การขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบผ้าคาร์บอน

นางสาวปทุมทิพย์ เสมอภาค

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NICKEL AND ZINC REMOVAL FROM DILUTE SOLUTION USING CARBON CLOTH ELECTRODE

Miss Patumtip Samerpak

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

500023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบผ้าคาร์บอน
โดย	นางสาวปทุมทิพย์ เสมอภาค
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กานดา ว่องไวลิขิต)

..... กรรมการ
(ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ)

ปทุมทิพย์ เสมอภาค : การขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบผ้าคาร์บอน. (NICKEL AND ZINC REMOVAL FROM DILUTE SOLUTION USING CARBON CLOTH ELECTRODE) อ. ที่ปรึกษา: รศ.ดร. เก็จวลี พฤกษาทร, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ.ดร.มะลิ หุ่นสม, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับขั้วโลหะ ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความเป็นกรด-เบส กระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของไอออนโลหะ และเวลา สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มีความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสีในช่วง 10-50 และ 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ขั้วแคโทดทำจากผ้าคาร์บอนมีพื้นที่ 66 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนดทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทิเนียมออกไซด์ มีพื้นที่ 66 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแยกนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเดี่ยวนิกเกิลและสังกะสีเจือจางที่มีความเข้มข้น 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อใช้ผ้าคาร์บอน คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของแคโทดประมาณ 15.2 และ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 โดยสามารถแยกนิกเกิลและสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 94 และ 80 ในเวลา 6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (Current Efficiency) เท่ากับร้อยละ 11.9 และ 14.9 โดยให้ค่าการแยกสูงกว่าเมื่อใช้ขั้วแคโทดที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม 1.3 เท่าสำหรับนิกเกิล และ 3.7 เท่าสำหรับสังกะสี ในการขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางผสมจะต้องใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อให้ได้ร้อยละการขจัดเท่าเดิม โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม คือ 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เมื่อทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อการขจัดโดยการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟกทอเรียล พบว่า เวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีผลอย่างมากต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสี

ภาควิชา...เคมีเทคนิค...
สาขาวิชา...เคมีเทคนิค...
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....ปทุมทิพย์.....เสมอภาค.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4872348123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: Electrochemical / Carbon cloth/ Nickel/ Zinc

PATUMTIP SAMERPAK: NICKEL AND ZINC REMOVAL FROM DILUTE SOLUTION USING CLOTH ELECTRODE THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. KEJVALEE PRUKSATHORN PhD, THESIS COADVISOR : ASST. PROF. MALI HUNSOM. PhD 96 pp.

This research was to study the optimum condition of electrochemical removal of nickel and zinc from dilute solutions using carbon cloth electrode and to compare its efficiency with metal electrode. The studied parameters were pH, concentration of metal ions, current and time. The concentrations of nickel and zinc electrolytes were in the range of 10-50 and 20-100 mg/L respectively. Cathode was carbon cloth (66 cm^2 of area). Anode was titanium coated with ruthenium oxide (66 cm^2). The results showed that the optimum conditions of nickel and zinc removal were a cathode current density of 15.2 and 50 A/m^2 at a pH of 4 for 22 and 100 mg/L respectively. More than 94 % nickel and 80% zinc were removed in 6 hours for a current efficiency of 11.9% and 14.9% respectively. Carbon cloth can be removed metal ions more than stainless steel (1.3 times for nickel and 3.7 times for zinc). High current density was used in mixed electrolyte to obtain the same nickel and zinc removals. The optimum current density was 150 A/m^2. 2^k factorial of experimental design was used to determine the effect of parameters on metal removal. The results showed that time and current density have significant effect on metal removal.

Department Chemical Technology
Field of study Chemical Technology
Academic year 2007

Student's signature S. patumtip
Advisor's signature B. Pruksathorn
Co-advisor's signature Mali Hunsom

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมและคณาจารย์ทุกท่าน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในงานวิจัยนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจ จนงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		จ
กิตติกรรมประกาศ		ฉ
สารบัญ		ช
สารบัญตาราง		ญ
สารบัญภาพ		ฏ
บทที่		
1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
	1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	3
2	วารสารปริทัศน์	4
	2.1 น้ำเสีย	4
	2.2 วิธีการบำบัดน้ำเสีย	6
	2.3 วิธีบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน	8
	2.4 กระบวนการเคมีไฟฟ้า	11
	2.4.1 โพลาไรเซชัน (Polarization)	14
	2.4.2 กฎฟาราเดย์	14
	2.4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า	15
	2.5 การแยกโลหะโดยอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้า	15
	2.6 คาร์บอน	21
	2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
3	วิธีดำเนินงานวิจัย	25
	3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	25
	3.2 การเตรียมสารละลายเจือจาง	27

บทที่ หน้า

3.3 วิธีการทดลอง..... 27
3.4 การเตรียมสารละลายตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสีในสารละลาย ณ เวลาใดๆ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer..... 30
3.5 การวิเคราะห์ผล..... 30
4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง..... 32
ตอนที่ 1 ผลของตัวแปรที่มีต่อการขจัดของนิกเกิลออกจากสารละลายเจือจาง..... 32
1.1 ผลของค่ากระแสไฟฟ้า..... 32
1.2 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส..... 34
1.3 ผลของค่าความเข้มข้น..... 36
1.4 ผลของขั้วไฟฟ้า..... 37
ตอนที่ 2 ผลของตัวแปรที่มีต่อการขจัดสังกะสีออกจากสารละลายเจือจาง..... 39
2.1 ผลของค่ากระแสไฟฟ้า..... 39
2.2 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส..... 41
2.3 ผลของค่าความเข้มข้น..... 43
2.4 ผลของขั้วไฟฟ้า..... 43
ตอนที่ 3 การขจัดของนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายผสม..... 44
ตอนที่ 4 การหาความสัมพันธ์ของผลการทดลองจากสารละลายผสมเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k..... 46
4.1 ผลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสม..... 47
4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลออกจากสารละลายเจือจางผสม..... 48
4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสม..... 53

บทที่ หน้า

4.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 59
4.2.1 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 60
4.2.2 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 64
4.3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวที่มีผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน..... 67
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... 73
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 73
5.2 ข้อเสนอแนะ..... 74
รายการอ้างอิง..... 75
ภาคผนวก..... 78
ภาคผนวก ก..... 79
ภาคผนวก ข..... 83
ภาคผนวก ค..... 87
ภาคผนวก ง..... 95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 96

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
4.1	ร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสม	47
4.2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดนิกเกิล	48
4.3	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดสังกะสี	53
4.4	ร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน	60
4.5	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดนิกเกิลเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน	60
4.6	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดสังกะสีเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน	64
4.7	ร้อยละการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเจือจางผสมเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน	68
4.8	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดนิกเกิลเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน	68
4.9	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปร (ANOVA) สำหรับการขจัดสังกะสีเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน	68
ก-1	ตารางแสดงค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	79
ข-1	ผลการทดลองการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าของสารละลายเจือจาง ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้น 22 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่ 4 โดยให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าคงที่ 15.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (0.1แอมแปร์) ด้วยการเจือจาง 4.55: 50 โดยปริมาตร	84
ค-1	ข้อมูลการทดลองศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายนิกเกิลที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 15.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิลเริ่มต้น 22 มิลลิกรัมต่อลิตร	87

ตาราง หน้า

ค-2 ข้อมูลการทดลองศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการขจัดนิกเกิล ที่ค่าความเป็นกรดเบสของสาระลายเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความเข้มข้นของสารละลายนิกเกิลเริ่มต้น 22 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 88

ค-3 ข้อมูลการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของนิกเกิล ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.2 แอมแปร์ และค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลายเริ่มต้นเท่ากับ 4..... 89

ค-4 ข้อมูลการทดลองศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการขจัดสังกะสี ที่ค่าความเป็นกรดเบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 90

ค-5 ข้อมูลการทดลองศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบสที่มีต่อการขจัดสังกะสีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 91

ค-6 ข้อมูลการทดลองศึกษาผลของความเข้มข้นของสังกะสี ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4..... 92

ค-7 ข้อมูลการทดลองเปรียบเทียบการขจัดนิกเกิลและสังกะสี เมื่อใช้ขั้วแคโทดแตกต่างกัน ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.2 และ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ค่าความเป็นกรดเบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสี 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ..... 93

ค-8 ข้อมูลการทดลองศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายผสม ที่ค่าความเป็นกรดเบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความเข้มข้นของนิกเกิล และสังกะสี 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 94

ง-1 สมบัติทางกายภาพของผ้าคาร์บอน..... 95

สารบัญภาพ

รูป		หน้า
2.1	แผนภูมิ Pourbaix ของกรดฟอสฟอริก.....	10
2.2	โพลาไรเซชัน ของ Cu, M_1, M_2.....	16
2.3	โพลาไรเซชัน ของ M_1, M_2.....	17
2.4	โพลาไรเซชัน ของ Cu, Zn และสารเชิงซ้อนของ Cu, Zn.....	17
2.5	ลักษณะของกระบวนการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า.....	18
2.6	ลักษณะของกระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้าชนิดมีเยื่อเลือกผ่านด้วยกระแสไฟฟ้า.....	19
3.1	เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าตรง.....	25
3.2	ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
3.3	เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer.....	26
3.4	(ก) และ (ข) การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	28
4.1	ความสัมพันธ์ของร้อยละการขจัดนิกเกิลกับเวลาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ความเข้มข้นของนิกเกิล 22 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	33
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ ร้อยละการขจัดนิกเกิลใดๆ ในสารละลายนิกเกิลเจือจางความเข้มข้น 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4.....	34
4.3	ผลของค่าความเป็นกรด-เบส ที่มีต่อการขจัดนิกเกิล (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดนิกเกิล ณ เวลาใดๆที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบสและค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.1 แอมแปร์ ณ ปริมาณร้อยละของการขจัดนิกเกิลใดๆ.....	35
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดนิกเกิล ณ ค่าความเข้มข้นใดๆ ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 0.1 แอมแปร์ และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 และ 3	36

รูป หน้า

4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขจัดนิกเกิล ณ เวลาใดๆ เมื่อใช้ขั้วแคโทดแตกต่าง กัน ที่ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.1 แอมแปร์ และความเข้มข้นของนิกเกิล 22 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 38

4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการดูดซับนิกเกิลและสังกะสี ณ เวลาใดๆ เมื่อใช้ผ้าคาร์บอนเป็นตัวดูดซับ ที่ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 และความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสีคงที่ที่ 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ..... 38

4.7 ความสัมพันธ์ของร้อยละการขจัดสังกะสีกับเวลาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ณ ความเป็นกรด-เบสคงเริ่มต้นเท่ากับ 4 และความเข้มข้นของสังกะสี 100 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 40

4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าที่ร้อยละการขจัดสังกะสีใดๆ ในสารละลายสังกะสีเจือจางความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4..... 41

4.9 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส ที่มีต่อการขจัดสังกะสี (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดสังกะสี ณ เวลาใดๆที่ความเป็นกรด-เบสต่างๆ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-เบส และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.33 แอมแปร์ ณ ปริมาณร้อยละของการขจัดสังกะสีใดๆ..... 42

4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการขจัดสังกะสี ณ ค่าความเข้มข้นใดๆ ที่กระแสไฟฟ้า 0.33 แอมแปร์ และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ตามลำดับ..... 43

4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขจัดสังกะสี ณ เวลาใดๆ เมื่อใช้ขั้วแคโทดต่างกัน ที่ ค่าความเป็นกรด – เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 0.3 แอมแปร์ และสารละลายสังกะสีความเข้มข้น100 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 44

รูป หน้า

4.12 (ก) และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการขจัดนิกเกิลและสังกะสีจาก สารละลายผสมซึ่งมีความเข้มข้นของนิกเกิลและสังกะสี 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อ ลิตร ตามลำดับ ณ ค่าความความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใดๆ และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นเท่ากับ 4 45

4.13 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีต่อร้อยละการขจัดของนิกเกิล (Normal probability plot) 49

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการขจัดนิกเกิล..... 50

4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของนิกเกิล..... 50

4.16 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล..... 51

4.17 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเจือจางที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล..... 51

4.18 ผลของเวลาที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล..... 52

4.19 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล..... 52

4.20 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีต่อร้อยละการขจัดของสังกะสี (Normal probability plot) 54

4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของสังกะสี..... 54

4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของสังกะสีที่ภาวะคงที่..... 55

4.23 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (ก) ค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (ข) และเวลา (ค) ที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสี..... 56

4.24 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง ที่มีต่อการขจัดสังกะสี..... 57

รูป หน้า

4.25 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้นที่มีการขจัดสังกะสี..... 58
4.26 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเจือจางและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสี..... 58
4.27 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีต่อร้อยละการขจัดของนิกเกิล (Normal probability plot) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 61
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการขจัดนิกเกิลเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 62
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของนิกเกิลเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 62
4.30 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก) ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (ข) และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (ค) ที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิลที่เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 63
4.31 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีต่อร้อยละการขจัดของสังกะสี (Normal probability plot) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 65
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการขจัดสังกะสีเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 65
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของสังกะสีเมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 66
4.34 ผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก) ความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง (ข) และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น (ค) ที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสีที่เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน..... 66
4.35 ผลของสหสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อร้อยละการขจัดสังกะสี เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าเท่ากัน 67
4.36 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อร้อยละการขจัดของนิกเกิล (ก) และสังกะสี(ข) (Normal probability plot) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน..... 69

รูป		หน้า
4.37	ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละ Normal probability กับส่วนตกค้างของร้อยละการขจัดนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน.....	70
4.38	ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกทำนายของนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน.....	70
4.39	ผลของค่าประจุไฟฟ้าต่อการขจัดนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) เมื่อให้ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน.....	71
4.40	ผลของความเข้มข้นของสารละลายเจือจางต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) ที่ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน.....	71
4.41	ผลสหสัมพันธ์ของความเข้มข้นของสารละลายเจือจาง และค่าความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น ที่มีต่อร้อยละการขจัดนิกเกิล (ก) และสังกะสี (ข) ที่ค่าประจุไฟฟ้าต่างกัน.....	72
ข-1	ความสัมพันธ์ของร้อยละการขจัดนิกเกิลกับเวลาที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.2 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และความเป็นกรด-เบสคงที่ที่ 4 ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 22 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	85
ง-1	ลักษณะของผ้าคาร์บอนที่ขยายขนาดด้วย SEM.....	95