

การกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วย
วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

นายศรัณณ ศรีธัญรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF NICKEL FROM LABORATORY'S WASTE USING
ELECTRODEPOSITION CONTROLLED-CURRENT METHOD

Mr. Saranyu Srithanrat

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	การกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่
โดย	นายศรัณณ ศรีธีญรัตน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุภา ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนิก)

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

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัณมิกะ)

ศรัณณู ศรีธวัชรัตน์ : การกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่. (REMOVAL OF NICKEL FROM LABORATORY'S WASTE USING ELECTRODEPOSITION CONTROLLED-CURRENT METHOD) อ. ที่
 ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. เขมรัฐ โอสถาปนันธ์, อ. ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร. เจริญขวัญ ไกรยา, 125 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายและควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดของการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ตามลำดับ ส่วนที่ 2 ศึกษาหาประสิทธิภาพของการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริง โดยเลือกใช้ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดจากการทดลองส่วนแรกมาทดสอบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลกับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

ผลการทดลองส่วนที่ 1 การทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 976 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 1 ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 0.5 โมลาร์ จัดเป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 12 ได้ 99.96% ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 33.89% ในการกำจัดนิกเกิลที่ 25.96%

ผลการทดลองส่วนที่ 2 การทดลองในน้ำเสียจริงที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 1,281 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย สามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 60 ได้ 99.06% ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 61.34% ในการกำจัดนิกเกิลที่ 31.15% สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย สามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 60 ได้ 44.52% ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 23.62% ในการกำจัดนิกเกิลที่ 24.09%

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา 2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170472521 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : NICKEL / ELECTRODEPOSITION / ELECTROCHEMICAL / WASTE

SARANYU SRITHANRAT : REMOVAL OF NICKEL FROM LABORATORY'S WASTE USING ELECTRODEPOSITION CONTROLLED-CURRENT METHOD.

THESIS ADVISOR : ASST.PROF.KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., THESIS

CO-ADVISOR : CHAROENKWAN KRAIYA, Ph.D., 125 pp.

This work studied nickel removal from the synthetic wastewater and the real laboratory's waste. Controlled-current electrodeposition was employed in a designed two-electrode cell with junctions. This work was divided into two parts. The first part studied for the best conditions for nickel removal from synthetic wastewater including cathode materials, initial pH of solution, current density and NaCl concentration. For the second part, the best conditions from the first part were applied for the real laboratory's waste. Also, the efficiency of cell without junctions were also investigated.

From the first part, with initial nickel concentration of 976 mg/L, a 99.96% nickel removal was achieved within 12-min electrolysis using 140 A/m^2 current density with graphite electrode, initial pH of 1 and NaCl concentration of 0.5 M. Maximum current efficiencies was achieved at 38.89% with 25.96% nickel removal.

In the second part, with the real laboratory's waste containing 1,281 mg/L nickel concentration, a 99.06% nickel removal was achieved with 60-min electrolysis using the best conditions from the first part. Maximum current efficiencies were at 61.34% with 31.15% nickel removal for cell with junctions, and 23.62% with 24.09% nickel removal for cell without junctions.

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

Field of study :.....Environmental Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year :...2010.....Co- advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัย
จึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์
ดร. เจริญขวัญ ไกรยา ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่ง
ที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ
ลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์
ตลอดจน อาจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และ อาจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒน์ิกะ ที่ได้ให้คำ
ชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ทุกท่าน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ และงบประมาณจากภาควิชา
เคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกัน
และกันในช่วงการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 นิกเกิล.....	6
2.2 การหาปริมาณของนิกเกิลด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก.....	7
2.2.1 หลักการ.....	7
2.2.2 จุดมุ่งหมายของผู้ทำการทดลอง.....	8
2.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	8
2.3 ระบบการจัดการของเสียภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	9
2.3.1 การจำแนกของเสีย.....	9
2.3.2 การบำบัดของเสียเบื้องต้น.....	10
2.3.3 การกำจัดของเสียอันตราย.....	10
2.3.4 การรายงานข้อมูลของเสียอันตราย.....	11
2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	11
2.4.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE).....	11
2.4.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction).....	12
2.4.3 รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis).....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4 การระเหย (Evaporation).....	12
2.4.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis).....	13
2.4.6 การดูดติดผิว (Adsorption).....	13
2.4.7 การตกตะกอน (Precipitation).....	13
2.4.8 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery).....	17
2.5 เซลล์เคมีไฟฟ้า.....	18
2.5.1 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	18
2.5.2 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	18
2.6 หลักการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	20
2.6.1 การนำพาไอออนในสารละลาย (Mass transfer).....	21
2.6.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	22
2.6.3 โพลาริเซชัน.....	25
2.7 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	26
2.7.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่.....	26
(Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)	
2.7.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่.....	27
(Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode)	
2.8 ขั้วไฟฟ้า.....	27
2.8.1 แก้วไฟต์.....	28
2.8.2 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	28
2.8.3 อะลูมิเนียม.....	28
2.9 ศักย์ขั้วไฟฟ้า.....	29
2.9.1 สมการเนิร์นสต์.....	29
2.9.2 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°).....	30
2.10 ศักย์เซลล์เคมีไฟฟ้า.....	32
2.10.1 ศักย์อุณหพลวัต (E_{Cell}).....	32
2.10.2 ศักย์ที่รอยต่อสารละลาย (E_J).....	33
2.10.3 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (E_R).....	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.10.4 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน (E_p , π).....	33
2.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	34
2.11.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน.....	34
2.11.2 ค่าการนำไฟฟ้า.....	35
2.11.3 กำลังไฟฟ้า.....	36
2.12 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า.....	36
2.13 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency (%)).....	37
2.14 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	38
2.15 อิเล็กโทรกราวิเมตรี (Electrogravimetry).....	38
2.15.1 หลักการในการวิเคราะห์.....	39
2.15.2 เทคนิคการวิเคราะห์.....	42
2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	43
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี.....	48
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	48
3.1.2 สารเคมี.....	49
3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียจริง สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และสะพานเกลือ.....	49
3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	50
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	52
3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์.....	54
3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริง.....	62
3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์.....	66
3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	66
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	67
4.1 การทดลองส่วนที่ 1 การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์.....	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด.....	67
4.1.2 ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย.....	75
4.1.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า.....	78
4.1.4 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด.....	82
4.2 การทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริง.....	85
4.2.1 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย.....	85
4.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลต่อรูปแบบของการจัด เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย.....	87
4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการกำจัด.....	92
4.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี.....	92
4.3.2 ค่าใช้จ่ายด้านเคมีไฟฟ้า.....	92
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	94
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	94
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	100
ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	101
ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ.....	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	125

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ลักษณะของเสีย निकเกิดในส่วนสารละลายสีเขียวอ่อนที่ใช้ในงานวิจัย.....3
2.1	สมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลของโลหะ निकเกิด.....6
2.2	ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ..... 16
2.3	เปรียบเทียบการตกตะกอนแบบต่างๆ.....17
2.4	ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานขั้วไฟฟ้าของสารละลายในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน (SHE).....31
2.5	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัด निकเกิด (Ni^{2+}) จากของเสียด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า.....47
3.1	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของชนิดขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อการกำจัด निकเกิดด้วยวิธี การพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียสังเคราะห์.....55
3.2	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อการกำจัด निकเกิดด้วยวิธี การพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียสังเคราะห์..... 57
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัด निकเกิด ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียสังเคราะห์....59
3.4	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่ง ขั้วไฟฟ้าแอโนดต่อการกำจัด निकเกิดด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า แบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียสังเคราะห์..... 61
3.5	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด निकเกิดด้วยวิธีการพอกพูน ด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า แบบมีรอยต่อของสารละลาย.....63
3.6	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัด निकเกิดด้วยวิธีการพอกพูน ด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย.....65
3.7	วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด..... 66
4.1	สมบัติของน้ำเสียจริงรวบรวมจากของเสียห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....85
4.2	รูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัด निकเกิดจากของเสีย ห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่..... 89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.3	เปรียบเทียบผลการทดลองจากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง..... 91
4.4	สรุปค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 2.02 แอมแปร์..... 93
5.1	สรุปผลการวิจัย..... 95
ก.1	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด..... 102
ก.2	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด..... 103
ก.3	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด..... 104
ก.4	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยไม่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย..... 105
ก.5	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1..... 106
ก.6	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 3..... 107
ก.7	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7..... 108
ก.8	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร..... 109
ก.9	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร..... 110
ก.10	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร..... 111
ก.11	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 2 โมลาร์..... 112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ก.12	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์..... 113
ก.13	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์..... 114
ก.14	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0 โมลาร์..... 115
ก.15	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิดจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย..... 116
ก.16	ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิดจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... 117
ก.17	ผลเปรียบเทียบการกำจัดนิกเกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงด้วย วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่..... 118

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ของเสียนิกเกิลจากห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการตกตะกอน ด้วยไดเมทิลไกลออกซิม.....2
1.2	การจัดเก็บของเสียนิกเกิลจากห้องปฏิบัติการ..... 2
2.1	การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย.....19
2.2	การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยมีรอยต่อของสารละลาย (ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพอรน..... 19 (ข) ต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ..... 19
2.3	องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า..... 20
2.4	การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน..... 21
2.5	การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่..... 22
2.6	กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า..... 23
2.7	การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก..... 23
2.8	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....26 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....26
2.9	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา ในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่..... 27 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลา ในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....27
2.10	อุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรเคมี.....42
3.1	ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง.....49
3.2	เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย.....51
3.3	เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... 52
3.4	ผังการทำวิจัย..... 53
4.1	ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทด ที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม..... 68

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม..... 68
4.3	ร้อยละการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม..... 70
4.4	ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม..... 70
4.5	ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.27, 1, 3 และ 7 โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด..... 75
4.6	ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.27, 1, 3 และ 7 โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด.....76
4.7	ร้อยละการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.27, 1, 3 และ 7 โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด..... 77
4.8	ความเข้มข้นของนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร... 78
4.9	ร้อยละการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร... 79
4.10	ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อผ่านค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร... 80
4.11	ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร... 81
4.12	ร้อยละการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 2, 0.5, 0.1 และ 0 โมลาร์..... 82

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 2, 0.5, 0.1 และ 0 โมลาร์..... 83
4.14	สรุปสถานะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย..... 84
4.15	ความเข้มข้นของนิกเกิด เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ 2.02 แอมแปร์ ณ เวลาต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง..... 86
4.16	ร้อยละการกำจัดนิกเกิด เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ 2.02 แอมแปร์ ณ เวลาต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง..... 86
4.17	ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ 2.02 แอมแปร์ ณ เวลาต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง..... 87
4.18	ความเข้มข้นของนิกเกิดในน้ำเสียจริงเทียบกับเวลา เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... 88
4.19	ร้อยละการกำจัดนิกเกิดในน้ำเสียจริงเทียบกับเวลา เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... 88
4.20	ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสในน้ำเสียจริงเทียบกับเวลา เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย..... 88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้โลหะหนัก จะเป็นแหล่งใหญ่ที่ปล่อยน้ำทิ้ง ซึ่งมีโลหะหนักปนเปื้อน แต่ห้องปฏิบัติการทางวิทยาศาสตร์ตามมหาวิทยาลัยจัดเป็นอีกแหล่งหนึ่ง ที่ควรตระหนักถึง เพราะโลหะหนักได้ถูกนำมาใช้กันมากในงานวิเคราะห์ค่าทางวิทยาศาสตร์จึงต้องผ่านกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งให้ได้มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนดก่อนการปล่อยทิ้งเพื่อความปลอดภัย และช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่จะเกิดขึ้น

สำหรับห้องปฏิบัติการภายในมหาวิทยาลัย นิกเกิลเป็นโลหะหนักตัวหนึ่งที่ใช้ในปริมาณสูงเพื่อการเรียนการสอนและการวิจัย ดังนั้นจึงเป็นของเสียอันตรายที่ต้องส่งกำจัดทิ้งซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการกำจัดสูง หากสามารถกำจัดนิกเกิลได้เองจะสามารถลดต้นทุนในการส่งกำจัด และลดมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม หากละเลยการกำจัดและกระจายสู่สิ่งแวดล้อม อาจส่งผลกระทบต่อคนได้ในที่สุด อีกทั้งนิกเกิลที่ถูกกำจัดเป็นโลหะที่มีราคาแพง การกำจัดนิกเกิลจะเป็นแนวทางในอนาคตที่จะสามารถนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ต่อไป

การหาปริมาณของนิกเกิลด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (*Gravimetric determination of nickel*) ซึ่งใช้เทคนิคการตกตะกอนนิกเกิลด้วยไดเมทิลไกลออกซิมในการวิเคราะห์ เป็นปฏิบัติการที่นิสิตปริญญาตรีทุกๆ คนที่เข้าศึกษาในภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ของมหาวิทยาลัยทุกๆ แห่งทั่วโลกจะได้ศึกษาในรายวิชา *ปฏิบัติการปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative analysis laboratory)* เพื่อฝึกทักษะด้านต่างๆ ในการเป็นนักเคมีวิเคราะห์ที่ดีและมีคุณภาพ โดยปฏิบัติการเรื่องนี้จะเกิดของเสียนิกเกิลขึ้น 2 ส่วน ได้แก่ ตะกอนสีแดงของนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิม และสารละลายสีเขียวอ่อนภายหลังจากการตกตะกอน ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ของเสียนิกเกิลจากห้องปฏิบัติการด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยไดเมทิลไกลออกซิม

จากความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ทำให้ในแต่ละปีประเทศไทยมีนิสิตที่เข้าศึกษาในภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ในระดับปริญญาตรีมากขึ้นทุกๆ ปี ตามข้อมูลล่าสุดจากเว็บไซต์ การคัดเลือกบุคคลเข้าศึกษาในระบบกลาง (Central University Admissions System, CUAS) ประจำปีการศึกษา 2553 พบว่า จะมีนิสิตเรียนเคมีมากถึง 2,760 คน ซึ่งสามารถคาดการณ์ได้ว่านิสิตเหล่านี้จะทำให้เกิดของเสียนิกเกิลเฉพาะในส่วนสารละลายสีเขียวอ่อน ภายหลังจากตกตะกอนซึ่งจะถูกจัดเก็บในขวดสีชาดังแสดงในรูปที่ 1.2 ประมาณ 1.66 ลูกบาศก์เมตรต่อปีการศึกษา ดังแสดงในการคำนวณ

$$Q_{\text{Ni}^{2+}(\text{Waste})} = \frac{600 \text{ mL ของเสีย}}{1 \text{ คนนิสิต}} \times \frac{2,760 \text{ คนนิสิต}}{1 \text{ ปีการศึกษา}} \times \frac{1 \text{ L ของเสีย}}{1,000 \text{ mL ของเสีย}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1,000 \text{ L ของเสีย}} = \frac{1.66 \text{ m}^3}{1 \text{ ปีการศึกษา}}$$



รูปที่ 1.2 การจัดเก็บของเสียนิกเกิลจากห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1.1 ลักษณะของเสียนิกเกิลในส่วนสารละลายสี่เขี้ยวอ่อนที่ใช้ในงานวิจัย

1. การทำคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative analysis)		
พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ตรวจพบ	
1.1 ลักษณะภายนอก	ของเหลวใสสี่เขี้ยวอ่อน	
1.2 แคทไอออน	Ni^{2+} , H^+ และ NH_4^+	
1.3 แอนไอออน	SO_4^{2-} , Cl^- , และ OH^-	
1.4 สารอินทรีย์	$\text{HC}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{N}_2$, $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$	
2. การทำปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative analysis)		
พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ความเข้มข้น
2.1 ค่าพีเอช	-	0.27
2.2 ปริมาณของแข็งละลายทั้งหมด	mg/L	22,061
2.3 ค่าการนำไฟฟ้า	mS/cm	351.0
2.4 นิกเกิล (Ni^{2+})	mg/L	976

ที่มา : ตัวอย่างของเสียนิกเกิลรวบรวมจาก ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลในส่วนสารละลายสี่เขี้ยวอ่อนภายหลังจากการตกตะกอน เพื่อแก้ปัญหาต่างๆ ช่างต้นด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าซึ่งเป็นวิธีทางเคมีไฟฟ้าวิธีหนึ่งที่มีความจำเพาะกับสารที่ต้องการวิเคราะห์โดยไม่ต้องแยกสารรบกวนอื่นๆ ออก สำหรับวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าของระบบให้คงที่ ออกแบบการทดลองโดยต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cell with liquid junction) ซึ่งเชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิมิตตัวของโซเดียมคลอไรด์ กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่น แล้วทำการหาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลโดยการแปรค่าตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ตามลำดับ แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลกับวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไปซึ่งต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย (Cell without liquid junction) สุดท้ายนำสภาวะที่ได้จากการวิจัยที่ดีที่สุดมาเสนอเป็นแนวทางในการออกแบบระบบการกำจัดนิกเกิลสำหรับห้องปฏิบัติการต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. หาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ตามลำดับ
2. หาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลกับน้ำเสียจริง แล้วคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมด โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไป

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. งานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ โดยทำการทดลองด้วยวิธีวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่แบบทีละเท (Batch)
3. วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ใช้สะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์ ใช้สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นน้ำเสียสังเคราะห์หรือน้ำเสียจริงปริมาตร 170 มิลลิลิตร ใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม หรืออะลูมิเนียม แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 0.27, 1, 3 และ 7 ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0, 0.1, 0.5 และ 2 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร และใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
4. ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้ววัดค่าพีเอช วัดค่าการนำไฟฟ้า และวัดความเข้มข้นของนิกเกิลด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrophotometer) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไป
2. ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบการกำจัดนิกเกิลสำหรับห้องปฏิบัติการ
3. ได้แนวทางในการนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ในอนาคต

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิกเกิล (สุรางค์ อนุกุล, 2542)

เป็นโลหะสีขาวด้าน มีความคล้ายกับเหล็กในด้านความเหนียวและมีความแข็งมากกว่าเหล็ก มีความคล้ายกับทองแดงในด้านการเกิดสารประกอบออกไซด์ ซึ่งจะไม่เกิดที่อุณหภูมิห้องแต่จะเกิดเมื่อเผาถึง 700-800 องศาเซลเซียส อีกทั้งนิกเกิลยังสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก ซึ่งสมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลของโลหะนิกเกิลดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางฟิสิกส์และสมบัติเชิงกลของโลหะนิกเกิล

มวลอะตอม	58.69
โครงสร้างระบบผลึก	Face center cubic ($a=3.516 \text{ \AA}$)
ความหนาแน่น (ที่ 25°C)	8.89 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
อุณหภูมิหลอมเหลว	1,435-1,445 องศาเซลเซียส
จุดเดือดกลายเป็นไอ	2,730 องศาเซลเซียส
ความร้อนจำเพาะ (ที่ $27-100^{\circ}\text{C}$)	0.130 แคลลอรี่ต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส
ความร้อนแฝงของการหลอมละลาย	7.38 แคลลอรี่ต่อกรัม
สัมประสิทธิ์การขยายตัว (ที่ $27-100^{\circ}\text{C}$)	13×10^{-6} ต่อองศาเซลเซียส
ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ (ที่ 20°C)	9.5 ไมโครโอมเซนติเมตร
สัมประสิทธิ์นำความร้อน (ที่ $27-100^{\circ}\text{C}$)	0.145 แคลลอรี่คูอมป์ต่อตารางเซนติเมตร
ความแข็งแรงหรือความต้านทานแรงดึง	47 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร
พิกัดความยืดหยุ่น	15 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร
อัตราการยืดตัว	40%
ความแข็ง	110 HB.
โมดูลัสของการยืดหยุ่น	21,000 กิโลกรัมต่อตารางมิลลิเมตร

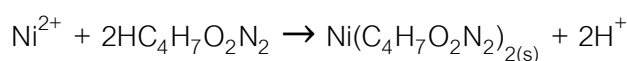
ถึงแม้ निकเกิลจะอยู่คาบเดียวกันกับเหล็กและโคบอลต์ ซึ่งคาดว่าอาจมีผลต่อร่างกาย แต่กลับปรากฏว่า निकเกิลไม่มีผลทางสรีระต่อทั้งพืชและสัตว์ निकเกิลและสารประกอบของ निकเกิลทั่วไปเป็นพิษต่อร่างกายในเกณฑ์ต่ำหรือจัดว่าไม่เป็นพิษก็ได้ เข้าสู่ร่างกายโดยทางอาหาร อย่างไรก็ตาม निकเกิลในรูปของฝุ่นผงติดไฟง่ายและเป็นพิษ ระดับการทนได้ของผง निकเกิลในอากาศ คือ 1 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กฎหมายกำหนดต้องมีความเข้มข้นของ निकเกิลไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่สามารถผลิต निकเกิลได้เอง จึงต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแท่ง แผ่น และแถบ ปริมาณการนำเข้าในแต่ละปีมากกว่า 300 ล้านบาทและมีแนวโน้มในการนำเข้า निकเกิลเพิ่มขึ้นทุกปี ราคาการซื้อขายภายในประเทศไทยโดยเฉลี่ยประมาณ 220 บาทต่อกิโลกรัม สำหรับการส่งออก निकเกิลส่วนมากอยู่ในรูปเศษโลหะ คิดเป็นมูลค่าประมาณปีละ 4 ล้านบาท (กรมทรัพยากรธรณี, 2549)

2.2 การหาปริมาณของ निकเกิลด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์, 2542)

2.2.1 หลักการ

นิกเกิล (Ni (II)) ทำปฏิกิริยากับไดเมทิลไกลออกซิม เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสีแดงในสารละลายที่เป็นเบสด้วยแอมโมเนีย สารสีแดงที่เกิดขึ้นมีสูตร $\text{Ni}(\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{N}_2)_2$ ซึ่งละลายได้น้อยหรือเกิดเป็นตะกอนนั่นเอง ดังสมการ



ไดเมทิลไกลออกซิมเป็นรีเอเจนต์ที่มีความจำเพาะเจาะจงในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับนิกเกิล ถึงแม้ว่าไดเมทิลไกลออกซิมจะทำปฏิกิริยากับแพลเลเดียมด้วยแต่ในภาวะที่มีกรดเจือจาง จะไม่รบกวนในสภาวะที่เป็นเบสจึงเหมาะสมกับนิกเกิลเท่านั้น ถ้าสารละลายมีเหล็กปนเปื้อนสามารถรบกวนการวิเคราะห์โดยการเกิดเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์และตกตะกอนรวมออกมากับตะกอนนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิม เพราะสภาวะที่ใช้เพื่อให้นิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิมตกตะกอนเป็นสภาวะเบส แต่การรบกวนสามารถถูกกำจัดให้หมดไปได้ด้วยการเติมกรดซัลฟิวริกหรือทาร์ทาริกเพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับเหล็ก และไม่ตกตะกอนร่วมกับนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิม

ไดเมทิลไกลออกซิมไม่ละลายในน้ำแต่ละลายในแอลกอฮอล์ แอลกอฮอล์สามารถละลายตะกอนนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิมด้วย ดังนั้น การเติมรีเอเจนต์ไดเมทิลไกลออกซิมที่ละลาย

แอลกอฮอล์ลงไป ต้องเติมให้มีปริมาณเพียงพอที่จะตกตะกอนนิกเกิลออกมาให้หมดและมีปริมาณมากเกินไปเล็กน้อย เพื่อให้มั่นใจว่านิกเกิลจะตกตะกอนออกมาหมด แต่ต้องไม่ให้ปริมาณมากเกินไป เพราะแอลกอฮอล์จะละลายตะกอนไปมากด้วย แอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นตัวทำละลายไดเมทิลไกลออกซิมคือ โพรพานอล ไม่ใช่เอทานอล เพราะเอทานอลระเหยง่ายกว่า จึงสูญเสียมากกว่าในตอนที่ต้ม ทำให้รีเอเจนต์ไดเมทิลไกลออกซิมที่มากเกินไปตกตะกอน (ไม่ละลาย) ออกมาด้วย

ตะกอนสีแดงของนิกเกิลไดเมทิลไกลออกซิมมีลักษณะไฮโดรฟอบิก (ไม่ชอบน้ำ) ซึ่งมักจะลอยฟ่องและป็นหินน้ำขึ้นมาทำให้กรองยาก ความพยายามใช้น้ำฉีดล้างให้ตะกอนตกกลับไปยังทำให้แย่ง ตะกอนสีแดงนี้ มีความอยู่ตัวถึงอุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ดังนั้น การอบตะกอนให้แห้งมักทำที่ 120 องศาเซลเซียส

2.2.2 จุดมุ่งหมายของผู้ทำการทดลอง

1. มีเทคนิคในการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก ได้แก่ การใช้เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด การอบแห้งและหาน้ำหนักที่แน่นอนของครุชชีเบิด การถ่ายเทเชิงปริมาณวิเคราะห์ การกรองและเทคนิคในการตกตะกอน
2. เข้าใจถึงผลของสิ่งเจือปนที่จะมีผลต่อการวิเคราะห์
3. เข้าใจถึงข้อดี ข้อเสีย ของการตกตะกอนจากสารละลายเนื้อเดียว
4. สามารถคำนวณปริมาณของนิกเกิลได้จากน้ำหนักของตะกอน

2.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. นิกเกิล (II) ซัลเฟต (Nickel (II) sulphate, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
2. ไดเมทิลไกลออกซิม (Dimethylglyoxime, $\text{HC}_4\text{H}_7\text{O}_2\text{N}_2$)
3. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)
4. แอมโมเนีย (Ammonia, NH_3)
5. โพรพานอล (Propanol, $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$)
6. กรดซิตริก (Citric acid, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$) หรือ กรดทาร์ทาริก (Tartaric acid, $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$)

2.3 ระบบการจัดการของเสียภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สุทธิพร จิตต์มิตรภาพ, 2551)

ของเสียที่เกิดจากการปฏิบัติการที่ใช้สารเคมี มักจะเป็นสารผสมของผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยา และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ ซึ่งอาจมีสถานะเป็นของแข็งหรือของเหลวที่มีสมบัติและระดับความเป็นอันตรายแตกต่างกัน นอกจากนี้ของเสียอันตรายยังครอบคลุมสารเคมีเหลือใช้ สารไม่ระบุชนิดและวัสดุต่างๆ ที่เปราะเปื้อนสารเคมี ดังนั้นการดูแลจัดการของเสียจากสารเคมีจะต้องดำเนินการอย่างถูกวิธี เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาต่อระบบนิเวศน์ ซึ่งรวมถึงสิ่งมีชีวิต และทรัพยากรต่างๆ ในสภาพแวดล้อม

ระบบการจัดการของเสีย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้กำหนดแนวทางมาตรฐานในการจัดการของเสียจากห้องปฏิบัติการอย่างเป็นระบบ และได้จัดตั้งหน่วยงานพิเศษสำหรับการจัดการของเสียอันตราย ดำเนินการเป็นส่วนหนึ่งในโครงการนำร่องการพัฒนาระบบการจัดการสารเคมีและของเสียอันตรายของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีภารกิจในการให้ข้อมูลและประสานดำเนินการรวบรวมของเสียอันตรายจากหน่วยงานของมหาวิทยาลัย พร้อมทั้งติดต่อหน่วยงานภายนอกที่ได้รับอนุญาตตามกฎหมายในการกำจัดของเสียอันตรายมาดำเนินการต่อไป

การจัดการของเสียที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการให้ปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

2.3.1 การจำแนกของเสีย

ของเสียจากห้องปฏิบัติการ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ตามลักษณะของการจัดการ ดังนี้

1. ของเสียไม่อันตรายที่สามารถปล่อยทิ้งได้ ได้แก่ ของเสียจำพวกเกลือของโลหะที่ไม่เป็นอันตราย ของเสียความเข้มข้นเจือจางที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (มีสารเคมีอยู่ไม่เกินร้อยละ 5) และของแข็งที่ไม่เป็นพิษ

2. ของเสียอันตรายที่ควรบำบัดในเบื้องต้นก่อนส่งทิ้งหรือบำบัด แบ่งออกได้เป็น สารละลายกรดและเบส ตัวออกซิไดซ์ สารไวต่อน้ำหรืออากาศ ของแข็งที่มีตัวทำละลายอินทรีย์ปนอยู่

3. ของเสียอันตรายที่ต้องส่งไปกำจัด แบ่งออกเป็น 14 ประเภทหลัก ได้แก่ ของเสียพิเศษ ของเสียที่มีไซยาไนด์ ของเสียที่มีสารออกซิไดซ์ ของเสียที่มีปรอท ของเสียที่มีโครเมต ของเสียที่มีโลหะหนัก ของเสียที่เป็นกรด ของเสียที่มีอัลคาไลน์ ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ของเสียประเภท Oxygenated ของเสียประเภท NPS containing ของเสียประเภท Halogenated ของแข็ง และของเสียที่มีน้ำเป็นตัวทำละลายอื่นๆ รายละเอียดประเภทของเสียเหล่านี้ ได้ให้ไว้ในเว็บไซต์ <http://chemsafe.chula.ac.th/wastetrack>

4. ของเสียกลุ่มพิเศษ ได้แก่ สารกัมมันตรังสี ของเสียติดเชื้อ และแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ ซึ่งมีระบบการดำเนินงานเฉพาะเรื่องอยู่แล้ว

2.3.2 การบำบัดของเสียเบื้องต้น

วิธีการเบื้องต้นในการบำบัดของเสียประเภทต่างๆ ในข้อ 2. ห้องปฏิบัติการที่รับผิดชอบสามารถทำตามรายละเอียดในเว็บไซต์ <http://chemsafe.chula.ac.th/wastetrack>

2.3.3 การกำจัดของเสียอันตราย

สำหรับของเสียอันตรายประเภทที่ไม่สามารถกำจัดได้เอง หน่วยงานสามารถติดต่อโดยตรงกับหน่วยงานบำบัดของเสียอันตรายที่ได้รับอนุญาตตามกฎหมายให้จัดการกับของเสียที่เกิดขึ้นอย่างถูกวิธี หรือ ติดต่อมาที่หน่วยงานพิเศษสำหรับการจัดการของเสียอันตรายผ่านเว็บไซต์ หน่วยงานพิเศษฯ จะกำหนด username และ password ให้กับหน่วยงานที่ต้องการกำจัดของเสีย ซึ่งอาจจะเป็นหน่วยงานในระดับห้องปฏิบัติการ ระดับภาควิชา หรือระดับคณะที่สามารถดูแลเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายในการกำจัดของเสีย หน่วยงานจะต้องแยกชนิดของเสียตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ และเก็บในภาชนะที่ระบุประเภทของของเสีย แห่่งที่มา และผู้รับผิดชอบ โดยหน่วยงานพิเศษฯ จะเป็นผู้ระบุหมายเลขอ้างอิงสำหรับของเสียเหล่านี้ เพื่อสะดวกในการติดตามตรวจสอบหากเกิดปัญหาขึ้น เมื่อถึงเวลาที่กำหนด หน่วยงานพิเศษฯ จะติดต่อหน่วยงานภายนอกที่ได้รับอนุญาตในการกำจัดของเสียอันตรายมาดำเนินงานต่อไป

ทั้งนี้หน่วยงานที่มีการติดต่อโดยตรงกับหน่วยงานภายนอกเพื่อการจัดของเสีย นั้น จะต้องเก็บข้อมูลของเสีย และรายงานไปยังศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อม และของเสียอันตราย ตามรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.3.4 การรายงานข้อมูลของเสียอันตราย

หน่วยงานที่มีของเสียอันตรายจากการปฏิบัติงานจะต้องรายงานข้อมูลและผลการจัดการของเสียอันตรายให้กับมหาวิทยาลัย อย่างน้อยปีละหนึ่งครั้ง โดยระบุไว้ในรายงาน ซึ่งมีดังนี้

- ประเภทของของเสีย
- ปริมาณของของเสียแต่ละประเภท
- ผลการบริหารจัดการ

- มาที่ **หน่วยงานพิเศษสำหรับการจัดการของเสียอันตราย**
- <http://chemsafe.chula.ac.th/wastetrack>
- ติดต่อ : คุณธีรพัฒน์ คล้ายมุข
- เบอร์โทรศัพท์ 086-376-6705
- E-mail : recycle4@gmail.com

2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดจึงขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้ คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ โดยสรุปวิธีการบำบัดต่างๆ ได้ดังนี้

2.4.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนจะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชื่นชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งการแลกเปลี่ยนไอออนนี้มีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ โดยที่เรซินจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่แต่จะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ซึ่งถ้าเรซินเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน (Cation exchange resins) แต่ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน (Anion exchange resins) วิธีการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะ

หนักที่มีปริมาณน้อยและจะต้องทำการกำจัดสารปนเปื้อนชนิดอื่นก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด (Manahan, 1993)

2.4.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and reduction)

กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันเป็นวิธีการทางเคมีอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก โดยการบำบัดจะทำการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนลงไปได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน เช่น อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกาเนต โครเมต และไนเตรต เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน เช่น เฟอร์รัสซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

2.4.3 รีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis)

กระบวนการรีเวิร์ส ออสโมซิส เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส แอซีเตต และโพลีเอไมด์ ซึ่งจะให้เฉพาะตัวที่ละลายผ่าน Semi permeable membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่จะใช้จึงต้องทนต่อแรงดันได้สูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้น ได้แก่ การปรับค่าพีเอช การแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรงออก และการกรองสารแขวนลอยออกเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน

2.4.4 การระเหย (Evaporation)

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

2.4.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

กระบวนการอิเล็กโทรไดอะไลซิสเป็นวิธีการที่ใช้แยกไอออนออกจากสารละลาย ด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนจะขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้ใช้ต้นทุนค่าก่อสร้างและดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการกำจัดได้

2.4.6 การดูดติดผิว (Adsorption)

กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับสูงได้ และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่นๆ ได้ เช่น ตะกั่ว และทองแดง เป็นต้น

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าไปใกล้สารดูดติดผิว

2.4.7 การตกตะกอน (Precipitation)

การตกตะกอนเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้

ในการตกตะกอนต้องพิจารณาถึงค่าพีเอช หลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปจะมีค่าพีเอชที่สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ตารางที่ 2.2 ได้แสดงค่าพีเอชที่เหมาะสม และชนิด

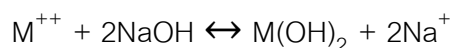
ของสารเคมีที่ใช้เติมผสมลงไป เพื่อกำจัดหรือแยกมลสารออกจากน้ำเสีย ซึ่งพบว่าในแต่ละมลสาร จะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึง ค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับค่าพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้ยังทำให้ตกผลึกในรูปของหินปูน ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนมาก ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ นั้นมีราคาแพงกว่าและเกิดอันตรายได้มากกว่าแคลเซียมออกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณ ที่น้อยกว่า จึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลาย น้ำต่ำแล้วอาจทำการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะ หนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับค่าพีเอชหรือเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะนั้น มีค่าความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation)

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยการเติม สารเคมี คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ลงไป ทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนที่อยู่ในสารละลาย และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

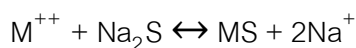


การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่ มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric property) คือ จะไม่สามารถ ตกตะกอนที่ค่าพีเอชใดค่าพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงค่าพีเอชที่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปโลหะ ส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่ค่าพีเอช 8 ถึง 11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้ อีกถ้าค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนจากค่าที่โลหะหนักสามารถตกตะกอนเป็นผลึกโลหะไฮดรอกไซด์ได้

ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด ด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกไฮดรอก ไซด์จะขึ้นอยู่กับปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้ สภาพวะที่ เกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช และสารอื่นๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการ ตกตะกอน

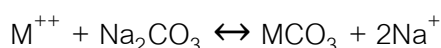
2. การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide precipitation)

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



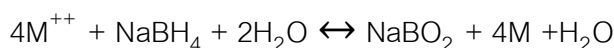
3. การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate precipitation)

สำหรับโลหะบางตัว เช่น แคลเซียม และตะกั่ว เป็นต้น การตกตะกอนคาร์บอเนตทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำกว่า เมื่อเทียบกับการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ และสามารถกรองตะกอนได้มากกว่า และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



4. การตกตะกอนโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride precipitation)

โซเดียมโบโรไฮไดรด์เป็นรีดิวซิงเอเจนต์ ที่สามารถใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักได้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับค่าพีเอช และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



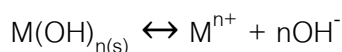
กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพสูง ในช่วงค่าพีเอช 8 ถึง 11 ที่ค่าพีเอชต่ำกว่า 8 การใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น โดยการไฮโดรไลซิสของโบโรไฮไดรด์ ขณะที่ค่าพีเอชมากกว่า 11 อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลง ค่าพีเอชที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยการทดสอบความสมดุลของการใช้โบโรไฮไดรด์กับระยะเวลาของการทำปฏิกิริยา และคุณภาพของน้ำที่ปล่อยออกมา

ตารางที่ 2.2 ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดมลสารออกจากน้ำเสียด้วยสารเคมีต่างๆ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

มลสารที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย	สารเคมีที่เติมลงไป	ค่าพีเอชที่เหมาะสม	สารเคมีที่ตกตะกอนได้
Aluminum	Lime	5	Al(OH) ₃
Arsenic	Ferric chloride	8	AsCl ₂
Barium	Sodium sulphate	10	BaSO ₄
Cadmium	Lime	9.5 - 12	Cd(OH) ₂
Chromic	Lime	8.0 - 9.5	Cr(OH) ₃
Cupric	Lime	9.0 - 10.0	Cu(OH) ₂
Ferric	Lime	7	Fe(OH) ₃
Fluoride	Lime	12	CaF ₂
Manganese	Lime	10	Mn(OH) ₂
Silver	Sodium chloride	8	AgCl
Selenium	Sodium sulfide	6.5	SeS ₂
Mercury	Sodium sulfide	8.5	HgS

5. ความสามารถในการละลาย

เมื่อพิจารณาสมดุลในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ และค่าคงที่สมดุลที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้



$$K_{sp} = \{m^{n+}\}\{OH^{-}\}$$

ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับของแข็งจะถูกเขียนโดยของแข็งเป็นสารตั้งต้น โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี ค่าคงที่สมดุลถูกแสดงด้วยตัวห้อย S แล้วตามด้วยจำนวนลิแกนด์ เขียนเป็นสัญลักษณ์ K_{sp} ซึ่งจะถูกใช้แสดงถึงค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่มีของแข็งเป็นสารตั้งต้นที่มีการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยาเคมี และสารเชิงซ้อนที่มีจำนวน i ลิแกนด์เป็นผลิตภัณฑ์ (Benjamin, 2002)

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบการตกตะกอนแบบต่างๆ (Freeman, 1989)

วิธีการตกตะกอน	ข้อดี	ข้อเสีย
ไฮดรอกไซด์	1.ราคาถูก	1.เกิดตะกอนมาก 2.ละลายกลับได้ถ้าค่าพีเอชเปลี่ยน
ซัลไฟด์	1.ความสามารถในการละลายน้ำของตะกอนต่ำ 2.รีดน้ำออกจะตะกอนได้มากกว่าไฮดรอกไซด์	1.ราคาแพง 2.มีโอกาสเกิดแก๊สไฮโดรเจนหากไม่มีการควบคุมที่ดี
คาร์บอเนต	1.กรองตะกอนได้มาก	1.ใช้กับโลหะได้ไม่ทุกชนิด 2.เกิดตะกอนมากกว่าไฮดรอกไซด์
โบโรไฮดรอกไซด์	1.ใช้กับการนำกลับของโลหะ 2.เกิดตะกอนน้อยกว่าไฮดรอกไซด์	1.ใช้ได้กับช่วงค่าพีเอชสั้น 8 ถึง 11

2.4.8 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยไอออนของโลหะจะเกิดการรีดักชันที่ขั้วของแคโทด ซึ่งแคโทดที่ใช้ในอุตสาหกรรมนี้มียู 2 ชนิด คือ Conventional Metal Cathode (CMC) กับ High Surface Area Cathode (HSAC) แอโนดและแคโทด มักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยที่แคโทดมักจะทำด้วยเหล็กกล้าหรือสแตนเลสสตีล (Stainless steel) หรือ Carbon fiber ส่วนแอโนดมักจะทำด้วย Platinized Titanium, Ruthenized titanium ตะกั่ว แกรไฟต์ เป็นต้น การแยกด้วยไฟฟ้าจะทำได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแยกเกิดได้ดีขึ้น ดังที่ใช้ในการแยกควรจะทำให้มีน้ำกระเพื่อมหรือมีการกวน เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ดีขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่ของแคโทดและแอโนด และอัตราการเคลื่อนย้ายมวล จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเข้าเกาะของโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งเหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำไปขาย โดยประสิทธิภาพของระบบนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90-95 แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง

2.5 เซลล์เคมีไฟฟ้า

2.5.1 ชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า

เซลล์เคมีไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ของเซลล์ คือ เซลล์แกลวานิก หรือ เซลล์โวลตาอิก และเซลล์อิเล็กโทรไลต์

1. เซลล์แกลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก

เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า อันเป็นผลของการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า ทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ในทางการค้า ตัวอย่างของเซลล์แกลวานิก คือ แบตเตอรี่เซลล์ เชื้อเพลิง เป็นต้น สำหรับการนำเซลล์แกลวานิกในการวิเคราะห์ เป็นการศึกษาการดำเนินไปของปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของการเกิดสมดุล (Equilibrium constant) ของปฏิกิริยาที่เซลล์

2. เซลล์อิเล็กโทรไลต์

เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าจากภายนอก ในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ ในด้านการวิเคราะห์เซลล์อิเล็กโทรไลต์ถูกใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารที่ต้องการ โดยเทคนิควิธีการวิเคราะห์แบบต่างๆ เช่น โวลแทมเมตรี และอิเล็กโทรแกรวิเมตรี เป็นต้น

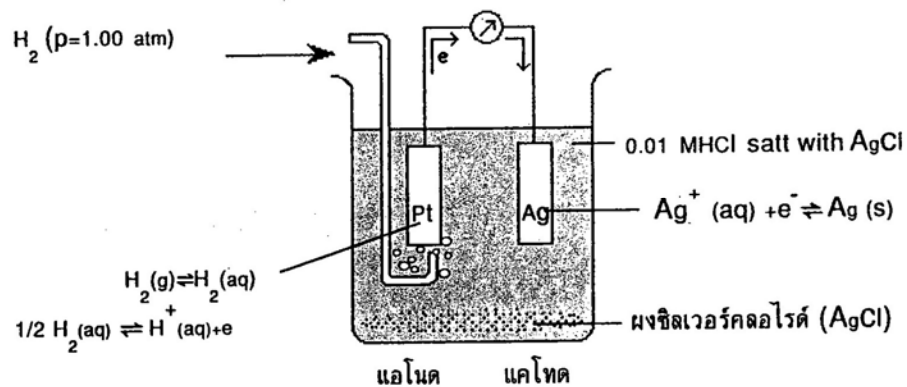
2.5.2 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า

ในเซลล์เคมีไฟฟ้า 1 เซลล์ต้องประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เดียวกันหรือต่างกันได้

1. การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย (Cell without liquid junction)

ในรูปที่ 2.1 เป็นแผ่นแพลทินัม (Pt) และแผ่นเงิน (Ag) อยู่ในสารละลาย 0.01 M HCl (กรดไฮโดรคลอริก) ที่อิ่มตัวด้วย AgCl (ซิลเวอร์คลอไรด์) โดยมีท่อผ่าน H₂ (แก๊สไฮโดรเจน) เข้ามา

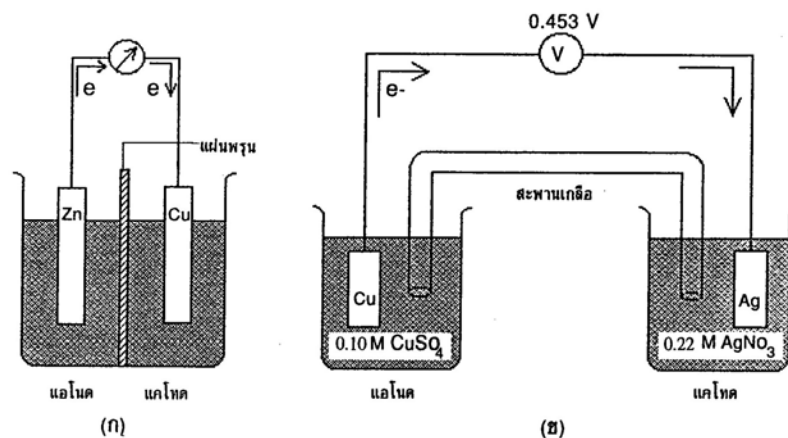
ในสารละลายทางแผ่นแพลทินัมตลอดเวลา เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด และแท่งเงินทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด



รูปที่ 2.1 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยไม่มีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

2. การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย (Cell with liquid junction)

ในรูปที่ 2.2 แต่ละขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่เหมือนกัน โดยอาจต่างทั้งชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ หรือที่ความเข้มข้น หรือต่างทั้งชนิดและความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ การแยกแต่ละครึ่งเซลล์ออกจากกันทำได้หลายวิธีด้วยกัน ที่ยกตัวอย่างในรูปที่ 3.2-(ก) เป็นการใส่วัสดุรูพรุน เช่น โยแก้ว เป็นต้น และรูปที่ 3.2-(ข) เป็นการแยกภาชนะของแต่ละครึ่งเซลล์ และเชื่อมด้วยแท่งแก้วบรรจุสารละลายเข้มข้น เช่น KCl (โพแทสเซียมคลอไรด์) เป็นต้น แท่งแก้วนี้เรียกว่าสะพานเกลือ การแยกสารละลายโดยสะพานเกลือในเชิงวิเคราะห์มีข้อดีกว่าการใช้วัสดุโยแก้ว เพราะช่วยลดค่าศักย์ที่รอยต่อสารละลายได้



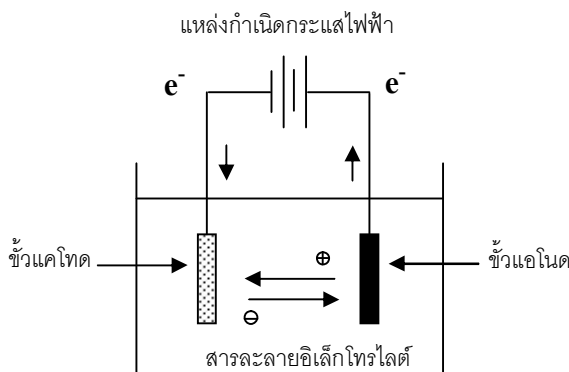
รูปที่ 2.2 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยมีรอยต่อของสารละลาย (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

(ก) กั้นสารละลายด้วยแผ่นพรุน (ข) ต่อสารละลายด้วยสะพานเกลือ

2.6 หลักการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

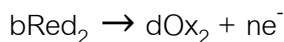
กระบวนการเคมีไฟฟ้าในการทำวิเคราะห์เชิงไฟฟ้าจะหมายถึง กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอก ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ ขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าภายนอกเป็นส่วนที่ใช้เพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า โดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสไฟฟ้าผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่า ขั้วแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2.3

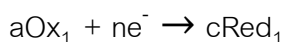


รูปที่ 2.3 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด

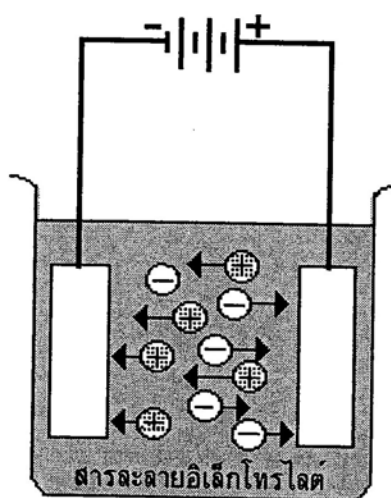


2.6.1 การนำพาไอออนในสารละลาย

ไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ในสารละลาย ถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ด้วย 3 กลไกด้วยกัน คือ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และคอนเวกชันหรือการพา (Convection) กระบวนการนำพาไอออนทั้งสามกลไกนี้ เกิดขึ้นทั้งกับขั้วแอโนดและขั้วแคโทด สามารถเกิดขึ้นเองกับไอออนในสารละลาย หรือถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ ขึ้นกับเทคนิคการวิเคราะห์นั้นๆ

1. ไมเกรชัน (Migration)

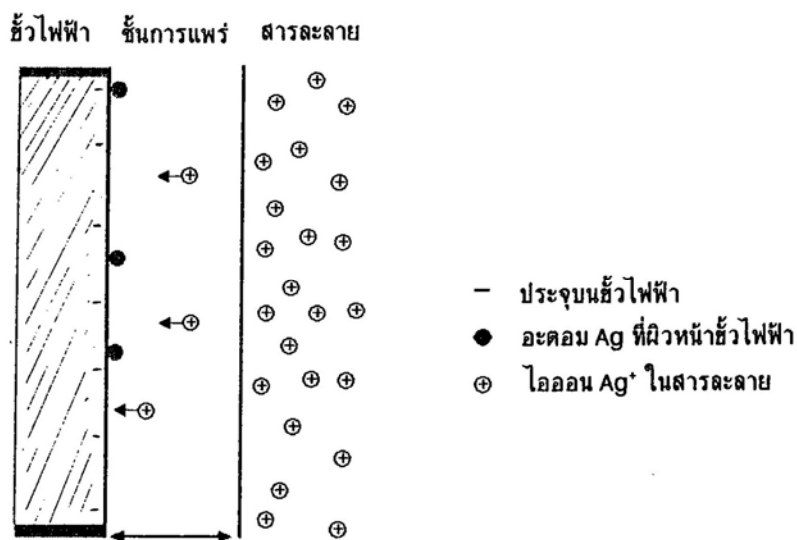
เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกเคลื่อนเข้าหาขั้วลบ และไอออนลบเคลื่อนไปทางขั้วบวก ดังในรูปที่ 2.4 ความเร็วของการที่ไอออนเคลื่อนเข้าหา หรือเคลื่อนออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแต่ศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น เพิ่มหรือลดไปด้วย นอกจากนี้ ถ้ามีไอออนอื่นที่มีประจุชนิดเดียวกับไอออนที่ต้องการอยู่ในสารละลายด้วย จะเกิดการแย่งกันเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรอันเนื่องมาจากไอออนที่ต้องการจะลดลงไปด้วย เช่น การที่สะพานเกลือเป็นสารละลายของ KCl ที่มีความเข้มข้นมากกว่าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ 50-100 เท่า ทำให้ทั้ง K^+ และ Cl^- แย่งเคลื่อนเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าแทนไอออนที่ต้องการวิเคราะห์เกิดผลดี คือ ทำให้ไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน แต่เคลื่อนที่แบบการแพร่แทน เป็นต้น



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน (เพ็ญศรี ทองนพเน็อ, 2552)

2. การแพร่ (Diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออน หรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่า ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จนกว่าไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น อัตราความเร็วของการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เช่น ดังในรูปที่ 2.5 การพอกพูนของซิลเวอร์ที่ขั้วแคโทดในสารละลายที่ประกอบด้วย Ag^+ ในความเข้มข้นที่มากกว่าที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จึงเกิดการแพร่ของ Ag^+ ในสารละลาย และที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าต่างกันมาก การแพร่ก็ยิ่งเกิดอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 2.5 การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่ (เพ็ญศรีทองนพเน็อ, 2552)

3. คอนเวกชัน หรือการพา (Convection)

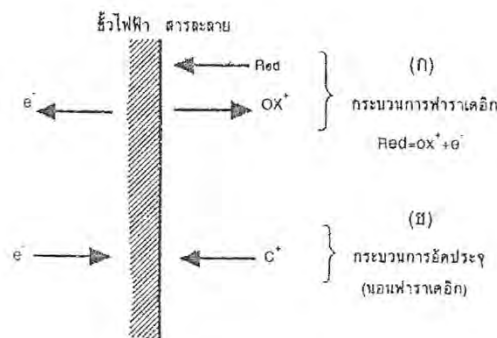
การที่ไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหา หรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้า อันเป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลายหรือด้วยกลไกภายนอก เช่น โดยการคน หรือเขย่าสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนตัวของไอออนภายในสารละลาย

2.6.2 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและจ่ายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น (ปฏิกิริยารีดอกซ์)

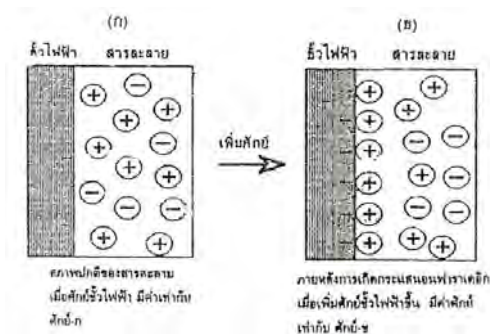
เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการดังกล่าวนี้ที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้านั้นได้ เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic current) ดังแสดงในรูปที่ 2.6-(ก)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้าไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้น แต่ก็ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Non-faradaic process) กระแสไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non-faradaic current) ดังแสดงในรูปที่ 2.6-(ข)



รูปที่ 2.6 กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า (เพ็ญศรี ทองนพเน็อ, 2552)

สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์ หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า แต่ขึ้นกับสถานะของสารวิเคราะห์ ว่ามีคุณสมบัติหรือเงื่อนไขที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด ตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การทำการอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก (เพ็ญศรี ทองนพเน็อ, 2552)

ในรูปที่ 2.7 (ก) เดิมซ้ำไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์ -ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของซ้ำไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลาย มาเรียงประชิดกับซ้ำไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของซ้ำไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายตัวในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับซ้ำไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.7 (ข) สมมุติให้เท่ากับ -ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์ -ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ทันที โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าซ้ำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสไฟฟ้าก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ซ้ำไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสถานะที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าซ้ำไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสไฟฟ้าที่ไหลชั่วขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสไฟฟ้าจากการอัดซึ่งเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดย

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

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรอย่างต่อเนื่อง และสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจร ขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยา การรับและจ่ายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของซ้ำไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของซ้ำไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ซ้ำไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาริเซชัน ขณะที่เกิดโพลาริเซชันซ้ำไฟฟ้าถูกโพลาริซ์ ทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรลดลง การที่จะทำให้โพลาริเซชันหมดไป จำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์ไฟฟ้าแก่วงจรนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรนี้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential overvoltage)

2.6.3 โพลาริเซชัน

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. โพลาริเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration polarization)

เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่ง สารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้น หรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลาย และขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลาย จะมีส่วนทำให้เกิดโพลาริเซชันขึ้นไม่มากนักน้อย ซึ่งผลของการเกิดโพลาริเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจร เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรเป็นไปตามปกติ

2. โพลาริเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization)

เกิดขึ้นจากการชะลอของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออนจะส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันแบบที่กล่าวไว้ได้

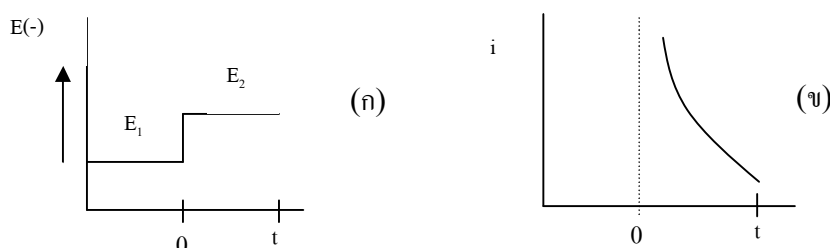
2.7 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

รูปแบบการควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.7.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)

เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์ที่เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก) ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

โดยที่ E_1 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น Diffusion limited rate หรือเป็น Mass transfer limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i = kC$)



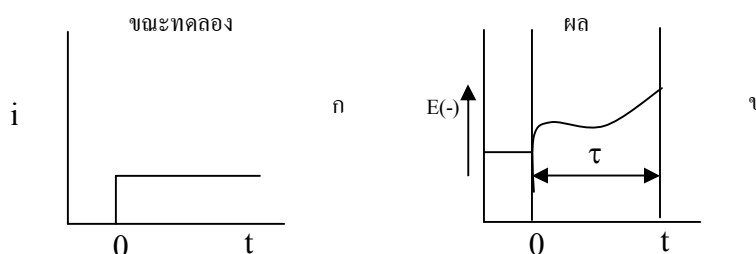
รูปที่ 2.8 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
(Friedrich, 1962)

2.7.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode)

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



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้นี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
(Friedrich, 1962)

2.8 ขั้วไฟฟ้า

ในแต่ละครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ ขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อบริเวณสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด

ขั้วไฟฟ้าแบ่งออกเป็นสามประเภทใหญ่ๆ ตามหน้าที่ของขั้วไฟฟ้า ได้แก่ **ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง** (Reference electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าเฉพาะที่ไม่แปรตามการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร **ขั้วไฟฟ้าใช้งาน** (Working electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ส่งผลต่อค่าศักย์ของอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งในขณะที่เกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในสารละลายอันเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง และ **ขั้วไฟฟ้าช่วย** (Auxiliary electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีหน้าที่ในการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งานโดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร

วัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม และแกรไฟต์ เป็นต้น โดยมีลักษณะและคุณสมบัติในแต่ละชนิด ดังนี้

3.8.1 แกรไฟต์

แกรไฟต์เป็นอัญรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะที่บดแสงและเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์แต่จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าได้น้อย

3.8.2 เหล็กกล้าไร้สนิม

Stainless steel หรือเหล็กกล้าไร้สนิม คือ โลหะผสมเหล็กที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุดร้อยละ 10.5 เป็นองค์ประกอบ โลหะผสมดังกล่าวไม่เป็นสนิมเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อเหล็ก จะเกิดเป็นฟิล์มบางๆ เคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กได้เป็นอย่างดี ปกป้องการกัดกร่อน และไม่ซำรุดง่ายอย่างโลหะทั่วไป

2.8.3 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่พบมากเป็นอันดับ 3 ในเปลือกโลก โดยมีลักษณะเป็นสีขาว นํ้าหนักเบา และแข็งมาก แต่ไม่เปราะ จึงสามารถทำให้เป็นรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ เช่น

ใช้ทำโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงและน้ำหนักเบา อะลูมิเนียมจะทำปฏิกิริยากับโลหะตัวอื่นๆ ได้อย่างรวดเร็ว มีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 และถ้าหาก Al^{3+} อยู่ในน้ำจะสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและไฮโดรไลซิสขึ้นได้

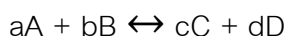
2.9 ศักย์ขั้วไฟฟ้า

คำจำกัดความของศักย์ขั้วไฟฟ้า คือ ค่าศักย์ของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ซึ่งการที่ต้องกำหนดขั้วแอโนดเป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนก็เพื่อไว้อ้างอิงและสามารถอธิบายถึงผลของศักย์ขั้วไฟฟ้าได้ในความหมายเดียวกัน และในการกำหนดเครื่องหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้าตาม IUPAC ได้กำหนดไว้ว่า ในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนกับขั้วไฟฟ้าที่ต้องการหาศักย์ไฟฟ้า และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าเอกทิวติเป็นหนึ่ง ให้ถือว่า ค่าผลลัพธ์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ขั้วไฟฟ้านั้นๆ

2.9.1 สมการเนินสต์ (ลาวัลย์ ศรีพงศ์, 2543)

ในทางปฏิบัติ ศักย์ขั้วไฟฟ้าที่วัดได้จากครึ่งเซลล์หนึ่งๆ (เมื่ออีกครึ่งเซลล์เป็นขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน) แปรเปลี่ยนไปได้ ถ้าสารละลายครึ่งเซลล์ที่ขั้วไฟฟ้านั้นจุ่มอยู่มีความเข้มข้นเปลี่ยนไปโดยเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ศักย์ขั้วไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอธิบายได้ง่ายๆ ว่า เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูง ไอออนในสารละลายย่อมมีจำนวนมาก การส่งผ่านอิเล็กตรอนข้ามผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าย่อมเกิดได้ดีขึ้น ทำให้วัดศักย์ได้เพิ่มขึ้น

ในทางทฤษฎี นักเคมีชาวเยอรมัน ชื่อ Walther Nernst พบว่าในปฏิกิริยาเคมีทั่วไป เช่น



สามารถคำนวณค่าศักย์ขั้วไฟฟ้า หรือศักย์เซลล์เคมีไฟฟ้าได้จากสมการ

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\{C\}^c \{D\}^d}{\{A\}^a \{B\}^b}$$

$$\text{เมื่อ } K_{eq} = \frac{\{C\}^c \{D\}^d}{\{A\}^a \{B\}^b}$$

จะได้

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln K_{eq}$$

ความสัมพันธ์ของศักย์ขั้วไฟฟ้า หรือศักย์เซลล์เคมีไฟฟ้ากับแอกทिवิตีของตัวทำปฏิกิริยา และผลปฏิกิริยาแสดงได้ด้วยสมการที่เรียกว่า สมการเนิร์นสต์ (Nernst Equation)

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{A_{prod}}{A_{react}}$$

เมื่อ	E	=	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่คาดคะเน
	E^0	=	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล)
	T	=	อุณหภูมิองศาสัมพัทธ์
	F	=	ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,491 คูลอมบ์ต่อน้ำหนักสมมูล)
	A, B, C และ D	=	ค่าแอกทिवิตีของสาร A, B, C และ D
	K_{eq}	=	ค่าคงที่สมดุล
	A_{prod}/A_{react}	=	อัตราส่วนแอกทिवิตีของผลปฏิกิริยาและตัวทำปฏิกิริยา

2.9.2 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^0)

จากที่กล่าวในหัวข้อข้างต้นของศักย์ขั้วไฟฟ้า ที่เซลล์ขั้วไฟฟ้ามีขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด ขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วแคโทด และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจุ่มอยู่มีค่าแอกทिवิตีเป็นหนึ่งจะถือได้ว่า ค่าผลลัพท์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ขั้วไฟฟ้านั้นๆ โดยในความหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้านี้ จะหมายถึงศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ซึ่งค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าที่หาได้ด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะมีค่าเฉพาะของแต่ละครึ่งเซลล์ โดยที่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์หนึ่งๆ ที่มีค่าแอกทिवิตีเป็นหนึ่ง ไปสู่ค่าแอกทिवิตีที่ในสภาวะสมดุลได้ โดยมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าคงที่ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^0) ดังนี้

1. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าหนึ่งๆ ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ โดยที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดเสมอ
2. ตามสัจนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะต้องได้มาจากการเขียนปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น
3. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะไม่ผันแปรตามจำนวนโมลที่เกิดจากการใช้ปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
4. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิ จึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิพร้อมกับค่าของ (E^0) ด้วยเสมอ
5. ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยตัวเลขและเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายบวกหรือลบจะมีความหมายที่แตกต่างกัน คือ เครื่องหมายบวก จะหมายถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาจะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ส่วนเครื่องหมายลบ จะบ่งบอกถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้อยกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานขั้วไฟฟ้าของสารละลายในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน (SHE) (ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

ครึ่งปฏิกิริยา	E^0 (V)
$\text{Cl}_2 + 2e^- \leftrightarrow 2\text{Cl}^-$	+1.360
$1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	+1.230
$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3e^- \leftrightarrow \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.960
$\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 3e^- \leftrightarrow \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0.940
$\text{Fe}^{3+} + e^- \leftrightarrow \text{Fe}^{2+}$	+0.771
$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.170
$2\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2$	+0.000
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Ni}$	-0.250
$\text{Cr}^{3+} + e^- \leftrightarrow \text{Cr}^{2+}$	-0.410
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Fe}$	-0.440
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Zn}$	-0.763
$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.830

(ต่อ)	
ครึ่งปฏิกิริยา	E^0 (V)
$\text{Cr}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Cr}$	-0.913
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \leftrightarrow \text{Al}$	-1.660
$\text{Na}^+ + e^- \leftrightarrow \text{Na}$	-2.714

2.10 ศักย์เซลล์เคมีไฟฟ้า

ศักย์เซลล์เคมีไฟฟ้าของวงจรหนึ่งๆ ประกอบด้วย ศักย์อุณหพลวัต (Thermodynamic potential, E_{Cell}) ซึ่งเป็นศักย์ทางทฤษฎีที่คำนวณได้ กับศักย์อื่นๆ ที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ได้แก่ ศักย์ที่รอยต่อสารละลาย (Liquid junction potential, E_J) ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (Ohmic potential, IR drop, E_R) และศักย์จากการเกิดโพลาไรเซชัน, E_p , π)

2.10.1 ศักย์อุณหพลวัต (E_{Cell})

ผลจากแต่ละขั้วไฟฟ้าในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ ซึ่งคำนวณได้จากสมการเนินสต์ เป็นศักย์อุณหพลวัต ซึ่งตามสัญนิยมได้กำหนดว่า

$$E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cathode}} - E_{\text{Anode}}$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } E_{\text{Cathode}} &= \text{ศักย์ขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด} \\ E_{\text{Anode}} &= \text{ศักย์ขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด} \end{aligned}$$

การคำนวณ E_{Cell} เป็นการหาผลต่างศักย์จากขั้วแคโทด และขั้วแอโนด ซึ่งคำนวณจากสมการเนินสต์ ศักย์อุณหพลวัตของเซลล์หรือเรียกสั้นๆ ว่า ศักย์ของเซลล์ที่ได้จากการคำนวณนี้ แม้ไม่ใช่ศักย์ที่แท้จริงของเซลล์เคมีไฟฟ้าในทางปฏิบัติ แต่ก็ทำให้สามารถทราบความเป็นไปได้ของการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเซลล์เคมีไฟฟ้า ในวงจรไฟฟ้าต่างๆ ค่าศักย์ของเซลล์ที่คำนวณได้มักไม่ต่างไปจากการปฏิบัตินัก

2.10.2 ศักย์ที่รอยต่อสารละลาย (E_J)

ในเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ ถ้าสารละลายของแต่ละครึ่งเซลล์มีความแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นแตกต่างกันในความเข้มข้นของสารละลาย หรือแตกต่างกันในชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ตรงรอยต่อระหว่างสารละลายทั้งสองนี้จะเกิดความต่างศักย์ขึ้น เรียกว่าศักย์ที่รอยต่อสารละลาย (E_J) การเกิดความต่างศักย์ขึ้นนี้เป็นผลจากธรรมชาติของการปรับสมดุลของสารละลายในแต่ละครึ่งเซลล์ ในระหว่างการปรับสมดุลมีการเคลื่อนที่ของไอออนเกิดขึ้น ไอออนแต่ละชนิดไม่ว่ามีประจุบวกหรือประจุลบมีความเร็วของการเคลื่อนที่ต่างกัน ตามแต่ขนาดของมวลโมเลกุล ผลลัพธ์จากการปรับสมดุลจึงมักเป็นการแบ่งแยกประเภท หรือชนิดของไอออนตามประจุออกเป็นสองพวกตามความเร็วของการเคลื่อนที่ ไอออนที่แบ่งแยกออกนี้ไม่เหมือนกัน จึงเกิดความแตกต่างของศักย์ขึ้นอย่างชัดเจน และมากพอที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์วัดศักย์

$$E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cathode}} - E_{\text{Anode}} + E_J$$

2.10.3 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (E_R)

ในเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ การที่กระแสไฟฟ้าจะไหลครบวงจรของเซลล์ได้นั้น ต้องมีพลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งที่เพียงพอต่อการเอาชนะความต้านทานของวงจร ซึ่งศักย์ไฟฟ้าจำนวนนี้ คือ ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential) โดยมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับความต้านทาน (IR) ดังนั้นค่าผลลัพธ์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม จึงต้องมีเทอมของศักย์ไฟฟ้าจากความต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังสมการ

$$E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cathode}} - E_{\text{Anode}} - E_R$$

2.10.4 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน (E_p, π)

โพลาริเซชันเกิดขึ้นได้ 2 แบบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.3 คือ เกิดเนื่องมาจากผลของความเข้มข้นและแบบจลน์ ซึ่งต้องแก้ไขโดยการเพิ่มประมาณของกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นหรือทำการเพิ่มศักย์ของวงจรให้สูงขึ้น ศักย์ที่ถูกเพิ่มนี้จะเรียกว่า “ศักย์เกินตัว” (Overpotential, π) จึงทำให้ค่าผลลัพธ์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวมต่างจากค่าอุณหพลวัตจากการคำนวณ ดังนั้นถ้ามีโพลาริเซชันเกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ การแสดงค่าผลลัพธ์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม เป็นดังสมการ

$$E_{\text{Cell}} = E_{\text{Cathode}} - E_{\text{Anode}} - E_{\text{R}} - \pi$$

2.11 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์เคมีไฟฟ้า

การไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์เคมีไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำเซลล์เคมีไฟฟ้า โดยต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 จูล เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมป์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ และจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมป์ ดังสมการ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = \text{คูลอมป์} \times \text{โวลต์}$$

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากเซลล์เคมีไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุที่อยู่ในหน่วยคูลอมป์จึงขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปฏิกิริยา โดยทุกๆ 1 โมลของอิเล็กตรอน จะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมป์ หรือ F คูลอมป์ ซึ่ง F ก็คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ ดังนั้นสมการที่แสดงถึงงานทางไฟฟ้าสุทธิที่มีหน่วยของอิเล็กตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ก็คือ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ } (W_{\text{elec}}) = nF \times \text{โวลต์}$$

2.11.1 การแลกเปลี่ยนไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออน

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์ จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งวัดได้ในหน่วยของแอมแปร์ (Amp) โดยจำนวนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด จะถูกวัดในรูปค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density, I) ส่วนการวัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในวัสดุจะเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (Conductivity) ซึ่งโลหะโดยส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎของโอห์ม โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_f) ซึ่งมีหน่วยเป็น โวลต์ต่อเซนติเมตร ได้คือ

$$I = \text{ohm} \times E_f$$

$$E_f = \frac{I}{\text{ohm}}$$

$$E_f = \frac{V}{R \times \text{ohm}}$$

โดย	ohm	=	ค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โหมห์ต่อเซนติเมตร
	V	=	ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น โวลต์
	R	=	ค่าความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น โหมห์
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น แอมแปร์

2.11.2 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า มีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยา ส่วนค่าความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในวิธีทางเคมีไฟฟ้านั้นจะหมายถึงความต้านทานที่เกิดขึ้นในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าการนำไฟฟ้ากับค่าความต้านทานทางกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นไปตามสมการ คือ

$$R = \frac{L}{C \times A}$$

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

2.11.3 กำลังไฟฟ้า

ปริมาณไฟฟ้า Q คูลอมบ์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในเวลา t วินาที

$$Q = I \times t$$

พลังงานไฟฟ้า (W) จะหมายถึง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานในเวลา t วินาที โดยที่ตัวต้านทานนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น E โวลต์

$$W = EI \times t$$

$$W = E \times Q$$

กำลังไฟฟ้า (Watt, P) คำนวณได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

$$P = \frac{W}{t}$$

2.12 กฎฟาราเดย์เกี่ยวกับการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า (อินทรีรา หาญพงษ์พันธ์, 2539)

มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แคโทด ในขณะที่เกิดปฏิกิริยา จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยใช้ปริมาณไฟฟ้าที่เท่ากัน จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการละลายอิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้ไอเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์

$$F \text{ (Faraday)} = e \times N$$

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

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

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

$$X \text{ Coulomb} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)}$$

เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้โดยการใช้อุปกรณ์ของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = \frac{s(M.W.)It}{nF}$$

โดย	W	=	มวลของสารที่ควรเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี มีหน่วยเป็น กรัม
	s	=	สัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี
	M.W.	=	มวลโมเลกุล มีหน่วยเป็น กรัมต่อโมล
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง มีหน่วยเป็น แอมแปร์
	t	=	เวลา มีหน่วยเป็น วินาที
	n	=	จำนวนโมลของตัวออกซิไดซ์ตามสมการเคมี มีหน่วยเป็น น้ำหนักสมมูลต่อโมล
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์ต่อน้ำหนักสมมูล)

2.13 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency (%))

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการเคมีไฟฟ้า นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เพราะกระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงสุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับว่าเป็นกระบวนการที่ดี โดยค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จากสมการ

$$\text{Current efficiency (\%)} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \times 100\%$$

2.14 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์เคมีไฟฟ้า (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

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

2.15 อิเล็กโทรแกรวิเมตรี (Electrogravimetry)

วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพื่อหาการกำจัดนิกเกิลจากของเสียที่ทราบปริมาณของนิกเกิลที่แน่นอนจากการวัดปริมาณนิกเกิลด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS โดยเป็นการประยุกต์เทคนิค “อิเล็กโทรแกรวิเมตรี” (Electrogravimetry) ซึ่งเป็นเทคนิควิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าที่วัดปริมาณสารตัวอย่างจากน้ำหนักของของแข็งที่พอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า ขณะที่วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่ได้วัดปริมาณนิกเกิลที่มีอยู่ในของเสียจากน้ำหนักของนิกเกิลที่พอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า แต่เป็นการวัดปริมาณนิกเกิลที่เหลือทางอ้อมจากของเสียที่ทราบปริมาณนิกเกิลภายหลังจากการที่นิกเกิลไปพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS โดยผลต่างของปริมาณนิกเกิลในของเสียที่ทราบปริมาณที่แน่นอนกับปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายจะทำให้ทราบปริมาณนิกเกิลที่สามารถกำจัดได้จากของเสีย ซึ่งนำไปสู่การคำนวณหาปริมาณนิกเกิลที่สามารถนำกลับได้นั่นเอง ดังนั้นจึงขอกกล่าวถึงรายละเอียดของเทคนิคอิเล็กโทรแกรวิเมตรีซึ่งเป็นรากฐานของการวิเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย

อิเล็กโทรแอกวิเมตรี เป็นเทคนิควิธีวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าวิธีหนึ่งที่มีการจัดเซลล์เป็นแบบอิเล็กโทรไลต์ คือ ต้องอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากภายนอก ในการทำให้สารตัวอย่างถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ ให้ผลปฏิกิริยาเป็นของแข็งพอกพูนอยู่ที่ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ซึ่งจากน้ำหนักของของแข็งที่เพิ่มขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าจะสามารถคำนวณหาปริมาณสารตัวอย่างได้ อิเล็กโทรแอกวิเมตรีประกอบด้วยกลไกทางไฟฟ้าที่ต่อเนื่องกันถึง 2 กลไก คือ กลไกการแยกสารตัวอย่างออกจากสารละลายอาจเรียกเป็นการแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) ตามด้วยกลไกการพอกพูนสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้า อาจเรียกเป็นการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Electrodeposition) ด้วยกลไกทางไฟฟ้าที่ปรับให้เหมาะสมเฉพาะกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้การวิเคราะห์มีความจำเพาะเจาะจงสูง ไม่มีการรบกวนหรือปะปนของสารที่ไม่ต้องการ ทั้งคำนวณปริมาณสารตัวอย่างได้โดยตรงจากน้ำหนักที่พอกพูนที่เพิ่มขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ไม่จำเป็นต้องมีการสร้างเส้นกราฟเทียบมาตรฐาน

2.15.1 หลักการในการวิเคราะห์

มีหลักการสำคัญสามประการ คือ ประการแรก พลังงานในรูปศักย์จากภายนอกที่ให้กับเซลล์ต้องมีค่ามากกว่าค่าศักย์แตกตัว เพื่อให้เกิดการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า ประการที่สอง ระหว่างการดำเนินปฏิกิริยาของการวิเคราะห์ควรต้องมีการกวนสารละลายตลอดเวลา เพื่อช่วยเร่งการนำพาไอออนสารตัวอย่างจากชั้นของสารละลายไปใกล้กับผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า โดยมีชั้นของการแพร่บางที่สุดที่จะบางได้ เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนสารที่ขั้วไฟฟ้าถูกจำกัดด้วยอัตราความเร็วของการนำพาไอออนจากแรงกวนสารละลาย และกลไกการนำพาไอออนด้วยการแพร่เป็นไปอย่างรวดเร็ว ประการสุดท้าย สารตัวอย่างต้องเกิดเป็นผลปฏิกิริยาพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ จึงจะหาปริมาณของสารตัวอย่างได้ หลักการที่กล่าวข้างต้นทั้งสามประการ มีความสำคัญและสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันในการทำให้สารตัวอย่างเกิดการแยกสลายด้วยไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ จนสามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารได้

1. ศักย์แตกตัว (E_D)

ศักย์ต่ำสุดของเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือรีดักชันของสารตัวอย่างที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ เรียกว่า ศักย์แตกตัว ในทางทฤษฎี ศักย์แตกตัวคำนวณได้จากศักย์อุณหภูมิวัตของเซลล์ (E_{Cell}) อันเป็นผลต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์ โดยใช้สมการเนินสต์ ในทางปฏิบัติ พลังงานในรูปศักย์ที่ให้กับเซลล์ต้องคำนึงผลการไหลของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อผลรวมศักย์ของเซลล์ด้วย โดยต้องรวมค่าศักย์จากความต้านทานของวงจร ($E_R = IR$) กับศักย์เกินตัวในการป้องกันหรือแก้ไขการเกิดโพลาไรเซชัน (π) อีกด้วย โพลาไรเซชันอันเนื่องมาจากความ

เข้มข้นลดลงได้ เมื่อไอออนในสารละลายถูกนำพาด้วยกลไกคอนเวกชัน โดยการกวนสารละลาย หรือการหมุนของขั้วไฟฟ้า ดังนั้นค่าศักย์เกินตัวมักเกี่ยวข้องกับการเกิดโพลาริเซชันแบบจลน์ โดยเมื่อมีแก๊สเกิดขึ้นในปฏิกิริยา หรือมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าค่อนข้างสูง ค่าศักย์เกินตัวพลอยสูงไปด้วย

ดังนั้น ค่าศักย์แตกตัว (E_D) ที่ให้กับเซลล์ เพื่อเกิดปฏิกิริยาการแยกสลายของสารตัวอย่างในการวิเคราะห์หรืออิเล็กโทรเคมีตรี ควรประกอบด้วยศักย์ต่างๆ ดังนี้

$$E_D = E_{\text{Cell}} - E_R - \pi$$

2. การแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า

เมื่อพลังงานในรูปศักย์ที่ให้กับเซลล์มีค่ามากกว่าศักย์แตกตัว เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันของไอออนสารตัวอย่าง ได้ผลปฏิกิริยาในรูปโลหะหรือของแข็งที่ขั้วไฟฟ้า กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “เกิดการแยกสลายของสารด้วยไฟฟ้า” ระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยาการแยกสลายนี้ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในสารละลายตัวอย่าง คือ ความเข้มข้นของตัวปฏิกิริยาลดลงตามสัดส่วนของผลปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ขั้วไฟฟ้า โดยเฉพาะขั้วที่มีการพอกพูนของผลปฏิกิริยา โดยการเปลี่ยนแปลงของศักย์เล็กน้อยขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่รับ-ส่ง ในปฏิกิริยา (n) ด้วย เมื่อผลปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น ศักย์เปลี่ยนไปทางลบมากขึ้น ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เป็นไปตามปกติของการเกิดปฏิกิริยา แต่มีผลทำให้ศักย์รวมของเซลล์แปรปรวนตามสัดส่วนความเข้มข้นของสารที่ขั้วแคโทดด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรก็แปรตามความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา ซึ่งลดลง ทำให้ศักย์จากความต้านทาน ($E_R = IR$) เปลี่ยนไปเช่นกัน สำหรับศักย์เกินตัว (π) แม้การนำพาไอออนในสารละลายด้วยกลไกคอนเวกชันมีส่วนช่วยให้ค่าของ π ไม่แปรไปมากตลอดการวิเคราะห์ ผลศักย์รวมย่อมกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของ π เช่นกัน

ดังนั้น ระหว่างการดำเนินไปของกระบวนการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า ค่าศักย์เซลล์มิได้เท่ากับค่าศักย์แตกตัวตลอดเวลา เพราะสาเหตุต่างๆ ข้างต้น ถ้าสารตัวอย่างมีเพียงสารชนิดเดียวที่เกิดปฏิกิริยาพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า การแปรเปลี่ยนศักย์เซลล์เพียงแต่ทำให้เวลาของการวิเคราะห์นานมากขึ้นกว่าการแยกสลายเสร็จสมบูรณ์ แต่ถ้าสารตัวอย่างประกอบด้วยสารมากกว่าหนึ่งชนิดที่ต้องทำให้แยกจากกัน และเกิดการจับกับขั้วไฟฟ้า นอกจากเวลาในการวิเคราะห์นานมากขึ้นแล้ว ยังอาจเกิดปฏิกิริยารวมของสารมากกว่าหนึ่งชนิดพอกพูนบนขั้วไฟฟ้าด้วย

ถ้าควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า (โดยเฉพาะขั้วที่ผลปฏิกิริยาไปพอกพูนอยู่) ให้มีค่าตามต้องการได้ การแยกสลายของสารย่อมดำเนินไปตามคาดหมายอย่างสมบูรณ์ ทั้งไม่มีการรบกวน

ของสารอื่นระหว่างระหว่างการวิเคราะห์สารหนึ่งๆ ด้วย การควบคุมเฉพาะศักย์ขั้วไฟฟ้า โดยการวัดค่าศักย์ขั้วไฟฟ้าตลอดเวลา เทียบกับศักย์ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง แล้วจึงปรับศักย์เซลล์ให้มีค่าในระดับที่ทำให้ศักย์ขั้วไฟฟ้าใช้งานอยู่ในภายในช่วงของการเกิดปฏิกิริยาตลอดการวิเคราะห์ ทำให้เกิดการแยกสลายของสารอย่างมีประสิทธิภาพตามต้องการ

3. การพอกพูนสารด้วยไฟฟ้า

การวิเคราะห์หาปริมาณสารด้วยเทคนิควิธีอิเล็กโทรเกรวิเมตรีเป็นไปได้อย่างถูกต้อง ต่อเมื่อสารตัวอย่างที่เกิดปฏิกิริยามีการแยกสลายอย่างสมบูรณ์ และมาพอกพูนบนขั้วไฟฟ้าจนหมด สารตัวอย่างมักเป็นโลหะควรจับบนขั้วไฟฟ้าได้แน่น เรียบ สม่ำเสมอ เพื่อให้สามารถนำขั้วไฟฟ้าที่มีผลปฏิกิริยาพอกพูนอยู่ ไปล้างให้ปราศจากไอออนต่างๆ ทำให้แห้ง และชั่งน้ำหนักได้ โดยไม่เกิดการสูญเสียสารเลย

เมื่อการพอกพูนของสารตัวอย่างบนขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรจะลดลงจนเป็นศูนย์ หรือจนมีค่าคงที่ที่น้อยมาก แม้ยังคงให้พลังงานแก่เซลล์ปฏิกิริยาหรือการไหลของกระแสไฟฟ้ายอมไม่เกิดขึ้นอีก ซึ่งควรต้องนำขั้วไฟฟ้าที่มีการพอกพูนของสารออกจากวงจรของเซลล์ ก่อนนำแหล่งพลังงานไฟฟ้าออก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการผันกลับของปฏิกิริยา ซึ่งทำให้สารที่จับกับขั้วไฟฟ้ากลับละลายไปในสารละลาย

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนของผลปฏิกิริยา ได้แก่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ โดยทั่วไปพลังงานศักย์ที่ให้กับเซลล์ไม่ควรมากจนทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากกว่า 0.1 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร การเกิดกระแสไฟฟ้ามากเกินไป เหมือนเป็นการเร่งการพอกพูนของสารทำให้การพอกพูนสารไม่เรียบ การที่ไอออนในสารละลายมีการเคลื่อนไหวตลอดเวลาด้วยแรงกวนสารละลาย หรือการหมุนของขั้วไฟฟ้า มีส่วนช่วยการเคลื่อนของไอออนในสารละลาย เร่งการพอกพูนสารที่ขั้วไฟฟ้า แต่ทั้งนี้ขึ้นกับลักษณะและสภาวะการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละสารตัวอย่างด้วย

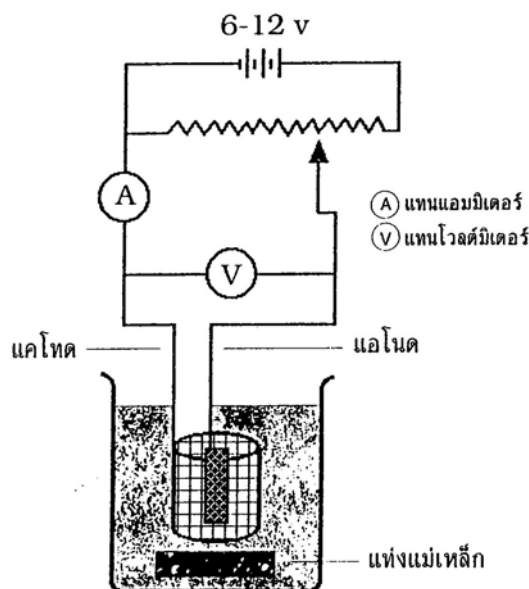
สาเหตุหนึ่งของการทำให้การพอกพูนสารไม่เรียบ หลุดง่าย เป็นเพราะการเกิดแก๊สขึ้นระหว่างการวิเคราะห์ การเกิดรีดอกชันของน้ำให้แก๊สไฮโดรเจน หรือการเกิดออกซิเดชันของน้ำให้แก๊สออกซิเจนในระหว่างการพอกพูนสารวิเคราะห์ ถึงแม้ฟองแก๊สทำให้เกิดการเคลื่อนพาไอออนดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน ก็สกัดกั้นการพอกพูนของสารบนขั้วไฟฟ้า ทำให้การเกาะตัวของสารไม่ราบเรียบ และหลุดออกได้ง่ายขณะล้างขั้วไฟฟ้าก่อนชั่งน้ำหนัก

2.15.2 เทคนิคการวิเคราะห์

แบ่งเทคนิควิธีการวิเคราะห์อิเล็กโทรเกรวิเมตรีได้เป็น 2 วิธี วิธีแรก เป็นการให้พลังงานในรูปศักย์ที่มากกว่าศักย์แตกตัวของสารตัวอย่าง ซึ่งทำให้สารตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาออกพูนบนขั้วไฟฟ้าจนสมบูรณ์ โดยไม่ต้องควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้าเพียงแต่คอยปรับศักย์หรือกระแสไฟฟ้าให้คงที่ตลอดการวิเคราะห์ เรียกวิธีนี้ว่า **อิเล็กโทรเกรวิเมตรีแบบกระแสคงที่ หรือแบบไม่ควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า** อีกวิธีเป็นการควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้าใช้งานให้มีค่าคงที่ เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เรียกวิธีนี้ว่า **อิเล็กโทรเกรวิเมตรีแบบควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า** ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีแรกซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในงานวิจัย

อิเล็กโทรเกรวิเมตรีแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ หรือแบบไม่ควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า

การวิเคราะห์ปริมาณของสารตัวอย่างโดยวิธีนี้ทำได้ง่ายๆ โดยการต่อเซลล์เข้ากับวงจรไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แหล่งพลังงานไฟฟ้า (แบตเตอรี่ขนาด 6 ถึง 12 โวลต์) มาตรฐานวัดกระแสไฟฟ้า A มาตรฐานวัดศักย์ V และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรเกรวิเมตรี (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

การพอกพูนของผลปฏิกิริยาจากการแยกสลายของสารตัวอย่าง เกิดขึ้นเมื่อพลังงานในรูปศักย์ที่ให้กับเซลล์ในระดับหนึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม

กระแสไฟฟ้าให้อยู่ที่ระดับเดิมนั้น หรือให้อยู่ที่ระดับกระแสไฟฟ้าหนึ่งที่ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้จนเสร็จสิ้น เกิดการพอกพูนของสารวิเคราะห์อย่างสมบูรณ์

การทำอิเล็กโทรแกรมวิธีวิธีนี้ ไม่จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จำเพาะหรือยุ่งยาก เหมาะกับการวิเคราะห์โลหะในสารตัวอย่าง หรือการแยกโลหะบริสุทธิ์จากสารตัวอย่าง มากกว่าใช้ในการวิเคราะห์ส่วนผสมของตัวอย่างที่มีโลหะมากกว่าหนึ่งชนิด

สารตัวอย่างที่วิเคราะห์หาปริมาณด้วยเทคนิคนี้มักเป็นสารประกอบของไอออนโลหะ โดยโลหะจะแยกจากสารละลายมาพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า เนื่องจากศักย์ขั้วไฟฟ้ามีการแปรเปลี่ยนตามสมการเนินสตร๊ระหว่างการวิเคราะห์ และศักย์เกินตัวในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนบนขั้วไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้ระหว่างการทำปฏิกิริยาการพอกพูนโลหะบนขั้วไฟฟ้ามีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่าศักย์แตกตัวในการทำให้เกิดปฏิกิริยาพอกพูนโลหะบนขั้วไฟฟ้านั้น มีค่าต่างจากศักย์เกินตัวในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนมากน้อยเพียงใด ถ้าต่างกันมาก การแปรเปลี่ยนศักย์ขั้วไฟฟ้าระหว่างการวิเคราะห์อาจไม่ถึงจุดศักย์ของการแก๊สไฮโดรเจน

2.16 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Scott และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาการนำกลับของโลหะดีบุก ตะกั่ว และทองแดงจากสารละลายที่ได้จากการล้างแผงวงจรไฟฟ้าโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจร ในการศึกษาครั้งนี้มีสองวิธีในการนำกลับโลหะ วิธีแรก คือ การใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าในการนำกลับโลหะทั้งหมด วิธีที่สอง คือ การใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้าในการเกิดการพอกพูนของทองแดง และทำให้เกิดการตกตะกอนของดีบุกและตะกั่ว ซึ่งนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการเข้าเตาเผา การใช้สารละลายกรดไนตริกในการล้างแผงวงจรเพราะสามารถใช้ในการนำกลับโลหะโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้าได้ และลดการเกิดหมอกระหว่างการล้างแผงวงจร ในวิธีการแรกแยกดีบุกออกจากสารละลายด้วยวิธีการกรอง เนื่องจากเกิดไฮดรอกไซด์ออกไซด์ ตะกอนที่เกิดขึ้นสามารถละลายได้ในกรดไฮโดรคลอริก และนำกลับได้โดยการใช้เทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีไททาเนียมเป็นขั้วแอโนด หลังจากที่มีการแยกดีบุกแล้วสารละลายที่มีไอออนของทองแดงและตะกั่วจะสามารถนำกลับด้วยการพอกพูนของไอออนที่ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับดีบุก และจะได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง กระบวนการนี้เป็นเทคโนโลยีที่สะอาดสำหรับการนำกลับของโลหะ อย่างไรก็ตามก็ยังไม่เป็นการประหยัดถ้าหากเทียบกับการตกตะกอนด้วยต่าง อีกตัวเลือกหนึ่งของการนำกลับทองแดงโดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า โดยทำการตกตะกอนดีบุกและตะกั่ว ก่อนที่จะมีการพอกพูนของทองแดงเกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ SnO_2 และ PbSO_4 จะถูกส่งไปเผา เพื่อที่จะผลิตโลหะผสมขึ้นมา วิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดแต่ไม่เป็นมิตรกับ

สิ่งแวดล้อมเหมือนกับการนำกลับโลหะทั้งหมดโดยใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้า เพราะว่าการเผาไหม้จะเกิดแก๊สและเกิดกากโลหะขึ้น

จันฐบรรณ วรณรัตน์ (2542) ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการแยกนิเกิลด้วยกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือสารละลายนิเกิลสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1 ลิตร ขั้วแคโทด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม พื้นที่ผิว 89 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนด ทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ พื้นที่ผิว 82 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า ค่าพีเอช 3 ถึง 3.5 และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นสภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 32 ในการแยกนิเกิลที่ร้อยละ 60 โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟูริก และหากปรับค่าพีเอชด้วยกรดบอริกจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อย ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวปนเปื้อนในน้ำเสีย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวจำพวกสารที่มีประจุลบ โดยหากมีการปนเปื้อนเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพลดลงร้อยละ 70

Fourcade และ Tzedakis (2000) ได้ทำการศึกษาวิธีการทางเคมีไฟฟ้าในการเกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดต์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน การศึกษาถึงปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่ากระแสไฟฟ้า ณ จุดศักยภาพต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดติดของซิลเวอร์ไอโอไดต์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดต์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สองซิลเวอร์ไอโอไดต์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สาม คือ การเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งของซิลเวอร์ไอโอไดต์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนหลักเมื่อเทียบกับในสองขั้นตอนแรกเพราะใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากที่สุด คือ 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

มะลิ หุ่นสม (2544) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เพื่อการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โคโรเมียม และนิเกิล จากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรก คือ การนำกลับของโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับของโลหะโคโรเมียมและนิเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือก

ผ่าน ส่วนที่สามเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่า โลหะแต่ละชนิดมีสภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียม และนิกเกิล ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10, 90 และ 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

หทัยรัตน์ ชื้อสุวรรณ (2544) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าเพื่อแยกโลหะหนักออกจากตะกอน กระบวนการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ละลายโลหะหนักออกจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสีย และการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า พบว่าในขั้นตอนการละลายตะกอนค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายโลหะหนักออกจากตะกอนปริมาณตะกอนแห้งประมาณร้อยละ 0.7 โดยมีมวลต่อปริมาตรกรดซัลฟูริก คือ ประมาณ 1.0 โดยมีค่าความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดโดยประมาณดังนี้ ทองแดง 70 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิล 95 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสี 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียม 7 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้นตอนการกำจัดโลหะหนักพบว่า มากกว่าร้อยละ 90 ทองแดงสามารถแยกออกมาได้ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด และโลหะชนิดอื่นๆ ที่เหลือในสารละลายถูกกำจัดออกด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electroprecipitation) พบว่า สามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมได้เกือบร้อยละ 100 และกำจัดสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 80 ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110-130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยพลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 25-30 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเมตร

Carlos และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของทาร์เทรต ต่อการเกิดการพอกพูนของทองแดงและดีบุก ในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 โมลาร์ โดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า จากสารละลายที่ไม่มีไฮยาไนด์ การพอกพูนของทองแดงและดีบุกที่ขั้วไฟฟ้า พบว่า ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.31 โวลต์ ทองแดงจะพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าร้อยละ 66-68.5 ในขณะที่ดีบุกพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าร้อยละ 31.5-34 และที่ค่าศักย์ไฟฟ้า -0.64 โวลต์ ทองแดงจะพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าร้อยละ 45-51 ในขณะที่ดีบุกพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้าร้อยละ 49-55 และจากการศึกษา จะพบว่าทาร์เทรตจะเพิ่มอัตราการเกิดผลึก และเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า ทั้งที่มีและไม่มีทาร์เทรตเกิดขึ้นที่ 11 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อย่างไรก็ตามการมีทาร์เทรตจะทำให้เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าในการเกิดการพอกพูนของโลหะที่ขั้วไฟฟ้านำไปสู่การประหยัดพลังงาน

Lee และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษากำหนดปริมาณนิกเกิลจากดินลูกรังคุณภาพต่ำที่มีนิกเกิลเป็นองค์ประกอบน้อยกว่าร้อยละ 2 โดยมวล ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยเก็บตัวอย่างดินลูกรังในประเทศอินโดนีเซีย 4 แห่ง มาทำการทดสอบโดยการต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 3.2 ถึง 32 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 32 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร นิกเกิลในดินลูกรังถูกนำกลับออกมามากกว่าร้อยละ 60 แต่เจือปนกับเหล็กเชื่อว่าการนำกลับนิกเกิลออกมาจากดินลูกรังนั้นอาจมีเหล็กละลายออกมาในสารละลายด้วย และมีผลต่อการแยกสลายทางไฟฟ้าแข่งขันกับนิกเกิล โดยการนำกลับนิกเกิลด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างต่ำแต่จะมีแมงกานีสหรือเหล็กเจือปนออกมาด้วย

อภิรตี สุนทรภา (2549) ได้ทำการศึกษากำหนดประสิทธิภาพการตกตะกอนทางเคมีในน้ำเสียสังเคราะห์ และวิธีทางเคมีไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง เพื่อการนำกลับของดีบุก ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์มีดีบุกเข้มข้น 0.01 โมลาร์ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกศึกษากำหนดประสิทธิภาพการตกตะกอนทางเคมีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ พบว่า ที่ค่าพีเอช 3 สามารถนำกลับดีบุกได้ร้อยละ 56.03 และที่ค่าพีเอช 2 สามารถนำกลับดีบุกได้ ร้อยละ 79.68 ตามลำดับ ส่วนที่สองศึกษาวิธีทางเคมีไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า ชนิดขั้วแอโนดเป็นแกรไฟต์และขั้วแคโทดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถนำกลับดีบุกได้ร้อยละ 100 โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 500 มิลลิแอมแปร์ พื้นที่ขั้วไฟฟ้า 6.5 x 12 ตารางเซนติเมตร และระยะห่างระหว่างขั้ว 5 เซนติเมตร ส่วนที่สามศึกษาวิธีทางเคมีไฟฟ้าในน้ำเสียจริงโดยเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในส่วนที่สองมาทำการทดสอบ พบว่า ให้ค่าการนำกลับดีบุกได้ร้อยละ 86.86 และจากการศึกษา พบว่า ค่าใช้จ่ายทางเคมีไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าการตกตะกอน แต่การนำกลับดีบุกด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้านั้นจะให้ดีบุกบริสุทธิ์ และไม่ปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อม

Orinakova และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษากำหนดเปรียบเทียบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายคลอไรด์ และสารละลายซัลเฟต ที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG (Paraffin Impregnated Graphite) พบว่า กลไกการพอกพูนของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG แตกต่างกัน โดยสารละลายคลอไรด์จะเป็นกลไกของ Ni^{2+} รั่วอิเล็กตรอนเกิดเป็น $NiCl^+$ ขณะที่สารละลายซัลเฟตจะเป็นกลไกของ H^+ รั่วอิเล็กตรอนเกิดเป็น $NiOH^+$ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าไปตรวจสอบด้วย SEM (Scanning Electron Micrographs) พบว่า เชื่อได้ว่าคุณภาพการพอกพูนของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG น่าจะมีผลมาจากชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.5 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดนิกเกิล (Ni^{2+}) จากของเสียด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

หัวข้อ	จัฐบรรณ วรณรัตน์	มะลิ หุ่นสม	หทัยรัตน์ ชื้อสุวรรณ
1. ปีที่ทำการวิจัย	2542	2544	2544
2. องค์ประกอบโลหะหนักในตัวอย่าง	Ni^{2+}	Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{6+}	Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+}
3. แหล่งที่มาของตัวอย่าง	น้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ	สลัดจ์ โรงงานบำบัดน้ำเสีย
4. ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni^{2+}	1,000 mg/L	128 mg/L	95 mg/L
5. รูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้า	ไม่มีรอยต่อ	มีรอยต่อ โดยใช้เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ	
6. ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมในการทดลอง	กระแสไฟฟ้า	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า
7. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	เหล็กกล้าไร้สนิม		
8. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	ไทเทเนียมเคลือบ รูทีเนียมออกไซด์	แพลทินัม/SCE (RE)	ไทเทเนียมเคลือบ รูทีเนียมออกไซด์
9. ค่าพีเอชเริ่มต้น	3.3 (ปรับด้วย H_2SO_4)	1 (ปรับด้วย H_2SO_4)	1 (ละลายด้วย H_2SO_4)
10. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับการกำจัดโลหะหนัก	ดีที่สุดที่ 140 A/m^2	ดีที่สุดที่ 90 A/m^2	ดีที่สุดที่ 130 A/m^2
11. ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดสำหรับการกำจัด Ni^{2+}	32%	ต่ำกว่า 1%	ต่ำกว่า 1%
12. ร้อยละการกำจัด Ni^{2+}	89.95%	99%	90%
13. เวลาที่ใช้ในการกำจัด Ni^{2+}	8.15 ชั่วโมง	8.5 ชั่วโมง	13 ชั่วโมง
14. Ni^{2+} ถูกกำจัดในรูปของ	$\text{Ni}_{(s)}$	$\text{Ni}(\text{OH})_{2(s)}$	

บทที่ 3

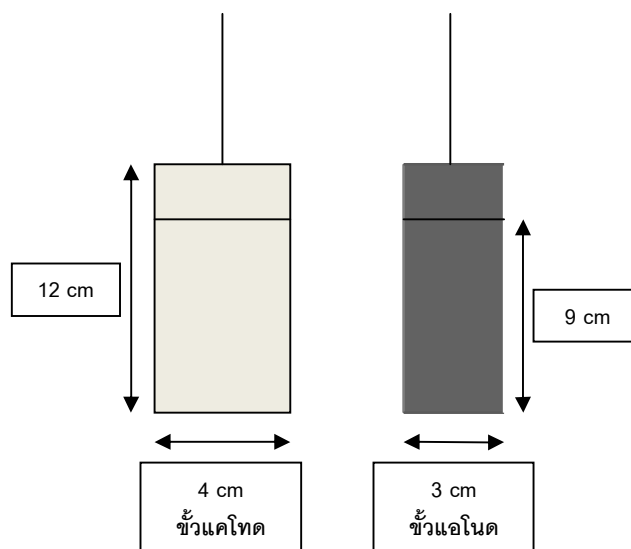
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply): GW, INSTEK
2. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS): GBC, Avanza
3. เครื่องวัดค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้า (pH/Conductivity meter): Mettler Toledo, Seven Multi pH/Conductivity
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digits Balance): Mettler-Toledo, Dragon 204
5. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer): VELP, ARED
6. ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิก ขนาด (กว้าง × ยาว × สูง) 5 × 11 × 13 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายฝังขั้วไฟฟ้าแคโทดเท่ากับ 85 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
7. กระดาษกรองเบอร์ 2 (Filter paper): Whatman No. 2
8. กระดาษทรายเบอร์ 0 (Sandpaper): T.O.A. No. 0
9. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
10. ขั้วไฟฟ้าแคโทด มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม หรือ อะลูมิเนียม ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร และขั้วไฟฟ้าแอโนด มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 สารเคมี

1. นิกเกิล (II) ซัลเฟต (Nickel (II) sulphate, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)
2. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH)
4. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl)
5. ผงวุ้น (Agar powder)

3.1.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียจริง สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง และ สะพานเกลือ

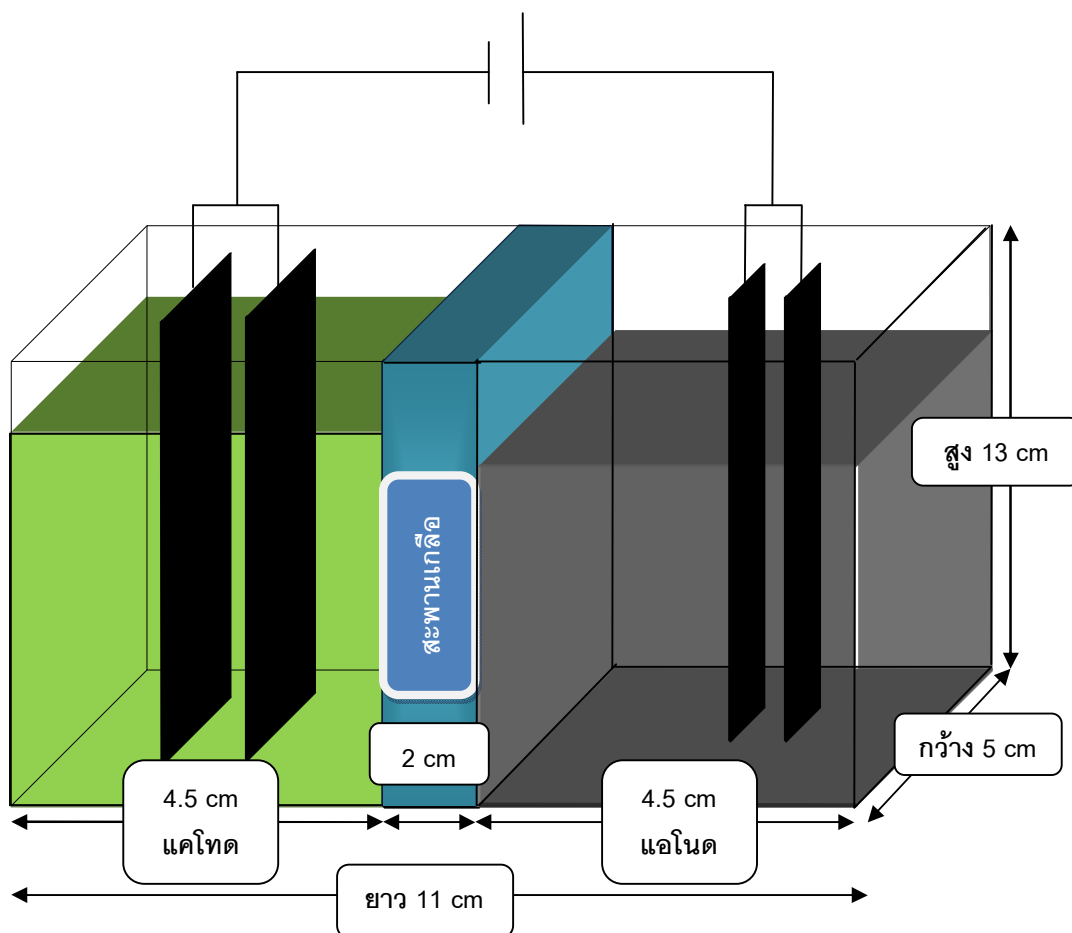
1. น้ำเสียสังเคราะห์ของการวิจัยนี้ มีค่าพีเอชเท่ากับ 0.27 ซึ่งได้จากการนำกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 37 โดยมวลต่อปริมาตร (ความถ่วงจำเพาะ 1.18) ปริมาตร 120 มิลลิลิตร เติมนลงในน้ำกลั่นปริมาตร 400 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเตรียมสารละลายนิกเกิล ให้มีความเข้มข้นเท่ากับน้ำเสียจริงซึ่งมีค่าเท่ากับ 976 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่ง $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 4.3706 กรัม ละลายลงในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ แล้วเติมน้ำกลั่น จนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
2. น้ำเสียจริง เป็นน้ำเสียจากวิชาปฏิบัติการสำหรับนิสิตปริญญาตรีในหัวข้อ “การหาปริมาณ นิกเกิลด้วยวิธีวิเคราะห์โดยน้ำหนัก” ในห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์
 - ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เตรียมจากชั่ง NaCl 5.85 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
 - ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เตรียมจากชั่ง NaCl 29.25 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
 - ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เตรียมจากชั่ง NaCl 117 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
4. สารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์ เตรียมจากชั่ง NaCl 292.5 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร
5. สะพานเกลือ เตรียมจากการนำสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์จากข้อ 4. ปริมาตร 150 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด หลังจากนั้นนำมาผสมกับผงวุ้น 5 กรัม คนให้สารละลายเข้ากัน ต้มต่อไปอีก 30 วินาที จนกระทั่งสารละลายข้นเหนียว แล้วบรรจุลงในถังปฏิบัติการตรงบริเวณที่ใส่สะพานเกลือ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายภายในถังปฏิบัติการแข็งเป็นวุ้น

3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

1. จัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 (การทดลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้)

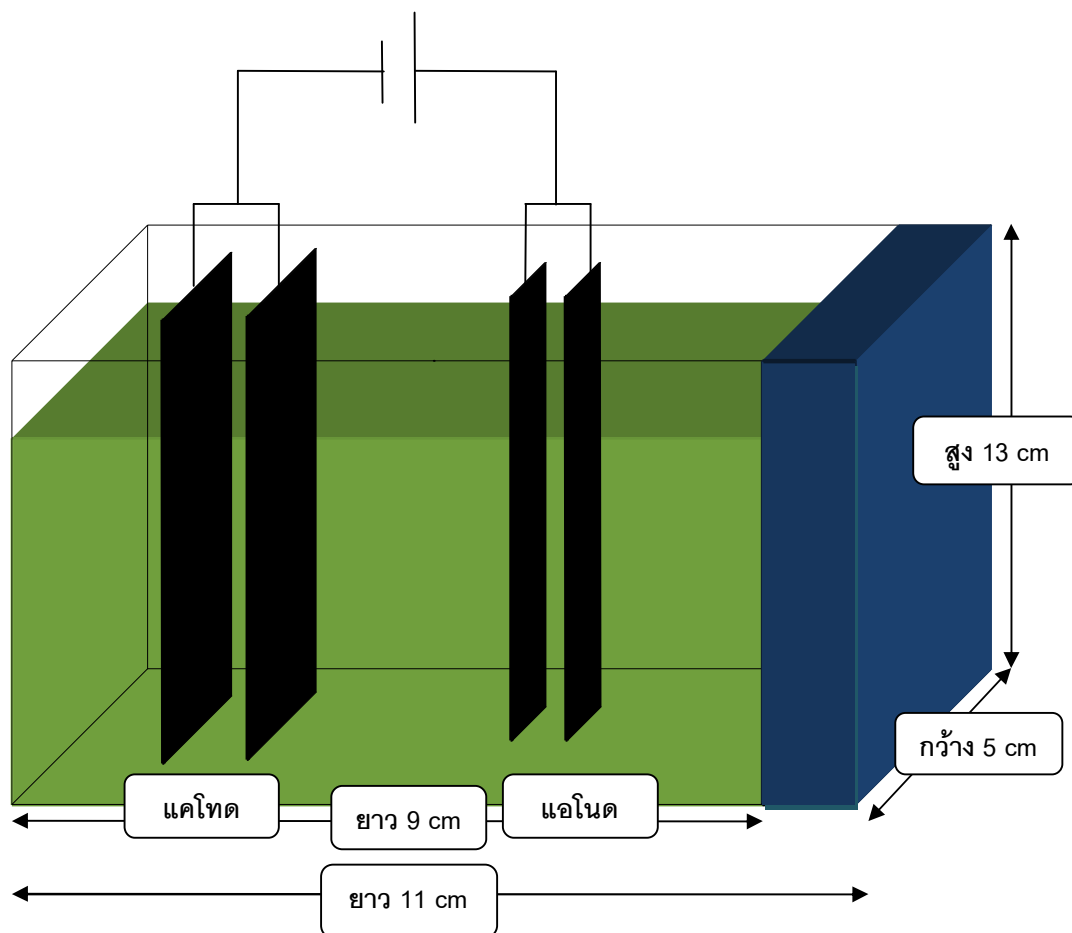
1. เชื่อมต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์
2. ในถังปฏิบัติการ ครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ส่วนครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดบรรจุ น้ำเสียสังเคราะห์หรือน้ำเสียจริง ปริมาตร 170 มิลลิลิตร
3. ขั้วบวกและขั้วลบ นำมาต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าแอโนด (แผ่นสแตนเลสเคลือบเงินของแกรไฟต์) ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทด (แผ่นสแตนเลสเคลือบเงินของแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม หรืออะลูมิเนียม) ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

2. จัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 3.3 (การทดลองเปรียบเทียบที่ใช้โดยทั่วไป ทำเฉพาะน้ำเสียจริงเท่านั้น)

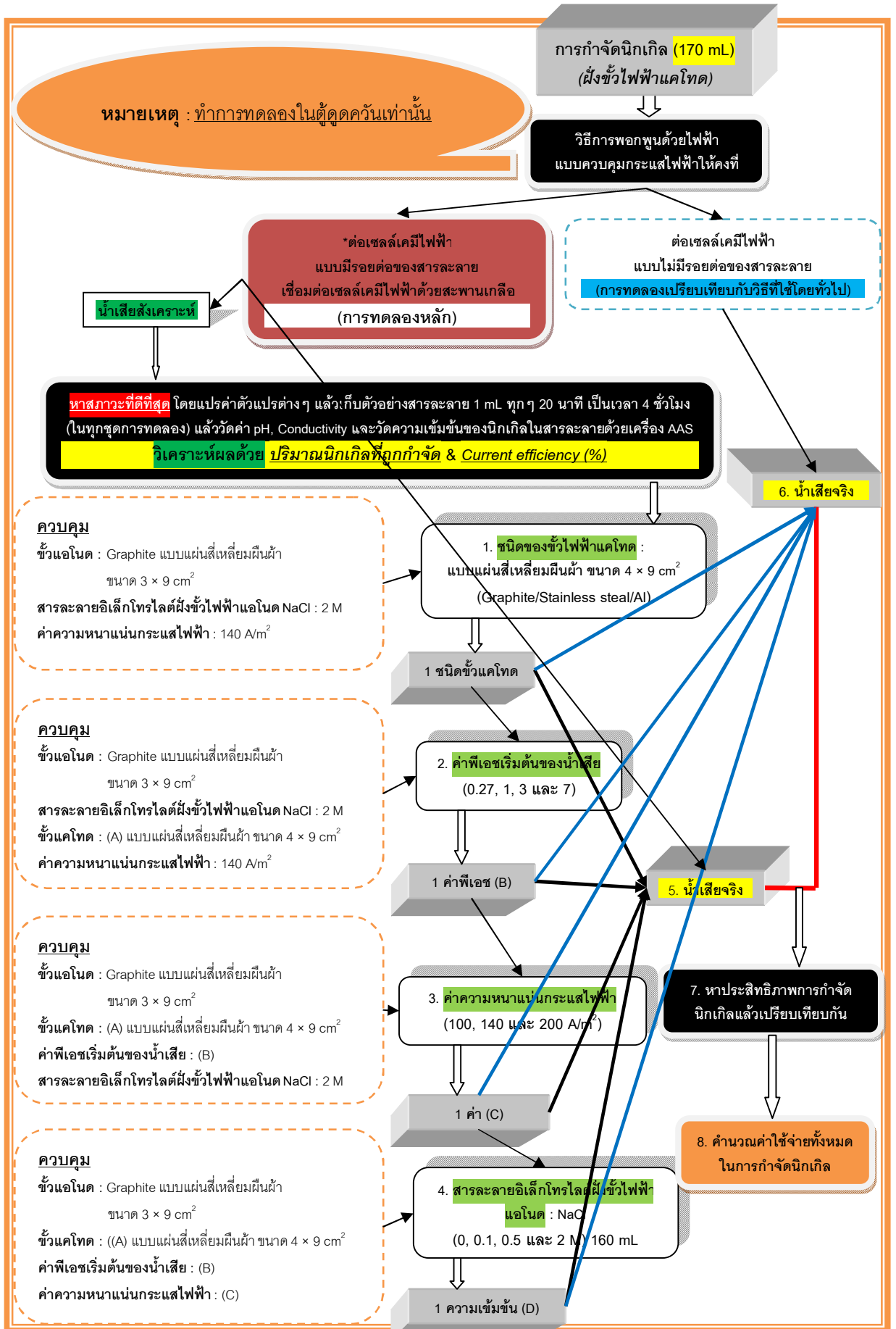
1. บรรจุน้ำเสียน้ำเสียจริง ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในถังปฏิกิริยา
2. ในถังปฏิกิริยา ขั้วบวกและขั้วลบนำมาต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าแอโนด (แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแกรไฟต์) ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทด (แผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม หรืออะลูมิเนียม) ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดของการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ สำหรับงานวิจัยนี้จะจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย และทำการศึกษาดัชนีที่สำคัญตามลำดับดังนี้ ได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ สำหรับการทดลองส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาหาประสิทธิภาพของการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริง โดยเลือกใช้ค่าตัวแปรที่ดีที่สุดจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการทดสอบ พร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการทดลองที่ใช้โดยทั่วไปซึ่งจะจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย สุดท้ายทำการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการกำจัดนิกเกิล วิธีการดำเนินการวิจัยทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ฝั่งการทำวิจัย

3.2.1 การทดลองส่วนที่ 1 การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

การกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ตามลำดับ

1.1 ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์
2. บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
3. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
4. แปรเปลี่ยนชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นแกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร โดยที่กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์ แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร
5. ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. วัดค่าพีเอช วัดค่าการนำไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
8. จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการจัดนิกเกิลที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของชนิดขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย
2. ชนิดของสารละลายขั้วไฟฟ้าแอโนด	2. โซเดียมคลอไรด์
3. สารละลายขั้วไฟฟ้าแคโทด	3. น้ำเสียสังเคราะห์
4. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แกรไฟต์
5. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแอโนด	5. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
6. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทด	6. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
7. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแอโนด	7. 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
8. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด	8. 4 × 9 ตารางเซนติเมตร
9. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	9. 160 และ 170 มิลลิลิตร สำหรับขั้วแอโนดและแคโทดตามลำดับ
10. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	10. 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
11. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์	11. 2 โมลาร์
12. เวลาเก็บกัก	12. 4 ชั่วโมง
13. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	13. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	1. แกรไฟต์/เหล็กกล้าไร้สนิม/อะลูมิเนียม
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล	1. ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

1.2 ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อเครื่องเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์
2. บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ภายหลังจากการแปรค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1, 3 และ 7 ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร และน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ได้ปรับค่าพีเอช (ค่าพีเอช 0.27)
3. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.1 แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร โดยที่กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร
5. ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการรอกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. วัดค่าพีเอช วัดค่าการนำไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
8. จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการจัดนิกเกิลที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียต่อการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย
2. ชนิดของสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด	2. โซเดียมคลอไรด์
3. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด	3. น้ำเสียสังเคราะห์
4. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แกรไฟต์
5. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแอโนด	5. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
6. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	6. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.1
7. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทด	7. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
8. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแอโนด	8. 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
9. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด	9. 4 × 9 ตารางเซนติเมตร
10. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	10. 160 และ 170 มิลลิลิตร สำหรับฝั่งแอโนดและแคโทดตามลำดับ
11. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	11. 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
12. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์	12. 2 โมลาร์
13. เวลาเก็บกัก	13. 4 ชั่วโมง
14. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	14. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	1. 0.27, 1, 3 และ 7
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล	1. ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

1.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อเครื่องเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมคลอไรด์
2. บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นจากค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.2 ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
3. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.1 แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร โดยที่กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร
5. แปรเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. วัดค่าพีเอช วัดค่าการนำไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
8. จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านกำจัดนิกเกิลที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อการกำจัดนิกเกิล ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย
2. ชนิดของสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด	2. โซเดียมคลอไรด์
3. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด	3. น้ำเสียสังเคราะห์
4. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แกรไฟต์
5. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแอโนด	5. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
6. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	6. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.1
7. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทด	7. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
8. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแอโนด	8. 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
9. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด	9. 4 × 9 ตารางเซนติเมตร
10. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	10. 160 และ 170 มิลลิลิตร สำหรับฝั่งแอโนดและแคโทดตามลำดับ
11. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	11. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.2
12. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์	12. 2 โมลาร์
13. เวลาเก็บกัก	13. 4 ชั่วโมง
14. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	14. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	1. 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล	1. ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

1.4 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ดีที่สุดซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อเครื่องเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมคลอไรด์
2. บรรจุน้ำเสียสังเคราะห์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นจากค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.2 ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
3. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์โดยแปรเปลี่ยนค่าความเข้มข้นเป็น 0, 0.1, 0.5 และ 2 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.1 แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร โดยที่กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร
5. ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.3 โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. วัดค่าพีเอช วัดค่าการนำไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
8. จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการทำจذبที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้า แอโนดต่อการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียสังเคราะห์

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย
2. ชนิดของสารละลายฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด	2. โซเดียมคลอไรด์
3. สารละลายฝังขั้วไฟฟ้าแคโทด	3. น้ำเสียสังเคราะห์
4. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แกรไฟต์
5. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแอโนด	5. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
6. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	6. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.1
7. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทด	7. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
8. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแอโนด	8. 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
9. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด	9. 4 × 9 ตารางเซนติเมตร
10. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	10. 160 และ 170 มิลลิลิตร สำหรับฝังแอโนดและแคโทดตามลำดับ
11. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	11. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.2
12. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	12. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.3
13. เวลาเก็บกัก	13. 4 ชั่วโมง
14. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	14. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์	1. 0, 0.1, 0.5 และ 2 โมลาร์
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล	1. ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

3.2.2 การทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริง

การกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าในน้ำเสียจริง

เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลกับน้ำเสียจริง โดยทำการเปรียบเทียบกับวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าที่ใช้กันโดยทั่วไปที่มีการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

2.1 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริง โดยเลือกค่าสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองในส่วนที่ 1 (1.1-1.4) มาทำการทดสอบกับน้ำเสียจริง โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. เชื่อมต่อเครื่องเซลล์เคมีไฟฟ้าด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์
2. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 170 มิลลิลิตร โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นจากค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.2 ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
3. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.4 ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในเครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
4. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.1 แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร โดยที่กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร
5. ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.3 โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
6. ทำการรอกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
7. วัดค่าพีเอช วัดค่าการนำไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
8. จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการกำจัดนิกเกิลที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย
2. ชนิดของสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด	2. โซเดียมคลอไรด์
3. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด	3. น้ำเสียจริง
4. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แกรไฟต์
5. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแอโนด	5. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
6. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	6. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.1
7. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทด	7. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
8. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแอโนด	8. 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
9. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด	9. 4 × 9 ตารางเซนติเมตร
10. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	10. 160 และ 170 มิลลิลิตร สำหรับฝั่งแอโนดและแคโทดตามลำดับ
11. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	11. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.2
12. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	12. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.3
13. ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์	13. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.4
14. เวลาเก็บกัก	14. 4 ชั่วโมง
15. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	15. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล	1. ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียจริง

2.2 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริงกับวิธีการทดลองที่ใช้โดยทั่วไปที่มีการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย โดยเลือกค่าสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองในส่วนที่ 1 (1.1-1.4) มาทำการทดสอบกับน้ำเสียจริง โดยมีวิธีการทดลองดังนี้

1. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ภายหลังจากปรับค่าพีเอชเริ่มต้นจากค่าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.2 ผสมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้นที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.4 ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ในถังปฏิกริยา
2. ใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.1 แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4×9 ตารางเซนติเมตร โดยที่กำหนดขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นแกรไฟต์แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3×9 ตารางเซนติเมตร
3. ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1.3 โดยควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
4. ทำการกวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
5. วัดค่าพีเอช วัดค่าการนำไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาณ 1 มิลลิลิตร ทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
6. จากนั้นนำตัวอย่างน้ำเสียส่งเคราะห์หลังผ่านการกำจัดนิกเกิลที่เก็บได้มาทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

ตัวแปรคงที่	ช่วงที่ทำการควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย
2. สารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	2. น้ำเสียจริง
3. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	3. แกรไฟต์
4. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
5. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	5. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.1
6. ลักษณะของขั้วไฟฟ้าแคโทด	6. แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า
7. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแอโนด	7. 3 × 9 ตารางเซนติเมตร
8. ขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทด	8. 4 × 9 ตารางเซนติเมตร
9. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	9. 330 มิลลิลิตร
10. ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	10. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.2
11. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	11. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.3
12. ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ในน้ำเสียจริง	12. ค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 1.4
13. เวลาเก็บกัก	13. 4 ชั่วโมง
14. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	14. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล	1. ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียจริง

3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการทำวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า และความเข้มข้นของนิกเกิล

ตารางที่ 3.7 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัดค่า
ค่าพีเอช	Electrometric Method
ค่าการนำไฟฟ้า	Electrical Conductivity Method
ความเข้มข้นของนิกเกิล	AAS, Direct Aspiration

3.4 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ผลจากการตรวจวัดความเข้มข้นของนิกเกิลด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หรือน้ำเสียจริง ณ เวลาใดๆ ทำให้สามารถคำนวณหาปริมาณของนิกเกิลที่ได้ตามทฤษฎี โดยคำนวณตามสูตรจากกฎของฟาราเดย์ จากสมการ

$$W = \frac{s(M.W.)It}{nF}$$

2. คำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency (%)) ซึ่งเป็นต้นทุนหลักของการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า จากสมการ

$$\text{Current efficiency (\%)} = \frac{\text{มวลที่ได้จริงจากกระบวนการ}}{\text{มวลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี}} \times 100\%$$

3. ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้า เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้คาดการณ์ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลซึ่งใช้ประกอบการทดลองตลอดระยะเวลาต่างๆ ที่ทำการศึกษาการกำจัดนิกเกิล

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

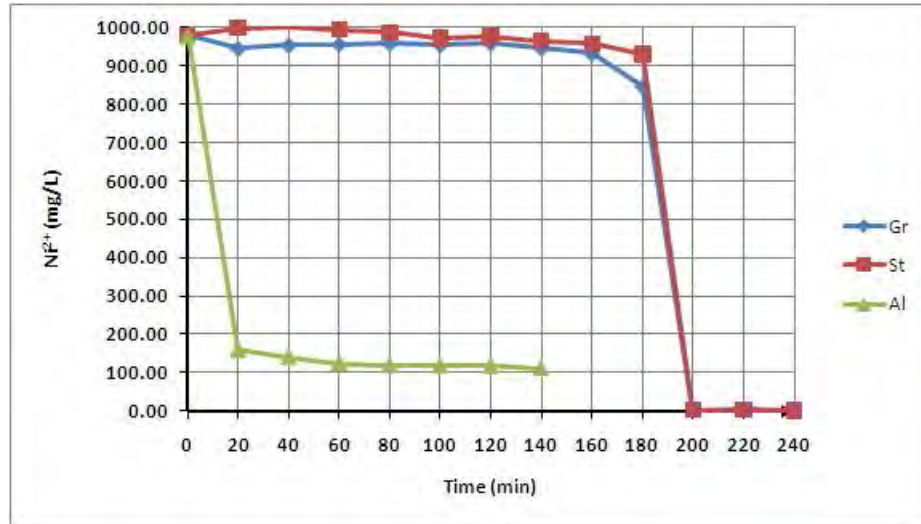
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง จากของเสียห้องปฏิบัติการที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล 976 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ โดยต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายพร้อมเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดนิกเกิลโดยใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายสำหรับน้ำเสียจริง การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ผลการศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ และ 2) ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริง

4.1 การทดลองส่วนที่ 1 การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์

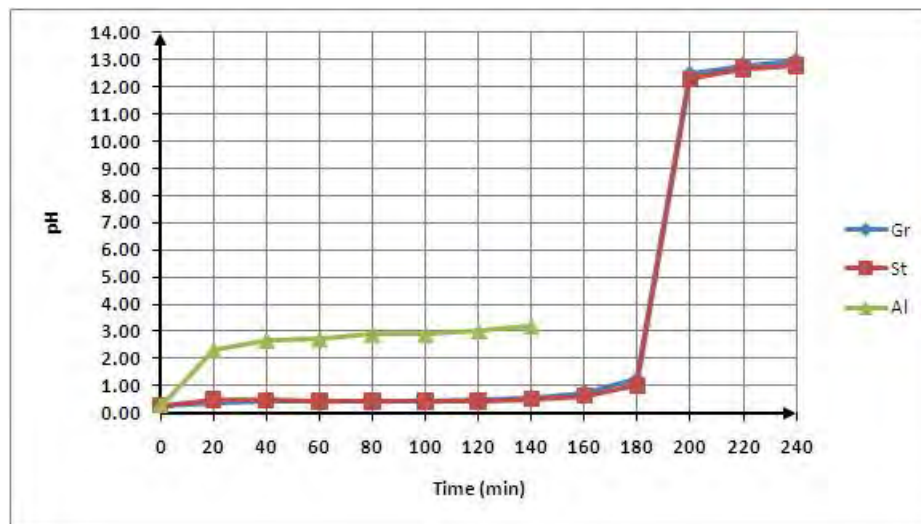
เป็นการศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดของการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ สำหรับงานวิจัยนี้จะจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายและทำการศึกษาตัวแปรที่สำคัญตามลำดับดังนี้ ได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้า แคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์

4.1.1 ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด

จากการศึกษาผลของขั้วไฟฟ้าแคโทด 3 ชนิด แบบแผ่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม โดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับที่ค่า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (คิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 2.02 แอมแปร์) ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับที่ 0.27 ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเท่ากับที่ 2 โมลาร์ และถึงปฏิกิริยามีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับที่ค่า 85 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายและค่าพีเอช ณ เวลาต่างๆ ในระหว่างการทดลองทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม



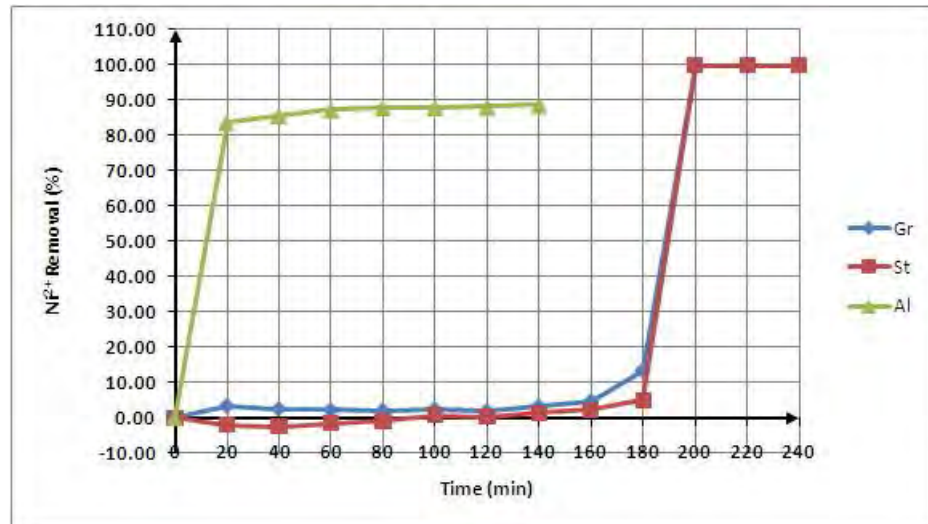
รูปที่ 4.2 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม

รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลายลดลงสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชของสารละลาย สำหรับขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม ณ นาทีที่ 180 ปริมาณนิกเกิลในสารละลายมีค่า 846.35 และ 929.54 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และค่าพีเอชของสารละลายมีค่า 1.23 และ 1.00 ตามลำดับ โดยสามารถสังเกตเห็นของแข็งสีน้ำตาลมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ เกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าขั้วไฟฟ้าแคโทดเพียงเล็กน้อยและเกิดฟองแก๊สจำนวนน้อยที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดโดยสารละลายยังคงมีสีเขียวอ่อน หลังจากนาทีที่ 180 พบว่า

ปริมาณนิกเกิลในสารละลายลดลงจนมีความเข้มข้นเข้าใกล้ศูนย์ โดยสามารถสังเกตเห็นของแข็งสีเขียวจำนวนมากและสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนเป็นใสไม่มีสี ณ นาทีที่ 240 ปริมาณนิกเกิลในสารละลายสำหรับขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิมมีค่า 2.33 และ 1.59 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และค่าพีเอชของสารละลายมีค่า 12.95 และ 12.78 ตามลำดับ การที่สารละลายมีสถานะเป็นเบสเกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำได้ OH^- และ $\text{H}_{2(g)}$ บนขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยที่ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้าตลอดเวลา ทำให้มีเหล็กส่วนหนึ่งหลุดออกมาจากขั้วไฟฟ้าและตกตะกอน ซึ่งตะกอนมีลักษณะสีน้ำตาลแดงซึ่งปนกับตะกอนสีเขียวของนิกเกิล ขณะที่ขั้วแกรไฟต์ไม่เกิดการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้าทำให้ตะกอนของนิกเกิลที่ตกลงมา มีความบริสุทธิ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นได้

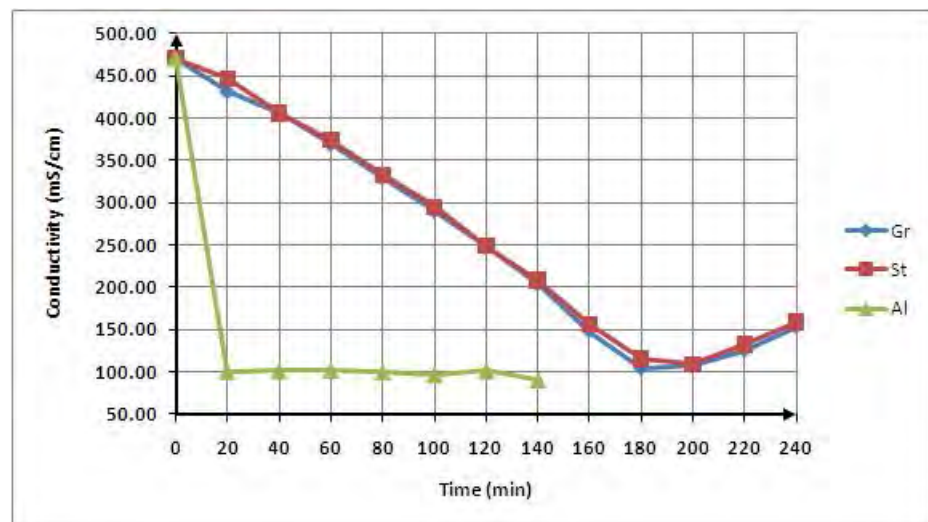
เมื่อใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด พบว่า ณ นาทีที่ 20 ปริมาณนิกเกิลในสารละลาย มีค่า 158.82 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของสารละลายมีค่า 2.32 โดยสามารถสังเกตเห็นฟองแก๊สจำนวนมากที่ขั้วอะลูมิเนียมพร้อมทั้งเห็นของแข็งสีน้ำตาลเกาะที่ผิวขั้วเป็นจำนวนมาก และสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนกลายเป็นสีเทาดำ มีของแข็งแขวนลอยสีเทาดำกระจายทั่วในสารละลาย และสารละลายเริ่มข้นเหนียว จนกระทั่งนาทีที่ 140 สารละลายชั้นเหนียวทั้งหมด มีลักษณะคล้ายวุ้น ปริมาณนิกเกิลในสารละลายมีค่า 110.89 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอชของสารละลายมีค่า 3.20 ณ จุดนี้ไม่สามารถดำเนินการทดลองต่อได้เนื่องจากแท่งกวนแม่เหล็กไม่สามารถกวนสารละลายได้อีกต่อไป

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์นิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ กับชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ควบคุม โดยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่า 976 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลอง พบว่า สำหรับขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม สามารถลดปริมาณนิกเกิลในสารละลาย ณ นาทีที่ 240 ได้ 99.76% และ 99.84% ตามลำดับ ขณะที่ขั้วอะลูมิเนียม สามารถลดปริมาณนิกเกิลในสารละลาย ณ นาทีที่ 140 ได้ 88.68%



รูปที่ 4.3 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม

พิจารณาค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย เมื่อค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีค่า 471.0 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ แกรไฟต์ เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม

จากผลการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายมีแนวโน้มใกล้เคียงกันสำหรับขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิม นั่นคือ ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ควบคุมที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่ใช้ในการผ่านกระแสไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณไอออนในสารละลาย ได้แก่ SO_4^{2-} , H^+ และ Ni^{2+} ลดลงและต่ำสุด ณ นาทีที่ 180 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายลดลงเหลือ 104.0 และ 114.9 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละของการลดลงได้ 78% และ 76% ตามลำดับ จากนั้นที่ 200 เป็นต้นไป ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีค่า 153.5 และ 158.6 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ ณ ชั่วโมงที่ 4 เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ OH^- สำหรับขั้วอะลูมิเนียม ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรกของการทดลอง โดยที่ค่าการนำไฟฟ้า ณ นาทีที่ 20 มีค่า 106 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร หรือคิดเป็นร้อยละของการลดลงได้ 77% หลังจากนั้นที่ 20 เป็นต้นไป ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าคงที่ เนื่องจากสารละลายเริ่มเกิดวุ้นทำให้สารละลายข้นหนืดทำให้เกิดความผิดพลาดต่อการอ่านค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย

การที่ปริมาณไอออนของนิกเกิลและไอออนอื่นๆ ที่มีอยู่ในสารละลายมีค่าลดลง จะมีผลทำให้เกิดการลดลงของค่าการนำไฟฟ้า ดังนั้นการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย จึงสอดคล้องกับปริมาณนิกเกิลในสารละลาย ทั้งนี้การลดลงของปริมาณนิกเกิลเกิดขึ้นจากสองปฏิกิริยา ได้แก่ 1) ปฏิกิริยารีดักชันของ Ni^{2+} เกิดเป็นโลหะนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้าแคโทดในปฏิกิริยาที่ 4-3 และ 2) ปฏิกิริยารีดักชันของ H_2O เกิด OH^- และ $\text{H}_{2(g)}$ ในปฏิกิริยาที่ 4-4 ทำให้สารละลายมีสภาพเป็นเบสและเกิดตะกอนสีเขียวของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (ปฏิกิริยาที่ 4-7) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองเกิดขึ้นพร้อมๆ กันและมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลง (รูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2) โดยขณะทำการทดลอง ที่ขั้วไฟฟ้าแคโทดสามารถสังเกตเห็นนิกเกิลมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ บนขั้วไฟฟ้าแคโทดจำนวนเล็กน้อยอย่างไม่สม่ำเสมอที่บริเวณผิวหน้าขั้ว เนื่องจากเกิดการรบกวนของฟองแก๊สต่อการเข้าเกาะของนิกเกิลบนขั้ว ผลที่เกิดขึ้นดังที่ได้กล่าวมานี้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาอันเนื่องมาจากไอออนอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบในสารละลายเกิดขึ้นด้วย (SO_4^{2-} และ H^+) ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าวมาทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าในขณะที่ทำการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่ มีปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งปฏิกิริยาดำเนินไปบนขั้วไฟฟ้าแคโทด ความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาเหล่านี้ได้ถูกนำเสนอไว้ในปฏิกิริยาที่ 4-1 ถึง 4-7

ปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าแคโทด	E^0 (Volt)	
$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.170	(4-1)
$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2$	+0.000	(4-2)
$\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Ni}$	-0.250	(4-3)
$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.830	(4-4)



ในช่วงต้นของการทดลองแบบควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่ สำหรับขั้วแกรไฟต์ และเหล็กกล้าไร้สนิม ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้าแคโทด ได้แก่ ปฏิกริยาที่ 4-1 ถึง 4-3 เนื่องจากในช่วงเวลานี้ SO_4^{2-} , H^+ และ Ni^{2+} ในสารละลายมีจำนวนมากและสารละลายในช่วงเวลานี้มีค่าพีเอชค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้ปฏิกริยาที่ 4-1 เกิดง่ายกว่าปฏิกริยาที่ 4-2 และปฏิกริยาที่ 4-2 เกิดง่ายกว่าปฏิกริยาที่ 4-3 โดยพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานในการเกิดรีดักชัน เนื่องจากผลของปฏิกริยาที่สนใจคือปฏิกริยาที่ 4-3 แต่ในช่วงเวลานี้เกิดได้ช้าเนื่องจากเกิดฟองแก๊ส SO_2 และ H_2 จากปฏิกริยาที่ 4-1 และ 4-2 ไปขัดขวางการเกาะของโลหะนิกเกิลที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำให้ในช่วงเวลานี้การกำจัดนิกเกิลออกจากสารละลายในรูปของ $\text{Ni}_{(s)}$ สามารถกำจัดได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในช่วงปลายของการทดลอง (หลังจากนาที่ที่ 180) เมื่อ SO_4^{2-} และ H^+ ที่มีอยู่ในสารละลายมีปริมาณลดลงอย่างมาก ปฏิกริยาที่ 4-3 และ 4-4 จึงเริ่มเกิดตามมาพร้อมๆ กัน ปฏิกริยาที่ 4-4 มีผลทำให้สารละลายมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้ Ni^{2+} ในสารละลายสามารถเกิดปฏิกริยากับ OH^- จากปฏิกริยา 4-4 เกิดเป็นตะกอนสีเขียวของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ อย่างรวดเร็ว ดังแสดงในปฏิกริยาที่ 4-7 ทำให้ปริมาณนิกเกิลในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งปฏิกริยาที่ 4-7 เป็นปฏิกริยาที่ไม่ได้คาดหมายว่าจะเกิดขึ้นแต่เป็นปฏิกริยาข้างเคียงต่อการกำจัดนิกเกิลในสารละลายด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ทำให้ปริมาณนิกเกิลในสารละลายลดลงจนมีความเข้มข้นเข้าใกล้ศูนย์ ปฏิกริยาข้างเคียงดังกล่าวที่เกิดขึ้นเป็นข้อดีของวิธีการนี้ที่ไม่ต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับค่าพีเอชของสารละลายให้สูงขึ้นเพื่อให้โลหะในสารละลายตกตะกอน

สำหรับขั้วอะลูมิเนียม ในช่วงต้นของการทดลองสามารถสังเกตเห็นฟองแก๊สจำนวนมากที่ขั้วพร้อมทั้งเห็นของแข็งสีน้ำตาลเกาะที่ผิวขั้วเป็นจำนวนมาก และขั้วไฟฟ้าเกิดการสึกกร่อนลงไปในสารละลายโดยสามารถสังเกตเห็นสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนกลายเป็นสีเทาดำ มีของแข็งแขวนลอยสีเทาดำกระจายทั่วในสารละลาย จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นคาดว่าฟองแก๊สที่เกิดขึ้นคือ SO_2 จากปฏิกริยาที่ 4-1 และ H_2 จากปฏิกริยาที่ 4-2 ขณะที่ของแข็งสีน้ำตาลเกาะที่ผิวขั้วคาดว่าป็นโลหะ Ni จากปฏิกริยาที่ 4-3 และเมื่อพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกริยาที่ 4-3 และ 4-5 พบว่า นิกเกิลสามารถเกิดปฏิกริยารีดักชันบนแผ่นอะลูมิเนียมได้เองโดยไม่ต้องให้กระแสไฟฟ้าเข้าไป (ปฏิกริยาแบบกัลวานิก) ทำให้ขั้วอะลูมิเนียมเกิดการสึกกร่อนลงไปในสารละลาย (ปฏิกริยาที่ 4-5 แบบย้อนกลับ) พร้อมทั้งเห็น

ของแข็งสีน้ำตาลไปเกาะบริเวณผิวหน้าขั้ว (ปฏิกิริยาที่ 4-3) และเนื่องจากขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ทำจาก อะลูมิเนียมไม่เฉื่อยและมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยารุนแรงกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีอยู่ใน สารละลาย (สุรวงศ์ อนุกุล, 2542) ดังนั้นการเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีเขียวอ่อนเป็นสีเทาดำ และมีของแข็งแขวนลอยสีเทาดำกระจายทั่วในสารละลาย คาดว่าเป็น $AlCl_3$ จากปฏิกิริยาที่ 4-6 และฟองแก๊สจำนวนมากที่ขั้วนอกจากจะเป็นฟองแก๊สจากปฏิกิริยาที่ 4-1 และ 4-2 คาดว่ายังมี ฟองแก๊ส H_2 จากปฏิกิริยาที่ 4-6 อีกด้วย โดยการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าในช่วงต้นเป็นผลของ การลดปริมาณนิกเกิลเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแตกต่างจากขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิมที่ค่า การนำไฟฟ้าของสารละลายลดลงเนื่องจากการลดลงของปริมาณ SO_4^{2-} และ H^+ เป็นส่วนใหญ่ ส่วนในช่วงปลายการทดลอง (หลังจากนาที่ที่ 20) สารละลายเริ่มข้นหนืด จนกระทั่งนาที่ที่ 140 สารละลายข้นหนืดทั้งหมด มีลักษณะคล้ายวุ้น คาดว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้าแคโทด ได้แก่ ปฏิกิริยาที่ 4-4 และ 4-5 แบบย้อนกลับ โดยที่ OH^- จากปฏิกิริยาที่ 4-4 ทำปฏิกิริยากับ Al^{3+} จาก ปฏิกิริยาที่ 4-5 แบบย้อนกลับ เกิดเป็นตะกอนวุ้นของ $Al(OH)_3$ ทำให้สารละลายข้นหนืดในที่สุด

สำหรับฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดของทุกๆ ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ใช้ Cl^- และ H_2O สามารถ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย (ปฏิกิริยาที่ 4-8 ถึง 4-12) เมื่อพิจารณาจากค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ในการเกิดออกซิเดชัน และด้วยปริมาณที่มีอยู่มากของ Cl^- ในสารละลาย ทำให้การจ่ายอิเล็กตรอน ไปยังฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นไปอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง ความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาเหล่านี้ ได้ถูกนำเสนอไว้ในปฏิกิริยาที่ 4-8 ถึง 4-12

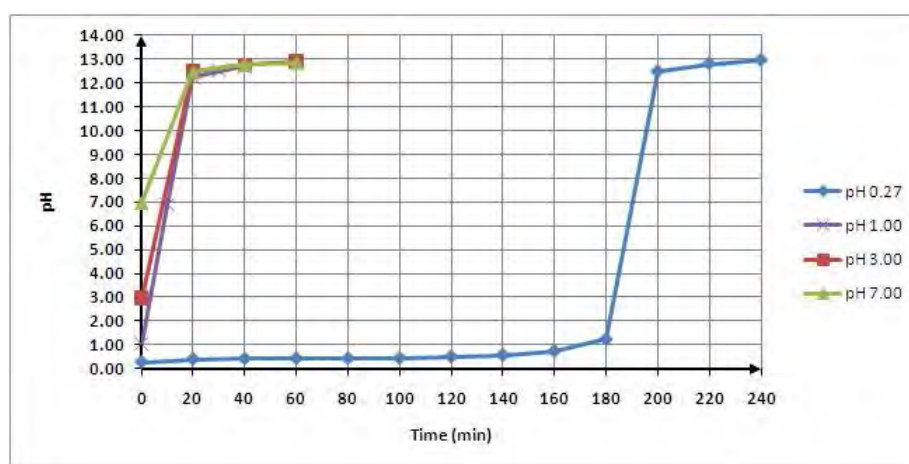
ปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าแอโนด	E^0 (Volt)	
$2H_2O + O_2 \leftrightarrow O_3 + H^+ + 2e^-$	-2.070	(4-8)
$2H_2O \leftrightarrow H_2O_2 + 2H^+ + 2e^-$	-1.770	(4-9)
$2Cl^- \leftrightarrow Cl_2 + 2e^-$	-1.360	(4-10)
$2H_2O \leftrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$	-1.230	(4-11)
$H_2O_2 \leftrightarrow O_2 + 2H^+ + 2e^-$	-0.695	(4-12)

สรุป เมื่อนำขั้วไฟฟ้าแคโทดทั้งสามชนิดมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด นิกเกิลในสารละลาย พบว่า ขั้วแกรไฟต์และเหล็กกล้าไร้สนิมมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลใน สารละลายใกล้เคียงกัน แต่ขั้วแกรไฟต์มีข้อดีตรงที่ขั้วไฟฟ้าไม่เกิดการสึกกร่อนลงไปในสารละลาย ทำให้อายุการใช้งานของขั้วยาวนานกว่า และได้สารละลายภายหลังการกำจัดนิกเกิลที่มีสีใสเมื่อ เปรียบเทียบกับขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีตะกอนสีน้ำตาลแดงปนมาจากการสึกกร่อนของขั้ว สำหรับ

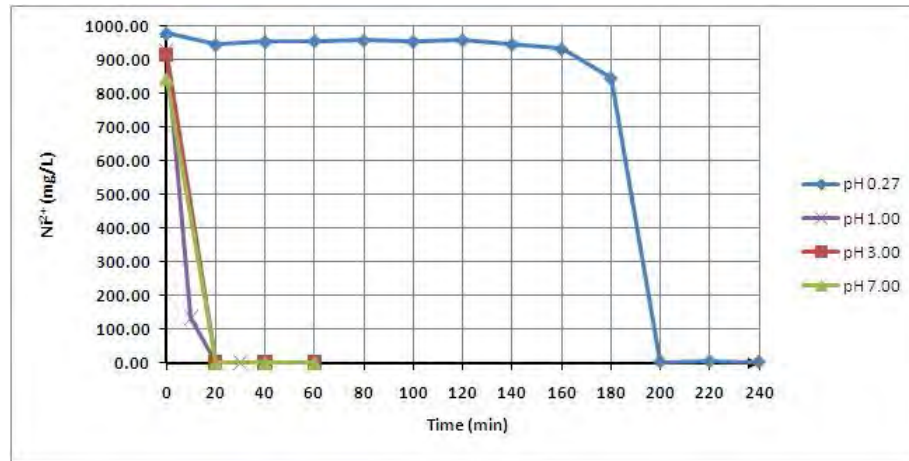
ซั้วอะลูมิเนียมไม่สามารถใช้ในการกำจัดนิกเกิลได้เพราะเกิดการสึกกร่อนลงไปในสารละลายอย่างมาก ทำให้สารละลายภายหลังการกำจัดนิกเกิลไม่บริสุทธิ์และมีสภาพเป็นวุ้น นอกจากนี้ยังมีต้นทุนค่าใช้จ่ายในส่วน of ซั้วไฟฟ้าที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ ทำให้คิดเป็นค่าใช้จ่ายที่เพิ่มเข้ามาซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ากระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป ดังนั้นซั้วไฟฟ้าแคโทดที่ดีที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้คือ ซั้วแกรไฟต์ซึ่งสามารถกำจัดนิกเกิลในสารละลายได้ 99.71% ณ เวลาที่ 200 นาที

4.1.2 ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 0.27, 1, 3 และ 7 โดยเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นขั้วแกรไฟต์ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากผลการทดลองที่ 4.1.1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับที่ค่า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (คิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 2.02 แอมแปร์) ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอนโนดเท่ากับที่ค่า 2 โมลาร์ ถึงปฏิกิริยามีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับที่ค่า 85 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร และปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียจาก 0.27 เป็น 1, 3 และ 7 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร เมื่อทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลภายหลังการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่า ค่าความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลายมีค่า 926.61, 916.17 และ 843.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าพีเอช 1, 3 และ 7 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า การปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1 และ 3 นิกเกิลในสารละลายยังไม่เกิดการตกตะกอนของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (ปฏิกิริยาที่ 4-7) ส่วนการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7 พบว่า 14% ของนิกเกิลในสารละลายเกิดการตกตะกอนเป็น $\text{Ni}(\text{OH})_2$ เมื่อทำการตรวจวัดค่าพีเอช และค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ เวลาต่างๆ ในระหว่างการทดลองทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 3 และ 7, ทุกๆ 10 นาที เป็นเวลา 40 นาที สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1 และทุกๆ 20 นาที เป็นเวลา 240 นาที สำหรับน้ำเสียที่ไม่ได้ทำการปรับค่าพีเอช ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 0.27 ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.27, 1, 3 และ 7 โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด



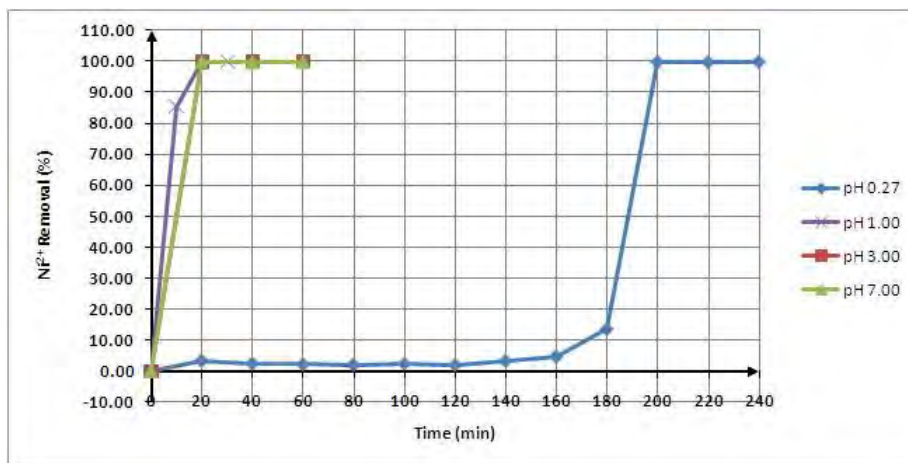
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.27, 1, 3 และ 7 โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด

รูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่เข้าไปในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ที่ทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1, 3 และ 7 พบว่าสามารถกำจัด 99% นิกเกิล จากสารละลายได้ภายในเวลา 20 นาที ซึ่งเร็วกว่าน้ำเสียที่ไม่ได้ทำการปรับค่าพีเอชถึง 10 เท่า (น้ำเสียที่ค่าพีเอช 0.27 ใช้เวลา 200 นาที ในการกำจัด 99% นิกเกิลออกจากน้ำเสีย) การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 20 นาทีนี้ สัมพันธ์กับการลดลงของปริมาณนิกเกิลในสารละลาย (ความเข้มข้นของนิกเกิลมีค่า 1.35, 1.84 และ 0.86 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1, 3 และ 7 ณ นาทีที่ 20 ตามลำดับ) ในรูปของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ (ปฏิกิริยา-ที่ 4-7) เป็นส่วนใหญ่ และมีเพียงส่วนน้อยของนิกเกิลที่เข้าเกาะในรูปโลหะนิกเกิลที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าแคโทด (ปฏิกิริยาที่ 4-3)

สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1, 3 และ 7 โปรตอน (H^+) ส่วนหนึ่งถูกสะเทินไป นั่นคือ H^+ ในสารละลายลดลงอย่างมาก ทำให้การดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ 4-1 และ 4-2 บนขั้วไฟฟ้าแคโทดเกิดขึ้นน้อย (โดยที่ปฏิกิริยาที่ 4-1 ถึง 4-4 เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน) เมื่อ H^+ ลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ปฏิกิริยาที่ 4-3 และ 4-4 จึงเกิดมากขึ้น แม้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของการเกิดรีดักชันของน้ำจะต่ำกว่านิกเกิล แต่เนื่องจากในสารละลายมีน้ำเป็นตัวทำละลาย ดังนั้นปริมาณของน้ำจึงมากกว่าปริมาณของนิกเกิล ทำให้ปฏิกิริยาที่ 4-4 เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีผลทำให้ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์นิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ ณ แต่ละค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ควบคุม จากผลการทดลอง พบว่าสำหรับการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1, 3 และ 7 สามารถลดปริมาณนิกเกิลในสารละลาย ณ นาทีที่ 20 ได้ 99.85%, 99.80% และ 99.90% ตามลำดับ และน้ำเสียที่ไม่ได้ทำการ

ปรับค่าพีเอช (ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 0.27) จะสามารถลดปริมาณนิเกิลในสารละลาย ณ นาทีที่ 200 ได้ 99.71%

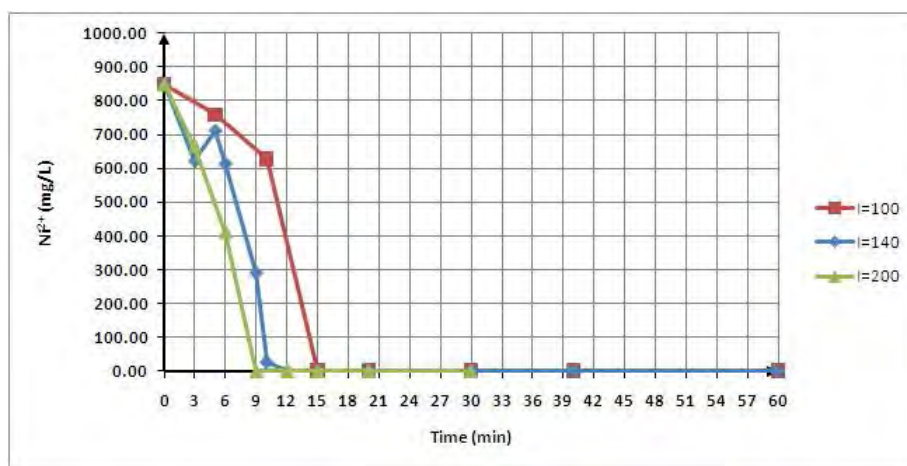


รูปที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 0.27, 1, 3 และ 7 โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด

สรุป เมื่อนำน้ำเสียที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 1, 3 และ 7 มาพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลในสารละลายกับน้ำเสียที่ไม่ปรับค่าพีเอช (ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 0.27) พบว่า ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียที่ 1, 3 และ 7 สามารถกำจัดนิเกิลได้มากกว่า 99% อย่างรวดเร็วในระยะเวลาเพียง 20 นาที ขณะที่น้ำเสียที่ไม่ปรับค่าพีเอชสามารถกำจัดนิเกิลได้มากกว่า 99% ณ เวลาที่ 200 นาที ซึ่งใช้เวลานาน ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในส่วนของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงควรปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียก่อนการทดลอง โดยปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตรที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช มีค่า 57, 69 และ 71 มิลลิลิตรต่อน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1 ลิตร สำหรับการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1, 3 และ 7 ตามลำดับ คิดเป็นค่าใช้จ่ายในส่วนสารเคมีนี้เป็น 766.94, 928.40 และ 955.31 บาทต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยที่โซเดียมไฮดรอกไซด์มีราคา 23 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม) ดังนั้นค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 1 เป็นค่าที่ดีที่สุดที่เลือกใช้ในการทดลองต่อไป เพราะใช้ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยกว่า ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับค่าพีเอชก่อนการใช้กระแสไฟฟ้าในการกำจัดนิเกิล อีกทั้งยังใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิเกิลในสารละลายได้อย่างรวดเร็ว

4.1.3 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

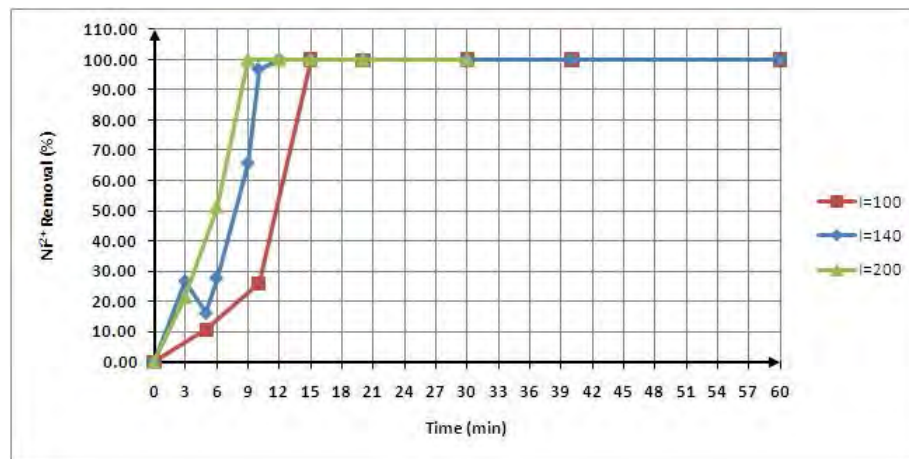
จากการศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่า 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (คิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 1.44, 2.02 และ 2.88 แอมแปร์ตามลำดับ) โดยเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นขั้วแกรไฟต์ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากผลการทดลองที่ 4.1.1 ทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร (จากผลการทดลองที่ 4.1.2) ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอนโนดเท่ากันที่ค่า 2 โมลาร์ และถึงปฏิกริยามีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายเท่ากันที่ค่า 85 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลาย ในระหว่างการทดลอง ณ นาทีที่ 5, 10, 15, 20, 30, 40 และ 60 (สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 100 และ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) และในระหว่างการทดลอง ณ นาทีที่ 3, 6, 9, 12, 15, 20 และ 30 (สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)



รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

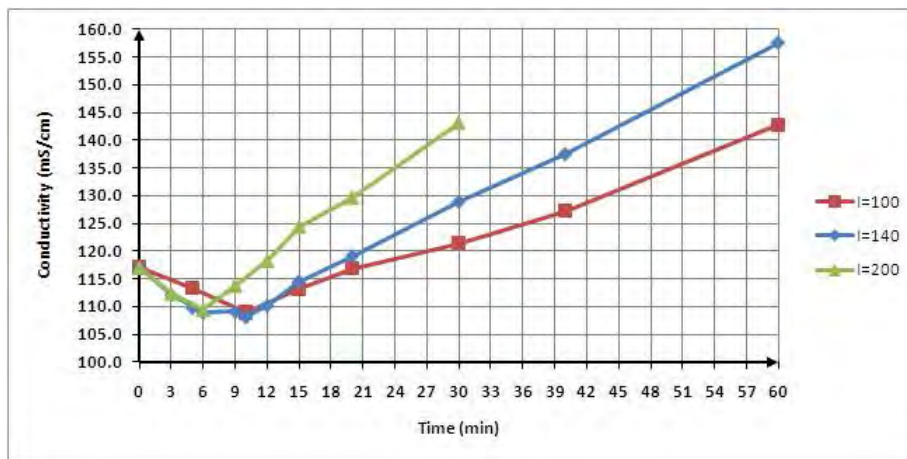
รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของนิกเกิลในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งลดลงจนเป็นศูนย์ ณ นาทีที่ 15, 12 และ 9 สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่า 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ โดยอัตราการลดลงของปริมาณนิกเกิลจะมากขึ้นเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าสูงขึ้น อัตราการลดลงเฉลี่ยของปริมาณนิกเกิลที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีค่า 56.54, 70.72 และ 94.29 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อนาที ตามลำดับ

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์นิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ ณ แต่ละค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ควบคุม จากผลการทดลองพบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่า 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถลดปริมาณนิกเกิลในสารละลาย ณ นาทีที่ 15, 12 และ 9 ได้ 99.90%, 99.96% และ 99.96% ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์ภายหลังการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1 มีค่า 117.1 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร เมื่อทำการทดลองโดยการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของนิกเกิล 848.99 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.10

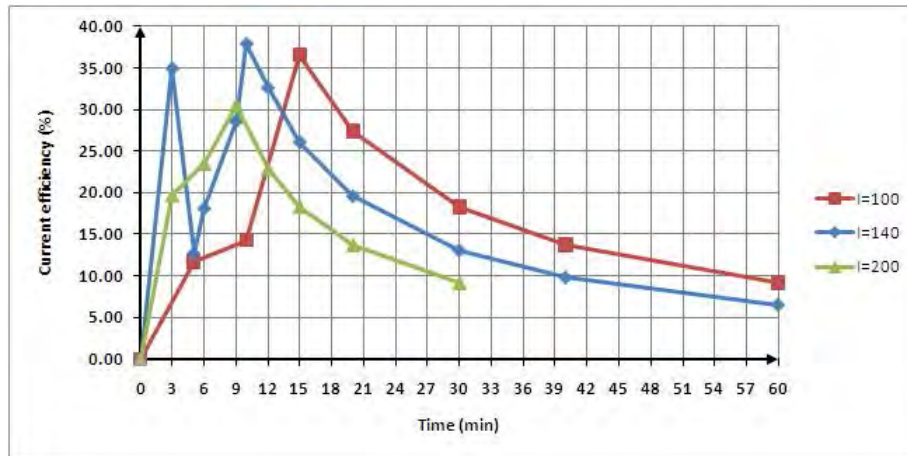


รูปที่ 4.10 ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อผ่านค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

จากการทดลอง พบว่า ค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้จากสารละลายลดลงต่ำสุด ณ เวลาที่ 10, 10 และ 6 สำหรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ค่า 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีค่า 108.9, 108.2 และ 109.5 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ หรือคิดเป็นร้อยละของการลดลงได้ 7%, 8% และ 6% ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบร้อยละของการลดลงของค่าการนำไฟฟ้ากับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย เมื่อใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด (จากการทดลองที่ 4.1.1) ซึ่งสามารถลดค่าการนำไฟฟ้าได้ถึงร้อยละ 78% ณ เวลาที่ 180 นาที พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่ปรับค่าพีเอชเป็น 1 สามารถลดค่าการนำไฟฟ้าได้น้อยกว่าน้ำเสียที่ไม่ปรับค่าพีเอช แสดงให้เห็นว่าการปรับค่าพีเอชทำให้ปฏิกิริยาที่ 4-1 เกิดได้น้อยลง SO_4^{2-} ที่อยู่ในสารละลายสามารถออกซิไดซ์เป็น SO_2 ได้น้อยลง เป็นผลให้กระบวนการกำจัด SO_4^{2-} หรือไอออนตัวอื่นๆ ในสารละลายลดน้อยลง แต่ในทางกลับกันก็สามารถกำจัดนิกเกิลในสารละลายจากปฏิกิริยาที่ 4-3 และ 4-7 ได้อย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ไม่ปรับค่าพีเอช

จากที่กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น พบว่า ในขณะที่ทำการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ณ เวลาต่างๆ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้าแคโทดมีมากกว่าหนึ่งปฏิกิริยา ดังนั้นปริมาณกระแสที่ให้แก่ระบบจึงไม่ถูกใช้ในการกำจัดนิกเกิลเพียงอย่างเดียว การคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency) จะสามารถระบุได้ว่า ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใดมีผลรบกวนจากปฏิกิริยาข้างเคียงมากที่สุด และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าควบคุมได้ดีที่สุดสำหรับการกำจัดนิกเกิล



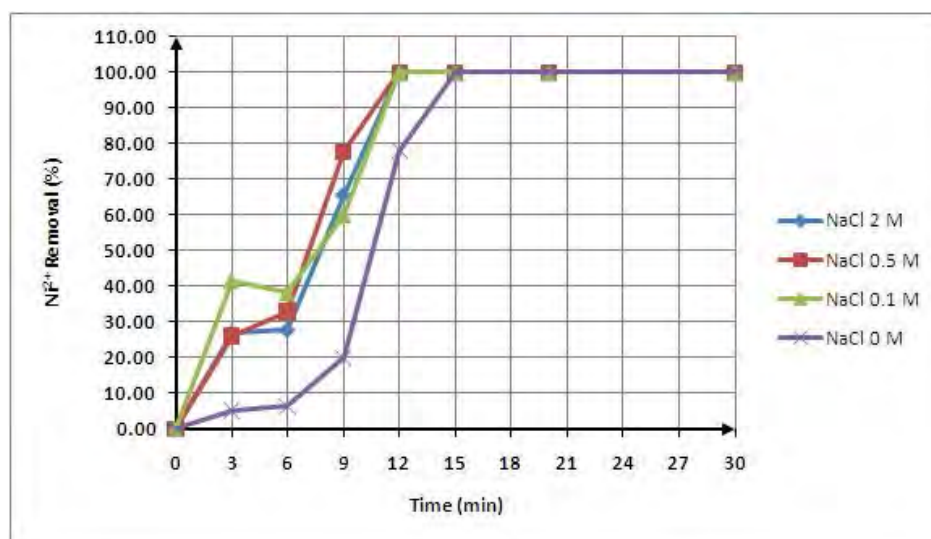
รูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

จากผลการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกระแส ดังแสดงในรูปที่ 4.11 พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100, 140 และ 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือ 36.58%, 37.89% และ 30.50% ณ ร้อยละการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ 99.90%, 96.78% และ 99.96% และ ณ นาทีที่ 15, 10 และ 9 ตามลำดับ ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จึงเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการกำจัดนิเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ในชุดการทดลองนี้ เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าค่าอื่นๆ นอกจากนี้ ยังพบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสมีค่าลดลงเมื่อผ่านค่าสูงสุดมาแล้ว ซึ่งเป็นผลสอดคล้องกับปริมาณนิเกิลที่เหลืออยู่น้อยในสารละลาย ณ เวลาดังกล่าว (ดังแสดงในรูปที่ 4.8) ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ใช้ไปในระบบ ถูกใช้ไปกับการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่คำนวณได้มีค่าลดลงเมื่อเวลาดำเนินผ่านไป

โดยผลที่ได้นี้สอดคล้องกับที่ ฉัฐบรรณ วรณรัตน์ (2542) ได้รายงานไว้ในการศึกษาผลของตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการแยกนิเกิลด้วยกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือสารละลายนิเกิลสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ขั้วแคโทด ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม พื้นที่ผิว 89 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนด ทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ พื้นที่ผิว 82 ตารางเซนติเมตร โดยต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย พบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นสภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 32% ในการแยกนิเกิลที่ร้อยละ 60% ดังข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

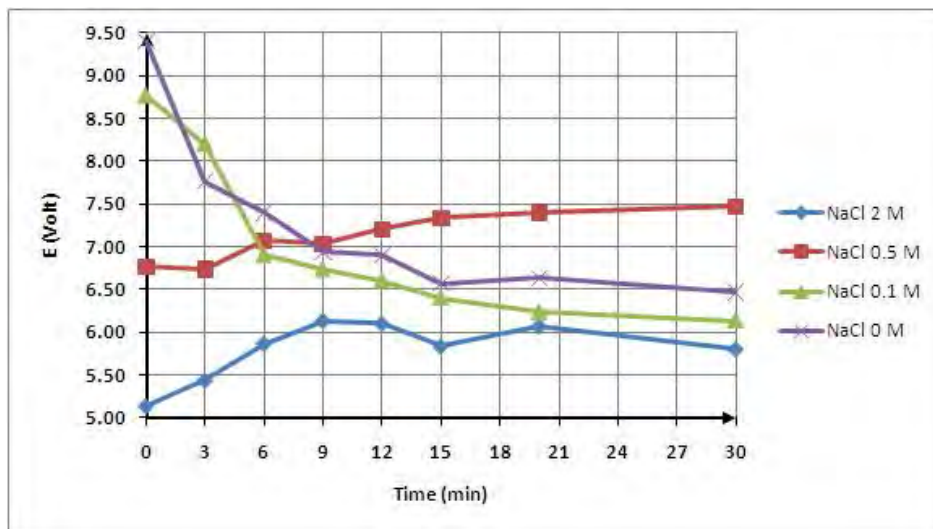
4.1.4 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ค่า 0, 0.1, 0.5 และ 2 โมลาร์ โดยเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นขั้วแกรไฟต์ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากผลการทดลองที่ 4.1.1 ทำการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร (จากผลการทดลองที่ 4.1.2) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากผลการทดลองที่ 4.1.3 และถึงปฏิกิริยามีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายเท่ากันที่ค่า 85 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร จากนั้นทำการตรวจวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายในระหว่างการทดลอง ณ นาทีที่ 3, 6, 9, 12, 15, 20 และ 30



รูปที่ 4.12 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 2, 0.5, 0.1 และ 0 โมลาร์

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์นิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ณ เวลาต่างๆ ณ แต่ละค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ควบคุม จากผลการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ค่า 0, 0.1, 0.5 และ 2 โมลาร์ สามารถลดปริมาณนิกเกิลในสารละลาย ณ นาทีที่ 12 ได้ 77.95%, 99.96%, 99.96% และ 99.96% ตามลำดับ ดังนั้นผลการทดลองชุดนี้แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ค่า 0 โมลาร์ ไม่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลในสารละลายเมื่อทำการทดลองในระยะเวลา 12 นาที



รูปที่ 4.13 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในน้ำเสียสังเคราะห์เทียบกับเวลา เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 2, 0.5, 0.1 และ 0 โมลาร์

จากรูปที่ 4.13 ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดมีค่า 0.5 และ 2 โมลาร์ พบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 4-13

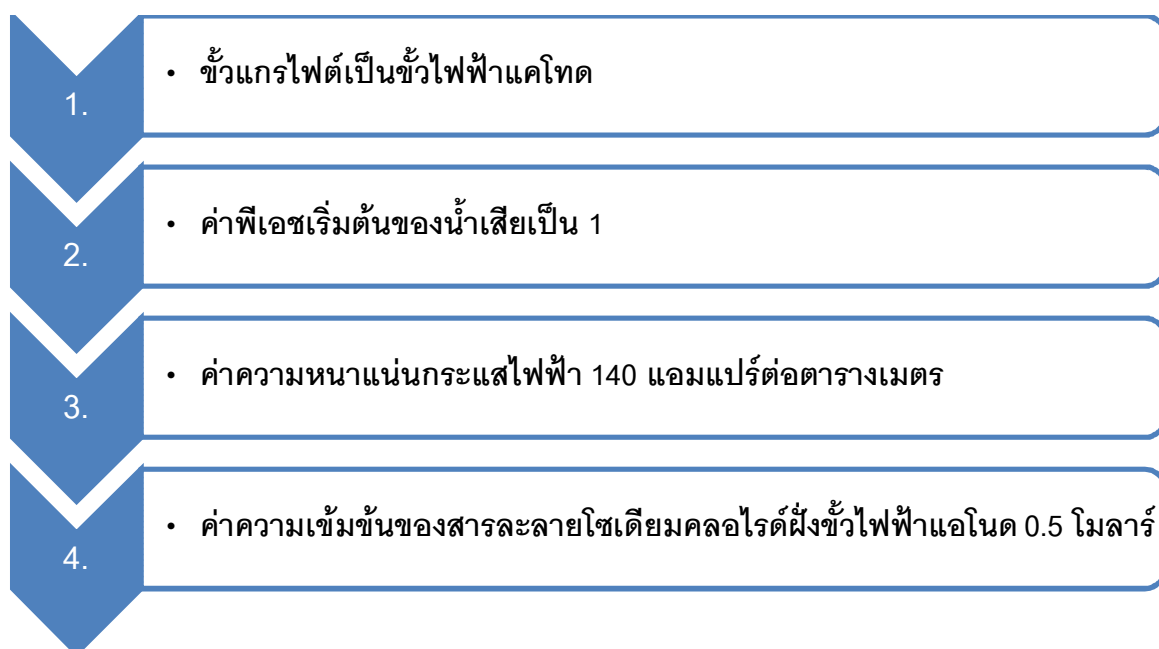
$$E = IR \quad (4-13)$$

จากสมการที่ 4-13 ในระบบที่ควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า (I) ให้คงที่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้า (E) จะเพิ่มขึ้น เมื่อความต้านทานของเซลล์เคมีไฟฟ้า (R) เพิ่มขึ้น โดยในระหว่างการดำเนินไปของปฏิกิริยาในการทดลองนี้ พบว่า ความเข้มข้นของ Ni^{2+} , SO_4^{2-} และ H^+ ในสารละลายฝั่งแคโทดลดลง (ปฏิกิริยาที่ 4-1 ถึง 4-3) เมื่อเวลาผ่านไป เป็นผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายฝั่งแคโทดลดลง นั่นคือค่าความต้านทานของเซลล์เคมีไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้ว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามเวลา (สมการที่ 4-13) ดังแสดงในรูปที่ 4-13

สำหรับความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ค่า 0 และ 0.1 โมลาร์ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป (รูปที่ 4.13) คาดว่ามีสาเหตุมาจากสารละลายโซเดียมคลอไรด์ในฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดมีความเข้มข้นต่ำเกินไป เป็นผลให้ปริมาณ Cl^- ที่เข้าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วไม่เพียงพอกับปริมาณกระแสที่ควบคุม จึงเกิดการแพร่ของ Cl^- ส่วนหนึ่งจากสะพานเกลือซึ่งบรรจุสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์เพื่อเข้าทดแทนปริมาณ Cl^- ที่ไม่เพียงพอต่อการจ่ายอิเล็กตรอนสำหรับสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด

(ปฏิกิริยาที่ 4-10) ทั้งนี้คาดว่าอัตราการแพร่ของ Cl^- ออกจากสะพานเกลือเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราเร็วที่สูงกว่าอัตราการลดลงของไฮดรอกไซด์ในสารละลายฝั่งแคโทด (ปฏิกิริยาที่ 4-1 ถึง 4-3) เป็นผลให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ารวมของเซลล์เคมีไฟฟ้าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ดังนั้น ที่ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ค่า 0 และ 0.1 โมลาร์ จึงเป็นค่าที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป

สรุป เมื่อนำความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ค่า 0, 0.1, 0.5 และ 2 โมลาร์ มาพิจารณาเปรียบเทียบการกำจัดนิกเกิลในสารละลาย พบว่า ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ค่า 0.5 โมลาร์ เป็นค่าที่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถกำจัดนิกเกิลในสารละลายได้ทั้งหมด ณ นาฬิกาที่ 12 ซึ่งใช้ระยะเวลาเท่ากับเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ค่า 2 โมลาร์ หากแต่ใช้ปริมาณของโซเดียมคลอไรด์ที่น้อยกว่า ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ได้อย่างมาก



รูปที่ 4.14 สรุปสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

รูปที่ 4.14 สรุปสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 976 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 0.27 และค่าการนำไฟฟ้า 471.0 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ได้สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง คือ การใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1 (โดยปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โม

ลาร์ พบว่า สามารถกำจัดนิกเกิลได้ 99.96% มีค่าพีเอชสุดท้ายเป็น 11.92 ณ นาทีที่ 12 และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 33.89% ณ นาทีที่ 3

4.2 การทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริง

น้ำเสียจริงเก็บมาจากของเสียห้องปฏิบัติการเคมีที่ได้จากการเรียนการสอนและการวิจัย โดยน้ำเสียที่เก็บมามีโลหะหนักซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญ คือ นิกเกิล และมีองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ แคลเซียม ไอออน แอนไอออน และสารอินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติของน้ำเสียจริงรวบรวมจากของเสียห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

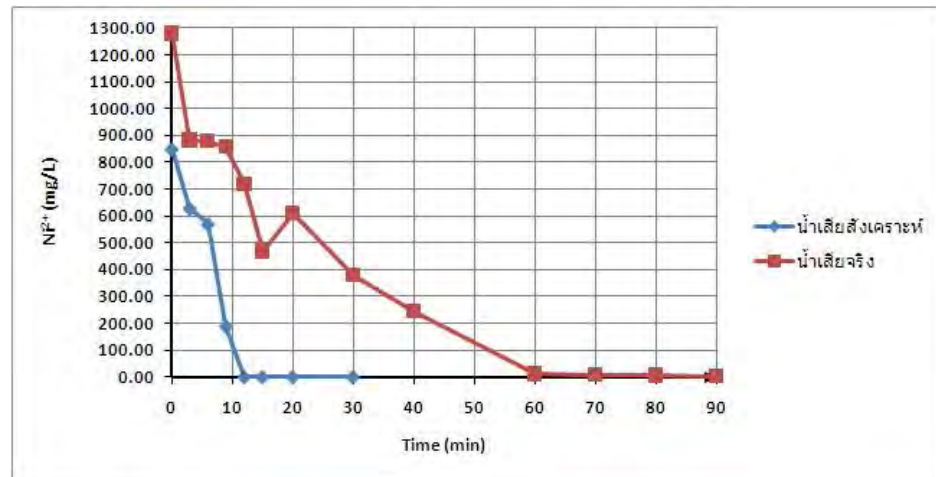
1. การทำคุณภาพวิเคราะห์ (Qualitative analysis)			
พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ตรวจพบ		
1.1 ลักษณะภายนอก	ของเหลวใสสีเขียวอ่อน		
1.2 แคลเซียมไอออน	Ni ²⁺ , H ⁺ และ NH ₄ ⁺		
1.3 แอนไอออน	SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , และ OH ⁻		
1.4 สารอินทรีย์	HC ₄ H ₇ O ₂ N ₂ , C ₃ H ₇ OH, C ₆ H ₈ O ₇ , C ₄ H ₆ O ₆		
2. การทำปริมาณวิเคราะห์ (Quantitative analysis)			
พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	หน่วย	ความเข้มข้น	
		ก่อนปรับค่าพีเอช	หลังปรับค่าพีเอช
2.1 ค่าพีเอช	-	0.30	1.03
2.2 ค่าการนำไฟฟ้า	mS/cm	360.6	123.8
2.3 นิกเกิล (Ni ²⁺)	mg/L	1,405	1,281

4.2.1 การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

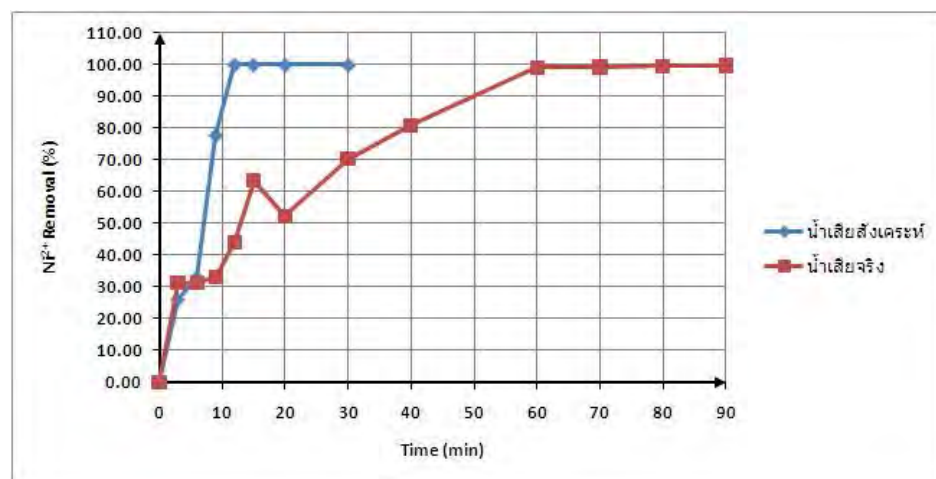
เมื่อได้สภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ ดังแสดงในผลการทดลองส่วนที่ 1 ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายซึ่งเชื่อมต่อกับสารละลายด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมคลอไรด์ พบว่า สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง คือ การใช้ขั้วแกรไฟต์ ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น

1 (โดยปรับค่าพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์) ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์

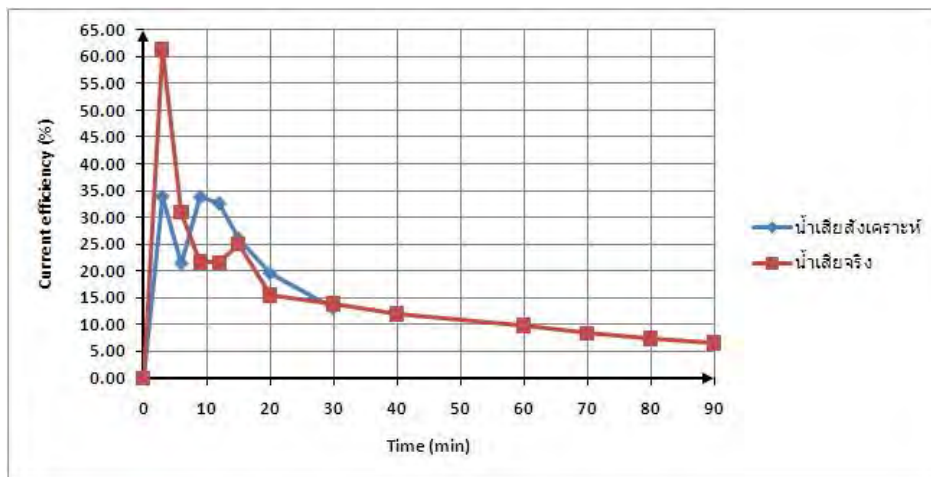
ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจริง ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการผ่านค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร แสดงในรูปที่ 4.15, 4.16 และ 4.17



รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของนิกเกิล เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ 2.02 แอมแปร์ ณ เวลาต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง



รูปที่ 4.16 ร้อยละการกำจัดนิกเกิล เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ 2.02 แอมแปร์ ณ เวลาต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

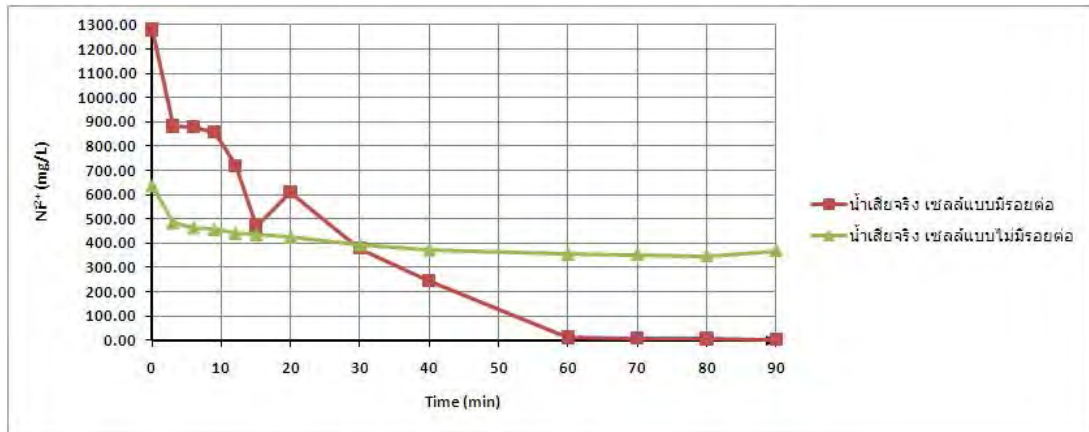


รูปที่ 4.17 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อทำการผ่านกระแสไฟฟ้าคงที่ 2.02 แอมแปร์ ณ เวลาต่างๆ ในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

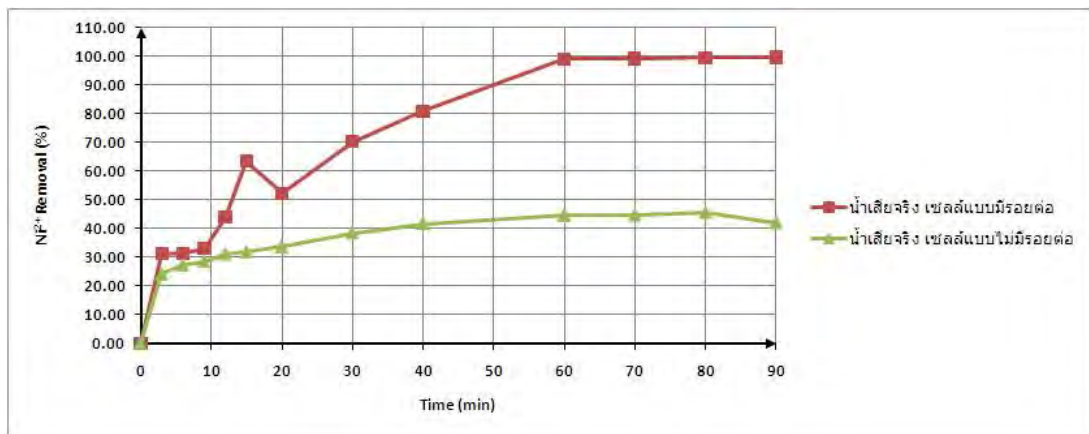
จากผลการทดลอง พบว่า น้ำเสียจริงสามารถกำจัดนิเกิล ณ นาที่ที่ 60 ได้ลดลงเหลือ 12.07 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.06% และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ 61.34% ณ นาที่ที่ 3 ที่ร้อยละการกำจัด 31.15% ขณะที่น้ำเสียสังเคราะห์สามารถกำจัดนิเกิล ณ นาที่ที่ 12 ได้ลดลงเหลือ 0.37 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.96% และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ 33.89% ณ นาที่ที่ 3 ที่ร้อยละการกำจัด 25.96%

4.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลต่อรูปแบบของการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

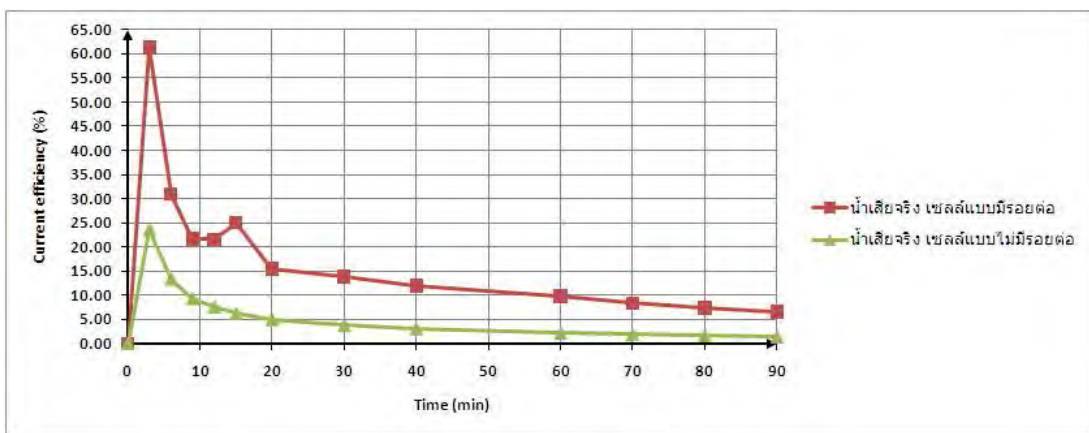
การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย ออกแบบการทดลองโดยผสมน้ำเสียจริงภายหลังการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1 โดยปรับค่าพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร กับ สารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร โดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ขั้วแกรไฟต์ขนาด 4 × 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 2 แผ่น เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด และขั้วแกรไฟต์ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลกับรูปแบบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย (จากผลการทดลองที่ 4.2.1) ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.18, 4.19 และ 4.20



รูปที่ 4.18 ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียจริงเทียบกับเวลา เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย



รูปที่ 4.19 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริงเทียบกับเวลา เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย



รูปที่ 4.20 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสในน้ำเสียจริงเทียบกับเวลา เมื่อต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อและแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

จากผลการทดลอง พบว่า การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายสามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 60 ได้ลดลงเหลือ 353.74 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้นที่ค่า 637.56 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 44.52% และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 23.62% ณ นาทีที่ 3 ที่ร้อยละการกำจัด 24.09% ขณะที่การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายสามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 60 ได้ลดลงเหลือ 12.07 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้นที่ค่า 1280.87 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.06% และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 61.34% ณ นาทีที่ 3 ที่ร้อยละการกำจัด 31.15%

ตารางที่ 4.2 รูปแบบของเซลล์เคมีไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

หัวข้อ	แบบมีรอยต่อของสารละลาย	แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย
1. ความเข้มข้น Ni^{2+} เริ่มต้น (ภายหลังการปรับค่าพีเอช)	1,280.87 mg/L	637.56 mg/L
2. ค่าพีเอชเริ่มต้น	1 (ปรับโดย NaOH)	
3. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	แกรไฟต์	
4. ค่าความหนาแน่นกระแส	140 A/m ²	
5. ความเข้มข้น NaCl	0.5 M	
6. เวลาที่ใช้ในการกำจัด Ni^{2+}	60 นาที	
7. ความเข้มข้น Ni^{2+} หลังกำจัด	12.07 mg/L	353.74
8. ร้อยละการกำจัด Ni^{2+}	99.06%	44.52%
9. ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส	สูงสุดที่ 61.34% ณ นาทีที่ 3	สูงสุดที่ 23.62% ณ นาทีที่ 3

การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายมีความสามารถในการกำจัดนิกเกิลที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ซึ่งสามารถกำจัดนิกเกิลจากสารละลายได้มากกว่า 99% ณ เวลาในการกำจัดเท่ากันที่ 60 นาที คาดว่าการกำจัดนิกเกิลให้ได้มากกว่า 99% สำหรับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อต้องเพิ่มระยะเวลาของการทดลองให้ยาวนานยิ่งขึ้น จึงจะสามารถกำจัดนิกเกิลได้ทั้งหมด

ดังนั้น รูปแบบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยใช้สะพานเกลือที่บรรจุสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลองนี้จึงมีความเหมาะสม ทำให้ร้อยละการกำจัดนิกเกิลเข้าใกล้ 100% ในระยะเวลาการกำจัดนิกเกิลที่รวดเร็ว และได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่สูง เมื่อเทียบกับการจัดรูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ไม่มีรอยต่อของสารละลาย โดยผลการทดลองจากงานวิจัยนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองจากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองจากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อ	ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์	มะลิ หุ่นสม	หทัยรัตน์ ชื้อสุวรรณ	งานวิจัยนี้
1. ปีที่ทำการวิจัย	2542	2544	2544	2553
2. องค์ประกอบโลหะหนักในตัวอย่าง	Ni ²⁺	Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Cr ⁶⁺	Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Cr ⁶⁺	Ni ²⁺
3. แหล่งที่มาของตัวอย่าง	น้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ	สลัดจ์โรงงานบำบัดน้ำเสีย	น้ำเสียห้องปฏิบัติการ
4. ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Ni ²⁺	1,000 mg/L	128 mg/L	95 mg/L	1,281 mg/L
5. รูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้า	ไม่มีรอยต่อ	มีรอยต่อ โดยใช้เยื่อเลือกผ่านไอออนลบ		มีรอยต่อ โดยใช้สะพานเกลือที่บรรจุ sat. NaCl _(aq)
6. ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมในการทดลอง	กระแสไฟฟ้า	ความต่างศักย์ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้า
7. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	เหล็กกล้าไร้สนิม			แกรไฟต์
8. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	ไทเทเนียมเคลือบ รูทินีียมออกไซด์	แพลทินัม/SCE (RE)	ไทเทเนียมเคลือบ รูทินีียมออกไซด์	แกรไฟต์
9. ค่าพีเอชเริ่มต้น	3.3 (ปรับด้วย H ₂ SO ₄)	1 (ปรับด้วย H ₂ SO ₄)	1 (ละลายด้วย H ₂ SO ₄)	1 (ปรับด้วย NaOH)
10. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสำหรับการกำจัดโลหะหนัก	ดีที่สุดที่ 140 A/m ²	ดีที่สุดที่ 90 A/m ²	ดีที่สุดที่ 130 A/m ²	ดีที่สุดที่ 140 A/m ²
11. ความเข้มข้นของ NaCl ผังขั้วไฟฟ้าแอโนด	-			0.5 M
12. ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดสำหรับการกำจัด Ni ²⁺	32%	ต่ำกว่า 1%	ต่ำกว่า 1%	61.34%
13. ร้อยละการกำจัด Ni ²⁺	89.95%	99%	90%	99.06%
14. เวลาที่ใช้ในการกำจัด Ni ²⁺	8.15 ชั่วโมง	8.5 ชั่วโมง	13 ชั่วโมง	1 ชั่วโมง
15. Ni ²⁺ ถูกกำจัดในรูปของ	Ni _(s)	Ni(OH) _{2(s)}		Ni _(s) และ Ni(OH) _{2(s)}

4.3 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการกำจัด

จากผลการทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการทดสอบกับน้ำเสียจริง ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย เพื่อศึกษาหาค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้ คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียและที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมคลอไรด์ ตามลำดับ และคำนวณค่าไฟฟ้าที่ต้องใช้ จากนั้นทำการคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการ (รายละเอียดการคำนวณอยู่ในภาคผนวก) โดยราคาที่คำนวณได้จะคิดเฉพาะค่าใช้จ่ายในการกำจัดนิกเกิลซึ่งไม่รวมค่าอุปกรณ์

4.3.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

ในการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้มีค่าเป็น 1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมีมวลต่อปริมาตร ค่าสารเคมีมีค่า 1,111.67 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และค่าสารเคมีที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ มีค่า 330.35 บาทต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าใช้จ่ายสารเคมีรวมทั้งสิ้น 1,442.02 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

4.3.2 ค่าใช้จ่ายด้านเคมีไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายในการกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ จะคำนวณค่าไฟฟ้าโดยไม่ได้คำนวณถึงต้นทุนที่ใช้ทั้งหมดในการบำบัด เพราะการทดลองนี้เป็นการทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติมากน้อยเพียงใด ซึ่งค่าใช้จ่ายที่ใช้เพื่อปรับแรงดันไฟฟ้า มีค่า 199.03 บาทต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย และ 130.70 บาทต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

ตารางที่ 4.4 สรุปค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอก-พูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 2.02 แอมแปร์

ค่าใช้จ่าย	แบบมีรอยต่อของสารละลาย	แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย
1.ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์	1,111.67 บาท/m ³	1,111.67 บาท/m ³
2.ค่าโซเดียมคลอไรด์	330.35 บาท/m ³	330.35 บาท/m ³
รวมค่าสารเคมี	1,442.02 บาท/m³	1,442.02 บาท/m³
3.ค่าไฟฟ้า	199.03 บาท/m ³	130.70 บาท/m ³
รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมด	1,641.05 บาท/m³	1,572.72 บาท/m³
% Ni ²⁺ removal ที่ 60 นาที	<u>99.06%</u>	<u>44.52%</u>

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการเคมี ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

1. การกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 976 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช 0.27 และค่าการนำไฟฟ้า 471.0 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ได้สภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลอง คือ การใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียให้มีค่า 1 ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และค่าความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์มีค่า 0.5 โมลาร์ พบว่า สามารถกำจัดนิกเกิลได้ 99.96% สารละลายมีค่าพีเอชสุดท้ายเป็น 12.63 ณ นาทีที่ 30 และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด 33.89% ณ นาทีที่ 3
2. การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายที่มีการปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 1 และความเข้มข้นของนิกเกิลเริ่มต้น 1,281 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าการนำไฟฟ้า 123.8 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร พบว่า สามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 60 ได้ลดลงเหลือ 12.07 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.06% และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือ 61.34% ณ นาทีที่ 3
3. การกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย มีการปรับค่าพีเอชของสารละลายเป็น 1 และความเข้มข้นของนิกเกิล 638 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าการนำไฟฟ้า 123.8 มิลลิซีเมนส์ต่อเซนติเมตร พบว่า สามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 60 ได้ลดลงเหลือ 353.74 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือคิดเป็นร้อยละการ

กำจัดที่ 44.52% และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือ 23.62% ณ นาทีที่ 3 ข้อมูลส่วนนี้แสดงให้เห็นว่ารูปแบบการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายให้ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลที่สูงกว่าการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

4. พลังงานที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย) คือ 79.61 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้าประมาณ 199.03 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และค่าสารเคมีประมาณ 1,442.02 บาทต่อลูกบาศก์เมตร รวมค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 1,641.05 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่าใช้จ่ายที่คิดไม่รวมค่าเครื่องมือ

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการวิจัย

หัวข้อ	น้ำเสียสังเคราะห์แบบมีรอยต่อ	น้ำเสียจริงแบบมีรอยต่อ	น้ำเสียจริงแบบไม่มีรอยต่อ
1. ความเข้มข้น Ni^{2+} เริ่มต้น (ภายหลังการปรับค่าพีเอช)	850 mg/L	1,281 mg/L	638 mg/L
2. ค่าพีเอชเริ่มต้น	1 (ปรับโดย NaOH)		
3. ชนิดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	แกรไฟต์		
4. ค่าความหนาแน่นกระแส	140 A/m ²		
5. ความเข้มข้น NaCl	0.5 M		
6. เวลาที่ใช้ในการกำจัด Ni^{2+}	12 นาที	60 นาที	
7. ความเข้มข้น Ni^{2+} หลังกำจัด	0.37 mg/L	12.07 mg/L	353.74 mg/L
8. ร้อยละการกำจัด Ni^{2+}	99.96%	99.06%	44.52%
9. ค่าพีเอชสุดท้าย	11.92	12.54	0.92
10. ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส	สูงสุดที่ 33.89% ณ นาทีที่ 3	สูงสุดที่ 61.34% ณ นาทีที่ 3	สูงสุดที่ 23.62% ณ นาทีที่ 3
11. ค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์	-	1,111.67 บาท/m ³	
12. ค่าโซเดียมคลอไรด์	-	330.35 บาท/m ³	
13. ค่าไฟฟ้า	-	199.03 บาท/m ³	130.70 บาท/m ³
14. รวมค่าใช้จ่าย	-	<u>1,641.05 บาท/m³</u>	<u>1,572.72 บาท/m³</u>

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. หากไม่ทำการปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เสนอให้หาวิธีในการกำจัดเซลล์ในสารละลายก่อนการทำการทดลอง
2. หากทำการปรับค่าพีเอชของสารละลาย เสนอให้ใช้แอมโมเนียเป็นสารเคมีที่ใช้ในการปรับค่าพีเอช
3. เสนอให้ศึกษาการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า
4. เสนอให้ศึกษาผลของความเร็วในการกวนสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดต่อการเข้าเกาะของนิกเกิลที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด
5. เสนอให้ศึกษาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเปรียบเทียบกับโซเดียมคลอไรด์

5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

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

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มิตินาการพิมพ์.
- ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์. 2542. ผลของตัวแปรต่ออิเล็กทรอนิกส์โพสิชันของนิกเกิล. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทรัพย์ากรธณี, กอม. 2549. ฝายพัฒนาโลหกรรม. สภาวะการณ์อุตสาหกรรมโลหะ. กรุงเทพฯ: กองโล
หกรรม.
- ปริเมษ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรตในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา
มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2552. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มะลิ นุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วย
เทคนิคเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลาวัลย์ ศรีพงศ์. 2543. การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนัก
จากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. 2543. ปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 6 กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุทธิพร จิตต์มิตรภาพ. 2551. คู่มือแนวปฏิบัติที่ดีด้านการบริหารจัดการสารเคมีและของเสีย
อันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรางค์ อนุกุล. 2542. ปฏิบัติการเคมีคุณภาพวิเคราะห์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย.
- หทัยทัต ชี้อสุวรรณ. 2544. การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์
ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อินทิวา หาญพงษ์พันธ์. 2539. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิรดี สุนทรภา. 2549. การนำกลับดีบุกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีและวิธีทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

Cameselle, C., Pazos, M. and Sanroman, M.A. 2005. Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimization and scale-up. Chemosphere 60: 1080-1086.

Carlos, I. A., Bidoia, E.D., Pallone, E. M. J. A., Almeida, M. R. H. and Souza, C. A.C. 2002. Effect of tartrate content on aging and deposition condition of copper-tin electrodeposits from a non-cyanide acid bath. Surface and Coatings Technology. 157: 14-18.

Fourcade, F. and Tzedakis, T. 2000. Study of the mechanism of the electrochemical deposition of silver from an aqueous silver iodide suspension. Journal of Electroanalytical Chemistry. 493: 20-27.

Freeman, H.M. 1989. Handbook of hazardous waste treatment and disposal. USA: McGraw Hill Book.

Friedrich, H. 1962. Ion Exchange. New York: McGraw-Hill.

Lee, H.Y., Kim, S.G. and Oh, J.K. 2005. Electrochemical leaching of nickel from low-grade laterites. Hydrometallurgy. 77: 263-268.

Manahan, J. 1993. Ion Exchange. Ann Arbor Science Publishers Department of Environmental Engineering. Illinois institute of technology. Chicago. 122 p.

Orinakova, R., Streckova, M., Trnkova, L., Rozik, R. and Galova, M. 2006. Comparison of chloride and sulphate electrolytes in nickel electrodeposition on a paraffin impregnated graphite electrode. Journal of Electroanalytical Chemistry. 594: 152-159.

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

Scott, K., Chen, X., Atkinson, J.W., Todd, M. and Armstrong R.D. 1997. Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit boards. Conservation and Recycling. 20: 43-55.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด

เวลา (นาที)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	4.2	0.27	471.0	979.20	979.20	979.20	979.20	0.00	0.00	0.00
20	4.1	0.40	431.3	946.09	952.70	938.65	945.81	7.03	3.41	0.77
40	4.2	0.41	405.3	960.15	973.37	929.55	954.36	22.48	2.54	0.29
60	4.3	0.42	369.7	967.59	973.37	930.38	957.11	23.33	2.26	0.17
80	4.4	0.42	329.3	953.53	986.61	935.38	958.51	25.98	2.11	0.12
100	4.5	0.43	290.3	966.76	977.51	921.28	955.19	29.85	2.45	0.11
120	4.7	0.50	247.3	956.84	981.65	940.30	959.60	20.81	2.00	0.08
140	5.0	0.56	203.5	950.22	951.88	938.65	946.92	7.21	3.30	0.11
160	5.3	0.73	148.2	950.22	913.84	934.51	932.86	18.25	4.73	0.13
180	6.2	1.23	104.0	823.86	829.48	885.72	846.35	34.21	13.57	0.34
200	6.2	12.47	107.0	2.57	3.31	2.57	2.82	0.43	99.71	2.25
220	6.2	12.81	125.2	4.78	4.04	3.31	4.04	0.74	99.59	2.04
240	6.4	12.95	153.5	1.10	1.84	4.04	2.33	1.53	99.76	1.88

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด

เวลา (นาที)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.9	0.27	471.0	979.20	979.20	979.20	979.20	0.00	0.00	0.00
20	4.1	0.49	446.7	1,029.62	987.44	980.00	999.02	26.76	-2.02	-0.46
40	4.2	0.47	405.7	1,022.17	998.19	986.61	1002.32	18.14	-2.36	-0.27
60	4.3	0.44	373.7	1,027.13	963.46	992.40	994.33	31.88	-1.55	-0.12
80	4.5	0.42	333.0	1,001.50	964.28	998.19	987.99	20.60	-0.90	-0.05
100	4.7	0.42	295.0	973.38	964.28	976.69	971.45	6.42	0.79	0.04
120	4.8	0.42	248.7	994.05	973.38	962.63	976.69	15.97	0.26	0.01
140	5.2	0.51	208.0	980.00	953.53	962.63	965.38	13.45	1.41	0.05
160	5.6	0.63	156.4	951.88	946.09	974.21	957.39	14.85	2.23	0.06
180	6.5	1.00	114.9	932.00	932.03	924.59	929.54	4.29	5.07	0.13
200	6.8	12.28	108.7	1.10	2.57	1.84	1.84	0.74	99.81	2.25
220	6.9	12.66	132.2	1.10	3.31	1.84	2.08	1.12	99.79	2.05
240	7.0	12.78	158.6	1.84	1.84	1.10	1.59	0.43	99.84	1.88

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด

เวลา (นาที)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	4.0	0.27	471.0	979.20	979.20	979.20	979.20	0.00	0.00	0.00
20	4.8	2.32	100.6	161.33	156.89	158.23	158.82	2.28	83.78	18.92
40	5.0	2.68	101.0	133.56	151.33	135.06	139.98	9.86	85.70	9.68
60	5.4	2.73	102.2	125.78	121.33	125.78	124.30	2.57	87.31	6.57
80	5.6	2.90	99.6	121.33	116.89	116.89	118.37	2.56	87.91	4.96
100	6.1	2.90	96.5	125.78	114.67	113.45	117.97	6.79	87.95	3.97
120	6.8	3.03	101.6	123.56	113.56	112.44	116.52	6.12	88.10	3.32
140	7.3	3.20	90.3	110.22	112.44	110.00	110.89	1.35	88.68	2.86
160	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
180	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
200	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
220	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
240	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยไม่ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

เวลา (นาที)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	4.2	0.27	471.0	979.20	979.20	979.20	979.20	0.00	0.00	0.00
10	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
20	4.1	0.40	431.3	946.09	952.70	938.65	945.81	7.03	3.41	0.77
30	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
40	4.2	0.41	405.3	960.15	973.37	929.55	954.36	22.48	2.54	0.29
60	4.3	0.42	369.7	967.59	973.37	930.38	957.11	23.33	2.26	0.17
80	4.4	0.42	329.3	953.53	986.61	935.38	958.51	25.98	2.11	0.12
100	4.5	0.43	290.3	966.76	977.51	921.28	955.19	29.85	2.45	0.11
120	4.7	0.50	247.3	956.84	981.65	940.30	959.60	20.81	2.00	0.08
140	5.0	0.56	203.5	950.22	951.88	938.65	946.92	7.21	3.30	0.11
160	5.3	0.73	148.2	950.22	913.84	934.51	932.86	18.25	4.73	0.13
180	6.2	1.23	104.0	823.86	829.48	885.72	846.35	34.21	13.57	0.34
200	6.2	12.47	107.0	2.57	3.31	2.57	2.82	0.43	99.71	2.25

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 1

เวลา (นาทื)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	5.1	1.05	129.5	926.61	926.61	926.61	926.61	0.00	0.00	0.00
10	5.2	6.89	123.0	140.22	129.11	135.11	134.81	5.56	85.45	36.52
20	5.2	12.25	130.2	1.84	1.10	1.10	1.35	0.43	99.85	21.34
30	5.2	12.51	135.0	1.10	0.37	0.37	0.61	0.42	99.93	14.24
40	5.2	12.70	149.8	1.10	0.37	0.37	0.61	0.42	99.93	10.68
60	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
100	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
140	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
160	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
180	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
200	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 3

เวลา (นาที)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	5.3	2.98	115.3	916.17	916.17	916.17	916.17	0.00	0.00	0.00
10	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
20	5.5	12.48	137.6	1.84	1.84	1.84	1.84	0.00	99.80	21.08
30	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
40	5.5	12.77	153.5	1.84	0.37	0.37	0.86	0.85	99.91	10.55
60	5.5	12.89	172.3	1.10	1.10	0.37	0.86	0.42	99.91	7.04
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
100	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
140	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
160	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
180	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
200	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 7

เวลา (นาที)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	5.2	7.00	116.1	843.13	843.13	843.13	843.13	0.00	0.00	0.00
10	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
20	5.2	12.46	136.1	0.37	1.10	1.10	0.86	0.42	99.90	19.42
30	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
40	5.2	12.79	153.7	1.84	1.84	1.10	1.59	0.43	99.81	9.70
60	5.2	12.86	167.1	0.37	1.10	1.10	0.86	0.42	99.90	6.47
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
100	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
140	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
160	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
180	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
200	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	5.0	1.03	117.1	848.99	848.99	848.99	848.99	0.00	0.00	0.00
3	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
5	5.1	1.41	113.3	824.21	701.40	750.28	758.63	61.83	10.64	11.69
6	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
9	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
10	5.2	4.61	108.9	624.21	631.23	629.38	628.27	3.64	26.00	14.28
12	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
15	5.1	10.65	113.2	1.10	0.37	1.10	0.86	0.42	99.90	36.58
20	5.2	12.01	116.9	0.37	3.31	1.10	1.59	1.53	99.81	27.41
30	5.0	12.44	121.4	1.10	1.10	0.37	0.86	0.42	99.90	18.29
40	5.3	12.65	127.2	0.37	1.10	0.37	0.61	0.42	99.93	13.72
60	4.8	12.75	142.8	1.10	0.37	0.37	0.61	0.42	99.93	9.15
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาที)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)							SD	% Removal	% Current efficiency	
				1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย				
0	5.2	1.03	117.1	848.99	848.99	848.99	848.99	848.99	848.99	848.99	848.99	0.00	0.00	0.00
3	5.4	1.37	112.1	#N/A	#N/A	#N/A	722.46	568.07	575.09	621.87	87.18	26.75	34.91	
5	5.5	1.69	109.8	718.95	704.91	710.94	#N/A	#N/A	#N/A	711.60	7.04	16.18	12.67	
6	5.9	2.03	108.9	#N/A	#N/A	#N/A	680.35	592.63	568.07	613.68	59.03	27.72	18.09	
9	6.1	7.89	109.1	#N/A	#N/A	#N/A	219.11	313.78	340.44	291.11	63.76	65.71	28.59	
10	5.5	8.99	108.2	0.37	40.22	41.45	#N/A	#N/A	#N/A	27.35	23.37	96.78	37.89	
12	6.1	11.62	110.2	#N/A	#N/A	#N/A	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	32.61	
15	5.7	12.10	114.6	1.10	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.49	0.30	99.94	26.09	
20	5.8	12.40	119.2	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	19.57	
30	5.7	12.65	128.9	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	13.05	
40	5.7	12.74	137.5	0.37	0.37	0.37	#N/A	#N/A	#N/A	0.37	0.00	99.96	9.78	
60	5.6	12.87	157.6	0.37	0.37	0.37	#N/A	#N/A	#N/A	0.37	0.00	99.96	6.52	
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 200 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	6.8	1.03	117.1	848.99	848.99	848.99	848.99	0.00	0.00	0.00
3	6.8	1.46	112.4	669.82	673.33	655.79	666.31	9.28	21.52	19.70
5	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
6	6.7	7.63	109.5	336.00	402.67	500.44	413.04	82.71	51.35	23.50
9	6.7	11.81	113.9	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	30.50
10	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
12	6.7	12.15	118.3	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	22.88
15	6.8	12.35	124.5	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	18.30
20	6.6	12.51	129.8	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	13.73
30	6.7	12.69	143.2	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	9.15
40	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 2 โมลาร์

เวลา (นาท)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	5.1	1.03	117.1	848.99	848.99	848.99	848.99	0.00	0.00	0.00
3	5.4	1.37	112.1	722.46	568.07	575.09	621.87	87.18	26.75	34.91
6	5.9	2.03	108.9	680.35	592.63	568.07	613.68	59.03	27.72	18.09
9	6.1	7.89	109.1	219.11	313.78	340.44	291.11	63.76	65.71	28.59
12	6.1	11.62	110.2	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	32.61
15	5.8	12.11	114.1	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	26.09
20	6.1	12.42	118.8	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	19.57
30	5.8	12.68	129.1	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	13.05
40	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
100	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์

เวลา (นาทีก)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	6.8	1.03	117.1	848.99	848.99	848.99	848.99	0.00	0.00	0.00
3	6.7	1.43	114.0	620.70	634.74	630.24	628.56	7.17	25.96	33.89
6	7.1	2.62	110.8	571.58	557.54	580.60	569.91	11.62	32.87	21.45
9	7.0	7.95	112.0	187.11	189.33	190.60	189.01	1.77	77.74	33.82
12	7.2	11.92	115.7	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	32.61
15	7.3	12.17	120.6	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	26.09
20	7.4	12.37	126.7	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	19.57
30	7.5	12.63	134.4	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	13.05
40	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
100	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0.1 โมลาร์

เวลา (นาทึ)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	8.8	1.03	117.1	848.99	848.99	848.99	848.99	0.00	0.00	0.00
3	8.2	1.33	111.3	462.81	469.82	554.04	495.56	50.77	41.63	54.33
6	6.9	1.95	109.3	462.81	540.00	571.58	524.80	55.96	38.19	24.92
9	6.7	7.74	108.9	298.22	407.11	311.56	338.96	59.39	60.07	26.14
12	6.6	11.60	110.3	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	32.61
15	6.4	12.11	114.3	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	26.09
20	6.2	12.43	118.2	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	19.57
30	6.1	12.67	129.6	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	13.05
40	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
100	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ค่าความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0 โมลาร์

เวลา (นาทีก)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	9.4	1.03	117.1	848.99	848.99	848.99	848.99	0.00	0.00	0.00
3	7.8	1.30	114.8	802.61	810.23	805.11	805.98	3.88	5.07	6.61
6	7.4	1.82	111.9	783.36	800.90	801.87	795.38	10.42	6.31	4.12
9	6.9	4.79	111.4	682.01	665.61	689.64	679.09	12.28	20.01	8.71
12	6.9	9.37	114.6	185.22	181.34	194.98	187.18	7.03	77.95	25.43
15	6.6	11.89	117.3	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	26.09
20	6.6	12.32	121.8	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	19.57
30	6.5	12.66	131.7	0.37	0.37	0.37	0.37	0.00	99.96	13.05
40	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
60	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
80	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
100	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
120	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

เวลา (นาที)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	6.7	1.03	123.8	1280.87	1280.87	1280.87	1280.87	0.00	0.00	0.00
3	6.6	1.25	115.9	898.26	866.38	880.87	881.84	15.96	31.15	61.34
6	6.8	1.51	114.0	895.36	880.87	860.21	878.81	17.67	31.39	30.90
9	6.7	2.33	111.4	889.57	834.49	851.02	858.36	28.26	32.99	21.65
12	6.6	4.93	112.1	715.45	721.45	720.45	719.12	3.21	43.86	21.59
15	6.6	7.04	111.6	640.29	315.65	450.44	468.79	163.10	63.40	24.97
20	6.7	8.17	111.0	692.46	538.84	600.65	610.65	77.30	52.33	15.45
30	6.8	9.06	109.8	495.36	324.35	320.33	380.01	99.91	70.33	13.85
40	6.8	9.71	106.5	338.84	196.81	200.60	245.42	80.93	80.84	11.94
60	7.0	12.54	116.7	14.20	11.30	10.72	12.07	1.86	99.06	9.75
70	7.1	12.80	124.2	11.30	8.41	7.39	9.03	2.03	99.29	8.38
80	7.0	12.88	136.3	8.41	5.51	6.12	6.68	1.53	99.48	7.35
90	7.1	12.96	140.8	5.51	2.61	4.28	4.13	1.46	99.68	6.54

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

เวลา (นาท)	E (Volt)	pH	Conductivity (mS/cm)	Nickel concentration (mg/L)				SD	% Removal	% Current efficiency
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	4.9	1.03	123.8	637.56	637.56	637.56	637.56	0.00	0.00	0.00
3	4.9	1.26	95.3	475.07	486.67	490.08	483.94	7.87	24.09	23.62
6	4.4	1.19	100.5	463.48	463.48	463.48	463.48	0.00	27.30	13.38
9	4.3	1.14	103.4	460.58	451.88	455.20	455.89	4.39	28.50	9.31
12	4.1	1.10	105.8	457.68	431.59	430.00	439.76	15.54	31.03	7.60
15	4.4	1.06	107.6	448.99	414.20	440.92	434.70	18.21	31.82	6.24
20	4.2	1.03	114.7	457.68	402.61	410.00	423.43	29.89	33.59	4.94
30	4.3	1.01	121.2	443.19	362.03	372.06	392.43	44.25	38.45	3.77
40	4.2	0.99	121.7	420.00	341.74	352.98	371.57	42.31	41.72	3.07
60	4.6	0.92	125.3	391.01	321.45	348.77	353.74	35.05	44.52	2.18
70	4.4	0.90	127.2	399.71	324.35	335.12	353.06	40.76	44.62	1.87
80	4.2	0.86	131.6	391.01	318.55	332.22	347.26	38.50	45.53	1.67
90	4.4	0.80	131.9	420.00	347.54	340.50	369.35	44.01	42.07	1.37

หมายเหตุ : #N/A = ไม่ได้วัดค่า

ตารางที่ ก.17 ผลเปรียบเทียบการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

เวลา (นาที)	แบบมีรอยต่อของสารละลาย						แบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย		
	น้ำเสียสังเคราะห์			น้ำเสียจริง			น้ำเสียจริง		
	Ni (mg/L)	% Removal	% Current efficiency	Ni (mg/L)	% Removal	% Current efficiency	Ni (mg/L)	% Removal	% Current efficiency
0	848.99	0.00	0.00	1280.87	0.00	0.00	637.56	0.00	0.00
3	628.56	25.96	33.89	881.84	31.15	61.34	483.94	24.09	23.62
6	569.91	32.87	21.45	878.81	31.39	30.90	463.48	27.30	13.38
9	189.01	77.74	33.82	858.36	32.99	21.65	455.89	28.50	9.31
12	0.37	99.96	32.61	719.12	43.86	21.59	439.76	31.03	7.60
15	0.37	99.96	26.09	468.79	63.40	24.97	434.70	31.82	6.24
20	0.37	99.96	19.57	610.65	52.33	15.45	423.43	33.59	4.94
30	0.37	99.96	13.05	380.01	70.33	13.85	392.43	38.45	3.77
40	#N/A	#N/A	#N/A	245.42	80.84	11.94	371.57	41.72	3.07
60	#N/A	#N/A	#N/A	12.07	99.06	9.75	353.74	44.52	2.18
70	#N/A	#N/A	#N/A	9.03	99.29	8.38	353.06	44.62	1.87
80	#N/A	#N/A	#N/A	6.68	99.48	7.35	347.26	45.53	1.67
90	#N/A	#N/A	#N/A	4.13	99.68	6.54	369.35	42.07	1.37

ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ

ข.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการกำจัดนิกเกิล

การกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า มีค่าใช้จ่ายอยู่หลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า เป็นต้น แต่ไม่สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดนั้นได้ โดยเฉพาะค่าเครื่องมือและอุปกรณ์ ได้แก่ เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้า เครื่องกวน และขั้วไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และไฟฟ้า ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายสำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ถ้าหากจะนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงแล้วนั้น ต้องมีการปรับปรุงขนาดของอุปกรณ์ให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำเสียที่ต้องการกำจัด

ข.1.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่าไฟฟ้า

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียและที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมคลอไรด์ โดยที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ราคา 23 บาทต่อกิโลกรัม และโซเดียมคลอไรด์ราคา 12 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม)

1. ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

น้ำเสียปริมาตร 1,500 มิลลิลิตร ปรับให้มีค่าพีเอชเป็น 1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 145 มิลลิลิตร ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1,111.67 บาทต่อน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

$$\frac{\text{บาท}}{1 \text{ m}^3 \text{ Waste}} = \frac{145 \text{ mL Sol}^n}{1.5 \text{ L Waste}} \times \frac{50 \text{ g NaOH}}{100 \text{ mL Sol}^n} \times \frac{1,000 \text{ L Waste}}{1 \text{ m}^3 \text{ Waste}} \times \frac{1 \text{ kg NaOH}}{1,000 \text{ g NaOH}} \times \frac{23 \text{ บาท}}{1 \text{ kg NaOH}} = \frac{1,111.67 \text{ บาท}}{1 \text{ m}^3 \text{ Waste}}$$

และต่อการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสีย 1 ครั้ง สามารถกำจัดน้ำเสียได้ 170 มิลลิลิตร ซึ่งต้องใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 160 มิลลิลิตร ถ้าน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 6,250 ครั้ง ดังนั้นจึงเสียค่าใช้จ่ายโซเดียมคลอไรด์ 330.35 บาทต่อน้ำเสียปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร

$$\frac{\text{บาท}}{1 \text{ m}^3 \text{ Waste}} = \frac{160 \text{ mL Sol}^n}{170 \text{ mL Waste}} \times \frac{0.5 \text{ mol NaCl}}{1,000 \text{ mL Sol}^n} \times \frac{58.5 \text{ g NaCl}}{1 \text{ mol NaCl}} \times \frac{1 \text{ kg NaCl}}{1,000 \text{ g NaCl}} \times \frac{12 \text{ บาท}}{1 \text{ kg NaCl}} \times \frac{1,000 \text{ mL Waste}}{1 \text{ L Waste}} \times \frac{1,000 \text{ L Waste}}{1 \text{ m}^3} = \frac{330.35 \text{ บาท}}{1 \text{ m}^3 \text{ Waste}}$$

2. ค่าใช้จ่ายในการทดลองทางเคมีไฟฟ้า

2.1 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางเคมีไฟฟ้า จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ โดยราคาค่าไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= \frac{I \text{ (A)} \times V \text{ (volt)} \times \text{time (hr)} / V \text{ (m}^3\text{)}}{((0.17/1000) \times 1000)} \\
 &= \frac{2.02 \text{ ampere} \times 6.7 \text{ volt} \times 1 \text{ hours}}{((0.17/1000) \times 1000)} \\
 &= 79.61 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการกำจัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อ
 ยูนิต ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times (\text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\
 &= 79.61 \times 2.5 \\
 &= 199.03 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นวิธีทางเคมีไฟฟ้ามีค่าใช้จ่าย 199.03 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

2.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางเคมีไฟฟ้า จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ใช้ โดยราคาค่าไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับกำลังไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= \frac{I \text{ (A)} \times V \text{ (volt)} \times \text{time (hr)} / V \text{ (m}^3\text{)}}{((0.17/1000) \times 1000)} \\
 &= \frac{2.02 \text{ ampere} \times 4.4 \text{ volt} \times 1 \text{ hours}}{((0.17/1000) \times 1000)} \\
 &= 52.28 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

ยูนิต ดังนี้

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการกำจัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อ

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times (\text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\ &= 52.28 \times 2.5 \\ &= 130.70 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นวิธีทางเคมีไฟฟ้ามีค่าใช้จ่าย 130.70 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ข.2 วิธีคำนวณผลการทดลอง

ข.2.1 ร้อยละการกำจัด

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

W_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

W_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

ข.2.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส

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

โดย n = ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์/eq)

C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)

C_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

$I(t)$ = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ข.2.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ในที่นี้ จะนำความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียจริง ที่เวลา 3 และ 30 นาที มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่าร้อยละการกำจัด และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (คิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้า 2.02 แอมแปร์) โดยใช้การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 0.02182 โมลาร์

เวลา 3 นาที ความเข้มข้นของนิกเกิล 0.01502 โมลาร์

เวลา 30 นาที ความเข้มข้นของนิกเกิล 0.00647 โมลาร์

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

แทนค่า ที่เวลา 3 นาที

$$= \frac{(0.02182 - 0.01502) \times 100\%}{0.02182}$$

$$= 31.16\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 3 นาที ร้อยละการกำจัดนิกเกิล คือ 31.16%

แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{(0.02182 - 0.00647) \times 100\%}{0.02182}$$

$$= 70.35\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ร้อยละการกำจัดนิกเกิล คือ 70.35%

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

แทนค่า ที่เวลา 3 นาที

$$= \frac{2 \times 96500 \times (0.02182 - 0.01502) \times 0.17 \times 100\%}{2.02 \times 3 \times 60}$$

$$= 61.36\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 3 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 61.36%

แทนค่า ที่เวลา 30 นาที

$$= \frac{2 \times 96500 \times (0.02182 - 0.00647) \times 0.17 \times 100\%}{2.02 \times 30 \times 60}$$
$$= 13.85\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 30 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 13.85%

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศรีณญ ศรีธัญรัตน์ เกิดเมื่อวันที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย สายสามัญ แผนการเรียนวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ จากโรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย จังหวัดศรีสะเกษ เมื่อปีการศึกษา 2546 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แล้วจึงสำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551 ที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 1 ซอยพหลโยธิน 24 แยก 4-3-4 แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900 เบอร์โทรศัพท์ 0-2511-1761