

การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน
ที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี

นางสาววรรรธิดา จิระชัยพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

EFFICIENCY ENHANCEMENT OF ZINC REMOVAL BY ELECTROCHEMICAL PROCESS
FROM RAYON FACTORY WASTEWATER AFTER SULFATE AND COD DEPLETION

Miss Wantida Jirachaiphan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering
Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2011
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี
ในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใยเรยอนที่ผ่านการกำจัดซัลเฟต
และซีโอดี

โดย

นางสาววรรรธิดา จิระชัยพันธุ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ ใสสถาพันธุ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัฒน์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ ใสสถาพันธุ์)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัณมิกะ)

วรรณิดา จิระชัยพันธุ์ : การเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีในน้ำเสีย
โรงงานผลิตเส้นใยเรยอนที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี. (EFFICIENCY
ENHANCEMENT OF ZINC REMOVAL BY ELECTROCHEMICAL PROCESS FROM
RAYON FACTORY WASTEWATER AFTER SULFATE AND COD DEPLETION)
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. เขมรรัฐ โอสถาพันธุ์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม :
อ.ดร. เจริญขวัญ ไกรยา, 133 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการ
กำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน

ผลการทดลองส่วนที่ 1 การตกตะกอนทางเคมีด้วยแคลเซียมคลอไรด์ สามารถ
กำจัดซัลเฟตได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 4 โดยที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 1:1
สามารถกำจัดซัลเฟตได้ 85.7 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การกำจัดซีโอดีด้วยวิธีออกซิเดชัน สามารถ
กำจัดซีโอดีได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความ
เข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีโอดีได้ 16.1 เปอร์เซ็นต์ และทำให้น้ำที่ผ่านการ
ออกซิเดชันมีลักษณะใส ไม่มีสี

ผลการทดลองส่วนที่ 2 ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูน ให้ผล
การทดลองที่ดีและสะดวกต่อการใช้งานมากที่สุด โดยกำจัดสังกะสีได้ 97.9 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาใน
การทำปฏิกิริยา 30 นาที ณ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่ความหนาแน่น
กระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในน้ำเสียที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นและผ่านการ
ตกตะกอนร่วมกับการออกซิเดชันให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสี
ที่ 98.2 ณ เวลา 6 นาทีเท่ากับน้ำเสียที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นและผ่านการออกซิเดชัน แต่ในน้ำเสีย
ที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นและผ่านการออกซิเดชันพบการละลายกลับของตะกอนสังกะสีมากกว่า
ในขณะที่น้ำเสียที่กำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการปรับพีเอช,
ตกตะกอนซัลเฟต และออกซิเดชัน ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเท่ากับ 35.8 ที่เวลา 40
นาที

ภาควิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ.....
สาขาวิชา..... วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา 2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5270479021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ZINC / ELECTROCHEMISTRY / SULFATE / COD / INDUSTRIAL WASTEWATER

WANTIDA JIRACHAIPHAN : EFFICIENCY ENHANCEMENT OF ZINC REMOVAL BY ELECTROCHEMICAL PROCESS FROM RAYON FACTORY WASTEWATER AFTER SULFATE AND COD DEPLETION. ADVISOR : ASST.PROF.KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., CO-ADVISOR : CHAROENKWAN KRAIYA, Ph.D., 133 pp.

Purpose of this study is to enhance an electrochemical zinc removal efficiency in rayon fiber production factory wastewater. This study divided into three parts.

Part 1 involved sulfate precipitation by CaCl_2 and COD reduction by chemical oxidation. Results reviewed that 85.7% of sulfate ion was best removed at pH 4 by using mole ratio of $1:1 \text{ Ca}^{2+} : \text{SO}_4^{2-}$ and 16.1% of COD was best reduced at pH 5 by 3000 mg/L KMnO_4 . At this usage concentration of KMnO_4 , the treated water after oxidizing process was colorless.

Part 2 involved an electrochemical reactor selection. The 2-compartment reactor separated with sintered glass gave the best result in zinc removal. A 97.9% of zinc was eliminated within 30 min using 241 A/m^2 current density.

In part 3, percentages of electrochemical zinc removal process at 130 A/m^2 current density were investigated in various treated wastewaters. The best result gained from wastewater treated with initial pH adjustment (to pH 4), sulfate precipitation and COD reduction where 98.2% zinc removal was achieved in 6 min. The same result was also obtained from wastewater treated with initial pH adjustment and COD reduction alone. However, the more zinc redissolution was found in the later treated wastewater. A controlled system, untreated wastewater (pH 1.7), yielded 35.8% zinc removal at 40 min.

Department :..... Environmental Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study :..... Environmental Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year : ..2011..... Co- advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัย
จึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถาพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ
อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และ
แก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัย
นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์
ตลอดจนอาจารย์ ดร.อรอนงค์ ลาภบริสุทธิ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรธณวดี สุวัฒน์ิกะ ที่ได้ให้
คำชี้แนะ คำปรึกษา และแก้ไขงานวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ จากภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย และได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจาก ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต
จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และงบประมาณบางส่วนจาก โครงการส่งเสริมการ
วิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา
(หมายเลขโครงการ FW6521)

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกัน
และกันในช่วงการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 สังกะสี.....	6
2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย.....	7
2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย.....	7
2.2.2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใย.....	8
2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	9
2.3.1 ออกซิเดชัน (Oxidation process).....	10
2.3.2 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation).....	12
2.3.3 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery).....	15
2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	15
2.4.1 ชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	15
2.4.2 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	16
2.5 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี.....	17
2.5.1 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	18

2.5.2 โพลารไรเซชัน.....	21
2.6 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี.....	21
2.6.1 ไมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell).....	22
2.6.2 ไมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel).....	22
2.6.3 ไมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series).....	23
2.6.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode).....	23
2.7 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	24
2.7.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode).....	24
2.7.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode).....	25
2.8 ศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	26
2.8.1 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°).....	26
2.8.2 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (E_R).....	27
2.8.3 ศักย์จากการเกิดโพลารไรเซชัน (E_p, η).....	27
2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า.....	27
2.9.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน.....	28
2.9.2 ค่าความนำไฟฟ้า.....	29
2.9.3 กำลังไฟฟ้า.....	29
2.10 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า.....	30
2.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency).....	31
2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	31
2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
2.13.1 ไฟฟ้าเคมี.....	32
2.13.2 การตกตะกอน.....	34
2.13.3 ออกซิเดชัน.....	35

บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	39
3.1	เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี.....	39
3.1.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	39
3.1.2	สารเคมี.....	40
3.1.3	การเตรียมน้ำเสียจริง สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และสะพานเกลือ.....	40
3.1.4	การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสี อัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	41
3.1.5	การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	42
3.2	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	45
3.2.1	การทดลองส่วนที่ 1.....	47
3.2.1.1	การทดลองการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย ด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียม.....	47
3.2.1.2	การทดลองการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชัน.....	50
3.2.1.3	การทดลองการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี.....	57
3.2.2	การทดลองส่วนที่ 2.....	57
3.2.3	การทดลองส่วนที่ 3.....	63
3.3	วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์.....	64
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	65
4.1	การทดลองส่วนที่ 1.....	66
4.1.1	การกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียม.....	66
4.1.2	การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชัน ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต.....	68
4.1.3	การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชัน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	70
4.2	การทดลองส่วนที่ 2.....	72

4.2.1 การทดลองศึกษาหารูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เหมาะสม ในการกำจัดสังกะสี.....	72
4.3 การทดลองส่วนที่ 3.....	75
4.3.1 การศึกษาผลของการกำจัดซัลเฟตที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	75
4.3.2 การศึกษาผลของการออกซิเดชันที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	81
4.3.2.1 การศึกษาผลของการออกซิเดชันด้วย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	81
4.3.2.2 การศึกษาผลของการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพ ในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	83
4.3.3 การศึกษาผลของการตกตะกอนร่วมกับการออกซิเดชัน ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	85
4.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดลอง.....	87
4.4.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ในการทดลองการกำจัดซัลเฟต ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี.....	88
4.4.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ในการทดลองการกำจัดซีโอดี ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต.....	88
4.4.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ในการทดลองการกำจัดซีโอดี ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับ รังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	89
4.4.4 การคำนวณค่าใช้จ่าย ในการทดลองทางไฟฟ้าเคมี.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93

5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม.....	94
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	99
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	100
ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ.....	129
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	133

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	องค์ประกอบของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์..... 3
1.2	ศักย์มาตรฐานของปฏิกิริยาต่างๆ (Redox potential)..... 3
2.1	ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตเส้นใย..... 9
3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย..... 47
3.2	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตที่เหมาะสม..... 49
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย..... 51
3.4	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่เหมาะสม..... 52
3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย..... 54
3.6	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม..... 56
3.7	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... 58
3.8	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี แบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน..... 60
3.9	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี แบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกล็ดอิมิตัว..... 61
3.10	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมี..... 62
3.11	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริง..... 63
3.12	วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด..... 64
4.1	องค์ประกอบของน้ำเสีย..... 66
5.1	ผลการทดลองและค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต..... 92
5.2	ผลการทดลองและค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในน้ำเสียที่สภาวะต่างๆ..... 93

ตารางที่	หน้า
ก.1 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้ ถึงปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	101
ก.2 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	102
ก.3 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยวุ้นอิมิตัวด้วยสารละลายไซเดียมคลอไรด์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	103
ก.4 ผลการทดลองการกำจัดซัลเฟตโดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ ให้มีอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเป็น 1:1 ที่พีเอชต่างๆ.....	104
ก.5 ผลการทดลองการกำจัดซัลเฟต โดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ ที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 4.....	104
ก.6 ผลการทดลองความเข้มข้นของซัลเฟตที่เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการกำจัดสังกะสี ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	105
ก.7 ผลการทดลองการกำจัดซีโอดีโดยการออกซิเดชันด้วย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้น 8000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอชต่างๆ.....	106
ก.8 ผลการทดลองการกำจัดซีโอดีโดยการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	107
ก.9 ผลการทดลองการกำจัดซีโอดีโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่พีเอชต่างๆ.....	108
ก.10 ผลการทดลองการกำจัดซีโอดีโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่พีเอช เท่ากับ 5...	108
ก.11 ผลการทดลองการกำจัดซีโอดีโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่พีเอช เท่ากับ 5...	109

ตารางที่	หน้า
ก.19 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมล แคลเซียมต่อซัลเฟต 2:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ มีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4.....	117
ก.20 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ไม่ผ่านการตกตะกอน ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลาย ด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7.....	118
ก.21 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมล แคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ มีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7.....	119
ก.22 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมล แคลเซียมต่อซัลเฟต 1:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ มีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7.....	120
ก.23 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ไม่ผ่านการออกซิเดชัน ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลาย ด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 5.....	121
ก.24 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วย โฟแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7.....	122

ตารางที่	หน้า
ก.25 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วย โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 5.....	123
ก.26 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7.....	124
ก.27 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วย ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วย แผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7.....	125
ก.28 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมล แคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 และออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของ สารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7.....	126
ก.29 ผลการทดลองการกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมล แคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 และออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของ สารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 5.....	127
ก.30 เปรียบเทียบของค์ประกอบในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านกระบวนการตกตะกอน การออกซิเดชัน และกระบวนการไฟฟ้าเคมี.....	128

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	ผังกระบวนการผลิตเส้นใย..... 7
2.2	Diagram of pc-pH of $\text{CaSO}_4\text{-Ca(OH)}_2\text{-H}_2\text{O}$ system at 298.15 K..... 13
2.3	Diagram of logC-pH of various forms of zinc at 298.15 K..... 14
2.4	การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... 16
2.5	การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยมีรอยต่อของสารละลาย (ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน (ข) ต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ..... 17
2.6	องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี..... 18
2.7	กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า..... 19
2.8	การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก..... 19
2.9	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว..... 22
2.10	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน..... 22
2.11	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม..... 23
2.12	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์..... 23
2.13	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่..... 24
2.14	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับเวลา ในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่..... 25
3.1	ขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดที่ใช้สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมี แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... 40
3.2	ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกระบวนการออกซิเดชัน ด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....41

ภาพที่	หน้า
3.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย โดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยวจำนวน 1 คู่.....	42
3.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน.....	43
3.5 เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลืออิ่มตัว....	44
3.6 ผังการทำวิจัย.....	46
3.7 วิธีการทดลองการหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดซัลเฟตด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียม.....	48
3.8 วิธีการทดลองการหาอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตที่เหมาะสม.....	49
3.9 วิธีการทดลองการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต.....	51
3.10 วิธีการทดลองการหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสม.....	53
3.11 วิธีการทดลองการหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	55
3.12 วิธีการทดลองการหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม.....	56
3.13 วิธีการทดลองการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี.....	57
3.14 วิธีการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย.....	59
3.15 วิธีการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน.....	60
3.16 วิธีการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลืออิ่มตัว.....	62
3.17 วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	64
4.1 ความเข้มข้นของซัลเฟตที่เหลือหลังจากการตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตโดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ให้มีอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเป็น 1:1 ที่พีเอชต่างๆ.....	67
4.2 ความเข้มข้นของซัลเฟตที่เหลือหลังจากการตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่พีเอช เท่ากับ 4 โดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆ.....	68

ภาพที่	หน้า
4.3 ความเข้มข้นซีไอดีที่เหลือหลังจากการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เข้มข้น 8000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอชต่างๆ.....	69
4.4 ความเข้มข้นซีไอดีที่เหลือหลังจากการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	70
4.5 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	70
4.6 การออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	71
4.7 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่พีเอชต่างๆ.....	72
4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาของถังปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อ ของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอรูเบอร์ 4 (sintered glass) และอุ่นอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	73
4.9 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบของถังปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอรูเบอร์ 4 (sintered glass) และอุ่นอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์.....	74
4.10 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีกับเวลา หลังจากตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1.....	76
4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาหลังจากตกตะกอน ที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 4.....	77
4.12 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสหลังจากตกตะกอนที่อัตราส่วนโมล แคลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 4.....	77
4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาที่สภาวะต่างๆ (ตกตะกอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์).....	79
4.14 ค่าความเข้มข้นของซัลเฟตที่เหลืออยู่หลังจากกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี.....	79
4.15 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีที่สภาวะต่างๆ (ตกตะกอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์).....	80
4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาที่สภาวะต่างๆ (ออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต).....	82

ภาพที่	หน้า
4.17 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีที่สภาวะต่างๆ (ออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต).....	83
4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาที่สภาวะต่างๆ (ออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์).....	84
4.19 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีที่สภาวะต่างๆ (ออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์).....	85
4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาที่สภาวะต่างๆ.....	86
4.21 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลา ที่สภาวะต่างๆ.....	87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แร่โลหะหนักจัดเป็นทรัพยากรที่มีอยู่หรือเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ โดยมีบทบาทและความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรมและพลังงาน ซึ่งปริมาณของแร่โลหะหนักค่อยๆ ลดน้อยลง เนื่องจากการนำไปใช้ประโยชน์จากความต้องการของมนุษย์ในปริมาณที่สูงและต่อเนื่อง ทั้งนี้ยังอาจส่งผลกระทบต่อธรรมชาติจากการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติอีกด้วย ดังนั้นจึงควรมีมาตรการในการอนุรักษ์และป้องกันแร่โลหะหนัก คือ 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) การใช้วิธีออกซิเดชัน (Oxidation process) การใช้วิธีรีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis) การระเหย (Evaporation) การใช้วิธีอิเล็กโตรไดอะลิซิส (Electrodialysis) และการดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดนั้นจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีนั้นจัดเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก และรวดเร็ว ส่วนวิธีทางไฟฟ้าเคมี จัดเป็นวิธีที่ใช้กันมากเนื่องจากไม่ใช้

สารเคมีมาช่วยในการกำจัดและมีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง (Scott และคณะ, 1997) อีกทั้งโลหะหนักที่ได้กลับคืนมาจะอยู่ในรูปที่บริสุทธิ์สามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่ในกระบวนการผลิต

แร่โลหะที่สนใจในงานวิจัยนี้คือสังกะสี เนื่องจากสังกะสีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม ใช้ในกระบวนการผลิตเส้นใย และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น สังกะสีสามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำและยังมีผลอันตรายต่อมนุษย์ จึงเป็นสิ่งที่สมควรอย่างยิ่งที่จะศึกษาถึงวิธีการในการบำบัดสังกะสีที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียของกระบวนการผลิตเพื่อลดการปนเปื้อนของสังกะสีในน้ำเสียให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม คือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงจะสามารถปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ หรือการนำกลับมาใช้ใหม่เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายสำหรับการประกอบการของอุตสาหกรรมในด้านนี้

จากงานวิจัยของสหรัฐ เซาเวอูปีตี (2552) พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีจะลดลงเมื่อเทียบกับน้ำเสียสังเคราะห์ถึง 76 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งคาดว่าเกิดจากองค์ประกอบที่แตกต่างกันของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 1.1 พบว่าในน้ำเสียจริงมีปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟตและซีโอดีสูงกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ และเมื่อพิจารณาค่าศักย์มาตรฐานตามตารางที่ 1.2 พบว่า SO_4^{2-} มีค่าศักย์มาตรฐาน $E^\circ = +0.170 \text{ V. vs SHE}$ ในขณะที่ Zn^{2+} มีค่า $E^\circ = -0.763 \text{ V. vs SHE}$ ดังนั้น SO_4^{2-} มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดได้ดีกว่า Zn^{2+} จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีลดลง

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ปริมาณความเข้มข้น ในน้ำเสียจริง	ปริมาณความเข้มข้น ในน้ำสังเคราะห์
pH		1.7	2.0
Zinc, Total	mg/l Zn	200	155
Nitrate	mg/l	27	300
Sulfate	mg/l	11,800	-
Solid, Suspended	mg/l	100	-
COD, Total	mg/l	3,200	-

ที่มา : (สหรัฐ เซาเวอูปดี, 2552)

ตารางที่ 1.2 ศักย์มาตรฐานของปฏิกิริยาต่างๆ (Redox potential)

ครึ่งปฏิกิริยา	E° (V)
$\text{Cl}_2 + 2e^- \leftrightarrow 2\text{Cl}^-$	+1.360
$1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	+1.230
$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3e^- \leftrightarrow \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.960
$\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 3e^- \leftrightarrow \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0.940
$\text{Fe}^{3+} + e^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0.771
$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.170
$2\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2$	+0.000
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Ni}$	-0.250
$\text{Cr}^{3+} + e^- \leftrightarrow \text{Cr}^{2+}$	-0.410
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Fe}$	-0.440
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Zn}$	-0.763
$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.830
$\text{Cr}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Cr}$	-0.913
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \leftrightarrow \text{Al}$	-1.660
$\text{Na}^+ + e^- \leftrightarrow \text{Na}$	-2.714

ที่มา : (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539 : 222-224)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน โดยการกำจัดซัลเฟตและซีโอดีซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่พบในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางเคมี และนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดองค์ประกอบหลักนั้น มากำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียม
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และวิธีออกซิเดชันด้วยยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. เพื่อศึกษาผลของการกำจัดซัลเฟตและซีโอดีที่มีต่อประสิทธิภาพในการใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมีกำจัดสังกะสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน
4. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบรูปแบบของเซลล์ไฟฟ้าเคมี ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน
5. ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. งานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน
3. กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอนกับแคลเซียม
4. กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย ได้แก่ การออกซิเดชันด้วยรังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และวิธีออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
5. รูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบคือ แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน และแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลืออิมมัลชัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสังกะสีในน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยจากวิธีทางไฟฟ้าเคมี
2. เกิดความก้าวหน้าทางวิชาการ การพัฒนา และปรับปรุง วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย
3. เป็นแนวทางการลดมลภาวะทางน้ำที่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ได้
4. ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม

บทที่ 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 ซึ่งสามารถม้วนเป็นแผ่นได้ ค่า Oxidation state เท่ากับ +2 เมื่ออยู่ในรูปสารประกอบ และจะคงสภาพไม่เปลี่ยนแปลงอยู่ได้จนถึงอุณหภูมิ 225 °C ในสภาวะอากาศแห้ง แต่ในสภาวะที่มีความชื้นและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่จะเกิดการออกซิไดซ์ได้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเผาในบรรยากาศจะเกิดเป็นออกไซด์ขึ้น คือ ZnO ในบรรยากาศที่เย็นสังกะสีจะไม่ทำปฏิกิริยากับ คลอรีน โบรมีน และฟลูออรีน แต่ในบรรยากาศที่มีความชื้นอาจเกิดการเหนียวน้ำทำให้เกิดเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ขึ้นได้ ผงสังกะสีสามารถทำปฏิกิริยากับซัลเฟอร์เกิดเป็น Zinc sulfide (ZnS) แต่หากทำปฏิกิริยากับอะเซทิลีนจะได้ Zinc carbide (ZnC_2) สังกะสีเป็น Reducing agent ที่แรงสามารถที่จะรีดิวซ์เกลือของแมงกานีส เหล็ก นิกเกิล ทองแดง และแคดเมียม เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดไนตริกจะรีดิวซ์ NO_3^- ion ให้กลายเป็น NH_4^+ และจะทำปฏิกิริยากับกรดอื่นๆเกิดเป็นเกลือขึ้น สังกะสีจะละลายในอัลคาไลน์และแอมโมเนีย ซึ่งเกลือของสังกะสีส่วนใหญ่จะละลายน้ำ

ดังนั้นสังกะสีจึงถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นภาชนะของถ่านอัลคาไลน์ ใช้เป็นส่วนประกอบในโลหะผสม และใช้เคลือบโลหะเพื่อป้องกันการเกิดสนิมและการถูกกัดกร่อน เป็นต้น ถึงแม้ว่าสังกะสีจะเป็นตัวที่นิยมถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต แต่ก็สามารถส่งผลกระทบต่อมนุษย์ พิษ สัตว์และสิ่งแวดล้อมได้ถ้าหากเกิดการปนเปื้อน ส่วนอันตรายที่เกิดต่อมนุษย์ คือ ถ้ารับประทานอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีสังกะสีเจือปนอยู่จะทำให้เกิดอาการคลื่นไส้และอาเจียน ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะได้รับสังกะสีในรูปแบบของสังกะสีออกไซด์ ส่วนทางจมนั้นจะได้รับจากการสูดหายใจเอาฝุ่นละอองของสังกะสีเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ ทำให้ระบบทางเดินหายใจติดขัด ปอดอักเสบ และถ้าหายใจเอาสังกะสีออกไซด์เข้าสู่ร่างกายในปริมาณสูง จะทำให้มีอาการอ่อนเพลียหนาวสั่น ปวดตามแขนขา และปวดศีรษะอย่างรุนแรงได้

2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551 : 82-120)

2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย

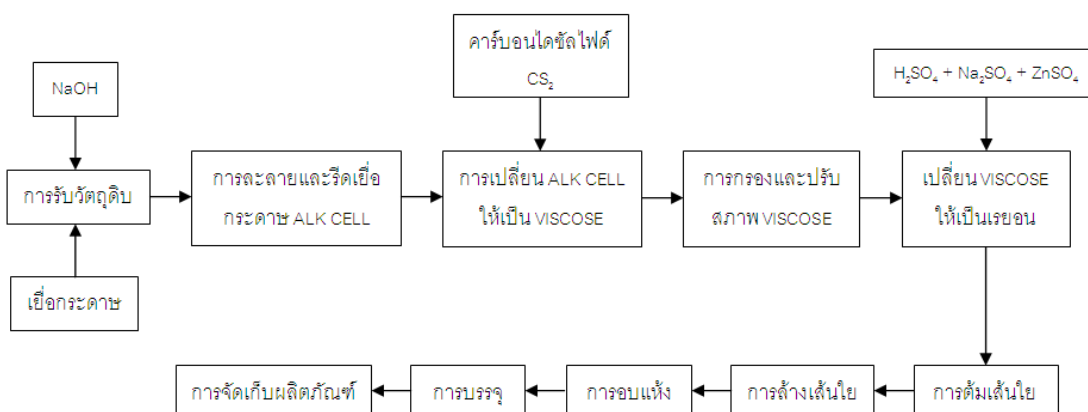
ในอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย ประกอบด้วยกระบวนการผลิตที่สำคัญ ดังนี้

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

จากนั้นเยื่อด่างจะถูกส่งไปทำปฏิกิริยากับสารคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) ภายใต้สภาวะสุญญากาศเพื่อเปลี่ยนจากเซลลูโลสเป็นเซลลูโลสแซนเทต (Cellulose xanthate) และจะถูกนำไปละลายต่อด้วยสารละลายด่างโซดาไฟ เกิดเป็นสารละลายที่เรียกว่า "วิสโคส" (Viscose)

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

สารละลายวิสโคสและสารละลายผสมจะถูกฉีดเป็นเส้นใย เส้นใยที่ได้นี้จะถูกนำไปตัดแล้วต้มให้ร้อนเพื่อให้เส้นใยเกิดการเปิดตัวได้ดี จากนั้นจะนำเส้นใยไปล้างสารเคมีก่อนที่ จะเข้าสู่การอบแห้งเพื่ออัดเป็นก้อน และส่งจำหน่ายต่อไป ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ผังกระบวนการผลิตเส้นใย

2. กระบวนการผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ (CS_2) จัดว่าเป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการนำถ่านมาเผาเพื่อไล่ความชื้นและสารระเหยออก หลังจากนั้นนำมาเติมลงในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ ถ่านที่อยู่ในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกให้ความร้อนด้วยกระแสไฟฟ้า จากนั้นกำมะถันเหลวจะถูกฉีดเข้าไปในเตาผลิตคาร์บอนไดซัลไฟด์ กำมะถันจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนและไฮโดรเจนที่มีอยู่ในถ่าน เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซเหล่านี้จะถูกส่งเข้าไปในถัง Sulfur separator เพื่อแยกเอาละอองไอกำมะถันออกจากก๊าซ ส่วนที่เป็นก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จะถูกส่งผ่านเข้าระบบควบแน่น ก๊าซคาร์บอนไดซัลไฟด์จะถูกควบแน่นเป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์เหลว และจะถูกนำไปเก็บในถังเก็บ Crude CS_2 ในส่วนนี้จะถูกนำมากลั่นให้เป็นคาร์บอนไดซัลไฟด์ที่บริสุทธิ์ จากนั้นถึงจะส่งไปใช้ในกระบวนการผลิต

3. กระบวนการผลิตกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จัดว่าเป็นกระบวนการผลิตเสริมที่เริ่มจากการป้อนกำมะถันเหลวเข้าสู่เตาเผากำมะถันโดยใช้ลมจาก Blower ในการเผาไหม้ให้เกิดเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ที่อุณหภูมิ 950 ถึง 970 องศาเซลเซียส ก๊าซร้อนที่ได้จะถูกลดอุณหภูมิโดยส่งผ่านหม้อน้ำ ก๊าซที่ลดอุณหภูมิแล้วจะถูกส่งเข้าไปในถัง Converter เพื่อให้ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเปลี่ยนเป็นก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) โดยมีสารเร่งปฏิกิริยา ก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ที่ออกจาก Converter จะถูกลดอุณหภูมิก่อนจะส่งเข้าหอจับก๊าซ (Absorption tower) เพื่อจับก๊าซซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ให้เปลี่ยนเป็นกรดซัลฟิวริก ก๊าซที่เหลือจากหอจับก๊าซจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยน้ำ (Water scrubber) เพื่อบำบัดก๊าซ หลังจากนั้นจะถูกส่งเข้าหอบำบัดด้วยสารละลายด่าง (Caustic scrubber) ก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ

ไอน้ำที่ได้จากกระบวนการผลิตสามารถนำไปหลอมละลายกำมะถัน ส่วนลมร้อนและน้ำร้อนสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้

2.2.2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใย

กระบวนการผลิตเส้นใยตามที่ได้กล่าวมานั้นจะทำให้เกิดน้ำเสีย 2 ประเภท คือ น้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดและมีโลหะหนักสังกะสี กับน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกลางหรือด่างแต่ไม่มีสารโลหะหนักสังกะสีปนเปื้อน

1. น้ำเสียประเภทแรก มีจุดกำเนิดที่ขั้นตอนกระบวนการล้างเส้นใย ซึ่งเป็นขั้นตอนต่อเนื่องจากการเกิดเส้นใย การตัดเส้นใยเป็นท่อนๆ แล้วต้มเส้นใยให้ร้อนจนเปิดตัวได้ดี น้ำที่ผ่านการล้างเส้นใยนี้จะมีสภาพเป็นกรดเพราะมีสารละลายเคมีเจือปนอยู่ คือ กรดซัลฟิวริก ไฮเดียมซัลเฟต และสังกะสีซัลเฟต ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตเส้นใย
(น้ำเสียเฉลี่ย 35,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน)

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ปริมาณความเข้มข้น
pH		1.7
Nitrogen, TKN	mg/l N	5
Phosphate, Total	mg/l P	3.2
BOD 5 days	mg/l	1,900
COD, Total	mg/l	3,440
Fat, Oil & Grease	mg/l	5.7
Solid, Total	mg/l	23,700
Solid, Dissolved	mg/l	23,600
Solid, Suspended	mg/l	100
Zinc, Total	mg/l Zn	155

ที่มา : (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2. น้ำเสียประเภทที่สอง เป็นน้ำเสียที่มาจากแหล่งต่างๆ ภายในโรงงาน เช่น น้ำล้างในกระบวนการผลิตที่ไม่มีสารโลหะหนักสังกะสี น้ำเสียจากระบบหล่อเย็น น้ำเสียจากการล้างเครื่องกรอง และน้ำเสียจากกิจกรรมอื่นๆ เป็นต้น

2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำ

ทั้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะกระบวนการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่

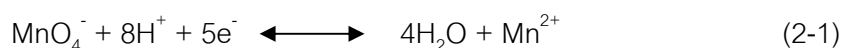
2.3.1 ออกซิเดชัน (Oxidation process)

กระบวนการออกซิเดชันเป็นวิธีการทางเคมีอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการบำบัดจะทำการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนลงไปได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมตและไนเตรต เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไอออน(II) ซัลเฟตโซเดียม-เมตาไบซัลเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น สำหรับตัวออกซิไดซ์ที่ใช้ในการทดลองเป็นดังนี้

1. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงและถูกใช้อย่างกว้างขวางในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน สำหรับควบคุมสีและกลิ่น นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นตัวออกซิไดซ์สำหรับกำจัด Impurities เช่น Fe^{2+} , Mn^{2+} , S^{2-} , CN^- และ Phenol ที่มีอยู่ในน้ำเสียอุตสาหกรรมด้วย

โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เมื่อถูกเติมลงในน้ำจะเกิดสีม่วงขึ้นและสีม่วงจะหายไปเมื่อเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงสามารถใช้การเปลี่ยนแปลงของสีนี้เป็น Indicator ของการออกซิเดชันได้ (Liptak, 1974)

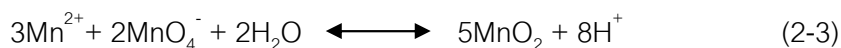
การออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Jorgensen, 1979) ในสารละลายที่เป็นกรดอย่างแรง สามารถรับได้ถึง $5e^-$ ดังนี้



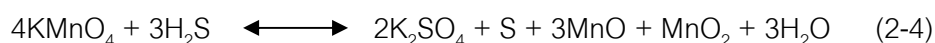
ขณะที่ในช่วงพีเอช 3-12 สามารถรับ e^- และเกิด Manganese dioxide ที่ไม่ละลายน้ำ



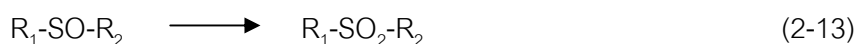
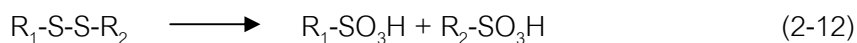
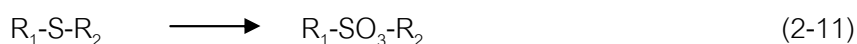
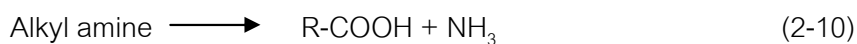
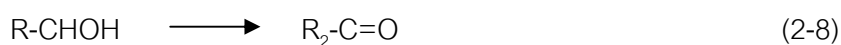
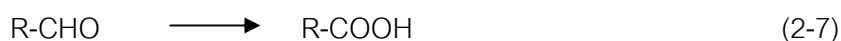
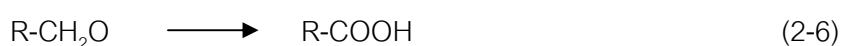
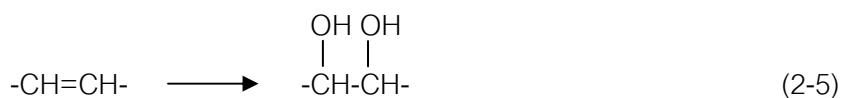
Permanganate ยังสามารถออกซิไดซ์ Manganese (II) ได้ดังนี้



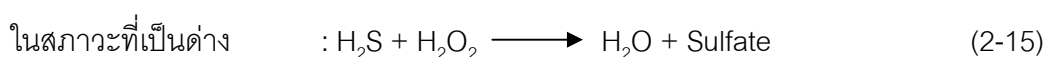
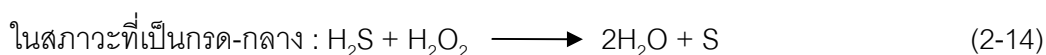
การออกซิไดซ์ Hydrogen sulfide ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น คือ



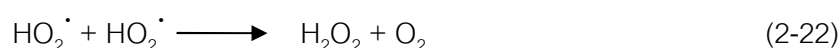
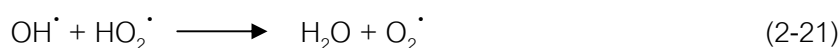
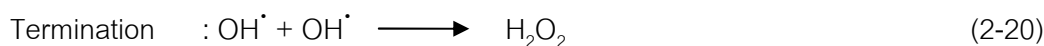
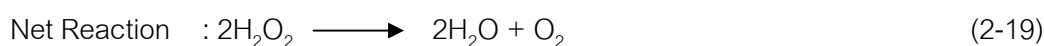
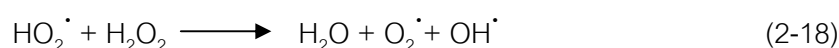
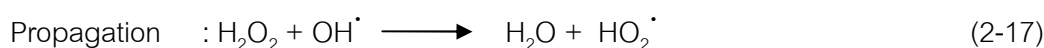
สำหรับการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ ปฏิกริยาเป็นดังนี้



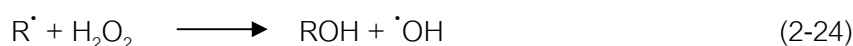
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) ถูกใช้เป็นตัวออกซิไดซ์สำหรับ sulfide ในน้ำ ความสามารถในการออกซิไดซ์นี้ ถูกใช้เพื่อควบคุมกลิ่นและการกัดกร่อนในน้ำเสีย ชุมชนและน้ำเสียอุตสาหกรรม (Jorgensen, 1979) ปฏิกริยาของ Hydrogen peroxide กับ sulfide เกิดดังนี้



การใช้รังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อมีแสงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ด้วย จะเกิด Hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) ซึ่ง radicals เหล่านี้สามารถไปทำลายพันธะตรงกลางของ HO-OH ซึ่งเป็นปฏิกิริยาเริ่มต้นของระยะ Propagation จนได้ปฏิกิริยารวมเป็นน้ำและออกซิเจน (Glaze และคณะ, 1996) ดังนี้



Hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) จะทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ ดังนี้



2.3.2 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากรู้น้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากรู้น้ำได้

1. การเกิดตะกอนทางเคมีของแคลเซียมซัลเฟต

แคลเซียมซัลเฟตเป็นสารเคมีที่ใช้ในห้องทดลองและงานอุตสาหกรรม ในรูปแอนไฮดรัสเป็นของแข็งใช้เป็นตัวดูดความชื้น ในรูปเฮมิไฮเดรตรู้จักกันดีในชื่อของพลาสติกออร์ออฟปารีส ขณะที่ไดไฮเดรตเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมีชื่อว่ายิปซัม

สมการการละลายของแคลเซียมซัลเฟตเกิดดังนี้ (Benatti และคณะ, 2009)

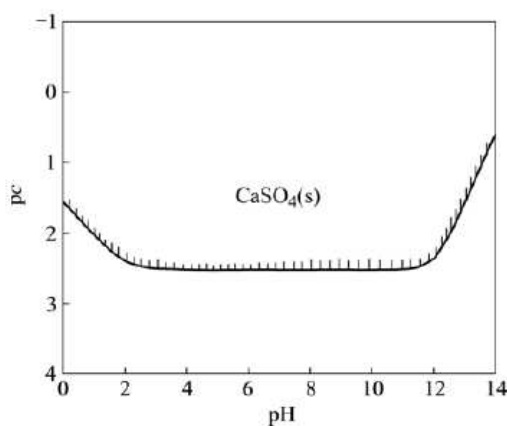


$$K_{sp} = [\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}] = 2.6 \times 10^{-5} \quad (2-26)$$

ผลของพีเอชต่อการเกิดตะกอนทางเคมีของแคลเซียมซัลเฟต

$$K_{sp} = [\text{Ca}]_t \left(1 + \frac{K_1'}{[\text{H}^+]} + \frac{K_1'}{[\text{H}^+]}\right)^{-1} \quad (2-27)$$

$$= [\text{S}]_t \left(1 + \frac{[\text{H}^+]}{K_{a2}} + \frac{[\text{H}^+]^2}{K_{a1}K_{a2}}\right)^{-1} \quad (2-28)$$



ภาพที่ 2.2 Diagram of pc-pH of $\text{CaSO}_4\text{-Ca(OH)}_2\text{-H}_2\text{O}$ system at 298.15 K
(Peng และคณะ, 2009)

จากภาพที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อระบบอยู่ในสมดุลของแคลเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นของแคลเซียมที่เหลืออยู่จะสัมพันธ์กับค่าพีเอช พื้นที่ใต้กราฟเป็น unsaturated zone และ

ในส่วนของพื้นที่เหนือกราฟเป็นส่วนของการเกิดตะกอนแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งสามารถประมาณค่าการละลายของแคลเซียมซัลเฟตที่พีเอชต่างๆได้ ซึ่งที่พีเอช 3.5-11.0 จะมีแคลเซียมซัลเฟตละลายอยู่อย่างน้อย 0.411 g/L และในช่วงพีเอชนอกเหนือจากนี้การละลายของแคลเซียมซัลเฟตจะเพิ่มขึ้น

2. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของสังกะสี

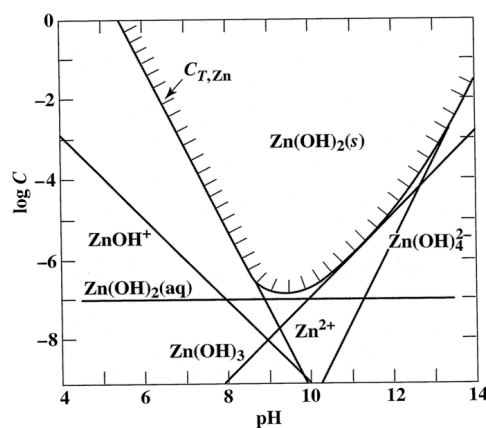
การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยการเติมสารเคมี คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนที่อยู่ในสารละลาย

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric property) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่ค่าพีเอชใดค่าพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วงค่าพีเอชที่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่ค่าพีเอช 8 ถึง 11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนจากค่าที่โลหะหนักสามารถตกตะกอนเป็นผลึกโลหะไฮดรอกไซด์ได้

สมการการละลายของสังกะสีไฮดรอกไซด์เกิดดังนี้



$$K_{sp} = [\text{Zn}^{2+}][\text{OH}^-]^2 = 1.2 \times 10^{-17} \quad (2-30)$$



ภาพที่ 2.3 Diagram of logC-pH of various forms of zinc at 298.15 K

(Jurkiewicz , 1987)

2.3.3 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

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

2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

2.4.1 ชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมี แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ของเซลล์ คือ เซลล์แกลวานิก หรือ เซลล์โวลตาอิก และเซลล์อิเล็กโทรไลต์

1. เซลล์แกลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก

เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า อันเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ในทางการค้า ตัวอย่างของเซลล์แกลวานิก คือ แบตเตอรี่เซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น สำหรับการนำเซลล์แกลวานิกในการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของการเกิดสมดุล (Equilibrium constant) ของปฏิกิริยาที่เซลล์

2. เซลล์อิเล็กโทรไลต์

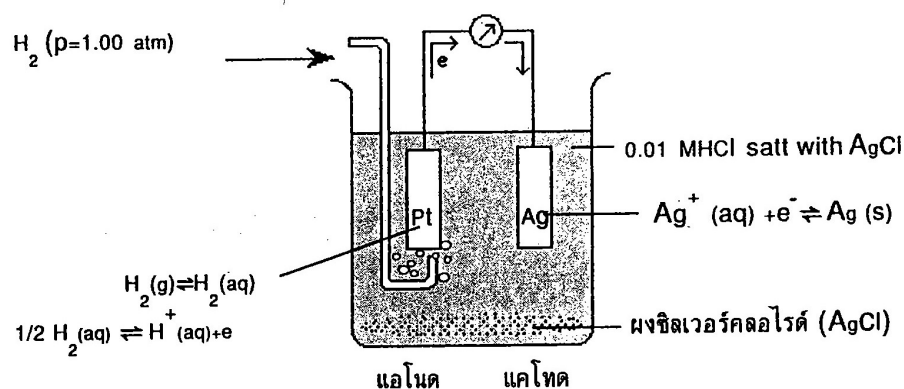
เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ ในด้านการวิเคราะห์เซลล์อิเล็กโทรไลต์ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ต้องการ โดยเทคนิควิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ เช่น โวลแทมเมตรี และอิเล็กโทรแกรวิเมตรี เป็นต้น

2.4.2 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมี 1 เซลล์ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกันหรือต่างกันได้

1. การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย (Cell without liquid junction)

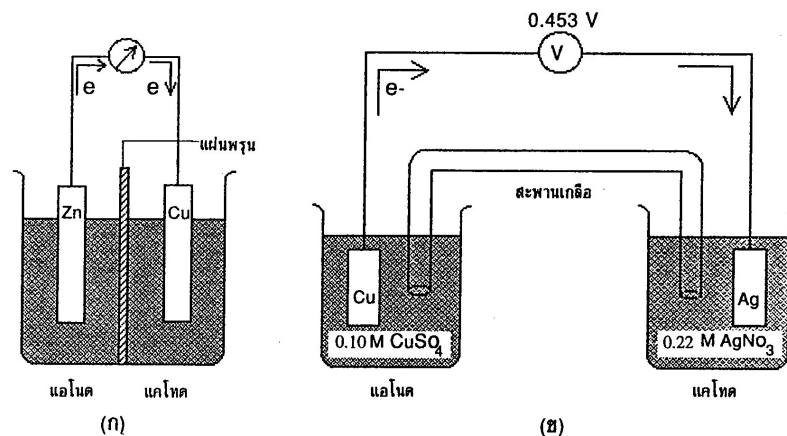
ในภาพที่ 2.4 เป็นแผ่นแพลทินัม (Pt) และแผ่นเงิน (Ag) อยู่ในสารละลาย 0.01 M HCl (กรดไฮโดรคลอริก) ที่อิ่มตัวด้วย AgCl (ซิลเวอร์คลอไรด์) โดยมีท่อผ่าน H_2 (แก๊สไฮโดรเจน) เข้ามาในสารละลายทางแผ่นแพลทินัมตลอดเวลา เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด และแท่งเงินทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด



ภาพที่ 2.4 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

2. การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cell with liquid junction)

ในภาพที่ 2.5 แต่ละขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เหมือนกัน โดยอาจต่างทั้งชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ หรือที่ความเข้มข้น หรือต่างทั้งชนิดและความเข้มข้นของแต่ละสารอิเล็กโทรไลต์ การแยกแต่ละครึ่งเซลล์ออกจากกันทำได้หลายวิธีด้วยกัน ที่ยกตัวอย่างในภาพที่ 2.5-(ก) เป็นการใส่วัสดุรูพรุน เช่น เยแก้ว เป็นต้น และภาพที่ 2.5-(ข) เป็นการแยกภาชนะของแต่ละครึ่งเซลล์ และเชื่อมด้วยแท่งแก้วบรรจุสารละลายเข้มข้น เช่น KCl (โพแทสเซียม-คลอไรด์) เป็นต้น แท่งแก้วนี้เรียกว่าสะพานเกลือ การแยกสารละลายโดยสะพานเกลือในเชิงวิเคราะห์มีข้อดีกว่าการใช้วัสดุเยแก้ว เพราะช่วยลดค่าศักย์ที่รอยต่อสารละลายได้



ภาพที่ 2.5 การจัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยมีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

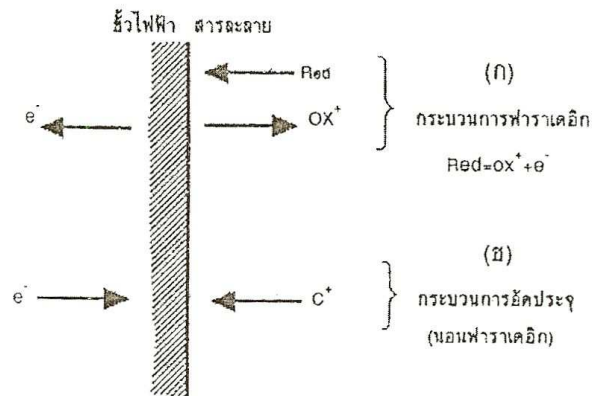
(ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน (ข) ต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ

2.5 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมีในการทำวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าจะหมายถึง กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

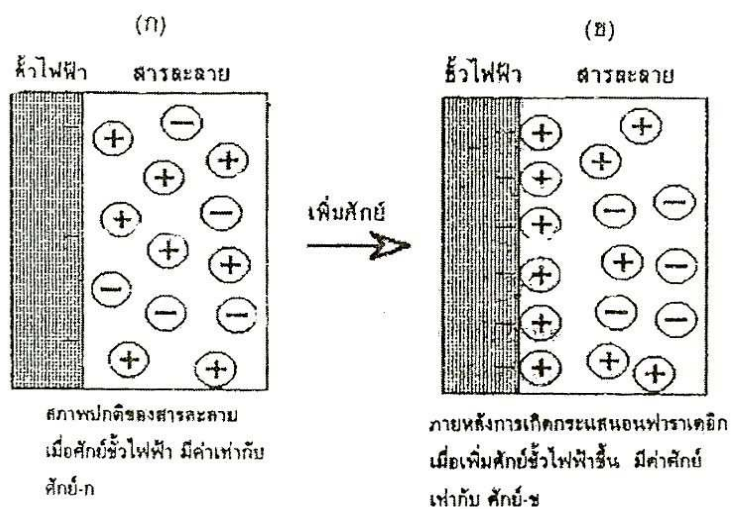
แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำ

ตรงรอยต่อ นั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Non-faradaic process) กระแสชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non-Faradaic current)



ภาพที่ 2.7 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539 : 12)

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์ หรือชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี แต่ขึ้นกับสถานะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดอิกได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2539 : 14)

ในภาพที่ 2.8 (ก) เดิมซ้ำไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์ -ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของซ้ำไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลาย มาเรียงประชิดกับซ้ำไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของซ้ำไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายทั่ว ในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับซ้ำไฟฟ้าดังในภาพที่ 2.8 (ข) สมมุติให้เท่ากับ -ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์ -ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ทันที โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพาไปที่ผิวหน้าซ้ำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ซ้ำไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าซ้ำไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสที่ไหลชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสจากการอัดเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดย

- ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าซ้ำไฟฟ้าได้
- ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของซ้ำไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารดีโพลไรเซอร์และซ้ำไฟฟ้าขณะนี้ถูกเรียกว่า ซ้ำดีโพลไรซ์

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสในวงจรอย่างต่อเนื่อง และสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจร ขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยา การรับและคายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของซ้ำไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของซ้ำไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสและศักย์ย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ซ้ำไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาริเซชัน ขณะที่เกิดโพลาริเซชันซ้ำไฟฟ้าถูกโพลาริซ์ ทำให้กระแสในวงจรลดลง การที่จะทำให้โพลาริเซชันหมดไป จำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์แก่วงจรนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรนี้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential overvoltage)

2.5.2 โพลาริเซชัน

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

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

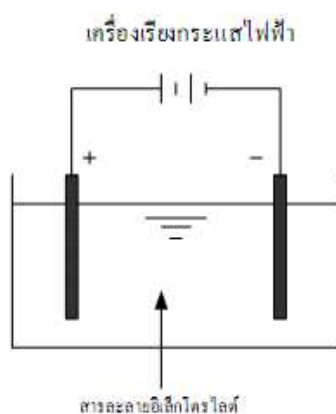
2. โพลาริเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization) เกิดขึ้นจากการชะลอลงของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผล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

2.6 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอน โดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง (Mollah, 2004) สำหรับการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 4 รูปแบบ ดังนี้

2.6.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell)

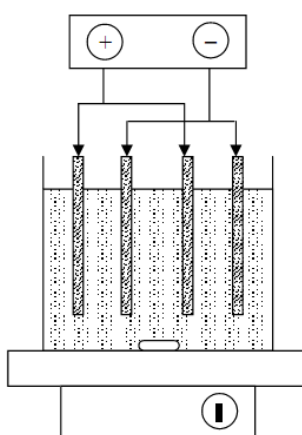
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งการจัดเรียงแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ และมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามาก



ภาพที่ 2.9 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Pertorius และคณะ, 1991)

2.6.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel)

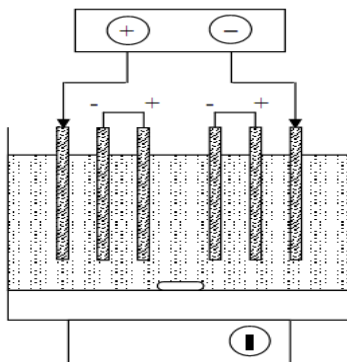
กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมโนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)

2.6.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series)

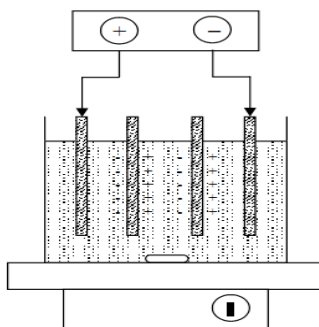
มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกันโดยมีการเชื่อมจุดอิเล็กโทรดเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละอิเล็กโทรด ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)

2.6.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode)

มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด ดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามี่ด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด และอีกด้านเป็นขั้วบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะการใช้งาน



ภาพที่ 2.12 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Chen, 2004)

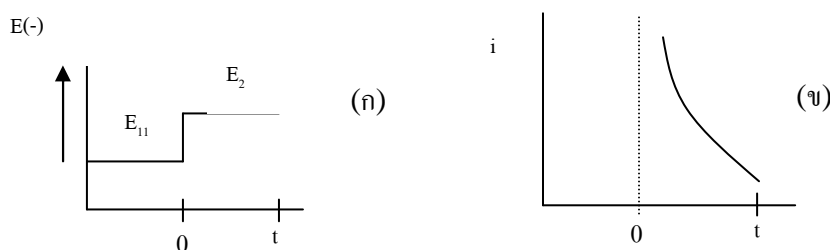
2.7 การควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

รูปแบบการควบคุมการทำงานของกระบวนการไฟฟ้าเคมี สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.7.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)

เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์ที่เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.13 (ก) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

โดยที่ E_1 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.13 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i = kC$)



ภาพที่ 2.13 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

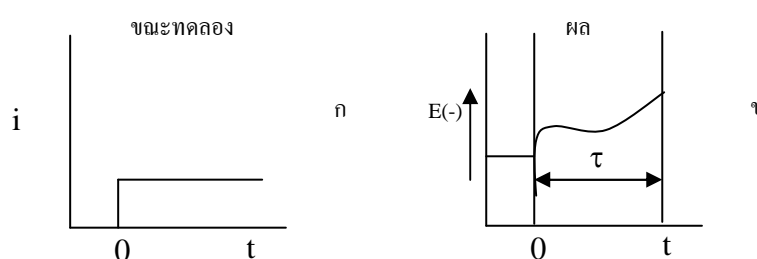
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Friedrich, 1962 : 330)

2.7.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric technique โดยเป็นการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าให้คงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ 2-33



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังแสดงในภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Friedrich, 1962 : 335)

2.8 ศักย์ขั้วไฟฟ้า

คำจำกัดความของศักย์ขั้วไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ของเซลล์ไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ซึ่งการที่ต้องกำหนดขั้วแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนก็เพื่อให้อ้างอิงและสามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน และในการกำหนดเครื่องหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC ได้กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาศักย์ไฟฟ้า 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 ซึ่งศักย์ไฟฟ้าจำนวนนี้ คือ ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential) โดยมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสกับความต้านทาน (IR) ดังนั้นค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม จึงต้องมีเทอมของศักย์ไฟฟ้าจากความต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_R \quad (2-34)$$

2.8.3 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน (E_p, η)

โพลาริเซชันเกิดขึ้นได้ 2 แบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 คือ เกิดเนื่องมาจากผลของความเข้มข้นและแบบจลน์ ซึ่งต้องแก้ไขโดยการเพิ่มประมาณของกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นหรือทำการเพิ่มศักย์ของวงจรให้สูงขึ้น ศักย์ที่ถูกเพิ่มนี้จะเรียกว่า 'ศักย์เกินตัว' (Overpotential, η) จึงทำให้ค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวมต่างจากค่าอุณหภูมิวัตจากการคำนวณ ดังนั้นถ้ามีโพลาริเซชันเกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ การแสดงค่าผลลัพท์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม เป็นดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_R - \eta \quad (2-35)$$

2.9 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

การไหลของกระแสที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำเซลล์ไฟฟ้า โดยต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 จูล เพื่อให้

เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมป์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ และจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมป์ ดังสมการ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมป์} \times \text{โวลต์} \quad (2-36)$$

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุที่อยู่ในหน่วยคูลอมป์จึงขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปฏิกิริยา โดยทุกๆ 1 โมลของอิเล็กตรอน จะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมป์ หรือ F คูลอมป์ ซึ่ง F ก็คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ ดังนั้นสมการที่แสดงถึงงานทางไฟฟ้าสุทธิที่มีหน่วยของอิเล็กตรอนเข้ามาเกี่ยวข้องก็คือ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = nF \times \text{โวลต์} \quad (2-37)$$

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

$$I = \text{ohm} \times E_f \quad (2-38)$$

$$E_f = I / \text{ohm} \quad (2-39)$$

$$E_f = V / (R \times \text{ohm}) \quad (2-40)$$

โดย	ohm	=	ค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอมห์ต่อเซนติเมตร
	V	=	ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น โวลต์
	R	=	ค่าความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น โอมห์
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น แอมแปร์

2.9.2 ค่าความนำไฟฟ้า

ค่าความนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และ ปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ส่วนค่าความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในวิธีทางไฟฟ้าเคมีนั้นจะหมายถึง ความต้านทานที่เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับค่าความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นไปตามสมการ คือ

$$R = L / (C \times A) \quad (2-41)$$

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

2.9.3 กำลังไฟฟ้า

ปริมาณไฟฟ้า Q คูลอมบ์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านในเวลา t วินาที

$$Q = i \times t \quad (2-42)$$

พลังงานไฟฟ้า (W) จะหมายถึง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานในเวลา t วินาที โดยที่ตัวต้านทานนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น E โวลต์

$$W = E \times i \times t \quad (2-43)$$

$$W = E \times Q \quad (2-44)$$

กำลังไฟฟ้า (Watt, P) คำนวณได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

$$P = W / t \quad (2-45)$$

2.10 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (อินทิตรา หาญพงษ์พันธ์, 2539)

มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แคโทด ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยใช้ปริมาณไฟฟ้าที่เท่ากัน เป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อทำให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังสมการที่ 2-46

$$F \text{ (Faraday)} = e \times N \quad (2-46)$$

$$F \text{ (Faraday)} = (1.62 \times 10^{-19}) \times (6.02 \times 10^{23}) \quad (2-47)$$

$$F \text{ (Faraday)} = 96,487 \text{ C mol}^{-1} \quad (2-48)$$

หรือ

$$1 \text{ Faraday} = 96,500 \text{ C mol}^{-1} \quad (2-49)$$

$$X \text{ Coulomb} = i \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)} \quad (2-50)$$

เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้โดยการใช้อนุของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = \frac{s(M.W.)it}{nF} \quad (2-51)$$

โดย	W	=	มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี มีหน่วยเป็น กรัม
	s	=	สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพัทธ์ของชนิดสารเคมี
	M.W.	=	มวลโมเลกุล มีหน่วยเป็น กรัมต่อโมล
	i	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	t	=	เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

- n = จำนวนโมลของตัวออกซิไดซ์ตามสมการเคมี มีหน่วยเป็น น้ำหนัก
สมมูลย์ต่อโมล
- F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์ต่อน้ำหนักสมมูลย์)

2.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency)

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมี นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เพราะ กระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงสุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับว่าเป็นกระบวนการที่ดี โดยประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จากสมการที่ 2-52

$$\text{Current efficiency (t) \%} = \frac{nF(C_o - C_t) V \times 100\%}{\int_0^t I(t) dt} \quad (2-52)$$

- 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)

2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

ทิศทางของอิออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุอิออน ความสามารถของอิออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ ประจุบนอิออนและขนาดอิออน

3. คุณหมุมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับคุณหมุมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้น 2 เปอร์เซ็นต์ ต่อการเพิ่มขึ้นของคุณหมุมิ 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้ว ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า และจำนวนกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่อิออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยจะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
6. จำนวนประจุของอิออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ

2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.13.1 ไฟฟ้าเคมี

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

คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ (2545) ได้ศึกษาถึงการแยกสังกะสีออกจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงชุบเพชรเกษมซึ่งใช้น้ำยาชุบสังกะสีชนิดไซยาไนด์ และน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ขั้วแคโทดเป็นสแตนเลสสตีล และตะกั่วจากโรงงานแบตเตอรี่รถยนต์เป็นขั้วแอโนด จากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการแยก

สังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสี 500 ส่วนในล้านส่วน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร เท่ากับ 96.7 เปอร์เซนต์ และมีประสิทธิภาพของกระแสเท่ากับ 7.08 เปอร์เซนต์ ในส่วนของน้ำเสียจริงที่ความหนาแน่นของกระแส 0.6 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีเท่ากับ 97.9 เปอร์เซนต์ และมีประสิทธิภาพของกระแสเท่ากับ 8.26 เปอร์เซนต์

ศรายุทธ ลาภพูนผล (2549) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย ศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างขั้ว พื้นที่ผิว อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรงต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ แบบขนาน ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงสุดมากกว่า 99 เปอร์เซนต์ ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ระยะระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเสียเข้าถัง 21.11 มิลลิเมตรต่ออนาที คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

สหรัฐ เซาว์รูปดี (2552) ศึกษาการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอนโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยนำไปตกตะกอนกับไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ และใช้วิธีไฟฟ้าเคมี ซึ่งมีการจัดเรียงขั้วแบบเซลล์เดี่ยวและเซลล์ขนาน และทำการแปรเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้า จากนั้นใช้ค่าสภาวะที่เหมาะสมมาใช้กับน้ำเสียจริง พบว่าการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ที่พีเอช 10 และซัลไฟด์ที่พีเอช 9 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี มากกว่า 99 เปอร์เซนต์ และวิธีทางไฟฟ้าเคมีที่จัดเรียงขั้วแบบขนาน ที่กระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี 100 เปอร์เซนต์ ในน้ำเสียสังเคราะห์ และ 24 เปอร์เซนต์ ในน้ำเสียจริง

Scott และคณะ (1997) ได้ศึกษาถึงการนำกลับของโลหะดีบุก ตะกั่ว และทองแดง จากสารละลายที่ได้จากการล้างแผงวงจรไฟฟ้า โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร ในการศึกษานี้มีสองวิธีในการนำกลับโลหะ วิธีแรก คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการนำกลับโลหะทั้งหมด วิธีที่สอง คือ การใช้ไฟฟ้าเคมีในการเกิดการพอกพูนของทองแดง และทำให้เกิดการตกตะกอนของดีบุกและตะกั่ว ซึ่งนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเข้า

เตาเผา การใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร เพราะว่าสามารถใช้ในการนำกลับโลหะ โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีได้ และลดการเกิดหมอกระหว่างการล้างแผงวงจร ในวิธีการแรกแยกดีบุก ออกจากสารละลายด้วยวิธีการกรอง เนื่องจากเกิดไฮเดรตทินด์ออกไซด์ ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถ ละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และนำกลับได้โดยการใช้ไฟฟ้าเคมี โดยให้เกิดการพอกพูนที่ขั้ว เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไททาเนียมเป็นขั้วแอโนด หลังจากที่มีการแยกดีบุกแล้วสารละลายที่มีไอออน ของทองแดงและตะกั่วจะสามารถนำกลับด้วยการพอกพูนของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับดีบุก และจะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสำหรับการนำกลับ ของโลหะ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่เป็นการประหยัดถ้าหากเทียบกับการตกตะกอนด้วยต่าง อีกตัวเลือกหนึ่งของการนำกลับทองแดงโดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี โดยรวมกันกับการตกตะกอน ดีบุกและตะกั่ว ก่อนที่จะมีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือ $PbSO_4$ และ SnO_2 จะ ถูกส่งไปเผา เพื่อที่จะผลิตโลหะผสมขึ้นมา วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่ไม่เป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อมเหมือนกับการนำกลับโลหะทั้งหมดโดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี เพราะว่าในการเผานั้นจะ เกิดก๊าซ และเกิดกากโลหะขึ้น

Fourcade และ Tzedakis (2000) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ในการ เกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดน์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน การศึกษาถึงปริมาณ ประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่าของกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการ ดูดติดของ ซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการ พอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดน์จะ เกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่ากระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สอง ซิลเวอร์ไอโอไดน์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่ากระแส 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สาม คือ การเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งของซิลเวอร์- ไอโอไดน์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนหลักเมื่อเทียบกับในสองขั้นตอนแรกเพราะใช้ค่ากระแสมาก ที่สุด คือ 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

2.13.2 การตกตะกอน

Chong และ Sheikholeslami (2001) ศึกษาเทอร์โมไดนามิกส์และไคเนติก ของ การตกตะกอนร่วมระหว่างแคลเซียมซัลเฟตและแคลเซียมคาร์บอเนตในระบบ Batch ที่อุณหภูมิ

60, 70 และ 80 องศาเซลเซียส โดยเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมคาร์บอเนตเท่ากับ 0.03 โมลาร์ และช่วงความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตอยู่ระหว่าง 0-0.01 โมลาร์ พบว่า ที่ความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตระหว่าง 0.002-0.01 โมลาร์ จะช่วยเพิ่มการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตได้

Jones และคณะ (2004) ศึกษาผลกระทบของแคลเซียมไอออนต่อการตกตะกอนของแบเรียมซัลเฟต พบว่า ที่ความเข้มข้นแคลเซียมไอออนน้อยกว่า 0.00025 โมลาร์ สิ่งส่งผลต่อการตกตะกอนคือ ค่า ความแรงของประจุ ที่ความเข้มข้นแคลเซียมไอออนมากกว่านี้ จะเริ่มส่งผลต่อการตกตะกอนของแบเรียมซัลเฟต โดยแคลเซียมจะเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย และเพิ่มความสามารถในการละลายของแบเรียมซัลเฟตได้

Benatti และคณะ (2009) ศึกษาการกำจัดซัลเฟตออกจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยเฟนตันรีเอเจนท์ โดยนำไปตกตะกอนกับแบเรียมและแคลเซียม และหาพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอน พบว่า พีเอช 4 มีประสิทธิภาพมากที่สุด การตกตะกอนด้วยแบเรียมสามารถกำจัดซัลเฟตได้มากกว่า 61.4 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การตกตะกอนด้วยแคลเซียมสามารถกำจัดซัลเฟตได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ และตะกอนที่ได้คือยิปซัมซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

Tait และคณะ (2009) ศึกษาการกำจัดซัลเฟตออกจากน้ำที่มีการปนเปื้อนสูง พบว่า ตะกอนหลักที่ได้คือ แคลเซียมซัลเฟต (ยิปซัม) และพบว่า impurity ต่างๆ ในน้ำจะยับยั้งการเกิดผลึกและเพิ่มความสามารถในการละลายของแคลเซียมซัลเฟต ดังนั้นจึงต้องเติมแคลเซียมให้มากเกินไปพอ เช่น เติมแคลเซียม 10 กรัมต่อลิตร เพื่อกำจัดซัลเฟต 0.25 กรัมต่อลิตร สำหรับตะกอนซัลเฟตอื่นๆ จะมีความสามารถในการละลายน้อยกว่าแคลเซียมซัลเฟต และจะไม่เกิดผลึกที่ค่าพีเอช 5-9

2.13.3 ออกซิเดชัน

แม่น้ำน้อย วิจิตรจรรยากุล (2543) ศึกษาการบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนัง โดยวิธีตกตะกอนและออกซิเดชัน โดยใช้ตัวช่วยตกตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมซัลเฟต, โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และเฟอร์รัสซัลเฟต ใช้ตัวออกซิไดซ์ 4 ชนิด ได้แก่ อากาศ, โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต, โซเดียมไฮโปคลอไรด์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า

อะลูมิเนียมซัลเฟตเป็นตัวช่วยตกตะกอนที่ดีที่สุด และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีที่สุด ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีไอดี 51.37 เปอร์เซ็นต์

อาริตรา ทะริยะะ (2546) ศึกษาการใช้รังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์จากน้ำเสียของโรงพยาบาลโดยหาสภาวะที่เหมาะสมได้แก่ พีเอช อัตราส่วนโมลาร์ของฟอร์มาลดีไฮด์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยใช้แสงยูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ การทดลองที่พีเอช 7 ใช้อัตราส่วนโมลาร์ของฟอร์มาลดีไฮด์ต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 1:2 และใช้เวลาในการย่อยสลาย 240 นาที

Chang และคณะ (1993) ศึกษาการกำจัดกรดอะซิติกด้วยโพแทสเซียม-เปอร์แมงกาเนต โดยศึกษาในถังปฏิกรณ์แบบที่ละเท แปรค่าอุณหภูมิ 400 ถึง 460 องศาเซลเซียส ความดัน 275 ถึง 350 บาร์ เปรียบเทียบกับตัวออกซิแดนซ์อื่นๆ ได้แก่ ออกซิเจน, ไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์, คอปเปอร์ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, เหล็กร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแมงกานีสซัลเฟตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่า โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยสามารถกำจัดกรดอะซิติกได้ 77 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 0.3 กรัมต่อมิลลิลิตร ใช้เวลา 2.5 นาที เมื่อใช้สภาวะเดียวกันนี้ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการกำจัดกรดอะซิติกเท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์

Garves (1997) ศึกษาอัตราการย่อยสลายของเซลลูโลสในสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตในสภาวะที่เป็นกรด พบว่ามีค่าเอนทัลปีเท่ากับ 63.2 kJ/mol เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพิ่มขึ้น จะเกิดการย่อยสลายของเซลลูโลสมากขึ้น เมื่อนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาออกซิเดชันจะได้คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบ ปฏิกิริยานี้ยังสามารถใช้ในการย่อยสลายนินได้ด้วย

Tanja และคณะ (2003) ศึกษาการกำจัดสีสังเคราะห์โดยเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้รังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเฟนตัน พบว่าการใช้เฟนตันใช้เวลาในการกำจัดสีเร็วที่สุด ต้นทุนต่ำ แต่ยังคงมีค่าซีไอดีสูงและเกิดสลดจ์มาก การใช้ไอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ได้ค่าซีไอดีต่ำ แต่ใช้เวลานานที่สุดและต้อง

ลงทุนสูง และการใช้รังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทำให้ได้ค่าซีไอดีต่ำ ไม่ทำให้เกิดสลัดจ์ แต่ต้องลงทุนสูง

Muruganandham และ Swaminathan (2004) ศึกษาการกำจัดสีสังเคราะห์โดยการใช้อุณหภูมิร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยศึกษาผลของพีเอช ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กำลังของหลอดยูวี พบว่าสภาวะที่ดีที่สุดคือ พีเอชเท่ากับ 3 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 20 มิลลิโมลาร์ เมื่อใช้กำลังของหลอดยูวีมากขึ้นจะทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลมากขึ้นจึงกำจัดสีได้มากขึ้น และปฏิกิริยาเป็นแบบ pseudo-first order

Taner และคณะ (2006) ศึกษาการใช้อุณหภูมิร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการบำบัดน้ำเสียชุมชน โดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่อง พบว่าสามารถลดค่าซีไอดีได้ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลา 60 นาที ที่พีเอชเท่ากับ 3 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้พลังงานไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมซีไอดี โดยยังใช้กำลังไฟฟ้าหลอดยูวีสูงจะช่วยลดเวลาในการทำปฏิกิริยาได้

Aleboye และคณะ (2009) ศึกษาการกำจัดสีย้อมด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสี, ปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต, พีเอช และอุณหภูมิ พบว่าความเป็นกรดและอุณหภูมิส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสี โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมคือที่ อุณหภูมิห้อง และพีเอชที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 2-4 และเมื่อเพิ่มปริมาณโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นด้วย

Eduardo และ Thiago (2009) ศึกษาการใช้ระบบไร้อากาศแล้วตามด้วยวิธีออกซิเดชันกำจัดสารที่ย่อยสลายยากจากน้ำเสียโรงงานผลิตกระดาษ ตัวออกซิแดนซ์ที่ศึกษาคือ โอโซน, รังสียูวี และโอโซนร่วมกับรังสียูวี พบว่า หลังจากบำบัดด้วยระบบไร้อากาศแล้ว การใช้โอโซนเพียงอย่างเดียวสามารถกำจัดซีไอดีได้ 50 เปอร์เซ็นต์ การใช้รังสียูวีเพียงอย่างเดียวสามารถกำจัดซีไอดีได้ 34 เปอร์เซ็นต์ และการใช้โอโซนร่วมกับรังสียูวีให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยสามารถกำจัดซีไอดีได้ 70 เปอร์เซ็นต์

Vilhunen และคณะ (2010) ศึกษาการใช้ยูวีโฟโตไลซิสและรังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำ ได้แก่ น้ำผิวดินที่ผ่านการตกตะกอนแล้ว น้ำใต้ดินที่มีสารเคลือบไม้ปนเปื้อน และน้ำล้างจากโรงงานตัดเย็บเสื้อผ้าที่มีไดคลอโรอีเทนปนเปื้อน หาค่าพีเอชและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม พบว่าการใช้รังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.3 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 60 นาที สามารถกำจัดสารอินทรีย์และสารที่เป็นพิษ (PAHs และ 1,2-DCE) ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าใช้รังสียูวีหรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว

สรุปเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ไฟฟ้าเคมี

1. การล้างขั้วไฟฟ้า ควรใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างขั้วไฟฟ้า
2. ขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้ในการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีคือ แกรไฟต์ เหล็ก เงิน อะลูมิเนียม สแตนเลสสตีล ตะกั่ว
3. ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีคือ กระแสไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรสารละลาย (A/V)

การตกตะกอน

พีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตคือที่พีเอชเท่ากับ 4 และต้องเติมแคลเซียมให้มากเกินพอ เนื่องจาก impurity ต่างๆในน้ำจะยับยั้งการเกิดผลึกและเพิ่มความสามารถในการละลายของแคลเซียมซัลเฟต

ออกซิเดชัน

การออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถกำจัดซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 3

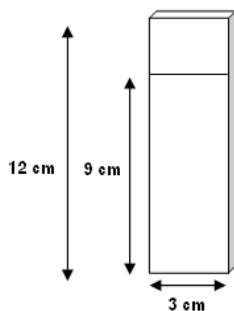
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digital Balance) : Mettler Toledo, Dragon 204
2. เครื่องวัดค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้า (pH/Conductivity meter): Mettler Toledo, Seven Multi pH/Conductivity
3. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) : PERKIN ELMER, AAnalyst 100
4. เครื่องไอออนโครมาโทกราฟี (Ion Chromatography) : DIONEX LC 25
5. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer) : VELP, ARED
6. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply) : GW, INSTEK
7. ถังปฏิกิริยาทำจากอะครีลิค
8. กระดาษกรอง (Filter paper) : Whatman No.2
9. หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตชนิด Low-pressure mercury lamp : Philips CLEO 15 W
10. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
11. ขั้วไฟฟ้า มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ขนาด 3 × 12 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดที่ใช้สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

3.1.2 สารเคมี

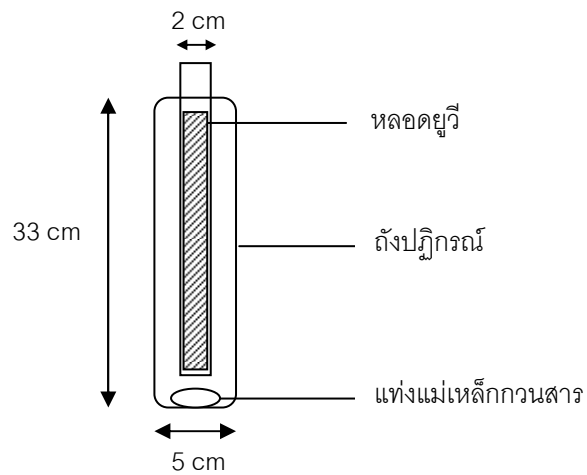
1. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl) : Carlo ERBA
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) : Carlo ERBA
3. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium Permanganate, KMnO_4) : Carlo ERBA
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen Peroxide, H_2O_2) : Carlo ERBA
5. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) : QP Panreac
6. โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium Dichromate, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) : UNILAB
7. ผงวุ้น (Agar powder)

3.1.3 การเตรียมน้ำเสียจริง สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และสะพานเกลือ

1. น้ำเสียจริง เป็นน้ำที่เก็บจากส่วนปล่อยทิ้งจากระบบการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน เก็บใส่ถังพลาสติกสีดำ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง
2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เตรียมจากชั่ง NaCl 117 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
3. สารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์ เตรียมจากชั่ง NaCl 292.5 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
4. สะพานเกลือ เตรียมจากการนำสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์จากข้อ 3. ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด หลังจากนั้นนำมาผสมกับผงวุ้น 5 กรัม คนให้สารละลายเข้ากัน ต้มต่อไปอีก 30 วินาที จนกระทั่งสารละลายข้นเหนียว แล้วบรรจุลงในถังปฏิริยาตรงบริเวณที่ใส่สะพานเกลือ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายภายในถังปฏิริยาแข็งเป็นวุ้น

3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ทำการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ พีเอชเริ่มต้น อัตราส่วนโมลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อซีโอดี เวลาในการฉายแสงยูวี โดยอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองและลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ได้แสดงไว้ในภาพที่ 3.2

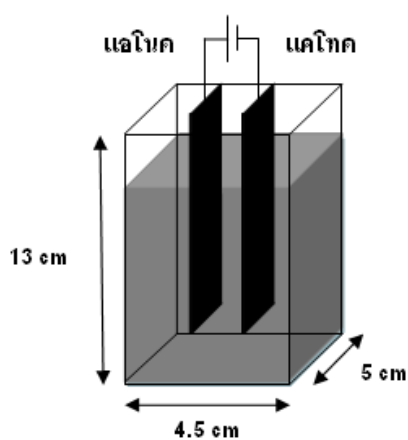


ภาพที่ 3.2 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

3.1.5 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย จัดวางขั้วไฟฟ้าแบบหลายเซลล์เดี่ยว

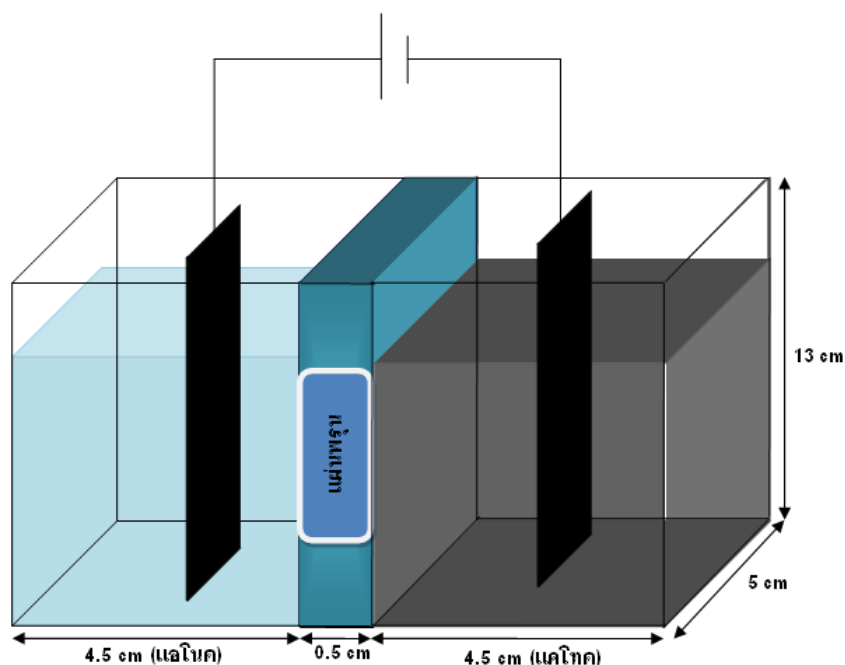
1. บรรจุน้ำเสียปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในถังปฏิกิริยา
2. ขั้วบวกและขั้วลบ นำมาต่อเข้ากับแผ่นแกรไฟต์ ที่มีขนาด 3 x 12 ตารางเซนติเมตร ขั้วละ 1 แผ่น การจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย โดยจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยวจำนวน 1 คู่

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพอรอน

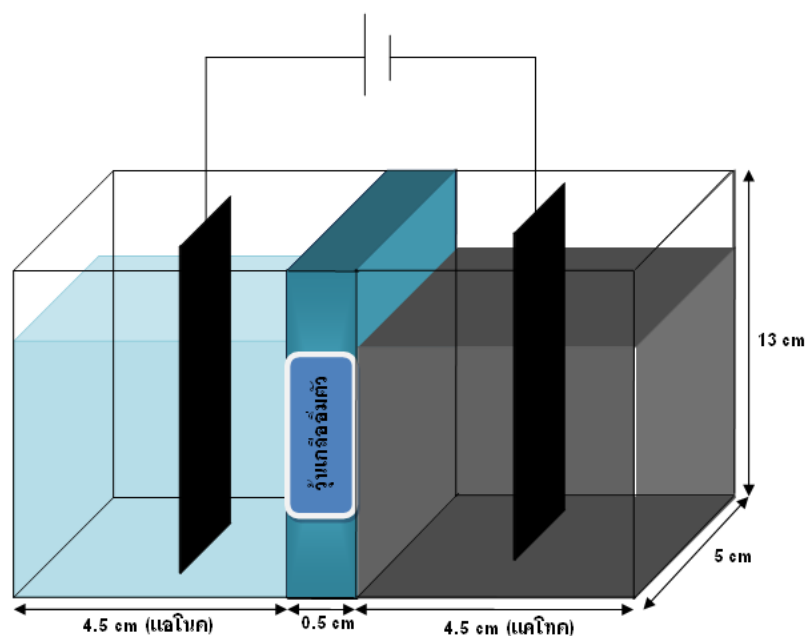
1. ในถึงปฏิกิริยา เครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ส่วนเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด บรรจุน้ำเสียปริมาตร 200 มิลลิลิตร
2. ขั้วบวกและขั้วลบ นำมาต่อเข้ากับแผ่นแกรไฟต์ ขั้วไฟฟ้าแอโนดทำจากแผ่นแกรไฟต์ ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทดทำจากแผ่นแกรไฟต์ ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น ตามลำดับ การจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพอรอน

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลืออิ่มตัว

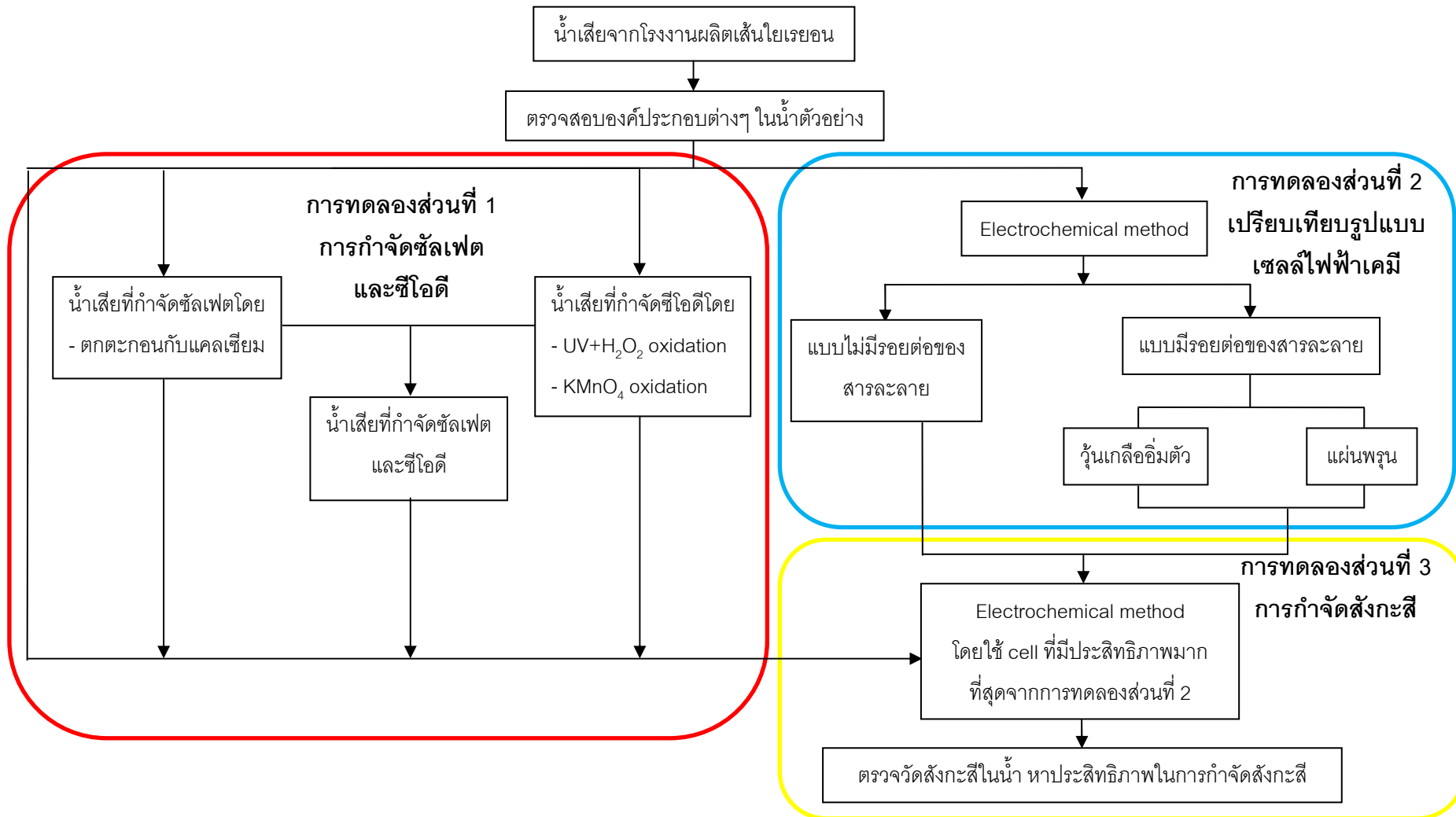
1. ในถึงปฏิกิริยา ครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ส่วนครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด บรรจุน้ำเสียปริมาตร 200 มิลลิลิตร
2. ขั้วบวกและขั้วลบ นำมาต่อเข้ากับแผ่นแกรไฟต์ ขั้วไฟฟ้าแอโนดทำจากแผ่นแกรไฟต์ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทดทำจากแผ่นแกรไฟต์ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น ตามลำดับ การจัดอุปกรณ์การทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลืออิ่มตัว

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนการทดลองหลัก คือ การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน โดยการกำจัดซัลเฟตด้วยการตกตะกอนกับแคลเซียม และกำจัดซีโอดีด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตและออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ สำหรับการทดลองในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาหาแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี โดยรูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบคือ แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน และแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลิอิมตัว โดยจะเลือกใช้รูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด การทดลองในส่วนที่ 3 เป็นการนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟต กำจัดซีโอดี กำจัดทั้งซัลเฟตและซีโอดี และน้ำเสียที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ มากำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีต่อไป โดยมีผังแสดงการทดลองดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ผังการทำวิจัย

3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1

3.2.1.1 การทดลองการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียม

การทดลองการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียม มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย ได้แก่ การหาพีเอชเริ่มต้นและอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตที่เหมาะสม โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. การหาพีเอชที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.7 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

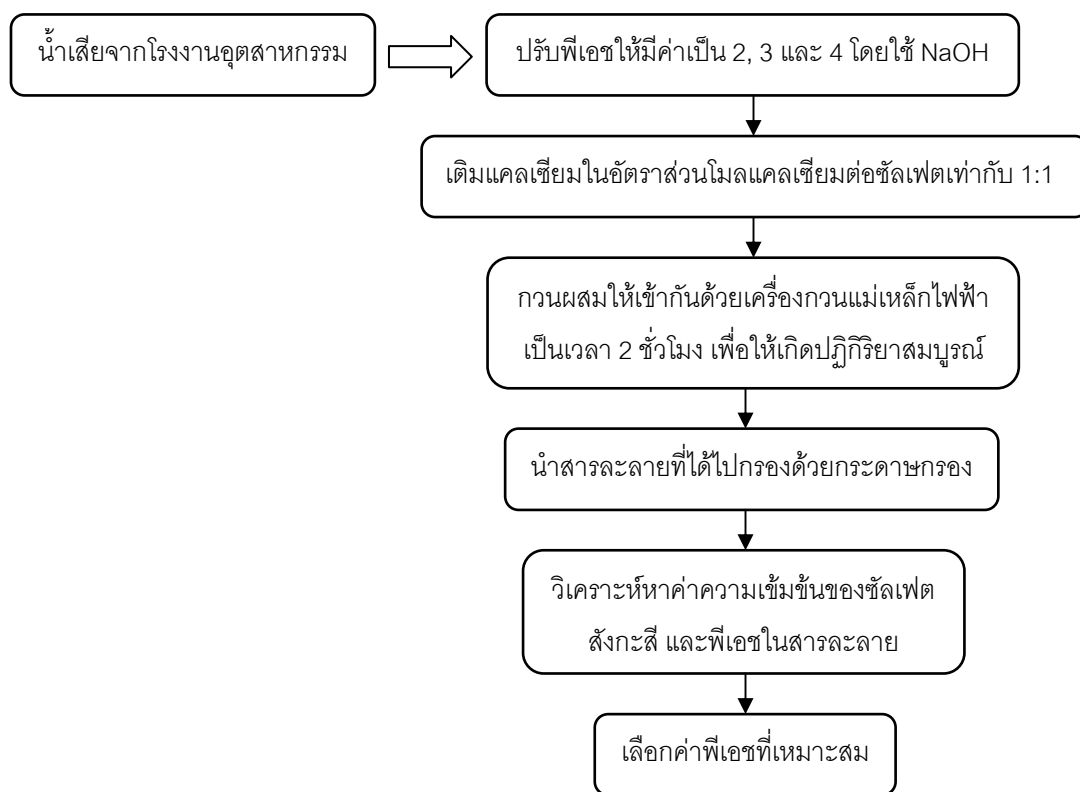
1. เตรียมน้ำเสีย ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
2. ปรับพีเอช โดยทดสอบที่ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 2, 3 และ 4 ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์
3. เติมแคลเซียมในอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 1:1
4. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้

เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์

5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
6. ตรวจวัดค่าพีเอช ซัลเฟต และสังกะสี
7. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ	1. อุณหภูมิห้อง
2. สารที่ใช้ในการตกตะกอน	2. แคลเซียมคลอไรด์
3. อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต	3. 1:1
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. พีเอช	1. พีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 4
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการตกตะกอน	1. ค่าความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลาย



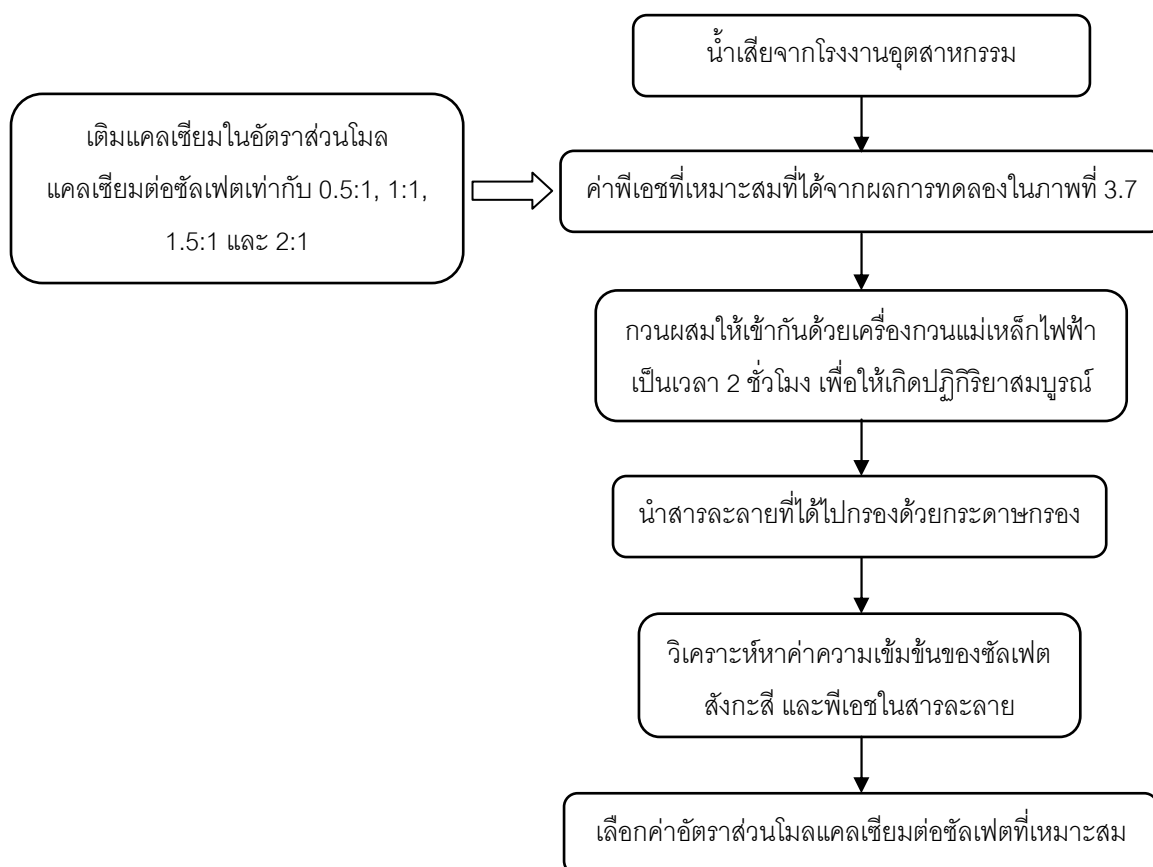
ภาพที่ 3.7 วิธีการทดลองการหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดซัลเฟต ด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียม

2. การหาอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.8 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสีย ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
2. ปรับพีเอช โดยใช้ค่าของพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมจากผลการทดลองในส่วนที่ 1 ของวิธีการตกตะกอนด้วยแคลเซียม
3. เติมแคลเซียมในอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1
4. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูร์น
5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
6. ตรวจวัดค่าพีเอช ซัลเฟต และสังกะสี
7. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ 2. สารที่ใช้ในการตกตะกอน 3. พีเอช	1. อุณหภูมิห้อง 2. แคลเซียมคลอไรด์ 3. ค่าเหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในตารางที่ 3.1
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต	1. 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการตกตะกอน	1. ค่าความเข้มข้นของซัลเฟตในสารละลาย



ภาพที่ 3.8 วิธีการทดลองการหาอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตที่เหมาะสม

3.2.1.2 การทดลองการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชัน

การทดลองการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชัน มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย โดยเลือกใช้การออกซิเดชัน 2 แบบ คือ ออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

1. การทดลองการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

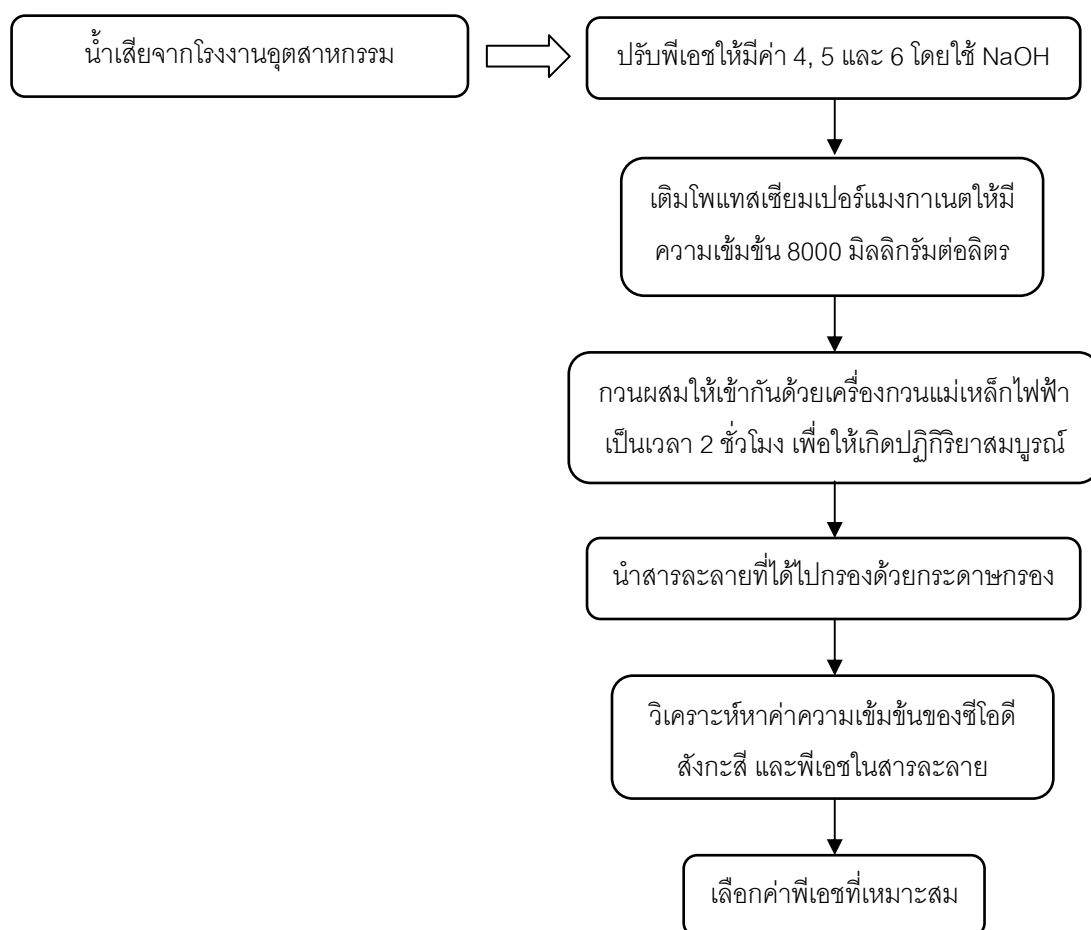
การทดลองการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย ได้แก่ การหา พีเอชและความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสม โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1.1 การหาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.3 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.9 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสีย ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
2. ปรับพีเอช โดยทดสอบที่ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 4, 5 และ 6 ด้วยไฮดรอกไซด์
3. เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้มีความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเท่ากับ 8000 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์
5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
6. ตรวจวัดค่าพีเอช ซีโอดี และสังกะสี
7. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ 2. สารที่ใช้ในการออกซิเดชัน 3. ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	1. อุณหภูมิห้อง 2. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3. 8000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. พีเอช	1. พีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 6
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี	1. ค่าซีโอดีในสารละลาย



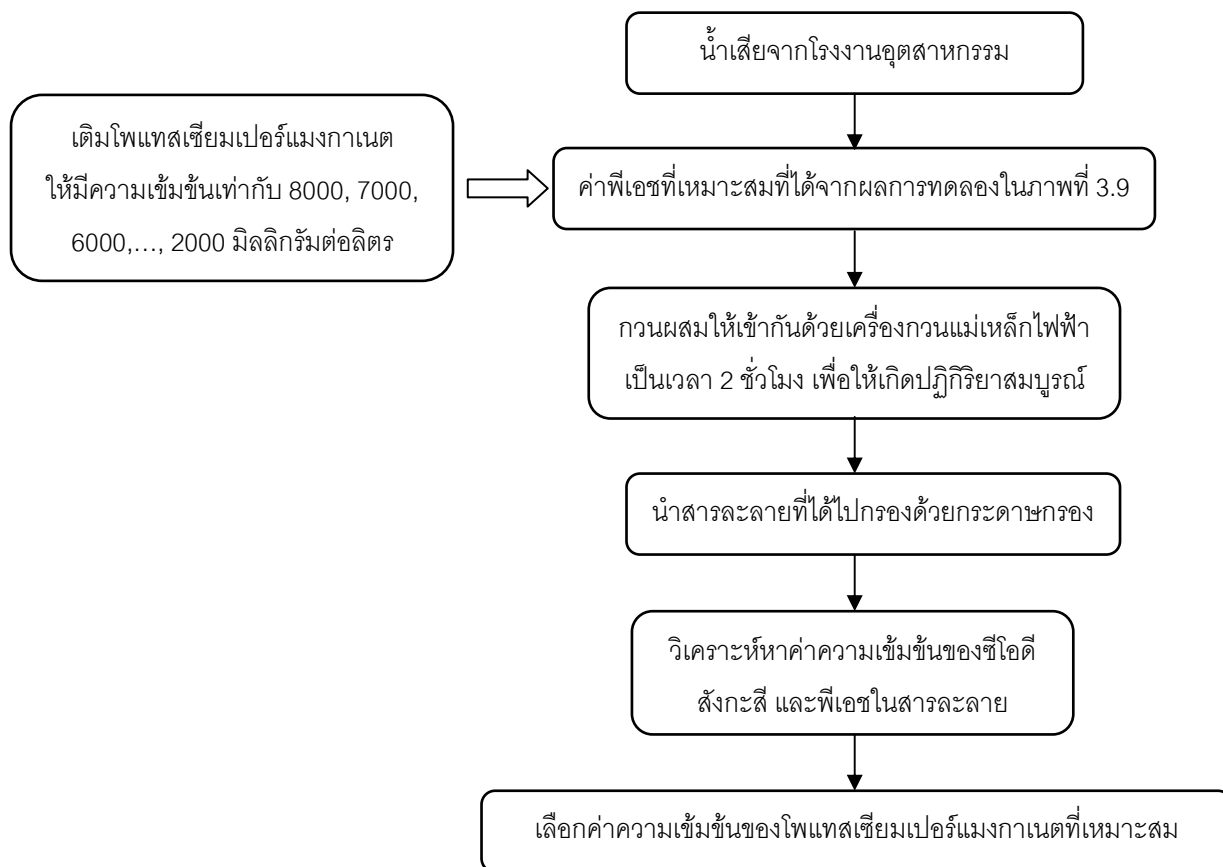
ภาพที่ 3.9 วิธีการทดลองการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

1.2 การหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.10 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสีย ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ลงในปิกเกอร์
2. ปรับพีเอช โดยใช้ค่าของพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมจากผลการทดลองในส่วนที่ 1.1 ของวิธีการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
3. เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้มีความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเท่ากับ 8000, 7000, 6000, ..., 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์
5. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง
6. ตรวจวัดค่าพีเอช ซีไอดี และสังกะสี
7. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสม

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ 2. สารที่ใช้ในการออกซิเดชัน 3. พีเอช	1. อุณหภูมิห้อง 2. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3. ค่าเหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในตารางที่ 3.3
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต	1. 8000, 7000, 6000, ..., 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี	1. ค่าซีไอดีในสารละลาย



ภาพที่ 3.10 วิธีการทดลองการหาความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่เหมาะสม

2. การทดลองการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

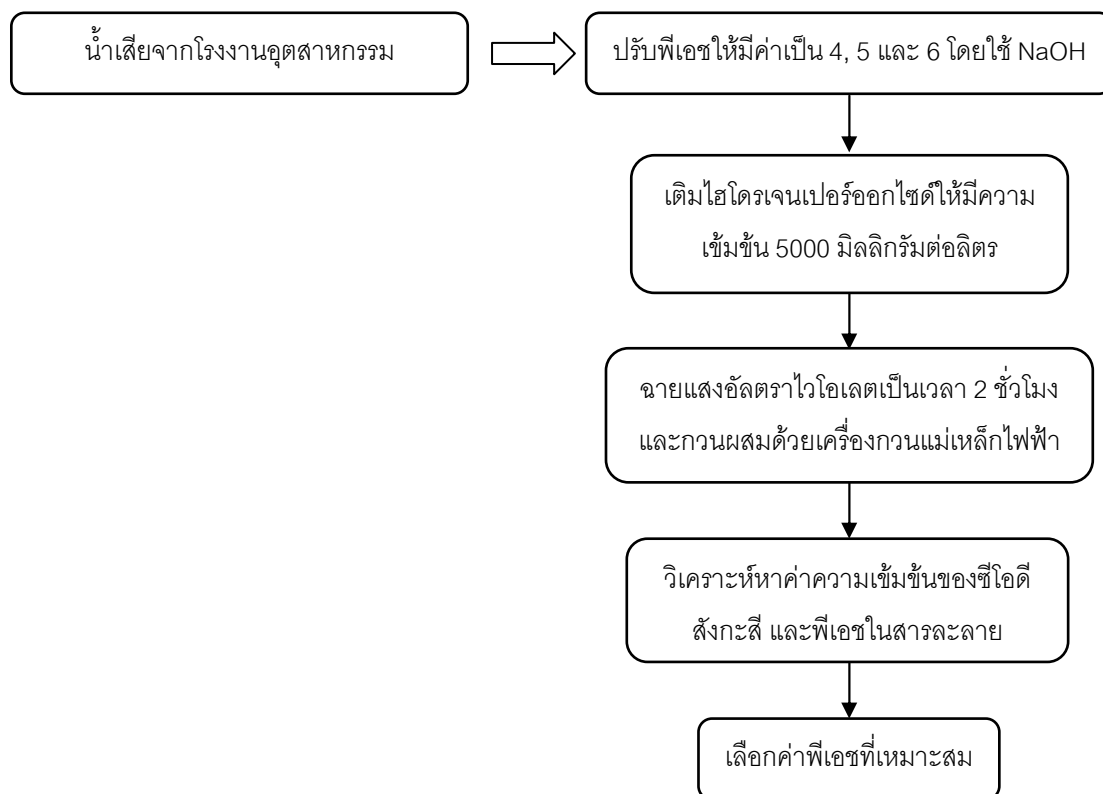
การทดลองการกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย ได้แก่ การหาพีเอชเริ่มต้น เวลาในการทำปฏิกิริยาและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

2.1 การหาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.11 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสีย ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
2. ปรับพีเอช โดยทดสอบที่ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 4, 5 และ 6 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์
3. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มีความเข้มข้น เท่ากับ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในขณะที่ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. ตรวจวัดค่าพีเอช ซีไอดี และสังกะสี
6. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้น ที่มีต่อการกำจัดซีไอดีในน้ำเสีย

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ	1. อุณหภูมิห้อง
2. สารที่ใช้ในการออกซิเดชัน	2. รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	3. 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. พีเอช	1. พีเอชตั้งแต่ 4 ถึง 6
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี	1. ค่าซีไอดีในสารละลาย



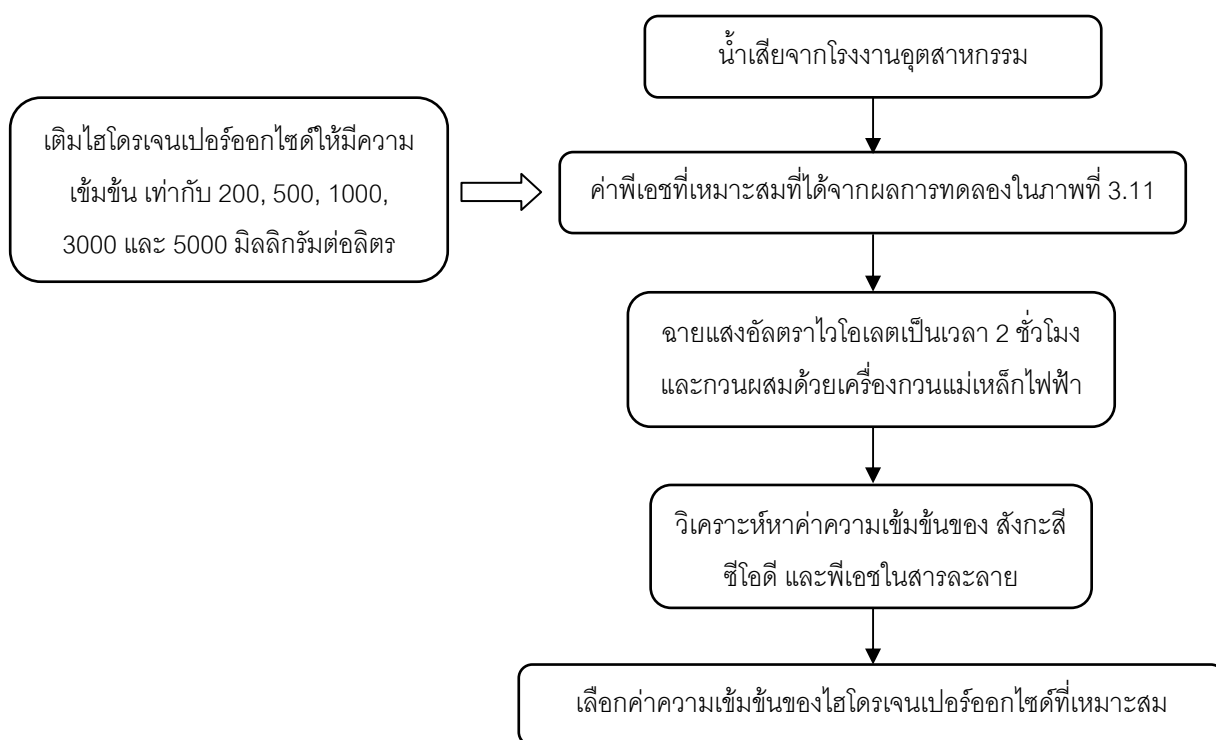
ภาพที่ 3.11 วิธีการทดลองการหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดซีไอดีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

2.2 การหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.12 โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมน้ำเสีย ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์
2. ปรับพีเอช โดยใช้ค่าของพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมจากผลการทดลองในส่วนที่ 2.1 ของวิธีการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
3. เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มีความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 200, 500, 1000, 3000 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตในขณะที่ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. ตรวจวัดค่าพีเอช ซีไอดี และสังกะสี
6. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

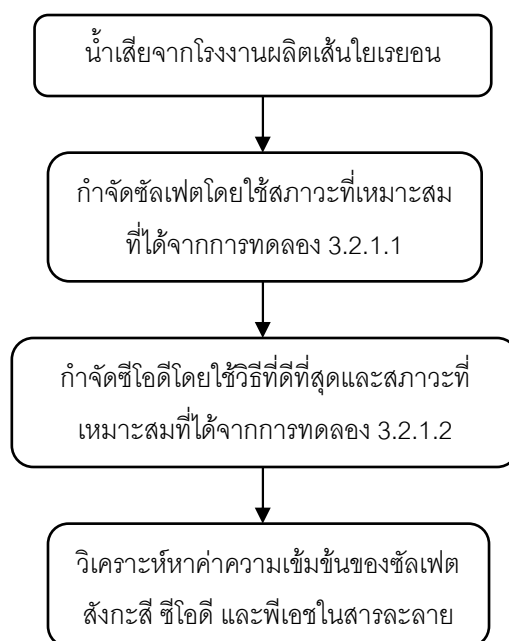
ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. อุณหภูมิ 2. สารที่ใช้ในการออกซิเดชัน 3. พีเอช	1. อุณหภูมิห้อง 2. รังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3. ค่าเหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในตารางที่ 3.5
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	1. 200, 500, 1000, 3000 และ 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี	1. ค่าซีโอดีในสารละลาย



ภาพที่ 3.12 วิธีการทดลองการหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

3.2.1.3 การทดลองการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี

การทดลองการกำจัดซัลเฟตและซีโอดีในน้ำเสียโดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง 3.2.1.1 และ 3.2.1.2 วิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 วิธีการทดลองการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี

3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2

การทดลองศึกษาหารูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี

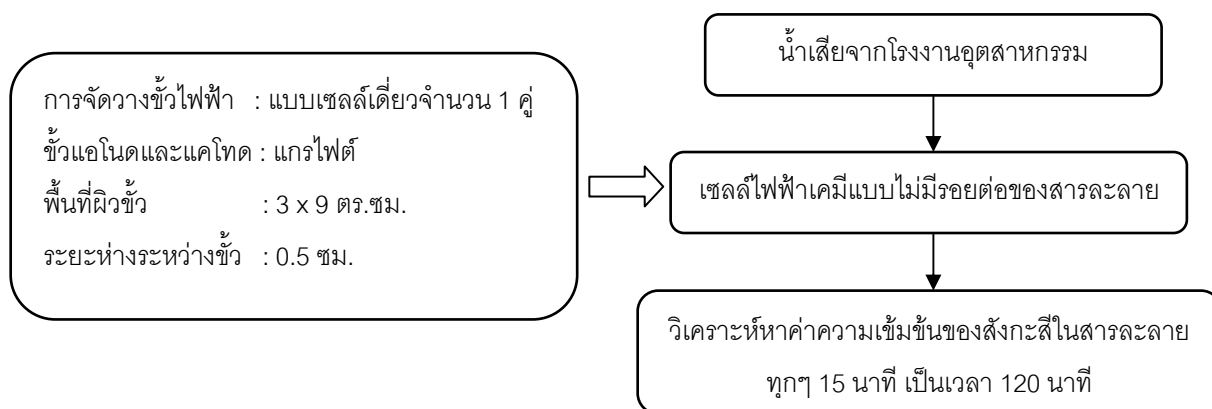
การทดลองศึกษาหารูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสีย รูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบคือ แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพอรอน และแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลือกอิมตัว กำหนดให้อัตราส่วนของพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าที่ทำปฏิกิริยาต่อปริมาตรน้ำเสีย (AV) มีค่าเท่ากัน และใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.14 โดยทำการทดลองดังนี้

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

1. บรรจุน้ำเสีย ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในถังปฏิกิริยา
2. ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (กระแสไฟฟ้า 1.3 แอมแปร์)
3. รูปแบบการจัดวางเซลล์ขั้วไฟฟ้าแบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่ โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนด ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทดแผ่น ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น
4. เก็บตัวอย่างทุกๆ 15 นาที เป็นเวลา 120 นาที
5. ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS และพีเอชด้วยเครื่องวัดค่าพีเอช
6. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วแอโนดและแคโทด	1. แกรไฟต์
2. ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่ทำปฏิกิริยา	2. 3×9 ตร.ซม.
3. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	3. 0.5 เซนติเมตร
4. เวลาเก็บกัก	4. 120 นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี	1. ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



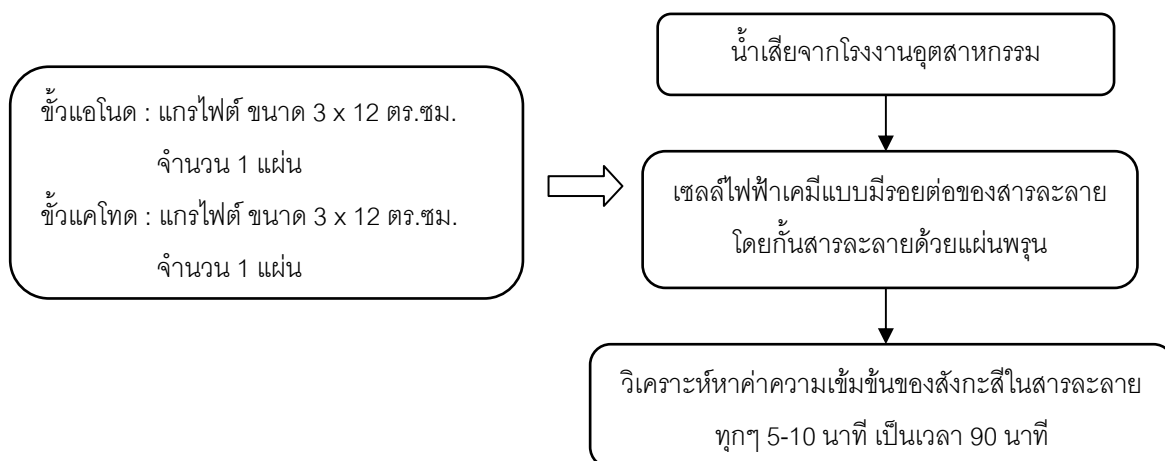
ภาพที่ 3.14 วิธีการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน

1. บรรจุน้ำเสีย ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
2. บรรจुสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (กระแสไฟฟ้า 1.3 แอมแปร์)
4. ขั้วไฟฟ้าแอโนด ขนาด 3 × 12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทดแผ่นแกรไฟต์ ขนาด 3 × 12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น
5. เก็บตัวอย่างทุกๆ 5-10 นาที เป็นเวลา 90 นาที
6. ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS และพีเอชด้วยเครื่องวัดค่าพีเอช
7. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.8 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพอรุน

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วแอโนดและแคโทด 2. ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ทำปฏิกิริยา 3. เวลาเก็บกัก	1. แกรไฟต์ 2. 3 x 9 ตร.ซม. 3. 90 นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี	1. ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



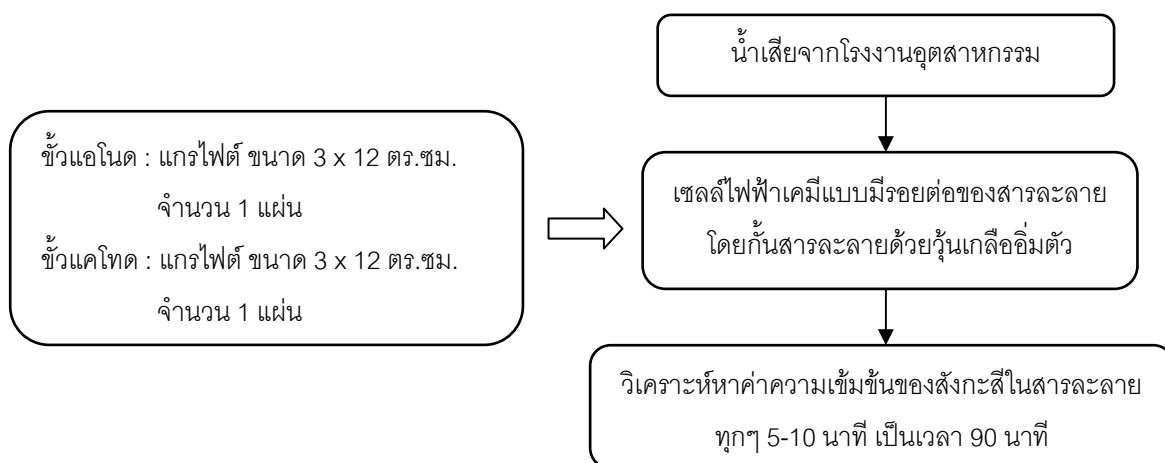
ภาพที่ 3.15 วิธีการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพอรุน

เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลืออิ่มตัว

1. เชื่อมต่อครึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีด้วยวุ้นเกลืออิ่มตัวที่บรรจุสารละลายอิ่มตัวของโซเดียมคลอไรด์
2. บรรจุน้ำเสีย ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
3. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
4. ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (กระแสไฟฟ้า 1.3 แอมแปร์)
5. ขั้วไฟฟ้าแอโนด ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทดแผ่นแกรไฟต์ ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 1 แผ่น
6. เก็บตัวอย่างทุกๆ 5-10 นาที เป็นเวลา 90 นาที
7. ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของสังกะสีด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS และพีเอชด้วยเครื่องวัดค่าพีเอช
8. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.9 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลืออิ่มตัว

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วแอโนดและแคโทด	1. แกรไฟต์
2. ขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ทำปฏิกิริยา	2. 3×9 ตร.ซม.
3. เวลาเก็บกัก	3. 90 นาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี	1. ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย



ภาพที่ 3.16 วิธีการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายด้วยวุ้นเกลืออิมิตัว

ตารางที่ 3.10 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ตัวแปร	เซลล์แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย	เซลล์แบบมีรอยต่อของสารละลาย	
		กั้นด้วยแผ่นพรุน	กั้นด้วยสะพานเกลือ
ชนิดของขั้วแอโนดและแคโทด	แกรไฟต์	แกรไฟต์	แกรไฟต์
พื้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ทำปฏิกิริยา (1 แผ่น)	3 x 9	3 x 9	3 x 9
จำนวนขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ใช้ (แผ่น)	1	1	1
พื้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดทั้งหมด (cm ²)	54	54	54
ปริมาตรน้ำเสีย (ml)	200	200	200
AV* (cm ² /ml)	0.27	0.27	0.27
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m ²)	241	241	241
ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (cm)	0.5	-	-
เวลาเก็บกัก (min)	120	90	90
ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างทุกๆ (min)	15	5-10	5-10

หมายเหตุ : *AV คือ อัตราส่วนของพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าที่ทำปฏิกิริยาต่อปริมาตรสารละลาย ซึ่งค่า AV สูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาได้มาก เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง เนื่องจากขั้วไฟฟ้าสัมผัสกับน้ำเสียได้มากนั่นเอง

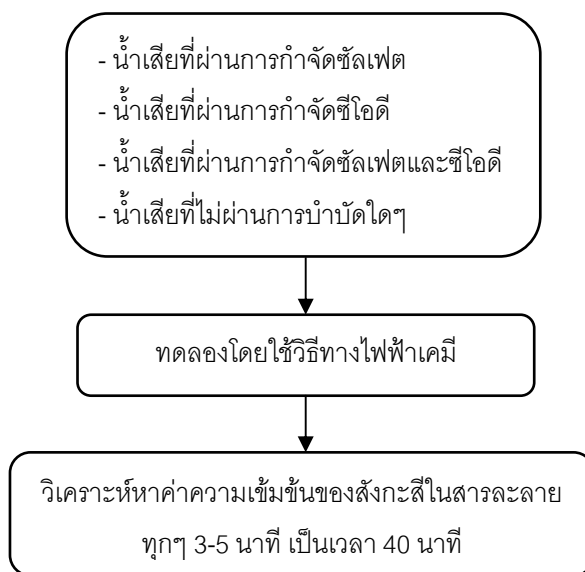
3.2.3 การทดลองส่วนที่ 3

การทดลองการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

การทดลองวิธีทางไฟฟ้าเคมี มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสีย โดยเลือกรูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ดีที่สุดในการทดลองส่วนที่ 2 มาทำการทดสอบกับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟต น้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซีโอดี น้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตและซีโอดีในการทดลองส่วนที่ 1 และน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดใดๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.11 และวิธีการทดลองดังแสดงในผังแสดงการทดลองภาพที่ 3.17

ตารางที่ 3.11 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วแอโนด/แคโทด	1. แกรไฟต์
2. รูปแบบการจัดวางขั้วไฟฟ้า	2. แบบเซลล์เดี่ยว จำนวน 1 คู่
3. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	3. 241 A/m^2
4. พื้นที่ขั้วไฟฟ้ารวม	4. 54 cm^2
5. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า	5. ได้จากรูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2
6. เวลาเก็บกัก	6. ได้จากรูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 2
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัด	1. ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายและเวลาที่ใช้ในการกำจัดสังกะสี



ภาพที่ 3.17 วิธีการทดลองการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ในน้ำเสีย ดังแสดงในตารางที่ 3.12

ตารางที่ 3.12 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัดค่า
สังกะสี	AA, Direct Aspiration U.S. EPA 0218.1 60014-79-020
พีเอช	Electrometric Method U.S. EPA 0150.1 60014-79-020
ซีโอดี	Closed Reflux; AWWA, Standard Methods for Water and Wastewater Examination
ซัลเฟต	Ion Chromatography
ไนเตรท	Ion Chromatography
ของแข็งละลายน้ำ	Electrometric Method U.S. EPA 0150.1 60014-79-020

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน โดยการกำจัดซัลเฟตและซีโอดีซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่พบในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางเคมี แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ

การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสังกะสีโดยการกำจัดซัลเฟตและซีโอดีในน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมี โดยทำการศึกษาดังนี้

1. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตในน้ำเสีย โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยแคลเซียมคลอไรด์
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในน้ำเสีย โดยกระบวนการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาหารูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีโดยรูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบคือ แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน และแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายด้วยสะพานเกลือ

การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการใช้วิธีไฟฟ้าเคมีกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟต น้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซีโอดี น้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี และน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ

วิเคราะห์พารามิเตอร์ในน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช สังกะสี ซีโอดี ซัลเฟต ไนเตรท และของแข็งละลายน้ำ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำเสีย

พารามิเตอร์	งานวิจัยนี้ (2554)	สหรัฐ เซาร์รูปดี (2552)	กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2551)
พีเอช	1.7	1.7	1.7
สังกะสี (mg/L)	204	200	155
ซีโอดี (mg/L)	2740	3200	3440
ซัลเฟต (mg/L)	14600	11800	-
ไนเตรท (mg/L)	18	27	-
ของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	28000	-	23600

4.1 การทดลองส่วนที่ 1

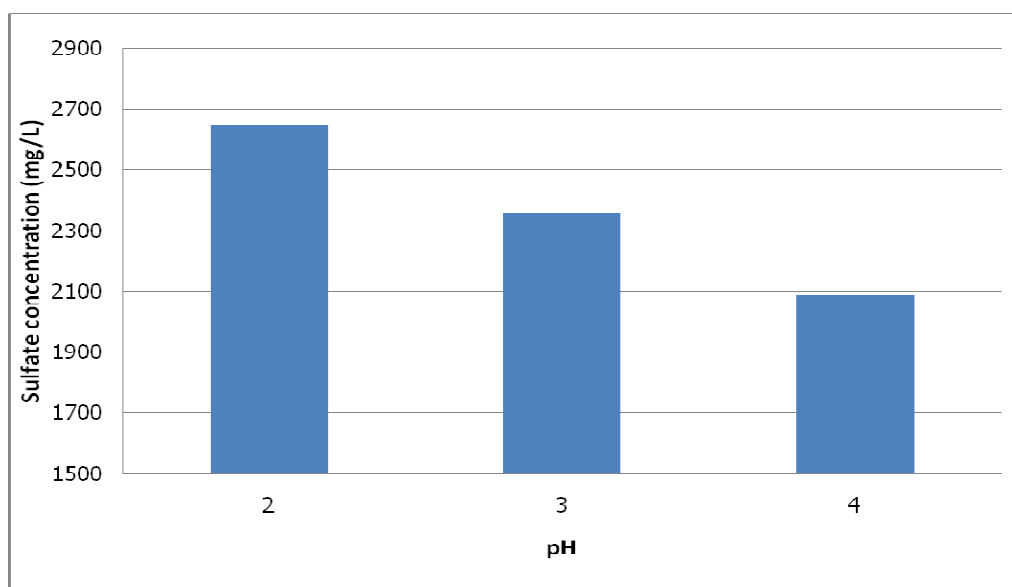
4.1.1 การกำจัดซัลเฟตในน้ำเสียด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียม

สภาวะที่ศึกษาได้แก่ พีเอชและอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต โดยนำน้ำเสียที่มีปริมาณซัลเฟต 14600 มิลลิกรัมต่อลิตรมาปรับให้มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2, 3 และ 4 เติมแคลเซียมคลอไรด์ในอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 1:1 เกิดเป็นตะกอนสีขาวขุ่นซึ่งเป็นตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตดังสมการที่ (4-1) เมื่อกรองเอาตะกอนออกแล้วนำส่วนของสารละลายไปวัดปริมาณซัลเฟตที่เหลือ พบว่า มีปริมาณซัลเฟตเหลืออยู่ในสารละลายเท่ากับ 2648.6, 2356.4 และ 2090.6 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.1 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตสามารถเกิดได้ดีในช่วงพีเอช 3.5-11 และเกิดการละลายกลับได้เมื่อพีเอชสูงกว่า 11 (Peng และคณะ, 2009) ดังนั้นที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 4 จึงถูกเลือกใช้สำหรับการทดลองหาอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต โดยทดลองที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตมากขึ้น ตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตจะเกิดมากขึ้น โดยพบปริมาณซัลเฟตเหลืออยู่ใน

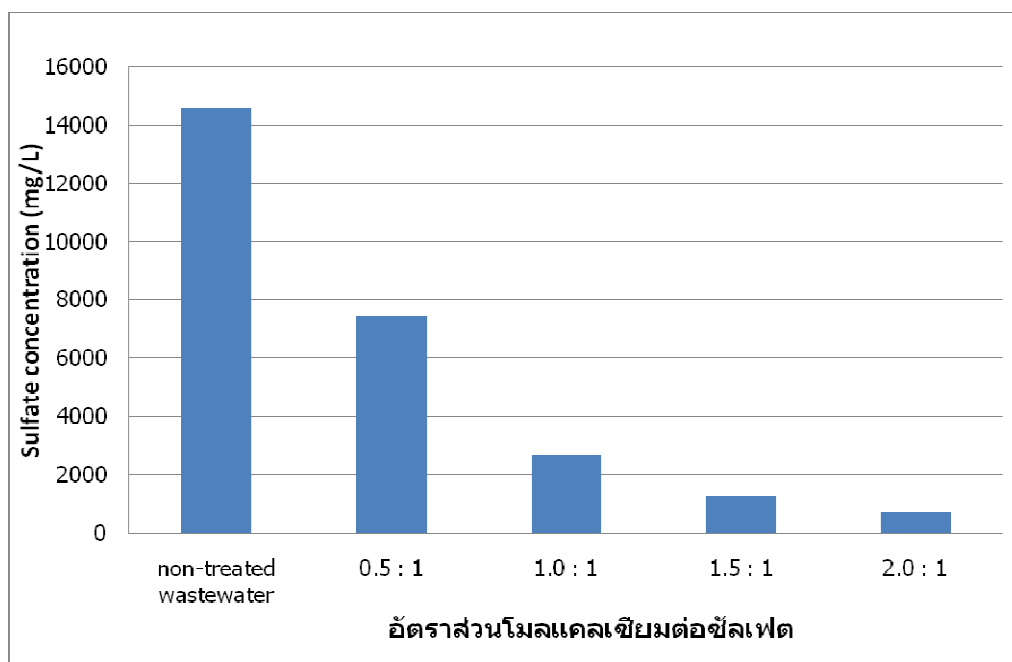
สารละลายเท่ากับ 7462.9, 2706.2, 1327.1 และ 1118.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.2



สมการที่ (4-1) แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมทำปฏิกิริยาพอดีกับซัลเฟตในอัตราส่วนโมล 1:1 แต่จากผลการทดลอง พบว่า แม้จะใช้อัตราส่วนโมลแคลเซียมพอดีกับซัลเฟต (1:1) หรือมากเกินไป (1.5:1 และ 2:1) ก็ยังคงมีปริมาณซัลเฟตเหลืออยู่ในสารละลาย ทั้งนี้เนื่องจากในทางปฏิบัตินั้นปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์นั่นเอง



ภาพที่ 4.1 ความเข้มข้นของซัลเฟตที่เหลือหลังจากการตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตโดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ให้มีอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเป็น 1:1 ที่พีเอชต่างๆ

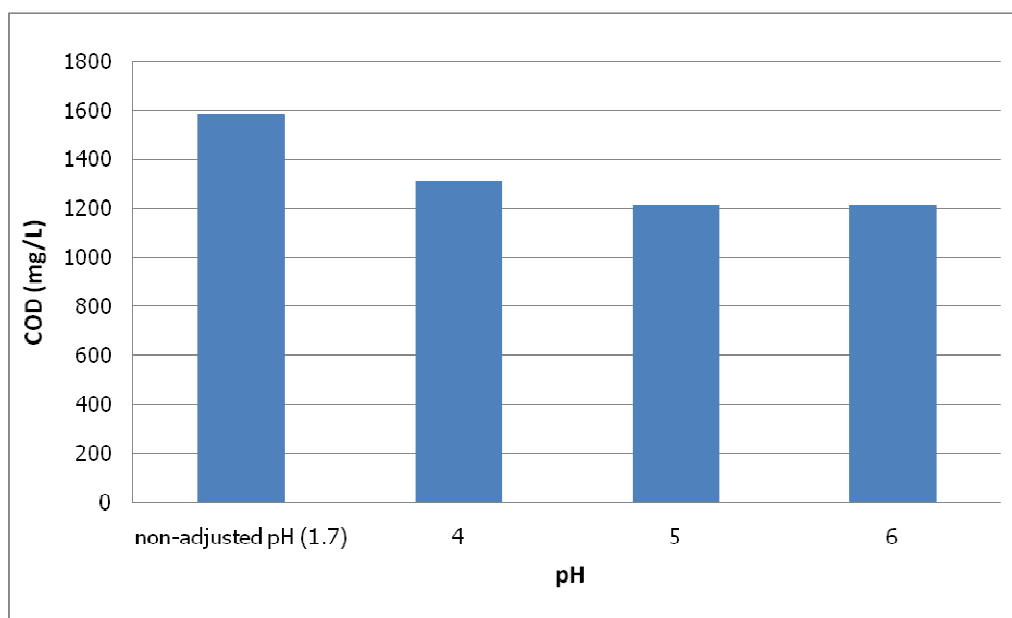


ภาพที่ 4.2 ความเข้มข้นของซัลเฟตที่เหลือหลังจากการตกตะกอนแกลเซียมซัลเฟตที่พีเอชเท่ากับ 4 โดยการเติมแกลเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วนโมลแกลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆ

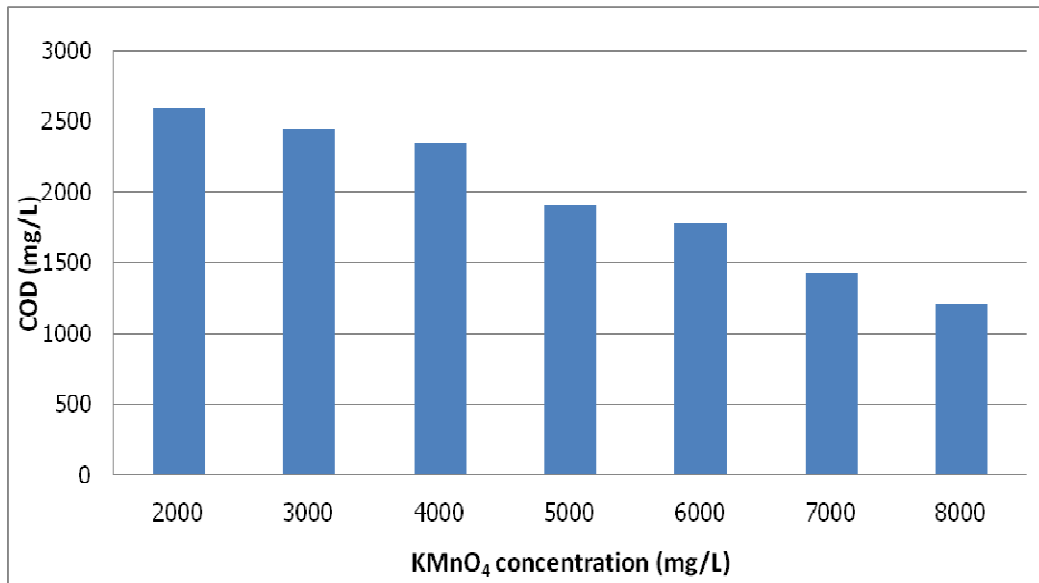
4.1.2 การกำจัดซีโอทีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

สภาวะที่ศึกษาได้แก่ พีเอชและความเข้มข้นของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต โดยนำน้ำเสียที่มีปริมาณซีโอที 2740 มิลลิกรัมต่อลิตรมาปรับให้มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4, 5, 6 และน้ำเสียที่ไม่ปรับพีเอช เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้มีความเข้มข้น 8000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดตะกอนสีน้ำตาลเข้มของแมงกานีสออกไซด์ ตามสมการที่ (4-2) เมื่อกรองเอาตะกอนออกแล้ว นำส่วนของสารละลายซึ่งมีสีม่วงเข้มวัดปริมาณซีโอที พบว่า มีปริมาณซีโอทีเหลืออยู่เท่ากับ 1309, 1219, 1218 และ 1581 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.3 จากผลการทดลองที่ได้ ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 5 จึงถูกเลือกใช้สำหรับการทดลองหาความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต แต่เนื่องจากน้ำที่ผ่านการออกซิเดชันแล้วมีสีม่วงเข้ม ซึ่งเป็นลักษณะอันไม่พึงประสงค์ ในการทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จึงลดความเข้มข้นโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตลงเป็น 7000, 6000, 5000, 4000, 3000 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณซีโอทีเหลืออยู่เท่ากับ 1430, 1784, 1916, 2349, 2454, และ 2529 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.4 โดยน้ำที่ผ่านการออกซิเดชันที่ความ

เข้มข้น 2000 และ 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีลักษณะใส ไม่มีสี น้ำที่ผ่านการออกซิเดชันที่ความเข้มข้น 4000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสีม่วงอ่อน น้ำที่ผ่านการออกซิเดชันที่ความเข้มข้น 5000, 6000 และ 7000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสีม่วงเข้ม ดังภาพที่ 4.5 เมื่อพิจารณาลักษณะของน้ำที่ผ่านการออกซิเดชันแล้ว โพลีเมอร์เชื่อมเปอร์แมนังกาเนตที่ความเข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงถูกเลือกใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.3 ความเข้มข้นซีไอดีที่เหลือหลังจากการออกซิเดชันด้วยโพลีเมอร์เชื่อมเปอร์แมนังกาเนตเข้มข้น 8000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอชต่างๆ



ภาพที่ 4.4 ความเข้มข้นซีโอดีที่เหลือหลังจากการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ

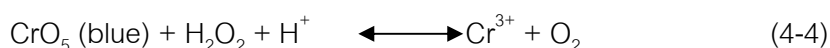


ภาพที่ 4.5 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ

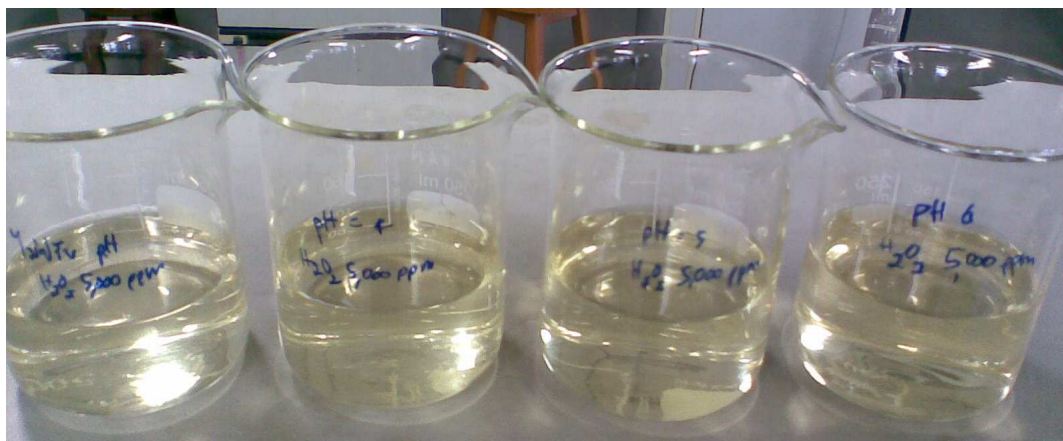
4.1.3 การกำจัดซีโอดีในน้ำเสียด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สภาวะที่ศึกษาได้แก่ พีเอชและความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นำน้ำเสียที่มีปริมาณซีโอดี 2740 มิลลิกรัมต่อลิตรมาปรับให้มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4, 5, 6 และน้ำเสียที่ไม่ปรับพีเอช เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้มีความเข้มข้น 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉายรังสี

อัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดังภาพที่ 4.6 น้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันมีสีเหลือง ชุ่นเล็กน้อย ดังภาพที่ 4.7 เมื่อนำไปวัดซีโอดีพบว่า ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่ทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมต ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในการหาค่าซีโอดี เกิดเป็นสีน้ำเงินของโครมิก-เปอร์ออกไซด์ ตามสมการที่ (4-3) และสีน้ำเงินจะจางหายไปเนื่องจากกรดโครมิกทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลือ ตามสมการที่ (4-4) ทำให้ค่าซีโอดีที่วัดได้มีค่าสูงเกินกว่าความเป็นจริง โดยค่าซีโอดีที่วัดได้ เท่ากับ 4931, 4829, 4892 และ 5071 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จึงทำการกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหลืออยู่โดยการต้มเป็นเวลา 10 นาที โดยสามารถกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ออกไปได้บางส่วน แต่ยังคงมีเปอร์ออกไซด์เหลืออยู่และยังคงให้ค่าซีโอดีสูงเกินจริง จึงไม่สามารถทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตได้ แต่จะเปรียบเทียบในด้านประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันในขั้นต่อไปแทน



ภาพที่ 4.6 การออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต



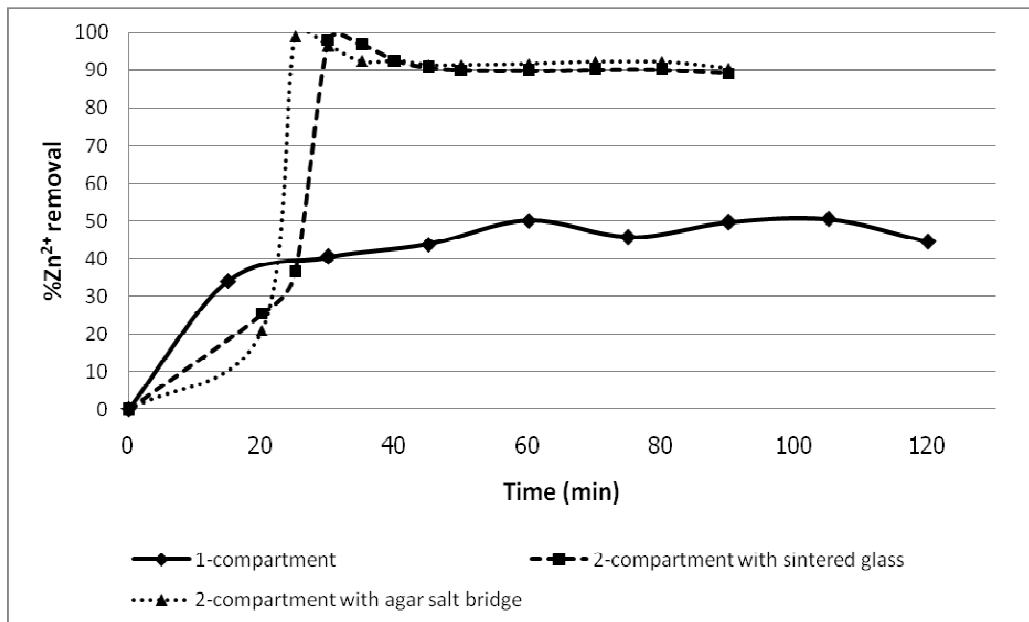
ภาพที่ 4.7 ลักษณะน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่พีเอชต่างๆ

4.2 การทดลองส่วนที่ 2

4.2.1 การทดลองศึกษาหารูปแบบเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี

ถึงปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอร์ซเลนเบอร์ 4 (sintered glass No.4) และขั้วอิเล็กโทรดด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ถูกทดสอบและเปรียบเทียบ โดยพิจารณาจากความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของสังกะสีในสารละลายระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาและความสะดวกในการใช้งานของถึงปฏิกิริยา โดยบรรจุน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 204 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความนำไฟฟ้า 27.9 มิลลิซีเมนตต่อเซนติเมตร ค่าพีเอช 1.7 ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในถึงปฏิกิริยาด้านขั้วไฟฟ้าแคโทด (ขั้วลบ) และบรรจุสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในถึงปฏิกิริยาด้านขั้วไฟฟ้าแอโนด (ขั้วบวก) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 90 นาทีแก่ระบบ พบว่า ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยขั้วอิเล็กโทรดด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีสูงที่สุดที่ 99.1 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 25 นาที ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอร์ซเลน ให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีสูงเช่นกันที่ 97.9 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ส่วนถึงปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ความเข้มข้นของสังกะสีลดลงช้ากว่าแบบมีรอยต่อของสารละลาย แม้จะเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 120 นาที แต่ก็ยังให้เปอร์เซ็นต์ของ

การกำจัดสังกะสีสูงที่สุดที่ 50.5 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 105 นาที ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.8 โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด เป็นไปตามสมการที่ (4-5) ถึง (4-7) และเมื่อเกิด OH^- มากขึ้นจะส่งผลให้เกิดตะกอน $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ตามสมการที่ (4-8) จึงสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียได้เพิ่มขึ้น แต่ตะกอน $\text{Zn}(\text{OH})_2$ สามารถละลายกลับได้ในสภาวะกรด

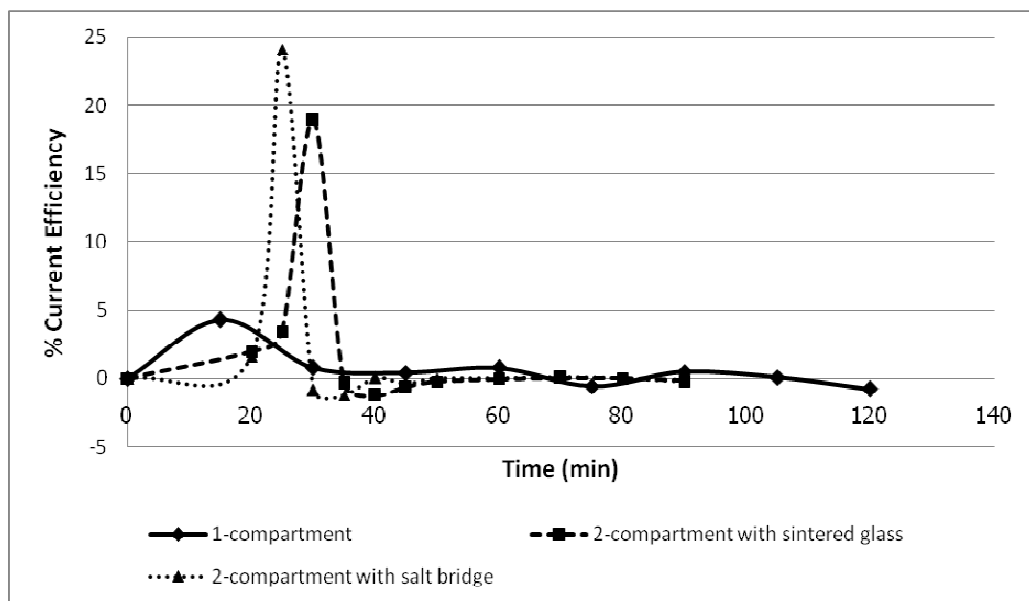


ภาพที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาของถังปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอร์ซเลน (sintered glass) และวุ้นอิมิตัวด้วยสารละลายไซเดียมคลอไรด์

ในขณะที่ทำการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ ณ เวลาต่าง ๆ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วแคโทดมีมากกว่าหนึ่งปฏิกิริยาขึ้นไป ดังนั้น ปริมาณกระแสที่ให้แก่ระบบจึงไม่ถูกใช้ในการกำจัดสังกะสีเพียงอย่างเดียว การคำนวณประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency) จะสามารถระบุได้ว่า ถังปฏิกิริยาแบบใดมีผลลบจากปฏิกิริยาข้างเคียงมาก

ที่สุด และถึงปฏิกริยารูปแบบใดเหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดสังกะสี โดยในงานวิจัยนี้ คำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเป็นเวลา เพื่อนำมาพิจารณาว่า ช่วงเวลาใดที่กระแสไฟฟ้า ถูกใช้ไปได้อย่างคุ้มค่าที่สุด ซึ่งก็คือช่วงเวลาที่มึค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดนั่นเอง

จากผลการทดลอง ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าควบคุมที่เท่ากัน ถึง ปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีที่ดีกว่าถึงปฏิกริยาแบบ ไม่มีรอยต่อของสารละลาย โดยค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของถึงปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อ ของสารละลายเท่ากับ 4.3 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 15 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของถึง ปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอรุนเท่ากับ 18.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 30 นาที และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของถึงปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยวุ้นอิมิตัว ด้วยสารละลายไซเดียมคลอไรด์เท่ากับ 24.1 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 25 นาที ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.9 ดังนั้น ถึงปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยวุ้นอิมิตัวด้วยสารละลายไซเดียมคลอไรด์จึงมี ความเหมาะสมในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียมากที่สุด เนื่องจากเป็นรูปแบบถึงปฏิกริยาที่ทำให้ เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่ารูปแบบถึงปฏิกริยาอื่น ๆ



ภาพที่ 4.9 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของถึงปฏิกริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพอรุนเบอร์ 4 (sintered glass) และวุ้นอิมิตัวด้วยสารละลายไซเดียมคลอไรด์

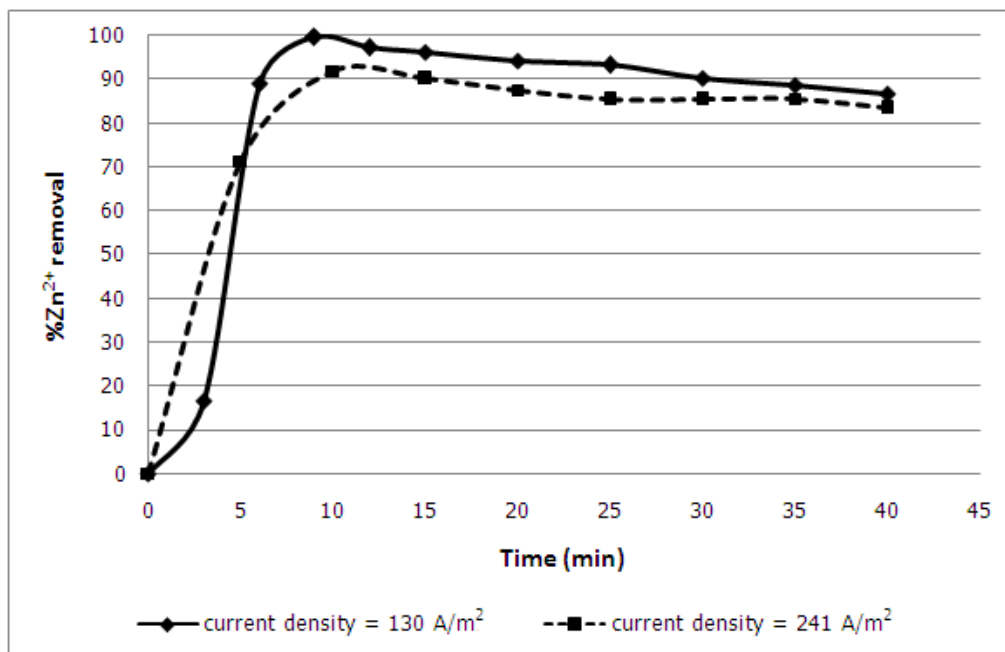
แม้ว่าถึงปฏิบัติการแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยหุ่นอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์จะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด แต่ในการใช้งานแต่ละครั้งจะต้องใช้เวลาในการเตรียมหุ่นอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสะดวกในการใช้งานและผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ถึงปฏิบัติการแบบแผ่นพูนจึงถูกเลือกใช้สำหรับการทดลองการกำจัดสังกะสีในขั้นต่อไป

4.3 การทดลองส่วนที่ 3

การทดลองนี้ได้ทำการทดลองโดยกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟต น้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซีโอดี น้ำเสียที่ผ่านการกำจัดทั้งซัลเฟตและซีโอดี และน้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัดใดๆ โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ดีที่สุดจากการทดลองส่วนที่ 2 มีขั้วแอโนดและแคโทดเป็นแกรไฟต์

4.3.1 การศึกษาผลของการกำจัดซัลเฟตที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียมที่พีเอชเท่ากับ 4 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1.1 เติมแคลเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.5:1 มากำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในถึงปฏิบัติการแบบแผ่นพูน พบว่า สามารถลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ลงจาก 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็น 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ก็ยังให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จะให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 91.9 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที และเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จะให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 9 นาที ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.10 จึงเลือกใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในการทดลองกับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียมคลอไรด์ในอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆด้วยเช่นกัน

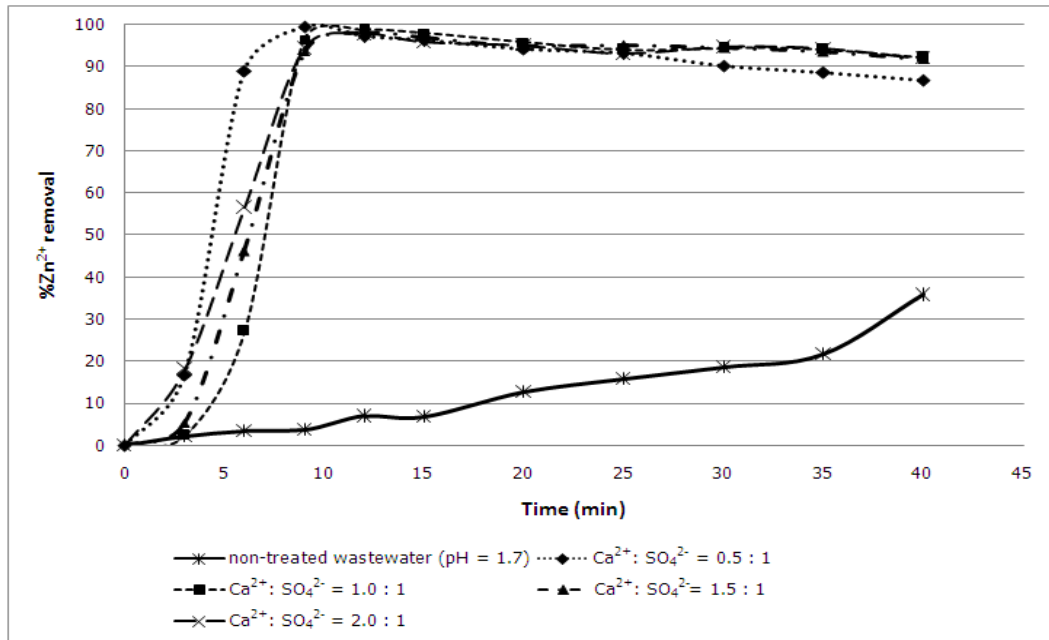


ภาพที่ 4.10 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีกับเวลา หลังจากตกตะกอนซัลเฟตที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1

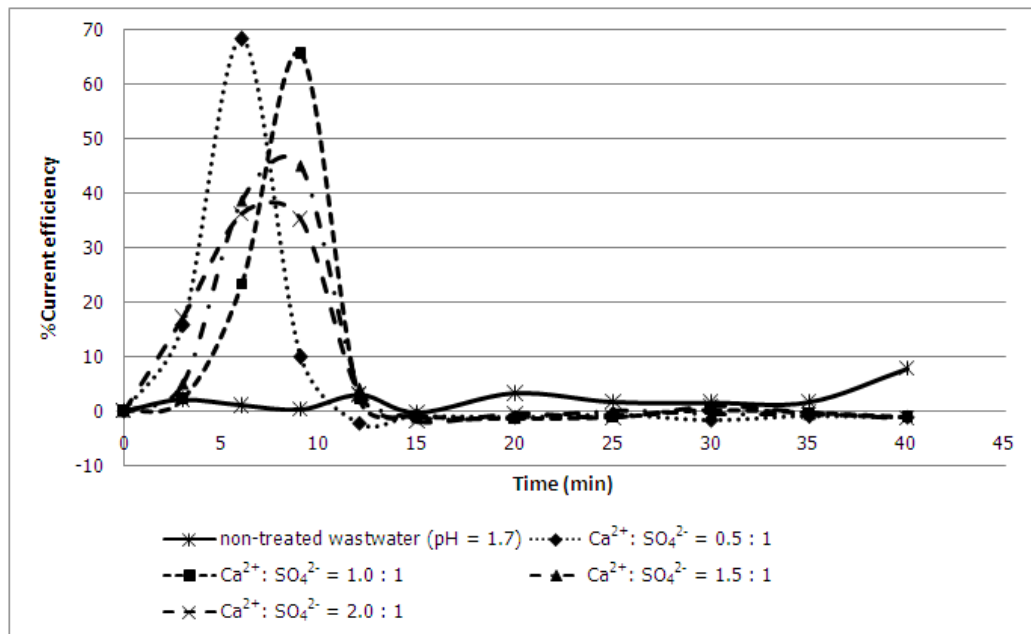
ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีหลังจากตกตะกอนซัลเฟตที่พีเอชเท่ากับ 4 อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเท่ากับ 99.5, 98.7, 98.0 และ 97.7 ตามลำดับ ในช่วงเวลา 9 ถึง 12 นาที ดังนั้นที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 จึงถูกเลือกใช้ในการทดลองในขั้นต่อไป เนื่องจากใช้แคลเซียมคลอไรด์ซึ่งเป็นสารเคมีในการตกตะกอนน้อยที่สุด แต่ให้ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีใกล้เคียงกันกับที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตอื่นๆ ในขณะที่การกำจัดสังกะสีของน้ำเสียที่ยังไม่ผ่านการตกตะกอนแคลเซียมซัลเฟตจะต้องใช้เวลานานกว่ามากโดยที่เวลาผ่านไป 40 นาที ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเท่ากับ 35.78 ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.11 เนื่องจาก SO_4^{2-} มีค่าศักย์มาตรฐาน $E^\circ = +0.170 \text{ V. vs SHE}$ ในขณะที่ Zn^{2+} มีค่า $E^\circ = -0.763 \text{ V. vs SHE}$ ดังนั้น SO_4^{2-} มีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดได้ดีกว่า Zn^{2+} จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีลดลงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่พีเอชเท่ากับ 4 อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1, 1:1, 1.5:1 และ 2:1 คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 68.4, 65.6, 45.0 และ 36.2 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6-9 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ค่า

ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการ ปรับพีเอชเริ่มต้นและไม่ผ่านการตกตะกอน เท่ากับ 7.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 40 นาทีดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.11 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาหลังจากตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 4

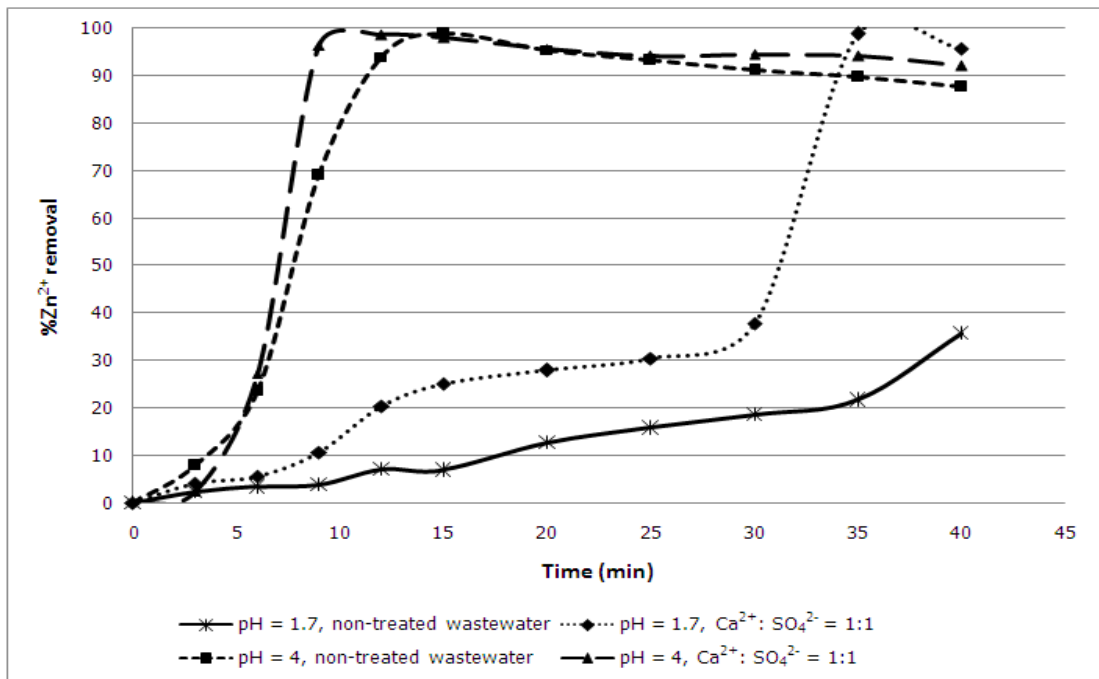


ภาพที่ 4.12 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสหลังจากตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 4

นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการปรับพีเอชเริ่มต้นที่ส่งผลต่อการกำจัดสังกะสีด้วยไฟฟ้าเคมี โดยนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียมโดยไม่ปรับพีเอชน้ำเสีย อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 1:1 และน้ำเสียที่ปรับพีเอชเท่ากับ 4 แต่ไม่ได้ผ่านการตกตะกอน มากำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในถังปฏิกริยาแบบแผ่นพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเท่ากับ 98.9 และ 99.9 ที่เวลา 35 และ 15 นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซัลเฟตด้วยวิธีตกตะกอนกับแคลเซียมที่พีเอชเท่ากับ 4 พบว่า เมื่อทำการปรับพีเอชรวมกับการตกตะกอนให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.13 เนื่องจาก ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด เป็นไปตามสมการที่ (4-5) ถึง (4-7) เมื่อปรับพีเอชเริ่มต้นให้สูงขึ้น ส่งผลให้ H^+ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสมการที่ (4-5) ลดลง พลังงานไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบจึงถูกใช้ไปกับสมการที่ (4-6) และ (4-7) ได้มากขึ้น นอกจากนี้เมื่อเกิด OH^- มากขึ้นจากสมการที่ (4-7) จะส่งผลให้เกิดตะกอน $Zn(OH)_2$ ตามสมการที่ (4-8) ซึ่งนับเป็นปฏิกริยาร่วมที่สำคัญในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสีย จากปฏิกริยาทั้งสองส่วนนี้ส่งผลให้สังกะสีถูกกำจัดออกไปได้เร็วขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจึงสูงขึ้น

จากผลการทดลอง พบว่าการปรับพีเอชเริ่มต้นส่งผลต่อเวลาในการกำจัดสังกะสีมากกว่าผลจากการตกตะกอนซัลเฟต เมื่อพิจารณาถึงการเกิดปฏิกริยาทางไฟฟ้าเคมีของซัลเฟตไอออนตามสมการที่ (4-9) พบว่า มี H^+ เป็นสารตั้งต้นร่วมอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อมีการปรับค่าพีเอชให้สูงขึ้น H^+ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของสมการที่ (4-9) ลดลง ปฏิกริยาทางไฟฟ้าเคมีของซัลเฟตไอออนจึงลดลงเมื่อตรวจวัดปริมาณซัลเฟตที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังจากผ่านการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี พบว่า มีปริมาณซัลเฟตที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ปรับพีเอชเท่ากับ 4 เหลืออยู่มากกว่าในน้ำเสียที่ไม่ได้ปรับพีเอช ดังแสดงไว้ใน ภาพที่ 4.14 แสดงว่า เมื่อมีการปรับพีเอชให้สูงขึ้น ซัลเฟตไอออนจะทำปฏิกริยาทางไฟฟ้าเคมีได้น้อยลง จึงยังคงเหลืออยู่ในสารละลาย ดังนั้นปฏิกริยาหลักในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียเป็นไปตามสมการที่ (4-6) ถึง (4-8) หรือกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีที่ดีขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการปรับพีเอชให้สูงขึ้นนั่นเอง



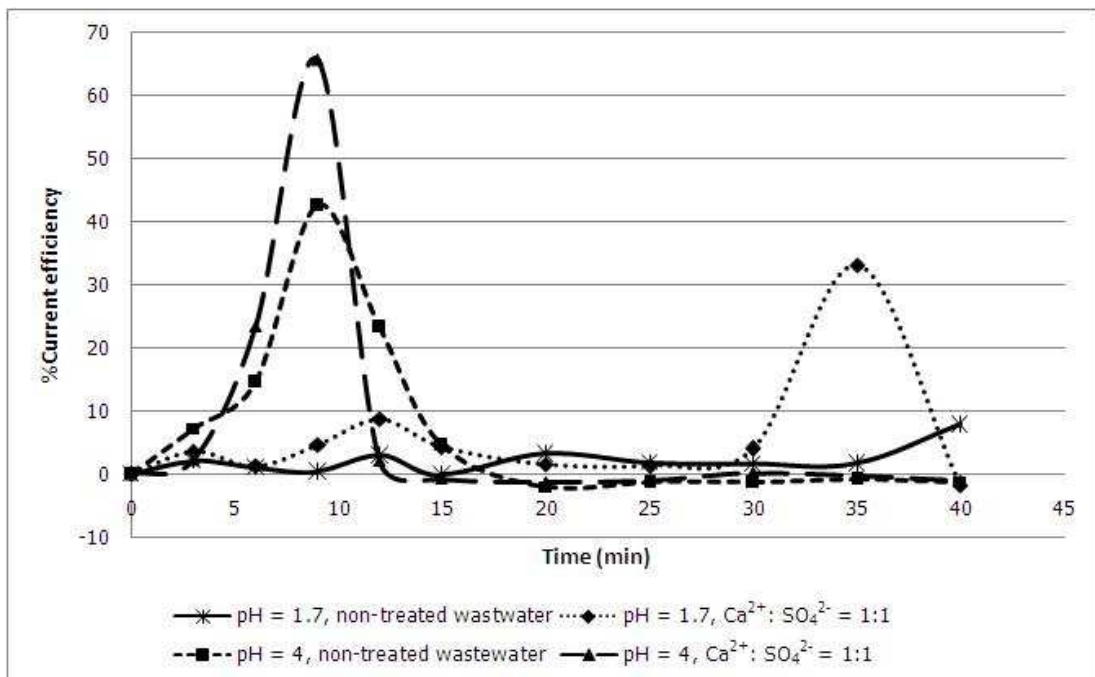


ภาพที่ 4.13 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาที่สภาวะต่างๆ (ตกตะกอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์)



ภาพที่ 4.14 ค่าความเข้มข้นของซัลเฟตที่เหลืออยู่เทียบกับเวลาหลังจากกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชเท่ากับ 4 เพียงอย่างเดียว เท่ากับ 42.6 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 9 นาที, น้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว เท่ากับ 33.2 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 35 นาที, น้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่พีเอชเท่ากับ 4 เท่ากับ 65.6 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 9 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการปรับพีเอชเริ่มต้นและไม่ผ่านการตกตะกอน เท่ากับ 7.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 40 นาที ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีที่สภาวะต่างๆ (ตกตะกอนด้วยแคลเซียมคลอไรด์)

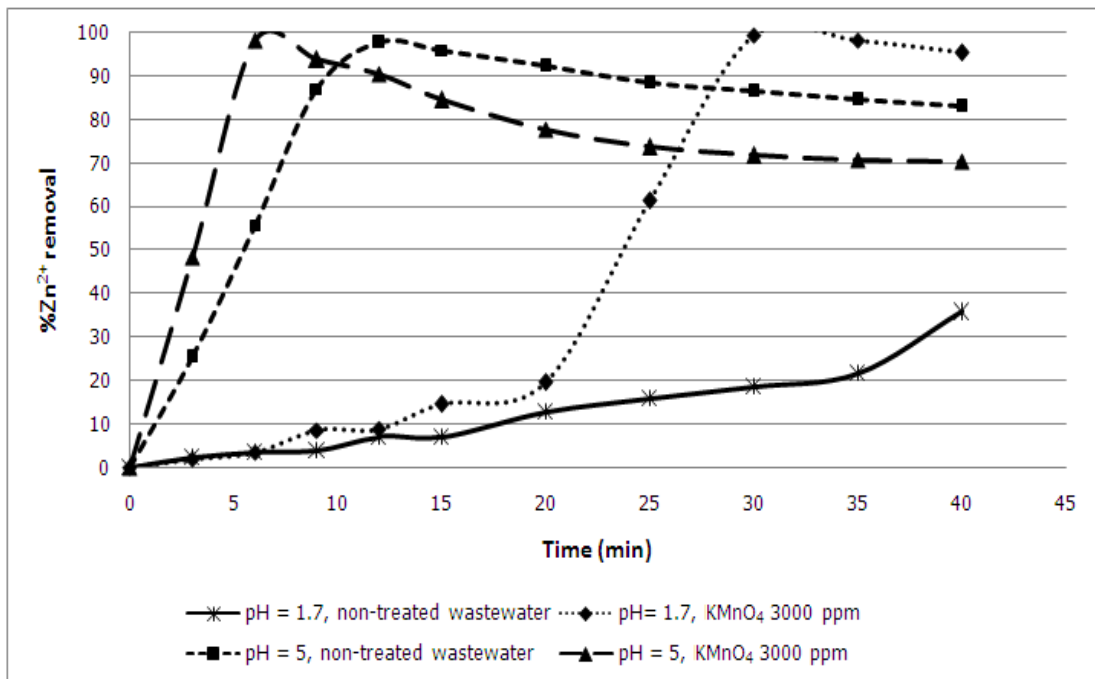
4.3.2 การศึกษาผลของการออกซิเดชันที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

4.3.2.1 การศึกษาผลของการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

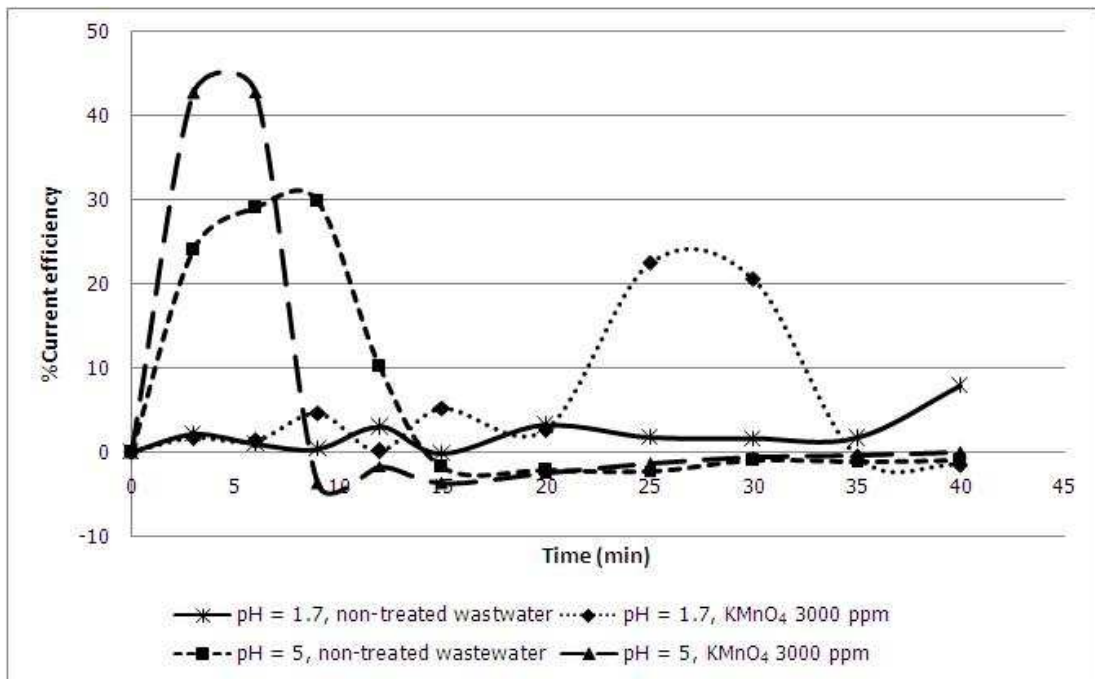
เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการกำจัดซีโอดีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเท่ากับ 5 ซึ่งเป็นความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 4.1.2 มาตรวจวัดความเข้มข้นของสังกะสี พบว่าในส่วนของสารละลายที่กรองได้หลังจากออกซิเดชัน เหลือความเข้มข้นของสังกะสีอยู่เพียงเล็กน้อย โดยสังกะสีหายไปมากถึง 98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำตะกอนแมงกานีสออกไซด์ที่ได้จากการออกซิเดชันมาเติมน้ำกลั่นและปรับพีเอชเท่ากับ 2 และนำส่วนของสารละลายจากตะกอนมาวัดสังกะสี พบว่าความเข้มข้นของสังกะสีใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสังกะสีเริ่มต้น นั่นคือ เมื่อทำการปรับพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้สูงขึ้นและออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต จะเกิดตะกอนของแมงกานีสออกไซด์ที่สามารถดูดซับสังกะสีได้ และเมื่อพีเอชลดลง สังกะสีจะหลุดออกจากตะกอนแมงกานีสออกไซด์มาอยู่ในสารละลายเหมือนเดิม ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี จึงได้ทำการเติมสังกะสีคลอไรด์ลงไป โดยให้ในน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตแล้วมีความเข้มข้นของสังกะสีใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสังกะสีเริ่มต้น แล้วนำมากำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในถังปฏิกริยาแบบแผ่นพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 98.2 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกริยา 6 นาที และจากการทดลองที่ 4.3.1 ทำให้ทราบว่าพีเอชส่งผลต่อระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีด้วยไฟฟ้าเคมี จึงได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยไม่ปรับพีเอชน้ำเสียเริ่มต้น พบว่า ไม่เกิดการดูดซับของสังกะสีบนตะกอนแมงกานีสออกไซด์ จึงไม่ต้องทำการเติมสังกะสีคลอไรด์เพิ่มลงไป เมื่อนำมากำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในถังปฏิกริยาแบบแผ่นพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 99.4 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกริยา 30 นาที น้ำเสียที่ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 แต่ไม่ผ่านการออกซิเดชัน ให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 97.8 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาในการทำปฏิกริยา 12 นาที แสดงว่าการปรับพีเอชเริ่มต้นส่งผลต่อเวลาในการกำจัดสังกะสีมากกว่าการออกซิเดชัน และ

เมื่อทำการปรับพีเอชร่วมกับการออกซิเดชันจะให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 98.2 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 นาที ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.16

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชเท่ากับ 5 เพียงอย่างเดียว เท่ากับ 29.8 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 9 นาที, น้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพียงอย่างเดียว เท่ากับ 22.5 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 25 นาที, น้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่พีเอชเท่ากับ 5 เท่ากับ 42.8 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6 นาที ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการปรับพีเอชเริ่มต้นและไม่ผ่านการออกซิเดชัน เท่ากับ 7.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 40 นาที ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.17



ภาพที่ 4.16 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาที่สภาวะต่างๆ (ออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต)

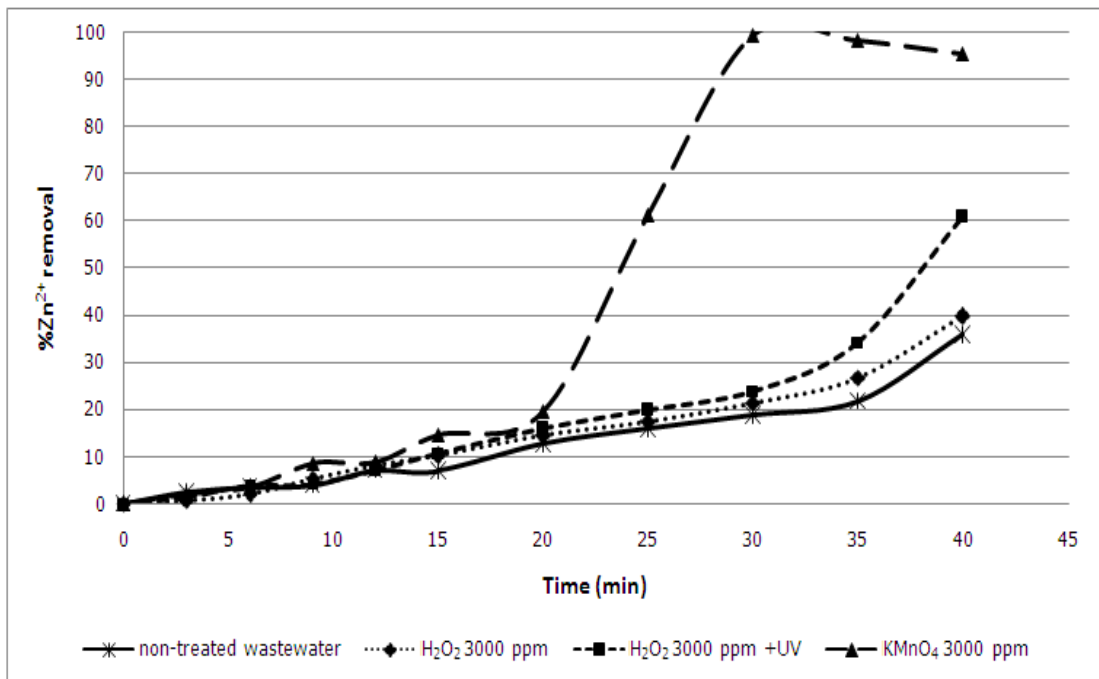


ภาพที่ 4.17 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสิ่งกะสึที่สภาวะต่างๆ
(ออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต)

4.3.2.2 การศึกษาผลของการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสิ่งกะสึด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

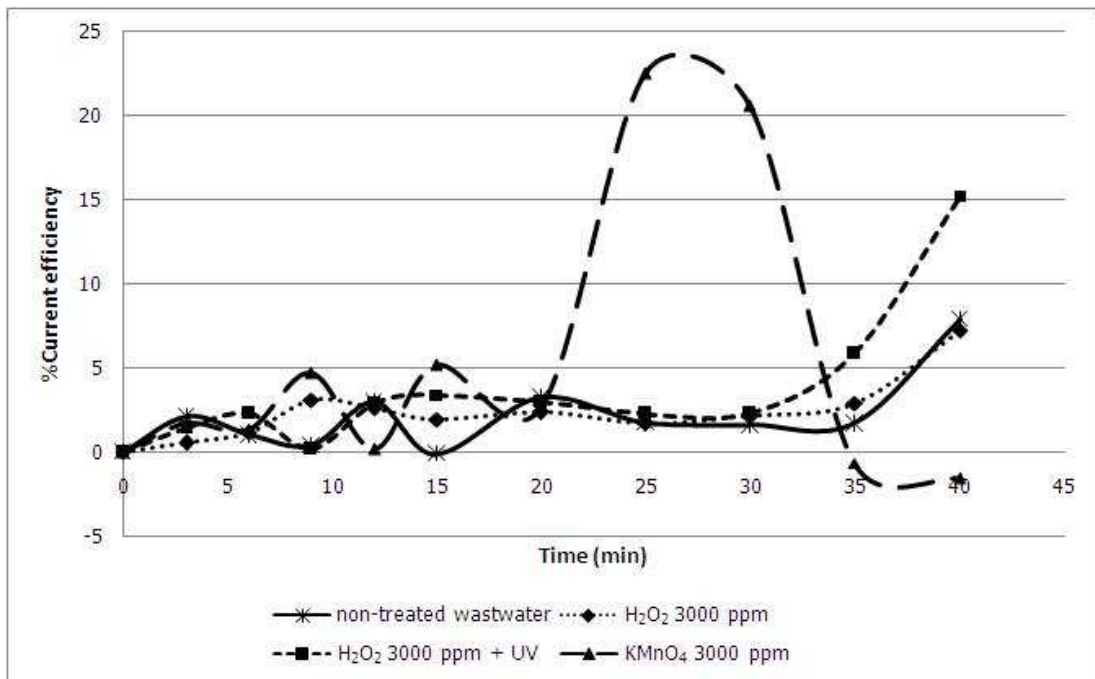
เมื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร มากำจัดสิ่งกะสึด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในถังปฏิกิริยาแบบแผ่นพูน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 40 นาที ให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสิ่งกะสึที่ 60.8 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.18

จากภาพที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตให้ผลการทดลองที่ดีกว่าน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ความเข้มข้นและค่าพีเอชเริ่มต้นน้ำเสียเดียวกัน โดยใช้เวลาในการกำจัดสิ่งกะสึด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีน้อยกว่า แต่สามารถกำจัดสิ่งกะสึได้มากกว่า เพราะฉะนั้นน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจึงถูกเลือกใช้ในการทดลองขั้นต่อไป



ภาพที่ 4.18 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาที่สภาวะต่างๆ
(ออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์)

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพียงอย่างเดียว เท่ากับ 7.2 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 40 นาที, น้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต เท่ากับ 15.2 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 40 นาที, น้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเพียงอย่างเดียว เท่ากับ 22.5 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 25 นาที ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการปรับพีเอชเริ่มต้นและไม่ผ่านการออกซิเดชัน เท่ากับ 7.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 40 นาทีดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.19

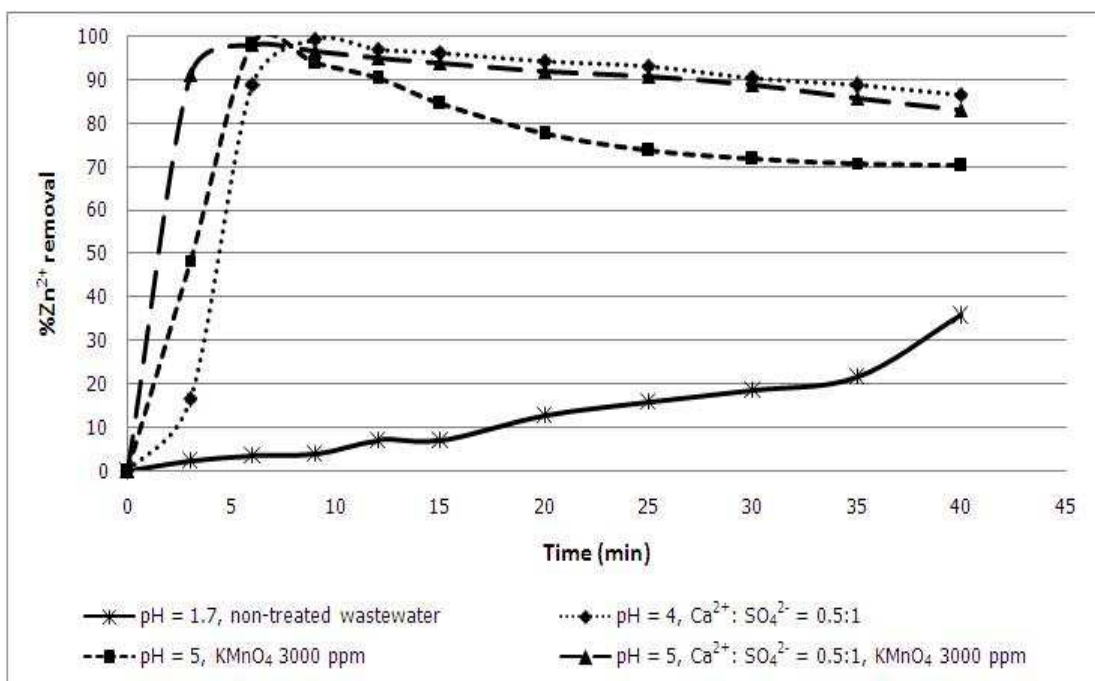


ภาพที่ 4.19 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีที่สภาวะต่างๆ
(ออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์)

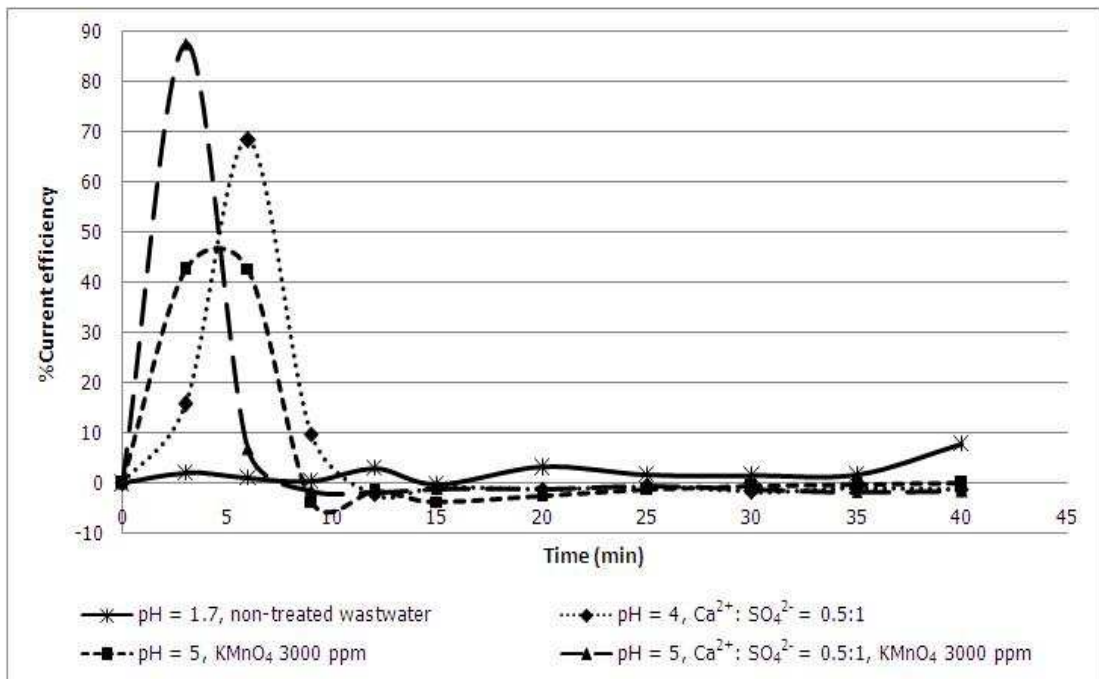
4.3.3 การศึกษาผลของการตกตะกอนร่วมกับการออกซิเดชันที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

นำน้ำเสียมาปรับพีเอชเริ่มต้นให้เท่ากับ 4 เดิมแคลเซียมในอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 กรองเอาตะกอนออกแล้วนำส่วนของสารละลายไปปรับพีเอชให้เท่ากับ 5 เดิมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร กรองเอาตะกอนออก เดิมสังกะสีคลอไรด์มีความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร นำส่วนของสารละลายไปกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ในถังปฏิกรณ์แบบแผ่นพรุน โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนร่วมกับการออกซิเดชัน และน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันเพียงอย่างเดียวให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 98.2 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6 นาทีเท่ากัน แต่น้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนร่วมกับการออกซิเดชันมีการละลายกลับของสังกะสีน้อยกว่าน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันเพียงอย่างเดียว ในขณะที่น้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนเพียงอย่างเดียวให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 99.5 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 9 นาที ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.20

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชร่วมกับการตกตะกอน เท่ากับ 68.4 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6 นาที, น้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชร่วมกับการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เท่ากับ 42.8 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6 นาที, น้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชร่วมกับการตกตะกอน และการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เท่ากับ 87.5 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 3 นาที ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ไม่ผ่านการปรับพีเอชเริ่มต้นและไม่ผ่านการออกซิเดชัน เท่ากับ 7.9 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 40 นาทีดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.21



ภาพที่ 4.20 ค่าเปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาที่สภาวะต่างๆ



ภาพที่ 4.21 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดสังกะสีที่สภาวะต่างๆ

4.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดลอง

การกำจัดซัลเฟตด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี การกำจัดซีโอไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน และการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี มีค่าใช้จ่ายหลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า เป็นต้น แต่ไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดนั้นได้ โดยเฉพาะค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ซึ่งได้แก่ เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า เครื่องกวน และขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ถ้าหากจะนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงแล้วนั้น ต้องมีการปรับปรุงขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัด

4.4.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ในการทดลองการกำจัดซัลเฟตด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

1. การปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีราคา 40 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 1.7 ปรับให้มีค่าพีเอชเป็น 4 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.15 กรัม ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.006 บาท ซึ่งถ้ามีน้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 120 บาท

2. การกำจัดซัลเฟตด้วยกระบวนการตกตะกอนกับแคลเซียมคลอไรด์

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอน ได้แก่ แคลเซียมคลอไรด์ มีราคา 28 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมแคลเซียมคลอไรด์ในอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต เท่ากับ 0.5 : 1 ด้วยแคลเซียมคลอไรด์เข้มข้น 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 0.38 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเสียค่าแคลเซียมคลอไรด์ 0.016 บาท ซึ่งถ้ามีน้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 156 บาท

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายรวมด้านสารเคมี ในการทดลองการกำจัดซัลเฟตด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี เท่ากับ 276 บาท ต่อมีน้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

4.4.2 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ในการทดลองการกำจัดซีโอไซด์ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

1. การปรับพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีราคา 40 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร พีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 1.7 ปรับให้มีค่าพีเอชเป็น 5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.2 กรัม ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.008 บาท ซึ่งถ้าน้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 160 บาท

2. การกำจัดซีโอดีด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ในการออกซิเดชัน ได้แก่ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต มีราคา 117 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงเสียค่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 0.018 บาท ซึ่งถ้าน้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 351 บาท

ดังนั้น ค่าใช้จ่ายรวมด้านสารเคมี ในการทดลองการกำจัดซีโอดีด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต เท่ากับ 511 บาท ต่อ น้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

4.4.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ในการทดลองการกำจัดซีโอดีด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับรังสีอัลตราไวโอเล็ต

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ในการออกซิเดชัน ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีราคา 30 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

น้ำเสียปริมาตร 50 มิลลิลิตร เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.45 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเสียค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.041 บาท ซึ่งถ้าน้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 810 บาท

4.4.4 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการทดลองทางไฟฟ้าเคมี

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าเคมี จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ โดยยกตัวอย่างของราคาค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชและตกตะกอน ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= I \text{ (A)} \times V \text{ (volt)} \times \text{time (hr)} / V \text{ (m}^3\text{)} \\
 &= \frac{0.7 \text{ ampere} \times 9 \text{ volt} \times (9/60) \text{ hours}}{(200 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \times 1000 \text{ watt}} \\
 &= 4.72 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการบำบัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อ
 หน่วย ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{ค่าหน่วย/หน่วย}) \\
 &= 4.72 \times 2.5 \\
 &= 11.8 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชและตกตะกอนมีค่าใช้จ่าย
 11.8 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน โดยการกำจัดซัลเฟตและซีโอดีซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่พบในน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางเคมี

1. การตกตะกอนทางเคมีด้วยแคลเซียมคลอไรด์ในน้ำเสียจริง ที่มีความเข้มข้นของซัลเฟต 14600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สามารถกำจัดซัลเฟตได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 4 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตมากขึ้นจะเกิดการตกตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเท่ากับ 1:1 สามารถกำจัดซัลเฟตได้ 85.7 เปอร์เซ็นต์
2. การกำจัดซีโอดีด้วยวิธีออกซิเดชันในน้ำเสียจริง ที่มีซีโอดีเท่ากับ 2739 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า สามารถกำจัดซีโอดีได้ดีที่สุดที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตความเข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดซีโอดีได้ 16.1 เปอร์เซ็นต์ และทำให้น้ำที่ผ่านการออกซิเดชันมีลักษณะใส ไม่มีสี นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดสังกะสีได้ 98.3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากตะกอนแมงกานีสออกไซด์สามารถดูดซับสังกะสีได้ที่พีเอชสูง และเมื่อพีเอชลดลง สังกะสีจะหลุดออกจากตะกอนแมงกานีสออกไซด์มาอยู่ในสารละลายเหมือนเดิม ตามตารางที่ 5.1
3. การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริง ที่มีความเข้มข้นของสังกะสี 204 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความนำไฟฟ้า 27.9 มิลลิซีเมนตต่อเซนติเมตร ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ถึงปฏิบัติการแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยขั้วอิมิตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีสูงที่สุดที่ 99.1 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิบัติการ 25 นาที ถึงปฏิบัติการแบบมี

รอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูน ให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีสูงเช่นกันที่ 97.9 เปอร์เซ็นต์ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที ถึงปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ยังให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีสูงที่สุดที่ 50.5 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 105 นาที แต่เมื่อพิจารณาถึงความสะดวกในการใช้งานและผลการทดลองที่ไม่แตกต่างกันมากนัก ถึงปฏิกิริยาแบบแผ่นพูนจึงเป็นรูปแบบถึงปฏิกิริยาที่ดีที่สุด

4. การกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้น (ผ่านการตกตะกอนทางเคมีหรือออกซิเดชัน) สามารถลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ลงได้ 46 เปอร์เซ็นต์ (จาก 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็น 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)
5. การปรับพีเอชเริ่มต้นส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี มากกว่าการกำจัดซัลเฟตและการกำจัดซีโอดี โดยการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นและผ่านการตกตะกอนร่วมกับการออกซิเดชันให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด โดยให้เปอร์เซ็นต์ของการกำจัดสังกะสีที่ 98.2 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 6 นาทีและมีการละลายกลับของสังกะสีน้อย ณ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และผลการทดลองในน้ำเสียที่สภาวะต่างๆเป็นไปตามตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองและค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต

pH เริ่มต้น	กำจัด COD (3000 mg/L KMnO_4)	%Zn ²⁺ removal	ค่าใช้จ่าย (บาท/ m^3)
5	/	98.3	511

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองและค่าใช้จ่ายในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีในน้ำเสียที่
สภาวะต่างๆ (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เท่ากับ 130 A/m²)

pH เริ่มต้น	non- treated	กำจัด SO ₄ ²⁻ (Ca ²⁺ : SO ₄ ²⁻ = 1:1)	กำจัด COD (3000 mg/L KMnO ₄)	%Zn ²⁺ removal	เวลาที่ใช้ในการ กำจัด (นาที)	ค่าใช้จ่าย (บาท/m ³)
1.7	/	-	-	35.8	40	-
1.7	-	/	-	98.9	35	358
1.7	-	-	/	99.4	30	390
4	/	-	-	99.0	15	149
4	-	/	-	99.5	9	444
4	-	/ (Ca ²⁺ : SO ₄ ²⁻ = 0.5:1)	/(เติม ZnCl ₂)	98.2	6	675
5	/	-	-	97.8	12	176
5	-	-	/(เติม ZnCl ₂)	98.2	6	519

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เสนอให้ศึกษาการกำจัดสังกะสีด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
2. เสนอให้ศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเปรียบเทียบกับโซเดียมคลอไรด์
3. เสนอให้ใช้ปูนขาวเป็นสารเคมีที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช เพื่อลดค่าใช้จ่าย
4. ในขั้นตอนการตกตะกอน เสนอให้ใช้การตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเองแทนการกรอง เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงในโรงงานอุตสาหกรรม
5. การทดลองเกี่ยวกับซีโอดี ควรวัดค่าซีโอดีเริ่มต้นทุกครั้ง
6. เสนอให้ศึกษาการนำกลับของสังกะสีที่ถูกดูดซับบนตะกอนแมงกานีสออกไซด์ ด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

7. จากผลการทดลอง ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยคำนึงถึงการกำจัดสังกะสีและค่าใช้จ่ายเป็นหลัก แนะนำให้ใช้วิธีปรับพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้เท่ากับ 4 แล้วใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี

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. การแยกสังกะสีจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีชนิดโซดาไนต์ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- แน่นน้อย วิจิตรจรรยากุล. 2543. การบำบัดค่าซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกหนังโดยวิธีตกตะกอนและออกซิเดชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2539. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิคไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- 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 เชาว์รูปดี. 2552. การกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยเรยอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- อาริศรา ทะริยะ. 2546. การย่อยสลายฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้รังสียูวีร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2539. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Aleboye, A., Olya, M. E., and Aleboye, H. 2009. Oxidative treatment of azo dyes in aqueous solution by potassium permanganate. Journal of Hazardous Materials. 162:1530-1535.
- Benatti, C. T., Tavares, R. G., and Lenzi, E. 2009. Sulfate removal from waste chemicals by precipitation. Journal of Environmental Management. 90: 504-511.
- Benjamin, M.M. 2002. Water chemistry. Singapore: McGraw Hill Book.
- Chang, K. C., Li, L., and Gloyna, E. F. 1993. Supercritical water oxidation of acetic acid by potassium permanganate. Journal of Hazardous Materials. 33:51-62.
- Chen, G. 2004. Electrocoagulation technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38: 11-44.
- Chong, T. H., and Sheikholeslami, R. 2001. Thermodynamics and kinetics for mixed calcium carbonate and calcium sulfate precipitation. Chemical Engineering Science. 56: 5391-5400.
- Eduardo, C, P., and Thiago, J, M. 2009. Combination of an anaerobic process with O₃, UV and O₃/UV for cellulose pulp bleaching effluent treatment. Desalination and Water Treatment. 5:213-222.
- 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: McGraw-Hill.
- Glaze, W. H., Kang, J. W., and Chapin, D. H. 1987. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide, and ultraviolet radiation. Ozone Science and engineering. 9: 335-352.
- Garves, K., 1997. Degradation and oxidation of cellulose in acidic potassium permanganate solutions. Holzforschung. 51: 526-530.
- Jones, F., Oliviera, A., Parkinson, G. M., Rohl, A. L., Stanley, A., and Upson, T. 2004. The effect of calcium ions on the precipitation of barium sulphate 1: calcium ions in absence of organic additives. Journal of Crystal Growth. 262: 572-580.
- Jones, F., Oliviera, A., Parkinson, G.M., Rohl, A. L., Stanley, A., and Upson, T. 2004. The effect of calcium ions on the precipitation of barium sulphate 2: calcium ions in the absence of organic additives. Journal of Crystal Growth. 270: 593-603.
- Jorgensen, S. E. 1979. Industrial waste water management. New York : Elsevier Scientific Publishing Company. : pp. 97-112, 309-313.
- Jurkiewicz, K. 1990. The removal of zinc from solutions by foam separation, II. Precipitate flotation of zinc hydroxide. International Journal of Mineral Processing. 29: 1-15.
- Liptak, B. G. 1974. Environmental Engineers' Handbook Vol.1 Water Pollution. Pennsylvania : Chilton Book Company. : pp. 1204-1211.
- Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmes, M., Parga, J. and Cocke, D.L. 2004. Fundamentals present and future perspective of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. B114: 189-199.
- Muruganandham, M., and Swaminathan, M. 2004. Photochemical oxidation of reactive azo dye with UV-H₂O₂ process. Dyes and Pigments. 62:269-275.
- Patterson, J.W. 1985. Industrial wastewater treatment technology. Boston: Butterworth Publisher.
- Peng, X. Y., Wang, Y. Y., Chai, L. Y., and Shu, Y. D. 2009. Thermodynamic equilibrium of CaSO₄-Ca(OH)₂-H₂O system. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 19:249-252.

- Pertorius, W., Johannes, W. and Lempert, G. 1991. Electrolytic Iron flocculants production with bipolar electrode in series arrangement . Water SA. 17: 133-13.
- 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.
- Tait, S., Clarke, W. P., Keller, J., and Batstone, D. J. 2009. Removal of sulfate from high-strength wastewater by crystallization. Water Research. 43: 762-772.
- Taner, Y., Kadir, K., and Nuri, A. 2006. Treatability studies on domestic wastewater using UV/H₂O₂ process. Applied Catalysis. 67:223-228.
- Tanja, K., Alenka, M. L. M., and Darinka, B V. 2003. Comparison of H₂O₂/UV, H₂O₂/ O₃ and H₂O₂/Fe²⁺ processes for the decolorisation of vinylsulphone reactive dyes. Dyes and Pigments. 58:245-252.
- Vilhunen, S., Vilve, M., Vepsalainen, M., and Sillanpaa, M. 2010. Removal of organic matter from a variety of water matrices by UV photolysis and UV/ H₂O₂ method. Journal of Hazardous Materials. 179:776-782.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.70	203.83	203.83	203.83	203.83	0.00	
15	1.89	145.96	126.84	130.00	134.27	10.25	34.13
30	1.89	130.53	116.49	116.84	121.29	8.00	40.50
45	1.91	112.98	123.51	107.19	114.56	8.27	43.80
60	1.91	102.63	112.98	89.65	101.75	11.69	50.08
75	1.91	122.63	108.25	100.88	110.58	11.06	45.75
90	1.9	111.75	104.74	91.05	102.51	10.53	49.71
105	1.91	104.04	110.88	87.72	100.88	11.90	50.51
120	1.92	119.47	110.88	109.12	113.16	5.54	44.48

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพรุนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.73	203.83	203.83	203.83	203.83	0.00	
20	2.32	145.49	162.85	147.22	151.85	9.56	25.50
25	6.96	133.68	130.32	123.61	129.21	5.13	36.61
30	11.14	3.80	3.29	5.72	4.27	1.28	97.90
35	11.64	10.58	4.47	5.07	6.71	3.37	96.71
40	11.79	21.64	14.59	8.95	15.06	6.36	92.61
45	11.93	26.40	18.68	11.69	18.92	7.36	90.72
50	11.98	27.88	21.66	11.84	20.46	8.09	89.96
60	12.11	27.70	21.83	12.37	20.63	7.73	89.88
70	12.19	27.34	19.71	13.09	20.05	7.13	90.17
80	12.26	25.52	18.87	15.67	20.02	5.03	90.18
90	12.31	25.57	19.39	21.17	22.04	3.18	89.19

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยวุ้นอิมิตัวด้วย สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.72	203.83	203.83	203.83	203.83	0.00	
20	2.76	166.09	166.20	150.35	160.88	9.12	21.07
25	10.43	0.91	0.81	3.76	1.83	1.67	99.10
30	11.84	7.74	7.55	6.84	7.38	0.47	96.38
35	12.04	14.94	16.26	14.78	15.33	0.81	92.48
40	12.19	16.78	18.38	10.22	15.13	4.32	92.58
45	12.21	17.53	18.87	15.93	17.44	1.47	91.44
50	12.24	17.36	18.97	15.94	17.42	1.52	91.45
60	12.32	19.00	17.06	15.12	17.06	1.94	91.63
70	12.37	18.99	14.95	13.53	15.83	2.83	92.24
80	12.42	18.82	14.70	14.17	15.90	2.55	92.20
90	12.51	23.10	16.50	18.06	19.22	3.45	90.57

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการกำจัดซัลเฟตโดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ให้มีอัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตเป็น 1:1 ที่พีเอชต่างๆ

pH	Sulfate concentration (mg/L)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
2	2470	2635	2841	2649	185.86	81.86
3	2138	2460	2471	2356	189.13	83.86
4	1965	2184	2123	2091	112.92	85.68

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการกำจัดซัลเฟต โดยการเติมแคลเซียมคลอไรด์ที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟตต่างๆ ที่พีเอชเท่ากับ 4

อัตราส่วนโมล Ca ²⁺ : SO ₄ ²⁻	Sulfate concentration (mg/L)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
non-treated	146000	146000	146000	146000	0.00	
0.5 : 1	7522	7403	7463	7463	59.43	48.88
1 : 1	2369	2660	3089	2706	362.06	81.46
1.5 : 1	1328	1285	1368	1327	41.46	90.91
2 : 1	1119	1117	1119	1118	1.12	92.34

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองความเข้มข้นของซัลเฟตที่เหลืออยู่ในน้ำที่ผ่านการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี

เวลา	pH = 1.7		pH = 4	
	Sulfate concentration (mg/L)	% Removal	Sulfate concentration (mg/L)	% Removal
0	14600		14600	
3	13642	6.56	14573	0.19
6	13093	10.32	14559	0.28
9	12667	13.24	14451	1.02
12	12617	13.58	14435	1.13
15	12249	16.11	14149	3.09
20	12121	16.98	14207	2.69
25	11871	18.69	14302	2.04
30	11250	22.94	14169	2.95
35	11113	23.88	14137	3.17
40	10871	25.54	13720	6.03

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการกำจัดซีไอดีโดยการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเข้มข้น 8000 มิลลิกรัมต่อลิตรที่พีเอชต่างๆ

pH	COD (mg/L)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1.7	1581	1513	1649	1581	68.00	42.28
4	1377	1241	1309	1309	68.00	52.21
5	1241	1174	1241	1219	38.68	55.51
6	1241	1208	1205	1218	19.97	55.53

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการกำจัดซีไอดีโดยการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยการเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่ความเข้มข้นต่างๆ

[KMnO ₄] (mg/L)	COD (mg/L)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
2000	2519	2598	2676	2598	78.50	5.16
3000	2362	2519	2480	2454	81.75	10.42
4000	2283	2598	2165	2349	223.84	14.25
5000	1811	2007	1929	1916	98.68	30.06
6000	1968	1692	1692	1784	159.35	34.87
7000	1456	1378	1456	1430	45.03	47.79
8000	1241	1208	1205	1218	19.97	55.53

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการกำจัดซีไอดีโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 5000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสี อัลตราไวโอเลตที่พีเอชต่างๆ

พีเอช	COD (mg/L)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
1.7	4994	4956	5262	5071	166.79	-85.13
4	4612	4765	5415	4931	426.36	-80.02
5	4765	4765	4956	4829	110.27	-76.29
6	4879	4841	4956	4892	58.59	-78.61

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดซีไอดีโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสี อัลตราไวโอเลตที่พีเอช เท่ากับ 5

หลัง ออกซิเดชัน	COD (mg/L)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
ไม่ต้ม	4166	4166	4236	4189	40.41	-52.95
ต้มก่อน dilute	3472	3572	3541	3528	51.19	-28.82
dilute ก่อนต้ม	3854	3819	3715	3796	72.30	-38.59

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการกำจัดซีโอดีโดยการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสี อัลตราไวโอเลตที่พีเอช เท่ากับ 5

หลัง ออกซิเดชัน	COD (mg/L)				SD	% Removal
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
ไม่ต้ม	3341	3341	3378	3353	21.36	-22.43
ต้มก่อน dilute	2906	2906	2833	2882	42.15	-5.21
dilute ก่อนต้ม	2869	2797	2869	2845	41.57	-3.87

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 241 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	3.96	202.78	203.80	199.85	202.14	2.05	
5	11.76	58.64	57.85	57.56	58.02	0.56	71.30
10	12.08	16.07	16.36	16.46	16.30	0.21	91.94
15	12.24	19.76	19.81	19.96	19.85	0.10	90.18
20	12.29	25.18	25.03	25.13	25.12	0.08	87.57
25	12.40	28.79	29.58	30.07	29.48	0.65	85.42
30	12.45	29.08	29.38	29.58	29.35	0.25	85.48
35	12.49	28.89	29.08	29.28	29.08	0.20	85.61
40	12.52	33.42	33.62	33.62	33.55	0.11	83.40

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	3.96	200.04	203.33	201.90	201.76	1.65	
3	4.58	181.36	200.16	122.70	168.07	40.40	16.71
6	6.84	32.18	30.63	3.68	22.17	16.03	89.01
9	10.61	0.89	1.43	0.71	1.01	0.37	99.50
12	11.53	4.70	5.59	6.87	5.72	1.09	97.17
15	11.80	8.60	7.63	6.32	7.52	1.15	96.27
20	12.05	13.64	7.30	13.38	11.44	3.59	94.32
25	12.20	18.17	9.78	13.24	13.73	4.22	93.18
30	12.28	19.96	21.54	17.24	19.58	2.18	90.30
35	12.37	23.67	25.41	19.41	22.83	3.09	88.69
40	12.41	27.73	28.94	23.71	26.79	2.73	86.72

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ไม่ผ่านการตกตะกอน ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4

เวลา (นาท)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	3.70	196.69	203.69	198.12	199.50	3.70	
3	4.01	176.65	187.79	187.15	183.86	6.25	7.84
6	5.51	115.27	172.20	170.45	152.64	32.38	23.61
9	6.74	0.85	20.32	163.77	61.65	88.98	68.98
12	9.75	1.84	0.84	33.05	11.91	18.31	93.99
15	11.36	2.49	2.79	0.90	2.06	1.02	98.97
20	12.21	11.57	10.00	5.21	8.93	3.32	95.53
25	12.42	14.07	13.75	11.97	13.27	1.13	93.35
30	12.57	17.89	18.68	16.50	17.69	1.10	91.13
35	12.66	19.00	21.16	20.78	20.32	1.15	89.82
40	12.75	22.28	26.52	24.46	24.42	2.12	87.77

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.1:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	3.99	200.73	203.51	202.92	202.39	1.46	
3	4.52	170.47	189.77	188.16	182.80	10.71	9.70
6	6.47	20.76	151.61	168.57	113.65	80.89	44.03
9	8.98	1.77	3.95	5.70	3.81	1.97	98.12
12	11.69	4.41	3.43	1.73	3.19	1.35	98.42
15	12.06	8.65	6.36	2.99	6.00	2.85	97.03
20	12.38	6.73	10.07	10.16	8.99	1.96	95.56
25	12.55	19.62	18.01	16.43	18.02	1.59	91.09
30	12.68	13.65	21.13	18.22	17.67	3.77	91.28
35	12.76	14.14	15.47	10.77	13.46	2.42	93.35
40	12.83	20.00	27.91	19.84	22.58	4.61	88.85

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.3:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	3.91	202.78	203.80	199.85	202.14	2.05	
3	4.04	188.30	188.74	192.54	189.86	2.33	6.06
6	5.55	160.09	168.13	168.57	165.59	4.77	18.07
9	7.50	4.97	15.79	82.31	34.36	41.88	82.87
12	11.17	2.01	1.62	1.30	1.64	0.36	99.19
15	11.97	7.16	5.53	1.89	4.86	2.70	97.60
20	12.32	11.43	11.61	10.92	11.32	0.36	94.40
25	12.52	9.91	16.37	17.11	14.46	3.96	92.84
30	12.65	21.39	18.23	21.26	20.29	1.79	89.96
35	12.74	24.52	19.44	23.29	22.42	2.65	88.90
40	12.81	30.15	21.84	28.44	26.81	4.38	86.73

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 1:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	3.72	201.90	202.22	202.86	202.33	0.48	
3	3.57	196.98	198.57	196.67	197.41	1.02	2.43
6	5.72	59.52	198.10	184.29	147.30	76.33	27.24
9	8.68	10.66	9.68	1.25	7.20	5.18	96.44
12	11.06	3.57	2.08	2.24	2.63	0.82	98.70
15	11.58	2.44	4.38	5.44	4.09	1.52	97.98
20	11.90	10.51	5.78	9.06	8.45	2.42	95.82
25	12.08	13.03	10.49	12.30	11.94	1.31	94.10
30	12.19	13.51	6.25	14.02	11.26	4.34	94.44
35	12.30	15.38	6.25	14.03	11.89	4.93	94.12
40	12.38	14.37	16.30	16.83	15.83	1.30	92.18

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 1.5:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	3.55	202.71	201.03	202.97	202.24	1.05	
3	3.76	201.55	178.42	194.57	191.52	11.86	5.32
6	5.87	189.79	83.59	53.62	109.00	71.56	46.12
9	8.99	35.76	1.17	1.90	12.94	19.77	93.61
12	10.69	1.05	5.27	6.03	4.12	2.68	97.96
15	11.49	4.60	5.13	9.35	6.36	2.61	96.86
20	11.85	4.79	12.07	13.81	10.22	4.78	94.94
25	12.03	0.84	14.87	14.01	9.91	7.86	95.10
30	12.14	7.17	11.50	15.12	11.26	3.98	94.43
35	12.26	8.99	17.13	12.88	13.00	4.07	93.57
40	12.35	12.21	19.97	17.69	16.62	3.99	91.78

ตารางที่ ก.19 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 2:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 4

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	3.42	201.72	197.67	201.94	200.44	2.40	
3	4.57	125.39	189.02	176.74	163.72	33.76	18.23
6	6.12	1.55	182.43	75.19	86.39	90.96	56.57
9	9.27	3.56	27.78	2.25	11.19	14.38	94.36
12	11.01	7.45	2.57	3.62	4.54	2.57	97.74
15	11.45	10.95	4.21	10.06	8.41	3.66	95.82
20	11.77	17.81	5.19	6.51	9.84	6.93	95.11
25	11.94	18.14	13.98	9.88	14.00	4.13	93.01
30	12.07	13.38	10.48	7.97	10.61	2.70	94.71
35	12.15	11.57	13.14	9.55	11.42	1.80	94.30
40	12.22	20.26	20.37	7.43	16.02	7.44	91.99

ตารางที่ ก.20 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ไม่ผ่านการตกตะกอน ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	2.00	200.22	200.87	201.95	201.01	0.87	
3	2.00	197.40	196.75	195.02	196.39	1.23	2.30
6	2.01	194.16	195.89	192.42	194.16	1.73	3.41
9	2.03	199.57	192.86	187.45	193.29	6.07	3.83
12	2.07	195.45	185.71	179.44	186.87	8.07	7.02
15	2.11	194.59	185.71	180.95	187.09	6.92	6.92
20	2.19	185.28	175.32	166.02	175.54	9.63	12.66
25	2.31	181.82	166.67	159.09	169.19	11.57	15.81
30	2.43	174.03	156.28	159.96	163.42	9.37	18.69
35	2.74	171.00	147.40	153.68	157.36	12.22	21.71
40	4.93	103.46	139.18	144.81	129.15	22.42	35.78

ตารางที่ ก.21 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	2.01	199.03	197.41	191.26	195.90	4.10	
3	2.02	185.44	190.29	184.47	186.73	3.12	4.66
6	2.06	183.17	188.03	181.07	184.09	3.57	6.02
9	2.10	177.67	182.20	171.36	177.08	5.45	9.61
12	2.16	164.56	168.12	164.40	165.70	2.10	15.40
15	2.22	159.55	170.06	163.59	164.40	5.31	16.05
20	2.40	148.87	162.62	151.78	154.42	7.25	21.16
25	2.71	142.88	155.83	141.91	146.87	7.77	25.03
30	4.06	122.17	145.31	122.49	129.99	13.27	33.66
35	10.04	1.63	44.01	1.51	15.72	24.50	92.03
40	12.10	9.82	5.59	6.88	7.43	2.17	96.21

ตารางที่ ก.22 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 1:1 ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.82	192.24	193.60	195.64	193.83	1.71	
3	1.84	184.69	189.22	183.68	185.87	2.95	4.10
6	1.86	176.48	183.39	189.37	183.08	6.45	5.56
9	1.91	173.63	160.21	185.72	173.19	12.76	10.67
12	1.98	155.68	131.19	176.54	154.47	22.70	20.34
15	2.05	144.95	128.27	162.54	145.26	17.14	25.09
20	2.16	143.44	120.84	154.81	139.70	17.29	27.95
25	2.65	146.63	112.09	145.48	134.73	19.62	30.49
30	4.91	126.84	100.13	134.11	120.36	17.89	37.92
35	10.96	2.62	1.58	2.34	2.18	0.54	98.88
40	12.13	8.17	6.89	9.37	8.15	1.24	95.80

ตารางที่ ก.23 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ไม่ผ่านการออกซิเดชัน ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 5

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	5.03	202.17	202.54	204.89	203.20	1.48	
3	5.11	56.70	201.99	197.10	151.93	82.51	25.34
6	7.24	1.04	190.40	78.62	90.02	95.19	55.70
9	9.09	4.02	74.09	0.83	26.32	41.41	87.01
12	10.85	9.20	0.93	3.50	4.54	4.23	97.76
15	11.67	12.74	3.80	8.03	8.19	4.47	95.97
20	11.97	18.93	12.16	16.03	15.71	3.40	92.27
25	12.14	22.23	23.77	24.82	23.61	1.30	88.38
30	12.24	24.53	28.55	28.55	27.21	2.32	86.61
35	12.32	25.56	33.46	35.00	31.34	5.06	84.58
40	12.36	29.42	36.11	38.42	34.65	4.67	82.95

ตารางที่ ก.24 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถึงปฏิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	2.61	191.49	192.55	192.03	192.02	0.53	
3	2.65	188.30	188.48	188.47	188.39	0.10	4.66
6	2.75	182.62	188.48	185.07	185.55	2.94	6.02
9	2.84	172.87	178.19	175.36	175.53	2.66	9.61
12	3.00	172.52	177.84	175.40	175.18	2.66	15.40
15	3.40	160.64	167.55	163.59	164.10	3.47	16.05
20	4.60	151.95	157.27	154.78	154.61	2.66	21.16
25	7.72	0.18	148.76	74.91	74.47	74.29	25.03
30	11.82	1.45	1.06	1.22	1.26	0.19	33.66
35	12.44	5.73	1.24	3.51	3.48	2.24	92.03
40	12.66	12.84	5.00	8.88	8.92	3.92	96.21

ตารางที่ ก.25 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถึงปฏิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 5

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	5.91	173.01	188.41	194.02	185.14	10.88	
3	7.67	109.78	170.11	2.20	94.03	85.05	48.37
6	9.13	1.64	0.70	5.87	2.74	2.75	98.16
9	11.91	2.91	13.70	14.89	10.50	6.60	93.77
12	12.31	8.84	9.71	23.55	14.03	8.25	90.42
15	12.52	15.87	19.91	29.75	21.84	7.14	84.52
20	12.71	25.20	28.46	37.70	30.45	6.48	77.62
25	12.84	31.20	33.93	40.11	35.08	4.57	73.66
30	12.93	34.60	35.69	41.30	37.20	3.60	71.67
35	12.99	35.96	36.49	42.32	38.25	3.53	70.77
40	13.04	37.30	37.21	41.00	38.50	2.16	70.29

ตารางที่ ก.26 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.82	198.10	196.84	197.05	197.33	0.68	
3	1.84	195.99	196.62	195.78	196.13	0.44	0.61
6	1.86	191.77	194.73	194.30	193.60	1.60	1.89
9	1.87	183.76	190.93	186.29	186.99	3.64	5.24
12	1.88	177.00	185.02	182.07	181.36	4.05	8.09
15	1.90	172.36	182.91	176.37	177.22	5.32	10.19
20	1.98	162.45	174.89	168.99	168.78	6.23	14.46
25	2.09	159.70	167.93	160.55	162.73	4.53	17.53
30	2.43	150.21	164.77	149.79	154.92	8.53	21.48
35	3.54	140.08	157.81	135.86	144.59	11.64	26.72
40	5.65	100.21	137.76	118.57	118.85	18.78	39.75

ตารางที่ ก.27 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ร่วมกับการฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.79	202.95	203.59	203.80	203.45	0.44	
3	1.81	199.16	202.32	199.58	200.35	1.72	1.52
6	1.83	195.78	195.99	194.73	195.50	0.68	3.91
9	1.83	195.78	197.47	191.98	195.08	2.81	4.11
12	1.85	189.45	188.82	188.40	188.89	0.53	7.15
15	1.87	178.06	184.18	182.70	181.65	3.19	10.72
20	1.94	174.89	171.10	167.30	171.10	3.80	15.90
25	2.06	163.29	164.77	160.97	163.01	1.91	19.88
30	2.37	154.43	157.17	152.53	154.71	2.33	23.95
35	3.44	139.66	131.22	130.59	133.83	5.06	34.22
40	8.44	137.97	46.20	54.64	79.61	50.72	60.84

ตารางที่ ก.28 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 และออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 1.7

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	1.74	208.51	204.71	201.63	197.33	3.45	
3	1.79	206.52	203.08	196.20	196.13	5.26	1.48
6	1.86	200.91	193.66	189.86	193.60	5.61	4.96
9	1.96	189.49	184.78	188.95	186.99	2.58	8.38
12	2.09	188.77	147.46	190.40	181.36	24.33	14.33
15	2.33	178.62	135.33	183.70	177.22	26.58	19.04
20	3.35	168.48	155.62	175.18	168.78	9.94	18.77
25	6.51	16.67	0.72	21.56	162.73	10.89	93.65
30	9.49	0.21	0.15	0.19	154.92	0.03	99.91
35	11.58	0.68	2.03	1.73	144.59	0.71	99.27
40	11.92	2.74	5.34	6.78	118.85	2.04	97.57

ตารางที่ ก.29 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนที่อัตราส่วนโมลแคลเซียมต่อซัลเฟต 0.5:1 และออกซิเดชันด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต 3000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้ถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยแผ่นแก้วพูนเบอร์ 4 (sintered glass) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอช เท่ากับ 5

เวลา (นาที)	pH เฉลี่ย	Zinc concentration (mg/L)				SD	% Removal
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย		
0	5.62	203.44	206.34	205.43	203.45	1.48	
3	9.68	0.76	53.80	0.36	200.35	30.74	91.12
6	11.57	5.62	1.25	4.20	195.50	2.23	98.20
9	11.87	9.96	1.76	8.88	195.08	4.46	96.64
12	12.04	12.43	7.93	11.18	188.89	2.32	94.87
15	12.14	13.53	12.03	13.15	181.65	0.78	93.71
20	12.23	17.39	14.57	18.03	171.10	1.84	91.87
25	12.36	18.44	19.31	19.66	163.01	0.63	90.67
30	12.38	20.45	25.05	23.44	154.71	2.33	88.80
35	12.43	24.04	33.61	30.45	133.83	4.87	85.69
40	12.46	31.09	39.84	34.42	79.61	4.42	82.89

ตารางที่ ก.30 เปรียบเทียบองค์ประกอบในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านกระบวนการตกตะกอน การออกซิเดชัน และกระบวนการไฟฟ้าเคมี

พารามิเตอร์	น้ำเสียเริ่มต้น	Ca ²⁺ : SO ₄ ²⁻ = 1:1	KMnO ₄ 3000 mg/L	ปรับ pH = 4 ผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี ที่เวลา 15 นาที (ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 130 A/m ²)
พีเอช	1.7	1.82	1.93	11.36
สังกะสี (mg/L)	204	194	192	2.06
ซีโอดี (mg/L)	2740	2720	2450	2545
ซัลเฟต (mg/L)	14600	2090	14500	14150
ของแข็งละลายน้ำ (mg/L)	28000	25500	26500	26800

ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ

ข.1 วิธีคำนวณผลการทดลอง

ข.1.1 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.1.2 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 = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ข.1.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ในที่นี้ใช้ เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลายกันสารละลายด้วยแผ่นพรุน ค่ากระแสไฟฟ้า 0.7 แอมแปร์ ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียที่เวลา 35 และ 40 นาที มาเป็น ตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่าร้อยละการกำจัด และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 203.8 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา 35 นาที ความเข้มข้นของสังกะสี 157.4 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา 40 นาที ความเข้มข้นของสังกะสี 129.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

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

แทนค่า ที่เวลา 35 นาที

$$= \frac{(203.8 - 157.4) \times 100\%}{203.8}$$

$$= 22.8 \%$$

ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 35 นาที ร้อยละการกำจัดสังกะสี คือ 22.8 %

แทนค่า ที่เวลา 40 นาที

$$= \frac{(203.8 - 129.2) \times 100\%}{203.8}$$

$$= 36.6 \%$$

ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 40 นาที ร้อยละการกำจัดสังกะสี คือ 36.6 %

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

แทนค่า ที่เวลา 35-40 นาที (ช่วงเวลาห่างกัน 5 นาที)

$$= \frac{2 \times 96500 \times [(157.4 - 129.2)/(65.4 \times 1000)] \text{ mol Zn}^{2+} \times 0.2 \text{ L} \times 100\%}{0.7 \text{ A} \times 5 \text{ min} \times 60 \text{ min/sec}}$$

$$= 7.93 \%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 40 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 7.93 %

ข.2 วิธีคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น} \\ &= 3 \text{ เซนติเมตร} \times 9 \text{ เซนติเมตร} \times 2 \text{ ด้าน} \times 1 \text{ แผ่น} \\ &= 54 \text{ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

คงที่กระแส 700 มิลลิแอมแปร์

ความหนาแน่นกระแส = กระแสต่อพื้นที่ขั้ว

$$\begin{aligned} &= \frac{700 \times 10^{-3} \text{ แอมแปร์}}{54 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}} \\ &= 130 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเมตร} \end{aligned}$$

คงที่กระแส 1300 มิลลิแอมแปร์

$$\begin{aligned} &= \frac{1300 \times 10^{-3} \text{ แอมแปร์}}{54 \times 10^{-4} \text{ ตารางเมตร}} \\ &= 241 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเมตร} \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรรริดา จิระชัยพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 21 เดือนเมษายน พ.ศ.2530 ที่ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2552 ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 372-3 หมู่ 13 ถนนสีหบุรานุกิจ แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร 10510