

ผลของตัวแปรต่ออิเล็กทรอนิกส์ของนิกเกิล



นาย ฉัฐบรณ วรณรัตน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-05-1074-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF VARIABLES ON NICKEL ELECTRODEPOSITION

Mr. Chattaban Wannaratana



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1074-5

นัฐบรรณ วรณรัตน์ : ผลของตัวแปรต่ออิเล็กโทรดโพสิชันของนิกเกิล. (EFFECT OF VARIABLES ON NICKEL ELECTRODEPOSITION) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.เก็จวดี พุกษาทร, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ จำนวนหน้า 49 หน้า. ISBN 974-03-1074-5.

การประยุกต์ วิธีอิเล็กโทรดโพสิชันเพื่อแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย สามารถกำจัดโลหะหนักออกมาในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หรือโลหะผสมที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ อีกทั้งยังเป็นการลดขั้นตอนการบำบัดรองรับในขั้นต่อไปและลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ได้

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกนิกเกิลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรดโพสิชัน สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือสารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic Method) ปริมาตรสารละลายอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 1 ลิตร ขั้วแคโทด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) มีรูพรุนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิว 89 ตร.ซม ขั้วแอโนด ทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ พื้นที่ผิว 82 ตร.ซม. ผลการทดลองพบว่า ค่าความเป็นกรด - เบส และ ปริมาณกระแสไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพของการอิเล็กโทรดโพสิชัน โดยภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพกระแส (Current Efficiency) สูงสุด (32%) ในการแยกนิกเกิลที่ 60% คือ ช่วง pH 3 – 3.5 และที่ความหนาแน่นกระแส 140 แอมแปร์/ตารางเมตร โดยปรับค่าความเป็นกรด - เบสด้วย กรดซัลฟูริก และหากปรับค่าความเป็นกรด - เบสด้วยกรดบอริกจะให้ค่าประสิทธิภาพที่สูงกว่าเล็กน้อย ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวปนเปื้อนในน้ำเสีย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวจำพวกสารที่มีประจุเป็นลบ โดยหากมีปนเปื้อนเพียง 1 ppm ทำให้ประสิทธิภาพลดลงกว่า 70 %

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4272241023: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ELECTRODEPOSITION / NICKEL REMOVAL / WASTE WATER TREATMENT / ELECTROCHEMICAL / SURFACTANT

CHATTABAN WANNARATANA: ผลของตัวแปรต่ออิเล็กโทรดโพสิชั่นของนิกเกิล. (EFFECT OF VARIABLES ON NICKEL ELECTRODEPOSITION) THESIS ADVISOR: KEJVALEE PRUKSATHORN, THESIS COADVISOR : SOMSAK DAMRONGLERD, [PAGES] pp. ISBN 974-03-1074-5.

The Application of Electrodeposition to remove heavy metal from wastewater can separate metal into pure metal or alloy form. There are reduced steps of treatment process and lower cost. This work studies the effect of variables and the optimum condition for deposition of nickel electrodeposition. The electrolyte is nickel synthetic solution 1 g/L for 1 liter. The system is controlled by Galvanostatic method. Cathode is made from stainless steel, 1.5 mm pore sized diameter, 89 cm² of surface area. Anode is made from titanium coated by ruthinium oxide, 82 cm² of surface area. The result show that pH and current affect to the efficiency of electrodeposition.

The optimum condition of the nickel electrodeposition is the range of pH 3 - 3.5 and current density 140 A/m² for maximum current efficiency (32%) at 60% nickel removal, sulfuric acid is used to adjust pH of electrolyte. Boric acid electrolyte has a little higher efficiency than sulfuric acid. Meanwhile, surfactant contaminated in wastewater decreased the efficiency especially the cationic surfactant. If the wastewater contaminate with 1 ppm of surfactant, the efficiency will be decreased up to 70 %

Department Chemical Technology Student's signature.....

Field of study Chemical Technology Advisor's signature.....

Academic year 2001 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือ ความกรุณา และการสนับสนุนจากบุคคลหลายๆฝ่าย ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร. เกียรติ พฤษภาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ศ. ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ซึ่งเป็นผู้ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะรวมทั้งในการสนับสนุน ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มาด้วยดีโดยตลอด

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้สถานที่ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆในการทำการวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท เอกอภิวัดณ์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการเมธีวิจัยอาวุโสของศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ และ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา – มารดา ผู้ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน และคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
บทที่ 2.....	3
2.1 มลสารในน้ำ.....	3
2.2 การบำบัดน้ำเสีย.....	5
2.3 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน.....	8
2.3.1 การทำให้ตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation).....	8
2.3.2 การเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (Oxidation - Reduction Reaction).....	8
2.3.3 การระเหยแห้ง (Evaporation).....	8
2.3.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange).....	9
2.3.5 การแพร่ย้อนกลับ (Reverse Osmosis).....	9
2.3.6 กระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Process).....	9
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	9
2.4.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า.....	9
2.4.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode).....	11
2.4.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	11
2.4.4 ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode Potential).....	12

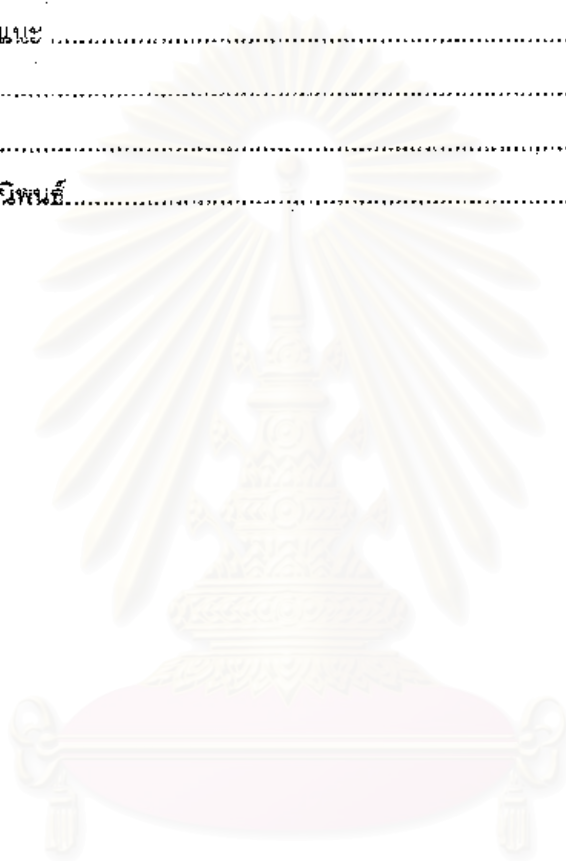
สารบัญ (ต่อ)	ช หน้า
2.4.5 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^0)	12
2.4.6 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า	13
2.4.7 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)	14
2.4.8 ประสิทธิภาพเชิงกระแส	15
2.5 วิธีการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า	15
2.5.1 การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled – Potential Method or Potentiostatic Mode).....	15
2.5.2 การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – Current Method or Galvanostatic Mode)	17
2.6 สารลดแรงตึงผิว	18
2.6.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)	19
2.6.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anion surfactant).....	19
2.6.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant).....	20
2.6.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและลบ (Zwitterionic surfactants หรือ Amphoteric surfactants)	20
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	21
บทที่ 3	23
3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	23
3.2 การเตรียมสารละลายตั้งเคราะห์	25
3.3 วิธีการทดลอง.....	25
3.4 การเตรียมสารละลายตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลาย ณ เวลาใดๆ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer	26
3.5 การวิเคราะห์ผล	26
บทที่ 4	28
4.1 ผลการทดลอง	28
ตอนที่ 1 ผลของค่าความเป็นกรด – เบส ที่มีต่ออิเล็กโทรดโพสิชันของนิกเกิล	29
ตอนที่ 2 ผลของชนิดของกรดที่ใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด - เบส	31
ตอนที่ 3 ผลของค่าปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	33
ตอนที่ 4 ผลของสารลดแรงตึงผิว	35

สารบัญ (ต่อ)

ณ

หน้า

บทที่ 5.....	39
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	39
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
รายการอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก ก.	43
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	53



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 การแยกประเภทของมลสารในน้ำ	3
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของน้ำดื่มที่เกี่ยวกับโลหะหนัก	4
ตารางที่ ก-1 ตารางแสดงค่ามาตรฐานน้ำดื่มจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม.....	43
ตาราง ข-1 ผลการทดลองซีดีเคไทเทรชันของสารละลายสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้น 1 กรัม/ลิตร มีค่าความเป็นกรด - เบส เริ่มต้นที่ 3.3 มีสารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุเป็นบวก (Cationic Surfactant) เจือปน ที่ความเข้มข้น 1 ppm โดยให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 140 แอมแปร์/ตารางเมตร (1.25 แอมแปร์)	46



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า.....	10
รูปที่ 2.2 แผนภาพสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าทั้งสองชนิด.....	10
รูปที่ 2.3 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์คงที่ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับเวลาในการควบคุมแบบศักย์คงที่.....	16
รูปที่ 2.4 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	17
รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างลักษณะโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว.....	19
รูปที่ 3.1 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง.....	23
รูปที่ 3.2 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
รูปที่ 3.3 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer.....	24
รูปที่ 3.4 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	25
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง ก่อนและหลังจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ.....	27
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าการได้นิกเกิลกลับคืนมา กับเวลาที่ค่ากระแสต่างๆ ณ ความเป็นกรดและต่างคงที่ที่ 3.3	28
รูปที่ 4.3 ผลของค่าความเป็นกรดต่างที่มีต่ออิเล็กโทรดโพสิทีฟของนิกเกิล (a) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการนำนิกเกิลกลับคืน ณ เวลาใดๆ ที่ค่าความเป็นกรดและต่างต่างๆ (b) ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ความเป็นกรดและต่าง กับ ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.5 แอมแปร์ และร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน.....	29
รูปที่ 4.4 แผนภูมิ Pourbaix ของนิกเกิลที่ 25 °C ที่ความเข้มข้น 1×10^{-4} โมล/ลิตร เมื่อ $n = 0, -2, -4, -6$	31
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของกรดที่ใช้ในการปรับค่า ความเป็นกรดและต่าง กับค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.5 แอมแปร์ และร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน.....	32
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับ ประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่การได้นิกเกิลกลับคืน 60 %	33

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรดและด่าง และประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่กระแสไฟฟ้า
คงที่ 1.25 แอมแปร์ และร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน.....34

รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่ ความเป็นกรดและด่าง
เริ่มต้น 3.3 กระแสไฟฟ้าคงที่ 1.25 แอมแปร์ และ ร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน.....35

รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าปริมาณกระแส กับ ประสิทธิภาพเชิงกระแส โดยมี
ความเป็นกรดและด่าง เริ่มต้น 3.3 และมีสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก ปนเปื้อนอยู่ 1 ppm ณ
ร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน.....37

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรดและด่างเริ่มต้น กับ ประสิทธิภาพเชิงกระแส โดย
มีกระแสไฟฟ้าคงที่ 140 แอมแปร์/ตารางเมตร และมีสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก ปนเปื้อนอยู่ 1
ppm ณ ร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน.....37



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ปัจจุบันมีงานวิจัยที่ค้นคว้าเพื่อแก้ไขปัญหานี้อย่างกว้างขวาง หนึ่งในงานวิจัยเหล่านั้นคือ การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียทางอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดด้วยวิธีการอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน (Electrodeposition) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดโลหะหนักออกมาในรูปของโลหะบริสุทธิ์ จึงไม่ต้องมีกระบวนการบำบัดอื่นๆ มารองรับ และง่ายต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยประสิทธิภาพของกระบวนการจะขึ้นอยู่กับค่า ความเป็นกรด - เบส ปริมาณโลหะหนัก และองค์ประกอบที่มีอยู่ในน้ำเสีย

นิกเกิล เป็นโลหะหนักที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม แต่เนื่องจากนิกเกิลเป็นโลหะที่มีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (-0.23 V/NHE) ต่ำกว่าค่าการเกิดแก๊สไฮโดรเจน (0 V/NHE) ดังนั้นประสิทธิภาพของกระบวนการแยกนิกเกิลด้วยกระแสไฟฟ้าจึงไม่สูงเท่าที่ควร ดังนั้นในงานวิจัยจึงศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการ เช่น ค่าความเป็นกรด - เบส ปริมาณกระแสไฟฟ้า ปริมาณสารลดแรงตึงผิว เพื่อให้กระบวนการเกิดประสิทธิภาพสูงสุด และเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการกำจัดโลหะหนักโดยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน หรือ กระบวนการชุบโลหะต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำนิกเกิลกลับคืนมาด้วยวิธีอิเล็กโทรไลต์โพสิชัน
2. ศึกษาผลของ ค่าความเป็นกรด - เบส ชนิดของกรด ปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่ออิเล็กโทรไลต์โพสิชันของนิกเกิล

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เป็นการศึกษาเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ
2. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการนำนิเกิลกลับคืนมาด้วยวิธีอิเล็กโทรดีโพสิชัน โดยใช้สารละลายนิเกิลสังเคราะห์ โดยมีตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรด - เบส ชนิดของกรด ปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และ ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เข้าใจกลไกและอิทธิพลที่มีต่ออิเล็กโทรดีโพสิชันของนิเกิลได้ดียิ่งขึ้น
2. ได้กระบวนการอิเล็กโทรดีโพสิชันของโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่มีลักษณะแตกต่างกันให้มีความสะดวก รวดเร็ว และดียิ่งขึ้น

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎี หลักการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำความเข้าใจหลักการเพื่ออธิบายผลที่จะได้รับ
2. เตรียมและจัดหาอุปกรณ์เครื่องมือ และสารเคมีที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่ออิเล็กโทรดีโพสิชันของนิเกิล
 - 3.1 ค่าความเป็นกรด - เบส
 - 3.2 ชนิดของกรดที่ใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด - เบส
 - 3.3 ค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า
 - 3.4 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่เจือปน
4. อธิบาย และวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
5. เขียนและสรุปผลการทดลอง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มลสารในน้ำ [1, 4, 22]

มลสาร หมายถึง สารที่ก่อให้เกิดมลภาวะอันได้แก่ พิษที่เกิดจากความมัวหมองหรือความสกปรก ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อมหรือเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เช่น อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อ การดำรงชีวิต หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพชีวิตของมนุษย์และสัตว์ การเกิดมลภาวะมีได้หลายทางคือ มลภาวะทางอากาศเกิดจากการที่มีก๊าซพิษในอากาศ เช่น ก๊าซไฮโดรคาร์บอน, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น มลภาวะทางน้ำเกิดจากกากของเสียอินทรีย์และอนินทรีย์ที่เป็นพิษ เช่น ปุ๋ย, ตะกั่ว, แคดเมียม เป็นต้น มลภาวะทางเกษตรเกิดจากสารพิษที่ใช้ในทางเกษตรกรรม เช่น ดีดีที, พาราไทออน และยากำจัดแมลงและศัตรูพืชอื่น ๆ เป็นต้น มลภาวะทางน้ำเป็นผลจากการกระทำของมนุษย์ ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม, น้ำใช้ในชีวิตประจำวันตามบ้านเรือนหรือน้ำเสียจากแหล่งชุมชน และน้ำเสียจากเกษตรกรรม สิ่ง que แสดงถึงการเกิดมลภาวะทางน้ำหรือเกิดสภาวะน้ำเป็นพิษได้แก่ การมีสีหรือมีกลิ่นรุนแรง, การลดลงของปริมาณออกซิเจนในน้ำ, การมีคราบน้ำมันปนอยู่, การเกิดฟอง, การมีสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่เป็นพิษ, การที่น้ำมีอุณหภูมิสูง และมีการตายของสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำ เช่น กุ้ง, ปลา เป็นต้น มลสารในน้ำอาจแบ่งได้ 3 ประเภทตามลักษณะคือ ทางกายภาพ, ทางชีวภาพ และทางเคมี โดยมีรายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 การแยกประเภทของมลสารในน้ำ [4]

ชนิด	ตัวอย่าง
<u>ทางกายภาพ</u> สารที่ลอยน้ำ สารที่แขวนลอยในน้ำ ความร้อน	เศษไม้ ใบไม้ ฟอง โคลนตม ดิน ซึ้นโลหะ เศษไม้ ยาง เยื่อกระดาษ น้ำร้อนจากหม้อต้มน้ำโรงงานอุตสาหกรรม
<u>ทางชีวภาพ</u> สิ่ง que ก่อให้เกิดโรคภัยไข้เจ็บ Algae bloom	แบคทีเรีย โปรโตซัว ไวรัส พาราไซต์ เชื้อรา สาหร่าย และพืชน้ำต่าง ๆ

ชนิด	ตัวอย่าง
ทางเคมี สารอินทรีย์	น้ำมัน สีทา สีย้อม ผงซักฟอกสังเคราะห์ ฟีนอล กรดคาร์บอกซิลิก คาร์โบไฮเดรต น้ำตาล
สารอนินทรีย์	กรด เบส คลอรีน เกลือของโลหะ ไนเตรต ฟอสเฟต ซัลเฟต ไบคาร์บอเนต ไฮโดรเจนซัลไฟด์

โลหะหนัก คือ ธาตุโลหะที่มีเลขอะตอมมากกว่าเลขอะตอมของแคลเซียม(20) เช่น นิกเกิล เงิน ทองแดง ปรอท ตะกั่ว เป็นต้น ซึ่งถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ จึงปนเปื้อนมากับ น้ำเสียอันเกิดจากกระบวนการต่างๆในอุตสาหกรรมเหล่านั้น ดังแสดงใน ตารางที่ 2.2 ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้ จัดเป็นสารพิษ ที่มีความอันตราย เพราะหากร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้รับ สารโลหะหนักเหล่านี้ เข้าไปเกินขนาด จะทำให้ร่างกายเกิดอาการผิดปกติ จนถึงขั้นเสียชีวิตได้

ตาราง 2.2 อุตสาหกรรมกับขั้นตอนที่เกี่ยวข้องในการปล่อยโลหะหนัก [4]

ประเภทอุตสาหกรรม	ขั้นตอนที่เกี่ยวข้อง	ชนิดของโลหะหนัก
อุตสาหกรรมผลิตเม็ดสีอนินทรีย์	-การล้าง -การเหวี่ยงตะกอนแคดเมียม และสารประกอบ แคดเมียม -น้ำทิ้งจากการล้างแก๊ส	ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม ปรอท แคดเมียม
อุตสาหกรรมผลิตสารอนินทรีย์ เคมี	-การกรอง -การเหวี่ยงตะกอน -น้ำทิ้งจากการล้างแก๊ส -การเก็บฝุ่นชนิดเปียก	ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว อาร์เซนิก ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว อาร์เซนิก ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว อาร์เซนิก ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว

		อาร์เซนิก
อุตสาหกรรมผลิตสารอินทรีย์เคมี	-การล้าง -การกรอง -น้ำทิ้งจากการล้างแก๊ส	ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม ปรอท แคดเมียม ตะกั่ว โครเมียม
อุตสาหกรรมผลิตยา	-การกรอง -การแยก -การผสม -การล้างแก๊ส	ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก ปรอท ตะกั่ว โครเมียม อาร์เซนิก โครเมียม อาร์เซนิก
อุตสาหกรรมผลิตรีเอเจนท์	-กระบวนการผลิต	ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม อาร์เซนิก
อุตสาหกรรมเหล็กและเครื่องกล	-น้ำล้างแก๊ส -การเก็บฝุ่นเป็ยก -การชุบโลหะ	ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม อาร์เซนิก ปรอท ตะกั่ว แคดเมียม อาร์เซนิก โครเมียม นิกเกิล ทองแดง เงิน สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม

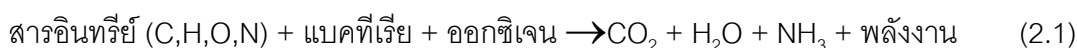
2.2 การบำบัดน้ำเสีย [1, 2, 5, 7, 22]

การบำบัดน้ำเสียคือ การแยกหรือการทำลายมลสารต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีปริมาณลดลงอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำที่รองรับน้ำเสียนั้น ระบบบำบัดน้ำเสียจะประกอบด้วยหลายขั้นตอนรวมกันเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดให้ต่ำสุด การบำบัดน้ำเสียอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่หนึ่ง เป็นขั้นตอนการกำจัดของแข็งส่วนใหญ่ที่ลอยและแขวนลอยอยู่ในน้ำ ด้วยวิธีการตักออก และด้วยวิธีให้ตกตะกอนโดยแรงดึงดูดของโลก ซึ่งเป็นวิธีการทางกายภาพ ในขั้นตอนนี้ค่า BOD ของน้ำจะลดลงไปเพียงเล็กน้อย กระบวนการนี้แบ่งเป็น 3 ขั้น คือ

1. การตักก้นวัตถุขึ้นใหญ่ ๆ โดยใช้ตะแกรงแยกของแข็งออก
2. การกำจัดกรวดทรายโดยใช้รางตกตะกอน เศษหิน, กรวด, ทราย หรือวัตถุชิ้นเล็ก ๆ จะตกลงไปอยู่ด้านล่างของรางตกตะกอน
3. การกำจัดสิ่งแขวนลอยโดยใช้ถังตกตะกอน น้ำเสียที่ผ่านตะแกรงและรางตกตะกอนมาแล้ว ยังคงมีโคลนตมหรือตะกอนแขวนลอยอื่น ๆ ปะปนอยู่ในน้ำ เมื่อปล่อยให้ น้ำเสียนี้ผ่านเข้าไปในถังพักเพื่อตกตะกอนโดยลดความเร็วของการไหลของน้ำเสีย จะได้ตะกอนของสารแขวนลอยตกลงไปอยู่ด้านล่างของถัง เรียกว่า กากตะกอน (Sludge) ในบางครั้ง น้ำที่ผ่านออกมาจากถังตกตะกอนอาจจะมีการฆ่าเชื้อโรคโดยการผ่านคลอรีนลงไป ก่อนที่จะปล่อยน้ำลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ แต่โดยทั่วไปยังต้องนำไปบำบัดขั้นต่อนต่อไป

ขั้นที่สอง เป็นขั้นตอนที่มีการลดค่า BOD ของน้ำโดยวิธีทางชีววิทยารวมทั้งการกำจัดสารแขวนลอยที่ยังเหลืออยู่ กระบวนการทางชีววิทยาที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยการย่อยสลายตามธรรมชาตินิยมใช้ระบบตะกอนเร่งมากที่สุด ระบบตะกอนเร่งสามารถกำจัดสารแขวนลอยและ BOD ได้สูงกว่า 90% การบำบัดน้ำเสียโดยระบบโปรยกรองเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ยอมรับ ซึ่งมีหลักการคือ ผ่านน้ำเสียอย่างช้า ๆ ลงบนถาดกรองที่ประกอบด้วยก้อนกรวดหรือก้อนหินขนาดเล็กที่เคลือบด้วยเมือกแบคทีเรีย ถาดกรองนี้ลึก 3 – 10 ฟุต แบคทีเรียที่อยู่บนก้อนกรวดหรือหินจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย น้ำที่ได้จะมี BOD ต่ำและไหลลงสู่ด้านใต้ของถาดกรอง โดยภายนอกเมือกและผิวนอกเมือกจะเกิดสภาวะการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน สำหรับด้านในเมื่อเกิดสภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียโดยระบบตะกอนเร่งเป็นที่นิยมใช้ทั้งแหล่งน้ำเสียจากชุมชนและจากโรงงานอุตสาหกรรม อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยแบคทีเรียจะเพิ่มขึ้นโดยการสูบอากาศเข้าไปในน้ำเสีย และการให้ตะกอนแบคทีเรียได้สัมผัสกับน้ำเสียหรือน้ำที่ผ่านออกมาจากขั้นที่หนึ่งมากที่สุด เพื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ตามสมการ 2.1 นี้



น้ำที่ผ่านการบำบัดในขั้นที่สองแล้วจะสามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะได้นั้น ต้องมีสมบัติต่างๆ ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนดโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม

ขั้นที่สาม มีวัตถุประสงค์ที่จะกำจัดมลสารที่เหลืออยู่ทั้งหมด ทั้งชนิดที่ละลายน้ำหรือที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ และลดค่า BOD ให้ต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร อีกทั้งกำจัดเกลืออนินทรีย์โดยเฉพาะสารไนเตรทและฟอสเฟตที่ไม่สามารถกำจัดได้ในขั้นที่หนึ่งและขั้นที่สอง เพื่อให้น้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วมีความสะอาดยิ่งขึ้นก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ หรือนำน้ำกลับมาใช้อุปโภคบริโภคนั่นเอง ในขั้นตอนที่สามนี้มีการนำเทคนิคต่าง ๆ ที่ทันสมัยมาใช้ในการบำบัด เช่น กระบวนการออสโมซิสผันกลับ, การแลกเปลี่ยนไอออน และกระบวนการไฟฟ้าเคมี นอกเหนือไปจากการตกตะกอน, การกรอง และการดูดซับกลิ่นและสีด้วยถ่านกัมมันต์ ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สามจึงมีค่าใช้จ่ายสูงมาก และไม่นิยมใช้กันในประเทศกำลังพัฒนา

นอกจากนี้การบำบัดน้ำเสีย อาจแบ่งตามวิธีการที่ใช้ได้เป็น 3 กลุ่มคือ

1. การบำบัดทางเคมี (Chemical Treatment) เป็นการขจัดมลสาร โดยการเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำปฏิกิริยาเคมี เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation), การทำให้ลอย (Chemical Flocculation), การแลกเปลี่ยน (Ion Exchange) เป็นต้น เพื่อทำการขจัดพิษ หรือเปลี่ยนรูปของมลสารเพื่อให้ง่ายต่อการบำบัด หรือขจัดออก ด้วยวิธีการอื่นๆ
2. การบำบัดทางกายภาพ (Physical Treatment) เป็นการบำบัดโดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพของสาร เช่น การกรองผ่านตะแกรง (Screening), การกรอง (Filtration), การทำให้ตกตะกอน (Sedimentation), การปั่นให้ตกตะกอน (Centrifugation) เป็นต้น การบำบัดวิธีการนี้มีวิธีการง่ายๆและค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีข้อจำกัดไม่สามารถกำจัดมลสารได้ทุกประเภท จึงมักใช้ร่วมกับกระบวนการอื่นๆ
3. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) เป็นการบำบัดโดยใช้สิ่งมีชีวิต เช่น พืช หรือจุลินทรีย์ ช่วยในการขจัดมลสารเหล่านั้น โดยมากมักใช้ในการขจัดมลสารที่เป็นสารอินทรีย์ หรือปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำเสีย เช่น ค่า BOD

2.3 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน [1, 2, 4, 5, 6, 7, 22]

มีด้วยกันหลายวิธีการแต่ที่เป็นที่นิยมใช้มีดังนี้

2.3.1 การทำให้ตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นกระบวนการที่เติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเสีย เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่มีอยู่ทำให้เกิดตะกอนของเกลือของโลหะหนักที่ไม่ละลายในน้ำเสีย ก่อให้เกิดเป็นตะกอนที่สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยทั่วไปแล้วนิยมตกตะกอนโลหะหนักในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ จึงมักเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) แต่เนื่องจากราคาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือปูนขาว (Lime) มีราคาถูกลงกว่า จะหาได้ง่ายกว่า จึงเป็นที่นิยมมากกว่า วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้เป็นอย่างมากเพราะมีราคาถูก ง่ายต่อการควบคุมและปฏิบัติการ แต่มีข้อเสียคือจะต้องมีกระบวนการบำบัดตะกอนมารองรับ และไม่สามารถนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้อีก หรือหากจะนำกลับมาใช้ก็ต้องมีกระบวนการที่ยุ่งยากและซับซ้อนมารองรับ

2.3.2 การเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน (Oxidation – Reduction Reaction)

เป็นการเติมสารเคมีลงไปลงในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน กับโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสีย ทำให้โลหะหนักเหล่านั้นเปลี่ยนเป็นสารประกอบในรูปอื่นๆ ที่ไม่เป็นพิษหรือสามารถตกตะกอนได้ เช่นการเติม ออกซิเจน หรือไฮโดรเจน ลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้ไอออนของโลหะเกิดปฏิกิริยา เปลี่ยนเป็น โลหะออกไซด์ ซึ่งจะสามารถทำให้ตกตะกอนออกมาจากน้ำเสียได้ วิธีการนี้จะคล้ายกับวิธีการที่ 2.3.1 แม้จะมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า แต่ก็มีประสิทธิภาพสูงกว่า และจะมีความง่ายกว่าหากต้องการนำโลหะหนักจากตะกอนกลับมาใช้ใหม่

2.3.3 การระเหยแห้ง (Evaporation)

เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย แต่ก็ต้องใช้ปริมาณพลังงานจำนวนมาก เพื่อให้ น้ำระเหยแห้งไปจนหมด ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณมากและมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำ

2.3.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

เป็นวิธีการที่ใช้เรซิน (Resin) เป็นตัวแยกไอออนของโลหะออกมา โดยจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนัก กับไอออนบนผิวของเรซิน ทำให้โลหะหนักเหล่านี้เกาะอยู่ที่ผิวของเรซิน โดยเรซินที่ใช้ในการแยกโลหะหนักนั้น คือ แคตไอออนเรซิน (Cationic Resin) วิธีการนี้แม้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีค่าใช้จ่ายมาก เนื่องจาก เรซินมีราคาแพง นอกจากนี้ ยังไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง และ มีการปนเปื้อนของสารหลายชนิด จึงนิยมเป็นกระบวนการบำบัดขั้นตอนสุดท้ายเพื่อให้น้ำทิ้ง (Effluent) มีความสะอาดสูง มีการปนเปื้อนของโลหะในปริมาณที่ต่ำมาก

2.3.5 การแพร่ย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เป็นกระบวนการบำบัดโดยผ่านน้ำเสียที่มีความดันสูง(สูงกว่า 10 บรรยากาศ) ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable membrane) ซึ่งมีคุณสมบัติที่ยอมให้ไอออนบางชนิดเท่านั้นที่สามารถแพร่ผ่านไปได้ เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงมาก แต่ก็มีค่าใช้จ่ายสูงมากเช่นกัน เนื่องจาก แผ่นเนื้อเยื่อ (membrane) มีราคาแพง และต้องใช้ความดันสูง

2.3.6 กระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Process)

เป็นกระบวนการที่ผ่านกระแสไฟฟ้าลงสู่น้ำเสียโดยผ่านทางขั้วไฟฟ้า เพื่อให้ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยไม่ต้องมีการเติมสารเคมีลงไป ทำให้โลหะหนักที่แยกออกมาได้ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของโลหะหนักบริสุทธิ์ หรือโลหะผสม (Alloy) จึงเป็นการง่ายที่จะนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์เคมีไฟฟ้า [2, 4, 5, 6, 11, 16, 21]

2.4.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า

เซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วย

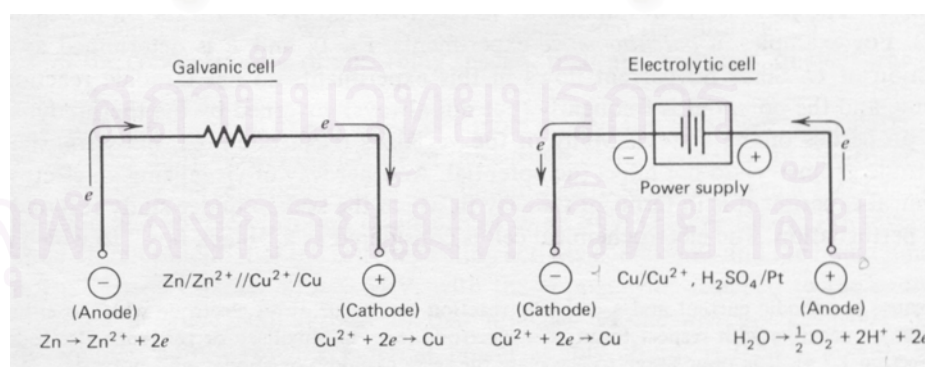
1. ขั้วไฟฟ้า อย่างน้อย 2 ขั้ว ซึ่งจะเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า
2. อิเล็กโทรไลต์
3. สื่อไฟฟ้าภายนอก อันได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า และตัวนำไฟฟ้าที่ต่อเพื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลครบวงจร ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 เซลล์เคมีไฟฟ้า [5]

เซลล์เคมีไฟฟ้ายังอาจแบ่งได้ตามหน้าที่ เป็น 2 ประเภท คือ

1. เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ ณ บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่ เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) เป็นต้น
2. เซลล์อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic Cell) เป็นเซลล์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งภายนอก ให้เป็นพลังงานเคมี ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นที่บริเวณผิวของขั้วไฟฟ้า ซึ่งกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ก็จัดเป็นเซลล์อิเล็กโทรไลติก ประเภทหนึ่ง



รูปที่ 2.2 แผนภาพสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าทั้งสองชนิด [21]

2.4.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

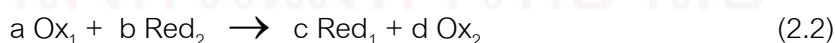
ทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อระหว่าง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ กับสื่อไฟฟ้าภายนอก โดยในเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ จะต้องประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ซึ่งในแต่ละขั้วนั้น จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ไม่เหมือนกัน ดังจะกล่าวต่อไป

นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้ายังสามารถแบ่งได้ตามหน้าที่ภายในเซลล์ ได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ

1. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode) มีหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ระหว่าง สารละลายอิเล็กโทรไลต์ กับ สื่อภายนอก แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงถูกต่อเข้ากับ เซลล์ไฟฟ้า เพื่อใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้า ของขั้วไฟฟ้าใช้งาน
3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary Electrode) ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือ กระแสไฟฟ้า ไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน

2.4.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า

ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปฏิกิริยาออกซิโดรีดักชัน (Oxido-Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reduction) ดังสมการที่ 2.2



เมื่อ Ox = สารออกซิไดซ์
 Red = สารรีดิวซ์
 a, b, c และ d = สัมประสิทธิ์การคำนวณทางวิศวกรรม

ซึ่งสามารถแบ่งปฏิกิริยาได้เป็นปฏิกิริยาครึ่งเซลล์ อันได้แก่

ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



2.4.4 ศักย์ขั้วไฟฟ้า (Electrode Potential)

ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ เป็นค่าศักย์สัมพัทธ์ นำมาหาค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ ต่อเมื่อรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าอ้างอิง หรือเมื่อศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นอาจกำหนดเป็นค่าจำกัดความ ของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ว่า ค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

การที่ต้องกำหนดค่าคงที่ของขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งเป็นขั้วอ้างอิงไว้อย่างชัดเจน เพื่อให้สามารถอธิบายถึง ผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน โดยสัญญาได้กำหนดเครื่องหมายศักย์ขั้วไฟฟ้า ตาม IUPAC กำหนดไว้ว่า “ในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน กับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ ค่าศักย์ผลลัพธ์ของวงจร ถือเป็นค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น โดยเครื่องหมายของศักย์ที่ได้ ถ้าเป็นบวกแสดงว่าวงจรเซลล์ไฟฟ้าเคมีนั้นต่อแบบกัลวานิก การดำเนินไปของปฏิกิริยารีดักชันเป็นไปอย่างต่อเนื่อง โดยมีขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางกลับกัน ถ้าค่าผลศักย์ของวงจรเป็นลบแสดงว่าปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนแทน และขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาค่าศักย์ กลับทำหน้าที่เป็นแอโนด”

2.4.5 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^0)

ถ้าขั้วไฟฟ้าหนึ่งของเซลล์เป็นขั้วไฮโดรเจน และสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีแอกทิวิตี (Activity) เป็นหนึ่ง ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ถือเป็นศักย์ขั้วไฟฟ้า โดยศักย์ขั้วไฟฟ้านี้คือ ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^0) โดยลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน มีดังนี้

1. ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ เพราะเป็นค่าที่ได้เมื่อขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งของเซลล์ต้องเป็นขั้วไฮโดรเจนเสมอ

2. ตามสัจนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าต้องได้จากการเขียนปฏิกิริยาครึ่งเซลล์เป็นแบบ รีดักชันเท่านั้น ค่าศักย์ไฟฟ้าจึงอาจถือได้ว่าเป็นค่าศักย์รีดักชันสัมพัทธ์ (Relative Reduction Potential)
3. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า เป็นค่าที่ไม่แปรผันตามจำนวนโมลที่ใช้ในการปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
4. ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานจะแปรผันตามอุณหภูมิ ดังนั้นการแสดงค่า E^0 จึงต้องระบุอุณหภูมิด้วยเสมอ
5. ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะเป็นค่าบ่งชี้ถึงความรุนแรงของการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน คือเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานมีค่าสูงกว่า ก็จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่า

2.4.6 หลักการอุณหพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

จากปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดของครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้างดสมการ 2.3 ดังนั้นจึงมีค่าพลังงานอิสระของกิบส์ คือ

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \frac{[Red]^c}{[Ox]^a} \quad (2.5)$$

เมื่อ	ΔG	=	ค่าพลังงานอิสระของกิบส์ (จูล ต่อ โมล)
	ΔG^0	=	ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานของกิบส์ (จูล ต่อ โมล)
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.317 จูล ต่อ โมล เคลวิน)
	T	=	อุณหภูมิ (เคลวิน)
	[Red]	=	ความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ (โมล ต่อ ลิตร)
	[Ox]	=	ความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ (โมล ต่อ ลิตร)

และจากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานอิสระของกิบส์กับค่าศักย์ไฟฟ้า

$$\Delta G = -nF\Delta E; \quad \Delta G^0 = -nF\Delta E^0 \quad (2.6)$$

เมื่อ	n	=	จำนวนอิเล็กตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยา
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96500 คูลอมป์/อนุภาค)

ΔE = ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

ΔE^0 = ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

ดังนั้นจึงได้เป็นสมการของเนิร์นส (Nernst's Equation)

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Red]^c}{[Ox]^a} \quad (2.6)$$

เมื่อ E = ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันครึ่งเซลล์ (โวลต์)

E^0 = ศักย์ไฟฟ้ารีดักชันมาตรฐาน (โวลต์)

หากพิจารณาทั้งเซลล์ไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย 2 ครึ่งเซลล์ ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จึงมีค่าเป็น

$$E_{\text{cell}} = E_1^0 - E_2^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{[Ox_1]^a [Red_2]^b}{[Ox_2]^d [Red_1]^c} \quad (2.7)$$

หรือ $E_{\text{cell}} = E_1 - E_2 = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (2.9)$

นอกจากนี้เซลล์เคมีไฟฟ้า ก็เหมือนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ก็คือ มีความต้านทานภายในอยู่ คือจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งเพื่อเอาชนะความต้านทานภายในนี้ จึงเกิดการไหลผ่านของกระแส ซึ่งศักย์ไฟฟ้านี้เราเรียกว่า ศักย์ของโอห์ม (Ohmic Potential : E_R) ดังนั้นหากจะคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ให้ถูกต้อง จะต้องรวมค่าศักย์นี้ไปด้วย ดังนั้น

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} + E_R \quad (2.10)$$

2.4.7 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ตั้งกฎเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างประจุที่ผ่านกับปริมาณสารที่ถูกออกซิไดส์และถูกรีดิวส์ที่ขั้วไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายและระยะเวลาของการปล่อยให้กระแสผ่านกฎของฟาราเดย์มี 2 ข้อ คือ

กฎข้อที่ 1 น้ำหนักอิออนที่ถูกปล่อยให้กลายเป็นอิสระโดยกระแสไฟฟ้าย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของไฟฟ้าที่ใช้

กฎข้อที่ 2 น้ำหนักของไอออนชนิดต่างๆ ที่ถูกปล่อยเป็นอิสระ โดยปริมาณไฟฟ้าเท่าๆ กัน ย่อมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสมมูลเคมีของไอออนเหล่านั้น

กฎสองข้อนี้จะสามารถเขียนเป็นสมการ 2.11

$$m = sMt/nF \quad (2.11)$$

เมื่อ	m	=	มวลของสารนั้น (กรัม)
	s	=	สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี
	M	=	น้ำหนักอะตอม หรือน้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)
	I	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	t	=	เวลาที่ใช้ (วินาที)

2.4.8 ประสิทธิภาพเชิงกระแส

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมี นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส ทั้งนี้เพราะกระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงที่สุด ดังนั้น กระบวนการสามารถใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นกระบวนการที่ดี ซึ่งประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \quad (2.12)$$

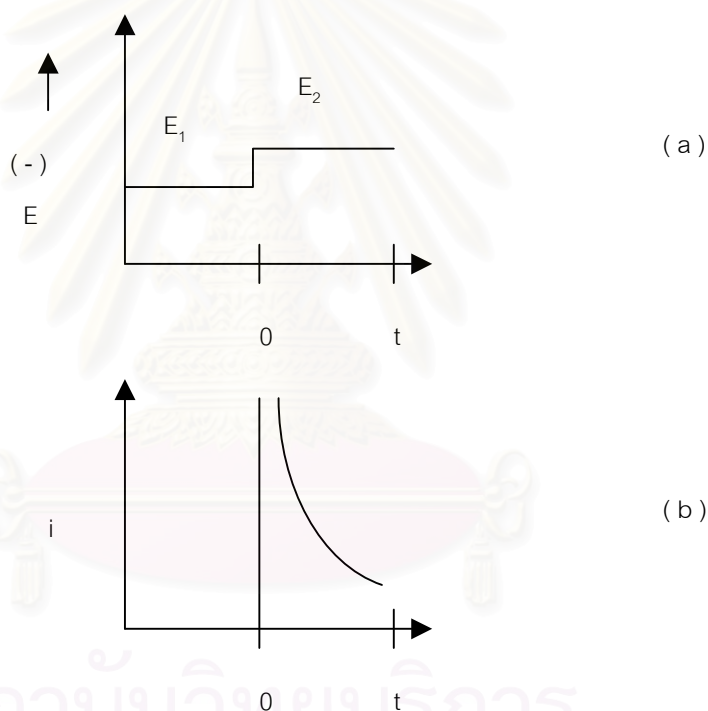
ซึ่งมวลที่ได้ตามทฤษฎีนั้นสามารถคำนวณได้ตามกฎของฟาราเดย์

2.5 วิธีการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า

จากหลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่มีความเกี่ยวข้องของหลักการทางไฟฟ้า และหลักการทางเคมี ดังนั้นการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า จึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ และ การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งหลักการควบคุมในแต่ละแบบมีดังนี้

2.5.1 การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled – Potential Method or Potentiostatic Mode)

หลักการของการควบคุมนี้คือการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ในกระบวนการให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของไอออนของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่แสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

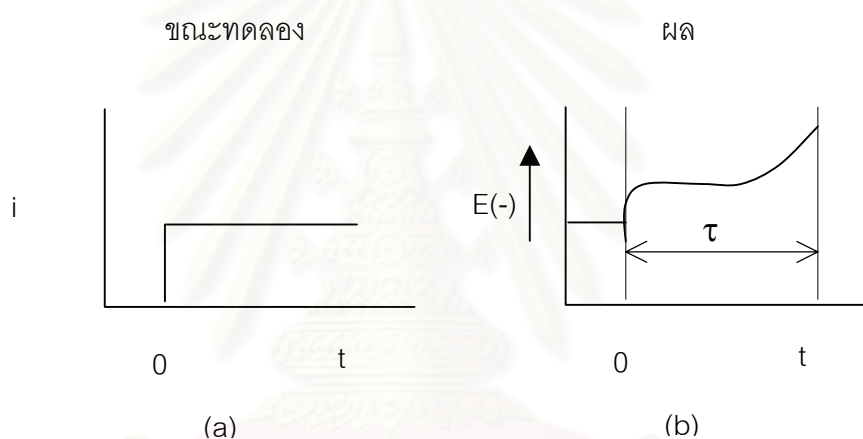


รูปที่ 2.3 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

E_1 คือ ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น diffusion limited rate หรือเป็น mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังแสดงในรูป (b) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i = kC$)

2.5.2 การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled – Current Method or Galvanostatic Mode)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric Technique โดยการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าคงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงด้วยตามสมการของเนิร์นส (2.6) ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 เพื่อให้ได้อัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด ปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะควรเป็น
 การควบคุมแบบถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer control) สมการแสดงอัตราการดีโพสิชันของ
 โลหะออกจากสารละลาย เขียนได้ดังนี้

$$-v \frac{dc}{dt} = \frac{-I_L}{nF} = k_m A_e \quad (2.13)$$

เมื่อ	V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
	C	=	ความเข้มข้นของไอออนโลหะ (โมล ต่อ ลิตร)
	t	=	เวลา (วินาที)
	I_L	=	กระแสจำกัด (limiting current) (แอมแปร์)
	k_m	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสาร (mass transfer coefficient)
	A_e	=	พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า (ตารางเมตร)

เมื่ออินทิเกรตสมการที่ 2.13 เทียบกับเวลาจะได้สมการดังนี้

$$\frac{C(t)}{C(0)} = \exp\left(-\frac{k_m A_e}{V} t\right) \quad (2.18)$$

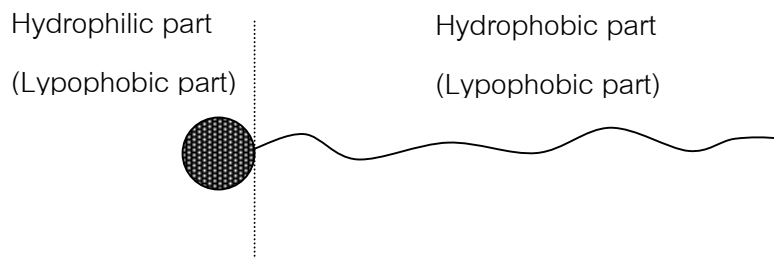
เมื่อ	$C(0)$	=	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายเริ่มต้น
	$C(t)$	=	ความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลาย ณ เวลาใดๆ

จากสมการกล่าวได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไอออนโลหะขึ้นกับตัวแปรที่สำคัญคือ

1. การถ่ายโอนมวลสารจากสารละลายสู่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ขึ้นกับสมบัติของอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า การกวนจะช่วยเพิ่มการถ่ายโอนมวลสาร
2. พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

2.6 สารลดแรงตึงผิว [3, 8, 18, 20]

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) เป็นคำย่อของ surface active agent เป็นสารที่มีคุณสมบัติในการดูดซับที่ผิวระหว่างเฟส ทำให้แรงตึงผิว (surface tension) ของสารละลายลดต่ำลง สารลดแรงตึงผิวมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยส่วนที่ประกอบด้วยส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) หรือส่วนที่ไม่ชอบไขมัน (lypophobic) เป็นส่วนหัว และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือส่วนที่ชอบไขมัน (lypophilic) เป็นส่วนหาง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยส่วนหัวของสารลดแรงตึงผิวที่ชอบน้ำจะละลายน้ำได้ ส่วนหางเป็นอนุพันธ์ของสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสายโซ่ยาว สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ คือ ไฮโดรคาร์บอนฟลูออโรคาร์บอน และสารพอลิเมอร์พวกซิลิโคน



รูปที่ 2.5 แบบจำลองโครงสร้างลักษณะโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว [20]

นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวยังสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆตามลักษณะประจุไฟฟ้าของส่วนหัวคือ

2.6.1 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant)

ส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มสารประกอบ ควอร์เทอนารี แอมโมเนียม (Quaternary ammonium compound) และเพราะคุณสมบัติที่มีประจุเป็นบวกนี้ จึงทำให้สามารถเกาะติดกับประจุลบที่อยู่บนผิวของสิ่งต่างๆ เช่น แก้ว, เส้นผม, เส้นใย, โลหะ, หรือพลาสติก ดังนั้นสารประเภทนี้จึงถูกใช้เป็นส่วนป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิต (Antistatic agent), สารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitor), น้ำยาปรับผ้านุ่ม (Fabric Softener), แชมพูและครีมนวดผม, น้ำยาเช็ดกระจก (pigment wetting and dispersing agent) และใช้เป็นสารฟลอคคูแลนต์ (Flocculant) ในการบำบัดน้ำเสีย ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้คือ

- Cetyl trimethyl ammonium bromide $[C_{14}H_{29}N(CH_3)_3]^+ Br^-$ ใช้มากในอุตสาหกรรมแชมพูและครีมนวดผม และอุตสาหกรรมยา
- Lauryl dimethyl benzyl ammonium chloride $[C_{12}H_{25}N(CH_3)_2CH_2-C_6H_5]^+ Cl^-$ เป็นสารที่นิยมใช้มากที่สุดในกลุ่มนี้ โดยจะเป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดโดยทั่วไป
- Distearyl dimethyl ammonium chloride $[(C_{18}H_{37})_2N(CH_3)_2]^+ Cl^-$ เป็นสารองค์ประกอบในน้ำยาปรับผ้านุ่ม

2.6.2 สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anion surfactant)

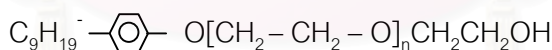
เป็นสารลดแรงตึงผิวที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น สบู่ หรือ ผงซักฟอก เพราะมีกระบวนการผลิตที่ง่ายไม่ยุ่งยาก มีราคาถูก โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเกลือโซเดียม หรือ โพแทสเซียม ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้คือ

- สบู่ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COO}^-\text{Na}^+$ เมื่อ $n = 10 - 16$ เป็นสารลดแรงตึงผิวที่สามารถผลิตได้ง่ายที่สุด เกิดจาก การทำปฏิกิริยาของกรดไขมัน กับ โซเดียมไฮดรอกไซด์
- กลุ่ม ABS (Alkyl Benzene Sulphonate) $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_4-\text{SO}_3^-\text{Na}^+$ เมื่อ $n = 10 - 12$ กลุ่มนี้เป็นสารองค์ประกอบสำคัญของ ผงซักฟอก เพราะมีราคาถูก ประสิทธิภาพดี และสามารถทำให้ผงได้ง่าย นอกจากทำเป็นผงซักฟอกแล้วยังใช้ทำน้ำยาทำความสะอาดต่างๆอีกด้วย และเนื่องจากราคาที่ถูกลง จึงเป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีปริมาณการใช้สูงสุด และมีการปนเปื้อนใน น้ำทิ้งทั้งจากครัวเรือน และโรงงานอุตสาหกรรมสูงสุด

2.6.3 สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

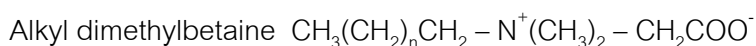
สารลดแรงตึงผิวจำพวกนี้ส่วนใหญ่จะเป็นพวก อีธอกซีเลต (Ethoxylate) เป็นสารที่มีราคาแพง จึงไม่นิยมใช้กันมากนัก โดยจะใช้เฉพาะ ในกระบวนการที่ต้องการการสัมผัสกันได้ดี เป็นพิเศษระหว่าง สารที่มีขี้ว กับ สารไม่มีขี้ว เช่น การขจัดคราบน้ำมันในน้ำเสีย ตัวอย่างของสารกลุ่มนี้คือ

Nonylphenol ethoxylate



2.6.4 สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและลบ (Zwitterionic surfactants หรือ Amphoteric surfactants)

เป็นสารลดแรงตึงผิวที่อาจเป็นได้ทั้งประจุบวก หรือ ลบ ขึ้นกับค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลาย ไม่ค่อยเป็นที่นิยมนัก เพราะมีราคาแพงมาก ตัวอย่างของสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้คือ



จากโครงสร้างโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่มีส่วนที่ละลายได้ในน้ำ และส่วนที่ละลายได้ในไขมัน สารลดแรงตึงผิวจึงถูกใช้ในการเป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทำความสะอาด

สะอาด เช่น สบู่ แชมพู ผงซักฟอก น้ำยาทำความสะอาด เป็นต้น จึงทำให้ในน้ำเสียโดยทั่วไปมีสารลดแรงตึงผิวเหล่านี้เจือปนอยู่เสมอ นอกจากนี้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียบางกระบวนการ เช่น การทำให้เกิดการจับตัวเป็นก้อน (Flocculation and Coagulation) จะมีการใช้สารลดแรงตึงผิวในกระบวนการ

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- Ji et al.[13] ศึกษาผลของ ความเป็นกรด - เบส ต่ออิเล็กโทรวินนิ่ง (Electrowinning) ของนิกเกิลจากสารละลายนิกเกิลคลอไรด์ โดยวัดค่า ความเป็นกรด - เบส ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่บริเวณแคโทด โดยใช้ Flat-bottom combination glass ความเป็นกรด - เบส electrode ผู้วิจัย พบว่า ค่าความเป็นกรด - เบส ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ผิวแคโทดจะสูงกว่าในสารละลาย และถ้าเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นจะเกิดตะกอนของนิกเกิลไฮดรอกไซด์บนแคโทด การลดค่า ความเป็นกรด - เบส ที่แคโทดทำได้โดยลดค่า ความเป็นกรด - เบส ของสารละลาย เพิ่มความเข้มข้นของนิกเกิล เพิ่มอุณหภูมิ และเติมกรดบอริก (H_3BO_3) และเติมแอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)

- Pruksathorn K. et al. [19] ได้ทำการวิจัยเพื่อกำจัดโลหะออกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีไฟฟ้าเคมี และ การบำบัดทางชีวภาพ(Biological treatment) เพื่อทำการบำบัดน้ำเสียเจือจางในปริมาณมากๆ ในการวิจัยได้แบ่งออกเป็นสามส่วนคือ

ส่วนที่ 1: การศึกษาอัตราการดูดซับโลหะของ Microorganism ใน activated sludge

ส่วนที่ 2: เป็นการชะล้างโลหะหนักออกจากตะกอนโดยใช้สารละลายกรด (Mineral acid)

ส่วนที่ 3: จะใช้ขบวนการไฟฟ้าเคมีในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลายที่ได้จากการชะล้างตะกอนในส่วนที่ 2 โดยใช้วิธีการอิเล็กโทรดีโพสิชัน พบว่าอิเล็กโทรดีโพสิชันของนิกเกิลนั้นมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นอย่างมากในกระบวนการ

- Hamid et al. [11] ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อกระบวนการอิเล็กโทรดีโพสิชันแบบ โคดีโพสิชัน (Codeposition) ของนิกเกิล และ Polytetrafluoro ethylene polymer (PTFE) พบว่าภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการคือ ที่ ความเป็นกรด - เบสเท่ากับ 4

ความเข้มข้นของ PTFE ในสารละลาย 40 กรัม/ลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 A/dm² อุณหภูมิ 50 °C และใช้สารลดแรงตึงผิว คือ Sodium octyl benzene sulphonate (C₈ϕSO₃Na) กับ Nonyl phenol ethoxylate (C₉ϕE₁₂) ในอัตราส่วนโดยโมล 0.4 – 0.6

- Huang [12] ศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อการนำนิกเกิดกลับคืนมาจากน้ำทิ้งโรงงานชุบนิกเกิด ด้วยวิธีอิเล็กโทรวินนิ่ง พบว่าสารลดแรงตึงผิวจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยสารลดแรงตึงผิวนี้อาจทำให้พื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยา (Effective surface area) ของขั้วไฟฟ้า และ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (Mass transfer coefficient) มีค่าลดลง วิธีแก้ไขคือการเติมกรดบอริก และ เพิ่มอัตราการกวน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. สารนิกเกิลซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ของบริษัท APS AJAX FINECHEM มีสถานะเป็นของแข็ง มีมวลโมเลกุล 262.86 ความบริสุทธิ์ 96 % ขนาดบรรจุ 500 กรัม
2. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ของบริษัท BDH มีสถานะเป็นของเหลว ความเข้มข้น 98 % โดยน้ำหนัก ขนาดบรรจุ 1 ลิตร
3. กรดบอริก (H_3BO_3) ของบริษัทบริษัท CARIO ERBA มีสถานะเป็นของแข็ง ความบริสุทธิ์ 99.8% ปริมาตรบรรจุ 1000 %
4. สารละลายมาตรฐานของนิกเกิลความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร
5. กรดไนตริก เข้มข้น ของ องค์การการค้าสุภา มีสถานะเป็นของเหลว ขนาดบรรจุ 500 มิลลิลิตร
6. แก๊สอะเซทิลีน (Acetylene)
7. สารลดแรงตึงผิว
8. เครื่องกวน (Magnetic Stirrer)
9. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ 3.1



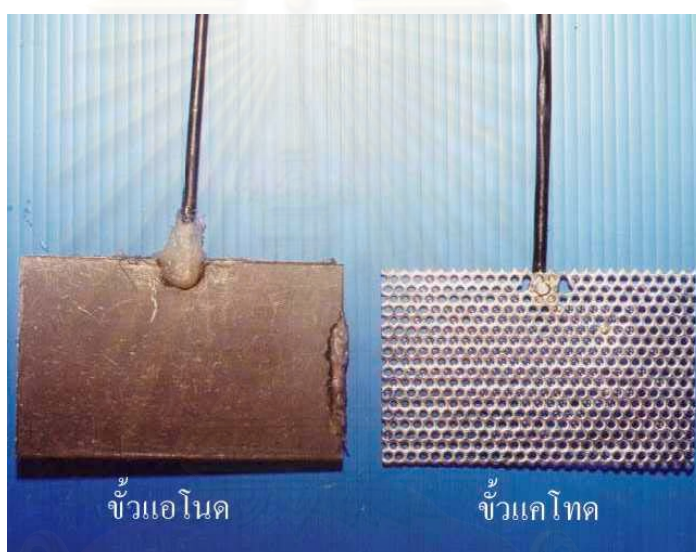
รูปที่ 3.1 เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

10. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด – เบส (pH Meter)

11. ขั้วไฟฟ้า (รูปที่ 3.2)

11.1 ขั้วแอนโนด ทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์
พื้นที่ผิว 82 ตร.ซม.

11.2 ขั้วแคโทด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) มีรูพรุน
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร มีพื้นที่ผิว 89
ตร.ซม.



รูปที่ 3.2 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

12. สายไฟต่อเชื่อม ตัวต่อเชื่อมตัวผู้-ตัวเมีย และแผงต่อเชื่อม

13. บีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร

14. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ของบริษัท GBC รุ่น Avanta
 Σ (รูปที่ 3.3)



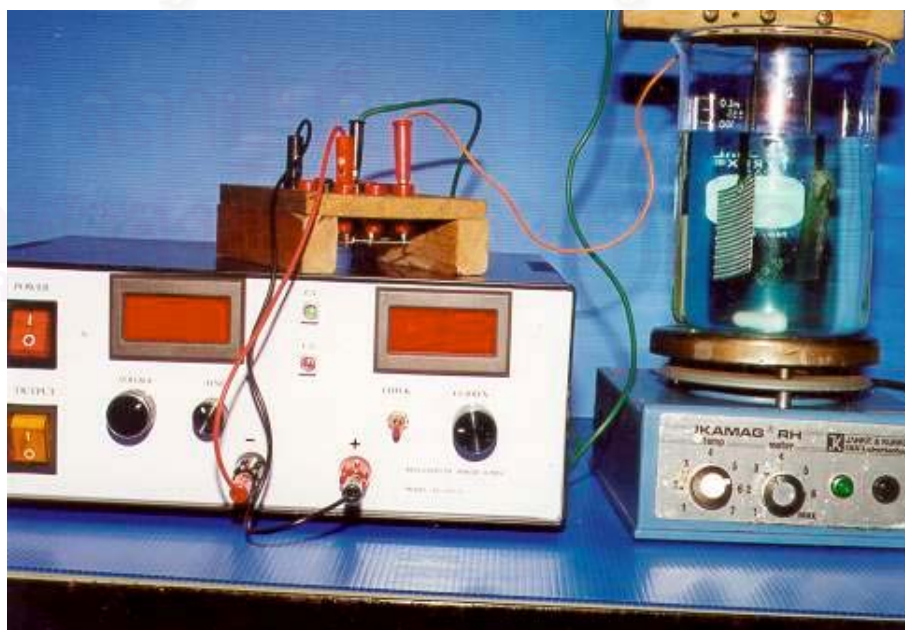
รูปที่ 3.3 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.2 การเตรียมสารละลายสังเคราะห์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในงานวิจัยนี้ เป็นสารละลายสังเคราะห์ ที่เตรียมจาก สารนิกเกิลซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ละลายด้วยน้ำกลั่น มีความเข้มข้นของนิกเกิล ประมาณ 1 กรัม/ลิตร จากนั้นจึงทำการปรับ ค่าความเป็นกรด - เบสด้วยกรดตามชนิดที่ทำการ ศึกษา เพื่อให้สารละลายมีความเป็นกรด - เบสตามที่ต้องการ แล้วจากนั้นจึงเติมสารลดแรงตึงผิว เมื่อต้องการศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิว

3.3 วิธีการทดลอง

1. จัดตั้งอุปกรณ์ ต่างๆดังรูปที่ 3.4 โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีปริมาตร 1 ลิตร



รูปที่ 3.4 การติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

2. เปิดเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า โดยควบคุมกระแสไฟฟ้าในระบบคงที่ (Galvanostatic Method) จากนั้นทำการเก็บสารละลายตัวอย่าง 10 มิลลิลิตร ทุกๆครึ่งชั่วโมง ใน 3 ชั่วโมงแรก และทุกๆชั่วโมงจนครบ 8 ชั่วโมง

3. นำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ เวลาต่างๆ

4. นำผลการวิเคราะห์ที่ได้ มาหาค่า ร้อยละของการได้นิกเกิลกลับคืนมา และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส ณ เวลานั้นๆ แล้วเปรียบเทียบผล

3.4 การเตรียมสารละลายตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลาย ณ เวลาใดๆ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ในงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลาย ณ เวลาใดๆ นั้น กระทำโดยการใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เป็นเครื่องตรวจสอบ โดยเครื่อง AAS นี้ เป็นเครื่องรุ่น Avanta Σ ของบริษัท GBC ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกช่วงของการทำงานของเครื่องในการตรวจสอบความเข้มข้นของนิกเกิล ที่ 6 – 24 $\mu\text{g/ml}$ ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS จึงต้อง นำสารละลายตัวอย่างที่เก็บได้ในช่วงเวลาต่างๆมาละลาย เพื่อให้มีความเข้มข้นอยู่ภายใต้ช่วงการทำงานของเครื่อง โดยทำการละลายด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน สารละลายตัวอย่าง : น้ำกลั่น เป็น 1 : 50 และเมื่อได้ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง AAS แล้วจึงนำมาคำนวณปริมาณสารสัมพัทธ์ เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นที่แท้จริงออกมา

3.5 การวิเคราะห์ผล

1. ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS ทำให้ทราบถึงความสัมพัทธ์ของปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ภายในสารละลายสังเคราะห์ ณ เวลาใดๆ ทำให้สามารถนำมาคำนวณหาค่าร้อยละของการนำนิกเกิลกลับคืน ได้จาก

$$\text{ร้อยละของการนำกลับคืน(\%Recovery)} = \frac{(\text{ปริมาณเริ่มต้นของสาร} - \text{ปริมาณของสารที่เหลืออยู่})}{\text{ปริมาณเริ่มต้นของสาร}} \times 100$$

2. นำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการนำกลับคืน กับ เวลา และจากกราฟที่ได้สามารถหาเวลาที่ใช้ในการนำนิกเกิลกลับคืนมาร้อยละ 60 (60% recovery)

3. นำค่าเวลาที่ได้อมาคำนวณหามวลสารที่ได้ตามทฤษฎี โดยคำนวณจากสูตรตามกฎของฟาราเดย์ (สมการ 2.11)
4. คำนวณหาค่า ประสิทธิภาพเชิงกระแส ตามสมการ 2.12



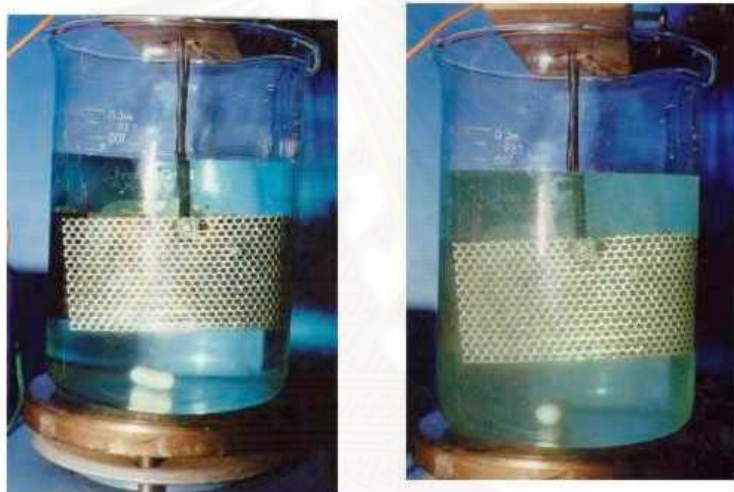
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

ทันทีที่เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ บริเวณที่ขั้วไฟฟ้าจะเริ่มเกิดปฏิกิริยา โดยเฉพาะที่ขั้วแคโทดจะเกิดฟองแก๊สจำนวนมาก ดังรูปที่ 4.1 แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนและปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาข้างเคียง (Side Reaction) ของการอิเล็กโทรไลต์ไดโพลีเมอร์ของนิเกิล มีผลทำให้ประสิทธิภาพของการอิเล็กโทรไลต์ไดโพลีเมอร์ของนิเกิลลดลง

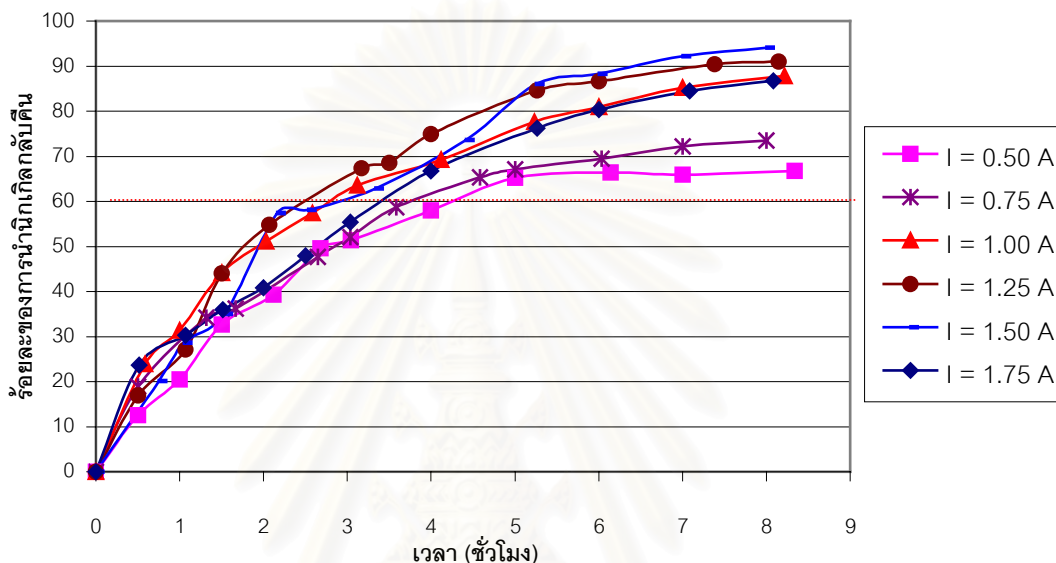


ก่อน

หลัง

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง ก่อนและหลังจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ระบบ

จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณนิกเกิลในสารละลายลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น หรือปริมาณของนิกเกิลกลับคืน (%Recovery) เพิ่มขึ้นตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 4.2 เป็นไปตามความสัมพันธ์ของฟาราเดย์ (Faraday's law) ปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามค่ากระแสไฟฟ้าและเวลาหรือประจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.11 โดยสามารถแยกได้สูงสุด 95 % โดยใช้ความหนาแน่นกระแส 168 แอมแปร์/ตารางเมตร (1.25 แอมแปร์) ที่เวลา 8 ชั่วโมง

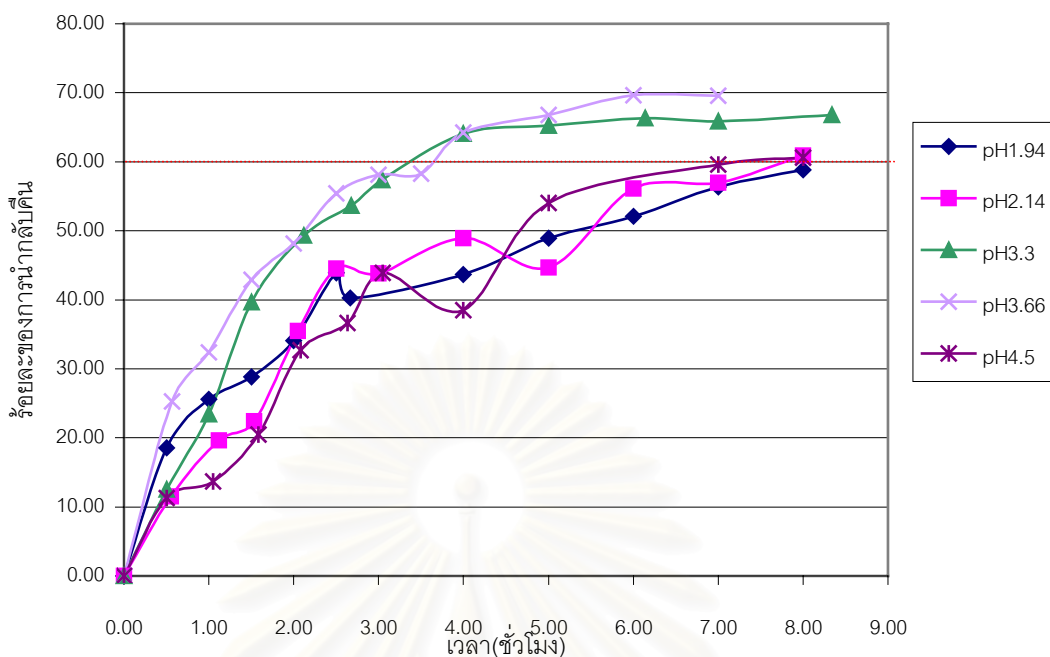


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าการได้นิกเกิลกลับคืนกับเวลาที่ค่ากระแสต่างๆ ณ ความเป็นกรด - เบสคงที่ที่ 3.3

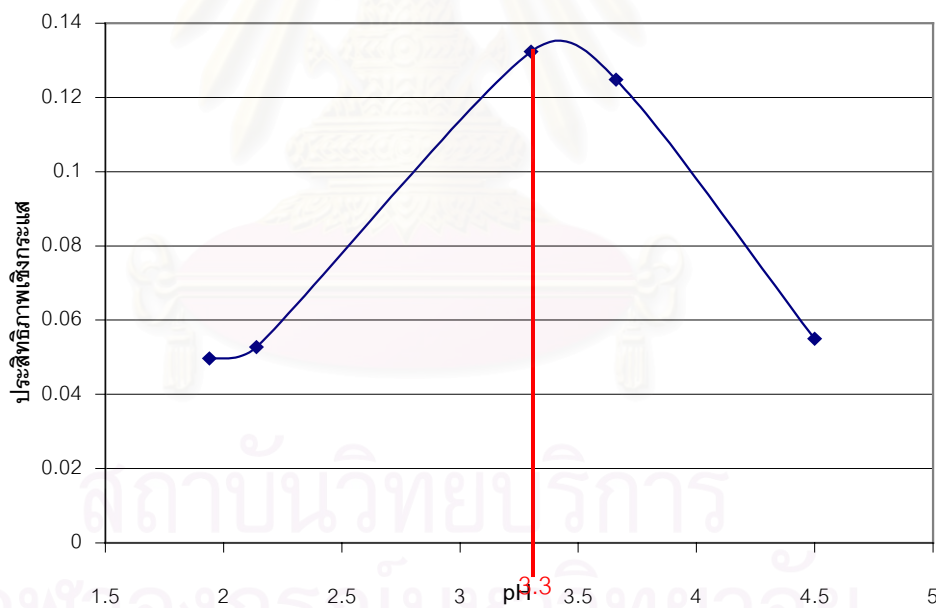
ตอนที่ 1 ผลของค่าความเป็นกรด - เบส ที่มีต่ออิเล็กโทรดโพสิทีฟของนิกเกิล

การทดลองหาผลของค่าความเป็นกรด - เบส ที่มีต่อกระบวนการอิเล็กโทรดโพสิทีฟของนิกเกิล โดยใช้สารละลายนิกเกิล 1 กรัม/ลิตร ปริมาตร 1 ลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และทำการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 0.5 แอมแปร์ พบว่า ค่าความเป็นกรด - เบส เริ่มต้นของสารละลายที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด (13%) คือ ที่ค่าความเป็นกรด - เบส ประมาณ 3.3 เมื่อค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงมากกว่านี้และส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และจากกราฟรูปที่ 4.3 (b) เมื่อพิจารณากราฟ จากจุดที่มีประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด โดยการประมาณการเชิงเส้นด้วยโปรแกรม Mathematica Version 4 ของ Wolfram Research, Inc. จะได้ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพเชิงกระแส (CE) กับ ค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ดังนี้

$$CE = 0.237762 - 0.325265(\text{pH}) + 0.157452(\text{pH})^2 - 0.0209397(\text{pH})^3 \quad (4.1)$$



(a)



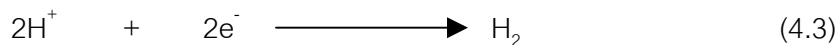
(b)

รูปที่ 4.3 ผลของค่าความเป็นกรด - เบสที่มีต่ออเล็กโทรดโพสิชันของนิกเกิล

(a) ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการนำนิกเกิลกลับคืน ณ เวลาใดๆ ที่ค่าความเป็นกรด - เบสต่างๆ

(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ความเป็นกรด - เบส กับ ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่ กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.5 แอมแปร์ และร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน

ทั้งนี้เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด - เบสของสารละลายต่ำ ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนเป็นแก๊สไฮโดรเจน

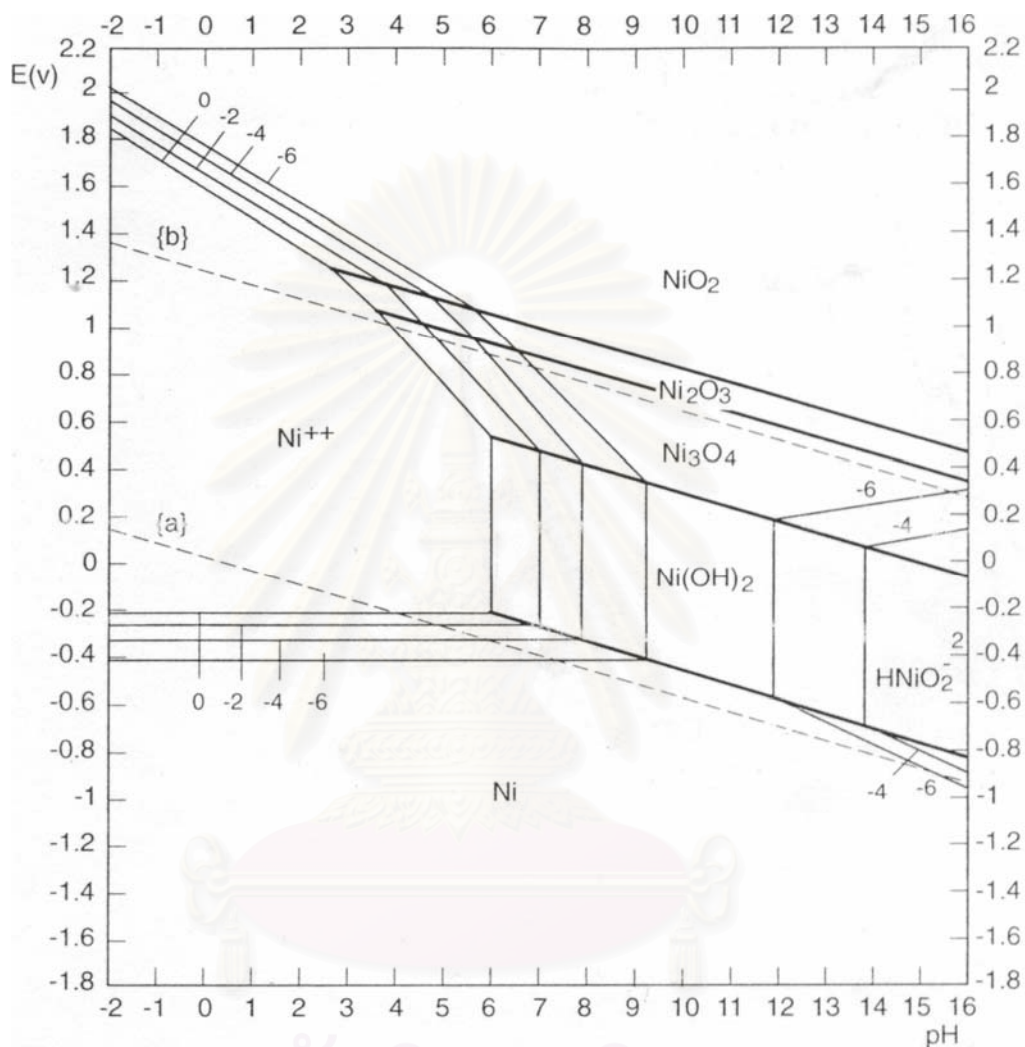


ซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction) ดังแสดงในแผนภูมิ Pourbaix รูปที่ 4.4 และในการแยกนิกเกิลที่ ความเป็นกรด - เบส ต่ำกว่า 6 ระบบจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนได้ดีกว่าการรีดักชันของนิกเกิล เมื่อค่าความเป็นกรด - เบส ต่ำลง ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดดีขึ้น หรืออัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนของระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแสหรืออิเล็กตรอนจะถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังกล่าวเพิ่มขึ้น กระแสที่จะใช้ในการรีดักชันของนิกเกิลจึงลดลงเมื่อค่ากระแสรวมคงที่ ทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสของระบบลดลง ส่วนที่ค่าความเป็นกรด - เบส มากกว่า 3.3 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสลดลงเนื่องจากปฏิกิริยารีดักชันของไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรด - เบส ที่ผิวของขั้วแคโทดเพิ่มขึ้นจนถึงค่าที่ทำให้ไอออนของนิกเกิลทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนเกิดเป็นตะกอนนิกเกิลไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าความเป็นกรด - เบสสูงไม่สามารถผสมกับสารละลายที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทด จนทำให้ค่าความเป็นกรด - เบส บริเวณนั้นต่ำกว่าค่าของเกิดการตกตะกอนของนิกเกิลไอออนได้ เช่นเดียวกับกรณีที่ใช้สารละลายที่มีค่าความเป็นกรด - เบส ต่ำกว่า 3.3 ซึ่งตะกอนของนิกเกิลไฮดรอกไซด์จะไปยับยั้งการเกิดนิวเคลียสของไอออนนิกเกิล ทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสลดลง [23]

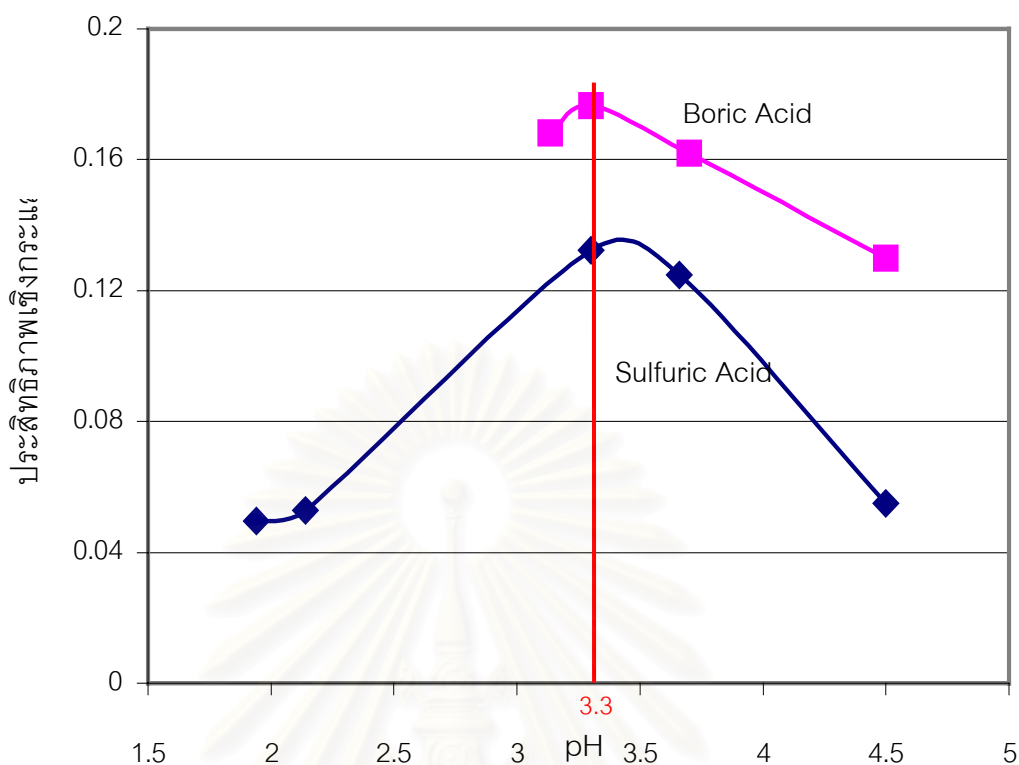
ตอนที่ 2 ผลของชนิดของกรดที่ใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด - เบส

จากผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงกระแสของอิเล็กโทรดดีโพสิชันของนิกเกิลที่มีการปรับค่า ความเป็นกรด - เบส ด้วยกรด 2 ชนิด คือ กรดซัลฟูริก และกรดบอริก พบว่า กระบวนการที่ปรับค่าความเป็นกรด - เบสด้วยกรดบอริก จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงกว่าเล็กน้อย ดังรูป 4.5 ทั้งนี้เพราะกรดบอริกเป็นกรดอ่อน เมื่อเติมลงไปในสารละลายสังเคราะห์จึงทำให้มีลักษณะเป็นสารละลาย บัฟเฟอร์ (Buffer Solution) จึงทำให้ค่า ความเป็นกรด - เบส ของสารละลายขณะทำการทดลอง มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ซึ่งจากผลการทดลองตอนที่ 1 เห็นได้ว่าค่าความเป็นกรด - เบส มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสของระบบอย่างมาก ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงกระแสของกระบวนการที่ใช้กรดบอริก ในการปรับค่า ความเป็นกรด - เบส จึงมีค่าสูงกว่า แต่เนื่องจากกรดซัลฟูริกเป็นกรดที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม จึงเป็นวัตถุดิบที่หาง่ายและ

ราคาถูกกว่า กรดบอริก ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความเห็นที่จะเลือกใช้กรดซัลฟูริกเป็นสารที่ใช้ในการปรับค่าความเป็นกรด - เบส ในตอนต่อไป ทั้งนี้เพื่อมีความเป็นไปได้ในการนำผลงานวิจัยไปใช้จริง และเป็นการง่ายในการประยุกต์งานวิจัยนี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง



รูปที่ 4.4 แผนภูมิ Pourbaix ของนิกเกิลที่ 25 °C ที่ความเข้มข้น 1×10^{-6} โมล/ลิตร
เมื่อ $n = 0, -2, -4, -6$ [14]



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของกรดที่ใช้ในหารปรับค่า ความเป็นกรด - เบส กับ ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ 0.5 แอมแปร์ และร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน

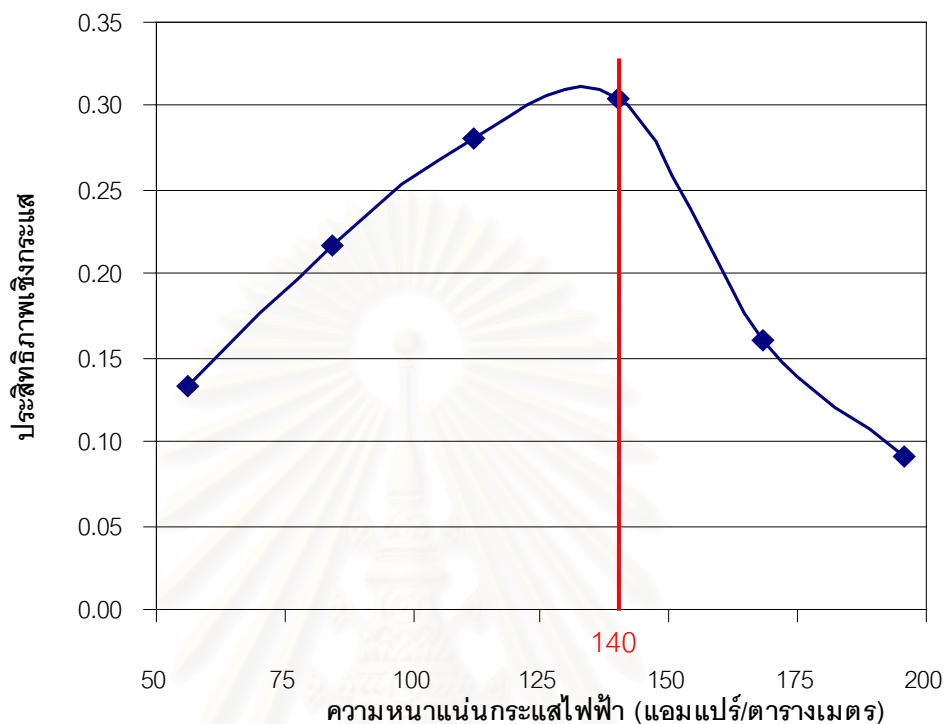
ตอนที่ 3 ผลของค่าปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม จากสารละลายที่มีค่า ความเป็นกรด - เบส เริ่มต้นเท่ากับค่า ความเป็นกรด - เบส ที่เหมาะสมจากตอนที่ 1

รูปที่ 4.6 แสดงผลของค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มีต่อกระบวนการอิเล็กโทรดีโพสิชันของนิกเกิล ที่ค่าความเป็นกรด - เบส เริ่มต้นของสารละลายประมาณ 3.3 กล่าวได้ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงกระแสของระบบเพิ่มขึ้นด้วย และมีค่าสูงสุด (32 % ที่ร้อยละ 60 ของปริมาณนิกเกิลที่ได้กลับคืน) ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของขั้วแคโทดประมาณ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (กระแสประมาณ 1.25 แอมแปร์) แต่เมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าอีก ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสก็ลดลง โดยได้ความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส และ ค่าปริมาณกระแสไฟฟ้างดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = 0.2324 I + 0.03 \quad R^2 = 0.95 \quad \text{เมื่อ } I < 1.25 \text{ A.} \quad (4.4)$$

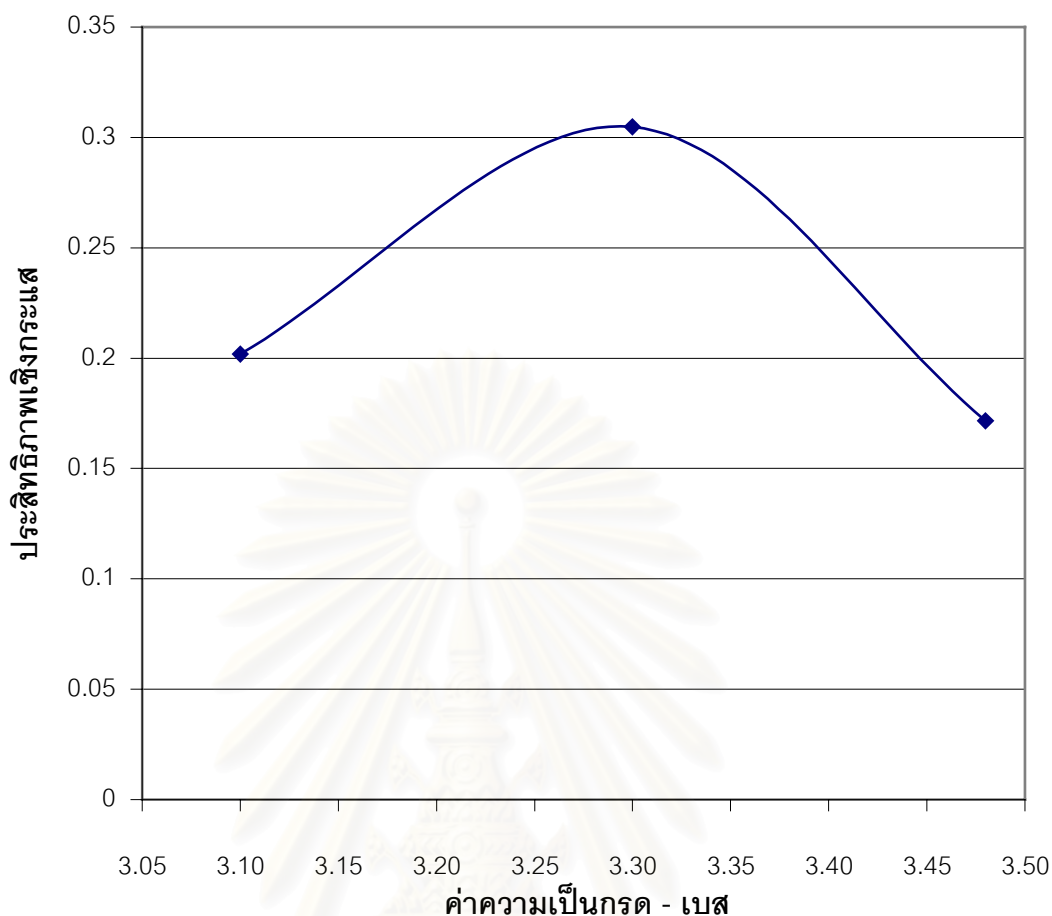
$$\text{ประสิทธิภาพเชิงกระแส} = -0.4278 I + 0.8272 \quad R^2 = 0.9615 \quad \text{เมื่อ } I > 1.25 \text{ A.} \quad (4.5)$$



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่การได้นิกเกิลกลับคืน 60 ในสารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร ที่มีค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้น เท่ากับ 3.3

ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณกระแสตามความสัมพันธ์ของฟาราเดย์จนถึงค่ากระแสจำกัดค่าหนึ่งที่ควบคุมโดยการถ่ายเทมวล (Mass Transfer Control) ครั้นเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าให้ระบบมากกว่านี้ กระแสที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนโลหะมีค่าเท่ากับปริมาณกระแสจำกัดเท่านั้น ส่วนกระแสส่วนเกินถูกนำไปใช้ในการเกิดปฏิกิริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนหรือปฏิกิริยาข้างเคียงอื่น ๆ ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงกระแสของการแยกนิกเกิลจึงลดลง

นอกจากนี้ เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองของตอนที่ 1 ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนไปไม่ทำให้ค่าความเป็นกรด - เบส ที่เหมาะสมของระบบเปลี่ยนไป จึงทำการทดลองตอนที่ 1 ซ้ำอีกครั้ง แต่ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ ความหนาแน่นของกระแส 140 แอมแปร์/ตร.ม.(1.25 แอมแปร์) ซึ่งเป็นค่าปริมาณกระแสที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด และจากผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า ความเป็นกรด - เบส ที่ทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด ยังคงเป็น ที่ความเป็นกรด - เบส 3.3 เช่นเดิม



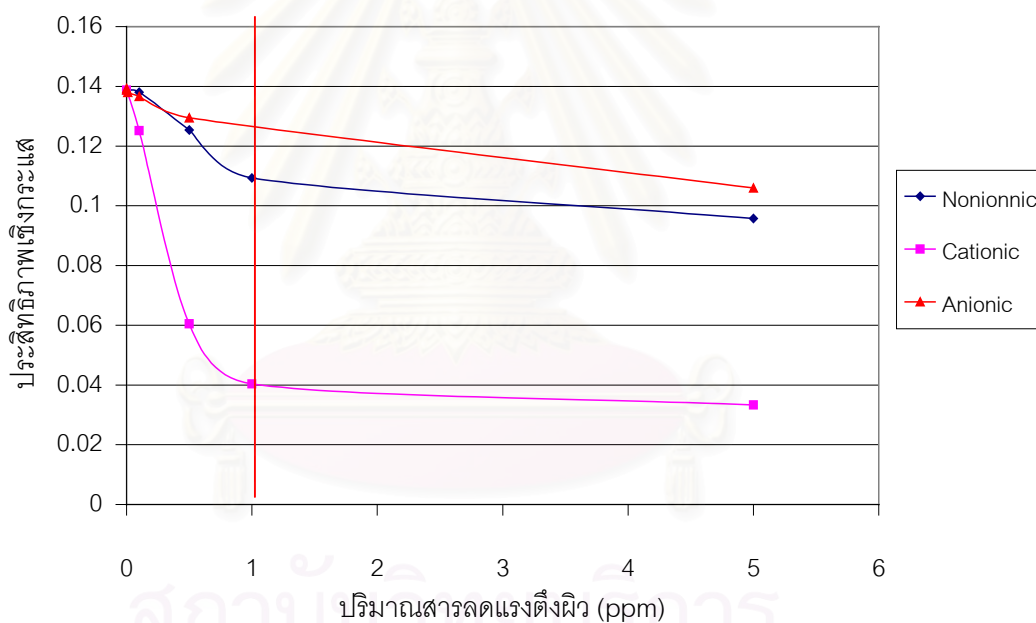
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าความเป็นกรด - เบส และประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 140 แอมแปร์/ตารางเมตร และร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน

ตอนที่ 4 ผลของสารลดแรงตึงผิว

จากผลการทดลองตอนที่ 1 – 3 ซึ่งเป็นตัวแปรพื้นฐานของระบบบิเล็กโทรดีโพสิชันสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการจริงได้ แต่เนื่องจากน้ำทิ้งในอุตสาหกรรมจริงไม่ได้มีเพียงไอออนของนิกเกิลละลายอยู่ในน้ำทิ้งเพียงอย่างเดียวดังเช่นสารละลายสังเคราะห์ ซึ่งจะส่งผลต่อการอิเล็คโทรดีโพสิชันของนิกเกิลอย่างแน่นอน และสารเจือปนประเภทหนึ่งที่มีมักจะพบในน้ำทิ้งและมีผลต่อระบบ ก็คือ สารลดแรงตึงผิว ทั้งนี้เพราะสารลดแรงตึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของสารซักล้าง จึงปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจำนวนมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวิจัยตอนนี้ เพื่อศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อระบบ เพื่อเป็นข้อมูลในการนำงานวิจัยชิ้นนี้ไปใช้ในอุตสาหกรรมจริงโดยทำการนำสารลดแรงตึงทั้งสามประเภท (สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก, ประจุลบ, และไม่มีประจุ) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริงมาผสมกับสารละลายสังเคราะห์ที่มีค่าความเป็นกรดต่างที่ 3.3 และใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1.25 แอมแปร์ (ความหนาแน่นกระแส 140

แอมแปร์/ตร.ม.) โดยทำการละลายสารลดแรงตึงผิว ให้มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0 – 5 ppm ทั้งนี้เนื่องจากโดยทั่วไปในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมีสารลดแรงตึงผิวปนเปื้อนมาไม่เกิน 1 ppm

สำหรับผลของสารลดแรงตึงผิว พบว่า สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic Surfactant) มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงกระแสของระบบมากกว่าสารลดแรงตึงผิวประจุลบและไม่มีประจุ แม้จะมีปริมาณการเจือปนเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ทั้งนี้เพราะสารลดแรงตึงผิวประเภทนี้ไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของนิกเกิลไอออนที่ขั้วแคโทด โดยลดพื้นที่ผิวที่นิกเกิลไอออนที่เข้ารับอิเล็กตรอน เป็นเหตุให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง [12] ส่วนสารลดแรงตึงผิวประจุลบหรือไม่มีประจุอาจรวมตัวกับนิกเกิลไอออนในสารละลายทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันเปลี่ยนแปลงเปลี่ยนไปจากนิกเกิลไอออนอิสระ จึงต้องการพลังงานส่วนหนึ่งมาแยกนิกเกิลไอออนก่อนการเกิดปฏิกิริยารีดักชันต่อมา



รูปที่ 4.8 ผลของปริมาณสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพเชิงกระแส ที่ ความเป็นกรด - เบส เริ่มต้น 3.3 กระแสไฟฟ้าคงที่ 1.25 แอมแปร์ และ ร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน

หากทำการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็นสองช่วง คือ ช่วงที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าน้อยกว่า 1 ppm และ ช่วงที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่ามากกว่า 1 ppm จะได้ความสัมพันธ์ของ ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส กับค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ดังนี้

1. เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว น้อยกว่า 1 ppm

สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic Surfactant)

$$\text{ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส} = -0.0187C + 0.1387 \quad R^2 = 0.9892 \quad (4.7)$$

สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic Surfactant)

$$\text{ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส} = -0.1102C + 0.1387 \quad R^2 = 0.9015 \quad (4.8)$$

สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant)

$$\text{ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส} = -0.0287C + 0.1387 \quad R^2 = 0.9885 \quad (4.9)$$

2. เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว มากกว่า 1 ppm

สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic Surfactant)

$$\text{ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส} = -0.0052C + 0.132 \quad (4.10)$$

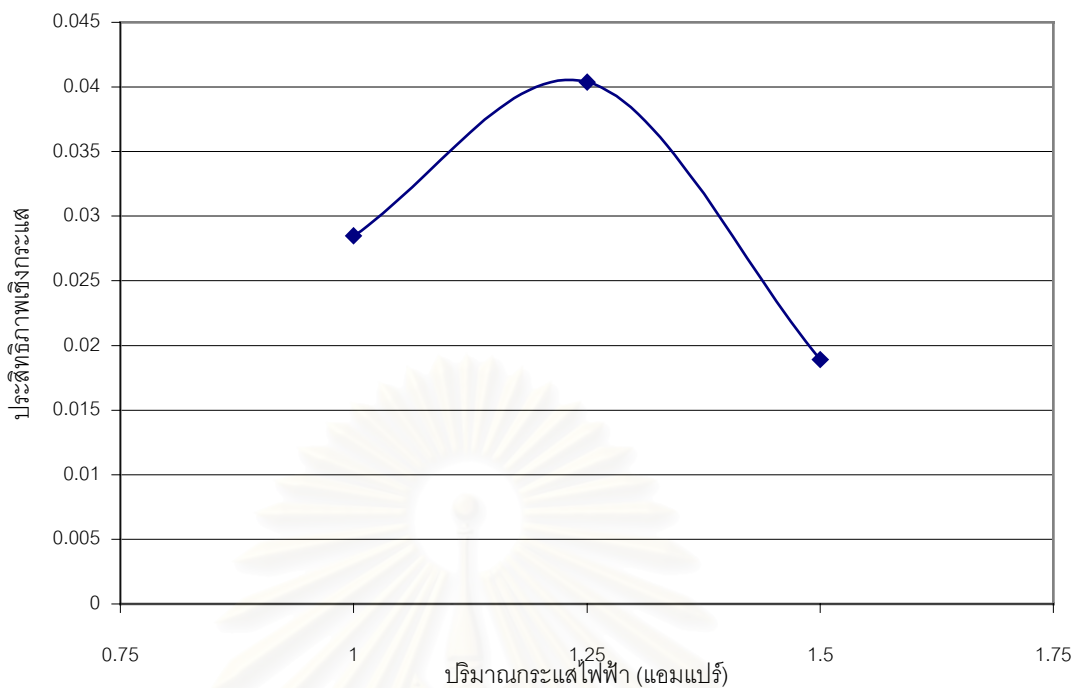
สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic Surfactant)

$$\text{ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส} = -0.0034C + 0.11127 \quad (4.11)$$

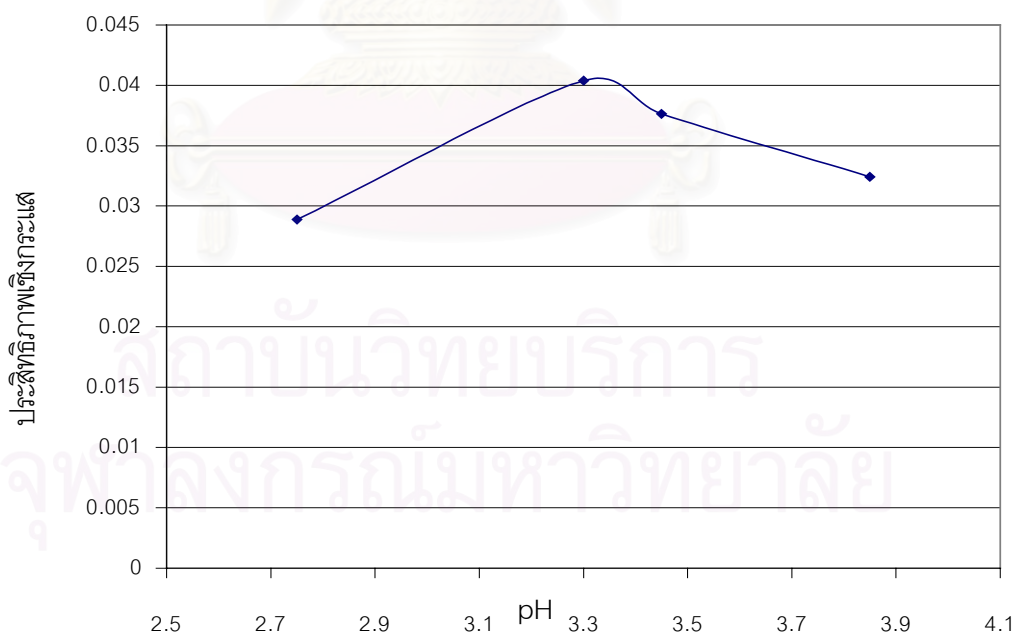
สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant)

$$\text{ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส} = -0.0018C + 0.0422 \quad (4.12)$$

นอกจากนี้ เมื่อทำการทดลองซ้ำตอนที่ 1 และ 3 เพื่อทดสอบดูผลของสารลดแรงตึงผิวเหล่านี้ว่า มีผลต่อภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนดังกล่าวหรือไม่ โดยเฉพาะ สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นบวกซึ่งส่งผลต่อระบบมากที่สุด และจากผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 เมื่อมีสารลดแรงตึงผิว อยู่ในสารละลายสังเคราะห์ ภาวะที่เหมาะสมของระบบยังคงเดิม คือ ที่ ความเป็นกรด - เบส เริ่มต้น 3.3 และความหนาแน่นของกระแส 140 แอมแปร์/ตร.ม.



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าปริมาณกระแส กับ ประสิทธิภาพเชิงกระแส โดยมีความเป็นกรด - เบส เริ่มต้น 3.3 และมีสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก ปนเปื้อนอยู่ 1 ppm ณ ร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้น กับ ประสิทธิภาพเชิงกระแส โดยมีความเป็นกรด - เบสเริ่มต้น 140 แอมแปร์/ตารางเมตร และมีสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก ปนเปื้อนอยู่ 1 ppm ณ ร้อยละ 60 ของการได้นิกเกิลกลับคืน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์โพสิชันของนิกเกิล ขึ้นกับค่าความเป็นกรด - เบส ปริมาณกระแสไฟฟ้า และองค์ประกอบของสารปนเปื้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะผลของสารลดแรงตึงผิว โดยที่ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสมากที่สุดคือ สารลดแรงตึงผิวโดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุเป็นบวก
2. ภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โพสิชันของนิกเกิลที่ความเข้มข้น 1 กรัม/ลิตร ปริมาตร 1 ลิตร คือ ที่ค่าความเป็นกรด - เบสเริ่มต้นประมาณ 3.3 ปริมาณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยจะมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 30.5 % ที่ร้อยละ 60 ของปริมาณนิกเกิลที่ได้กลับคืน
3. แม้ว่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของกระบวนการที่ใช้กรดบอริก ในการปรับค่าความเป็นกรด - เบส จะมีค่าสูงกว่า กระบวนการที่ใช้กรดซัลฟูริก แต่ความแตกต่างกันนั้นมีน้อยมาก นอกจากนี้กรดซัลฟูริกยังใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม และมีสถานะเป็นของเหลวทำให้สะดวกในการใช้ อีกทั้งราคายังต่ำกว่ากรดบอริก ดังนั้นจึงควรใช้กรดซัลฟูริก ในการปรับค่าความเป็นกรด - เบสมากกว่า
4. ค่าภาวะที่เหมาะสมของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ที่มีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ในงานวิจัยนี้ ไม่เปลี่ยนไปจากค่าภาวะที่เหมาะสมของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิวผสมอยู่ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวที่ผสมอยู่ในสารละลาย มีปริมาณความเข้มข้นไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีใดๆ แต่จะมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบสูง เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเหล่านี้จะไปลดอัตราการถ่ายเทมวลสาร ของไอออนของโลหะที่มีอยู่ในสารละลายลง และทำให้พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าลดลง เนื่องจากถูกเคลือบด้วยสารลดแรงตึงผิวเหล่านี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ผลการวิจัยในครั้งนี้ ทำให้ได้ภาวะที่เหมาะสมของอิเล็กทรอนิกส์โพสิชันของนิกเกิล ทำให้ได้ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ 14% แต่ยังถือว่ายังอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำอยู่ ดังนั้นจึงควรศึกษา

หาผลกระทบของกระบวนการที่เกิดจากตัวแปรตัวอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ ชนิดของโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า การปรับค่าความเป็นกรด - เบสโดยใช้ทั้งกรดซัลฟูริกและกรดบอริก เป็นต้น

2. ในขั้นตอนการปรับค่าความเข้มข้นของสารละลาย ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer เป็นขั้นตอนที่ต้องระมัดระวังเป็นอย่างมาก เพราะการผิดพลาดเพียงเล็กน้อยจะทำให้ผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์, 2539.ชยพร สงวนทรัพย์ากร และ พัฒนพงษ์ สงวนรักษ์. การกำจัดโลหะหนักจากกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสีย. ; วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
2. ชยพร สงวนทรัพย์ากร และพัฒนพงษ์ สงวนรักษ์. การกำจัดโลหะหนักจากกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสีย. ; วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
3. ดร.ณิ ดันทวิทยา. การแพร่กระจายของ LAS ในแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง. ; วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
4. นงนุช คุณประเสริฐ. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย(น้ำยา Flux) จากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยกระบวนการเพอร์ไรต์. ; วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
5. เพ็ญศรี ทรัพย์อุดมมาก และ พูนทรัพย์ ตริภพนาถ. การกำจัดโลหะหนักของแดงในน้ำเสียโดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี. วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
6. สมบัติ กิ่งเพชรรุ่งเรือง. การกำจัดทองแดงออกจากรน้ำเสียโดย Polyelectrolyte Enhanced Ultrafiltration. ; วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
7. สุเมธ ชวเดช. การบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
8. อโนชา เกตุเวชช์. การบำบัดน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันโดยระบบฟองลอย. ; วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
9. Baticle, P.; Kiefer, C.; and others. Treatment of nickel containing industrial effluents with a hybrid process comprising of polymer complexation – ultrafiltration – electrolysis. Separation and Purification Technology. 18(2000): 195 – 207.
10. Devos, O.; Olivier, A.; and others. Magnetic field effects on nickel electrodeposition. Journal Electrochemical Society. 145, 2(February 1998): 401 – 405.

11. Hamid, Z.; Abel; and Omar, A.M.A. The relation between anionic/non-ionic surfactant and electrodeposition of nickel-polytetrafluoro ethylene polymer composite. Anti-Corrosion Methods and Materials. 46, 3: 218 – 216.
12. Huang, C.H. Effect of surfactants on recovery of nickel from nickel plating wastewater by electrowinning. Water Res., 29,8: 1821 – 1826.
13. Ji, J.; Cooper, W. C.; Dresinger, D., B.; and Peters, E. Surface pH measurements during nickel electrodeposition. Journal of Applied Electrochemistry. 25,9: 642-650.
14. Jones, D. A. Principles and Prevention of Corrosion. 2nd ed. Prentice -Hall,1996.
15. Njau, K. N.; and others. Electrochemical removal of nickel ions from industrial wastewater. Chemical Engineering Journal. 79(2000): 187 – 195.
16. Prentice, G. Electrochemical Engineering Principles. New Jersey: Prentice – Hall International, 1991.
17. Pletcher, D. Industrial Electrochemistry. London : Chapman and Hall, 1982.
18. Porter, M.R. Handbook of Surfactant. 2nd ed. Melbourne: Chapman & Hull, 1995.
19. Pruksathon, K.; Vergnes, H.; Cantet, J.; and Duverneuil, P. Removal of metal in sludge of publicly owned treatment works and industrial effluent. Proceeding of Franco – Thai Symposium on New Advances in Water and Wastewater Treatment. Bangkok, Chulalongkorn University, 22 – 24 October 1997: 281 –295.
20. Rosen, M. J. Surfactant and interfacial Phenomena. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.
21. Sawyer, T., D.; and others. Electrochemistry for Chemists. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
22. Tchobanoglous, G. and Burton, F. L. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
23. Cui, C.Q.; Lee, J.Y.; and Tan Lu. Effect of oxygen reduction on nickel deposition from unbuffered aqueous-solution, 2, characterization of the electrode interface in electrodeposition. Journal of the Electrochemical Society, 142, 4, 1132 – 1138, 1995.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ตาราง ก – 1 ตารางแสดงค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	เครื่องวัดความเป็นกรดและด่าง
2. ค่าที่ดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าที่ดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ลักษณะของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectroความเป็นกรดและต่าง otometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4- Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วัน) ที่อุณหภูมิ 20 °C (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal) 1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	Atomic Absorption photometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
2. โครเมียมชนิด เฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
3. โครเมียมชนิด ไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	-Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
11. ซีลีเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	-Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	-Atomic Absorption Cold Vapour Techique

แหล่งที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13 ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ภาคผนวก ข

1. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าร้อยละของการนำนิกเกิลกลับคืน

ตาราง ข-1 ผลการทดลองอิเล็กโทรดโพสิชันของสารละลายสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้น 1 กรัม/ลิตร มีค่าความเป็นกรด - เบส เริ่มต้นที่ 3.3 มีสารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุเป็นบวก (Cationic Surfactant) เจือปน ที่ความเข้มข้น 1 ppm โดยให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 140 แอมแปร์/ตารางเมตร (1.25 แอมแปร์)

เวลา		ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
ชั่วโมง	นาที	
0	0	16.989
0	34	13.054
1	0	11.242
1	30	11.485
2	0	10.892
2	30	10.894
3	2	9.738
4	2	9.111
5	0	9.263
6	46	8.594
7	24	6.429
8	23	8.076

จากผลการวิเคราะห์หาปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ โดยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer ดังตารางที่ ข-1 ผลที่ได้จากเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer นั้นยังมีใช้ความเข้มข้นที่แท้จริงเนื่องจาก ก่อนทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องนั้นต้องทำการละลายสารละลายตัวอย่างจริงลง เพื่อให้มีความเข้มข้นอยู่ภายใต้ช่วงความเข้มข้นการทำงาน (Working concentration) ของเครื่อง โดยในการทดลองนี้ทำการละลายในอัตราส่วนสารละลายที่แท้จริงต่อสารละลายทั้งหมด โดยปริมาตรเป็น 1:50 (0.2:10) ดังนั้นสามารถหาความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายที่แท้จริงได้จากการคำนวณปริมาณสารสัมพันธ์

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (\text{ข} - 1)$$

เมื่อ $C_1 =$ ความเข้มข้นของสารละลายก่อนการละลาย (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

$V_1 =$ ปริมาณของสารละลายก่อนการละลาย (มิลลิลิตร)

$C_2 =$ ความเข้มข้นของสารละลายหลังการละลาย (มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)

$V_2 =$ ปริมาณของสารละลายหลังการละลาย (มิลลิลิตร)

ดังนั้น ณ เวลา 2 ชั่วโมง สารละลายสังเคราะห์ จะมีความเข้มข้นนิกเกิลสังเคราะห์ (C_1)

$$C_1 \times (0.2 \text{ มิลลิลิตร}) = (10.892 \text{ มิลลิกรัม/มิลลิลิตร}) \times (10 \text{ มิลลิลิตร})$$

∴ ความเข้มข้นของนิกเกิล ณ เวลา 2 ชั่วโมง เท่ากับ 544.6 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร หรือ 0.5446 กรัม/ลิตร

เมื่อทราบถึงความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ ของสารละลายนิกเกิล ก็จะสามารถหาปริมาณมวลสารของนิกเกิลที่ละลายอยู่ในสารละลายได้โดยการนำค่าความเข้มข้นคูณกับปริมาตรของสารละลาย ณ เวลานั้นๆ ดังตัวอย่าง

ณ เวลา 2 ชั่วโมง ปริมาตรของสารละลาย เท่ากับ 0.945 ลิตร ดังนั้น ปริมาณมวลสารของนิกเกิลที่ละลายอยู่ในสารละลาย เท่ากับ $0.945 \times 0.5446 = 0.509$ กรัม

สำหรับการหาค่าร้อยละของการนำนิกเกิลกลับคืนนั้นสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ร้อยละของการนำกลับคืน} = \frac{(\text{มวลสารเริ่มต้น} - \text{มวลสาร ณ เวลาใดๆ}) \times 100}{\text{มวลสารเริ่มต้น}}$$

ในการทดลองครั้งนี้ ผลจากการวิเคราะห์จากเครื่อง AAS ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 0.837 กรัม

$$\text{ดังนั้น ร้อยละของการนำนิกเกิลกลับคืน ณ เวลา 2 ชั่วโมง} = \frac{(0.837 - 0.5446)}{0.837} \times 100$$

$$= 40.36$$

2. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส

จากผลการทดลองอิเล็กทรอนิกส์โพสิชันของสารละลายสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้น 1 กรัม/ลิตร มีค่าความเป็นกรด - เบส เริ่มต้นที่ 3.3 โดยให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 140 แอมแปร์/ตารางเมตร (1.25 แอมแปร์) พบว่า

ณ เวลาของการทดลอง 2.07 ชั่วโมง ร้อยละของการนำนิกเกิลมีค่าเป็น 54.783

และ ณ เวลาของการทดลอง 3.17 ชั่วโมง ร้อยละของการนำนิกเกิลมีค่าเป็น 67.351

ดังนั้น เวลาที่ ร้อยละของการนำนิกเกิลกลับคืนเป็น 60 มีค่าเท่ากับ

$$3.17 - \left\{ \left(\frac{(67.351 - 60)}{(67.351 - 54.783)} \right) \times (3.17 - 2.07) \right\} = 2.523 \text{ ชั่วโมง}$$

จากกฎของฟาราเดย์ ตามสมการที่ 2.11 เมื่อนำค่าเวลาที่คำนวณได้ลงแทนในสมการ พร้อมทั้งค่าตัวแปรที่ทราบค่าตัวอื่น เพื่อหาค่ามวลที่ได้ตามทฤษฎี (m)

$$m = \frac{(s = 1)(M = 58.70 \text{ กรัม / โมล})(1.25 \text{ แอมแปร์})(2.523 \times 60 \times 60 \text{ วินาที})}{(2 \times 96500 \text{ แอมแปร์ / วินาที} * \text{อิเล็กโตรวาเลนซ์})}$$

$$= 2.343 \text{ กรัม}$$

และเมื่อค่าปริมาณนิกเกิลเริ่มต้นมีค่าเป็น 1.190 กรัม

ดังนั้นค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเป็น $(0.6 * 1.190) / 2.343 = 0.305$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

1. ข้อมูลผลการทดลองหาผลของ ค่าความเป็นกรด – เบส ที่ความหนาแน่นกระแสดังที่
ที่ 56 แอมแปร์/ตารางเมตร

pH 1.94		pH 2.14		pH3.3	
Sampling Time	%Recovery	Sampling Time	%Recovery	Sampling Time	%Recovery
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	18.55	0.55	11.53	0.50	12.54
1.00	25.62	1.12	19.65	1.00	23.46
1.50	28.83	1.53	22.40	1.50	39.62
2.00	34.06	2.05	35.51	2.12	49.31
2.50	43.93	2.50	44.49	2.68	53.64
2.67	40.26	3.00	43.80	3.04	57.32
4.00	43.65	4.00	48.96	4.00	64.04
5.00	48.90	5.00	44.71	5.00	65.24
6.00	52.08	6.00	56.14	6.14	66.34
7.00	56.38	7.00	57.00	7.00	65.87
8.00	58.83	8.00	60.94	8.34	66.78

pH 3.66		pH4.5	
Sampling Time	%Recovery	Sampling Time	%Recovery
0.00	0.00	0.00	0.00
0.57	25.29	0.50	11.27
1.00	32.42	1.05	13.68
1.50	42.86	1.58	20.51
2.00	48.15	2.08	32.69
2.50	55.40	2.63	36.67
3.00	58.12	3.05	43.87
3.50	58.32	4.00	38.48
4.00	64.24	5.00	54.05
5.00	66.82	7.00	59.60
6.00	69.68	8.00	60.61
7.00	69.56		

2. ข้อมูลผลการทดลองหาผลของ ค่าความหนาแน่นกระแส ที่ค่าความเป็นกรด - เบส คงที่ที่ 3.3

I = 0.75 A		I = 1.25 A	
Sampling Time	%Recovery	Sampling Time	%Recovery
0.00	0.00	0.00	0.00
0.58	12.69	0.50	16.96
1.00	21.30	1.07	27.09
1.58	21.86	1.50	44.03
2.07	27.86	2.07	54.78
2.50	33.30	3.17	67.35
3.13	36.71	3.50	68.50
4.08	44.50	4.00	74.92
5.22	46.78	5.27	82.61
6.00	49.22	6.00	84.61
7.00	50.56	7.38	87.39
8.07	54.42	8.15	89.95

I = 1.50 A		I = 1.75 A	
Sampling Time	%Recovery	Sampling Time	%Recovery
0.00	0.00	0.00	0.00
0.75	20.10	0.52	23.67
1.05	28.61	1.07	30.32
1.53	35.07	1.52	35.92
2.17	57.39	2.00	40.83
2.53	58.05	2.50	47.96
3.33	62.83	3.03	55.34
4.42	73.65	4.00	66.75
5.25	85.98	5.27	76.21
6.00	88.27	6.00	80.32
7.00	92.14	7.08	84.55
8.00	94.13	8.08	86.79

3. ข้อมูลผลการทดลองหาผลของ ค่าความเป็นกรด - เบส ที่ความหนาแน่นกระแสคงที่
ที่ 140 แอมแปร์/ตารางเมตร

pH 3.10		pH3.3		pH3.48	
Sampling Time	%Recovery	Sampling Time	%Recovery	Sampling Time	%Recovery
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.50	17.35	0.50	16.96	0.50	13.76
1.00	24.77	1.07	27.09	1.22	22.49
1.50	33.97	1.50	44.03	1.50	28.42
2.00	49.24	2.07	54.78	2.00	38.24
2.50	56.12	3.17	67.35	2.50	45.12
3.00	63.46	3.50	68.50	3.10	60.08
4.05	73.64	4.00	74.92	4.00	69.82
5.00	79.96	5.27	82.61	5.00	77.79
6.00	83.95	6.00	84.61	6.00	84.05
7.00	85.09	7.38	87.39	7.00	86.62
8.08	92.58	8.15	89.95	8.00	90.28

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจัฐบรรณ วรรณรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค จากภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรบัณฑิตศึกษา ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย