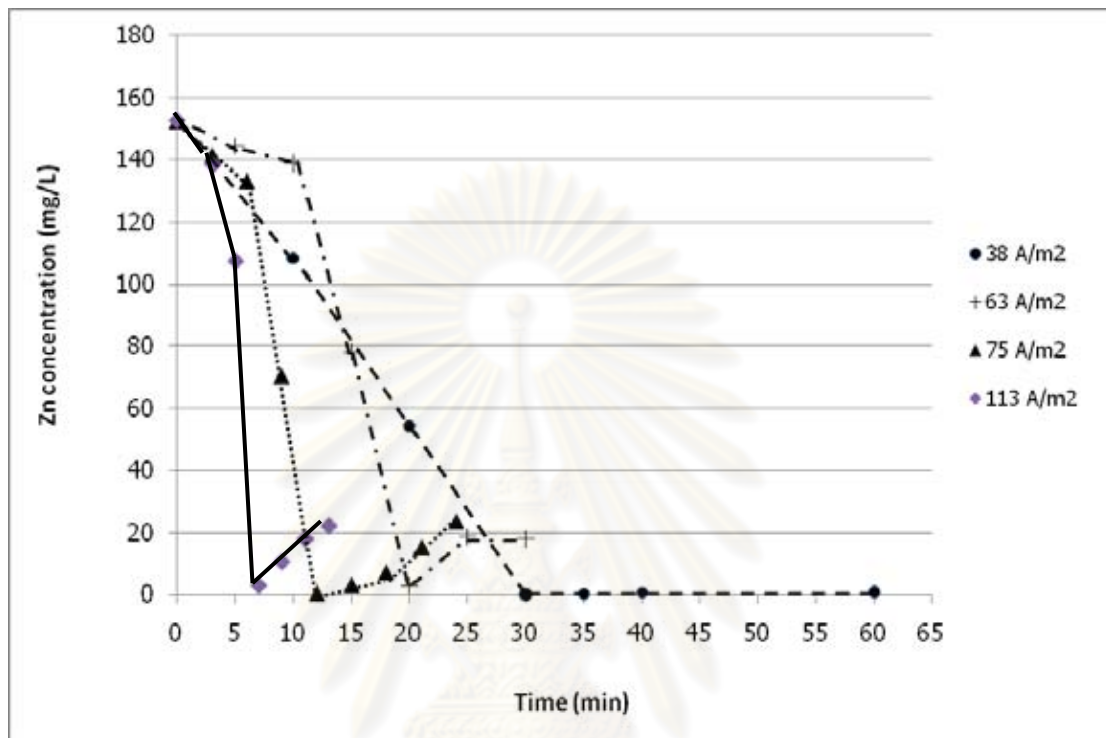
เมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยาที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า สังกะสีสามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันบนแผ่นอะลูมิเนียมได้เองโดยไม่ต้องให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป (ปฏิกิริยาแบบกัลวานิก) ทำให้ข้ออะลูมิเนียมเกิดการสึกกร่อนลงไปในสารละลาย (ปฏิกิริยาที่ 4.5 แบบย้อนกลับ) และเมื่อสังเกตสารละลายระหว่างการทดลองยังพบของแข็งแขวนลอยสีเทาดำเกิดขึ้นกระจายทั่วสารละลาย คาดว่าเป็น $AlCl_3$ จากปฏิกิริยาที่ 4.6 ลักษณะดังกล่าวทำให้ข้ออะลูมิเนียมไม่เหมาะสมในการใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย

ขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิมให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสังกะสีสูงกว่า 98% และไม่พบการละลายหรือการกัดกร่อนของขั้วลงสู่สารละลาย ดังนั้นขั้วทั้งสองจึงสามารถนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดเพื่อการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่มีสถานะความเป็นกรดสูงนี้ได้ ซึ่งขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมมีราคาต่อหน่วยต่ำกว่าขั้วแกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิมในทางโลหกรรมถือว่าเป็นโลหะผสมเหล็ก ที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% เป็นฟิล์มบางๆเคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อสแตนเลสได้เป็นอย่างดี ป้องกันการเกิดการกัดกร่อนจากสารละลายที่เป็นกรดและไม่ซำรุดหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป ดังนั้นในการทดลองต่อจากนี้จึงเลือกใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

4.2.2 ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75

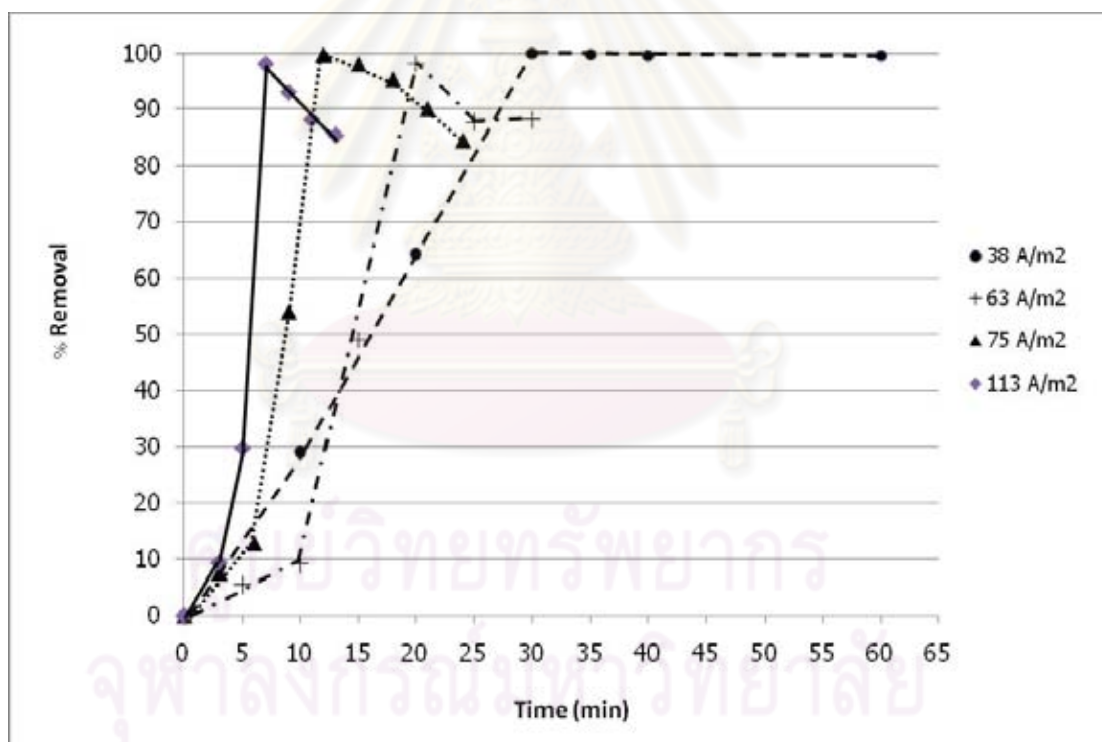
และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (การคำนวณตามภาคผนวก ข.3) โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อให้เวลาในการผ่านกระแสไฟฟ้านานขึ้น โดยอัตราการลดลงของปริมาณสังกะสีจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้มามีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสังกะสีในสารละลายลดลงจนมีความเข้มข้นน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 30 ถึง 60 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 ถึง 24 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 75 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 12 ถึง 15 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 7 ถึง 8 นาที เมื่อผ่านช่วงเวลาที่ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้ง 4 ค่า จะมีการละลายกลับของสังกะสีเกิดขึ้นซึ่งสาเหตุถูกกล่าวไว้ในหัวข้อ 4.2.3

รูปที่ 4.6 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สังกะสีที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ เทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ควบคุม โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่า 155 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลอง พบว่า ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าที่ 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 30 นาที ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 100% คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 5 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.4) ที่ 63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 20 นาที ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 98% คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 8 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที ที่ 75 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 12 นาที ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 100% คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 13 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที และที่ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 7 นาที ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 98% คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 22 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที



รูปที่ 4.6 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลาเมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

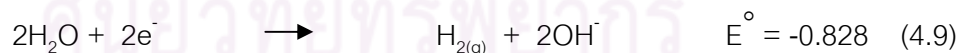
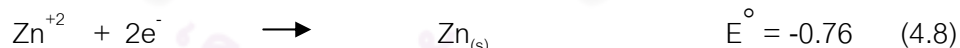
จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้น สามารถกำจัดสังกะสีให้ลดลงได้อย่างรวดเร็วโดยใช้ระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีออกจาก

น้ำเสียสั้นลงกว่าการควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า แต่เมื่อพิจารณาระยะเวลาที่ความเข้มข้นของสังกะสีอยู่ในช่วงผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร กลับพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำๆ สามารถลดสังกะสีให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ในระยะเวลาที่ยาวนานและคงที่กว่าการควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ความหนาแน่นกระแส 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตรซึ่งเป็นความหนาแน่นกระแสต่ำสุด สามารถลดสังกะสีให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ยาวนานและคงที่ตั้งแต่เวลาที่ 30 ถึงเวลาที่ 60

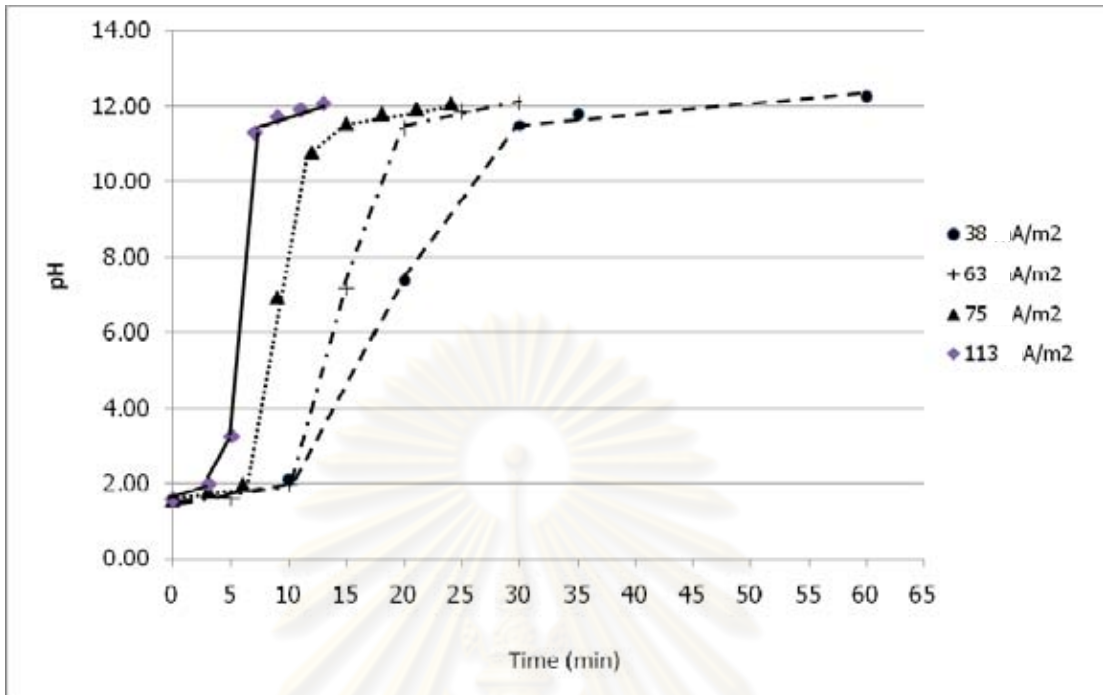
4.2.3 ฟิเอซ

น้ำเสียสังเคราะห์มีค่าฟิเอซเริ่มต้นที่ 1.7 ซึ่งได้จากการเติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร เมื่อทำการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด ทำการตรวจวัดค่าฟิเอซจากน้ำเสียสังเคราะห์ตลอดช่วงการทดลอง โดยการเปลี่ยนแปลงของฟิเอซเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 และสามารถอธิบายสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงค่าฟิเอซในแต่ละช่วงเวลาได้ โดยอาศัยสมการที่ 4.7 – 4.9

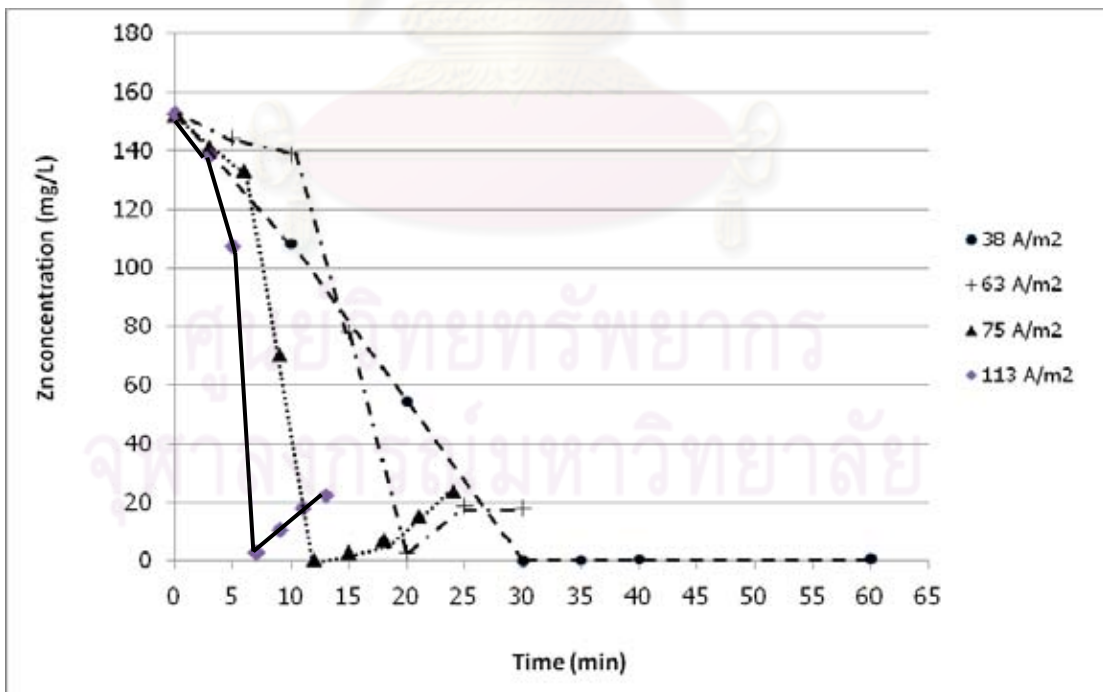
ปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าแคโทด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

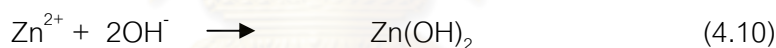


รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด

จากการทดลองค่าพีเอชมีการปรับเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันในแต่ละช่วงเวลา (รูปที่ 4.7) และมีความสัมพันธ์กับอัตราการลดลงของปริมาณสังกะสีในสารละลาย (รูปที่ 4.5) ดังนี้

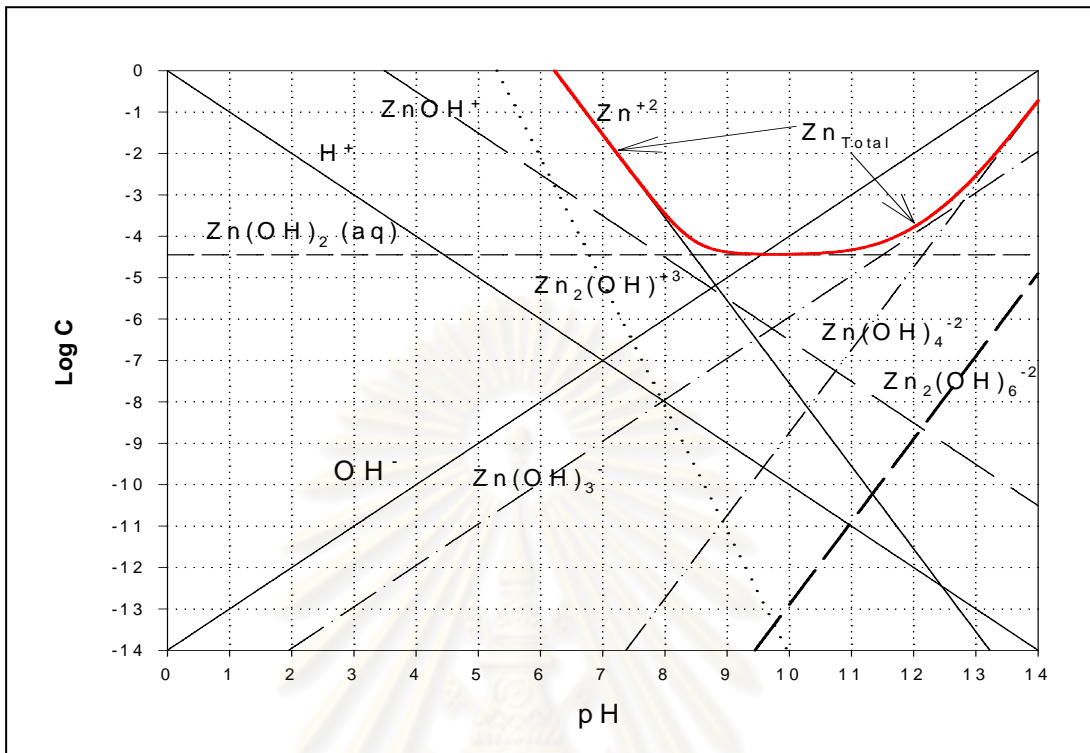
ช่วงต้น : 0 ถึง 3 หรือ 5 หรือ 10 นาที (ขึ้นกับค่าความหนาแน่นกระแสแต่ละค่า) ในช่วงต้นของการทดลอง เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 0 ถึง 3 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 0 ถึง 5 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 75 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 0 ถึง 10 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 0 ถึง 10 นาที พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด หลักๆ คือปฏิกิริยาที่ 4.7 และ 4.8 ค่าพีเอชมีการปรับเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็วช้าๆ ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการลดลงของปริมาณสังกะสีที่มีความเข้มข้นลดลงน้อย (รูปที่ 4.5)

ช่วงกลาง : กระแสที่เหลือในวงจรเป็นผลมาจากปฏิกิริยา 4.7, 4.8 และ 4.9 เป็นหลัก โดยสังเกตจากอัตราการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชที่สูง และเมื่อปฏิกิริยา 4.9 ดำเนินต่อ จะได้ผลิตภัณฑ์คือ OH^- และ OH^- ที่เกิดจะส่งผลให้เกิด $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ตามสมการที่ 4.10



ดังนั้นจะพบอัตราการลดลงของสังกะสีในสารละลายเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยา 4.7 และ 4.9

ช่วงปลาย : เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นมากในช่วงกลางของการทดลอง แสดงว่าความเข้มข้นของ H^+ ลดลงอย่างมากหรือหมดไป ทำให้ปฏิกิริยาที่ดำเนินอยู่ในช่วงเวลานี้ หลักๆ คือปฏิกิริยาที่ 4.5 ดังนั้นจึงพบอัตราการเพิ่มขึ้นของพีเอชลดลง (ตามปฏิกิริยาที่ 4.3 เท่านั้น) และในช่วงเวลานี้ค่าพีเอชมีค่าอยู่ในช่วงพีเอช 11-12 ซึ่งเป็นช่วงที่ตะกอน $\text{Zn}(\text{OH})_2$ (ปฏิกิริยาที่ 4.10) สามารถละลายกลับลงสู่สารละลาย (Benjamin, 2002) ดังแสดงในรูป 4.8 จึงพบการเพิ่มขึ้นของสังกะสีในช่วงเวลานี้ (รูปที่ 4.5)

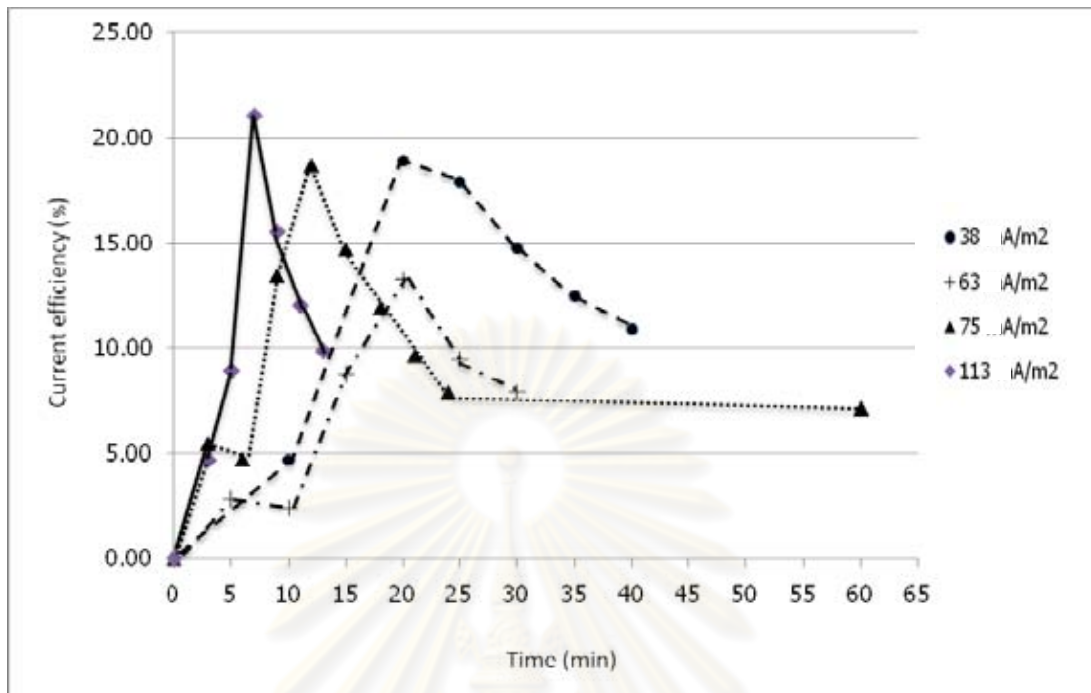


รูปที่ 4.8 แผนภาพการละลายของ $Zn(OH)_2$ (Benjamin, 2002)

4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแส

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสีหรือโลหะหนักออกจากสารละลายเทียบกับปริมาณพลังงานหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

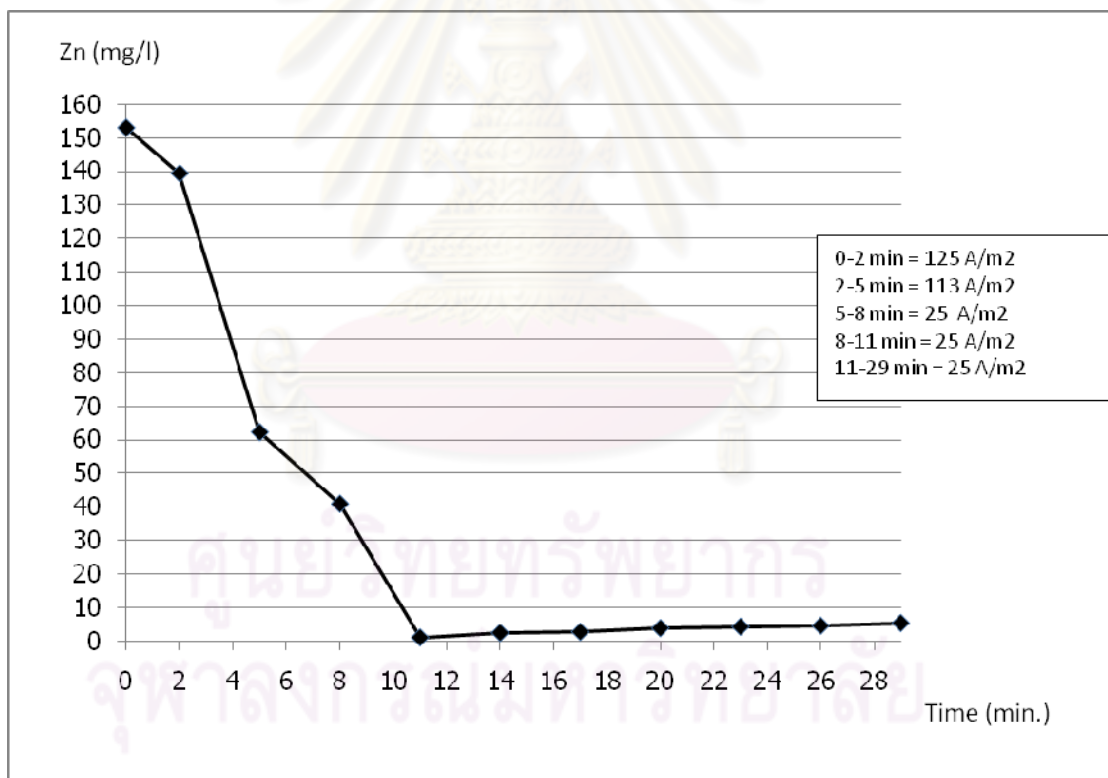


รูปที่ 4.9 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร บนขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

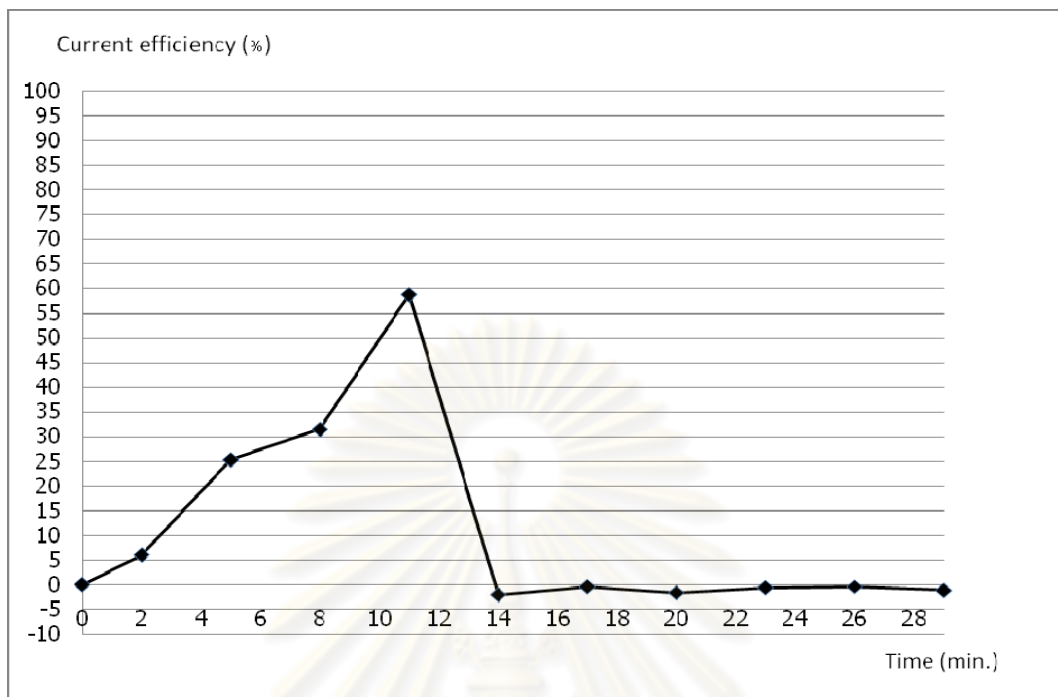
รูปที่ 4.9 แสดงค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่คำนวณได้จากการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร แก่น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 155 มิลลิกรัมต่อลิตร (2.4 โมลต่อลิตร) พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่คำนวณได้ในแต่ละชุดการทดลองมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม กล่าวคือ เมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบในปริมาณที่สูง ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูงที่สุดก็จะมีค่ามากด้วย เช่น เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่คำนวณได้มีค่า 19%, 13%, 19% และ 21% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโดยใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่มีประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 7% โดยใช้ระยะเวลากำจัดยาวนานถึง 6 ชั่วโมง (สหรัฐ เซารูปดี, 2552) และจากการทดลองหลังจากผ่านจุดสูงสุดของค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสแล้ว พบว่าประสิทธิภาพเชิงกระแสตกลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งการลดลงนี้สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงๆ ประสิทธิภาพเชิงกระแสจะตกลงเร็วกว่าการควบคุมกระแสไฟฟ้าต่ำๆ นอกจากนี้ผลการทดลองในรูปที่ 4.9 ยังแสดงให้เห็นว่าเวลาที่พบการเกิดประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดนี้จะลดลงเมื่อปริมาณความหนาแน่นกระแสที่

ให้กับระบบมีค่ามากขึ้น เช่น พบค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด ณ เวลา 20, 20, 12 และ 7 นาที เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 แอมแปร์ต่อตารางเมตรตามลำดับ แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสมากกว่า 50% ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าวมานี้ สามารถใช้เป็นแนวทางในการกำหนดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและเวลาที่ควบคุมให้เกิดความเหมาะสม เพื่อหลีกเลี่ยงการตกลงของประสิทธิภาพเชิงกระแสหลังผ่านจุดสูงสุด และมีผลทำให้สามารถรักษาระดับของประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีให้สูงตามสมควรได้ตลอดระยะเวลาของการทดลอง ส่งผลให้เกิดการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในที่สุด

รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงอัตราการลดลงของสังกะสีและค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลา เมื่อปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ควบคุมตามเวลาดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.10 การลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลา เมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยน
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมในช่วงระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง
พร้อมความเข้มข้นของสังกะสีและประสิทธิภาพเชิงกระแสที่ได้

ระยะเวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	ความเข้มข้นสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
0-2	125	140	6
2-5	113	62	25
5-8	25	41	32
8-11	25	1	59
11-14	25	2	-2
14-17	25	3	0
17-20	25	3	-2
20-23	25	4	-1
23-26	25	4	0
26-29	25	5	-1

จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 พบว่า ปริมาณสังกะสีลดลงอย่างรวดเร็ว ภายในเวลา 11 นาที ส่งผลให้ค่าความค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสได้สูงสุดที่ 59% ซึ่งมีความมากกว่า ค่าสูงสุดที่ได้เมื่อไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม (รูปที่ 4.9) ซึ่งแนวคิดนี้เป็นผลมาจากการใช้กระแสหรือควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงๆ ทำให้ใช้เวลา ในการกำจัดสังกะสีเร็วขึ้น แต่หากใช้ความหนาแน่นกระแสสูงคงที่ตลอดการทดลองจะทำให้กำจัด สังกะสีผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้ไม่ถึง 1 นาที จะทำให้สังกะสีละลาย กลับสู่สารละลายเช่นเดิม (รูปที่ 4.8) ดังนั้นจึงต้องใช้ความหนาแน่นกระแสสูงในช่วงแรกและค่อยๆ ปรับความหนาแน่นกระแสให้ต่ำลง ทำให้สามารถป้องกันการละลายกลับของโลหะสังกะสีลงสู่ สารละลาย เนื่องจากสังกะสีละลายได้ดีในกรดแก่และด่างแก่ (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2545) เป็นผล ให้สามารถควบคุมปริมาณสังกะสีที่ละลายในน้ำเสียให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลายาวนานหรือตลอดการทดลองได้ โดยในการทดลองนี้สามารถควบคุม ให้สังกะสีมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ได้ ทำให้สามารถเก็บกักไว้ในถังปฏิกิริยาต่อได้ โดยควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ช่วยทำให้สังกะสีไม่ละลาย กลับมาในถังปฏิกิริยาตั้งแต่หน้าที่ที่ 11 จนถึงหน้าที่ที่ 26 รวมเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งคาดว่าเพียงพอ สำหรับการนำไปปรับใช้ในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียในระดับอุตสาหกรรม (เหตุผลจะ อธิบายในหัวข้อต่อไป)

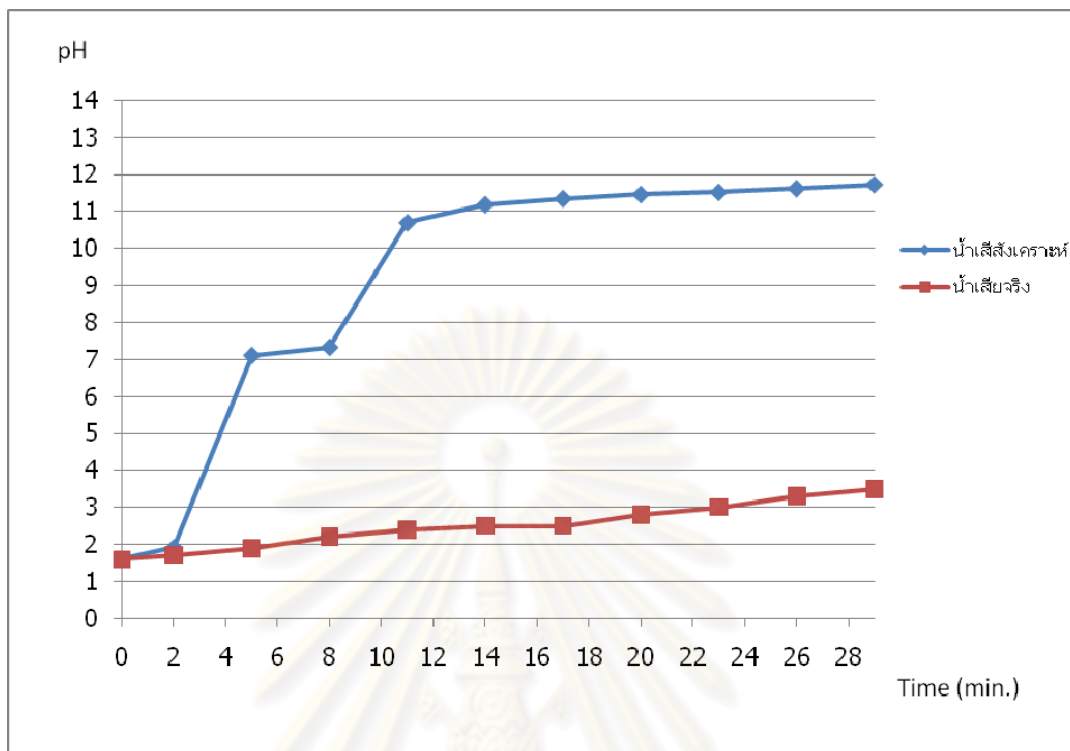
4.4 การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงด้วยวิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่าง ต่อเนื่อง

น้ำเสียจริงเก็บมาจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตเส้นใย ที่จัดได้ว่าเป็น กระบวนการผลิตหลักของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยน้ำเสียที่เก็บมามีลักษณะสีเหลือง ใส ประกอบด้วยโลหะหนักที่สำคัญ คือ สังกะสี ปริมาณ 155 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.7 ค่าความ นำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และมีค่าพารามิเตอร์อื่นๆ อีก ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ปริมาณความเข้มข้น	วิธีการตรวจวัดค่า
พีเอช		1.7	pH meter
ไนเตรท	mg/l	27	ICP
ซัลเฟต	mg/l	11,800	ICP
ของแข็งแขวนลอย	mg/l	100	-
ซีโอดี	mg/l	3,200	-
ของแข็งละลายน้ำ	mg/l	23,600	-
สังกะสี	mg/l Zn	155	AAS

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ จึงนำรูปแบบการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามาใช้ทดลองกับน้ำเสียจริง ผลปรากฏว่าค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ในเวลาการกำจัด 29 นาทีตามการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเทียบกับเวลา เมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1 กับน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2.3 พบว่าการกำจัดสังกะสีเกิดขึ้นได้มากเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าสูง และจากรูปที่ 4.12 ในระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นไฟฟ้าตามตารางที่ 4.2 เป็นเวลา 29 นาที พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นจาก 1.7 เป็น 11.73 ซึ่งเกิดการกำจัดสังกะสีขึ้นเป็นลำดับดังที่ได้อธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 4.2.3 ในขณะที่น้ำเสียจริงมีค่าพีเอชเพิ่มจาก 1.7 เป็น 3.5 ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน ดังนั้นการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงจึงเกิดขึ้นในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เป็นผลให้ไม่สามารถนำรูปแบบการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ได้ดีกับน้ำเสียสังเคราะห์มาใช้กับน้ำเสียจริงได้โดยตรง

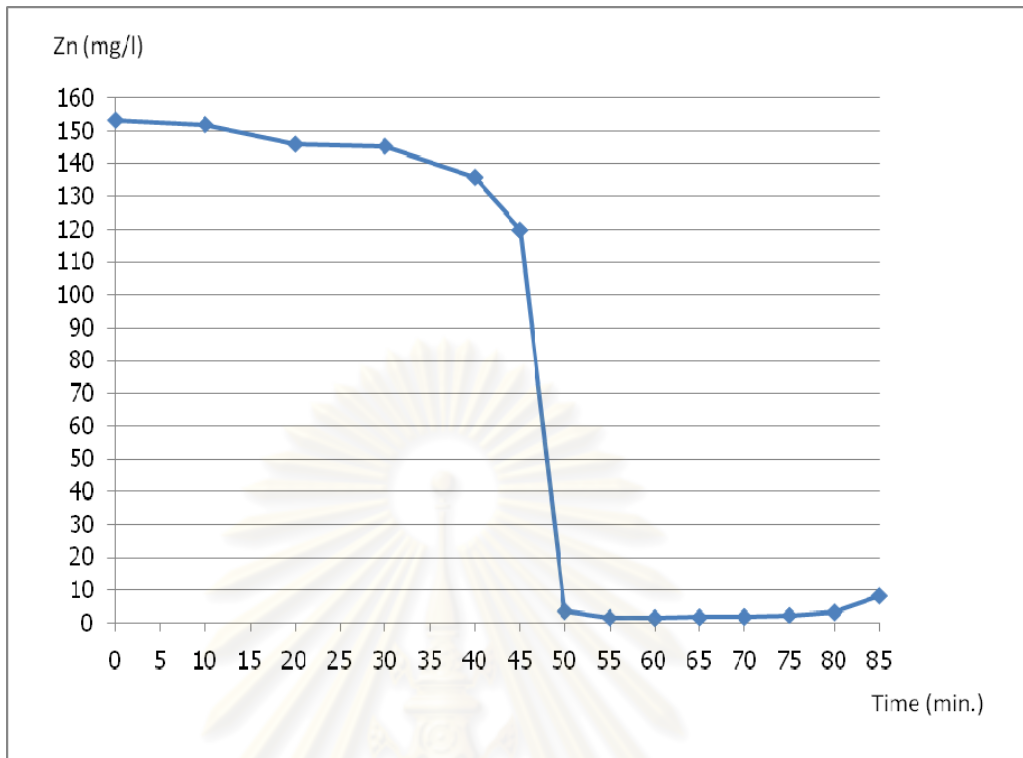
ตารางที่ 4.3 แสดงการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียจริง โดยอาศัยหลักการเดียวกันที่ใช้กับน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมในช่วงระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง พร้อมความเข้มข้นของสังกะสีและประสิทธิภาพเชิงกระแสที่ได้จากน้ำเสียจริง

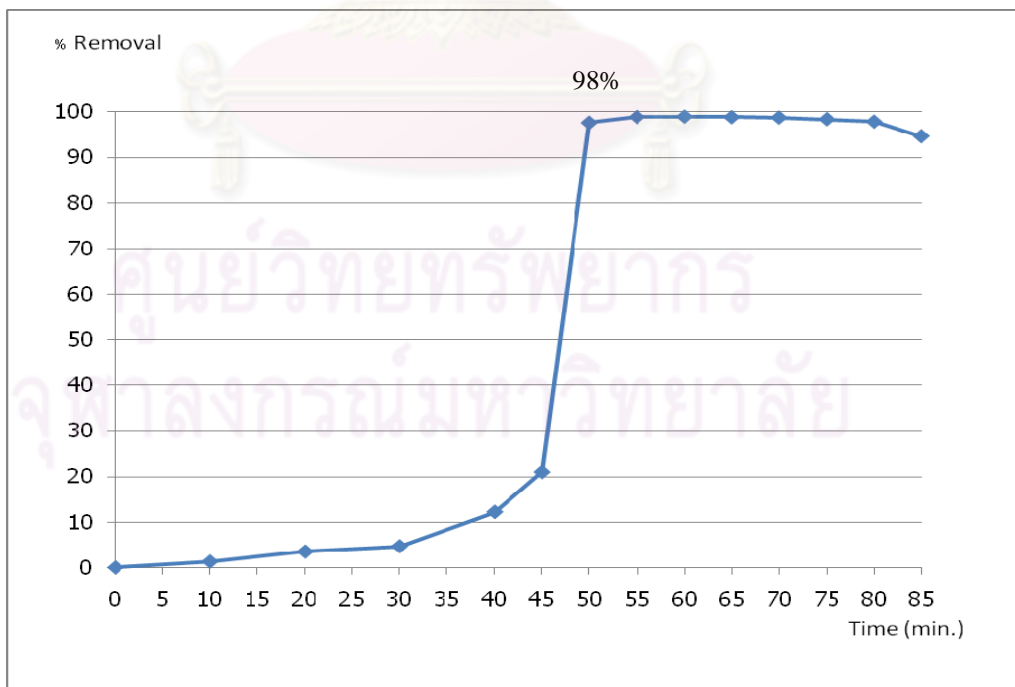
ระยะเวลา (นาทีก)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	ความเข้มข้นสังกะสี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
0-30	125	145	0
30-40	75	134	2
40-45	50	120	6
45-50	25	4	100
50-55	17	2	3
55-60	17	1	0
60-65	17	2	0
65-70	17	2	0
70-75	17	2	0
75-80	17	3	-1
80-85	17	8	-6

จากผลการทดลอง พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ในระยะเวลา 50 นาที (ตารางที่ 4.3) โดยสังกะสีในสารละลายลดลงเหลือ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัด 98% ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



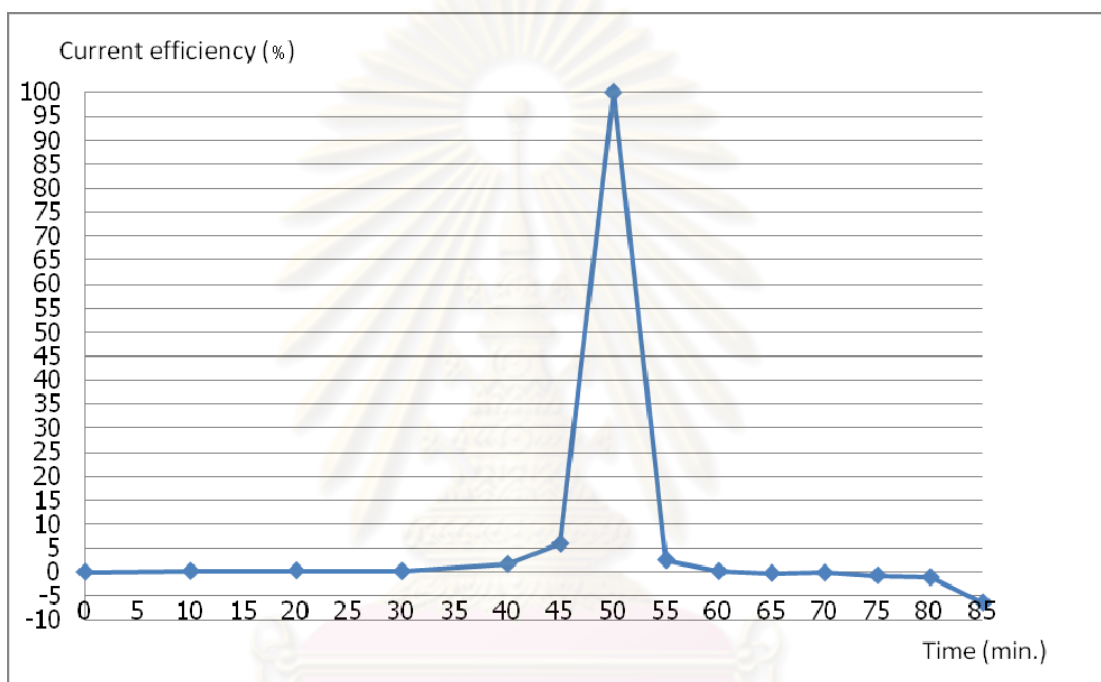
รูปที่ 4.13 การลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.14 ค่าร้อยละการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.3

รูปที่ 4.13 แสดงการลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลา เมื่อใช้การควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 125 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 0 นาที ถึง 30 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 75 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 30 นาที ถึง 40 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 40 นาที ถึง 45 นาที ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่เวลา 45 นาที ถึง 50 นาที และควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (เป็นค่าต่ำสุดที่เครื่องมือสามารถทำงานได้) ที่เวลา 50 นาที ถึง 85 นาที ซึ่งแนวคิดนี้เป็นผลมาจากการทดลองในส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งการใช้กระแสหรือควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงๆ ทำให้ใช้เวลาในการกำจัดสังกะสีเร็วขึ้น แต่หากใช้ความหนาแน่นกระแสสูงคงที่ตลอดการทดลองจะทำให้กำจัดสังกะสีผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ได้ไม่ถึง 1 นาที จะทำให้สังกะสีละลายกลับสู่สารละลายเช่นเดิม (รูปที่ 4.8) ดังนั้นจึงต้องใช้ความหนาแน่นกระแสสูงในช่วงแรกและค่อยๆปรับความหนาแน่นกระแสให้ต่ำลงโดยอาศัยแนวโน้มการปรับความหนาแน่นกระแสตามการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่างๆ ตามภาคผนวก ก. (ตารางที่ ก.9 ถึง ก.12) แนวคิดดังกล่าวทำให้สามารถกำจัดสังกะสีให้ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งลดลงภายในเวลา 50 นาที ส่งผลให้ค่าความประสิทธิภาพเชิงกระแสได้สูงสุดที่ 100% ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่ได้มีค่าสูงมาก เนื่องจากสังกะสีลดลงอย่างรวดเร็วจากความเข้มข้นสังกะสี 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ นาทีที่ 45 ลดลงเหลือ 4 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ นาทีที่ 50 และ ณ เวลา 50 นาที สามารถกำจัดสังกะสีได้ถึง 98% เป็นผลทำให้สามารถควบคุมปริมาณสังกะสีที่ละลายในน้ำเสียให้อยู่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลายาวนานหรือตลอดการทดลองได้ โดยในการทดลองนี้สามารถควบคุมให้สังกะสีมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ได้ ตั้งแต่นาทีที่ 50 จนถึงนาทีที่ 80 รวมเป็นเวลา 30 นาทีที่สามารถป้องกันการละลายกลับของสังกะสีได้ และการกำจัดสังกะสีได้ตั้งแต่นาทีที่ 50 คาดว่าสามารถช่วยประหยัดเวลาในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงในโรงงานเส้นใยเรยอนได้ ซึ่งค่าการออกแบบระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียในบ่อตกตะกอนเพื่อกำจัดโลหะหนักด้วยสารเคมี เช่น ปูนขาว โซดาไฟ เก็บกักในช่วงระยะเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อให้ตะกอนสามารถรวมตัวกันและตกตะกอนลงก้นบ่อตกตะกอน (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) แต่งานวิจัยนี้สามารถใช้ไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าตกตะกอนสังกะสีออกจากน้ำเสียเส้นใยเรยอนได้ในระยะเวลาที่สั้นลง คือสามารถกำจัดได้ตั้งแต่นาทีที่ 50 และมีร้อยละการกำจัดสูงถึง 98% เมื่อเทียบกับงานวิจัยการกำจัดสังกะสีด้วยการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีคงที่กระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้เพียง 24% และใช้เวลากำจัดถึง 6 ชั่วโมง (สหรัฐ เซารูปดี, 2552)

จากผลข้างต้น พบว่าค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.15 มีค่ามากกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ (รูปที่ 4.11) แต่ใช้ระยะเวลาในการกำจัด ยาวนานกว่าและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงน้อยกว่าน้ำเสียสังเคราะห์เล็กน้อย สาเหตุเนื่องมาจากองค์ประกอบที่แตกต่างกันระหว่างน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดง ตารางที่ 4.4

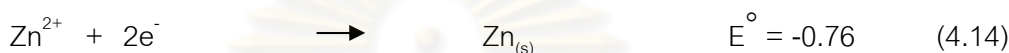
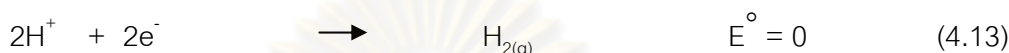
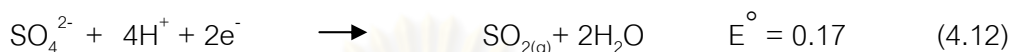
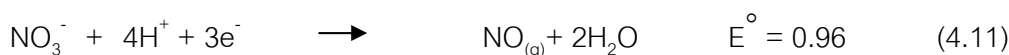


รูปที่ 4.15 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยน
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 สมบัติของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	น้ำเสียจริง	น้ำเสียสังเคราะห์
pH	1.7	1.6
Zinc, Total (mg/l)	155	155
Nitrate (mg/l)	27	-
Sulfate (mg/l)	11,800	-

จากตารางที่ 4.4 องค์ประกอบที่แตกต่างระหว่างน้ำเสียจริงกับน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ไออนไนเตรท ไออนซัลเฟต ซึ่งสามารถรับอิเล็กตรอน ได้ดีกว่าสังกะสี ดังแสดงในสมการที่ 4.11 ถึง 4.14



โดยไออนไนเตรทมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าไออนซัลเฟต แต่มีอยู่ในปริมาณน้อย ในขณะที่ไออนซัลเฟตมีอยู่ในปริมาณที่มากกว่าสังกะสีถึง 40 เท่า เมื่อเทียบเป็นอัตราส่วนต่อโมล ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุหลักที่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการลดลงของสังกะสี เกิดขึ้นได้ต่ำ ซึ่งงานวิจัยนี้ไม่ได้ศึกษาการกำจัดไนเตรทและซัลเฟตก่อน ดังนั้นเพื่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง ควรมียุทธศาสตร์การกำจัดไนเตรทและซัลเฟตก่อนการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

4.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

แบ่งค่าใช้จ่ายออกเป็น 2 ส่วน โดยไม่รวมค่าเครื่องควบคุมกระแสไฟฟ้า (Galvanometer) และสายไฟต่างๆ

4.5.1 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับอุปกรณ์และสารที่ใช้ซ้ำๆ ได้

Lab Scale (งานวิจัยนี้)

- ค่าถังปฏิกิริยา (ทำจากแผ่นอะครีลิก) ความจุ 1,274 มิลลิลิตร เท่ากับ 6,500 บาท (สำหรับฝั่งน้ำเสียจริงเท่านั้น)
- ค่าขั้วไฟฟ้า ซึ่งขั้วแคโทดที่ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 2 x 10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 10 แผ่น ราคา 20 บาท และขั้วแอโนดที่ใช้เป็นแกรไฟต์ ขนาด 10 x 10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ราคา 900 บาท

- ค่าสารละลายเกลืออิเล็กโทรไลต์ฝังแอนไอต์ (ในงานวิจัยนี้ใช้ NaCl เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 900 มิลลิลิตร) ราคา 21 บาท

$$\begin{aligned} \text{รวมเป็นค่าใช้จ่าย (บาท/ลบ.ม.)} &= \frac{6,500 + 20 + 900 + 21 \text{ บาท}}{1.274 \text{ ลิตร}} \\ &= 5,840 \text{ บาท/ลิตร} \\ &= 5,840,000 \text{ บาท/ลบ.ม. (Lab scale)} \end{aligned}$$

Plant Scale

- ค่าสร้างบ่อดกตะกอน (ทำจากคอนกรีต) อัตราน้ำเสียไหลก่อนเข้าบ่อดกตะกอนเท่ากับ 4,000 ลบ.ม./วัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551) ระยะเวลาที่เก็บน้ำสำหรับบ่อดกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีในงานวิจัยนี้ 50-80 นาที (ในการคำนวณจะใช้ 60 นาทีหรือ 1 ชั่วโมง)

$$\begin{aligned} \text{คำนวณจาก ขนาดบ่อดกตะกอน} &= 1 \text{ hr} \times \frac{1 \text{ d}}{24 \text{ hr}} \times \frac{4,000 \text{ m}^3}{\text{d}} \\ &= 170 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ความลึกน้ำบ่อดกตะกอนต้องไม่น้อยกว่า 0.9 เมตร (มันสิน ตัณฑุเลศน์, 2545)
ดังนั้นออกแบบบ่อดกตะกอนสูง 2 เมตร พื้นที่บ่อดกตะกอน

$$= 170 \text{ m}^3 / 2 \text{ m} = 85 \text{ m}^2$$

ใช้ปูนฉาบ 5 ตร.ม./25 กก. ราคาปูน 1 ถุง (25 กก.) = 106 บาท (ปูนซีเมนต์ผสม)

ดังนั้นใช้ปูน = $85 \text{ m}^2 / 5 \text{ m}^2 = 17$ ถุง

ราคาก่อสร้าง = 17 ถุง \times 106 บาท \times 2 เมตร = 3,604 บาท/ลบ.ม.

ราคาก่อสร้างนี้คิดเฉพาะค่าปูนซีเมนต์ผสมเพื่อเปรียบเทียบกับแผ่นอะครีลิก ไม่ได้รวมค่าทราย ปูนขาว น้ำ ค่าวัสดุป้องกันกรด ฯลฯ

- ค่าขั้วไฟฟ้า ซึ่งขั้วแคโทดที่ใช้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาด 2 x 10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 10 แผ่น ราคา 20 บาท และขั้วแอโนดที่ใช้เป็นแกรไฟต์ ขนาด 10 x 10 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ราคา 900 บาท
- ค่าสารละลายเกลืออิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอโนด (ในงานวิจัยนี้ใช้ NaCl เข้มข้น 2 โมลต่อลิตร ปริมาตร 900 มิลลิลิตร) ราคา 21 บาท

รวมค่าขั้วไฟฟ้าและค่าสารละลายเกลืออิเล็กโทรไลต์ฟุ้งแอโนด (บาท/ลบ.ม.)

$$= \frac{20 + 900 + 21 \text{ บาท}}{1.274 \text{ ลิตร}}$$

1.274 ลิตร

$$= 740 \text{ บาท/ลิตร}$$

$$= 740,000 \text{ บาท/ลบ.ม.}$$

$$\text{รวมเป็นค่าใช้จ่าย (บาท/ลบ.ม.)} = 740,000 + 3,604$$

$$= 743,604 \text{ บาท/ลบ.ม. (Plant scale)}$$

4.5.2 ค่าใช้จ่ายที่แปรผันตามปริมาตรของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

ใช้วิธีปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสที่ควบคุมตามเวลา ดังแสดงในตารางที่

4.3 พบว่ากำลังไฟฟ้าที่ถูกใช้ไปในแต่ละช่วงเวลาและค่าใช้จ่าย แสดงไว้ในตารางที่ 4.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ค่าใช้จ่ายที่แปรผันตามปริมาตรของน้ำเสียที่ต้องการบำบัดโดยใช้วิธีปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสที่ควบคุมตามเวลา

เวลา (min.)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/m ²)	ค่ากระแสที่ควบคุม (mA)	กำลังไฟฟ้า (kw.hr/m ³)	ค่าใช้จ่าย (Baht/m ³)
0-30	125	5,000	1.125	2.81
30-40	75	3,000	0.058	0.15
40-45	50	2,000	0.007	0.02
45-50	25	1,000	0.003	0.01
50-55	17	680	0.006	0.01
			รวม	3.00

ในงานวิจัยนี้ใช้ค่าไฟฟ้าในการตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใย 3 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (lab scale) โดยไม่ได้รวมกับค่าวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีในหัวข้อ 4.5.1 มีค่าใช้จ่ายที่ถูกลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนสังกะสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใยโดยใช้สารเคมี 2 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ ค่าสารเคมีในการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีค่า 110.40 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และโซเดียมซัลไฟด์มีค่า 141.16 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (สหรัฐ เซาร์รูปดี, 2552) และนอกจากจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสีแล้ว ร้อยละการกำจัดยังสูงถึง 98% และสามารถกำจัดสังกะสีให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ในเวลา 50 นาที ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 สรุปเปรียบเทียบงานวิจัยการใช้ไฟฟ้าเคมีในการตกตะกอน

ผู้วิจัย	งานวิจัย	ขั้วไฟฟ้า	ค่ากระแส	ปสม.การกำจัด
Kobya และคณะ (2009)	กำจัดซิงก์ฟอสเฟต -pHo 3.8, -[Zn] 40 mg/l -ไนเตรท 85 mg/l -ฟอสเฟต 120 mg/l -ซัลเฟต 60 mg/l	-เหล็ก -Al	10-100(A/m ²) คงที่กระแส	-97.80% @ 15 min (Fe) น้ำเสียจริง -96.70% @ 25 min (Al) น้ำเสียจริง
Mohammad และคณะ (2008)	กำจัดฟลูออไรด์ -pHo 4.0 -[F] 25 mg/l	-Al	12.5-50 (A/m ²) คงที่กระแส	- 95.70% @ 200 ml/min
สหรัฐ เซารูปดี (2552)	กำจัดสังกะสี -pHo 2.0, [Zn] 155 mg/l -ไนเตรท 27 mg/L -ซัลเฟต 11,800 mg/l	-แกรไฟต์	3-133(A/m ²) (50-2,000 mA) คงที่กระแส	-100% @ 6 hr. น้ำเสียสังเคราะห์ -24% @ 6 hr. น้ำเสียจริง
งานวิจัยนี้	กำจัดสังกะสี - pHo 1.7, [Zn] 155 mg/l -ไนเตรท 27 mg/L -ซัลเฟต 11,800 mg/l	-เหล็ก -Al -เหล็กกล้า ไร้สนิม (St.) -แกรไฟต์	17-125(A/m ²) ปรับเปลี่ยน กระแส	-99% @ 11 min. น้ำเสียสังเคราะห์ (ขั้ว St.) -98% @ 50 min. น้ำเสียจริง (ขั้ว St.)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย โดยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมกระแสต่อเนื่อง

1. รูปแบบถังปฏิกริยาที่เหมาะสมสำหรับการทำอิเล็กโทรไลซิสด้วยไฟฟ้าเคมี คือ แบบที่มีรอยต่อของสารละลายที่ทำด้วยแผ่นแก้วพอร์นเบอร์ 4
2. ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นขั้วแคโทดในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสีย (สังเคราะห์) โรงงานผลิตเส้นใยเรยอนที่มีสถานะความเป็นกรดสูง คือ ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม
3. เมื่อความหนาแน่นกระแสเพิ่มจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียเพิ่มขึ้นด้วย และใช้เวลาในการกำจัดน้อยลง
4. การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 155 มิลลิกรัมต่อลิตร (2.4 มิลลิโมลต่อลิตร) ความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าพีเอช 1.7 พบว่า การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ควบคุมตามเวลา ในขณะที่ทำอิเล็กโทรไลซิส มีผลทำให้ลดเวลาในการกำจัดสังกะสี เพิ่มประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดสังกะสี และลดความเป็นไปได้ในการละลายกลับของตะกอนสังกะสีลงสู่สารละลาย โดยผลการทดลองของการปรับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมตามเวลาดังที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.1 ยังผลให้สามารถกำจัดสังกะสีได้ถึง 99% ภายในเวลา 11 นาที และควบคุมปริมาณสังกะสีให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้นานถึง 15 นาที ซึ่งเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้กำจัดสังกะสีในน้ำเสียระดับอุตสาหกรรม

5. การกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงที่ได้รับจากโรงงานที่มีสังกะสี 155 มิลลิกรัมต่อลิตร (2.4 มิลลิโมลต่อลิตร) มีค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และมีค่าพีเอช 1.7 ด้วยวิธีการตรวจวัดค่าตามตารางที่ 4.3 พบว่า สามารถกำจัดสังกะสีได้ 98% ภายในเวลา 50 นาทีที่พลังงานที่ใช้ในการกำจัด คือ 1.20 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และค่าไฟฟ้าประมาณ 3.00 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (Lab Scale) โดยค่าใช้จ่ายที่คิดไม่รวมค่าอุปกรณ์อื่นๆ เช่น ค่าวัสดุในการทำถังปฏิกรณ์ สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ทำความสะอาดถังปฏิกรณ์และขั้วแคโทด สารเคมีที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชและค่าความนำไฟฟ้า ฯลฯ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลของไอออนไนเตรต ซัลเฟต และไอออนอื่นๆ ที่มีความสามารถยับยั้งอิเล็กตรอนได้ดีกว่าสังกะสี ส่งผลทำให้ความสามารถในการกำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีต้องใช้ระยะเวลาในการกำจัดยาวนานขึ้น
2. เสนอให้ศึกษาการกำจัดซีโอดีพร้อมกับสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีไปพร้อมกัน เพื่อดูแนวโน้มกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี มีผลต่อการกำจัดซีโอดีด้วยหรือไม่

5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

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

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มิตินาการพิมพ์.
- คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ. 2545. การแยกสังกะสีจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีชนิดไซยาไนด์ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปริเมษ เจริญพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2539. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศน์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2551. โครงการสร้างความเข้มแข็งในการเฝ้าระวังเพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหามลพิษจากโรงงานในพื้นที่ที่มีความเปราะบางด้านสิ่งแวดล้อม. อ่างทอง. หน้า 82-120.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศรายุทธ ลาภพูนผล. 2549. การกำจัดโครเมียมโดนกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สหรัฐ เซาร์รูปดี. 2552. การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอนโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อินทิวรา ชาญพงษ์พันธ์. 2539. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อมิริตี สุนทรภา. 2549. การนำกลับดีบุกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทาง
ไฟฟ้าเคมี วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- 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.
- Chen, G. 2004. Electrocoagulation technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38: 11-44.
- Emamjomeh, M.M., and Sivakumar, M. 2008. Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. Journal of environmental management. 90: 1204-1212.
- 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.
- Manahan, J. 1993. Ion Exchange. Ann Arbor Science Publishers Department of Environmental Engineering. Illinois institute of technology. Chicago. 122 p.
- Mollah, M.Y.A., et al. 2004. Fundamentals present and future perspective of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. B114: 189-199.

Patterson, J.W. 1985. Industrial wastewater treatment technology. Boston: Butterworth Publisher.

Pertorius, W., Johannes, W., and Lempert, G. 1991. Electrolytic Iron flocculants production with bipolar electrode in series arrangement . Water SA. 17: 133-13.

Schlesinger, M., and Paunovic, M. 2000. Modern electroplating. New York: Wiley.

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.




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.
ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการกำจัดค่าความเข้มข้นของ KMnO_4 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิโมลต่อลิตรในถังปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายและแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยกระดาษเซลลูลอสแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) และวุ้นอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาที

ถังปฏิกริยา	KMnO_4 concentration (mmol/l)			SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
ไม่มีรอยต่อ	2.44	4.30	3.37	1.32	32.60
กระดาษเซลลูลอส	0.11	0.03	0.07	0.06	98.60
แผ่นแก้วพูน	0.00	0.16	0.08	0.11	98.40
วุ้นอิมิตัวด้วยสารละลาย NaCl	2.02	2.11	2.06	0.06	58.70

** หมายเหตุ; ทดลองซ้ำครั้งที่ 3 ผล error

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)	% Removal
0	152.82 (*1.51)	0.00
10	130.15 (*1.75)	14.78
20	119.16 (*2.29)	21.98
30	0.00 (*9.88)	100.00
40	0.02 (*11.38)	99.99
45	0.22 (*11.63)	99.85
50	0.39 (*11.79)	99.74
60	0.79 (*11.94)	99.48

* ค่า pH ของสารละลายที่วัดได้ ณ ขณะนั้น

** หมายถึงเหตุ; ทดลองครั้งเดียว เนื่องจากขั้วเหล็กปล่อยสนิมออกมามาก ตามผลการทดลองที่ 4.2.1

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	152.73 (*1.58)	152.56 (*1.51)	152.72 (*1.54)	152.65	0.12	0.00
10	108.31 (*2.05)	112.07 (*1.99)	106.40 (*2.04)	110.19	2.66	29.08
20	54.38 (*5.67)	58.50 (*5.31)	52.47 (*5.40)	56.44	2.91	64.40
30	0.10 (*11.24)	0.08 (*11.03)	0.02 (*10.02)	0.09	0.01	99.93
35	0.30 (*11.44)	0.05 (*11.19)	0.11 (*11.09)	0.18	0.18	99.81
40	0.59 (*11.59)	0.05 (*11.29)	0.32 (*11.12)	0.32	0.38	99.61
60	0.70 (*11.75)	0.25 (*11.40)	0.61 (*11.25)	0.48	0.32	99.54

* ค่า pH ของสารละลายที่วัดได้ ณ ขณะนั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	152.73 (*1.51)	152.73 (*1.58)	152.56 (*1.58)	152.67	0.10	0.00
10	131.79 (*2.52)	130.52 (*2.13)	120.47 (*1.86)	127.59	6.20	13.71
20	114.66 (*7.74)	121.00 (*6.54)	113.60 (*2.20)	116.42	4.00	24.93
30	1.84 (*10.20)	0.35 (*11.02)	0.69 (*9.10)	0.96	0.78	98.80
35	4.33 (*10.95)	1.77 (*11.32)	4.24 (*11.60)	3.45	1.45	97.16
40	6.20 (*11.57)	4.49 (*11.75)	7.08 (*11.82)	5.92	1.32	95.94
60	9.18 (*11.93)	6.20 (*11.88)	10.51 (*11.88)	8.63	2.21	93.99

* ค่า pH ของสารละลายที่วัดได้ ณ ขณะนั้น

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	152.73 (*1.51)	152.82 (*1.58)	152.73 (*1.58)	152.76	0.05	0.00
10	135.60 (*2.01)	138.39 (*2.10)	136.87 (*2.10)	136.95	1.40	11.22
20	26.10 (*9.73)	25.95 (*9.78)	24.58 (*8.95)	25.54	0.84	82.91
30	2.79 (*11.24)	1.44 (*11.08)	1.18 (*11.20)	1.80	0.86	98.17
35	4.23 (*11.52)	4.16 (*11.48)	2.74 (*11.52)	3.71	0.84	97.23
40	4.68 (*11.55)	4.30 (*11.54)	4.80 (*11.51)	4.59	0.26	96.94
60	7.47 (*11.70)	6.28 (*11.75)	4.87 (*11.61)	6.21	1.30	95.11

* ค่า pH ของสารละลายที่วัดได้ ณ ขณะนั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 2,500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาที)	Zinc concentration (mg/l)	% Removal
0	152.38 (*1.58)	0.00
5	144.35 (*1.61)	5.27
10	138.79 (*1.99)	8.92
15	78.04 (*7.17)	48.78
20	2.84 (*11.42)	98.14
25	18.74 (*11.85)	87.70
30	18.00 (*12.08)	88.19

* ค่า pH ของสารละลายที่วัดได้ ณ ขณะนั้น

** หมายถึง; ทดลองครั้งเดียว เนื่องจากเป็นการทดลองเพื่อหาแนวโน้มของกระแส

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 3,000 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาท)	Zinc concentration (mg/l)	% Removal
0	152.38 (*1.58)	0.00
3	141.26 (*1.81)	7.30
6	133.23 (*1.99)	12.57
9	70.32 (*6.95)	53.85
12	0.37 (*10.79)	99.76
15	2.96 (*11.55)	98.06
18	7.09 (*11.81)	95.34
21	15.18 (*11.94)	90.04
24	23.68 (*12.09)	84.46

* ค่า pH ของสารละลายที่วัดได้ ณ ขณะนั้น

** หมายถึง; ทดลองครั้งเดียว เนื่องจากเป็นการทดลองเพื่อหาแนวโน้มของกระแส

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 4,500 มิลลิแอมแปร์

เวลา (นาท)	Zinc concentration (mg/l)	% Removal
0	152.70 (*1.58)	0.00
3	138.41 (*1.98)	9.36
5	107.33 (*3.25)	29.71
7	2.81 (*11.29)	98.16
9	10.55 (*11.71)	93.09
11	17.99 (*11.90)	88.22
13	22.21 (*12.07)	85.45

* ค่า pH ของสารละลายที่วัดได้ ณ ขณะนั้น

** หมายถึง; ทดลองครั้งเดียว เนื่องจากเป็นการทดลองเพื่อหาแนวโน้มของกระแส

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 1

เวลา (นาทิจ)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	Zinc concentration (mg/l)	pH	SD	% Removal
0	-	152.816	1.58	-	0.00
0-2	5,000	141.827	1.90	0.00	7.19
2-5	3,000	134.959	2.49	0.00	11.69
5-8	2,500	65.591	7.39	0.00	57.08
8-11	1,000	0.354	10.90	0.00	99.77
11-14	1,000	2.215	11.12	0.00	98.55
14-17	1,000	2.297	11.42	0.00	98.50
17-20	1,000	4.688	11.56	0.00	96.93
20-23	1,000	4.773	11.71	0.00	96.88
23-26	1,000	8.139	11.82	0.00	94.67
26-29	1,000	10.474	11.92	0.00	93.15

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 2

เวลา (นาทื)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	Zinc concentration (mg/l)	pH	SD	% Removal
0	-	152.816	1.58	-	0.00
0-2	5,000	143.201	1.91	0.00	6.29
2-5	4,500	59.238	7.20	0.00	61.24
5-8	3,000	11.058	11.31	0.00	92.76
8-11	1,000	2.627	11.55	0.00	98.28
11-14	1,000	4.962	11.65	0.00	96.75
14-17	1,000	5.529	11.76	0.00	96.38
17-20	1,000	7.315	11.82	0.00	95.21
20-23	1,000	7.589	11.87	0.00	95.03
23-26	1,000	7.658	11.94	0.00	94.99
26-29	1,000	10.886	11.98	0.00	92.88

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการกำจัดสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 3

เวลา (นาทื)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	Zinc concentration (mg/l)	pH	% Removal
0	-	153.105	1.60	0.00
0-2	5,000	139.521	1.91	8.70
2-5	4,500	62.322	7.11	59.22
5-8	1,000	40.977	7.33	73.19
8-11	1,000	1.109	10.70	99.27
11-14	1,000	2.502	11.19	98.36
14-17	1,000	2.787	11.35	98.18
17-20	1,000	3.904	11.46	97.45
20-23	1,000	4.324	11.52	97.17
23-26	1,000	4.615	11.62	96.98
26-29	1,000	5.418	11.73	96.45

**หมายเหตุ; เป็นผลการทดลองปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าแบบที่ดีที่สุด

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการกำจัดสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 4

เวลา (นาทื)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	Zinc concentration (mg/l)	pH	SD	% Removal
0	-	153.871	1.62	-	0.00
0-2	5,000	140.968	1.89	0.00	7.75
2-5	4,500	58.548	7.16	0.00	61.69
5-8	1,500	38.871	7.41	0.00	74.56
8-11	680	0.974	10.39	0.00	99.36
11-14	680	2.671	11.21	0.00	98.25
14-17	1,000	4.348	11.49	0.00	97.15
17-20	1,000	5.371	11.66	0.00	96.49
20-23	1,000	6.210	11.88	0.00	95.94

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 1

เวลา (นาทีก)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	Zinc concentration (mg/l)							SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	pH	ครั้งที่ 2	pH	ครั้งที่ 3	pH	เฉลี่ย		
0	-	152.6	1.65	152.6	1.65	154.4	1.69	153.2	1.05	0.00
0-10	5,000	150.8	1.77	151.7	1.71	153.5	1.76	152.0	1.39	0.40
10-20	5,000	150.8	2.00	153.5	2.01	149.9	2.04	151.4	1.89	0.80
20-30	5,000	151.7	2.96	149.0	3.15	149.9	3.01	150.2	1.39	1.59
30-35	3,000	148.0	4.84	147.1	4.76	145.3	4.80	146.8	1.39	3.78
35-40	1,000	144.4	5.11	143.5	4.95	141.7	5.02	143.2	1.39	6.16
40-45	1,000	141.7	6.89	143.5	6.91	140.8	6.95	142.0	1.39	6.96
45-50	1,000	137.1	7.29	136.2	7.23	140.8	7.25	138.0	2.41	9.54
50-55	1,000	113.5	7.38	109.8	7.45	107.1	7.42	110.1	3.20	27.83
55-60	1,000	62.9	9.33	62.1	9.28	61.8	9.30	62.3	0.56	59.20
60-63	680	61.0	9.40	60.7	9.45	61.0	9.41	60.9	0.21	60.08
63-66	680	7.4	10.15	7.3	10.22	7.5	10.09	7.4	0.11	95.13
66-69	680	0.9	11.05	0.9	11.01	0.8	11.14	0.9	0.04	99.42
69-72	680	1.1	11.26	1.2	11.30	1.2	11.33	1.2	0.02	99.24
72-75	680	2.1	11.48	2.1	11.46	2.2	11.50	2.1	0.05	98.62
75-78	680	2.6	11.49	2.6	11.49	2.5	11.52	2.6	0.06	98.32
78-81	680	2.1	11.52	2.1	11.54	2.1	11.55	2.1	0.03	98.62
81-84	680	2.4	11.56	2.4	11.60	2.3	11.59	2.4	0.04	98.45
84-87	680	3.1	11.63	3.1	11.64	3.0	11.66	3.1	0.04	98.00
87-90	680	3.1	11.65	3.1	11.67	3.1	11.69	3.1	0.04	97.97
90-93	680	4.2	11.70	4.6	11.71	4.5	11.73	4.5	0.20	97.08
93-96	680	6.8	11.78	6.9	11.80	7.4	11.80	7.0	0.34	95.39
96-99	680	7.4	11.85	7.8	11.87	8.0	11.88	7.7	0.28	94.93

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 2

เวลา (นาทีก)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	Zinc concentration (mg/l)							SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	pH	ครั้งที่ 2	pH	ครั้งที่ 3	pH	เฉลี่ย		
0	-	151.7	1.67	153.5	1.67	153.5	1.63	152.9	1.05	0.00
0-10	5,000	149.0	1.79	151.7	1.77	149.9	1.76	150.2	1.39	1.79
10-20	5,000	146.2	2.05	155.3	2.03	149.0	2.08	150.2	4.67	1.79
20-30	5,000	145.3	2.97	149.0	3.00	145.3	3.02	146.5	2.10	4.17
30-35	3,000	140.8	4.74	147.1	4.60	145.3	4.72	144.4	3.28	5.56
35-40	2,000	137.1	7.04	143.5	7.12	139.9	7.01	140.2	3.20	8.34
40-45	1,000	136.2	7.30	140.8	7.41	137.1	7.35	138.0	2.41	9.72
45-50	1,000	118.0	7.67	122.6	7.73	113.5	7.75	118.0	4.55	22.81
50-55	1,000	90.7	8.39	98.0	8.44	88.9	8.35	92.5	4.81	39.48
55-60	1,000	10.9	10.45	11.4	10.25	10.5	10.33	10.9	0.46	92.85
60-63	680	3.7	10.76	3.9	10.65	3.5	10.71	3.7	0.18	97.58
63-66	680	1.6	11.04	1.7	11.02	1.6	11.10	1.6	0.04	98.94
66-69	680	1.8	11.18	1.8	11.15	1.8	11.14	1.8	0.04	98.83
69-72	680	1.7	11.29	1.8	11.30	1.7	11.28	1.7	0.01	98.86
72-75	680	1.6	11.38	1.7	11.40	1.6	11.35	1.6	0.07	98.93
75-78	680	1.8	11.44	1.8	11.46	1.8	11.41	1.8	0.03	98.83
78-81	680	2.1	11.50	2.1	11.52	2.1	11.52	2.1	0.03	98.64
81-84	680	2.5	11.56	2.5	11.59	2.5	11.57	2.5	0.01	98.39
84-87	680	2.4	11.58	2.4	11.62	2.5	11.60	2.4	0.08	98.41
87-90	680	2.9	11.59	3.0	11.64	3.1	11.63	3.0	0.06	98.04
90-93	680	3.1	11.62	3.1	11.66	3.1	11.66	3.1	0.03	97.96
93-96	680	5.1	11.68	4.9	11.69	4.8	11.71	4.9	0.17	96.78
96-99	680	7.1	11.75	7.3	11.77	6.9	11.78	7.1	0.23	95.36

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 3

เวลา (นาท)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	Zinc concentration (mg/l)							SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	pH	ครั้งที่ 2	pH	ครั้งที่ 3	pH	เฉลี่ย		
0	-	152.0	1.58	150.7	1.58	153.4	1.58	152.0	1.34	0.00
0-10	5,000	151.3	1.68	146.6	1.69	152.0	1.72	150.0	2.92	1.32
10-20	5,000	148.7	1.96	145.3	1.99	146.0	1.95	146.6	1.77	3.53
20-30	5,000	146.6	2.82	142.6	2.85	145.3	2.85	144.9	2.05	4.70
30-40	3,000	131.9	4.75	132.6	4.76	135.9	4.80	133.5	2.15	12.20
40-45	2,000	119.8	7.64	120.5	7.69	119.8	7.70	120.1	0.39	21.02
45-50	1,000	3.6	10.77	3.5	10.77	3.7	10.75	3.6	0.09	97.63
50-55	680	1.7	11.06	1.7	11.05	1.6	11.05	1.7	0.04	98.90
55-60	680	1.5	11.20	1.6	11.15	1.6	11.18	1.5	0.02	98.98
60-65	680	1.7	11.31	1.7	11.28	1.8	11.30	1.7	0.03	98.86
65-70	680	1.8	11.45	1.9	11.45	1.9	11.41	1.9	0.03	98.78
70-75	680	2.4	11.57	2.4	11.52	2.4	11.59	2.4	0.02	98.42
75-80	680	3.2	11.66	3.2	11.61	3.3	11.64	3.2	0.06	97.88
80-85	680	8.0	11.78	8.2	11.80	8.3	11.81	8.1	0.17	94.64

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 4

เวลา (นาทื)	กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	Zinc concentration (mg/l)	pH	% Removal
0	-	153.4	1.59	0.00
0-10	5,000	146.6	1.73	4.37
10-20	5,000	145.3	2.02	5.24
20-30	5,000	142.6	2.94	6.99
30-35	5,000	139.9	6.92	8.74
35-40	3,000	117.2	7.50	23.60
40-45	2,000	3.2	10.91	97.94
45-50	680	1.8	11.19	98.84
50-55	680	1.4	11.32	99.10
55-60	680	2.0	11.46	98.71
60-65	680	3.4	11.64	97.79
65-70	680	7.1	11.78	95.39
70-75	680	8.4	11.90	94.55



ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสี

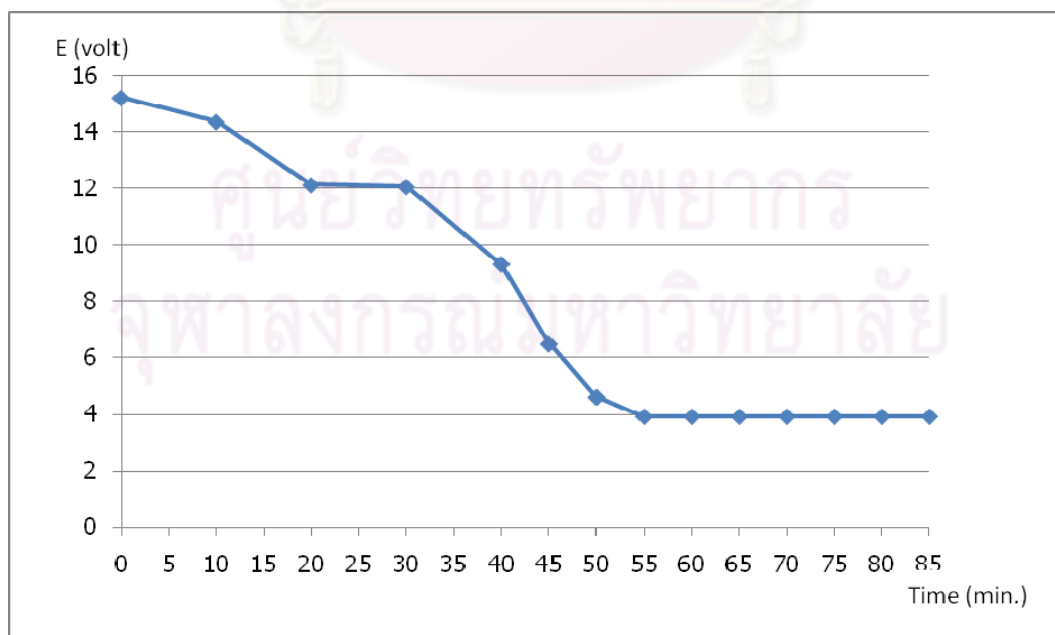
การกำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี มีค่าใช้จ่ายอยู่หลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า เป็นต้น แต่ไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดนั้นได้ โดยเฉพาะค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า เครื่องกวน และขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ถ้าหากจะนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงแล้วนั้น ต้องมีการปรับปรุงขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

ข.1.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดลองทางไฟฟ้าเคมี

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าเคมี จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ โดยราคาค่าไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\text{กำลังไฟฟ้า} = I \text{ (A)} \times V \text{ (volt)} \times \text{time (hr)} / V \text{ (m}^3\text{)}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ตามการทดลองกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงแบบที่ 3 (ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.15)



รูปที่ ข.1 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา เมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสตาม ตารางที่ ก.15

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า } 5.0 \text{ A} &= 5.0 \text{ A} \times \text{พท. ได้กราฟ E** @ 0-30 min/0.9 m}^3 \\ &= (5*(0.5*(15+12)*30)*(30/60))/(0.9*1000) \\ &= 1.13 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า } 3.0 \text{ A} &= 3.0 \text{ A} \times \text{พท. ได้กราฟ E** @ 30-40 min/0.9 m}^3 \\ &= (3*(0.5*(12+9)*10)*(10/60))/(0.9*1000) \\ &= 0.06 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า } 2.0 \text{ A} &= 2.0 \text{ A} \times \text{พท. ได้กราฟ E** @ 40-45 min/0.9 m}^3 \\ &= (2*(0.5*(6.2+9)*5)*(5/60))/(0.9*1000) \\ &= 0.01 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า } 1.0 \text{ A} &= 1.0 \text{ A} \times \text{พท. ได้กราฟ E** @ 45-50 min/0.9 m}^3 \\ &= (1*(0.5*(6.2+5)*5)*(5/60))/(0.9*1000) \\ &= 0.00 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า } 0.68 \text{ A} &= 0.68 \text{ A} \times \text{พท. ได้กราฟ E** @ 45-50 min/0.9 m}^3 \\ &= (0.68*(0.5*(4+5)*10)*(10/60))/(0.9*1000) \\ &= 0.01 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้ารวม} &= 1.13 + 0.06 + 0.01 + 0.00 + 0.01 \\ &= 1.20 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

** พื้นที่ใต้กราฟ E ณ เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ ข.1

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการบำบัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อ

ยูนิต ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{บาท/ยูนิต}) \\ &= 1.20 \times 2.5 \\ &= 3.00 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร (Lab Scale)} \end{aligned}$$

ดังนั้นวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีค่าใช้จ่าย 3.00 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (Lab Scale)

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 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส

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

โดย n = ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์/eq)

C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)

C_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

$I(t)$ = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ข.2.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณ ตามการทดลองกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์แบบที่ 3

ในที่นี้ จะนำความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียจริง ในเวลา 8 และ 11 นาที มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่าร้อยละการกำจัด และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 1,000 มิลลิแอมแปร์

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 152.82 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา 8 นาที ความเข้มข้นของสังกะสี 40.98 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา 11 นาที ความเข้มข้นของสังกะสี 1.11 มิลลิกรัมต่อลิตร

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

แทนค่า ที่เวลา 8 นาที

$$= \frac{(152.82 - 40.98) \times 100\%}{152.82}$$

$$= 73.18\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 11 นาที ร้อยละการกำจัดสังกะสี คือ 73.18%

แทนค่า ที่เวลา 11 นาที

$$= \frac{(152.82 - 1.11) \times 100\%}{152.82}$$

$$= 99.27\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 11 นาที ร้อยละการกำจัดสังกะสี คือ 99.27%

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

แทนค่า ที่เวลา 8-11 นาที (ช่วงห่าง 3 นาที)

$$= \frac{2 \times 96500 \times [(40.98 - 1.11)/(65.4 \times 1000)] \times 0.9 \times 100\%}{1 \times 3 \times 60}$$

$$= 58.83\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 11 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 58.83%

หมายเหตุ 1 คือ 1 A มาจาก 1,000 mA = 1A

3 คือ เวลา 8 ถึง 11 นาที = 3 นาที

60 คือ แปลงนาทีให้เป็นวินาที

ข.3 วิธีคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

คงที่กระแส 1,500 มิลลิแอมแปร์

พื้นที่ขั้วแคโทด = กว้าง x ยาว x 2 ด้าน x จำนวนแผ่น

$$= 2 \text{ ซม.} \times 10 \text{ ซม.} \times 2 \times 10$$

$$= 400 \text{ ตร.ซม.}$$

ความหนาแน่นกระแส = กระแสต่อพื้นที่ขั้ว

$$= \frac{1,500 \text{ mA}}{400 \text{ cm}^2}$$

$$= 38 \text{ A/m}^2$$

ข.4 อัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี

ตัวอย่างการคำนวณ ที่ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าที่ 38 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ เวลา 0-30 นาที

ลดปริมาณสังกะสีในสารละลายได้ 100% คือ สังกะสีความเข้มข้นเริ่มต้น 155 มิลลิกรัมต่อลิตร กำจัดได้ 155 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี

$$= \frac{155 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}}{30 \text{ นาที}} = 5 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที}$$

ดังนั้น คิดเป็นอัตราเร็วในการกำจัดสังกะสี 5 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพิชิต ลีกุล เกิดเมื่อวันที่ 21 เดือนกันยายน พ.ศ.2528 ที่จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียนบ้านน้ำพัน จังหวัดอุดรธานี สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย สายสามัญ แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนกุดจับประชาสรรค์ จังหวัดอุดรธานี เมื่อปีการศึกษา 2547 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีบัณฑิต จากสาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2552 ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 4 หมู่ 1 ตำบลน้ำพัน อำเภอหนองวัวซอ จังหวัดอุดรธานี 41360



ศูนย์วิทยพัชการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย