ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246910

การพัฒนาประสิทธิภาพกำจัดสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรม
โดยกระบวนการรวมกันระหว่างไฟฟ้าเคมีกับวิธีตกตะกอนด้วยสารส้มแบบต่อเนื่อง

นายทินิต ดีกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

b 00251451

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246910

การเพิ่มประสิทธิภาพกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง

นายพิชิต ลีกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5270414221

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

Mr. Pichit Leekoon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง
โดย	นายพิชิต ลีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาพันธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

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

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชัยพร ภู่ประเสริฐ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒิกะ)

246910

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

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใยเรยอนเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสังกะสีในปริมาณสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองปรับปรุงวิธีการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใยเรยอนมีปริมาณสังกะสีปนเปื้อน 155 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.7 และค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร การทดลองเริ่มต้นจากการศึกษารูปแบบถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับงานทางด้านไฟฟ้าเคมี ผ่านปฏิกิริยารีดักชั่นของ $KMnO_4$ และการทดสอบหาวัสดุที่ดีที่สุดที่สามารถใช้เป็นสะพานเกลือได้ทั้งถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อและไม่มีรอยต่อ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าถังปฏิกิริยาที่มีแผ่นแก้วพรุนทำหน้าที่เป็นเหมือนสะพานเกลือให้ผลการทดลองที่ดีที่สุดและได้นำไปใช้สำหรับการทดลองการกำจัดสังกะสีในขั้นต่อไป เหล็กอะลูมิเนียม แกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม ถูกนำมาทดสอบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแคโทดสำหรับการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยตรวจวัดความเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช และความเข้มข้นของสังกะสีตลอดระยะเวลาการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมความหนาแน่นกระแส คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้ถึง 98% ภายในเวลา 30 นาที ณ ค่าความหนาแน่นกระแส 37.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร รูปแบบใหม่ของการควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าตามเวลาได้ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ โดยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบใหม่นี้สามารถลดระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงลงได้มาก พร้อมๆกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัด จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงได้ถึง 98% ภายในเวลา 50 นาที โดยคิดเป็น 100% ประสิทธิภาพเชิงกระแส

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	พิชิต ลีกุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	
ปีการศึกษา	2553	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	

5270414221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING 246910

KEYWORDS : ZINC / ELECTROCHEMICAL PROCESSES / CONTROLLED CURRENT / WASTEWATER

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

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

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

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนอาจารย์ ดร.ชัยพร ภู่ประเสริฐ และ อาจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒิกะ ที่ได้ให้คำชี้แนะ คำปรึกษา และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

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

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฑ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4

2.1 สังกะสี..... 4

2.2 โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นใย..... 5

2.2.1 กระบวนการผลิตเส้นใย..... 5

2.2.2 การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเส้นใย..... 7

2.2.3 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นใย..... 8

2.3 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย..... 9

2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE)..... 9

2.3.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction)..... 9

2.3.3 รีเวิร์ส ออสโมซีส (Reverse osmosis)..... 10

2.3.4 การระเหย (Evaporation)..... 10

2.3.5 อิเลคโตรไดอะไลซีส (Electro dialysis)..... 10

2.3.6 การดูดติดผิว (Adsorption)..... 10

หน้า

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

หน้า

2.9.2 ความนำไฟฟ้า..... 29
2.9.3 กำลังไฟฟ้า..... 30
2.10 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า..... 31
2.11 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency)..... 32
2.12 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี..... *32*
2.13 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 33

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย..... 38
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี..... 38
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์..... 38
3.1.2 สารเคมี..... 39
3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง..... 39
3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี..... 40
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย..... 42
3.2.1 การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิกิริยา..... 42
3.2.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี
จากน้ำเสีย..... 43

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์..... 46
4.1 การออกแบบและเลือกรูปแบบถังปฏิกิริยา..... 46
4.2 ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราเร็วและประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสีย..... 49
4.2.1 ชนิดของขั้วไฟฟ้า..... 49
4.2.2 ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า..... 51
4.2.3 พีเอช..... 54
4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแส..... 57
4.4 การกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงด้วยวิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง.....61
4.5 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด..... 68
4.5.1 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับอุปกรณ์และสารที่ใช้ซ้ำๆ ได้..... 68

หน้า

4.5.2 ค่าใช้จ่ายที่แปนผันตามปริมาตรของน้ำเสียที่ต้องการบำบัด..... 70

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 73

5.1 สรุปผลการวิจัย..... 73

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 74

5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรม..... 74

รายการอ้างอิง..... 75

ภาคผนวก..... 79

ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง..... 80

ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ..... 97

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 103

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การใช้วัตถุดิบและการเกิดมลพิษจากโรงงาน	7
2.2	ลักษณะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนกระบวนการผลิตเส้นใย	8
2.3	ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ	14
3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า ที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าขั้วลบแบบเซลล์ขนาน 10 แผ่น และขั้วบวก 2 แผ่น	44
4.1	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมในช่วงระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง พร้อมความเข้มข้นของสังกะสีและประสิทธภาพเชิงกระแสที่ได้	60
4.2	สมบัติของน้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง	62
4.3	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมในช่วงระยะเวลาต่างๆ ของการทดลอง พร้อมความเข้มข้นของสังกะสีและประสิทธภาพเชิงกระแสที่ได้จากน้ำเสียจริง	64
4.4	สมบัติของน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลอง	67
4.5	ค่าใช้จ่ายที่แปรผันตามปริมาตรของน้ำเสียที่ต้องการบำบัดโดยใช้วิธีปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสที่ควบคุมตามเวลา	71
4.6	สรุปเปรียบเทียบงานวิจัยการใช้ไฟฟ้าเคมีในการตกตะกอน	72
ก.1	ผลการทดลองการกำจัดค่าความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิโมลต่อลิตรในถังปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายและแบบมีรอยต่อของสาระละลายด้วยกระดาษเซลล์โลเฟน แผ่นแก้วพรุนเบอร์ 4 (sintered glass) และวุ้นอิ่มตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ หลังผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาที	81
ก.2	ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์	82

ตารางที่ หน้า

ก.3 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์ 83

ก.4 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์ 84

ก.5 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1,500 มิลลิแอมแปร์ 85

ก.6 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 2,500 มิลลิแอมแปร์ 86

ก.7 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 3,000 มิลลิแอมแปร์ 87

ก.8 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 4,500 มิลลิแอมแปร์ 88

ก.9 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 1 89

ก.10 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 2 90

ก.11 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 3 91

ตารางที่ หน้า

ก.12 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 4 92

ก.13 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 1 93

ก.14 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 2 94

ก.15 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 3 95

ก.16 ผลการทดลองการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียจริงทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้การปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆ แบบที่ 4 96

สารบัญภาพ

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

รูปที่ หน้า

3.6 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส เวลา และประสิทธิภาพ
ในการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริง..... 45

4.1 ค่าความเข้มข้นของ $KMnO_4$ ในถังปฏิกิริยาแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย
และแบบมีรอยต่อของสารละลายด้วยกระดาษเซลล์โลเฟน แผ่นแก้วพรุน
เบอร์ 4 (sintered glass No.4) และวุ้นอิ่มตัวด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์
หลังผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์เป็นเวลา 20 นาที..... 47

4.2 สีของสารละลายในถังปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อด้วยกระดาษเซลล์โลเฟน
(หลอดขวา) หลังการกำจัดสี $KMnO_4$ เมื่อผ่านศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์
เป็นเวลา 20 นาทีเทียบกับน้ำกลั่น (หลอดซ้าย)..... 48

4.3 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้ขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์
เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และเหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่1,500 mA..... 49

4.4 ค่าร้อยละการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้ขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์
เหล็กกล้าไร้สนิม อะลูมิเนียม และเหล็ก เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ที่1,500 mA..... 50

4.5 ความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อควบคุม
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร
โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด..... 52

4.6 ร้อยละการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อควบคุม
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 38, 63, 75 และ 113 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร
โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด..... 53

4.7 ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ที่ 38, 63, 75 และ 113 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร..... 55

4.8 แผนภาพการละลายของ $Zn(OH)_2$ 57

4.9 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลา เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ที่ 38, 63, 75 และ 113 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเมตร บนขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม..... 58

4.10 การลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลา เมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่น
กระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.1..... 59

4.11 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยน
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1..... 60

รูปที่ หน้า

4.12 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชเทียบกับเวลา เมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.1 กับน้ำเสียจริงและน้ำเสียสังเคราะห์..... 63

4.13 การลดลงของสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงในตารางที่ 4.3..... 65

4.14 ค่าร้อยละการกำจัดสังกะสีเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.3..... 65

4.15 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเทียบกับเวลาเมื่อใช้การปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามตารางที่ 4.3..... 67