

การกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วย
ไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่



นายศุภชัย บุญประเสริฐพร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่มหาวิทยาลัยในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

REMOVAL OF NICKEL COPPER AND CHROMIUM FROM A PLATE-MAKING FACTORY
WASTEWATER BY ELECTRODEPOSITION CONTROLLED-CURRENT METHOD

Mr. Supachai Boonprasertporn

The logo of Chulalongkorn University, featuring a central emblem with a sunburst and a tiered structure, set against a light background.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสีย โรงงานผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบ ควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่
โดย	นายศุภชัย บุญประเสริฐพร
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์)

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

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฑฒิกะ)

ศุภชัย บุญประเสริฐพร : การกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่. (REMOVAL OF NICKEL COPPER AND CHROMIUM FROM A PLATE-MAKING FACTORY WASTEWATER BY ELECTRODEPOSITION CONTROLLED-CURRENT METHOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. เขมรัฐ โอสถาปนธ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: อ. ดร. เจริญขวัญ ไกรยา, 173 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุม กระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และแคโทด เพื่อศึกษาผลของชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ขั้วไฟฟ้าแอโนด ความเร็วการผสมขั้วไฟฟ้าแคโทด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และการปรับลดกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลา โดยมีความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 13 200 และ 101 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ทำการทดลองทั้ง 5 ชนิดไม่มีผลต่อการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิด จึงสามารถเลือกใช้น้ำเสียเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์แทนการใช้สารเคมี และน้ำประปา และจากการศึกษาความเร็วในการกวนผสม พบว่าความเร็วในการกวนผสมที่ดีที่สุด คือ 800 รอบต่อนาทีโดยใช้เวลาในการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิดน้อยที่สุดประมาณ 49 นาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และจากการศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ร้อยละการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิดจะเพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการกำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิด ประมาณ 20 นาที สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมได้ร้อยละ 96.04 มากกว่า 99.96 และ มากกว่า 99.94 ตามลำดับ และจากการศึกษาการปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลา พบว่า การปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบที่ 2 ใช้ระยะเวลากำจัดโลหะทั้ง 3 ชนิด น้อยที่สุดประมาณ 20 นาที โดยใช้พลังงานไฟฟ้า 2.92 กิโลวัตต์ ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

5370578621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: NICKEL / COPPER / CHROMIUM / WASTEWATER / ELECTRODEPOSITION

SUPACHAI BOONPRASERTPORN: REMOVAL OF NICKEL COPPER AND CHROMIUM FROM A PLATE-MAKING FACTORY WASTEWATER BY ELECTRODEPOSITION CONTROLLED-CURRENT METHOD. ADVISOR: ASST. PROF. KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., CO-ADVISOR: CHAROENKWAN KRAIYA, 173 pp.

The aim of this research is to investigate the removal of three heavy metals: nickel, copper and chromium from the wastewater of a plate-making factory by the controlled-current electrodeposition process. All experiments were carried out in a designed two-compartment cell equipped with graphite electrodes. The effects of the electrolyte solution type in the anode compartment, the stirring speed in the cathode compartment, current density and current density modify on the amount of time spent to remove the three metals were studied. The initial concentration of nickel, copper and chromium equal 13, 200 and 101 mg/L respective. The study found that all five electrolyte solutions, have no effects on the time spent on the removal of all three metals. Therefore, the wastewater was selected to use as the electrolyte solution instead of using chemicals. For the effect of the stirring speed, it is found that the speed of 800 rpm is best to remove all three metals with the least time of 49 minutes when 4.17 A/m² was applied. For the effect of the current density, Results indicate that metal removal at higher current density. The 96.04% nickel, more 99.96% copper and more 99.94 chromium were eliminated within 20 minutes when 10.42 A/m² was applied. For the effect of the current density modify, The 2nd form is best to remove all three metals with the least time of 20 minutes using power consumption 2.92 Kwh/m³

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2013

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัฒน์กะ ที่ได้ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ และงบประมาณจากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณครอบครัว เพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม	3
2.1.1 นิกเกิล.....	3
2.1.2 ทองแดง	3
2.1.3 โครเมียม.....	4
2.2 น้ำเสีย.....	4
2.2.1 ประเภทของน้ำเสีย.....	4
2.2.2 น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	6
2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน	7
2.3.2 กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)	7
2.3.3 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation).....	8
2.3.4 การดูดติดผิว (Adsorption).....	9
2.3.5 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)	9
2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	10
2.4.1 ส่วนประกอบเซลล์ไฟฟ้าเคมี	10

2.4.2 ชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	10
2.5 กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	12
2.5.1 กระบวนการขนส่งมวลในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	12
2.5.2 โครงสร้างชั้นไฟฟ้าที่เกิดในสารละลาย	13
2.5.3 กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic) และกระบวนการนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic)	14
2.5.4 โพลาริเซชัน	15
2.6 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	16
2.6.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)	16
2.6.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode).....	17
2.7 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี	18
2.7.1 โมนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell).....	18
2.7.2 โมนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel).....	19
2.7.3 โมนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series)	19
2.7.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode).....	19
2.8 ศักย์ไฟฟ้าเคมี.....	20
2.8.1 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^*).....	20
2.8.2 ศักย์อุณหภูมิ (E_{cell}).....	22
2.8.3 ศักย์ที่รอยต่อสารละลาย (E_j).....	22
2.8.4 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (E_R).....	22
2.8.5 ศักย์จากการเกิดโพลาริเซชัน (E_p).....	23
2.9 กระแสและแรงไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	23
2.9.1 กระแสไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี	23
2.9.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า	23
2.9.3 กำลังไฟฟ้า	24
2.9.4 กฎฟาราเดย์ของการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า.....	24

2.9.5 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency).....	25
2.10 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	26
2.11 การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย.....	26
2.11.1 การแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า.....	26
2.11.2 การกำจัดไอออนต่างๆ ในน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี.....	27
2.11.3 อิเล็กโทรแกรวิเมตรี (Electrogravimetry).....	28
2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	40
3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์.....	40
3.1.2 สารเคมี.....	40
3.1.3 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมสารละลายต่างๆที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้ง สะพานเกลือ.....	41
3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า.....	41
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	42
3.2.1 การศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมในการ กำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม.....	43
3.2.2 การศึกษาหาค่าความเร็วในการกวนผสมฝั่งแคโทดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม.....	45
3.2.3 การศึกษาหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม.....	47
3.2.4 การศึกษาหาระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม.....	49
3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์.....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	52
4.1 ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม.....	53
4.1.1 การศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมในการ กำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม.....	53

4.1.2 การศึกษาหาความเร็วควมผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม.....	58
4.1.3 การศึกษาหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม	63
4.1.4 การศึกษาหาระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม.....	67
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมกับค่าพีเอช	73
4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแส.....	79
4.4 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด.....	91
4.4.1 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย	91
4.4.2 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียในงานวิจัย.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	96
5.1 สรุปผลการวิจัย	96
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	97
5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม	97
รายการอ้างอิง	99
ภาคผนวก.....	103
ภาคผนวก ก.....	104
ภาคผนวก ข.....	165
ภาคผนวก ค.....	168
ภาคผนวก ง.	170
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	173

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตและรวบรวมน้ำเสียของโรงงานผลิตแม่พิมพ์	6
ภาพที่ 2.2 ชนิดเซลล์กัลวานิก.....	11
ภาพที่ 2.3 ชนิดเซลล์อิเล็กโทรไลติก	12
ภาพที่ 2.4 แผนภาพการขนส่งมวลในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบต่างๆ	13
ภาพที่ 2.5 ชั้นไฟฟ้าคู่ที่พื้นผิวอิเล็กโทรดเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าค่าบวกแก่อิเล็กโทรด	13
ภาพที่ 2.6 แผนภาพการจัดเรียงประจุที่รอยต่อประสานระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลาย	15
ภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลาแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่... ..	17
ภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลาแบบกระแสไฟฟ้าคงที่	18
ภาพที่ 2.9 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว.....	18
ภาพที่ 2.10 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน.....	19
ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม	19
ภาพที่ 2.12 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์.....	20
ภาพที่ 2.13 อุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรแกรวิเมตรี	28
ภาพที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	41
ภาพที่ 3.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย	42
ภาพที่ 3.3 ผังการดำเนินการวิจัย.....	43
ภาพที่ 3.4 วิธีการทดลองหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสม.....	45
ภาพที่ 3.5 วิธีการทดลองหาค่าความเร็วในการกวนผสมฝั่งแคโทดที่เหมาะสม	47
ภาพที่ 3.6 วิธีการทดลองหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม	49
ภาพที่ 3.7 วิธีการทดลองหาระยะเวลาในการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม	51
ภาพที่ 4.1 ร้อยละการกำจัดเมื่อเทียบกับเวลาของ (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำเสีย และ น้ำประปา.....	56
ภาพที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดเมื่อเทียบกับเวลาของ (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที.....	60
ภาพที่ 4.3 เวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯเมื่อใช้ค่าความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที.....	62
ภาพที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดเมื่อเทียบกับเวลาของ (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 แอมแปร์ (โดยคิดเป็น 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ).....	65

ภาพที่ 4.5 ร้อยละการกำจัดเมื่อเทียบกับเวลาของ (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียมเมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบต่างๆ 70

ภาพที่ 4.6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมกับค่าพีเอช 74

ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดแตกต่างกัน 76

ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อใช้ความเร็วการผสมฝังขั้วไฟฟ้าแคโทดแตกต่างกัน 76

ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน 77

ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามเวลาในแต่ละช่วงที่แตกต่างกัน 77

ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชที่มีต่อการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ 78

ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อเทียบกับเวลาการกำจัด (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำเสีย และน้ำประปา 81

ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อเทียบกับเวลาการกำจัด (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้ความเร็วการผสมฝังขั้วไฟฟ้าแคโทด 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที 82

ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อเทียบกับเวลาการกำจัด (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 แอมป์ (คิดเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร) 83

ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อเทียบกับเวลาการกำจัด (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาที่แตกต่างกัน 84

ภาพที่ 4.16 แสดงสภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ 90

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสารออกซิไดซ์ (Oxidant) และสารรีดิวซ์ (Reductant)	8
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการตกตะกอนแบบต่างๆ	9
ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานขั้วไฟฟ้าของสารละลายในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน	21
ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดนิกเกิล (Ni^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) และโครเมียม (Cr)	38
ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้า แอโนดที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า แบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง	44
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของความเร็วในการกวนผสมฝั่งแคโทดต่อการกำจัด นิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้ คงที่ในน้ำเสียจริง	46
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการ กำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุม กระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง	48
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อ การกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุม กระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง	50
ตารางที่ 3.5 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด	51
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้	52
ตารางที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ	53
ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา	57
ตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา	57
ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงาน อุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา	57
ตารางที่ 4.6 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที... 61	

ตารางที่ 4.7 แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที... 61	61
ตารางที่ 4.8 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที 62	62
ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร 66	66
ตารางที่ 4.10 แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร 66	66
ตารางที่ 4.11 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร 66	66
ตารางที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ณ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ..... 67	67
ตารางที่ 4.13 แสดงช่วงเวลากำหนดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามเวลาให้เหมาะสม 69	69
ตารางที่ 4.14 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน 71	71
ตารางที่ 4.15 แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน ... 71	71
ตารางที่ 4.16 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน ... 71	71
ตารางที่ 4.17 แสดงระยะเวลาผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในรูปแบบการปรับลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการบำบัด 72	72
ตารางที่ 4.18 แสดงตัวอย่างปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพีเอช 1 หน่วย 74	74
ตารางที่ 4.19 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา 85	85
ตารางที่ 4.20 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา 85	85
ตารางที่ 4.21 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา 85	85

ตารางที่ 4.22 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที.....	86
ตารางที่ 4.23 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที.....	86
ตารางที่ 4.24 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 รอบต่อนาที.....	87
ตารางที่ 4.25 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	87
ตารางที่ 4.26 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	88
ตารางที่ 4.27 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	88
ตารางที่ 4.28 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่าง กัน.....	88
ตารางที่ 4.29 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลา แตกต่างกัน.....	89
ตารางที่ 4.30 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำ ทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลา แตกต่างกัน.....	89
ตารางที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์ และงานวิจัยนี้.....	92
ตารางที่ 4.32 เปรียบเทียบผลการทดลองจากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่น.....	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมภายในประเทศมีสถิติเพิ่มมากขึ้น ทั้งปัญหามลพิษทางอากาศ น้ำ และกากอุตสาหกรรม อันเกิดจากโรงงานขนาดใหญ่ที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง และรวดเร็ว ทั้งยังขาดการบริหารจัดการที่ดี อุตสาหกรรมบางชนิดมีกระบวนการในการผลิตที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เช่น โรงงานแม่พิมพ์ที่ใช้นิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ในการชุบโลหะเพื่อให้เกิดความสวยงาม และทนต่อการกัดกร่อนของแม่พิมพ์ โลหะหนักดังกล่าวเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระบวนการผลิต ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการผลิตมีความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในปริมาณที่สูง ซึ่งหากโลหะหนักเหล่านี้ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำในปริมาณที่เกินกว่ากฎหมายกำหนดก็จะส่งผลให้แหล่งน้ำเสื่อมโทรม และเมื่อนำน้ำที่มีการปนเปื้อนมาใช้ในการอุปโภคและบริโภคก็ก่อให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพ โดยเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ปี พ.ศ.2539 กำหนดให้น้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมต้องมีค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ไม่เกิน 1, 2 และ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้าหากเกินกว่ามาตรฐานที่กฎหมายกำหนดจะต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

ผู้วิจัยมีความสนใจเลือกวิธีการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม โดยวิธีการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ซึ่งวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัด และขั้นตอนในการกำจัดไม่ต้องมีการเติมสารเคมีอื่นเพิ่มเติมหรือแยกสารรบกวนออกก่อนทำการกำจัด อีกทั้งยังใช้เวลาในการกำจัดที่รวดเร็ว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์โดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่แบบทีละเท (Batch) โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์โดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่แบบทีละเทได้แก่ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ขั้วไฟฟ้าแอโนด ความเร็วรอกผสมผึ่งแคโทด ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
3. ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์โดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่แบบทีละเท
4. ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในการศึกษา

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. งานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตแม่พิมพ์ โดยทำการทดลองด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่แบบทีละเท (Batch)

3. เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบมีรอยต่อของสารละลาย ด้วยสะพานเกลือที่บรรจุสารละลาย อิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์ ขั้วไฟฟ้าแอโนดทำจากแกรไฟต์ ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 6 แผ่น และขั้วไฟฟ้าแคโทดทำจากแกรไฟต์ ขนาด 4×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 6 แผ่น สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นน้ำเสียจริงปริมาตร 200 มิลลิลิตร สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดในแต่ละการทดลองที่แตกต่างกันเตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไนเตรท โซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำประปา และน้ำเสีย ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ความเร็วกวนผสมแต่ละการทดลองที่แตกต่างกันที่ 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแต่ละการทดลองที่แตกต่างกัน คือ 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลา

4. เก็บตัวอย่างสารละลายตามช่วงเวลาการกำจัดวัดค่าพีเอช และวัดความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic absorption spectrometer) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม

5. ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่แบบทีละเทเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในการศึกษา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

2. สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการออกแบบระบบการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์

3. สามารถนำไปพัฒนาเพื่อช่วยลดต้นทุนในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์

4. สามารถนำผลที่ได้ไปพัฒนาเพื่อนำนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมกลับมาใช้ใหม่ในอนาคต

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม

2.1.1 นิกเกิล

นิกเกิล (Nickel) เป็นโลหะที่มีสีขาวเงิน มีน้ำหนัก มีความคล้ายคลึงกับเหล็กด้านความแข็งแรงและทนต่อการกัดกร่อนสูง ซึ่งมักจะนำมาใช้ในการผลิตเหล็กกล้า สแตนเลสสตีล และอัลลอยด์ โดยโลหะนิกเกิลส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนประกอบเครื่องยนต์ ท่อสำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อน และวัสดุในอุตสาหกรรมเคมีการกลั่นน้ำมัน ใช้เคลือบผิวอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น เต้าไฟฟ้า หม้อหุงข้าว ซ้อนส้อม และอุปกรณ์การทำอาหารต่างๆ ใช้ในการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า และในงานก่อสร้างยังมีการนำนิกเกิลมาเพื่อใช้ในการทำเหล็กกล้าอีกด้วย ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษทั้งหลาย ทำให้ในปัจจุบันมีการนำนิกเกิลมาใช้ประโยชน์กันอย่างแพร่หลาย แต่สารดังกล่าวก็ก่อให้เกิดผลเสียกระทบต่อสุขภาพเช่นกัน

นิกเกิลอาจถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ ทางผิวหนังและจากทางเดินอาหาร ภาวะพิษของนิกเกิลเกิดจากการรับสัมผัสทางการหายใจและจากอาชีพเป็นหลัก โดยความสามารถในการถูกดูดซึมขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายในน้ำของสารประกอบนิกเกิล สารที่ละลายน้ำได้ดี ได้แก่ นิกเกิลคาร์บอเนล เป็นสารประกอบที่ถูกดูดซึมได้ดีกว่าสารประกอบที่ละลายในน้ำได้ไม่ดี เช่น นิกเกิลออกไซด์และนิกเกิลซัลไฟด์ นิกเกิลถูกกำจัดจากร่างกายทางปัสสาวะ

การสัมผัสนิกเกิลคาร์บอเนลทางการหายใจ จะทำให้เกิดอาการไข้ ไอ เจ็บหน้าอก หายใจลำบาก ปวดศีรษะ หลังจากนั้น 12-36 ชั่วโมง อาจเกิดภาวะปอดอักเสบเฉียบพลัน ซึ่งอาจทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตจากภาวะการหายใจล้มเหลว การฟื้นตัวจากภาวะปอดอักเสบนี้ใช้เวลาหลายสัปดาห์ถึงหลายเดือน ซึ่งผู้ป่วยจะยังคงมีอาการอ่อนเพลียและเหนื่อยง่ายในระยะยาว

การสัมผัสนิกเกิลที่ผิวหนังอาจทำให้เกิดภาวะผิวหนังอักเสบเป็นผื่นสัมผัส (Contact dermatitis) หรือเป็นผื่นแพ้ในส่วนอื่นๆของร่างกาย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาภูมิแพ้ ผู้ป่วยที่แพ้จะเกิดผื่นได้แม้สัมผัสนิกเกิลเพียงเล็กน้อย

ผู้ที่ดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนนิกเกิลอาจมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดมวนท้องและท้องเสีย มีรายงานอุบัติการณ์ของมะเร็งในโพรงจมูกและที่ปอดเพิ่มขึ้นในกลุ่มคนงานที่รับสัมผัสนิกเกิล

2.1.2 ทองแดง

ทองแดง (Copper) เป็นโลหะที่มีความหนาแน่น จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง พบได้ตามธรรมชาติ ทั้งในดิน หิน น้ำและอากาศ อาจอยู่ในรูปธาตุอิสระหรือสารประกอบ เช่น Cu_2O , Cu_2S , CuF , CuSO_4 และ CuFeS_2 เป็นต้น ทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ตรงจากเงิน

ปัจจุบันจึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ใช้ผลิตลวด สายไฟ ท่อน้ำ และวงจรไฟฟ้า นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์รบกวนต่างๆ ซึ่งส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยเราอาจได้รับผลกระทบอันได้จากการหายใจ การดื่มน้ำ และการบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน ทองแดงมีความจำเป็นต่อร่างกายของสิ่งมีชีวิตเพราะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระดูกและกล้ามเนื้อเพียงแต่ต้องได้รับในปริมาณที่เหมาะสมกับร่างกาย

ความเป็นพิษของทองแดง คือ จะทำให้เกิดการระคายเคืองและอักเสบที่ตา ระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหารและประสาทสัมผัสเสีย ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงมากๆ จะทำให้เกิดการคลื่นไส้ อาเจียน เป็นไข้ (Metal fume fever) อาจทำให้ผิวหนังและผมเปลี่ยนสีได้ ถ้าได้รับในปริมาณมาก จะทำให้น้ำเนื้อเยื่ออักเสบ และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง

2.1.3 โครเมียม

โครเมียม (Chromium) เป็นสารเคมีที่นิยมนำมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม โดยนำมาผสมกับโลหะทำให้เกิดความแข็งแรงมีความเหนียวทนทาน ทำให้โลหะไม่เป็นสนิมทนต่อการผุกร่อนโลหะโครเมียมบริสุทธิ์ใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า สารประกอบของโครเมต (Chromate) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมพอกหนัง การย้อมสีขนสัตว์ จะเห็นได้ว่าประโยชน์ของโครเมียม และสารประกอบของโครเมียมมีประโยชน์มากมาย แต่อันตรายของโครเมียมก็มีอยู่ไม่น้อย เช่น สูดหายใจเอาฝุ่นละอองหรือควันของกรดโครมิก ก็จะทำให้ระบบทางเดินหายใจส่วนต้นบริเวณจมูกถูกทำลาย และทำให้เป็นมะเร็งที่ปอด นอกจากนี้การสัมผัสกับฝุ่นละอองหรือสารละลายของกรดโครมิกจะทำให้เกิดผิวหนังอักเสบ

2.2 น้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่ผ่านการใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆแล้ว เช่น การในชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น การใช้ในการอุปโภคและบริโภค การประกอบอาหาร การชำระล้างร่างกาย และใช้ในอุตสาหกรรม เช่น การล้างวัตถุดิบ วัสดุอุปกรณ์ และการหล่อเย็น เป็นต้น ซึ่งทำให้น้ำดังกล่าวมีลักษณะต่างไปจากเดิม เนื่องจากการปนเปื้อนของสิ่งสกปรก (สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

2.2.1 ประเภทของน้ำเสีย

1. น้ำเสียชุมชน (Domestic wastewater) น้ำเสียชุมชน หรือ น้ำโสโครก (Sewage) คือ น้ำทิ้งที่มาจากชุมชน บ้านเรือน ที่พักอาศัย อาคาร ร้านค้า ภัตตาคาร โรงแรม ฯลฯ น้ำเสียดังกล่าวมักเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น การอุปโภคบริโภค การชำระล้างร่างกาย การขับถ่าย การซักล้าง ตลอดจนการประกอบอาหาร น้ำเสียส่วนนี้มักปนเปื้อนสิ่งสกปรกจำพวกสารอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร อุจจาระ ปัสสาวะ นอกจากนี้ ยังมีผงซักฟอก สบู่ และสารลดแรงตึงผิวที่

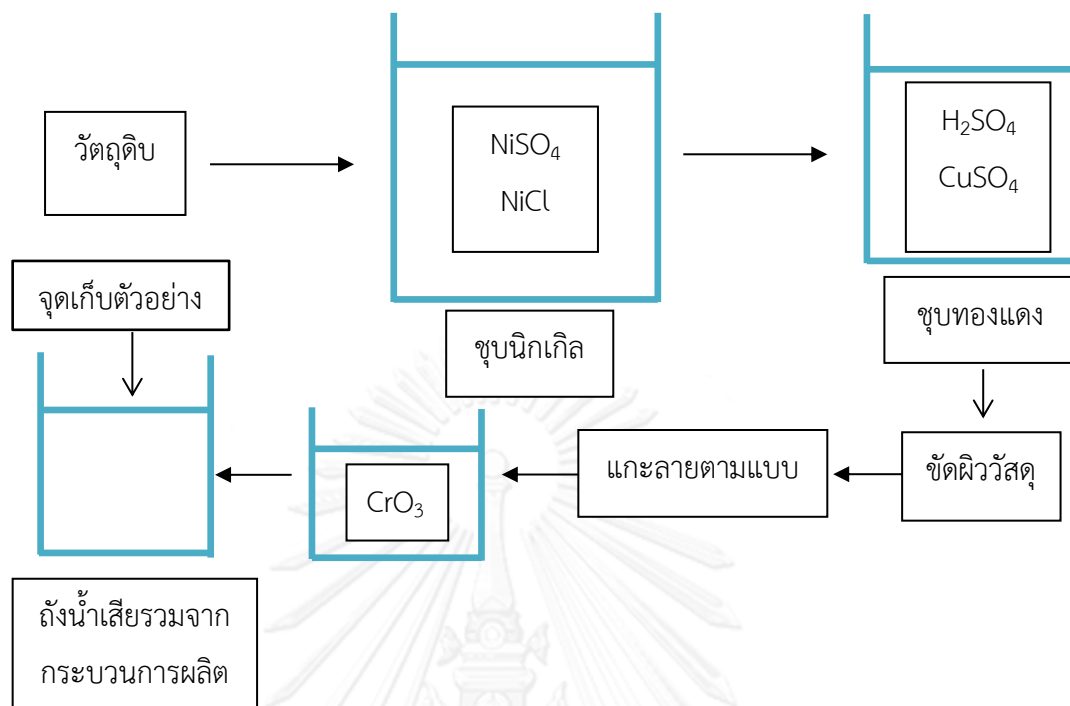
เป็นส่วนประกอบในผงซักฟอก สบู่ ตลอดจนจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ซึ่งอาจจะมีน้ำที่เป็นจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและจุลินทรีย์ทั่วไป

2. น้ำเสียเกษตรกรรม (Agricultural wastewater) น้ำเสียจากการเกษตรกรรม เป็นน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาจากพื้นที่เกี่ยวกับการเกษตรทั้งที่เป็นพื้นที่เพาะปลูกและพื้นที่เลี้ยงสัตว์ สิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่มาจากพื้นที่เลี้ยงสัตว์ส่วนใหญ่ มักจะเป็นสารอินทรีย์ซึ่งมาจากเศษอาหาร สัตว์และสิ่งขับถ่ายออกมาจากสัตว์ ซึ่งน้ำเสียส่วนนี้มักจะมีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงรวมทั้งอาจมีความเข้มข้นของของแข็งไม่ละลายน้ำสูงด้วย ส่วนน้ำเสียที่มาจากพื้นที่เพาะปลูกมักมีการปนเปื้อนสารเคมี ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยาฆ่าวัชพืช ที่ถูกใช้ในพื้นทีเพาะปลูก ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า น้ำเสียจากการเกษตรกรรมมักจะมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์เป็นจำนวนมากรวมทั้งสารเคมีด้วย

3. น้ำเสียอุตสาหกรรม (Industrial wastewater) น้ำเสียอุตสาหกรรมจะเป็นน้ำเสียที่มีชนิดของสิ่งปนเปื้อนและปริมาณของสิ่งปนเปื้อนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทของอุตสาหกรรม วัตถุประสงค์ ตลอดจนกระบวนการผลิตที่ใช้ โดยสิ่งปนเปื้อนอาจเป็นสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์หรืออาจเป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ก็ได้ น้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เกิดจากกระบวนการผลิต การล้างวัตถุดิบ การล้างเครื่องจักรอุปกรณ์ การระบายความร้อน รวมทั้งกิจกรรมต่างๆ ของพนักงานในโรงงาน เป็นต้น ในบางครั้งเมื่อกล่าวถึงน้ำเสียอุตสาหกรรม อาจจะคิดว่าน้ำเสียดังกล่าวจะเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในโรงงานเพียงอย่างเดียว ในความเป็นจริงแล้ว อาจเกิดขึ้นทั้งจากกระบวนการผลิต และจากกิจกรรมของพนักงานในโรงงานด้วยผสมกัน แต่ก็มีโรงงานบางแห่งแยกน้ำเสียทั้ง 2 ส่วนออกจากกันอย่างเด่นชัดและมีการบำบัดแยกออกจากกันโดยเด็ดขาด

2.2.2 น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัย

น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตแม่พิมพ์ โดยเก็บน้ำเสียจากบ่อกักน้ำเสียรวม โดยลักษณะน้ำเสียเมื่อนำมาวิเคราะห์เบื้องต้น พบว่า ความเข้มข้นของนิเกิลมีค่า 16 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของทองแดงมีค่า 211 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของโครเมียมมีค่า 106 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 3.3 วิเคราะห์เมื่อ 24 มกราคม 2556 กระบวนการผลิตและการรวบรวมน้ำเสียของโรงงานผลิตแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงกระบวนการผลิตและรวบรวมน้ำเสียของโรงงานผลิตแม่พิมพ์

(ชวลิต สวายงาม, สัมภาษณ์, 12 มิถุนายน 2557)

2.3 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

เป็นวิธีการที่ทำให้คุณภาพน้ำเสียดีขึ้นจนถึงระดับที่สามารถจะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของสิ่งแวดล้อม หรือแม้กระทั่งให้มีคุณภาพดีขึ้นจนสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำกลับไปใช้ในกิจกรรมอื่นๆ อีก การเลือกใช้ระบบใดขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะของน้ำเสีย ระดับการบำบัด และสภาพท้องถิ่น ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสีย สามารถแบ่งได้ 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้

กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment process) คือ การกำจัดของเสียหรือ สิ่งปนเปื้อนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการทางกายภาพ เช่น การดักด้วยตะแกรง (Screening) การกวาดเก็บ (Skimming) การทำให้ลอย (Floating) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) และการกรอง (Filtration) เป็นต้น กระบวนการทางกายภาพนี้มักจะเหมาะสมกับการแยกสิ่งสกปรกหรือปนเปื้อนที่ไม่ละลายน้ำเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้แล้วยังมีกระบวนการทางกายภาพอื่นๆ ที่มีการใช้อีก เช่น การลดอุณหภูมิของน้ำเสียโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเสียกับน้ำ หรือน้ำเสียกับอากาศ หรือแม้กระทั่งการใส่จุลินทรีย์ลงในน้ำเสีย

กระบวนการทางเคมี (Chemical treatment process) คือ การกำจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ที่มักจะอยู่ในรูปของสารที่ละลายน้ำและสารแขวนลอย ซึ่งอาจจะเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ หลักการที่ใช้ คือ การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การทำให้เกิดการตกตะกอน

(Precipitation) การรวมตะกอน (Coagulation) และการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) เป็นต้น วิธีดังกล่าวมักจะมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดค่อนข้างสูง เนื่องจากราคาสารเคมีและค่าใช้จ่ายในการควบคุมและเดินระบบบำบัด

กระบวนการทางชีววิทยา (Biological treatment Process) คือ กระบวนการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสิ่งมีชีวิต ซึ่งอาจจะเป็นจุลินทรีย์หรือพืชในการบำบัดหรือลดมลพิษในน้ำเสีย ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ได้แก่ บ่อหมักไร้อากาศ (Anaerobic pond) บ่อผึ่ง (Oxidation pond) บ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon) และถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter) เป็นต้น

กระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี (Physical-chemical treatment process) คือ วิธีการที่สามารถใช้ได้กับน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ โดยอาศัยหลักการทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ การดูดซับ (Carbon adsorption) การแพร่ย้อนกลับ (Reverse osmosis) และการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นต้น (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542 และ สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถกำจัดไอออนประจุบวก (Cation) และไอออนประจุลบ (Anion) จากน้ำเสียได้ ในปัจจุบันสารแลกเปลี่ยนไอออน แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ซีโอไลต์ (Zeolite) และเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) ถ้าน้ำเสียไหลผ่านถังที่บรรจุเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนประจุบวกในน้ำเสียจะแลกเปลี่ยนกับไอออนของไฮโดรเจน (H^+) หรือไอออนของโซเดียม (Na^+) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน ได้แก่ เรซินแบบกรดแก่ (Strong acid cation resin) และเรซินแบบกรดอ่อน (Weak acid cation resin) ส่วนไอออนประจุลบในน้ำเสียจะถูกแลกเปลี่ยนกับไอออนของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบต่างแก่ (Strong base anion resin)

เรซินทุกชนิดเมื่อใช้ไปในระยะเวลาหนึ่งจะหมดประสิทธิภาพ แต่สามารถเรียกประสิทธิภาพกลับคืนมาได้โดยการทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) ซึ่งเรซินแต่ละชนิดมีประสิทธิภาพในการรีเจนเนอเรชันต่างกัน เรซินแบ่งออกเป็น แคทไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน (Cation exchange resin) และแอนไอออนเอ็กซ์เชนจ์เรซิน (Anion exchange resin) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545)

2.3.2 กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารประกอบที่มีความเป็นพิษให้เป็นสารประกอบที่ไม่เป็นพิษ ได้แก่ การเติมสารเคมี ประเภทสารออกซิไดซ์ (Oxidant) หรือสารรีดิวซ์ (Reductant)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสารออกซิไดซ์ (Oxidant) และสารรีดิวซ์ (Reductant)

สารออกซิไดซ์	สารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดออก
ออกซิเจน	ซัลไฟต์, ซัลไฟด์, เพอร์ส
ก๊าซคลอรีน	ซัลไฟต์
คลอรีนไดออกไซด์	ไซยาไนด์
โซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl)	ไซยาไนด์ ตะกั่ว
แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ [Ca(OCl) ₂]	ไซยาไนด์
โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO ₄)	ไซยาไนด์ ตะกั่ว
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂)	ฟีนอล ไซยาไนด์ สารประกอบซัลเฟอร์ ตะกั่ว
สารรีดิวซ์	สารปนเปื้อนที่ต้องการกำจัดออก
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr ⁶⁺)
โซเดียมโบโมไฮไดรด์ (NaBH ₄)	ปรอท เงิน

ที่มา: เกรียงศักดิ์ อุทมนสินโรจน์, 2539

2.3.3 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลายโดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้ ในการตกตะกอนต้องพิจารณาถึงค่าพีเอชหลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปจะมีค่าพีเอชที่สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี ซึ่งในแต่ละมลสารจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับค่าพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย นอกจากนี้ยังทำให้เกิดผลึกในรูปของหินปูน ซึ่งจะก่อให้เกิดตะกอนมาก ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้นมีราคาแพงกว่าและเกิดอันตรายได้มากกว่าแคลเซียมออกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าจึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแล้ว อาจทำการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชหรืออุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะหนักนั้นมีความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการตกตะกอนแบบต่างๆ

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

ที่มา : Freeman, 1989

2.3.4 การดูดติดผิว (Adsorption)

กระบวนการดูดติดผิว เป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารมลพิษที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับสูงได้ และสารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งเป็นถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด จะทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น ถังคาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด และยังสามารลดความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่นๆ ได้ เช่น ตะกั่ว และทองแดง เป็นต้น

การดูดติดผิวเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมา เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของ Adsorbate เรียกว่า Adsorbent โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดติดผิว

2.3.5 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยไอออนของโลหะจะเกิดการรีดักชันที่ขั้วของแคโทด แอโนดและแคโทดมักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยที่แคโทดมักจะทำด้วยเหล็กกล้าหรือสแตนเลสสตีล (Stainless steel) ส่วนแอโนดมักจะทำด้วย

ตะกั่ว แกรไฟต์ เป็นต้น การแยกด้วยไฟฟ้าจะทำได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแยกเกิดได้ดีขึ้น ถึงที่ใช้ในการแยกควรจะทำให้มีน้ำกระเพื่อมหรือมีการกวน เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ดีขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่ของแคโทดและแอโนด และอัตราการเคลื่อนย้ายมวล จะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเข้าเกาะของโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งเหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำไปขาย โดยประสิทธิภาพของระบบนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90-95

2.4 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

เซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Cell) คือ วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรด (Electrode) สองขั้วจุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน เรียกว่า ขั้วแอโนด (Anode) หรือครึ่งเซลล์แอโนดิก (Anodic half cell) และอีกขั้วหนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน เรียกว่า ขั้วแคโทด หรือครึ่งเซลล์คาโทดิก (Cathodic half cell) (ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

2.4.1 ส่วนประกอบเซลล์ไฟฟ้าเคมี

1) สารละลายตัวอย่างหรือ สารละลายที่ต้องการวิเคราะห์หรือศึกษาอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

2) อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นขั้วที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าและออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยทั่วไปอิเล็กโทรดประกอบด้วยสองส่วน คือ ตัวนำไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Conductor) ซึ่งเป็นขั้วโลหะนำไฟฟ้าและตัวนำไฟฟ้าอิเล็กโทรไลติก (Electrolytic Conductor) ซึ่งเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้

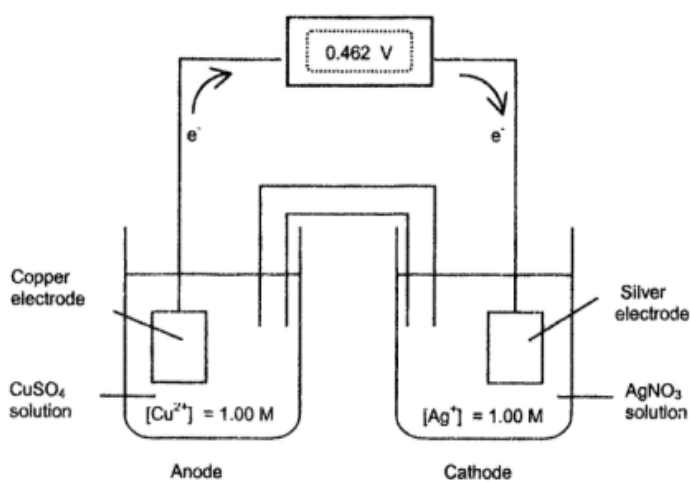
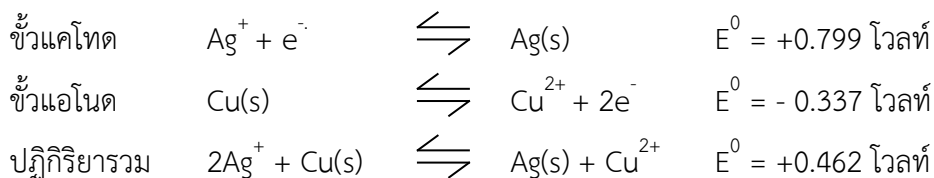
3) รอยต่อของเหลว (Liquid Junction) เป็นส่วนทำหน้าที่แยกสารละลายในขั้วแอโนด และขั้วแคโทดออกจากกันโดยการนำวัสดุรูพรุนมาถักขึ้นระหว่างขั้วทั้งสองหรือแยกภาชนะที่บรรจุแต่ละครึ่งเซลล์

4) สะพานเกลือ (Salt Bridge) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดในเซลล์ที่มีรอยต่อของเหลว โดยทั่วไปนิยมใช้แท่งแก้วรูปตัวยูบรรจุสารละลายโปแตสเซียมคลอไรด์ความเข้มข้นอิ่มตัว

2.4.2 ชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

โดยทั่วไปแบ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมีเป็น 2 ชนิด ตามคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี คือ เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic Cell)

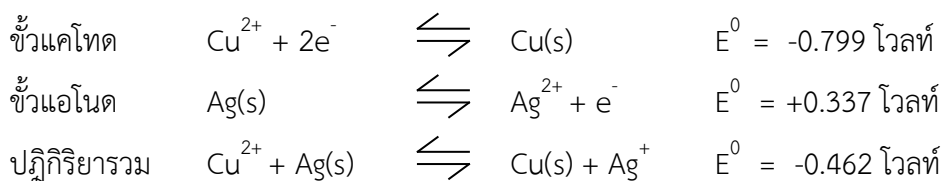
1. เซลล์กัลวานิกเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่พลังงานเคมีถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เอง กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน และคงมีอยู่ตลอดเท่าที่องค์ประกอบทั้งหมดยังมีอยู่

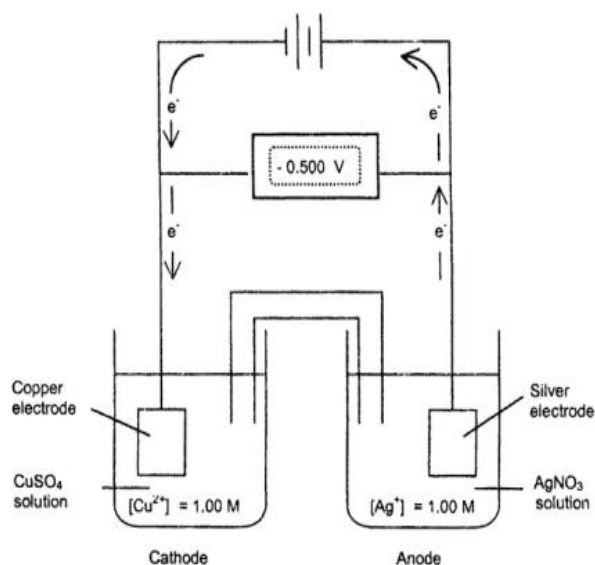


ภาพที่ 2.2 ชนิดเซลล์กัลวานิก

(ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

2. เซลล์อิเล็กโทรไลติกเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีอีกชนิดหนึ่งที่เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าจากภายนอก





ภาพที่ 2.3 ชนิดเซลล์อเล็กโทรไลติก

(ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

2.5 กระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

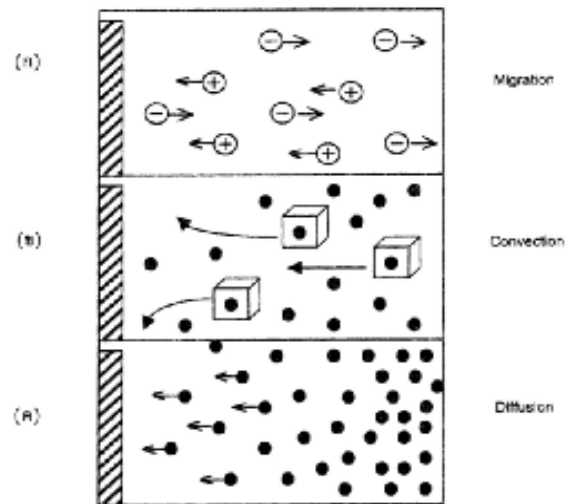
2.5.1 กระบวนการขนส่งมวลในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

การเคลื่อนที่ของไอออนหรือสปีชีส์ต่างๆ ที่อยู่ในสารละลายในเซลล์ไฟฟ้าเคมีเกิดได้ 3 กระบวนการ คือ ไมเกรชัน (Migration) การพาหรือคอนเวกชัน (Convection) และการแพร่ (Diffusion) โดยไอออนหรือสปีชีส์แต่ละตัวอาจเกิดการเคลื่อนที่โดยกระบวนการอันใดอันหนึ่งหรือเกิดหลายกระบวนการ การขนส่งมวลในเซลล์เคมีไฟฟ้า เช่น การเกิดกระแสฟาราดีกต้องการการขนส่ง สปีชีส์ที่มีฤทธิ์ไปยังพื้นผิวของอิเล็กโทรดอย่างต่อเนื่อง

1. ไมเกรชัน (Migration) การไมเกรชันเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือสปีชีส์ที่มีประจุไปตามความชันของไฟฟ้าหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า เช่น การเคลื่อนที่ของประจุลบไปยังขั้วไฟฟ้าบวกหรือการเคลื่อนที่ของประจุบวกไปยังขั้วไฟฟ้าลบ ดังภาพที่ 2.4 (ก)

2. การพาหรือคอนเวกชัน (Convection) คอนเวกชันเป็นการเคลื่อนที่จากแรงทางกายภาพที่ทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลาย เช่น การหมุน (Stirring) หรือการกววน (Swirling) การเคลื่อนที่แบบนี้ เรียกว่า การพาโดยแรง (Force Convection) ถ้าเป็นการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของสารจะเรียกว่า การพาโดยธรรมชาติ (Natural Convection) ดังภาพที่ 2.4 (ข)

3. การแพร่ (Diffusion) การแพร่เป็นการเคลื่อนที่ของสารไปตามความแตกต่างของความเข้มข้นจากสารละลายความเข้มข้นสูงไปที่สารละลายความเข้มข้นต่ำกว่า ดังภาพที่ 2.4 (ค) (ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

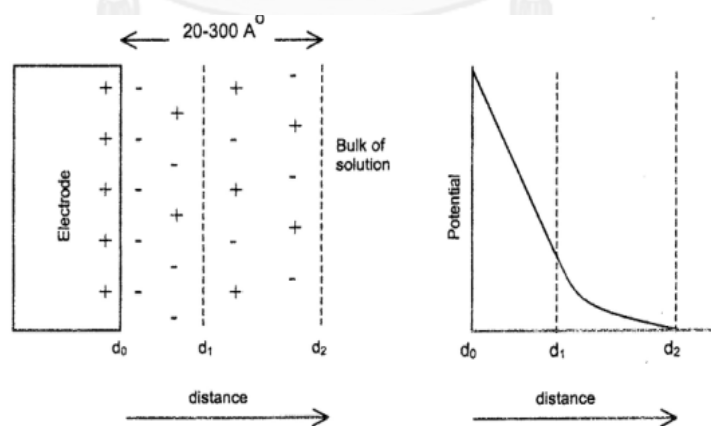


ภาพที่ 2.4 แผนภาพการขนส่งมวลในเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบต่างๆ

(ก) ไมเกรชัน (ข) การพาหรือคอนเวกชัน (ค) การแพร่ (ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

2.5.2 โครงสร้างชั้นไฟฟ้าที่เกิดในสารละลาย

ชั้นไฟฟ้าคู่ คือ การจัดเรียงตัวของประจุที่พื้นผิวอิเล็กโทรดและสารละลายที่ติดอยู่กับพื้นผิว ซึ่งชั้นของสารละลายที่อัดประจุบนพื้นผิวของอิเล็กโทรดแบ่งเป็นสองส่วน คือ ชั้นด้านในที่อัดแน่น (Compact Inner Layer) จากช่วง $d_0 - d_1$ บริเวณนี้ศักย์ไฟฟ้าลดลงเชิงเส้นตรงตามระยะทางจากพื้นผิวอิเล็กโทรดและชั้นการแพร่ (Diffuse Layer) จากช่วง $d_1 - d_2$ ที่ศักย์ไฟฟ้าลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล



ภาพที่ 2.5 ชั้นไฟฟ้าคู่ที่พื้นผิวอิเล็กโทรดเมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าค่าบวกแก่อิเล็กโทรด

(ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

2.5.3 กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic) และกระบวนการนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic)

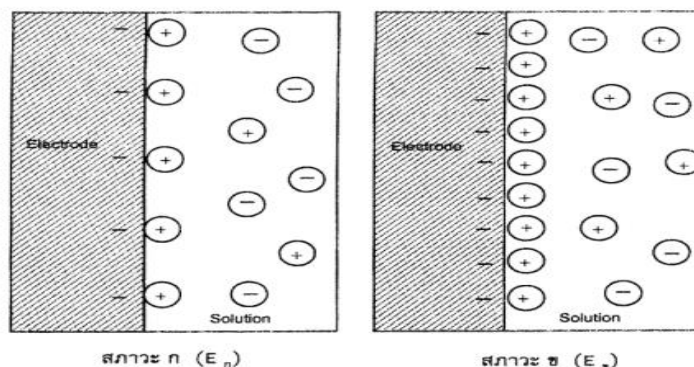
กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้ามี 2 ชนิด ชนิดที่หนึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องในการถ่ายโอนประจุ เช่น อิเล็กตรอน ข้ามรอยต่อประสานระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วไฟฟ้าหนึ่งและปฏิกิริยารีดักชันที่อีกขั้วไฟฟ้าหนึ่ง กระบวนการแบบนี้เรียกว่ากระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic Process) ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่กล่าวว่าปริมาณของปฏิกิริยาเคมีที่ขั้วไฟฟ้าเป็นสัดส่วนกับกระแสไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากกระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า กระแสฟาราเดอิก (Faradaic Current)

ในบางสภาวะช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับเซลล์ไม่ทำให้เกิดกระบวนการฟาราเดอิกที่ขั้วไฟฟ้าหนึ่งหรือทั้งคู่เนื่องจากอุณหพลวัต (Thermodynamic) หรือจลน์ (Kinetic) อยู่ในสภาวะไม่เหมาะสม ขั้วไฟฟ้าอาจมีบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าโดยไม่เกิดปฏิกิริยาถ่ายโอนอิเล็กตรอน และกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นทำให้โครงสร้างของรอยต่อประสานระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลายเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสหรือศักย์ไฟฟ้าชั่วขณะ ลักษณะเช่นนี้การนำไฟฟ้าของกระแสนี้สามารถเกิดขึ้นได้ กระบวนการชนิดนี้เรียกว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic Process) กระแสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการดังกล่าวนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Nonfaradaic Current)

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์ไฟฟ้าเคมี แต่ขึ้นกับสภาวะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหพลวัตหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่เพียงใด การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดย (เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ, 2552)

1) ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้

2) ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดส์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารตีโพลาริเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนั้นถูกเรียกว่า ขั้วตีโพลาริซ์



ภาพที่ 2.6 แผนภาพการจัดเรียงประจุที่รอยต่อประสานระหว่างอิเล็กโทรดกับสารละลาย
สถานะ ข. มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบมากกว่า สถานะ ก. (ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

ในภาพที่ 2.6 (ก) รูปชั่วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง เมื่ออยู่ในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของชั่วไฟฟ้า โดยไอออนที่มีประจุบวกจะมาเรียงประชิดกับชั่วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของชั่วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายทั่วในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับชั่วไฟฟ้าดังในภาพที่ 2.6 (ข) ซึ่งมีความมากกว่าศักย์รูป ก. จะเกิดการเรียงตัวของไอออนใหม่ทันที โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าชั่วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่จะมีการไหลของกระแสเกิดขึ้น ช่วงขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ชั่วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสถานะที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าชั่วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิกและกระแสที่ไหลช่วงขณะหนึ่ง เรียกว่า กระแสจากการอัดเป็น กระแสนอนฟาราเดอิก

2.5.4 โพลาริเซชัน

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของชั่วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. โพลาริเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration polarization) เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าชั่วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่งสารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังที่ผิวหน้าของชั่วไฟฟ้าจะเป็นไปได้ยากขึ้น หรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวน

สารละลายและขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลายจะมีส่วนทำให้เกิดโพลาไรเซชันขึ้นไม่มากนักน้อย ผลของการเกิดโพลาไรเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจร เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรเป็นไปตามปกติ

2. โพลาไรเซชันแบบจลน์ (Kinetic polarization) เกิดขึ้นจากการชะลอของ การที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับ ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออนจะส่งผลต่อการเกิดโพลาไรเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะช่วยลดการเกิดโพลาไรเซชันแบบที่กล่าวไว้ได้

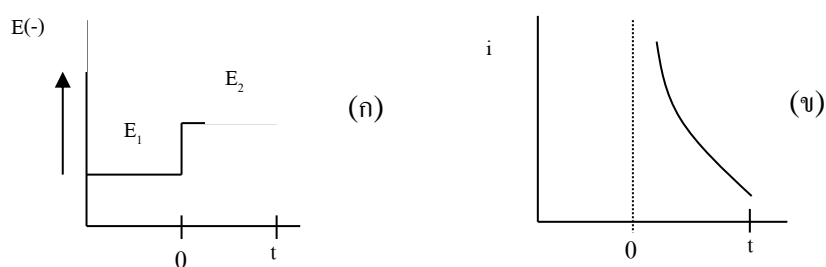
2.6 การควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

รูปแบบการควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

2.6.1 การทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Potential Method or Potentiostatic Mode)

เป็นการควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์ที่เพียงพอ ไอออนบวกของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปจะทำให้ความเข้มข้นของไอออนที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลงเพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดขึ้นจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.7 (ก) แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด

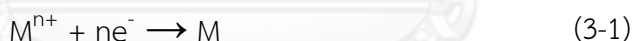
โดยที่ E_1 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยาและ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น Diffusion limited rate หรือเป็น Mass transfer limited ตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.7 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($I = kC$)



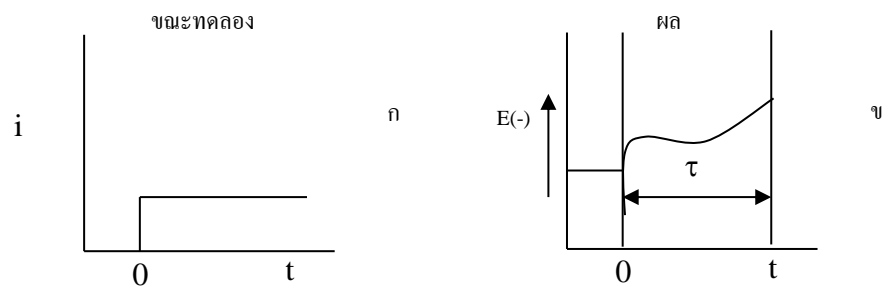
ภาพที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลาแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่
 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลา
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา (Friedrich, 1962)

2.6.2 การทำงานแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ (Controlled-Current Method or Galvanostatic Mode)

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



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+} เป็น M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ดังแสดงในภาพที่ 2.8



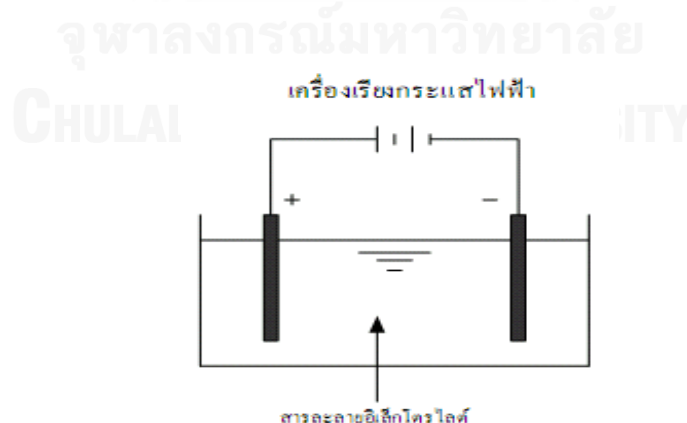
ภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลาแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลา
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลา (Friedrich, 1962)

2.7 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบต้องการขจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง (Mollah, 2004) สำหรับการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 4 รูปแบบ ดังนี้

2.7.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar electrode single cell)

เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุด คือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งการจัดเรียงแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่ และมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามาก

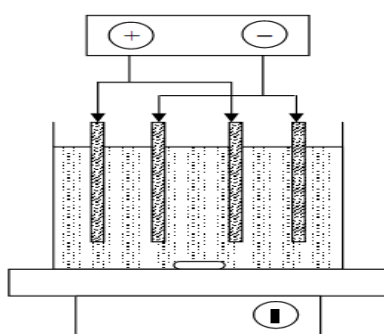


ภาพที่ 2.9 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว

(Pretorius และคณะ, 1991)

2.7.2 โมนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar electrode with cell in parallel)

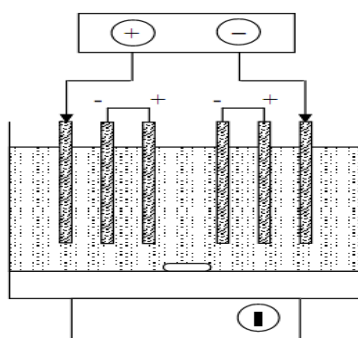
กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน ดังแสดงในภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมนโพลาร์แบบขนาน
(Chen, 2004)

2.7.3 โมนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar electrode with cell in series)

มีการจัดเรียงอิเล็กโทรดคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกันโดยมีการเชื่อมจุดอิเล็กโทรดเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละอิเล็กโทรด ดังแสดงในภาพที่ 2.11

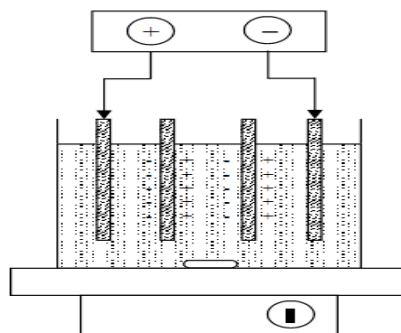


ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมนโพลาร์แบบอนุกรม
(Chen, 2004)

2.7.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar electrode)

มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด ดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม

โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของ เซลล์ที่ต่อแบบขนาน แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่าน ขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะการใช้งาน



ภาพที่ 2.12 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์
(Chen, 2004)

ขั้วไฟฟ้าโดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 ชนิด 1. ขั้วว่องไว (Active electrode) ได้แก่ ขั้วโลหะ ทั่วไป เช่น สังกะสี ทองแดง ตะกั่ว อะลูมิเนียม ขั้วพวกนี้บางโอกาสจะมีส่วนร่วมในปฏิกิริยาด้วย เช่น เกิดการสึกกร่อน และตกตะกอนของขั้วโลหะ 2. ขั้วเฉื่อย (Inert electrode) คือ ขั้วที่ไม่มีส่วนร่วม ใดๆ ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น แพลทินัม คาร์บอน (แกรไฟต์) (จิราพร ชูบัณฑิต, 2557: ออนไลน์) จากการศึกษาจะพบว่า ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม และขั้วอะลูมิเนียมจะมีการสึกกร่อนเมื่อใช้งาน และเกิด ตะกอนจากการสึกกร่อนของขั้วไฟฟ้าลงสู่สารละลาย แต่ขั้วแกรไฟต์ไม่มีการสึกกร่อนลงสู่สารละลาย ทำให้ขั้วแกรไฟต์มีอายุการใช้งานที่นานกว่าขั้วชนิดอื่น และไม่เกิดตะกอนจากการสึกกร่อนของ ขั้วไฟฟ้า (ศรัณยู ศรีธัญรัตน์, 2553) อีกทั้งทำให้พื้นที่ขั้วไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดลอง จึง สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ได้แม่นยำซึ่งเป็นข้อดีของขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์

2.8 ศักย์ไฟฟ้าเคมี

2.8.1 ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^*)

จากที่กล่าวในหัวข้อข้างต้นของศักย์ขั้วไฟฟ้า ที่เซลล์ขั้วไฟฟ้ามีขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำ หน้าที่เป็นขั้วแอโนด ขั้วไฟฟ้าที่ต้องการรู้ค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นขั้วแคโทด และสารละลายที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จุ่มอยู่มีค่าแอกทิวิตีเป็นหนึ่งจะถือได้ว่า ค่าผลลัพท์ของศักย์วงจรที่เกิดขึ้นเป็นค่าของศักย์ขั้วไฟฟ้านั้นๆ โดยในความหมายของศักย์ขั้วไฟฟ้านี้ จะหมายถึงศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ซึ่งค่าศักย์มาตรฐานของ ขั้วไฟฟ้าที่หาได้ด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะมีค่าเฉพาะของแต่ละครึ่งเซลล์ โดยที่สามารถนำมาเปรียบเทียบถึง ความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์หนึ่งๆ ที่มีค่าแอกทิวิตีเป็นหนึ่งไปสู่ค่าแอกทิวิตีที่ใน สภาวะสมดุลได้ โดยมีลักษณะเฉพาะที่สำคัญของค่าคงที่ศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E^0) ดังนี้

- 1) ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าหนึ่งๆ ถือเป็นค่าศักย์มาตรฐานสัมพัทธ์ โดยที่ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดเสมอ
- 2) ตามสัจนิยมของเคมีไฟฟ้า ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะต้องได้มาจากการเขียนปฏิกิริยาของครึ่งเซลล์เป็นแบบรีดักชันเท่านั้น
- 3) ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะไม่ผันแปรตามจำนวนโมลที่เกิดจากการใช้ปรับสมดุลของสมการครึ่งเซลล์
- 4) ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิ จึงต้องกำหนดค่าอุณหภูมิพร้อมกับค่าของ (E°) ด้วยเสมอ
- 5) ค่าศักย์มาตรฐานของขั้วไฟฟ้า ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยตัวเลขและเครื่องหมายบวกหรือลบ ซึ่งเครื่องหมายบวกหรือลบจะมีความหมายที่แตกต่างกัน คือ เครื่องหมายบวก จะหมายถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ดีกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ในที่นี้ขั้วไฟฟ้าที่ศึกษาจะทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทด ส่วนเครื่องหมายลบ จะบ่งบอกถึงขั้วไฟฟ้านั้นเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้น้อยกว่าขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์มาตรฐานขั้วไฟฟ้าของสารละลายในน้ำที่ 25 องศาเซลเซียส เทียบกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนมาตรฐาน

ครึ่งปฏิกิริยา	E° (V)
$\text{Cl}_2 + 2e^- \leftrightarrow 2\text{Cl}^-$	+1.360
$1/2 \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	+1.230
$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3e^- \leftrightarrow \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.960
$\text{NO}_3^- + 3\text{H}^+ + 3e^- \leftrightarrow \text{HNO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	+0.940
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Cu}$	+0.340
$\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+ + 2e^- \leftrightarrow \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	+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
$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \leftrightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	-0.830
$\text{Cr}^{2+} + 2e^- \leftrightarrow \text{Cr}$	-0.913
$\text{Na}^+ + e^- \leftrightarrow \text{Na}$	-2.714

ที่มา : ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543

2.8.2 ศักย์อุณหภูมิพลวัต (E_{Cell})

ผลจากแต่ละขั้วไฟฟ้าในวงจรเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ ซึ่งเป็นศักย์อุณหภูมิพลวัตซึ่งตามสัญนิยมได้กำหนดว่า

$$E_{Cell} = E_{Cathode} - E_{Anode} \quad (3-2)$$

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

2.8.3 ศักย์ที่รอยต่อสารละลาย (E_J)

ในเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ ถ้าสารละลายของแต่ละครึ่งเซลล์มีความแตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นแตกต่างกันในความเข้มข้นของสารละลาย หรือแตกต่างกันในชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ตรงรอยต่อระหว่างสารละลายทั้งสองนี้จะเกิดความต่างศักย์ขึ้น เรียกว่า ศักย์ที่รอยต่อสารละลาย (E_J) การเกิดความต่างศักย์ขึ้นนี้เป็นผลจากธรรมชาติของการปรับสมดุลของสารละลายในแต่ละครึ่งเซลล์ ในระหว่างการปรับสมดุลมีการเคลื่อนที่ของไอออนเกิดขึ้น ไอออนแต่ละชนิดไม่ว่ามีประจุบวกหรือประจุลบมีความเร็วของการเคลื่อนที่ต่างกัน ตามแต่ขนาดของมวลโมเลกุล ผลลัพธ์จากการปรับสมดุลจึงมักเป็นการแบ่งแยกประจุ หรือชนิดของไอออนตามประจุออกเป็นสองพวกตามความเร็วของการเคลื่อนที่ ไอออนที่แบ่งแยกออกนี้ไม่เหมือนกัน จึงเกิดความแตกต่างของศักย์ขึ้นอย่างชัดเจนและมากพอที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์วัดศักย์

$$E_{cell} = E_{cathode} - E_{anode} + E_J \quad (3-3)$$

2.8.4 ศักย์จากความต้านทานของเซลล์ (E_R)

ในเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ การที่กระแสจะไหลครบวงจรของเซลล์ได้นั้น ต้องมีพลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่งที่เพียงพอต่อการเอาชนะความต้านทานของวงจร ซึ่งศักย์ไฟฟ้าจำนวนนี้คือ ศักย์ของโอห์ม (Ohmic potential) โดยมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสกับความต้านทาน (IR) ดังนั้นค่าผลลัพธ์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม จึงต้องมีเทอมของศักย์ไฟฟ้าจากความต้านทานเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังสมการ

$$E_{cell} = E_{cathode} - E_{anode} - E_R \quad (3-4)$$

2.8.5 ศักย์จากการเกิดโพลาไรเซชัน (E_p)

โพลาไรเซชันเกิดขึ้นได้ 2 แบบ คือ เกิดเนื่องมาจากผลของความเข้มข้นและแบบจลน์ ซึ่งต้องแก้ไขโดยการเพิ่มประมาณของกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้นหรือทำการเพิ่มศักย์ของวงจรให้สูงขึ้น ศักย์ที่ถูกเพิ่มนี้จะเรียกว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential, π) จึงทำให้ค่าผลลัพธ์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวมต่างจากค่าอุณหพลวัตจากการคำนวณ ดังนั้นถ้ามีโพลาไรเซชันเกิดขึ้นในวงจรของเซลล์ การแสดงค่าผลลัพธ์ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์รวม เป็นดังสมการ

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} - E_R - \pi \quad (3-5)$$

2.9 กระแสและแรงไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

2.9.1 กระแสไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

กระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ภายในเซลล์เคมีไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออน กระแสไฟฟ้าจำนวนน้อย ศักย์ไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสมการ

$$E = IR \quad (3-6)$$

เมื่อ	E	=	ศักย์ไฟฟ้าในหน่วยโวลต์ของการเคลื่อนที่ของไอออน
	I	=	กระแสในหน่วยแอมแปร์
	R	=	ความต้านทานในหน่วยโอห์มของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ความต้านทานนี้จะขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย

เมื่อไฟฟ้ากระแสตรงถูกพาผ่านเซลล์เคมีไฟฟ้ามีปรากฏการณ์หลายชนิดเกิดขึ้น ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าโอห์มิก (Ohmic Potential) โพลาไรเซชัน (Polarization) และ ความต่างศักย์เกิน (Overvoltage) (ลาวัลย์ ศรีพงษ์, 2543)

2.9.2 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

การไหลของกระแสที่เกิดขึ้นในเซลล์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำเซลล์ไฟฟ้า โดยต้องการพลังงานเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 จูล เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมป์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งของเซลล์และจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้น 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมป์ (ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์, 2548) ดังสมการ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ (} W_{\text{elec}} \text{)} = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (3-7)$$

เนื่องจากพลังงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุที่อยู่ในหน่วยคูลอมบ์จึงขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปฏิกิริยา โดยทุกๆ 1 โมลของอิเล็กตรอน จะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ หรือ F คูลอมบ์ ซึ่ง F ก็คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ ดังนั้นสมการที่แสดงถึงงานทางไฟฟ้าสุทธิที่มีหน่วยของอิเล็กตรอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ก็คือ

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ (} W_{\text{elec}} \text{)} = nF \times \text{โวลต์} \quad (3-8)$$

2.9.3 กำลังไฟฟ้า

ปริมาณไฟฟ้า Q คูลอมบ์ จะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านในเวลา t วินาที

$$Q = I \times t \quad (3-9)$$

พลังงานไฟฟ้า (W) จะหมายถึง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวต้านทานในเวลา t วินาที โดยที่ตัวต้านทานนั้นมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็น E โวลต์

$$W = E I \times t \quad (3-10)$$

$$W = E \times Q \quad (3-11)$$

กำลังไฟฟ้า (Watt, P) คำนวณได้จากค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยเวลา

$$P = W / t \quad (3-12)$$

2.9.4 กฎฟาราเดย์ของการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า

มวลของสารที่เกิดขึ้นที่แคโทดในขณะที่เกิดปฏิกิริยาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆ ที่เกิดขึ้นโดยใช้ปริมาณไฟฟ้าที่เท่ากันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อทำให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ (อินทรีรา หาญพงษ์พันธ์, 2539)

$$F \text{ (Faraday)} = e \times N \quad (3-13)$$

$$F \text{ (Faraday)} = (1.62 \times 10^{-19}) \times (6.02 \times 10^{23}) \quad (3-14)$$

$$F \text{ (Faraday)} = 96,487 \text{ C mol}^{-1} \quad (3-15)$$

$$\text{หรือ } 1 \text{ Faraday} = 96,500 \text{ C mol}^{-1} \quad (3-16)$$

$$X \text{ (Coulomb)} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)} \quad (3-17)$$

เมื่อให้ค่ากระแสไฟฟ้าค่าหนึ่ง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของไอออนที่ขั้วแคโทด ปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้น สามารถวัดได้โดยการใช้กฎของฟาราเดย์ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$W = M I t / nF \quad (3-18)$$

โดย	W	=	มวลของสารที่ควรจะเกิดปฏิกิริยาตามทฤษฎี มีหน่วยเป็นกรัม
	n	=	จำนวนโมลของตัวออกซิไดส์ตามสมการเคมี มีหน่วย eq/โมล
	M	=	มวลโมเลกุล มีหน่วยเป็น กรัมต่อโมล
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง มีหน่วยเป็น แอมป์
	t	=	เวลา มีหน่วยเป็น วินาที
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อน้ำหนักสมมูล)

2.9.5 ประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency)

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการไฟฟ้าเคมีนิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เพราะ กระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงสุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงนับว่าเป็นกระบวนการที่ดี โดยประสิทธิภาพเชิงกระแสหาได้จากสมการที่ 3-19

$$\text{Current efficiency (t) \%} = \frac{nF(C_o - C_t) V \times 100\%}{\int_0^t I(t) dt} \quad (3-19)$$

$$\text{โดย } n = \text{ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล}$$

$$F = \text{ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อeq)}$$

C_0	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)
C_t	=	ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมลต่อลิตร)
V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
$I(t)$	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

2.10 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุม ดังนี้

- 1) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
- 2) การเคลื่อนที่ของประจุไอออน ความสามารถของไอออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุบนไอออนและขนาดไอออน
- 3) อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้า เป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
- 4) พื้นที่สัมผัสของขั้ว ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
- 5) ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า และจำนวนกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยจะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
- 6) จำนวนประจุของไอออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
- 7) ความเข้มข้นของสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ (ปริเมซ เจริญนพคุณ, 2545)

2.11 การประยุกต์ใช้ระบบไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการไฟฟ้าเคมีได้รับความสนใจมากในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมี และหลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ การใช้อิเล็กตรอนในการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน แทนการใช้สารเคมีในการเกิดปฏิกิริยา

2.11.1 การแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีน้ำมันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเดิมจะอาศัยหลักการแรงโน้มถ่วงของโลกในการแยกน้ำมันในน้ำเสีย ซึ่งพบปัญหา คือ ถ้าในน้ำเสียนั้นมีปริมาณน้ำสบู่มากโมเลกุลของ

สบู่จะปรากฏเป็นอนุภาคเล็กๆ กระจายไปทั่วระหว่างโมเลกุลของน้ำเสีย ทำให้น้ำมันแตกเป็นเซลล์เล็กเซลล์น้อย ผลที่ตามมา คือ ทำให้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียได้ยากมาก ดังนั้นจึงได้มีการนำกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการบำบัด โดยจะใช้อิเล็กโทรดที่มีส่วนในการทำปฏิกิริยา เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปในเซลล์อิเล็กโทรไลติกแล้ว อิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่เป็นแอโนดจะละลายเป็นไอออนในน้ำเสีย ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดตะกอนเบา ขณะที่แคโทดจะเกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการลอยตัวของน้ำมัน ซึ่งเป็นการแยกสารโดยทำให้ลอยด้วยไฟฟ้านั่นเอง จากนั้นจึงได้มีการพัฒนาให้ระบบการบำบัดมี 2 ขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่งเป็นการทำให้เกิดตะกอนเบาด้วยไฟฟ้าเพื่อให้เกิดการรวมตัวของน้ำมัน ขั้นที่สองเป็นการทำให้ลอยด้วยไฟฟ้า เพื่อแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย การสลายตัวของอิเล็กโทรดไม่ได้ขึ้นกับปริมาณและขนาดของอิเล็กโทรด แต่ขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด ข้อดีของระบบนี้ คือ ควบคุมง่าย ประสิทธิภาพสูง และระบบบำบัดมีขนาดเล็ก (Ohsasa และคณะ, 1991)

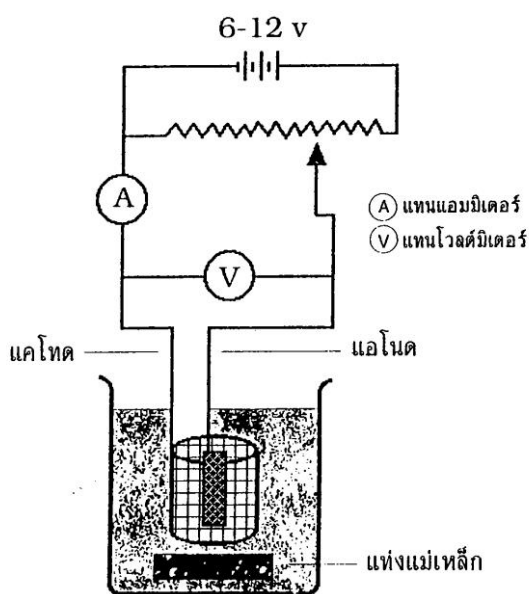
2.11.2 การกำจัดไอออนต่างๆ ในน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมี

ได้ทำการทดลองการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (Cr^{6+}) จากน้ำหล่อเย็น และไซยาไนด์ (CN^-) ด้วยวิธีนี้ จะเกิดตะกอนเบาของเหล็กที่ไม่ละลายน้ำหรือเกิดสารเชิงซ้อนโดยใช้เซลล์อิเล็กโทรไลติกที่มีเหล็กเป็นอิเล็กโทรด โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (Cr^{6+}) จะถูกเปลี่ยนให้เป็น โครเมียมไตรวาเลนซ์ (Cr^{3+}) ซึ่งอยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า ในระบบบำบัดน้ำเสียที่มีไอออนปนเปื้อนต่างๆ ต้องอาศัยวิธีการบำบัดหลายขั้นตอน เช่น การปรับพีเอชให้เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการ การเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี การทำให้เป็นกลางเพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย และการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว ในขณะที่การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีใช้เซลล์อิเล็กโทรไลติกที่มีเหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด เพื่อทำให้เกิดตะกอนเบาของเหล็กหรืออะลูมิเนียมในรูปออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ ซึ่งตะกอนเบาเหล่านี้จะทำหน้าที่ดูดซับสารปนเปื้อนหรือของเสียไว้ ทำให้สามารถกำจัดของเสียออกจากระบบบำบัดน้ำเสียได้ อย่างไรก็ตามอิเล็กโทรดดังกล่าว มีข้อจำกัดคือ ไม่เหมาะที่จะใช้กับสารปนเปื้อนที่ทำให้เกิดเกลือของโลหะบนอิเล็กโทรด จะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ไม่ต้องมีการปรับพีเอช และไม่ต้องเติมสารเคมีในการกำจัดไอออนต่างๆ หลักการของวิธีไฟฟ้าเคมีในการกำจัดไอออนเหล่านี้คือ เปลี่ยนเลขออกซิเดชันของไอออนให้อยู่ในรูปที่มีความเป็นพิษน้อยกว่า จากนั้นไอออนที่มีความเป็นพิษน้อยกว่าจะรวมตัวกับตะกอนเบาของเหล็กในทางกายภาพหรือทางเคมี เพื่อให้ได้สารประกอบเชิงซ้อน และถูกกำจัดออกจากระบบโดยการตกตะกอน ส่วนระบบการบำบัดแบบเดิมนั้น ต้องทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลายที่มีความเป็นกรดสูง จึงสามารถเปลี่ยนโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (Cr^{6+}) เป็นโครเมียมไตรวาเลนซ์ (Cr^{3+}) ได้ตั้งสมการที่ 2-20 หรือเปลี่ยนไซยาไนด์ (CN^-) เป็นเฟอร์โรไซยาไนด์ และเฟอร์โรไซยาเนต (Abdo และ Sedahmed, 1991)



2.11.3 อิเล็กโทรแกรวิเมตรี (Electrogravimetry)

อิเล็กโทรแกรวิเมตรี เป็นเทคนิควิธีวิเคราะห์เคมีไฟฟ้าวิธีหนึ่งที่มีการจัดเซลล์เป็นแบบอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถแบ่งเทคนิควิธีการวิเคราะห์อิเล็กโทรแกรวิเมตรีได้เป็น 2 วิธี วิธีแรกเป็นการให้พลังงานในรูปศักย์ที่มากกว่าศักย์แตกตัวของสารตัวอย่าง ซึ่งทำให้สารตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาพอกพูนบนขั้วไฟฟ้าจนสมบูรณ์ โดยไม่ต้องควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้าเพียงแต่คอยปรับศักย์หรือกระแสไฟฟ้าให้คงที่ตลอดการวิเคราะห์ เรียกวิธีนี้ว่า อิเล็กโทรแกรวิเมตรีแบบกระแสคงที่ หรือแบบไม่ควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า อีกวิธีเป็นการควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้าใช้งานให้มีค่าคงที่ เมื่อเทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง เรียกวิธีนี้ว่า อิเล็กโทรแกรวิเมตรีแบบควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีแรกซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในงานวิจัย วิธีอิเล็กโทรแกรวิเมตรีแบบกระแสไฟฟ้าคงที่หรือแบบไม่ควบคุมศักย์ขั้วไฟฟ้า มีวิธีการวิเคราะห์ปริมาณของสารตัวอย่างโดยวิธีนี้ทำได้ง่ายๆ โดยการต่อเซลล์เข้ากับวงจรไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วย แหล่งพลังงานไฟฟ้า (แบตเตอรี่ขนาด 6 ถึง 12 โวลต์) มาตรฐานวัดกระแสไฟฟ้า A มาตรฐานวัดศักย์ V และตัวควบคุมกระแสไฟฟ้า (ศรีณัญ ศรีธัญรัตน์, 2553) ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 อุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอิเล็กโทรแกรวิเมตรี

(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

การพอกพูนของผลปฏิกิริยาจากการแยกสลายของสารตัวอย่าง เกิดขึ้นเมื่อพลังงานในรูปศักย์ที่ให้กับเซลล์ในระดับหนึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมกระแสไฟฟ้าให้อยู่ที่ระดับเดิมนั้น หรือให้อยู่ที่ระดับกระแสไฟฟ้าหนึ่งที่ทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้จนเสร็จสิ้น เกิดการพอกพูนของสารวิเคราะห์อย่างสมบูรณ์

การทำอิเล็กโทรแอมเพอเมตรีวิธีนี้ ไม่จำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จำเพาะหรือยุ่งยากเหมาะกับการวิเคราะห์โลหะในสารตัวอย่าง หรือการแยกโลหะบริสุทธิ์จากสารตัวอย่างมากกว่าใช้ในการวิเคราะห์ส่วนผสมของตัวอย่างที่มีโลหะมากกว่าหนึ่งชนิด

สารตัวอย่างที่วิเคราะห์หาปริมาณด้วยเทคนิคนี้มักเป็นสารประกอบของไอออนโลหะ โดยโลหะจะแยกจากสารละลายมาพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า เนื่องจากศักย์ขั้วไฟฟ้ามีการแปรเปลี่ยนตามสมการเนินสต์ระหว่างการวิเคราะห์ และศักย์เกินตัวในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนบนขั้วไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้ระหว่างการทำปฏิกิริยาการพอกพูนโลหะบนขั้วไฟฟ้ามีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับว่าศักย์แตกตัวในการทำให้เกิดปฏิกิริยาพอกพูนโลหะบนขั้วไฟฟ้านั้น มีค่าต่างจากศักย์เกินตัวในการเกิดแก๊สไฮโดรเจนมากน้อยเพียงใด ถ้าต่างกันมาก การแปรเปลี่ยนศักย์ขั้วไฟฟ้าระหว่างการวิเคราะห์อาจไม่ถึงจุดศักย์ของการเกิดแก๊สไฮโดรเจน

2.12 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฉัฐบรรณ วรณรัตน์ (2542) ประยุกต์ใช้วิธีอิเล็กโทรดิโพสิชันเพื่อแยกโลหะหนักจากน้ำเสียสามารถกำจัดโลหะหนักออกมาในรูปของโลหะบริสุทธิ์ หรือโลหะผสมที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกทั้งยังเป็นการลดขั้นตอนการบำบัดรองรับในขั้นต่อไปและลดค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของตัวแปรและภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกนิกเกิลด้วยกระบวนการอิเล็กโทรดิโพสิชัน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ สารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic Method) ปริมาตรสารละลายอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 1 ลิตร ขั้วแคโทดทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) มีรูพรุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตรมีพื้นที่ผิว 89 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนดทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทิตเนียมออกไซด์ พื้นที่ผิว 82 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า ค่าพีเอชและปริมาณกระแสไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพของอิเล็กโทรดิโพสิชัน โดยภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพกระแสสูงสุด คือ ร้อยละ 32 ในการแยกนิกเกิลที่ 60 เปอร์เซ็นต์ คือ ช่วงพีเอช 3-3.5 และที่ความหนาแน่นกระแส 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟูริก และหากปรับค่าพีเอชด้วยกรดบอริกจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อย ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวปนเปื้อนในน้ำเสีย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวจำพวกสารที่มีประจุเป็นลบ โดยหากมีปนเปื้อนเพียง 1 ส่วนในล้านส่วน ทำให้ประสิทธิภาพลดลงกว่าร้อยละ 70

มะลิ หุ่นสม (2544) ประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าเพื่อการนำกลับของโลหะ ซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนย่อย ส่วนแรกเป็นการนำกลับคืนโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนสุดท้ายเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่าโลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียม และ นิกเกิล จาก

สารละลายผสมได้ ภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับทองแดง โครเมียม และนิกเกิล คือ ที่ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 10 90 และ 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 6 มีผลต่อการนำกลับของทองแดง ในขณะที่โครเมียมที่มีเลขออกซิเดชันบวก 3 ไม่มีผลต่อการนำกลับของทองแดง

หทัยทัต ชื่อสุวรรณ (2544) ประยุกต์ใช้วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อแยกโลหะหนักออกจากตะกอน กระบวนการแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ละลายโลหะหนักออกจากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียและการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยวิธีไฟฟ้าเคมี พบว่า ในขั้นตอนการละลายตะกอนค่าพีเอชที่เหมาะสมในการละลายโลหะหนักออกจากตะกอนปริมาณตะกอนแห้งประมาณร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรกรดซัลฟูริก คือ ประมาณ 1.0 โดยมีค่าความเข้มข้นของโลหะแต่ละชนิดดังนี้ ทองแดง 70 ส่วนในล้านส่วน นิกเกิล 95 ส่วนในล้านส่วน สังกะสี 15 ส่วนในล้านส่วน และโครเมียม 7 ส่วนในล้านส่วน ขั้นตอนการกำจัดโลหะ พบว่ามากกว่าร้อยละ 90 ของทองแดงสามารถแยกออกมาได้ในสถานะโลหะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current Efficiency) สูงสุด และโลหะชนิดอื่นๆ ที่เหลือในสารละลาย ถูกกำจัดออกด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electroprecipitation) พบว่า สามารถกำจัดนิกเกิลและโครเมียมได้เกือบร้อยละ 100 และกำจัดสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 80 ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 110-130 แอมแปร์ต่อตารางเมตรโดยพลังงานที่ใช้อยู่ในช่วง 25-30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ (2545) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกสังกะสีออกจากน้ำเสียโรงชุบ สังกะสีโดยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า โดยแบ่งการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงชุบเพชรเกษม ซึ่งใช้น้ำยาชุบสังกะสีชนิดโซยาไนต์ ทำการศึกษาผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (0.15 0.30 0.45 และ 0.60 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร) และอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ (3 6 และ 9 ลิตรต่อชั่วโมง) ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากซิงค์ซัลเฟต ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสังกะสีเริ่มต้น และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า โดยในระบบการแยกสังกะสีนี้ ใช้สแตนเลสตีลเป็นขั้วแคโทด และตะกั่วจากโรงงานแบตเตอรี่รถยนต์เป็นขั้วแอโนด จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีที่เข้มข้นเริ่มต้น 500 ส่วนในล้านส่วน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 0.60 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร เท่ากับร้อยละ 96.7 และมีประสิทธิภาพของกระแส เท่ากับร้อยละ 7.08 ในน้ำเสียจริงผลการทดลองเกิดเช่นเดียวกับน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ที่ความหนาแน่นของกระแส 0.06 แอมแปร์ต่อตารางเดซิเมตร ประสิทธิภาพในการแยกสังกะสีเท่ากับร้อยละ 97.9 และประสิทธิภาพของกระแส เท่ากับร้อยละ 8.26 ซึ่งมากกว่าที่ความหนาแน่นของกระแสอื่นๆ ส่วนในระบบที่น้ำเสียมีการไหลเข้าระบบอย่างต่อเนื่องที่ 3 ลิตรต่อชั่วโมง จะสามารถแยกสังกะสีดีที่สุด คือ ร้อยละ 68.97 และประสิทธิภาพของกระแสดีที่สุดเช่นเดียวกันเท่ากับร้อยละ 1.06 และความบริสุทธิ์ของสังกะสีที่ได้จากการแยกเท่ากับร้อยละ 60.5 ที่อัตราการไหล 3 ลิตรต่อชั่วโมง

Mohanty และคณะ (2002) ได้ศึกษาผลของโครเมียม (Cr^{3+}) ต่อประสิทธิภาพเชิงกระแส ขั้วแคโทด รูปร่างการพอกพูน แนวโน้มรูปร่างผลึก และการเกิดโพลาไรซ์ ในขณะที่เกิดกระบวนการพอกพูนของนิกเกิล พบว่าประสิทธิภาพเชิงกระแสในการพอกพูนนิกเกิลไม่เกิดผลกระทบเมื่อ โครเมียมมี

ความเข้มข้นต่ำ คือ น้อยกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร แต่ถ้าโครเมียมมีความเข้มข้นสูง จะทำให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสลดลงประมาณร้อยละ 10-13 การมีโครเมียมจะไม่ได้เปลี่ยนแปลงโครงสร้างการพอกพูนของนิกเกิลแต่จะมีผลต่อความหนาแน่นสูงสุดบนพื้นผิวของผลึก โพลาริเซชันของแคโทดทำให้เห็นว่า การมีโครเมียม จะมากับการเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าในการรับอิเล็กตรอนของนิกเกิลไปสู่ค่าลบมากกว่า และจะลดกระแสสูงสุดไปที่ละน้อยเช่นเดียวกับอัตราการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนสำหรับการรีดักชันของนิกเกิล

Chen และ Lim (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำกลับโลหะมีค่าโดยวิธีพอกพูนด้วยไฟฟ้าเคมี โดยการเปลี่ยนโลหะที่มีค่าละลายน้ำให้กลายเป็นของแข็งให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ พบว่า ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ไม่มีผลต่อการนำกลับ การกวนผสมที่ความเร็วสูงมีผลสำคัญสำหรับการนำกลับ ในสิ่งแวดล้อมการนำกลับโลหะจะเป็นไปตามอันดับดังนี้ เงิน > ตะกั่ว > ทองแดง จากการใช้ X-ray photoelectron spectroscopic และ Scanning Electronic Microscopic วิเคราะห์การลดลงของโลหะ พิสูจน์ให้เห็นว่า การพอกพูนจะประกอบไปด้วยโลหะหนักรวมตัวกับออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชัน

Hunsom และคณะ (2005) ได้ทำการทดลองการกำจัด ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากโรงงานชุบโลหะ โดยใช้ถังขนาด 1 ลิตร โดยใช้แผ่นสแตนเลสสตีล มีพื้นที่ผิวขนาด 0.011 ตารางเมตร และใช้ไทเทเนียมออกไซด์เคลือบด้วยรูทีเนียมถูกนำมาใช้เป็นแคโทดและแอโนดตามลำดับ อัตราการไหลคงที่ คือ 0.421 ลิตรต่อนาที ใช้พีเอชเท่ากับ 1 ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 และ 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากการทดลองนี้ถึงปฏิกิริยากับแผ่นอิเล็กโทรด สามารถกำจัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโดยใช้พลังงานที่ต่ำ คือ 42.30 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อโลหะหนัก 1 กิโลกรัม และใช้ค่าใช้จ่ายในการจัดการที่ต่ำ คือ 5.43 ดอลลาร์สหรัฐต่อลูกบาศก์เมตร จากการทดลองพบว่า สามารถกำจัดโลหะหนักทั้งหมดได้มากกว่าร้อยละ 99 และความเข้มข้นสุดท้ายของทองแดง โครเมียม และนิกเกิลเป็น 0.1-0.13, 0.19-0.2 และ 0.05-0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า สารขจัดผิวไม่มีผลต่อการประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง แต่โครเมียมเฮกซะวาเลนต์มีผลอย่างมากต่อการประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง

ภักพงษ์ เญยวิจิตร (2546) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี การทดลองได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดพร้อมกัน ได้แก่ โครเมียม เงิน และปรอท ในน้ำเสียซีโอดีเจือจาง (เจือจาง 10 เท่า) โดยศึกษาชนิดของขั้วไฟฟ้าค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักดังกล่าว ซึ่งจะใช้ค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมและค่าใช้จ่ายเบื้องต้นเป็นเกณฑ์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมตลอดจนศึกษาถึงน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่สลายไปและชนิดของสารประกอบในตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัด ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดพร้อมกันด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยน้ำเสียซีโอดีเจือจางมีปริมาณโครเมียม เงิน และปรอทเริ่มต้นเท่ากับ 49.8, 223.1 และ 354.2 มก./ล. ตามลำดับ เมื่อปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียซีโอดีเจือจางให้เท่ากับ 3 ใช้แผ่นเหล็กเป็นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทำการบำบัดที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย

3.91 แอมแปร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะทำให้มีปริมาณโครเมียม เงิน และปรอทเหลืออยู่ในน้ำเท่ากับ 0.04, 0.27 และ 0.0047 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนค่าใช้จ่ายเบื้องต้นสำหรับการกำจัดโลหะหนักในงานวิจัยนี้จะมีค่าใช้จ่ายประมาณ 14,370 บาทต่อลบ.ม. ของน้ำเสียซีโอดีเข้มข้น หรือเท่ากับ 1.15 บาทต่อตัวอย่างซีโอดี ซึ่งค่าใช้จ่ายดังกล่าวส่วนใหญ่ร้อยละ 90 เป็นค่าสารเคมีที่ใช้ปรับพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ผลการทดลองนี้ยังพบว่า เมื่อทำการบำบัดที่สภาวะที่เหมาะสม ดังกล่าวมีการสลายตัวของแผ่นเหล็กจากขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งเมื่อนำตะกอนที่เกิดขึ้นหลังจากการบำบัดภายใต้สภาวะนี้ไปวิเคราะห์หาชนิดของสารประกอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน(XRD) จะพบสารประกอบ 3 ชนิดคือ maghemite (Fe_2O_3), goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$) และ thenardite (Na_2SO_4)

ศรายุทธ ลาภพูนผล (2549) ได้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย ศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างขั้วพื้นที่ผิว อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง ใช้กระแสไฟฟ้าตรง ต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์ แบบขนาน ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมสูงที่สุดมากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ ระยะระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเสียเข้าถึง 21.11 มิลลิลิตรต่อนาที คิดเป็นค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

Orinakova และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายซัลเฟต และสารละลายคลอไรด์ ที่มีผลต่อการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG (Paraffin Impregnated Graphite) พบว่า การพอกพูนของนิกเกิลบนขั้ว PIG แตกต่างกัน โดยสารละลายซัลเฟตจะเป็นกลไกของ H^+ รับอิเล็กตรอนเกิดเป็น NiOH^+ ในขณะที่สารละลายคลอไรด์จะเป็นกลไกของ Ni^{2+} รับอิเล็กตรอนเกิดเป็น NiCl^+ เมื่อนำขั้วไฟฟ้าไปตรวจสอบ SEM (Scanning Electron Micrographs) เชื่อได้ว่าคุณภาพการพอกพูนของนิกเกิลมีผลมาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน

Oztekın และ Yazıcıgil (2006) ได้ศึกษาการนำกลับโลหะหนักจากน้ำเสียโดยกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยสารคีเลตเป็นแคโทดไรต์ ใช้โซเดียมไนเตรตเป็นแอโนไลต์ และศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ ผลของความเข้มข้นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคโทดไรต์ พีเอชของแคโทดไรต์และแอโนไลต์ ความเข้มข้นของโลหะหนักและลักษณะของแคทไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน (CEM) ลักษณะของสารคีเลต พบว่า ผลของความเข้มข้นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดคือ 35 มิลลิแอมแปร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคโทดไรต์ที่ดีที่สุดคือ 0.005 โมลาร์ พีเอชของแคโทดไรต์และแอโนไลต์ที่ดีที่สุดคือ 3 และ 6 ตามลำดับ ลักษณะของแคทไอออนเอ็กเซนจ์เมมเบรน (CEM) ที่ดีที่สุดคือ CMB ลักษณะของสารคีเลตที่ดีที่สุดคือ Citrate โดยสรุป คือ การนำกลับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคโทดไรต์ พีเอชเริ่มต้นของแอโนไลต์ที่สูง และเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ตติ จิตรู (2550) ทำการเปรียบเทียบการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์โดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบที่ละเทและไหลต่อเนื่อง พบว่า สามารถกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ได้ร้อยละ 99 ทุกการทดลอง การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยามีค่าลดลง ส่งผลให้มีการใช้พลังงานที่ลดลง ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต้องกำจัดโครเมียม

เฮกซะวาเลนทีให้คงเหลือในน้ำเสียไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาพักเก็บ 20, 120 และ 180 นาที แบบที่ละเทสามารถกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนทีให้คงเหลือในน้ำเสียได้ 0.52, 0.77 และ 0.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และแบบไหลต่อเนื่องสามารถกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนทีให้คงเหลือในน้ำเสียได้ 0.38, 0.31 และ 0.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พีเอชของน้ำทิ้งสุดท้ายมีค่า 9.5 ถึง 11 ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ปทุมทิพย์ เสมอภาค (2550) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล และสังกะสีโดยใช้ขี้ไฟฟ้าเป็นผ้าคาร์บอน เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับขี้โลหะ ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการแยกนิกเกิลและสังกะสีที่ความเข้มข้น 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อใช้ขี้ไฟฟ้าเป็นผ้าคาร์บอน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.2 และ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่พีเอชเท่ากับ 4 สามารถแยกนิกเกิล และสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 94 และ 80 ในระยะเวลา 6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า 11.9 และ 14.9 ในการกำจัดนิกเกิล และสังกะสีต้องใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้น โดยค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับกำจัดนิกเกิล และสังกะสี คือ 130 และ 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ จากการศึกษาความสัมพันธ์ต่อการกำจัด พบว่า เวลา และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการกำจัดนิกเกิลและสังกะสี

Emamjomeh และ Sivakumar (2009) ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้า ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง มีการจัดเรียงขี้ไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์ ใช้ขี้ไฟฟ้าเป็นอะลูมิเนียม ทำการศึกษาหาพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการไหล ค่าพีเอชเริ่มต้น และความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้น จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงถึงร้อยละ 99 เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 และความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

พิชิต ลีกุล (2553) ได้ทำการทดลองปรับปรุงวิธีการกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตเส้นใยเรยอน ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียมีปริมาณสังกะสีปนเปื้อน 155 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.7 และค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร การทดลองเริ่มต้นได้ศึกษารูปแบบถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสมกับงานทางด้านไฟฟ้าเคมี ผ่านปฏิกิริยารีดักชันของโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต และการทดสอบหาวัสดุที่ดีที่สุดที่สามารถใช้เป็นสะพานเกลือ พบว่าถึงปฏิกิริยาที่มีแผ่นแก้วพูนทำหน้าที่เป็นเหมือนสะพานเกลือให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด ต่อมาได้ศึกษาหาวัสดุที่จะนำมาใช้ทำขี้ไฟฟ้าแคโทด สำหรับการกำจัดสังกะสี จากผลการทดลองพบว่า ขี้ไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมความหนาแน่นกระแส คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้ถึงร้อยละ 98 ภายในเวลา 30 นาที ณ ค่าความหนาแน่นกระแส 37.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงได้ถึงร้อยละ 98 ภายในเวลา 50 นาที โดยคิดเป็นร้อยละ 100 ประสิทธิภาพเชิงกระแส

ศรัณยู ศรีธัญรัตน์ (2553) ได้ศึกษาการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

งานวิจัยนี้ได้ ศึกษาหาสภาวะที่ดีที่สุดของการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ชนิดของขั้วไฟฟ้า แคโทด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามลำดับ จากการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 976 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเป็น 1 ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ผังขั้วไฟฟ้าแคโทด 0.5 โมลาร์ จัดเป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยสามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 12 ได้ร้อยละ 99.96 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 33.89 ในการกำจัดนิกเกิลที่ร้อยละ 25.96 และเมื่อนำมาใช้กับน้ำเสียจริงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 1,281 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย สามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 60 ได้ร้อยละ 99.06 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 61.34 ในการกำจัดนิกเกิลที่ร้อยละ 31.15 สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย สามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 60 ได้ร้อยละ 44.52 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 23.62 ในการกำจัดนิกเกิลที่ร้อยละ 24.09

Akbal และ Camci (2011) ได้ศึกษาการกำจัดทองแดง นิกเกิลและโครเมียมด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการกำจัด เช่น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า วัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรด เวลาสำหรับอิเล็กโทรไลซิส พีเอชน้ำเสีย และค่าการนำไฟฟ้าในการกำจัดโลหะ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการลดความเข้มข้นไอออนโลหะหนักให้อยู่ในระดับที่ต่ำ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล มีประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า อัตราการกำจัดโครเมียม ทองแดง และนิกเกิล สูงเมื่อพีเอช 9 เนื่องจากจะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ที่ผังขั้วไฟฟ้าแคโทด คู่อิเล็กโทรดของเหล็ก-เหล็ก และเหล็ก-อลูมิเนียม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม ทองแดง และนิกเกิลจากน้ำเสียขุบโลหะ การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าของน้ำเสียขุบโลหะ คู่อิเล็กโทรดเหล็ก-อลูมิเนียม สามารถกำจัดโครเมียม ทองแดง และนิกเกิลได้ร้อยละ 100 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร พีเอชเท่ากับ 3 หลังจากเวลาในการตกตะกอนผ่านไป 20 นาที โดยใช้พลังงานและปริมาณการใช้อิเล็กโทรดเป็น 10.07 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และ 1.08 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

Hanay และ Hasar (2011) ได้ศึกษาผลของไอออนประจุลบต่อประสิทธิภาพการกำจัดทองแดง แมงกานีส และสังกะสี ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า โดยใช้สารละลายผสมระหว่างโลหะหนักกับไอออนซัลเฟตและคลอไรด์ และมีการวัดความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้นและพีเอช พบว่า ไอออนประจุลบในน้ำมีผลสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด เมื่อเทียบกับทองแดงและแมงกานีส ในการศึกษาไอออนประจุลบไม่ได้สร้างความแตกต่างเมื่อค่าพีเอชมีค่าเปลี่ยนไป ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงและสังกะสีทั้งหมด เกือบร้อยละ 100 คือหลังจากเวลาผ่านไป 5 นาทีที่พีเอชมากกว่า 7 และที่นาทีที่ 35 ประสิทธิภาพในการกำจัดแมงกานีสเป็นร้อยละ 85 เมื่อมีซัลเฟตเป็นไอออนประจุลบ และร้อยละ 80 เมื่อมีคลอไรด์เป็นไอออนประจุลบ

Konstantinos และคณะ (2011) ศึกษาการกำจัดนิกเกิล, ทองแดง, สังกะสี และโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น ค่าพีเอชเริ่มต้น, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า, ความเข้มข้นไอออนของโลหะเริ่มต้น และระยะเวลาสัมผัสในน้ำเสียจริงมีความเข้มข้นของนิกเกิล, ทองแดง, สังกะสี และโครเมียมเท่ากับ 376, 283, 75 และ 167 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ค่าพีเอชในช่วง 4 ถึง 8 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทั้ง 4 ชนิดได้ดี ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทั้ง 4 ชนิดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ซึ่งจากการทดลองความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงที่สุด โดยสามารถกำจัดได้ภายในระยะเวลา 60 นาที โดยมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า 0.041 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลิตร

Liqing และคณะ (2011) ได้ศึกษาการนำกลับนิกเกิลและทองแดงจากน้ำเสียชุบโลหะ โดยใช้การสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยใช้ Lix984N และศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อการนำกลับ พบว่าการแยกทองแดงและนิกเกิล ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการสกัดทองแดงและนิกเกิล คือ 4 และ 10.5 ตามลำดับ ร้อยละการกำจัดสูงสุดของทองแดงและนิกเกิล คือ ร้อยละ 92.9 และร้อยละ 93 ตามลำดับ และการนำกลับทองแดงและนิกเกิล พบว่า ประสิทธิภาพเท่ากับร้อยละ 99.1 และร้อยละ 99.3 ตามลำดับ

Peng และคณะ (2011) ได้ศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นการพัฒนาการใช้ อิเล็กโทรไลซิส (EL) และ อิเล็กโทรไดอะไลซิส (ED) รวมกัน ในการนำกลับทองแดงในน้ำเสีย ศึกษาผลของปัจจัยในการดำเนินการจัดการ 3 ประการ คือ ความต่างศักย์ของไฟฟ้า (Voltage) ความเข้มข้นของทองแดงเริ่มต้น และการไหลของน้ำ ในการนำกลับทองแดง ผลลัพธ์ของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส-อิเล็กโทรไดอะไลซิส (EL-ED) พิสูจน์ให้เห็นว่าร้อยละ 99.5 ของทองแดง และร้อยละ 100 ของน้ำสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งการใช้พลังงานของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ประมาณ 3 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อกิโลกรัม และอิเล็กโทรไดอะไลซิส ประมาณ 2 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และการนำกลับของทองแดงมีความบริสุทธิ์มากกว่าร้อยละ 97.9 โดยใช้ Scanning Electronic Microscopic (SEM) และ Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX) ตรวจวิเคราะห์

Bassam และคณะ (2012) ศึกษาประสิทธิภาพของการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบที่ละเท โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า จัดเรียงแบบโมโนโพลาร์ในการกำจัดทองแดง, นิกเกิล, สังกะสี และแมงกานีสจากน้ำเสียสังเคราะห์ ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2 ถึง 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก 50 ถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร และศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้น 3.568 และ 8.95 จากการศึกษาพบว่า ความเข้มข้นโลหะหนักเริ่มต้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ผลการทดลองที่ดีที่สุด จากการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้น พบว่า ค่าพีเอชสูงจะสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดี และจากการศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า พบว่าที่ 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง นิกเกิล สังกะสีมากกว่าร้อยละ 96 และ แมงกานีสที่ร้อยละ 72.6 โดยใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 49 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะน้ำเสีย ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ รูปแบบเซลล์ไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ร้อยละการกำจัดและระยะเวลาในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่า งานวิจัยของ ฉัฐบรรณ วรณรัตน์ (2542) เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้วไฟฟ้าเป็นไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์และเหล็กกล้าไร้สนิม ไม่มีรอยต่อของเซลล์ ใช้กระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 90 งานวิจัยของ มะลิ หุ่นสม (2544) ใช้น้ำเสียโรงงานชุบโลหะซึ่งน้ำเสียมีความเข้มข้นทองแดง โครเมียม และนิกเกิลเป็น 283 220 และ 128 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ขั้วไฟฟ้าเป็นแพลทินัมและเหล็กกล้าไร้สนิม ใช้เซลล์แบบมีรอยต่อ ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในการกำจัดอยู่ระหว่าง 10 ถึง 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99 งานวิจัยของ ศรัณยู ศรีธัญรัตน์ (2553) เป็นน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ที่มีความเข้มข้นนิกเกิล 1,281 มิลลิกรัมต่อลิตร ขั้วไฟฟ้าเป็นแกรไฟต์และแกรไฟต์ ใช้เซลล์แบบมีรอยต่อ ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99 งานวิจัยของ Akbal และ Camci (2011) ใช้น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ น้ำเสียมีความเข้มข้นทองแดง โครเมียม และนิกเกิลเป็น 45 44.5 และ 394 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ขั้วไฟฟ้าเป็นเหล็กและอะลูมิเนียม ใช้เซลล์แบบไม่มีรอยต่อ ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 100 งานวิจัยของ Hunsom และคณะ (2005) ใช้น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ น้ำเสียมีความเข้มข้นทองแดง โครเมียม และนิกเกิลเป็น 931 964 และ 467.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ขั้วไฟฟ้าเป็นไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์และเหล็กกล้าไร้สนิม ใช้เซลล์แบบมีรอยต่อ ใช้กระแสไฟฟ้า 10 ถึง 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99.9 งานวิจัยของ Konstantinos และคณะ (2011) ใช้ น้ำเสียโรงงานชุบโลหะมีความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง สังกะสี และโครเมียมเท่ากับ 376 283 75 และ 167 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีร้อยละการกำจัดร้อยละ 100 งานวิจัยของ Bassam และคณะ (2012) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ในการกำจัดทองแดง นิกเกิล สังกะสี และแมงกานีส ความเข้มข้น 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 25 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง นิกเกิล สังกะสีมากกว่าร้อยละ 96 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดแมงกานีสที่ร้อยละ 72.6 โดยใช้พลังงานไฟฟ้า 49 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร โดยงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตแม่พิมพ์ที่ยังไม่ผ่านการบำบัดซึ่งมีความเข้มข้นนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในน้ำ 13 200 และ 101 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พีเอช 3.3 จากงานวิจัยที่ศึกษา ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมนำมาใช้ในการทดลอง คือ แกรไฟต์ เนื่องจากไม่มีการสูญเสียขั้วไฟฟ้าขณะทำการทดลอง ทำให้ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและทำให้พื้นที่ขั้วไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดลอง จึงสามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ได้แม่นยำ รูปแบบเซลล์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูง คือ แบบมีรอยต่อของสารละลายเนื่องจากมีการแยกฝั่งระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ชัดเจน ทำให้มีการส่งผ่านประจุได้ง่ายและมีการควบคุมปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่ชัดเจน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนดส่วนใหญ่ ใช้สารที่ออกซิเดชันได้ดี ยกตัวอย่างเช่น คลอไรด์ จากการตรวจสอบองค์ประกอบของน้ำเสียเบื้องต้น พบว่า น้ำเสียมีปริมาณคลอไรด์อยู่สูง จึงคาดว่าสามารถนำน้ำเสียมาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดแทนการใช้สารเคมีเพื่อช่วย

ลดค่าใช้จ่ายในด้านสารเคมี และเพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม ความเร็วในการกวนผสมในงานวิจัยอยู่ระหว่าง 200 ถึง 500 รอบต่อนาที (Akbal และ Camci, 2011) พบว่าความเร็วรอบมีผลต่อการกำจัดโดย ความเร็วรอบยิ่งมากประสิทธิภาพการกำจัดยิ่งดี ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้กำจัดนิกเกิล และ ทองแดงส่วนใหญ่ อยู่ที่ 10 ถึง 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (ศรัณญ์ ศรีธัญรัตน์, 2553) พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงประสิทธิภาพการกำจัดจะสูงตาม จึงนำค่าที่เหมาะสมเหล่านี้มาใช้ในการ ทดลอง จากการศึกษางานวิจัย พบว่า ประสิทธิภาพโดยใช้ปัจจัยที่กล่าวข้างต้น สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยประสิทธิภาพการกำจัดมากกว่าร้อยละ 99



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2.4 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดนิกเกิล (Ni^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) และโครเมียม (Cr)

งานวิจัย	ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์ (2542)	มะลิ ทุ่นสม (2544)	ศรัณญา ศรีธีฎรัตน์ (2553)	Hunsom และคณะ (2005)
ลักษณะน้ำ ตัวอย่าง	น้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ	น้ำเสียห้องปฏิบัติการ เคมีวิเคราะห์	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ
องค์ประกอบ โลหะหนักใน ตัวอย่าง	Ni^{2+} 1000 (มก./ล)	Cu^{2+} 283 Cr^{6+} 220 Ni^{2+} 128 (มก./ล)	Ni^{2+} 1281 (มก./ล)	Cu^{2+} 931 Cr^{6+} 964 Ni^{2+} 467.8 (มก./ล)
ชนิดขั้วไฟฟ้า แอโนด	ไทเทเนียมเคลือบ รูทีเนียมออกไซด์	แพลทินัม	แกรไฟต์	ไทเทเนียมเคลือบรู ทีเนียมออกไซด์
ชนิดขั้วไฟฟ้า แคโทด	เหล็กกล้า ไร้สนิม	เหล็กกล้า ไร้สนิม	แกรไฟต์	เหล็กกล้า ไร้สนิม
รูปแบบเซลล์ เคมีไฟฟ้า	ไม่มีรอยต่อ	มีรอยต่อ ด้วยเยื่อเลือกผ่าน ไอออนลบ	มีรอยต่อด้วยวุ้นอิม ด้วยด้วยโซเดียมคลอ ไรด์	มีรอยต่อ ด้วยเยื่อเลือกผ่าน ไอออนลบ
ค่าความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า	Ni^{2+} 140 (A/m^2)	Cu^{2+} 10 Cr^{6+} 90 Ni^{2+} 90 (A/m^2)	Ni^{2+} 140 (A/m^2)	Cu^{2+} 10 Cr^{6+} 90 Ni^{2+} 90 (A/m^2)
ร้อยละการ กำจัด	Ni^{2+} 90 (%)	Cu^{2+} 98.9 Cr^{6+} 99 Ni^{2+} 99 (%)	Ni^{2+} 99 (%)	Cu^{2+} 99.9 Cr^{6+} 99.9 Ni^{2+} 99.9 (%)
เวลาที่ใช้การ กำจัด	8.15 (ชม.)	Cu^{2+} 5 Cr^{6+} 13 Ni^{2+} 13 (ชม.)	60 (นาที)	Cu^{2+} 12 Cr^{6+} 15 Ni^{2+} 15 (ชม.)

ตารางที่ 2.4 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดนิกเกิล (Ni^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) และโครเมียม (Cr) (ต่อ)

งานวิจัย	Akbal และCamci (2011)	Konstantinos และคณะ (2011)	Bassam และคณะ (2012)
ลักษณะน้ำตัวอย่าง	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ	น้ำเสียสังเคราะห์
องค์ประกอบโลหะ หนักในตัวอย่าง	Cu^{2+} 45 Cr^{6+} 44.5 Ni^{2+} 394 (มก./ล)	Ni = 376 Cu = 283 Zn = 75 Cr = 167 (มก./ล)	Cu = 250 Ni = 250 Zn = 250 Mn = 250 (มก./ล)
ชนิดขั้วไฟฟ้าแอโนด	เหล็ก	อะลูมิเนียม	เหล็ก
ชนิดขั้วไฟฟ้าแคโทด	อะลูมิเนียม	อะลูมิเนียม	เหล็ก
รูปแบบเซลล์ เคมีไฟฟ้า	ไม่มีรอยต่อ	-	ไม่มีรอยต่อ
ค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า	Cu^{2+} 100 Cr^{6+} 100 Ni^{2+} 100 (A/m ²)	Ni 40 mA/cm ² Cu 40 mA/cm ² Zn 40 mA/cm ² Cr 40 mA/cm ²	25 mA/cm ²
ร้อยละการกำจัด	Cu^{2+} 100 Cr^{6+} 100 Ni^{2+} 100 (%)	Ni 100 % Cu 100 % Zn 100 % Cr 100 %	Cu >96 % Ni >96 % Zn >96 % Mn >72.6 %
เวลาที่ใช้การกำจัด	20 (นาที)	60 นาที	20 นาที

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.1.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digit Balance)
2. กระดาษกรอง (Filter paper): Whatman
3. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
4. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power supply)
5. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrometer, AAS) รุ่น Perkin Elmer AAnalyst 100
6. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
7. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic stirrer)
8. ถังปฏิกิริยาทำจากอะครีลิก
9. ขั้วไฟฟ้าแคโทด และขั้วไฟฟ้าแอโนดทำจากแกรไฟต์

3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulphate, Na_2SO_4)
2. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)
3. โซเดียมไนเตรท (Sodium Nitrate, NaNO_3)
4. ผงวุ้น (Agar powder)

3.1.3 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองและการเตรียมสารละลายต่างๆที่ใช้ในการทดลอง รวมทั้ง สะพานเกลือ

1. น้ำเสียจริงเก็บจากส่วนปล่อยทิ้งของกระบวนการผลิตในโรงงานผลิตแม่พิมพ์ จ.ฉะเชิงเทรา เมื่อวันที่ 27 มิถุนายน 2555 ซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 3.3 และมีความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเท่ากับ 16, 211 และ 106 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียม

- โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เตรียมจากชั่ง NaCl 58.5 กรัม ละลายใน น้ำจืดกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

- โซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 1 โมลาร์ เตรียมจากชั่ง Na_2SO_4 126 กรัม ละลาย ในน้ำจืดกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

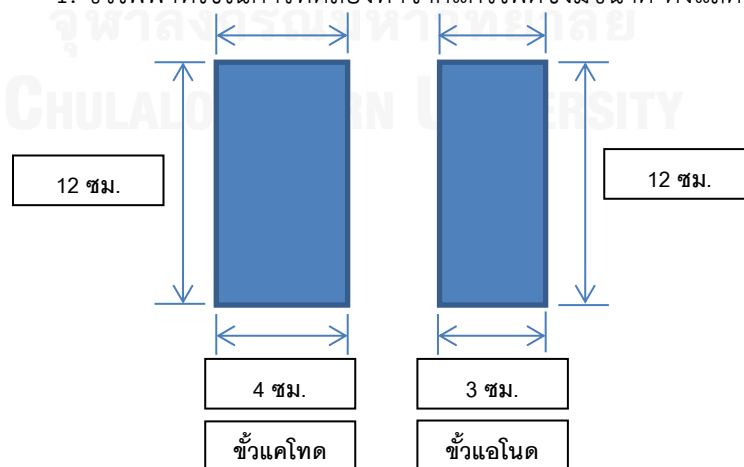
- โซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 1 โมลาร์ เตรียมจากชั่ง NaNO_3 85 กรัม ละลายใน น้ำจืดกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

3. สารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์ เตรียมจากชั่ง NaCl 292.5 กรัม ละลาย ในน้ำจืดกระทั่ง สารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

4. สะพานเกลือ เตรียมจากการนำสารละลายอิมิตัวของโซเดียมคลอไรด์จากข้อ 3. ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ต้มให้เดือด หลังจากนั้นนำมาผสมกับผงวุ้น 8.33 กรัม คนให้สารละลายเข้า กัน ต้มต่อไปอีก 30 วินาที จนกระทั่งสารละลายข้นเหนียว แล้วบรรจุลงในถังปฏิกิริยาตรงบริเวณที่ใส่ สะพานเกลือ ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นประมาณ 1 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายภายในถังปฏิกิริยาแข็งเป็นวุ้น

3.1.4 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า

1. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองทำจากแกรไฟต์ซึ่งมีขนาด ดังแสดงในภาพที่ 3.1



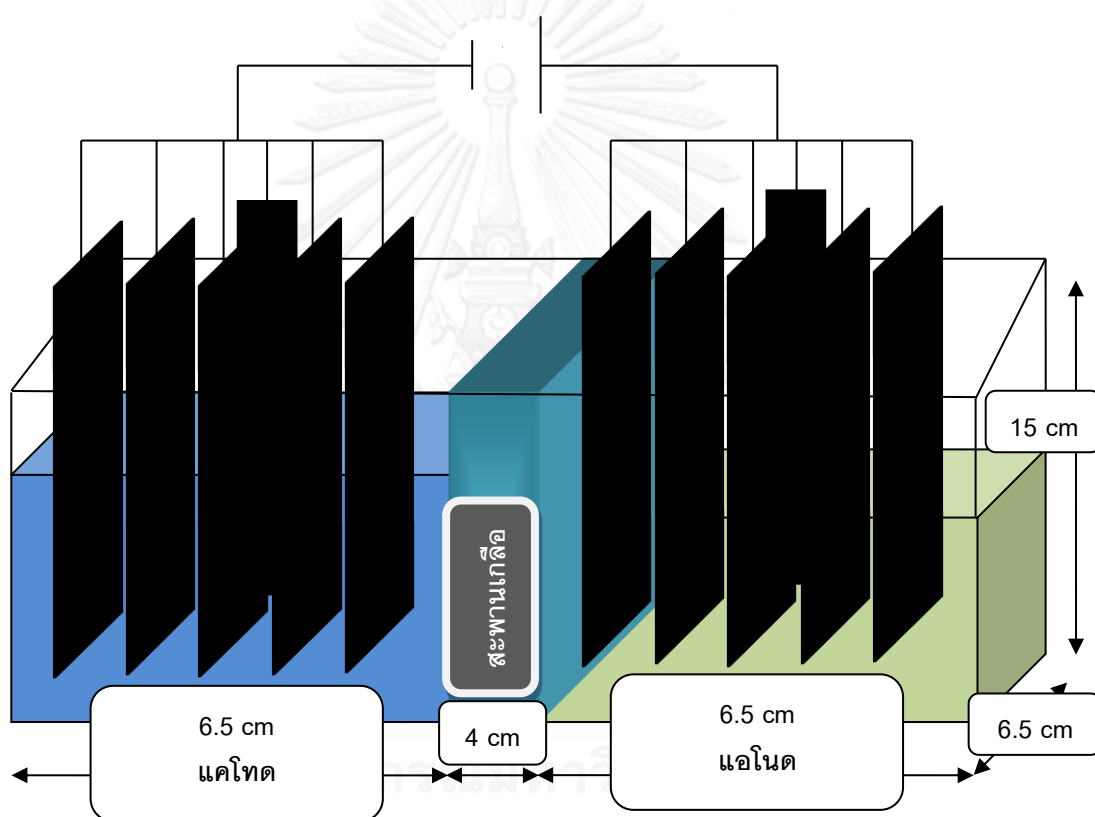
ภาพที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

2. การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ดังแสดงในภาพที่ 3.2

ใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดซึ่งทำจากแกรไฟต์ขนาด 3×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 6 แผ่น และ ขั้วไฟฟ้าแคโทดซึ่งทำจากแกรไฟต์ขนาด 4×12 ตารางเซนติเมตร จำนวน 6 แผ่น

สะพานเกลือที่ทำจากวุ้นที่มีองค์ประกอบของโซเดียมคลอไรด์อิมัลชันบรรจุในส่วนกลางของถังปฏิกิริยา เครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ปริมาตร 170 มิลลิลิตร เครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดบรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 200 มิลลิลิตร

3. ถังปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิจัยนี้มีขนาด (กว้าง \times ยาว \times สูง) $6.5 \times 17 \times 15$ ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.2

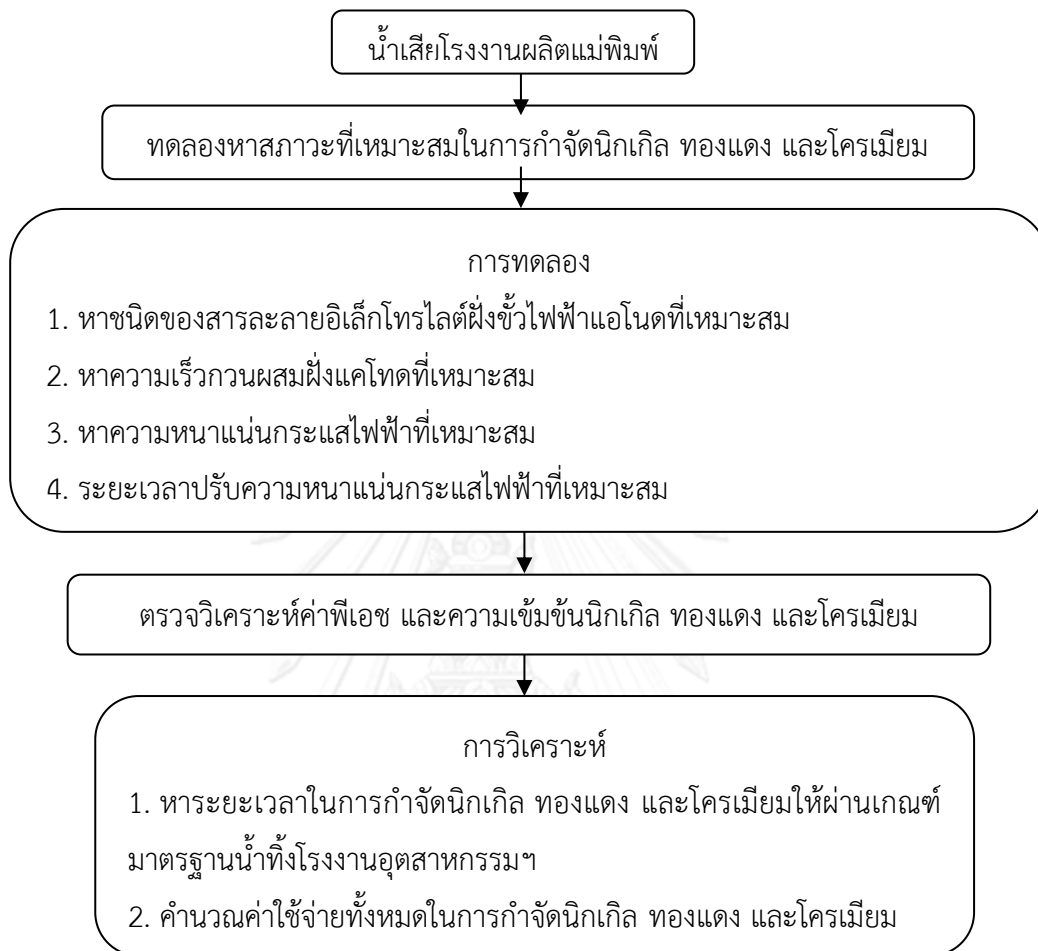


ภาพที่ 3.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดงและโครเมียมในน้ำเสียจริง โดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายและศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ได้แก่ 1) ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด 2) ความเร็วการผสมฝั่งแคโทด 3) ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และ 4) ระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า จากนั้นนำผลที่ได้มาหาจุดสมดุลของเวลาและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการ

กำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมปี พ.ศ. 2539
ผังการดำเนินการวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ผังการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม

ตัวแปรต่างๆในการทดลองเพื่อหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียจริง ดังสรุปในตารางที่ 3.1 และวิธีการทดลองดังสรุปในภาพที่ 3.4 โดยมีวิธีการทดลองโดยย่อดังนี้

1. ทำการวัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้า และถึงปฏิกิริยาดังที่บรรยายไว้ในข้อ 3.1.4
2. แปรเปลี่ยนชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในครึ่งเซลล์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็น NaCl, NaSO₄, NaNO₃ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำประปา และน้ำเสีย ปริมาตร 170 มิลลิลิตร
3. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝังขั้วไฟฟ้าแคโทด

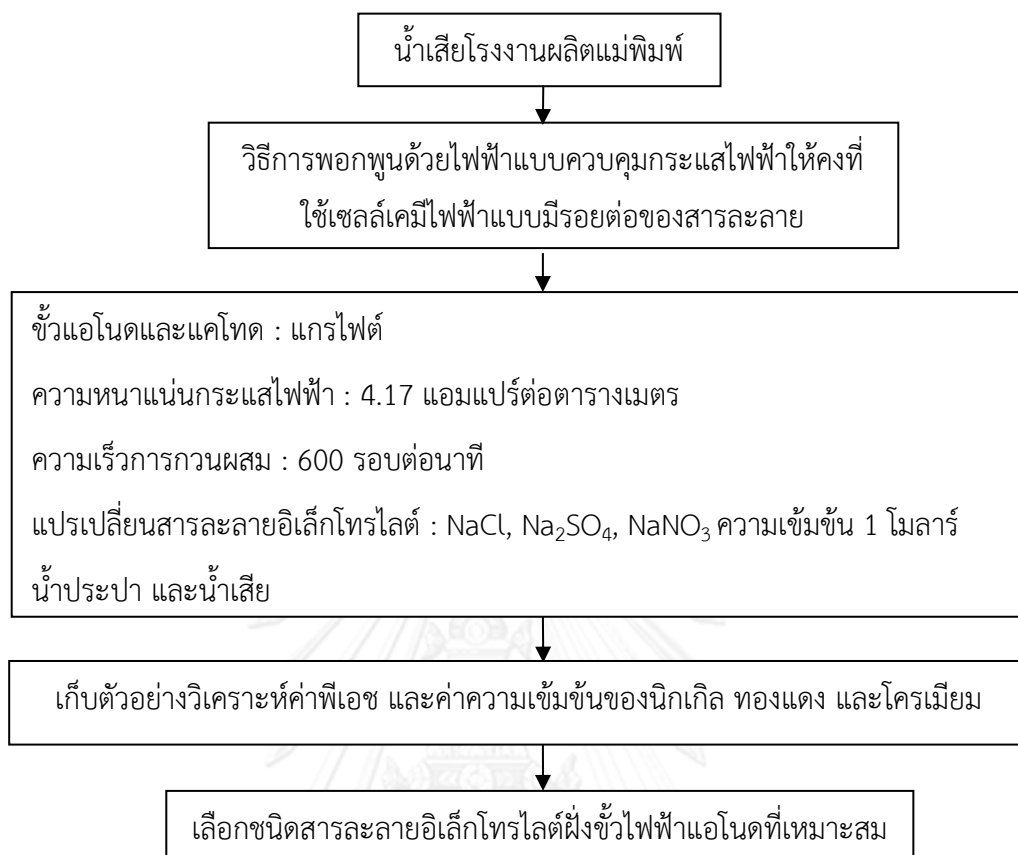
4. ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 0.1 แอมแปร์ (คิดเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)

5. กวนผสมสารละลายด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความเร็ว 600 รอบต่อนาที

6. เก็บตัวอย่างสารละลายในระหว่างการกำจัดตามระยะเวลา นำมาวัดค่าพีเอช และวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผึ่งข้าวไฟฟ้า แอนโนดที่มีผลต่อการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย
2. สารละลายผึ่งข้าวไฟฟ้าแคโทด	2. น้ำเสียจริง
3. ชนิดและขนาดของขั้วไฟฟ้าแอนโนด	3. แกรไฟต์ขนาด 3 x 12 ตารางเซนติเมตร
4. ชนิดและขนาดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	4. แกรไฟต์ขนาด 4 x 12 ตารางเซนติเมตร
5. ระยะห่างระหว่างขั้ว	5. 1 เซนติเมตร
6. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	6. 170 มิลลิลิตรในผึ่งแอนโนด และ 200 มิลลิลิตรในผึ่งแคโทด
7. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	7. 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
8. ความเร็วการกวนผสม	8. 600 รอบต่อนาที
9. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	9. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ควบคุม
1. ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผึ่งข้าวไฟฟ้าแอนโนด	1. NaCl, Na ₂ SO ₄ , NaNO ₃ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำประปา และน้ำเสีย
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม	1. ความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมที่เหลือในน้ำเสีย
2. พีเอช	2. ค่าพีเอชของน้ำเสีย



ภาพที่ 3.4 วิธีการทดลองหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสม

3.2.2 การศึกษาหาค่าความเร็วในการกวนผสมฝั่งแคโทดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลทองแดง และโครเมียม

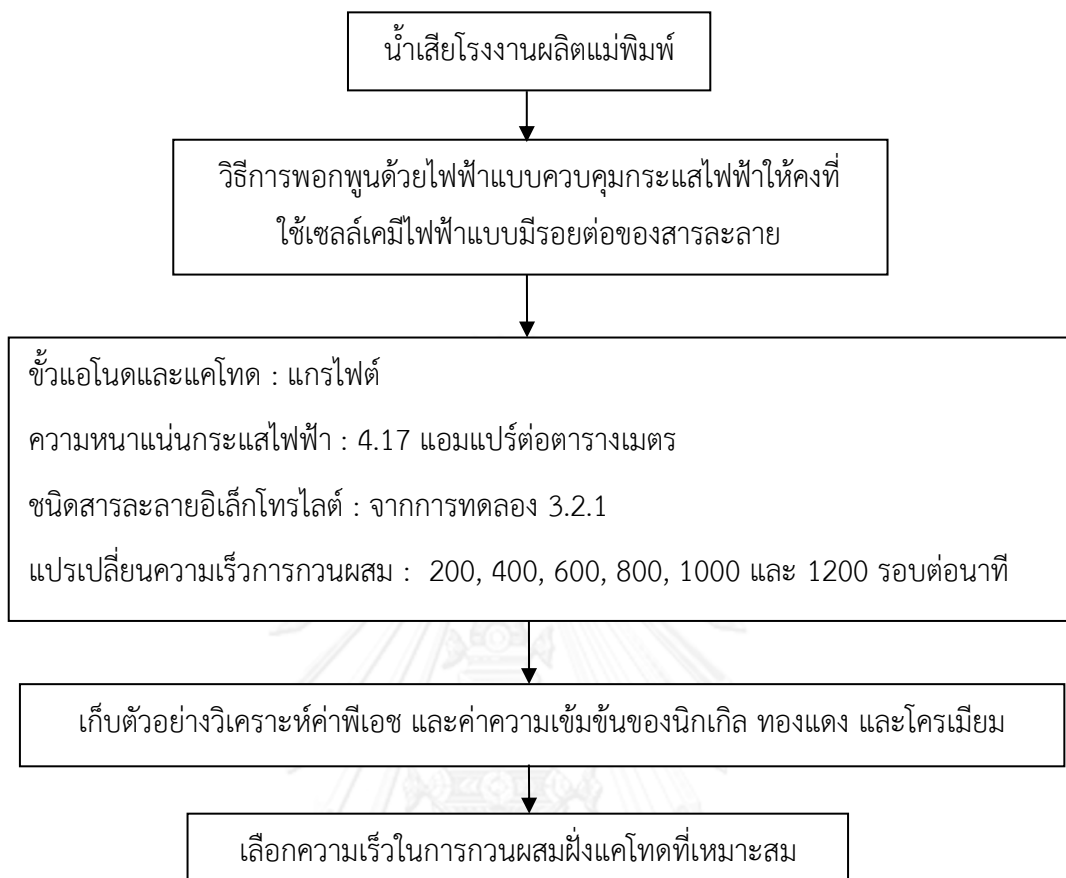
ตัวแปรต่างๆในการทดลองเพื่อหาความเร็วในการกวนผสมฝั่งแคโทดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียจริง ดังสรุปในตารางที่ 3.2 และวิธีการทดลองดังสรุปในภาพที่ 3.5 โดยมีวิธีการทดลองโดยย่อดังนี้

1. ทำการวัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้า และถึงปฏิกิริยาดังที่บรรยายไว้ในข้อ 3.1.4
2. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
4. ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 0.1 แอมแปร์ (คิดเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)
5. แปรเปลี่ยนความเร็วการกวนผสมเป็น 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที

6. เก็บตัวอย่างสารละลายในระหว่างการกำจัดตามระยะเวลา นำมาวัดค่าพีเอช และวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของความเร็วในการกวนผสมผึ่งแคโทดต่อการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย
2. สารละลายผึ่งขั้วไฟฟ้าแคโทด	2. น้ำเสียจริง
3. ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผึ่งขั้วไฟฟ้าแอโนด	3. ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.1
4. ชนิด และขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนด	4. แกรไฟต์ขนาด 3 x 12 ตารางเซนติเมตร
5. ชนิด และขนาดของขั้วไฟฟ้าแคโทด	5. แกรไฟต์ขนาด 4 x 12 ตารางเซนติเมตร
6. ระยะห่างระหว่างขั้ว	6. 1 เซนติเมตร
7. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า	7. 170 มิลลิลิตรในผึ่งแอโนด และ 200 มิลลิลิตรในผึ่งแคโทด
8. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	8. 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
9. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	9. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ควบคุม
1. ความเร็วในการกวนผสมผึ่งขั้วไฟฟ้าแคโทด	1. 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม	1. ความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมที่เหลือในน้ำเสีย
2. พีเอช	2. ค่าพีเอชของน้ำเสีย



ภาพที่ 3.5 วิธีการทดลองหาค่าความเร็วในการกวนผสมฝั่งแคโทดที่เหมาะสม

3.2.3 การศึกษาหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิเกิล ทองแดง และโครเมียม

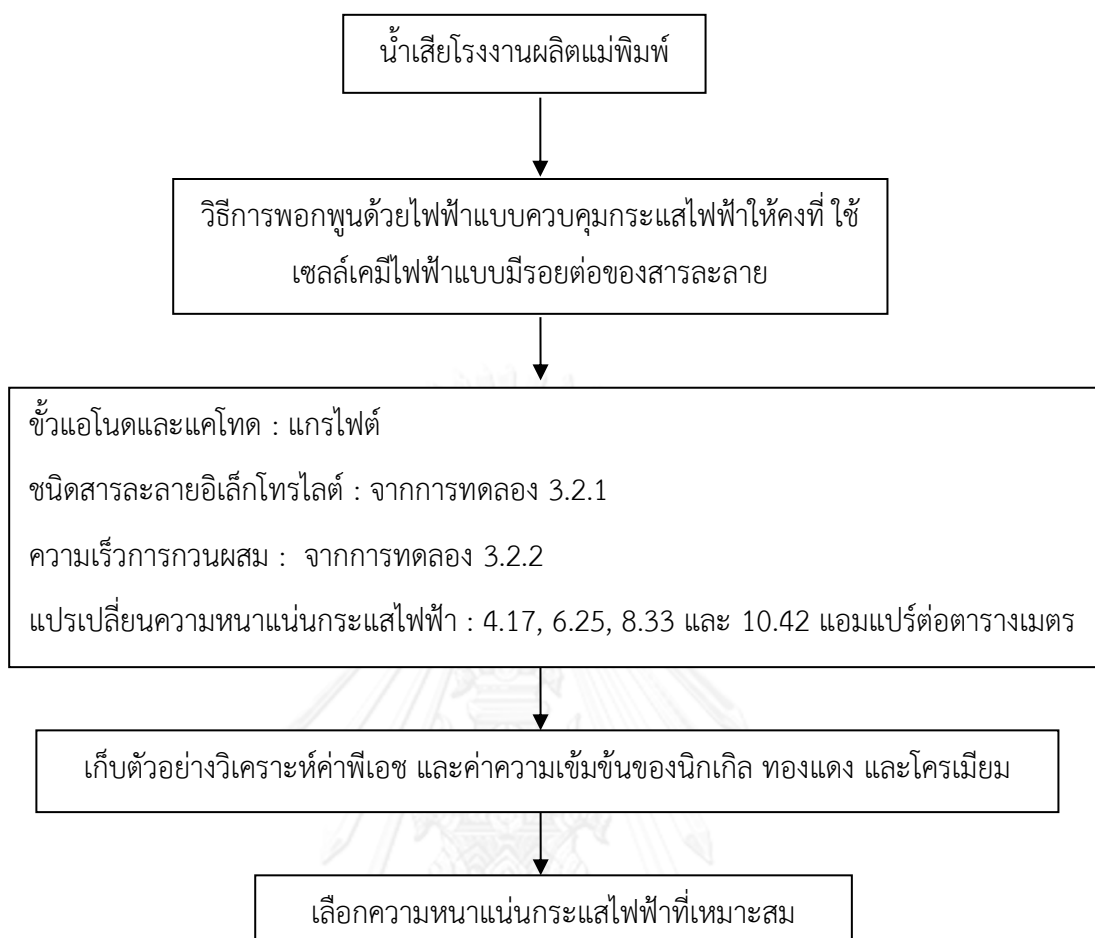
ตัวแปรต่างๆในการทดลองเพื่อหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิเกิล ทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียจริง ดังสรุปในตารางที่ 3.3 และวิธีการทดลองดังสรุปในภาพที่ 3.6 โดยมีวิธีการทดลองโดยย่อดังนี้

1. ทำการวัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้า และถึงปฏิกิริยาดังที่บรรยายไว้ในข้อ 3.1.4
2. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.1 ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
4. แปรเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็น 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 แอมแปร์ (คิดเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)
5. กวนผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความเร็วที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.2

6. เก็บตัวอย่างสารละลายในระหว่างการกำจัดตามระยะเวลา นำมาวัดค่าพีเอช และวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก อะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า 2. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 3. ชนิดสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด 4. ความเร็วในการกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 5. ชนิดและขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนด 6. ชนิดและขนาดของขั้วไฟฟ้าแคโทด 7. ระยะห่างระหว่างขั้ว 8. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า 9. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย 2. น้ำเสียจริง 3. ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.1 4. ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.2 5. แกรไฟต์ขนาด 3 x 12 ตารางเซนติเมตร 6. แกรไฟต์ขนาด 4 x 12 ตารางเซนติเมตร 7. 1 เซนติเมตร 8. 170 มิลลิลิตร ในฝั่งแอโนดและ 200 มิลลิลิตรในฝั่งแคโทด 9. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ควบคุม
1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	1. 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม 2. พีเอช	1. ความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมที่เหลือในน้ำเสีย 2. ค่าพีเอชของน้ำเสีย



ภาพที่ 3.6 วิธีการทดลองหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

3.2.4 การศึกษาหาระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัด นิเกิล ทองแดง และโครเมียม

ตัวแปรต่างๆในการทดลองเพื่อหาระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิเกิล ทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียจริง ดังสรุปในตารางที่ 3.4 และวิธีการทดลองดังสรุปในภาพที่ 3.7 โดยมีวิธีการทดลองโดยย่อดังนี้

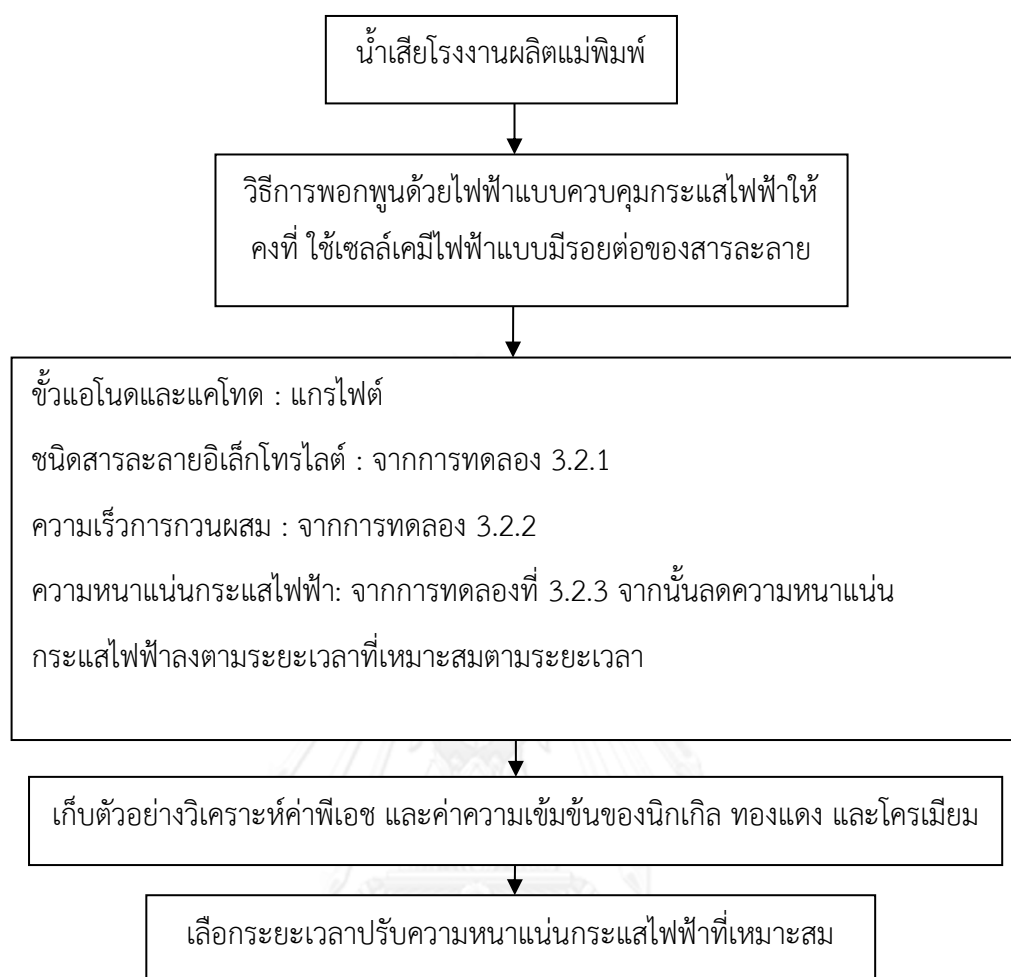
1. ทำการวัดโดยใช้ขั้วไฟฟ้า และถึงปฏิกิริยาดังที่บรรยายไว้ในข้อ 3.1.4
2. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 170 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. บรรจุน้ำเสียจริง ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
4. ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.3 จากนั้นปรับลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงตามแต่ละช่วงเวลา

5. กวณผลสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าความเร็วที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.2

6. เก็บตัวอย่างสารละลายในระหว่างการกำจัดตามระยะเวลา นำมาวัดค่าพีเอช และวัดค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนักอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer)

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ในน้ำเสียจริง

ตัวแปรคงที่	ควบคุม
1. ลักษณะการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้า 2. สารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 3. ชนิดสารละลายฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด 4. ความเร็วในการกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 5. ชนิดและขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนด 6. ชนิดและขนาดของขั้วไฟฟ้าแคโทด 7. ระยะห่างระหว่างขั้ว 8. ปริมาตรสารละลายในเซลล์เคมีไฟฟ้า 9. อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	1. แบบมีรอยต่อของสารละลาย 2. น้ำเสียจริง 3. ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.1 4. ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองที่ 3.2.2 5. แกรไฟต์ขนาด 3 x 12 ตารางเซนติเมตร 6. แกรไฟต์ขนาด 4 x 12 ตารางเซนติเมตร 7. 1 เซนติเมตร 8. 170 มิลลิลิตร ในฝั่งแอโนดและ 200 มิลลิลิตร ในฝั่งแคโทด 9. อุณหภูมิห้อง
ตัวแปรอิสระ	ควบคุม
1. ระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	1. ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 3.2.3 จากนั้นลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงตามระยะเวลาที่เหมาะสม
ตัวแปรตาม	ค่าที่ทำการวัด
1. ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิล ทองแดงและโครเมียม 2. พีเอช	1. ความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในที่เหลือน้ำเสีย 2. ค่าพีเอชของน้ำเสีย



ภาพที่ 3.7 วิธีการทดลองหาระยะเวลาในการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม

3.3 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวัดในการทำวิจัยนี้ คือ ค่าพีเอช และค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัดค่า
ค่าพีเอช	วิธีไฟฟ้า (พีเอชมิเตอร์)
ความเข้มข้นของ นิกเกิล ทองแดง และโครเมียม	อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer), ไตเร็กซ์แอสไพเรชันโดยวิเคราะห์โดยใช้ความยาวคลื่น 232, 324.8 และ 357.9 นาโนเมตร ตามลำดับ

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแม่พิมพ์ โดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย การทดลองได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539 ซึ่งได้แก่ 1) ศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม 2) ศึกษาหาความเร็วกวนผสมผั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม 3) ศึกษาหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม 4) ศึกษาหาระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมกับค่าพีเอช จากนั้นทำการประเมินค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม

ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ในน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช ปริมาณความเข้มข้นนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ปริมาณซัลเฟต ไนเตรท คลอไรด์ และของแข็งละลายน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	ปริมาณ*	ปริมาณ ค่าเฉลี่ย \pm SD (n=20)	หน่วย	ค่ามาตรฐาน น้ำทิ้ง
พีเอช	3.3	-	-	5.5 - 9
นิกเกิล	16	13 \pm 3	มก./ล.	< 1
ทองแดง	211	200 \pm 8	มก./ล.	< 2
โครเมียม	106	101 \pm 3	มก./ล.	< 0.25
ซัลเฟต	3708	-	มก./ล.	-
ไนเตรท	242	-	มก./ล.	-
คลอไรด์	500	-	มก./ล.	-
ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด	3976	-	มก./ล.	< 3,000

* เก็บตัวอย่างครั้งเดียววันที่ 21 มกราคม 2556 เก็บรักษาโดยเติมกรดไนตริก

4.1 ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม

4.1.1 การศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม

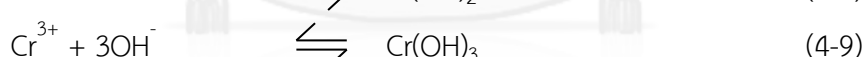
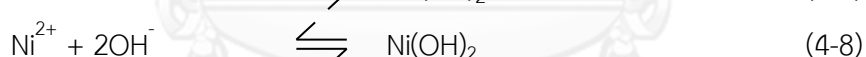
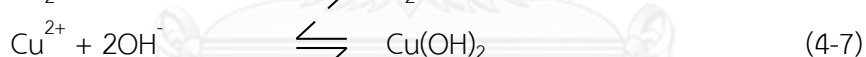
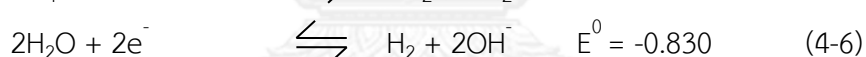
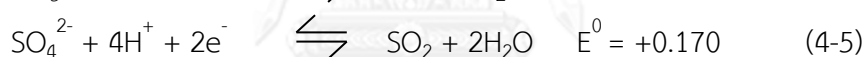
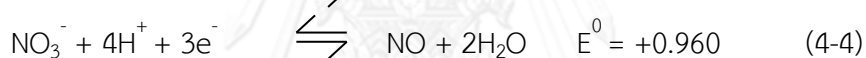
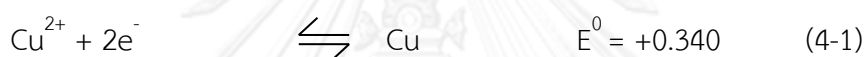
ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม โดยการศึกษา ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด ที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม มีค่าเท่ากับ 1, 2 และ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อคิดเป็นร้อยละการกำจัดของโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมที่มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 13, 200 และ 101 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 92.31, 99.00 และ 99.75 ตามลำดับ โดยที่เมื่อค่าร้อยละการกำจัดของโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม มีค่ามากกว่าร้อยละ 92.31, 99.00 และ 99.75 ตามลำดับ นั้นหมายถึง ปริมาณของโลหะชนิดนั้นมีค่าผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด น้ำเสียดังกล่าวจึงจัดเป็นน้ำทิ้งที่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง (มก./ล.)	ร้อยละการกำจัด
นิกเกิล	13	<1	92.31
ทองแดง	200	<2	99.00
โครเมียม	101	<0.25	99.75

ภาพที่ 4.1 (ก), 4.1 (ข) และ 4.1 (ค) แสดงร้อยละของการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเทียบกับเวลา โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 0.1 แอมแปร์ คิดเป็นปริมาณกระแสคงที่ที่ 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็น โซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำเสีย และ น้ำประปา จากการทดลองพบว่า ในช่วง 20 นาทีแรกของการทดลอง ปริมาณโลหะนิกเกิล ทองแดงและโครเมียม ลดลงเพียงเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้เกิดเป็นธาตุของโลหะเกาะบริเวณพื้นผิวของขั้วแกรไฟต์ ซึ่งจะสังเกตเห็นสีส้มแดงบริเวณพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด ซึ่งคาดว่าจะปฏิกิริยาของโลหะทองแดงซึ่งมีค่า $E^0 = +0.340$ ดังปฏิกิริยาที่ (4-1) (4-2) และ (4-3) อีกทั้งยังเกิดปฏิกิริยารีดักชันของไนเตรท และซัลเฟต ซึ่งมีค่า $E^0 = +0.960$ และ 0.170 ตามลำดับ ดังปฏิกิริยาที่ (4-4) และ (4-5) ซึ่งไนเตรท และซัลเฟตจะกลายเป็นไนตริกออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งมีสถานะเป็นแก๊ส โดยแก๊สที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการเกาะของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมที่บริเวณขั้วไฟฟ้าแคโทด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ ศรีณญู ศรีธัญรัตน์ (2553) จึงทำให้สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยจากภาพจะเห็นได้ว่า

ปริมาณความเข้มข้นของทองแดงจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดโดยค่าพีเอชจะมีค่าน้อยกว่า 5 และหลังจากนาที่ที่ 20 ปริมาณโลหะนิกเกิล ทองแดงและโครเมียม ลดลงอย่างรวดเร็ว อาจเป็นผลเพิ่มเติมจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไอออนไฮดรอกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ (4-6) ทำให้ค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้น และเมื่อค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 5 โครเมียมจะเกิดการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ของโครเมียม ตามด้วยการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ของทองแดง และนิกเกิล ตามลำดับ ปฏิกิริยาการเกิดดังปฏิกิริยาที่ (4-7) (4-8) และ (4-9) เป็นผลให้ปริมาณโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียลดลงอย่างรวดเร็ว การที่โลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมลดลงอย่างรวดเร็วอาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาร่วมกันของการรีดักชันที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด และส่วนหนึ่งเกิดการตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดมีค่าสูงขึ้นมาก จากการทดลองจะพบว่า ความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ นาที่ที่ 60 เป็นต้นไป เมื่อใช้โซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และน้ำประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด



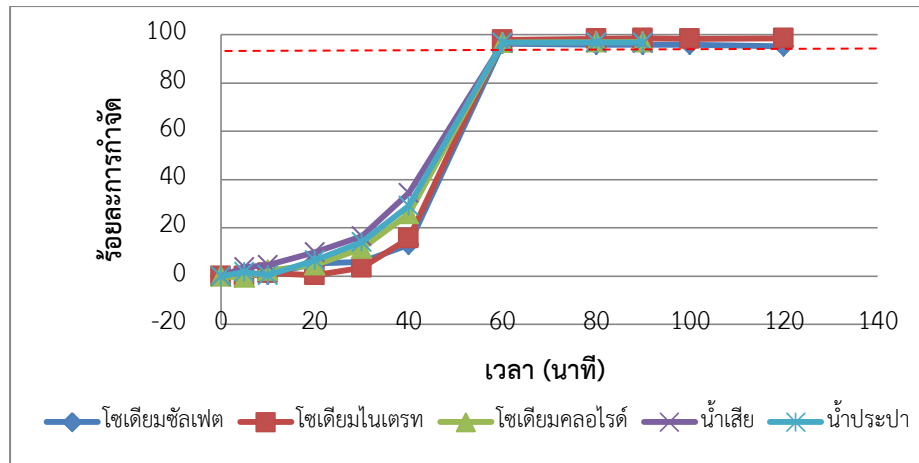
ระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็น โซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และน้ำประปา แสดงดังตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

จากตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นโซเดียมซัลเฟตพบว่าที่นาที่ที่ 60 มีร้อยละการกำจัดนิกเกิล และโครเมียม คิดเป็น 96.24 และ มากกว่า 99.96 ตามลำดับ และที่นาที่ที่ 59 สามารถกำจัดทองแดงได้ร้อยละ 99.20 เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นโซเดียมไนเตรท พบว่าที่นาที่ที่ 59 มีร้อยละการกำจัดนิกเกิล คิดเป็น 94.00 ที่นาที่ที่ 60 มีร้อยละการกำจัดทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 99.96 และ มากกว่า 99.96 ตามลำดับ เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นโซเดียมคลอไรด์พบว่าที่นาที่ที่ 59 มีร้อยละการกำจัดนิกเกิล และทองแดง คิดเป็น 93.75 และ 99.00 ตามลำดับ และที่นาที่ที่ 60 มีร้อยละการกำจัดโครเมียม มากกว่า 99.96 เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นน้ำเสียพบว่าที่นาที่ที่ 59 มีร้อยละการกำจัดนิกเกิล คิดเป็น 93.75 และ

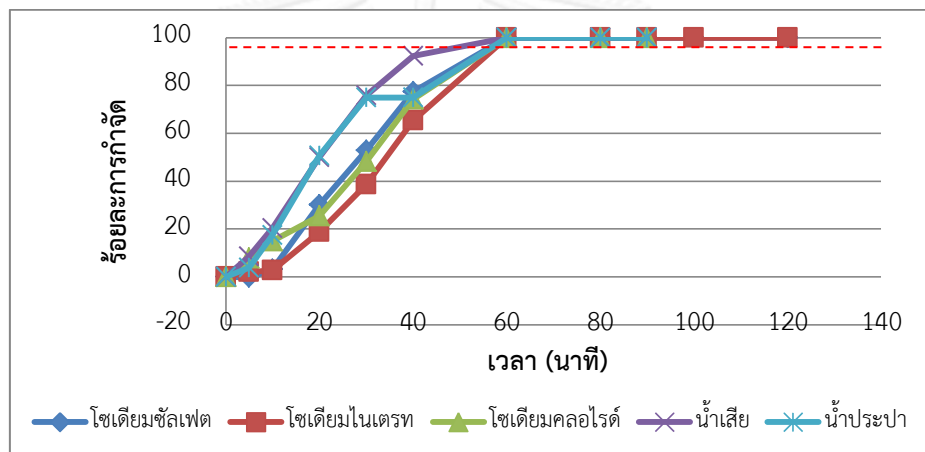
ที่นาที่ที่ 58 สามารถกำจัดทองแดงได้ร้อยละ 99.30 และที่นาที่ที่ 60 มีร้อยละการกำจัดโครเมียมมากกว่า 99.93 และเมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นน้ำประปาพบว่าที่นาที่ที่ 59 มีร้อยละการกำจัดนิกเกิล และทองแดง คิดเป็น 93.75 และ 99.00 ตามลำดับ และที่นาที่ที่ 60 สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่า 99.93 (ซึ่งร้อยละกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งมีค่าร้อยละกำจัดเท่ากับ 92.31, 99.00 และ 99.75 ตามลำดับ)

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า เมื่อใช้น้ำเสียเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมได้ดีใกล้เคียงกับใช้สารเคมีเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากในน้ำเสียมีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ ซึ่งคลอไรด์นี้เป็นไอออนที่ให้อิเล็กตรอนที่ดี โดยในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมออกจากน้ำเสียตัวอย่างโดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่างๆ สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม โดยใช้ระยะเวลาใกล้เคียงกัน คือ ประมาณ 60 นาที ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่มีผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมออกจากน้ำเสีย ดังนั้น เพื่อเป็นการควบคุมต้นทุน และลดสารเคมีที่ใช้ในการบำบัด จึงสามารถเลือกใช้น้ำเสียแทนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่นในฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดได้ ดังนั้น การทดลองขั้นต่อไปจึงเลือกใช้น้ำเสียเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด

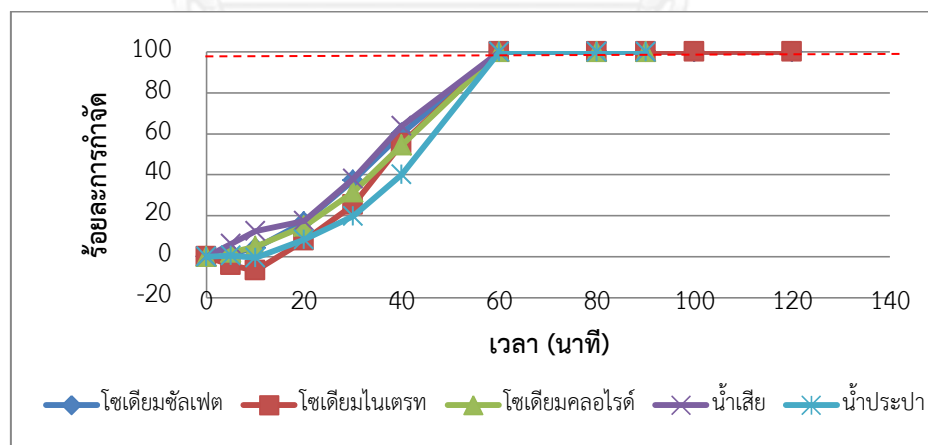
ในการทดลองช่วงแรกได้นำค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตรมาใช้ในการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงมาก ทำให้ไม่ทราบลักษณะการลดลงของความเข้มข้นนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมบนเส้นกราฟ เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่นาที่ที่ 1 หลังจากนั้น จึงได้ทดสอบหาค่าที่เหมาะสมเพื่อใช้เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้น พบว่า ที่กระแสไฟฟ้า 0.1 แอมแปร์ หรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตรให้ระยะเวลาในการกำจัดที่ดี มีการใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำ และใช้ระยะเวลากำจัดประมาณ 60 นาที จึงเลือกใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตรในการทดลอง และเนื่องจากในการทดลองมีการทดลองนำน้ำเสียมาใช้ในการวิจัย ซึ่งเมื่อทำการทดลอง พบว่าให้ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมใกล้เคียง หรือดีกว่าการใช้สารเคมี หรือน้ำประปา ดังนั้น ในการทดลองศึกษาความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดจึงไม่ได้ทำการศึกษา



(ก) ร้อยละการกำจัดนิกเกิล



(ข) ร้อยละการกำจัดทองแดง



(ค) ร้อยละการกำจัดโครเมียม

ภาพที่ 4.1 ร้อยละการกำจัดเมื่อเทียบกับเวลาของ (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำเสีย และ น้ำประปา

ตารางที่ 4.3 แสดงร้อยละการกำจัดนิเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
โซเดียมซัลเฟต	96.24	60
โซเดียมไนเตรท	94.00	59
โซเดียมคลอไรด์	93.75	59
น้ำเสีย	93.75	59
น้ำประปา	93.75	59

ตารางที่ 4.4 แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
โซเดียมซัลเฟต	99.20	59
โซเดียมไนเตรท	99.96	60
โซเดียมคลอไรด์	99.00	59
น้ำเสีย	99.30	58
น้ำประปา	99.00	59

ตารางที่ 4.5 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
โซเดียมซัลเฟต	>99.96	60
โซเดียมไนเตรท	>99.96	60
โซเดียมคลอไรด์	>99.96	60
น้ำเสีย	>99.93	60
น้ำประปา	>99.93	60

4.1.2 การศึกษาหาความเร็วกวนผสมผ้งข้าวไฟฟ้าแคโทดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลทองแดง และโครเมียม

ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม โดยการศึกษาค่าของความเร็วกวนผสมผ้งข้าวไฟฟ้าแคโทด ที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

ภาพที่ 4.2 (ก), 4.2 (ข) และ 4.2 (ค) แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เทียบกับเวลา โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 0.1 แอมแปร์ คิดเป็นปริมาณกระแสคงที่ที่ 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผ้งข้าวไฟฟ้าแอโนดเป็นน้ำเสีย และใช้ความเร็วกวนผสมผ้งข้าวไฟฟ้าแคโทดเป็น 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที พบว่า การกำจัดนิกเกิลที่ความเร็วกวนผสม 600 รอบต่อนาที ปริมาณนิกเกิลลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 50 คิดเป็นร้อยละการกำจัดนิกเกิลเท่ากับ 95.85 การกำจัดนิกเกิลที่ความเร็วกวนผสม 400 รอบต่อนาที ปริมาณนิกเกิลลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 59 คิดเป็นร้อยละการกำจัดนิกเกิลเท่ากับ 93.00 การกำจัดนิกเกิลที่ความเร็วกวนผสม 200, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที ปริมาณนิกเกิลลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 49 คิดเป็นร้อยละการกำจัดนิกเกิลเท่ากับ 93.00, 93.50, 92.50 และ 93.00 ตามลำดับ สำหรับการกำจัดทองแดงที่ความเร็วกวนผสม 200 และ 400 รอบต่อนาที ปริมาณทองแดงลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 50 คิดเป็นร้อยละการกำจัด 99.97 และ 99.02 ตามลำดับ ที่ความเร็วกวนผสม 600, 800 และ 1000 รอบต่อนาที ปริมาณทองแดงลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 45 คิดเป็นร้อยละการกำจัด 99.43, 99.39 และ 99.19 ตามลำดับ และที่ความเร็วกวนผสม 1200 รอบต่อนาที ปริมาณทองแดงลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 42 มีร้อยละการกำจัด 99.00 สำหรับการกำจัดโครเมียมที่ความเร็วกวนผสม 200, 600, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที ปริมาณโครเมียมลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 50 คิดเป็นร้อยละการกำจัดสูงกว่า 99.96 ที่ความเร็วกวนผสม 400 รอบต่อนาที ปริมาณโครเมียมลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 60 คิดเป็นร้อยละการกำจัดสูงกว่า 99.96 ที่ความเร็วกวนผสม 800 รอบต่อนาที ปริมาณโครเมียมลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่นาทิตี่ 48 คิดเป็นร้อยละการกำจัด 99.75 ดังแสดงในตารางที่ 4.6, 4.7 และ 4.8

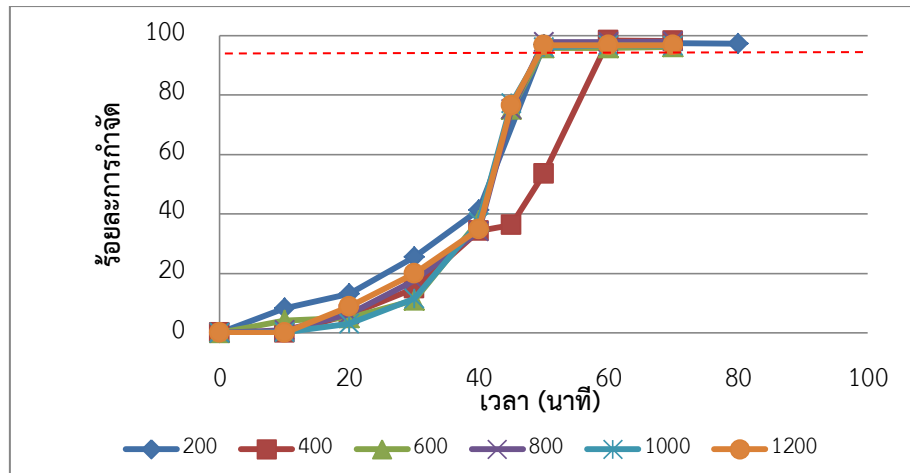
จากผลการทดลอง พบว่า ความเร็วกวนผสมผ้งข้าวไฟฟ้าแคโทดให้ผลการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำระยะเวลาที่โลหะทั้ง 3 มีค่าผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ณ ความเร็วกวนผสมต่างๆมาพิจารณา จะพบว่า ที่ความเร็วกวนผสม 800 รอบต่อนาที ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมน้อยที่สุด โดยใช้ระยะเวลาในการกำจัดเพียง 49 นาที ในขณะที่เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมที่ 200, 400, 600, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ที่ 50, 60, 50, 50 และ 50 นาที ตามลำดับ ดังข้อมูลแสดงในภาพที่ 4.3 ดังนั้นการทดลองหลังจากนี้จึงใช้ความเร็วกวนผสม 800 รอบต่อนาทีในการทดลองขั้นต่อไป

โดยจากผลการทดลองจะพบว่า ที่ความเร็วการกวนผสม 800 รอบต่อนาทีให้ผลดีที่สุดอาจเนื่องมาจากความเร็วการกวนผสมที่สูงจะส่งผลให้เกิดการนำพาหรือคอนเวกชัน (Convection) ซึ่ง

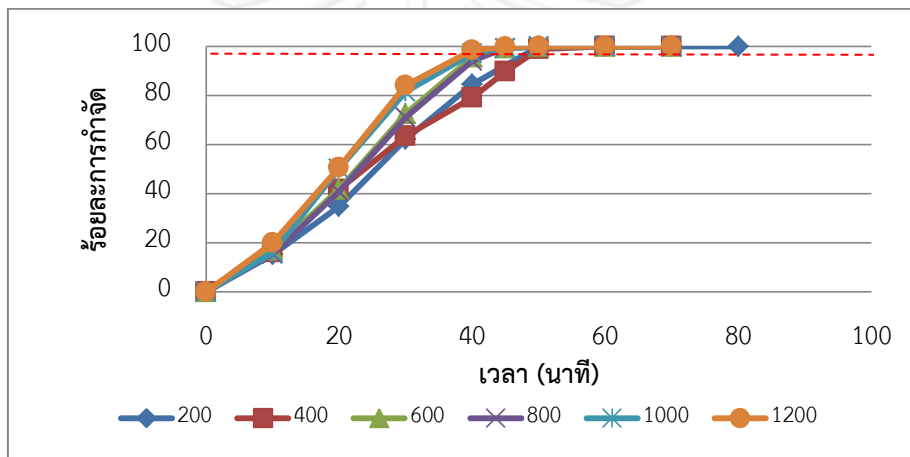
คอนเวกชันเป็นการเคลื่อนที่จากแรงทางกายภาพที่ทำให้เกิดการไหลเวียนของสารละลาย เช่น การหมุน (Stirring) หรือการกวน (Swirling) โดยแรง (Force Convection) แต่หากความเร็วการกวนผสมมีค่าสูงเกินไปอาจทำให้เกิดฟองก๊าซซึ่งฟองก๊าซจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการพอกพูนที่บริเวณขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็นผลทำให้พื้นที่ขั้วแคโทดที่สัมผัสน้ำเสียมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมมีค่าลดลง ซึ่งจากการทดลองจะเห็นได้ว่าความเร็วการกวนผสมที่สูงเกินไปหรือต่ำมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปตามผลงานวิจัยของ Chen และ Lim (2005) และ ทฤษฎีของ Stojan (2010)



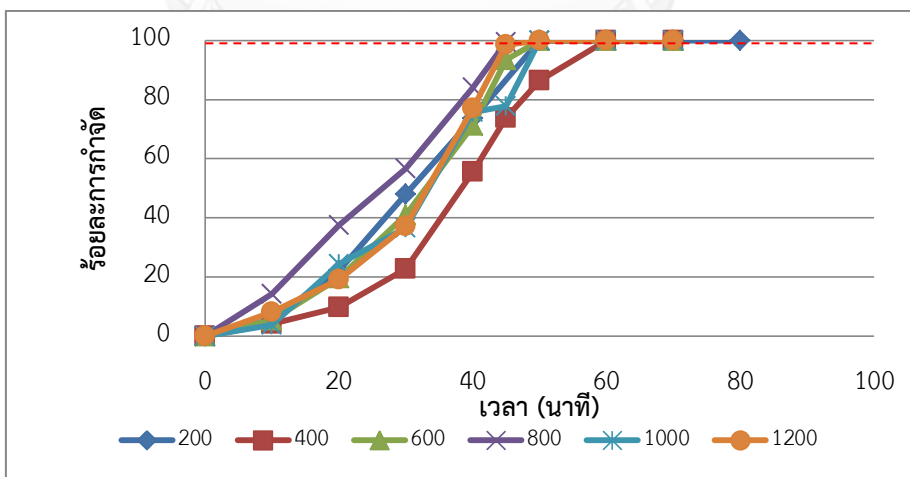
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ก) ร้อยละการกำจัดนิกเกิด



(ข) ร้อยละการกำจัดทองแดง



(ค) ร้อยละการกำจัดโครเมียม

ภาพที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดเมื่อเทียบกับเวลาของ (ก) นิกเกิด (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้ความเร็วแกนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.6 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที

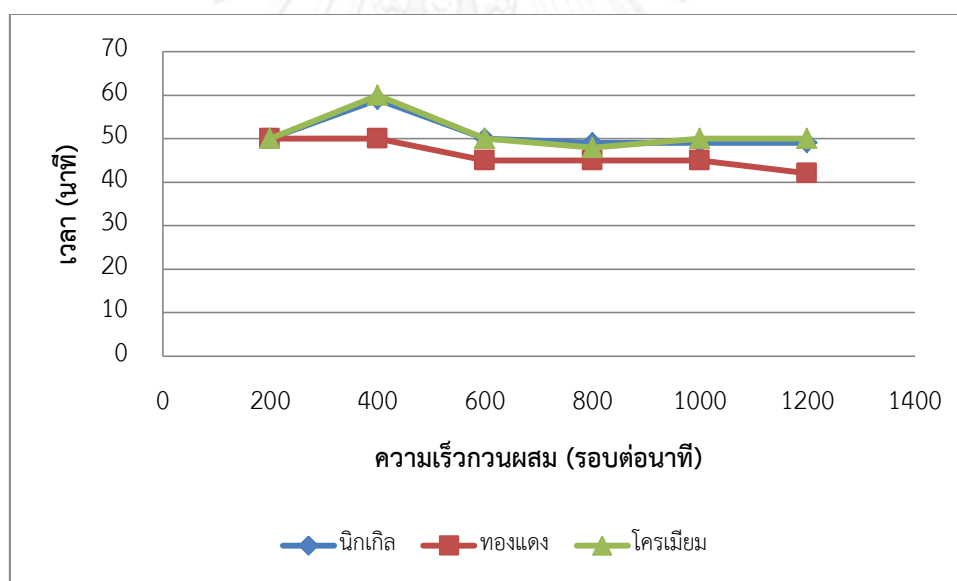
ความเร็วการกวนผสม (รอบต่อนาที)	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
200	93.00	49
400	93.00	59
600	95.85	50
800	93.50	49
1000	92.50	49
1200	93.00	49

ตารางที่ 4.7 แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที

ความเร็วการกวนผสม (รอบต่อนาที)	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
200	99.97	50
400	99.02	50
600	99.43	45
800	99.39	45
1000	99.19	45
1200	99.00	42

ตารางที่ 4.8 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกววนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที

ความเร็วการกววนผสม (รอบต่อนาที)	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
200	>99.96	50
400	>99.96	60
600	>99.96	50
800	99.75	48
1000	>99.96	50
1200	>99.96	50



ภาพที่ 4.3 เวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯเมื่อใช้ค่าความเร็วการกววนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที

4.1.3 การศึกษาหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม

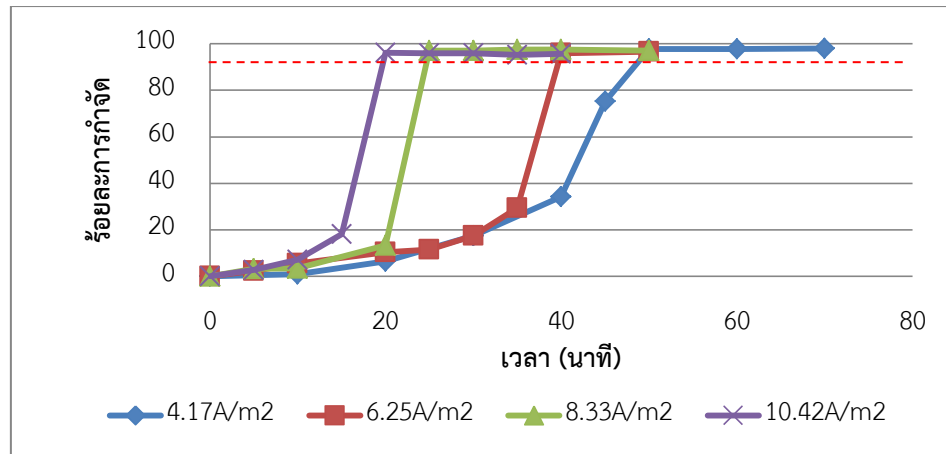
ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม โดยการศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

ภาพที่ 4.4 (ก), 4.4 (ข) และ 4.4 (ค) แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เทียบกับเวลา โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 แอมแปร์ คิดเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผงขี้เถ้าไฟฟ้าแอนดเป็นน้ำเสีย และใช้ความเร็วกวนผสมผงขี้เถ้าแคโทดเป็น 800 รอบต่อนาที พบว่า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ในเวลา 49, 45 และ 48 นาที ตามลำดับ โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 93.50, 99.39 และ 99.75 ตามลำดับ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ในเวลา 40 นาที โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 95.82, 99.73 และ มากกว่า 99.96 ตามลำดับ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ในเวลา 25 นาที โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 96.97, มากกว่า 99.99 และ มากกว่า 99.96 ตามลำดับ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ในเวลา 20, 19 และ 20 นาที ตามลำดับ โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 96.04, 99.10 และ มากกว่า 99.94 ตามลำดับ ดังสรุปไว้ในตารางที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 ทั้งนี้ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจะคำนึงถึงระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานฯ ทั้งหมดซึ่งจากตารางที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นเวลา 49 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นเวลา 40 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นเวลา 25 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นเวลา 20 นาที

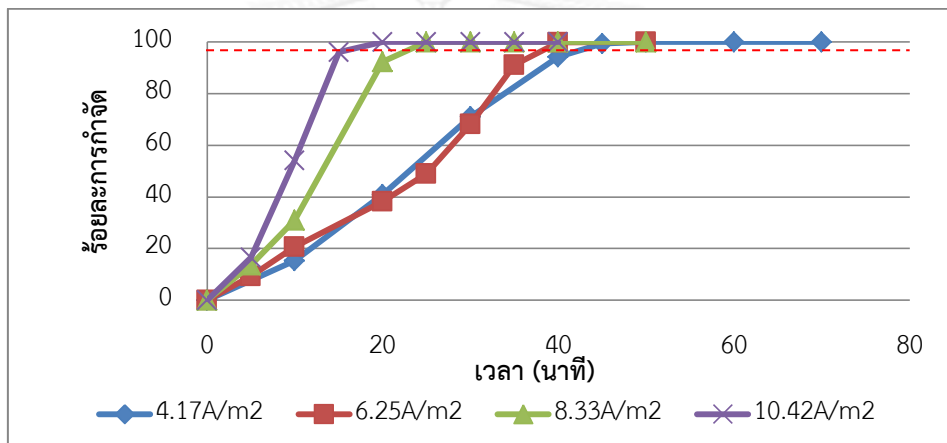
จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจะเป็นไปในทิศทางที่ตรงข้ามกัน นั่นหมายถึง เมื่อมีการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมมีค่าน้อยลง นั่นคือ เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งให้ผลคล้ายตามของ Akbal และ Camci (2011)

จากที่กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น พบว่า ในขณะที่ทำการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ณ เวลาต่างๆ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วไฟฟ้าแคโทดมีมากกว่าหนึ่งปฏิกริยา ดังนั้นปริมาณกระแสที่ให้แก่ระบบจึงไม่ถูกใช้ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเพียงอย่างเดียว การคำนวณค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส (Current efficiency) จะสามารถระบุได้ว่า ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใดมีผลรบกวนจากปฏิกริยาข้างเคียงมากที่สุด และค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าควบคุมได้ดีที่สุดสำหรับการกำจัดนิกเกิล

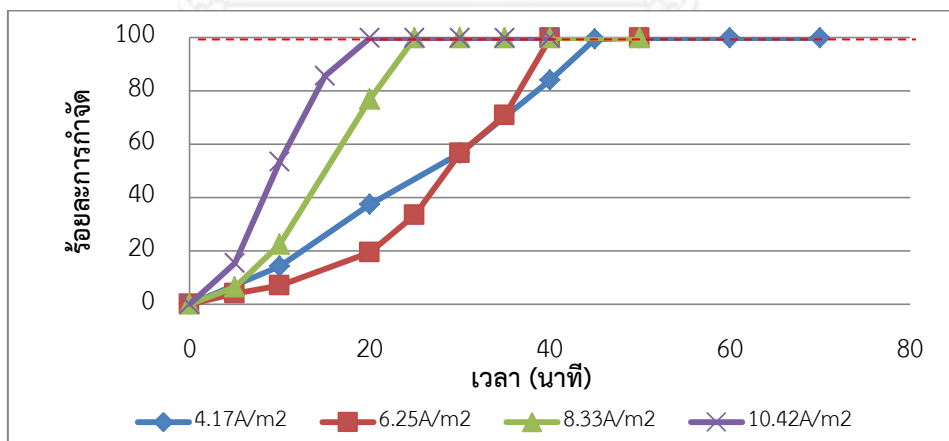
จากผลการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกระแส ดังแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม คือ ร้อยละ 3.03, 46.78 และ 42.18 ณ นาที่ที่ 50, 30 และ 45 ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม คือ ร้อยละ 2.15, 33.84 และ 30.30 ณ นาที่ที่ 40, 35 และ 40 ตามลำดับ ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม คือ ร้อยละ 2.13, 46.32 และ 36.26 ณ นาที่ที่ 25, 20 และ 25 ตามลำดับ และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือ ร้อยละ 1.97, 50.47 และ 43.29 ณ นาที่ที่ 20, 15 และ 15 ตามลำดับ ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จึงเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เนื่องจากเป็นค่าที่ทำให้เกิดการใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่าค่าอื่นๆ



(ก) ร้อยละการกำจัดนิกเกิล



(ข) ร้อยละการกำจัดทองแดง



(ค) ร้อยละการกำจัดโครเมียม

ภาพที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดเมื่อเทียบกับเวลาของ (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้ กระแสไฟฟ้า 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 แอมแปร์ (โดยคิดเป็น 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ)

ตารางที่ 4.9 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	ร้อยละการ กำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
4.17	93.50	49
6.25	95.82	40
8.33	96.97	25
10.42	96.04	20

ตารางที่ 4.10 แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	ร้อยละการ กำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
4.17	99.39	45
6.25	99.73	40
8.33	>99.99	25
10.42	99.10	19

ตารางที่ 4.11 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	ร้อยละการ กำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
4.17	99.75	48
6.25	>99.96	40
8.33	>99.96	25
10.42	>99.94	20

ตารางที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ณ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ

ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (%)					
	นิกเกิล	เวลา (นาทีก)	ทองแดง	เวลา (นาทีก)	โครเมียม	เวลา (นาทีก)
4.17	3.03	50	46.78	30	42.18	45
6.25	2.15	40	33.84	35	30.30	40
8.33	2.13	25	46.32	20	36.26	25
10.42	1.97	20	50.47	15	43.29	15

สำหรับการทดลองขั้นต่อไปจึงใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้น

4.1.4 การศึกษาหาระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม

ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม โดยปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามเวลาให้เหมาะสมสำหรับการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมและมีต้นทุนค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด

ภาพที่ 4.5 (ก), 4.5 (ข) และ 4.5 (ค) แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเทียบกับเวลา โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์หรือคิดเป็น 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นน้ำเสีย ได้ทำการปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสตามระยะเวลาเป็น 4 แบบ โดยแบบที่ 1 ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเหลือ 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเหลือ 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเหลือ 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 20 นาที แบบที่ 2 ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 20 นาที แบบที่ 3 ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเหลือ 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเหลือ 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 25 นาที แบบที่ 4 ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเหลือ 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลงเหลือ 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 20 นาที

ส่วนแบบที่ 5 เป็นแบบที่ใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 50 นาที ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.13

จากการทดลองพบว่า การให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 1 ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ เป็นเวลา 30, 30 และ 30 นาที ตามลำดับ โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 94.05, 99.90 และ 99.88 ตามลำดับ การให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ เป็นเวลา 20, 19 และ 20 นาที ตามลำดับ โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 98.58, 99.00 และ 99.94 ตามลำดับ รูปแบบที่ 3 ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นเวลา 25, 24 และ 25 นาที ตามลำดับ โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 95.71, 99.30 และ มากกว่า 99.96 ตามลำดับ รูปแบบที่ 4 ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นเวลา 35, 30 และ 35 นาที ตามลำดับ โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 97.58, มากกว่า 99.93 และ 99.93 ตามลำดับ รูปแบบที่ 5 ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นเวลา 25, 25 และ 25 นาที ตามลำดับ โดยมีร้อยละการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เท่ากับ 96.97, มากกว่า 99.99 และ มากกว่า 99.96 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.14, 4.15 และ 4.16

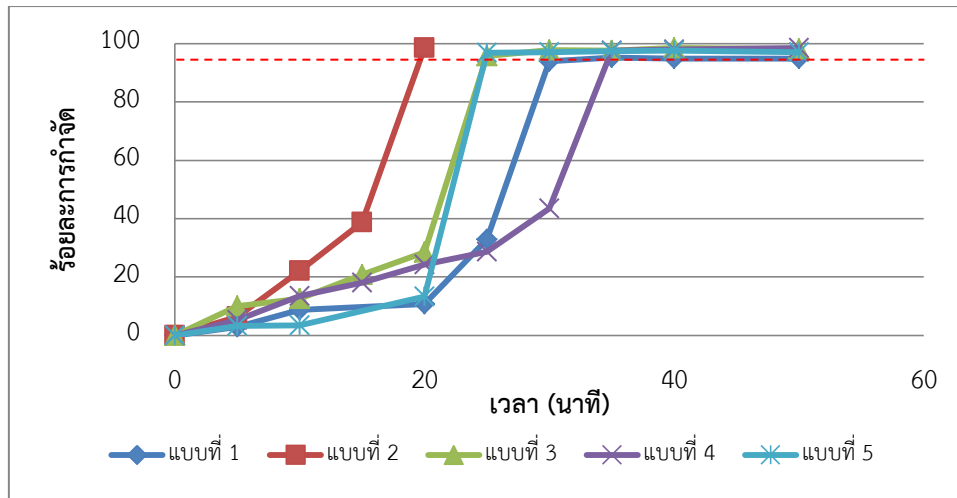
จากตารางที่ 4.13 รูปแบบที่ 1, 2 และ 3 เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นที่ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาปรับเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่างกัน พบว่า รูปแบบที่ 2 ซึ่งใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้น 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลา 20 นาที สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯได้ในเวลาที่ 20 รูปแบบที่ 1 และ 3 ยังคงมีความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเกินค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ จึงทำการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 10 นาที พบว่า แบบที่ 3 สามารถผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ โดยใช้ระยะเวลารวม 25 นาที แบบที่ 1 สามารถผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ โดยใช้ระยะเวลารวม 30 นาที ซึ่งจาก 3 รูปแบบที่ได้ทำการทดลองทำให้ทราบว่า เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ได้ภายในระยะเวลา 20 นาที หากใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นเท่ากับ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เริ่มต้นด้วยระยะเวลาเริ่มต้นที่น้อยลง จะส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเพิ่มมากขึ้น และเมื่อทำการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเริ่มต้นเป็น 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามรูปแบบที่ 4 และ 5 พบว่า ใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมให้ผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯได้ในเวลาที่ 35 และ 25 นาทีตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.13 แสดงช่วงเวลาการปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามเวลาที่เหมาะสม

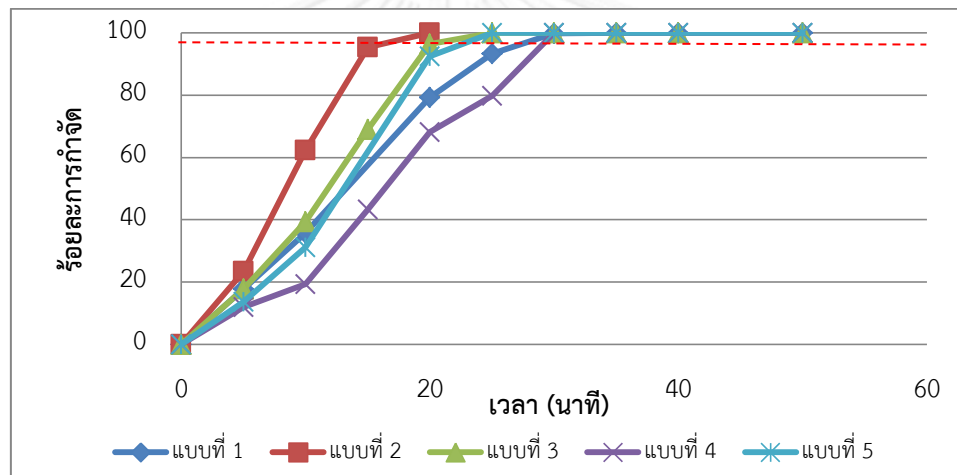
รูปแบบที่	เวลา ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ (นาทีก)			
	10.42 A/m ²	8.33 A/m ²	6.25 A/m ²	4.17 A/m ²
1	10	10	10	20
2	20	-	-	-
3	15	10	-	25
4	-	20	10	20
5	-	50	-	-

- หมายถึง ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ไม่ได้ใช้ในการทดลองของแต่ละรูปแบบ

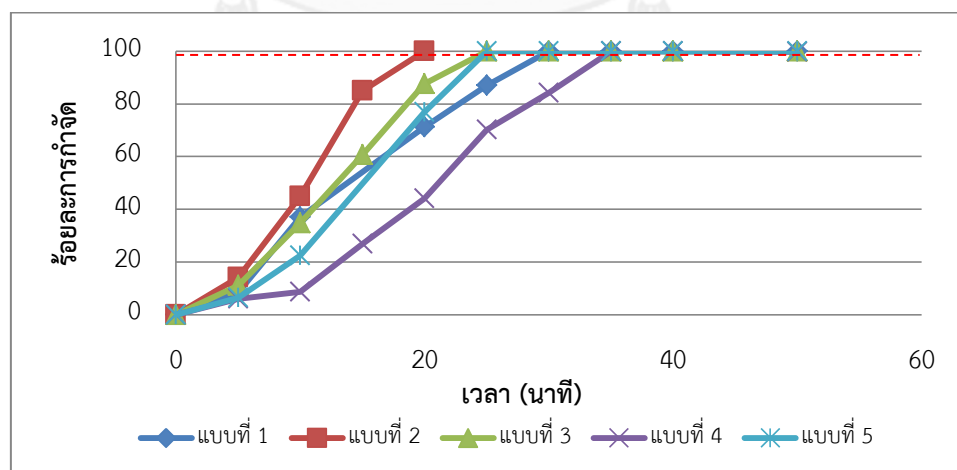
การปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในรูปแบบที่ 1 สามารถกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ได้นาทีที่ 30 คิดเป็นค่าใช้จ่าย 8.76 บาทต่อลูกบาศก์เมตร การปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 สามารถกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ได้นาทีที่ 20 คิดเป็นค่าใช้จ่าย 7.29 บาทต่อลูกบาศก์เมตร การปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 3 สามารถกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ได้นาทีที่ 25 คิดเป็นค่าใช้จ่าย 8.39 บาทต่อลูกบาศก์เมตร พบว่า การปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 4 สามารถกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ได้นาทีที่ 35 คิดเป็นค่าใช้จ่าย 8.75 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และการปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารูปแบบที่ 5 สามารถกำจัดโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม จนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ได้นาทีที่ 25 คิดเป็นค่าใช้จ่าย 7.29 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งจากผลการทดลอง เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะส่งผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมลดลง จากการทดลอง พบว่า การทดลองนี้การปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 2 ให้ผลดีที่สุดเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นๆ เพราะ มีค่าใช้จ่ายที่ถูกลงและใช้ระยะเวลาในการบำบัดเร็วที่สุด แม้การปรับลดกระแสไฟฟ้าไม่สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.17



(ก) ร้อยละการกำจัดนิกเกลิล



(ข) ร้อยละการกำจัดทองแดง



(ค) ร้อยละการกำจัดโครเมียม

ภาพที่ 4.5 ร้อยละการกำจัดเมื่อเทียบกับเวลาของ (ก) นิกเกลิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียมเมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบต่างๆ

ตารางที่ 4.14 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน

รูปแบบปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
แบบที่ 1	94.05	30
แบบที่ 2	98.58	20
แบบที่ 3	95.71	25
แบบที่ 4	97.58	35
แบบที่ 5	96.97	25

ตารางที่ 4.15 แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน

รูปแบบปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
แบบที่ 1	99.90	30
แบบที่ 2	99.00	19
แบบที่ 3	99.30	24
แบบที่ 4	>99.93	30
แบบที่ 5	>99.99	25

ตารางที่ 4.16 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน

รูปแบบปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ	ร้อยละการกำจัด	เวลาผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง (นาที)
แบบที่ 1	99.88	30
แบบที่ 2	99.94	20
แบบที่ 3	>99.96	25
แบบที่ 4	99.93	35
แบบที่ 5	>99.96	25

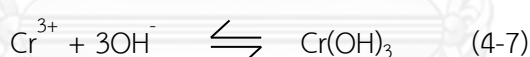
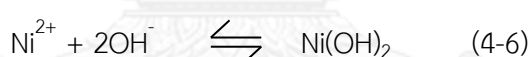
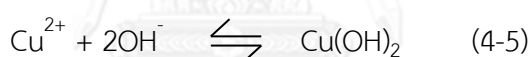
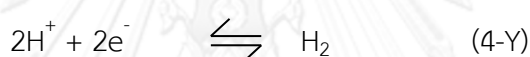
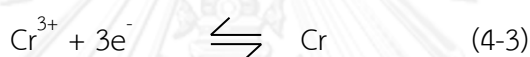
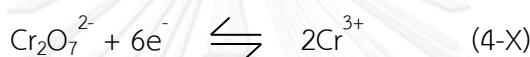
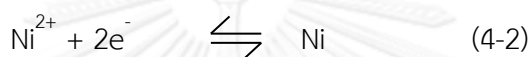
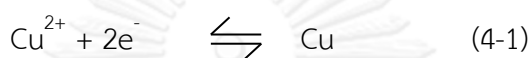
ตารางที่ 4.17 แสดงระยะเวลาผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมใน รูปแบบการปรับลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ และค่าใช้จ่ายในการบำบัด

รูปแบบการปรับลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	เวลาผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานฯ ของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม (นาทีก)	ค่าใช้จ่ายในการบำบัด (บาท/ลูกบาศก์เมตร)
แบบที่ 1	30	8.76
แบบที่ 2	20	7.29
แบบที่ 3	25	8.39
แบบที่ 4	35	8.75
แบบที่ 5	25	7.29

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมกับค่าพีเอช

จากการทดลองกระบวนการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ พบว่าค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้นสวนทางกับปริมาณนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ที่มีปริมาณลดลง โดยในช่วงการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 คือ ช่วงเริ่มต้นที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้เกิดเป็นธาตุของโลหะเกาะบริเวณพื้นผิวของขั้วแกรไฟต์ ซึ่งค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ดังปฏิกิริยาที่ (4-1) ถึง (4-3) และ (4-X)



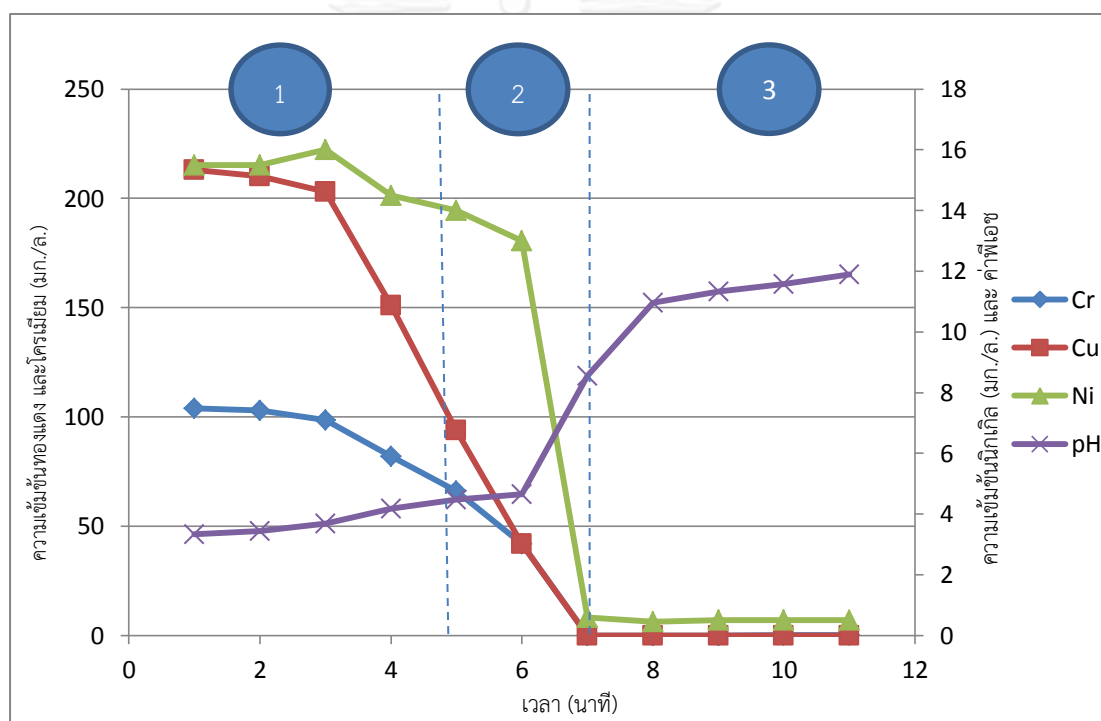
ช่วงที่ 2 คือ ช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันเพิ่มเติมของน้ำที่มีปริมาณมากในตัวอย่างที่ทำการทดลองเกิดผลิตภัณฑ์เป็นไฮดรอกไซด์ ดังปฏิกิริยาที่ (4-4) และ (4-Y) ทำให้ค่าพีเอชของน้ำเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ยังผลให้ปริมาณไอออนนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เกิดการตกตะกอนไฮดรอกไซด์และมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ดังปฏิกิริยาที่ (4-5) ถึง (4-7) คล้อยตามกับการทดลองของ Akbal และ Camci (2011) ซึ่งช่วงของการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 4.6

ช่วงที่ 3 คือ ช่วงที่พีเอชของน้ำเสียมีค่าสูงและปริมาณโลหะหนักลดลงจนใกล้หมดแล้ว การดำเนินไปของปฏิกิริยาที่ (4-1) ถึง (4-3) และ (4-X) และ (4-5) ถึง (4-7) จะสิ้นสุดลงเหลือเพียงปฏิกิริยาที่ (4-4) ที่ยังคงเกิดขึ้นเนื่องจากยังคงมีการให้กระแสไฟฟ้าแก่ระบบ ในช่วงนี้ค่าพีเอชจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพีเอช 1 หน่วยต้องใช้ปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนจำนวนมาก ทำให้ในการทดลองพบว่า ค่าพีเอชหากเพิ่มขึ้นจาก 10 เป็น 11 ต้องใช้เวลามากกว่าช่วงอื่น ดังแสดงในตารางที่ 4.18

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+] \quad (4-9)$$

ตารางที่ 4.18 แสดงตัวอย่างปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพีเอช 1 หน่วย

การเพิ่มขึ้นของพีเอช 1 หน่วย	[OH ⁻] (โมลต่อลิตร)
7 → 8	9×10^{-7}
9 → 10	9×10^{-5}
11 → 12	9×10^{-3}

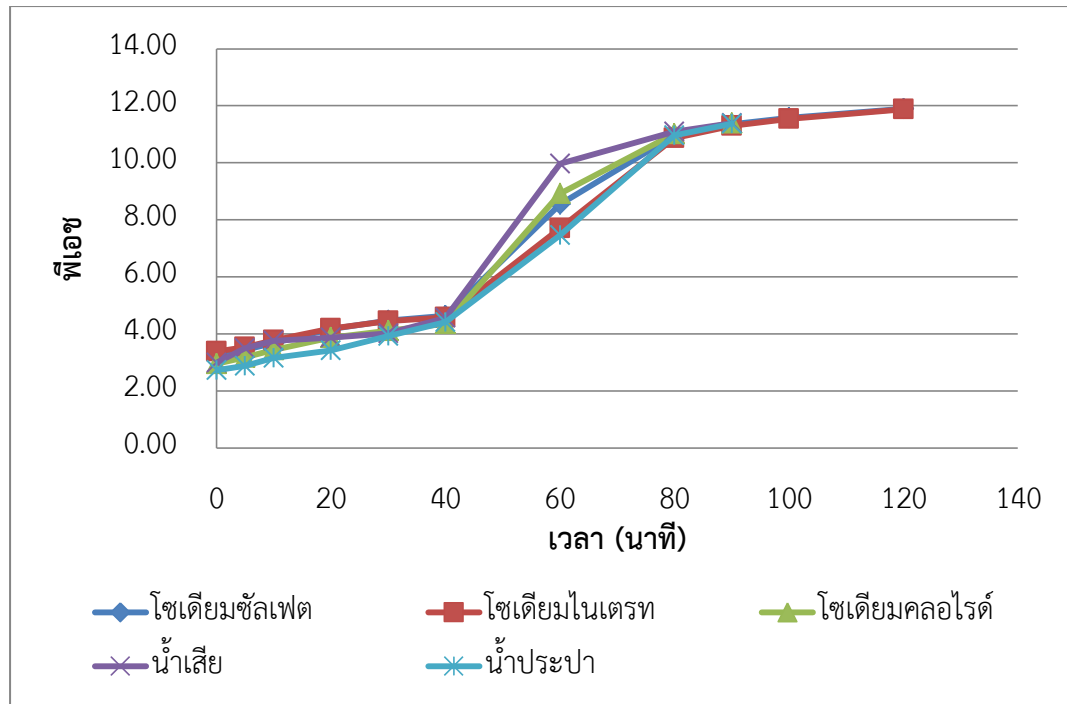


ภาพที่ 4.6 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมกับค่าพีเอช

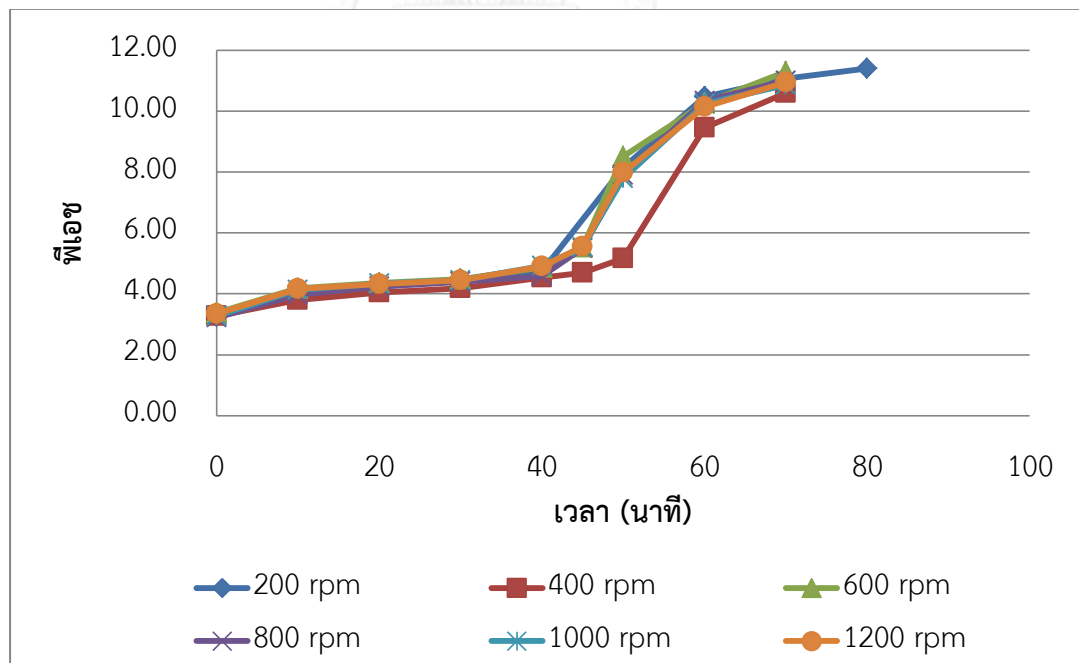
ภาพที่ 4.7 ถึง 4.10 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชตามเวลาเมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ผังขั้วไฟฟ้าแอโนดที่แตกต่างกัน ใช้ความเร็วหมุนขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ใช้ระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ตามลำดับ ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม พบว่า ช่วงแรกของการทดลองค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและเมื่อเวลาผ่านไปค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยอีกครั้งเมื่อค่าพีเอชมีค่ามากกว่า 10 ซึ่งเป็นไปตามที่กล่าวไว้ข้างต้น ผลจากการที่พีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นนี้จะส่งผลต่อการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากภาพจะสังเกต

ได้ว่าค่าพีเอชในช่วงแรกจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในช่วงแรกจะเป็นการรับอิเล็กตรอนของโลหะพอกพูนบริเวณขั้วไฟฟ้าแคโทด แต่หลังจากที่ปฏิกิริยาดำเนินไปจะเกิดการรับอิเล็กตรอนของน้ำเกิดเป็นไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้ค่าพีเอชในน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และความเข้มข้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมจะลดลงอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกัน โดยที่ค่าพีเอชของการตกตะกอนแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน โดยที่ Ni(OH)_2 สามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ที่พีเอชประมาณ 8 ถึง 14 Cu(OH)_2 สามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ที่พีเอชประมาณ 6 ถึง 14 และ Cr(OH)_3 สามารถตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ที่พีเอชประมาณ 5 ถึง 13 ดังภาพที่ 4.11

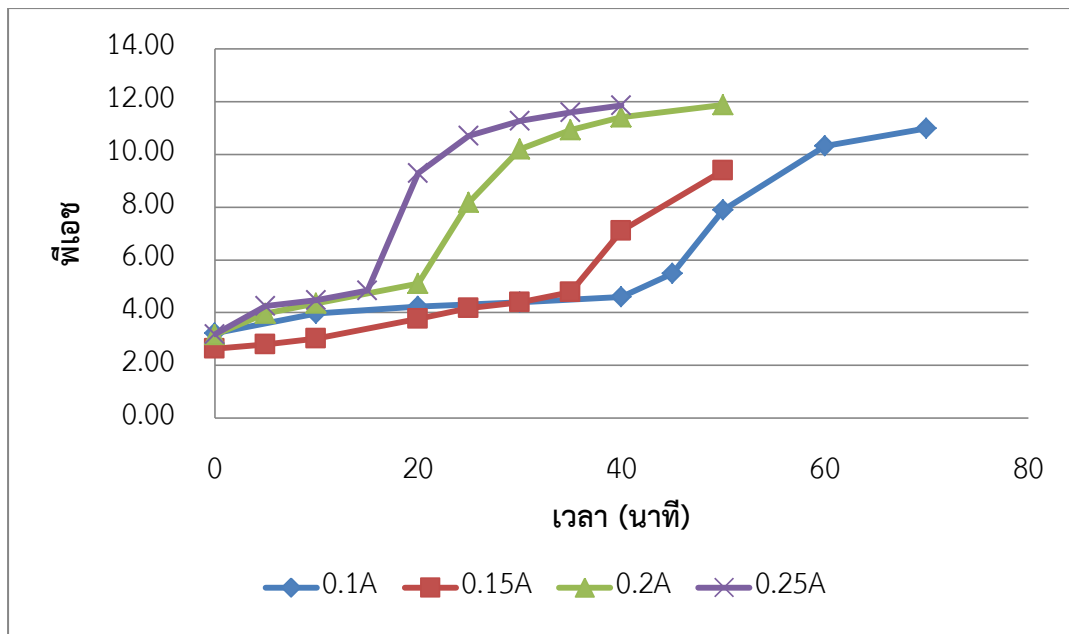
จากการทดลองสามารถบอกประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมโดยดูจากตัวอย่างจากภาพที่ 4.4 (ก) ร้อยละการกำจัดนิกเกิลที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 50 มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.90 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 97.73 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 40 มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.11 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 95.82 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 25 มีค่าพีเอชเท่ากับ 8.18 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 96.97 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 20 มีค่าพีเอชเท่ากับ 9.30 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 96.04 ซึ่งค่าพีเอชที่นิกเกิลสามารถตกตะกอนได้ดีจะอยู่ในช่วง 8 ถึง 14 จากภาพที่ 4.4 (ข) ร้อยละการกำจัดทองแดงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 45 มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.50 มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงร้อยละ 99.39 ร้อยละการกำจัดทองแดงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 35 มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.78 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 91.17 ร้อยละการกำจัดทองแดงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 20 มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงร้อยละ 92.43 ร้อยละการกำจัดทองแดงที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 15 มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.85 มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงร้อยละ 96.04 ซึ่งค่าพีเอชที่ทองแดงสามารถตกตะกอนได้ดีจะอยู่ในช่วง 6 ถึง 14 จากภาพที่ 4.4 (ค) ร้อยละการกำจัดโครเมียมที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 45 มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.50 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมากกว่าร้อยละ 99.47 ร้อยละการกำจัดโครเมียมที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 35 มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.78 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 70.83 ร้อยละการกำจัดโครเมียมที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 20 มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.10 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 76.95 ร้อยละการกำจัดโครเมียมที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่นาที่ที่ 15 มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.85 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 85.62 ซึ่งค่าพีเอชที่โครเมียมสามารถตกตะกอนได้ดีจะอยู่ในช่วง 5 ถึง 13 จึงคาดว่าประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมส่วนใหญ่มาจากกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้ามากกว่าการตกตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์



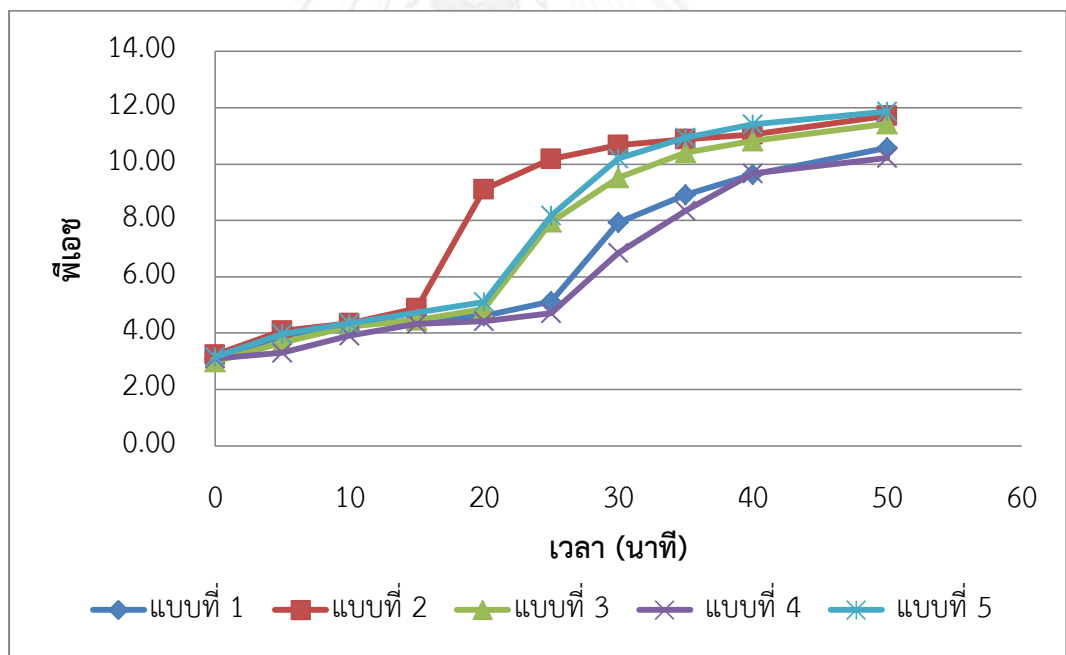
ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ผงขี้วัวไฟฟ้าแอนดแตกต่างกัน



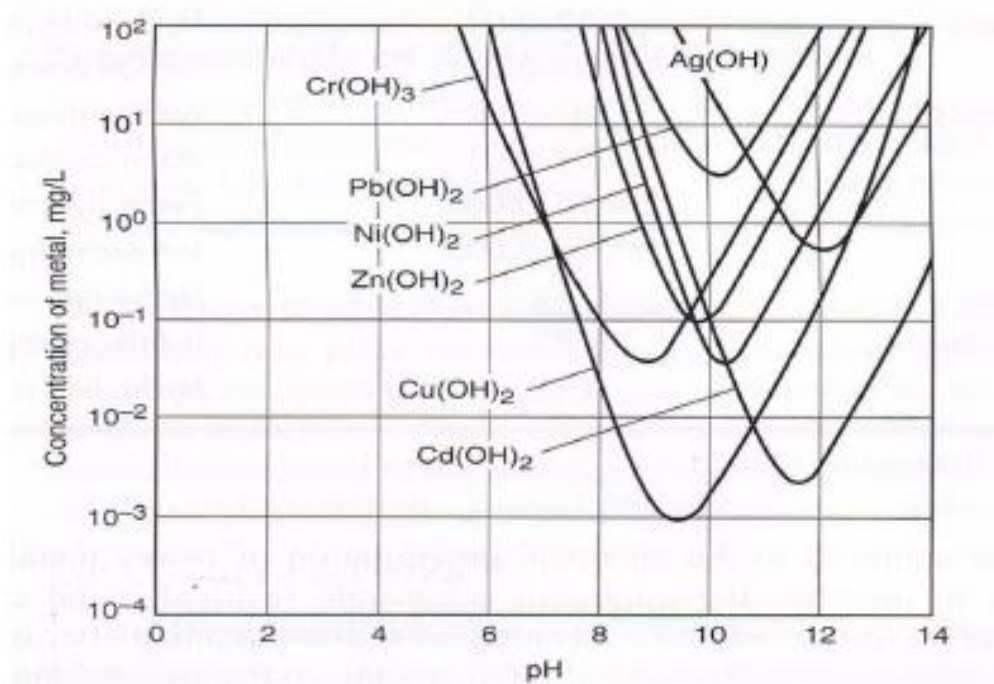
ภาพที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อใช้ความเร็วกวนผสมผงขี้วัวไฟฟ้าแอนดแตกต่างกัน



ภาพที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.10 การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเมื่อปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามเวลาในแต่ละช่วงที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชที่มีต่อการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ

(Metcalf และ Eddy, 2004)

4.3 ประสิทธิภาพเชิงกระแส

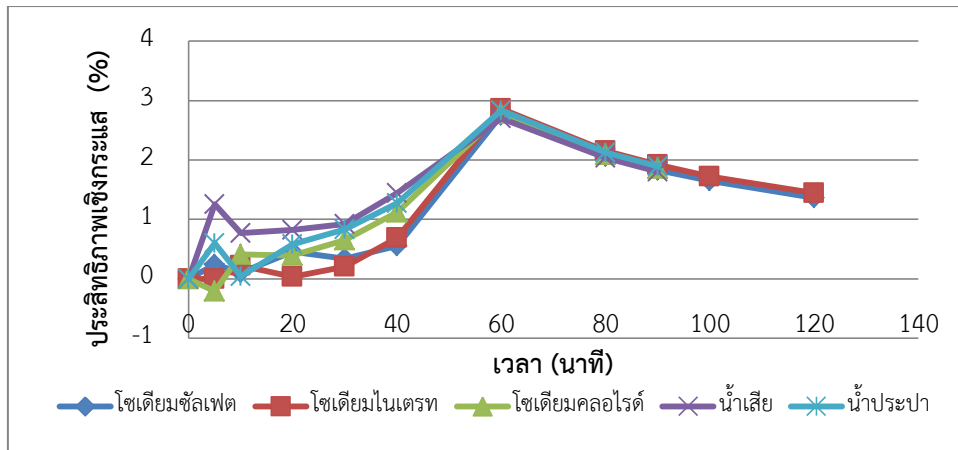
ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเป็นค่าที่บอกถึงอัตราเร็วในการกำจัดโลหะเทียบกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายไปในระบบ ณ ช่วงเวลาหนึ่ง

ภาพที่ 4.12 ถึง 4.15 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม พบว่า ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดนิกเกิลเมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และน้ำประปา มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 60 โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 2.76, 2.86, 2.79, 2.70 และ 2.83 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดทองแดง มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 40, 60, 40, 30 และ 20 นาที่ ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 41.90, 36.11, 37.57, 50.20 และ 51.86 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดโครเมียม มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 60 โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 32.64, 30.69, 30.00, 30.19 และ 30.62 ตามลำดับ ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.19 ถึง 4.21 ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดนิกเกิลเมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 50, 60, 50, 50, 50 และ 50 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 3.26, 2.51, 2.53, 3.03, 2.46 และ 2.40 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดทองแดง มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 40, 30, 30, 30, 30 และ 30 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 42.43, 41.96, 50.49, 46.78, 56.70 และ 61.70 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดโครเมียม มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 50, 50, 45, 45, 50 และ 45 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 37.78, 34.63, 37.40, 42.18, 36.54 และ 39.98 ตามลำดับ ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.22 ถึง 4.24 ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดนิกเกิลเมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 50, 40, 25 และ 20 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 3.03, 2.15, 2.13 และ 1.97 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดทองแดง มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 30, 35, 20 และ 15 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 46.78, 33.84, 46.32 และ 50.47 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดโครเมียม มีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 45, 40, 25 และ 15 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 42.18, 30.30, 36.26 และ 43.29 ตามลำดับ ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.25 ถึง 4.27 ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดนิกเกิลเมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่า การปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามเวลาแบบที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดที่นาที่ที่ 35, 20, 30, 35 และ 25 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 2.70, 2.23, 3.33, 3.16 และ 2.13 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดทองแดงมีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 35, 15, 30, 35 และ 20 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 58.57, 49.40, 64.76, 55.45 และ 46.32 ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงที่สุดในการกำจัดโครเมียมมีค่าสูงสุดที่นาที่ที่ 35, 15, 30, 35 และ 25 ตามลำดับ โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสร้อยละ 54.84, 49.15, 63.19, 53.61 และ 36.26 ตามลำดับ ดังข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.28 ถึง 4.30

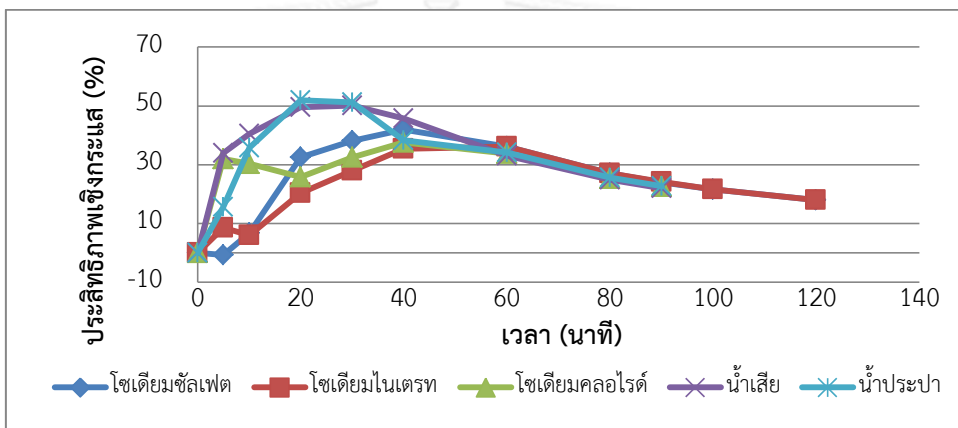
จากการทดลอง พบว่า ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนถึงจุดที่ให้ประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุด หลังจากนั้นประสิทธิภาพเชิงกระแสจะลดลง โดยผลที่ได้สอดคล้องกับ ศรัณยู ศรีธีรัตน์ (2553) เนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าที่ให้ในระบบถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ น้ำที่ไม่ใช่เพื่อการกำจัดนิเกิล ทองแดง และโครเมียม



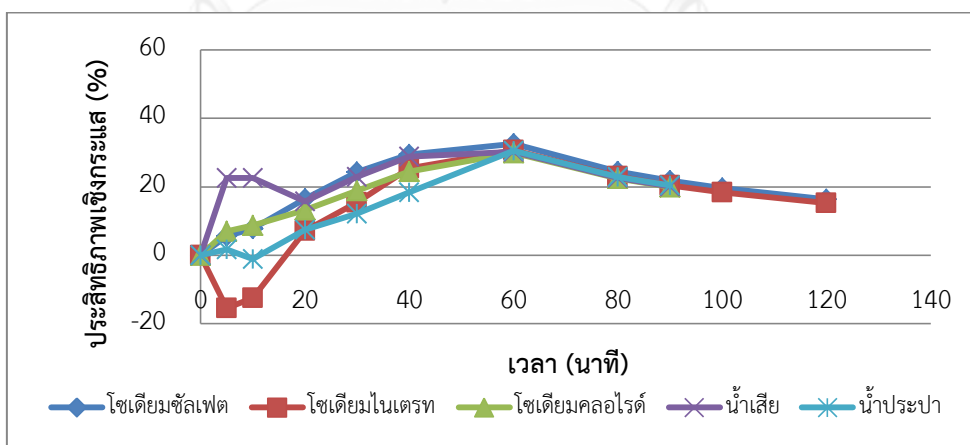
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



(ก) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดนิกเกิล

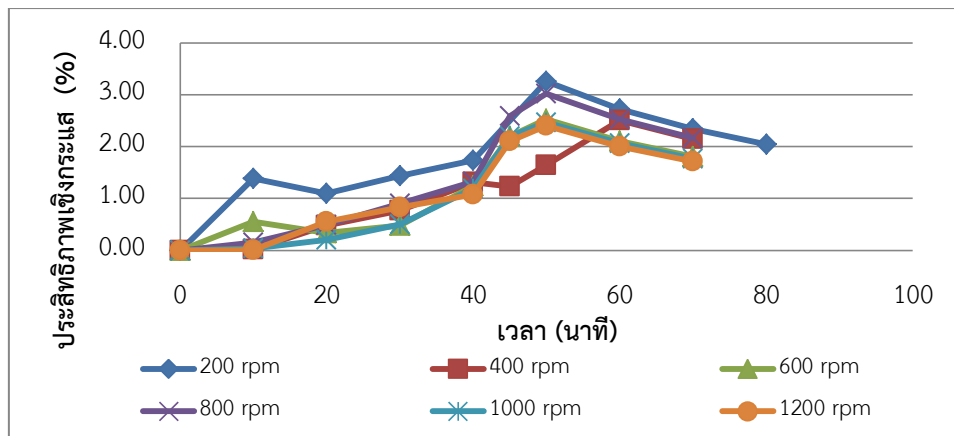


(ข) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดทองแดง

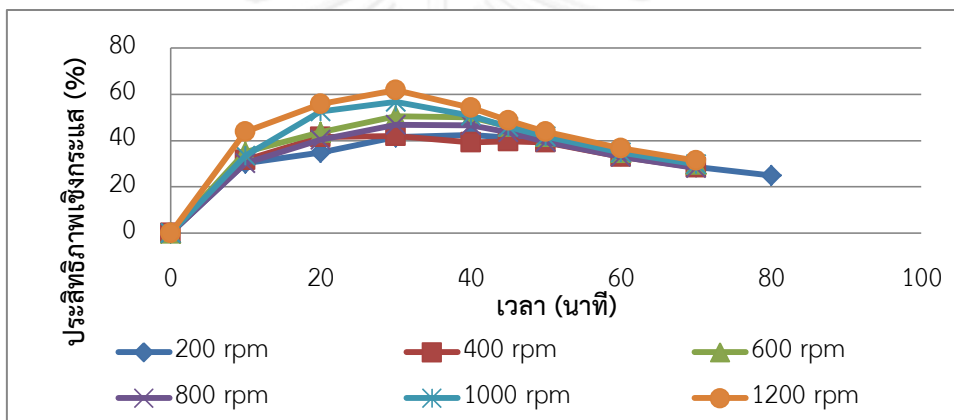


(ค) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดโครเมียม

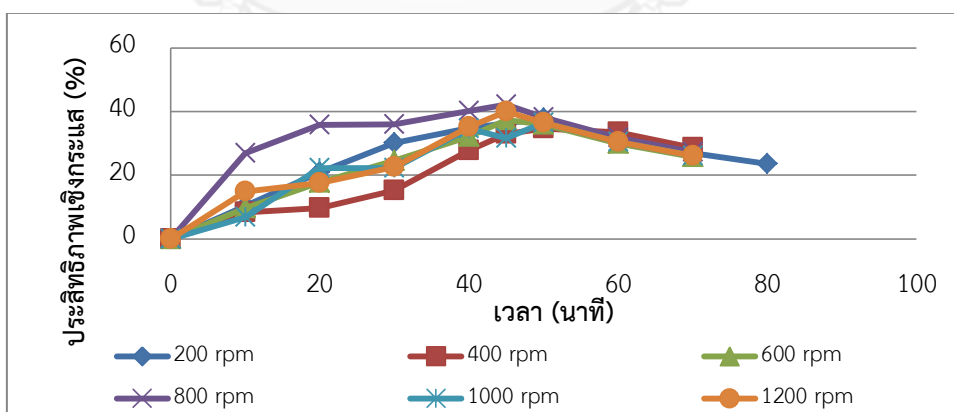
ภาพที่ 4.12 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อเทียบกับเวลาการกำจัด (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟุ้งซัวไฟฟ้าแอนโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำเสีย และน้ำประปา



(ก) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดนิกเกิล

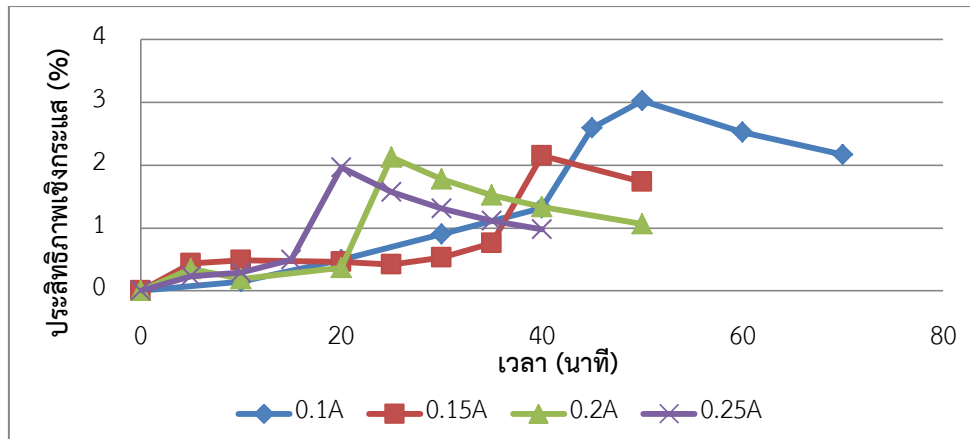


(ข) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดทองแดง

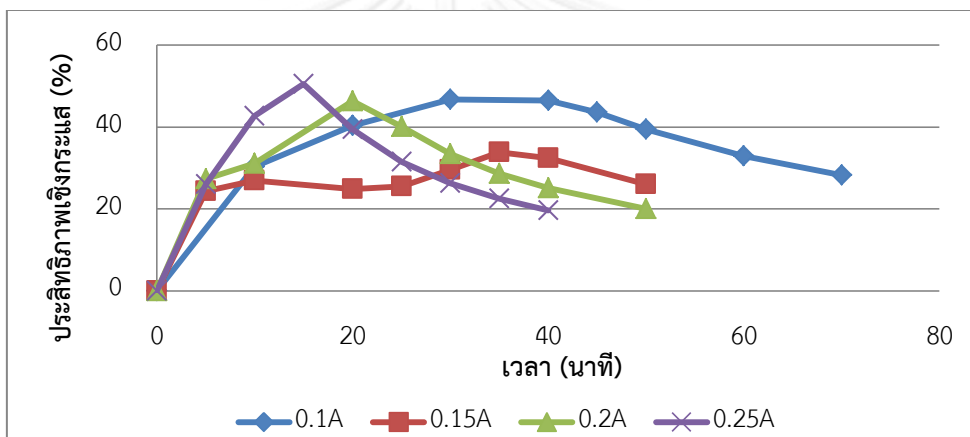


(ค) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดโครเมียม

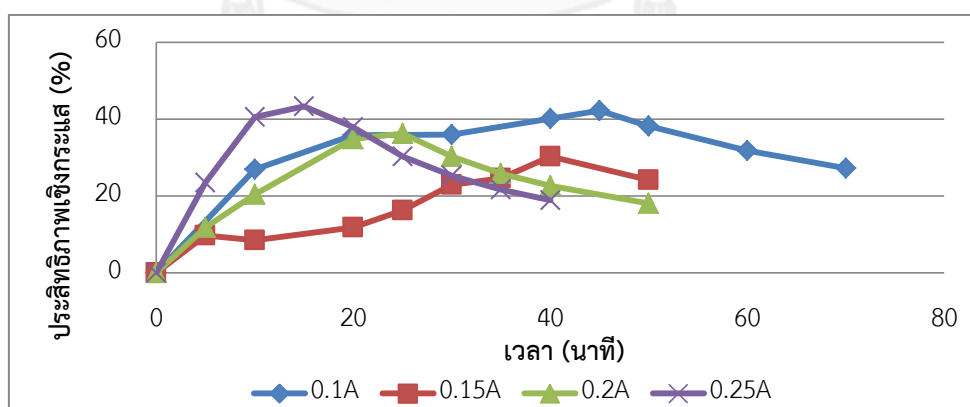
ภาพที่ 4.13 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อเทียบกับเวลาการกำจัด (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที



(ก) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดนิกเกิล

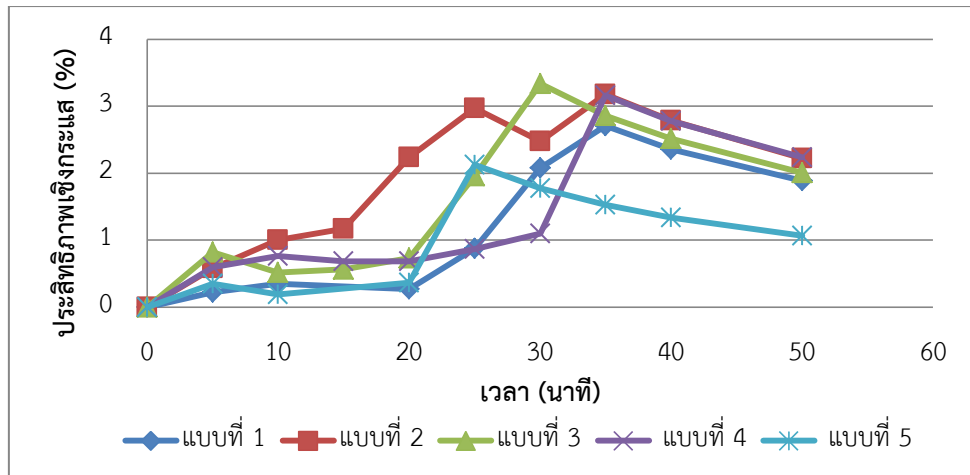


(ข) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดทองแดง

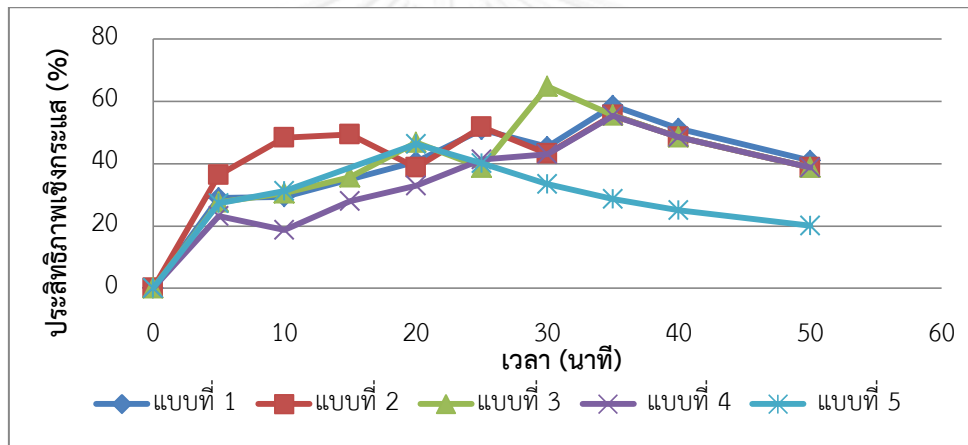


(ค) ประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัดโครเมียม

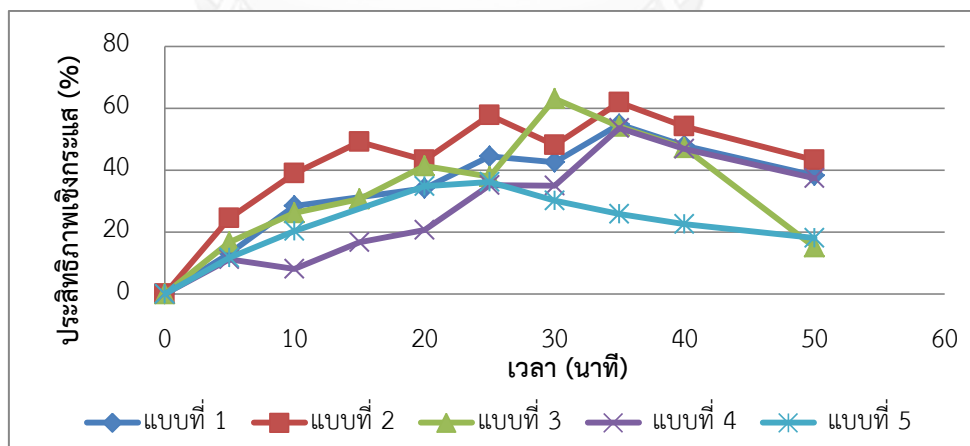
ภาพที่ 4.14 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อเทียบกับเวลาการจัด (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อใช้กระแสไฟฟ้า 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 แอมป์ (คิดเป็นความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร)



(ก) ประสิทธิภาพเชิงกระแสนของการกำจัดนิกเกิล



(ข) ประสิทธิภาพเชิงกระแสนของการกำจัดทองแดง



(ค) ประสิทธิภาพเชิงกระแสนของการกำจัดโครเมียม

ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพเชิงกระแสเมื่อเทียบกับเวลาการกำจัด (ก) นิกเกิล (ข) ทองแดง และ (ค) โครเมียม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.19 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
โซเดียมซัลเฟต	60	2.76
โซเดียมไนเตรท	60	2.86
โซเดียมคลอไรด์	60	2.79
น้ำเสีย	60	2.70
น้ำประปา	60	2.83

ตารางที่ 4.20 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
โซเดียมซัลเฟต	40	41.90
โซเดียมไนเตรท	60	36.11
โซเดียมคลอไรด์	40	37.57
น้ำเสีย	30	50.20
น้ำประปา	20	51.86

ตารางที่ 4.21 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ น้ำเสีย และ น้ำประปา

สารละลายอิเล็กโทรไลต์	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
โซเดียมซัลเฟต	60	32.64
โซเดียมไนเตรท	60	30.69
โซเดียมคลอไรด์	60	30.00
น้ำเสีย	60	30.19
น้ำประปา	60	30.62

ตารางที่ 4.22 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที

ความเร็วการกวนผสม (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
200	50	3.26
400	60	2.51
600	50	2.53
800	50	3.03
1000	50	2.46
1200	50	2.40

ตารางที่ 4.23 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที

ความเร็วการกวนผสม (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
200	40	42.43
400	30	41.96
600	30	50.49
800	30	46.78
1000	30	56.70
1200	30	61.70

ตารางที่ 4.24 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความเร็วการกวนผสม 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 รอบต่อนาที

ความเร็วการกวนผสม (รอบต่อนาที)	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
200	50	37.78
400	50	34.63
600	45	37.40
800	45	42.18
1000	50	36.54
1200	45	39.98

ตารางที่ 4.25 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
4.17	50	3.03
6.25	40	2.15
8.33	25	2.13
10.42	20	1.97

ตารางที่ 4.26 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
4.17	30	46.78
6.25	35	33.84
8.33	20	46.32
10.42	15	50.47

ตารางที่ 4.27 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
4.17	45	42.18
6.25	40	30.30
8.33	25	36.26
10.42	15	43.29

ตารางที่ 4.28 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดนิกเกิล ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน

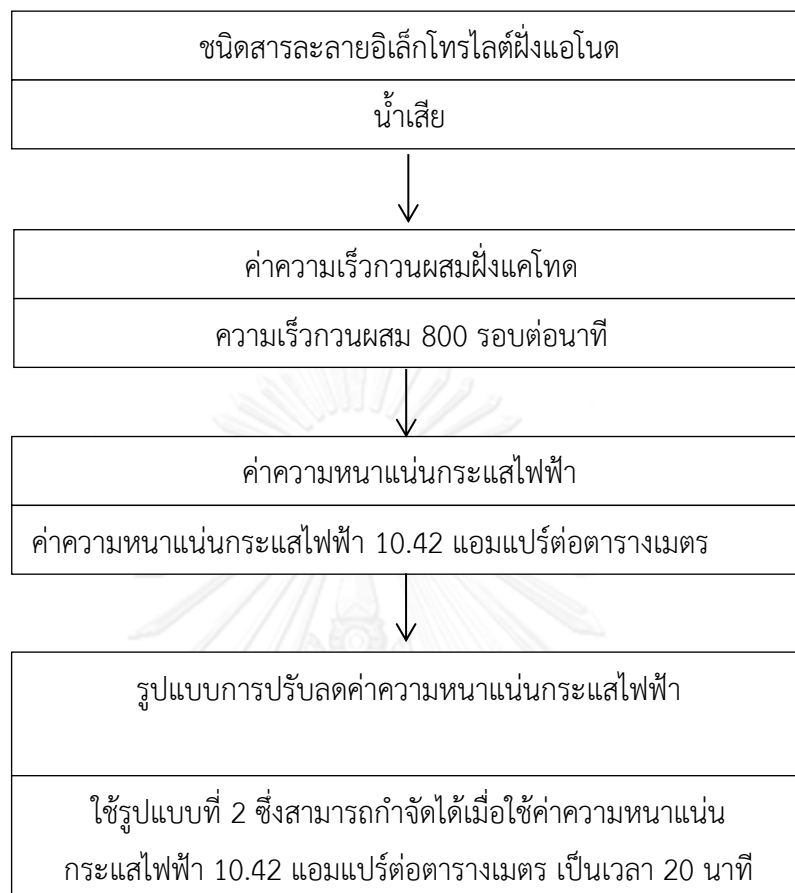
รูปแบบปรับลดค่าความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
แบบที่ 1	35	2.70
แบบที่ 2	20	2.23
แบบที่ 3	30	3.33
แบบที่ 4	35	3.16
แบบที่ 5	25	2.13

ตารางที่ 4.29 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดทองแดง ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน

รูปแบบปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
แบบที่ 1	35	58.57
แบบที่ 2	15	49.40
แบบที่ 3	30	64.76
แบบที่ 4	35	55.45
แบบที่ 5	20	46.32

ตารางที่ 4.30 แสดงประสิทธิภาพเชิงกระแสในการกำจัดโครเมียม ณ เวลาที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลาแตกต่างกัน

รูปแบบปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆ	เวลา (นาที)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
แบบที่ 1	35	54.84
แบบที่ 2	15	49.15
แบบที่ 3	30	63.19
แบบที่ 4	35	53.61
แบบที่ 5	25	36.26



ภาพที่ 4.16 แสดงสถานะที่ดีที่สุดจากการทดลองกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่

ภาพที่ 4.16 แสดงสถานะที่ดีที่สุดจากการทดลองกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยพบว่า ใช้น้ำเสียเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ฝิ่งแอโนด ใช้ความเร็วในการกวนผสมฝิ่งแคโทด 800 รอบต่อนาที ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และใช้รูปแบบที่ 2 (ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็นเวลา 20 นาที) ในการปรับลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลา

4.4 การวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

4.4.1 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย

(ขวลิต สวายนาม, สัมภาษณ์, 12 มิถุนายน 2557)

โรงงานผลิตแม่พิมพ์แห่งนี้ ตั้งอยู่ในนิคมอุตสาหกรรมเวลโกรว์ ทำงาน 6 วันต่ออาทิตย์ มีปริมาณน้ำเสียประมาณ 20 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน หรือมีปริมาณน้ำเสีย 480 ลูกบาศก์เมตรต่อเดือน วิธีบำบัดน้ำเสียของทางโรงงานผลิตแม่พิมพ์จะใช้วิธีการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี พบว่า โรงงานผลิตแม่พิมพ์มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียประมาณ 25,000 ถึง 30,000 บาทต่อเดือน (คิดเป็นค่าใช้จ่ายประมาณ 52 ถึง 63 บาทต่อลูกบาศก์เมตร) ค่าใช้จ่ายนี้เป็นเพียงค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี เช่น โพลีอะลูมิเนียมคลอไรด์ โพลีเมอร์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น ซึ่งเป็นสารเคมีที่ช่วยในการตกตะกอน ยังไม่รวมค่าบำบัดน้ำของทางนิคมประมาณ 8,000 ถึง 10,000 บาทต่อเดือน และค่ากำจัดตะกอน ซึ่งมีปริมาณตะกอนประมาณ 1,100 กิโลกรัม คิดเป็นค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนประมาณ 3,300 บาท เป็นต้น

4.4.2 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียในงานวิจัย

จากผลการทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดนิเกิล ทองแดง และโครเมียมจากน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ โดยการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย จากการทดลองคือ ใช้สารอิเล็กโทรไลต์ผงแอนโอดเป็นน้ำเสีย เพื่อศึกษาหาค่าใช้จ่ายในการกำจัด อาทิ ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า โดยราคาที่สามารถคิดเฉพาะค่าใช้จ่ายในการกำจัด ซึ่งไม่รวมค่าอุปกรณ์ต่างๆ เช่น เครื่องแก้ว เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์หาค่าใช้จ่ายทางไฟฟ้าในการกำจัดนิเกิล ทองแดง และโครเมียมจะคำนวณจากสูตรคำนวณค่าไฟฟ้างานนี้

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= \frac{\text{กระแสไฟฟ้า (A)} \times \text{แรงดันไฟฟ้า (volt)} \times \text{เวลา (hr)}}{\text{ปริมาตรน้ำเสีย (m}^3\text{)}} \\
 &= \frac{0.25 \text{ A} \times 7 \text{ v} \times (20/60) \text{ hr}}{((0.2/1000) \times 1000)} \\
 &= 2.92 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการกำจัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times (\text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\
 &= 2.92 \times 2.5 \\
 &= 7.29 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น วิธีทางเคมีไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าเท่ากับ 7.29 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

ในงานวิจัยนี้ใช้พลังงานไฟฟ้า 2.92 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 7.29 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งหากเทียบกับค่าใช้จ่ายกับทางโรงงานผลิตแม่พิมพ์จะพบว่า มีค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่ามาก ดังแสดงในตารางที่ 4.31 และจากการศึกษางานวิจัยของ Akbal และ Camci (2011) พบว่า ใช้พลังงานไฟฟ้า 10.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 25.18 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ซึ่งมีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 394, 45 และ 44.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.32 จะพบว่า ผลงานวิจัยนี้สามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียได้เป็นจำนวนมาก

ตารางที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์ และงานวิจัยนี้

ที่มา	วิธีการบำบัดน้ำเสีย	ค่าใช้จ่าย (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)
โรงงานผลิตแม่พิมพ์	ตกตะกอนด้วยสารเคมี	52 – 62.5*
งานวิจัยนี้	ไฟฟ้าเคมี	7.29**

* ค่าใช้จ่ายดังกล่าวเป็นค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในการบำบัดน้ำเสียด้วยการตกตะกอนด้วยสารเคมีเท่านั้น ซึ่งยังไม่รวมค่าใช้จ่ายอื่นๆในการกำจัด เช่น การกำจัดตะกอน ค่าบำบัดน้ำของทางนิคมอุตสาหกรรม เป็นต้น

** ค่าใช้จ่ายดังกล่าวเป็นค่าใช้จ่ายด้านค่าไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียด้วยไฟฟ้าเคมีเท่านั้น ซึ่งยังไม่รวมค่าใช้จ่ายอื่นๆในการกำจัด เช่น วัสดุอุปกรณ์ การกำจัดตะกอน เป็นต้น

ตารางที่ 4.32 เปรียบเทียบผลการทดลองจากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่น

งานวิจัย	ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์ (2542)	มะลิ หุ่นสม (2544)	ศรัณญา ศรีชัยรัตน์ (2553)	Hunsom และคณะ (2005)
ลักษณะน้ำ ตัวอย่าง	น้ำเสีย สังเคราะห์	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ	น้ำเสียห้องปฏิบัติการ เคมีวิเคราะห์	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ
องค์ประกอบ โลหะหนักใน ตัวอย่าง	Ni ²⁺ 1000 (มก./ล)	Cu ²⁺ 283 Cr ⁶⁺ 220 Ni ²⁺ 128 (มก./ล)	Ni ²⁺ 1281 (มก./ล)	Cu ²⁺ 931 Cr ⁶⁺ 964 Ni ²⁺ 467.8 (มก./ล)
ชนิดขั้วไฟฟ้า แอโนด	ไทเทเนียม เคลือบ รูทีเนียม ออกไซด์	แพลทินัม	แกรไฟต์	ไทเทเนียมเคลือบ รูทีเนียม ออกไซด์
ชนิดขั้วไฟฟ้า แคโทด	เหล็กกล้า ไร้สนิม	เหล็กกล้า ไร้สนิม	แกรไฟต์	เหล็กกล้า ไร้สนิม
รูปแบบเซลล์ เคมีไฟฟ้า	ไม่มีรอยต่อ	มีรอยต่อ ด้วยเยื่อเลือก ผ่านไอออนลบ	มีรอยต่อด้วยรู้นิม ด้วยด้วยโซเดียมคลอ ไรด์	มีรอยต่อ ด้วยเยื่อเลือกผ่าน ไอออนลบ
ค่าความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า	Ni ²⁺ 140 (A/m ²)	Cu ²⁺ 10 Cr ⁶⁺ 90 Ni ²⁺ 90 (A/m ²)	Ni ²⁺ 140 (A/m ²)	Cu ²⁺ 10 Cr ⁶⁺ 90 Ni ²⁺ 90 (A/m ²)
ร้อยละการ กำจัด	Ni ²⁺ 90 (%)	Cu ²⁺ 98.9 Cr ⁶⁺ 99 Ni ²⁺ 99 (%)	Ni ²⁺ 99 (%)	Cu ²⁺ 99.9 Cr ⁶⁺ 99.9 Ni ²⁺ 99.9 (%)
เวลาที่ใช้การ กำจัด	8.15 (ชม.)	Cu ²⁺ 5 Cr ⁶⁺ 13 Ni ²⁺ 13 (ชม.)	60 (นาที)	Cu ²⁺ 12 Cr ⁶⁺ 15 Ni ²⁺ 15 (ชม.)
ค่าใช้จ่ายใน การบำบัด (บาท/ลบ.ม.)	-	-	199	174

ตารางที่ 4.32 เปรียบเทียบผลการทดลองจากงานวิจัยนี้กับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่น (ต่อ)

งานวิจัย	Akbal และ Camci (2011)	Konstantinos และคณะ (2011)	Bassam และคณะ (2012)	งานวิจัยนี้ (2557)
ลักษณะน้ำตัวอย่าง	น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ	น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ	น้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสียโรงงานผลิตแม่พิมพ์
องค์ประกอบโลหะหนักในตัวอย่าง	Cu ²⁺ 45 Cr ⁶⁺ 44.5 Ni ²⁺ 394 (มก./ล)	Ni = 376 Cu = 283 Zn = 75 Cr = 167 (มก./ล)	Cu = 250 Ni = 250 Zn = 250 Mn = 250 (มก./ล)	Cu ²⁺ 200 Cr ⁶⁺ 101 Ni ²⁺ 13 (มก./ล)
ชนิดขั้วไฟฟ้าแอโนด	เหล็ก	อะลูมิเนียม	เหล็ก	แกรไฟต์
ชนิดขั้วไฟฟ้าแคโทด	อะลูมิเนียม	อะลูมิเนียม	เหล็ก	แกรไฟต์
รูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้า	ไม่มีรอยต่อ	-	ไม่มีรอยต่อ	มีรอยต่อด้วย วินอิมด้วยด้วย โซเดียมคลอไรด์
ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	Cu ²⁺ 100 Cr ⁶⁺ 100 Ni ²⁺ 100 (A/m ²)	Ni 40 mA/cm ² Cu 40 mA/cm ² Zn 40 mA/cm ² Cr 40 mA/cm ²	25 mA/cm ²	10 A/m ²
ร้อยละการกำจัด	Cu ²⁺ 100 Cr ⁶⁺ 100 Ni ²⁺ 100 (%)	Ni 100 % Cu 100 % Zn 100 % Cr 100 %	Cu >96 % Ni >96 % Zn >96 % Mn >72.6 %	Cu ²⁺ 99.9 % Cr ⁶⁺ 99.9 % Ni ²⁺ 99.9 %
เวลาที่ใช้การกำจัด	20 (นาที)	60 นาที	20 นาที	20 นาที
ค่าใช้จ่ายในการบำบัด (บาท/ลบ.ม.)	25	103	123	7

จากตารางที่ 4.32 งานวิจัยนี้เมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นจะพบว่าใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่น้อยกว่างานวิจัยอื่น ทำให้มีค่าใช้จ่ายด้านกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า แต่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะแต่ละชนิดจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานเช่นเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้เมื่อเทียบกับ ศรีณัฐ ศรีธัญรัตน์ (2553) จะพบว่า งานวิจัยนี้ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่าลดลงจาก 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเป็น 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลากำจัดที่น้อยกว่าจาก 60 นาที เป็น 20 นาที และค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่ามากจาก 199 บาทเป็น 7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนหนึ่งอาจมาจากความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีค่าแตกต่างกันจึงทำให้มีการใช้กระแสไฟฟ้าในปริมาณมาก และใช้ระยะเวลาในการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Konstantinos และคณะ (2011) ที่ใช้ระยะเวลาในการกำจัด 60 นาที และใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า 0.041 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลิตร หรือ 41 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งคิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าประมาณ 103 บาทต่อลูกบาศก์เมตร แต่เมื่อนำงานวิจัยนี้เทียบกับ Akbal and Camci (2011) ซึ่งมีความเข้มข้นโลหะหนักที่ใกล้เคียงกันจะพบว่า ใช้ระยะเวลาในการกำจัดโลหะหนักเท่ากัน โดยใช้ระยะเวลาในการกำจัดทั้งหมด 20 นาที และให้ประสิทธิภาพในการกำจัดใกล้เคียงกันที่มากกว่าร้อยละ 99.90 โดยจากงานวิจัยจะใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 10.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าประมาณ 20 บาท ซึ่งมากกว่างานวิจัยนี้ที่มีค่าใช้จ่าย 7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อนำงานวิจัยนี้เทียบกับ Bassam และคณะ (2012) จะพบว่า ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดที่มากกว่า ซึ่งจากงานวิจัยพบว่า มีร้อยละการกำจัดมากกว่า 96 แต่งานวิจัยนี้มีร้อยละการกำจัดมากกว่า 99.90 โดยใช้ระยะเวลาที่เท่ากันที่นาที่ที่ 20 โดยจากงานวิจัยจะใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 49 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าประมาณ 123 บาท ซึ่งมากกว่างานวิจัยนี้ที่มีค่าใช้จ่ายเพียง 7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร เมื่อนำงานวิจัยนี้เทียบกับ Hunsom และคณะ (2005) จะพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดใกล้เคียง คือประมาณร้อยละ 99.90 ในงานวิจัยนี้ใช้กระแสไฟฟ้าน้อยกว่า และใช้ระยะเวลาในการกำจัดน้อยกว่าส่วนหนึ่งอาจมาจากความเข้มข้นของโลหะหนักที่แตกต่างกัน พบว่า ค่าใช้จ่ายจากงานวิจัยจะอยู่ที่ประมาณ 5.43 ดอลลาร์สหรัฐต่อลูกบาศก์เมตร หรือประมาณ 174 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมากกว่างานวิจัยนี้ที่มีค่าใช้จ่าย 7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้น จากงานวิจัยจะพบว่า งานวิจัยนี้ใช้ระยะเวลาในการกำจัดที่น้อยกว่าหรือเท่ากับงานวิจัยอื่น แต่มีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่ามาก โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่มากกว่าหรือเท่ากับงานวิจัยอื่น ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกำจัดมากกว่า 99.90

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแม่พิมพ์ ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเท่ากับ 13, 200 และ 101 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย การทดลองทำการศึกษาปัจจัยต่างๆที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ซึ่งได้แก่ 1) ศึกษาหาชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม 2) ศึกษาหาความเร็วกวนผสมฝังขั้วไฟฟ้าแคโทดที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม 3) ศึกษาหาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม 4) ศึกษาหาระยะเวลาปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นโซเดียมซัลเฟต โซเดียมไนเตรท โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ น้ำเสีย และ น้ำประปา พบว่า ให้ผลการทดลองไม่แตกต่างกัน เราจึงสามารถใช้น้ำเสียเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนดแทนการใช้สารเคมี ซึ่งสามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ได้ภายในระยะเวลา 59, 58 และ 60 นาที โดยมีร้อยละในการกำจัด 93.75, 99.30 และ มากกว่า 99.93 ตามลำดับ

2. เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝังขั้วไฟฟ้าแคโทดเป็น 200, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 รอบต่อนาที พบว่า ที่ค่าความเร็วกวนผสม 800 รอบต่อนาที สามารถกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมได้เร็วที่สุด โดยใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียมเท่ากับ 49, 45 และ 48 นาที โดยมีร้อยละในการกำจัด 93.50, 99.39 และ 99.75 ตามลำดับ

3. เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17, 6.25, 8.33 และ 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่า ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ใช้ระยะเวลาน้อยที่สุดในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ที่นาทีที่ 20, 19 และ 20 ตามลำดับ โดยมีร้อยละในการกำจัด 96.04, มากกว่า 99.10 และ มากกว่า 99.94 ตามลำดับ

4. เมื่อปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามระยะเวลา พบว่า การปรับลดกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 2 ใช้ระยะเวลาน้อยที่สุดและมีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับรูปแบบอื่น โดยใช้ระยะเวลาในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ที่นาทีที่ 20, 19 และ 20 ตามลำดับ โดยมีร้อยละการกำจัด 98.58, 99.00 และ 99.94 และมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า 7.29 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เสนอให้มีการศึกษาโดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่ ต่อเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายเพื่อพัฒนาหรือศึกษาข้อแตกต่าง
2. เสนอให้มีการศึกษาโดยใช้วิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าให้คงที่เพื่อพัฒนาหรือศึกษาข้อแตกต่าง
3. เสนอให้มีการกำจัด หรือตรวจวัดไอออนตัวที่รบกวนการรับอิเล็กตรอนของโลหะที่จะนำมาวิเคราะห์ เช่น ซัลเฟต เนื่องจากซัลเฟตมีค่าศักย์ไฟฟ้ารีดิกชันสูง ซึ่งอาจสูงกว่าโลหะบางชนิด และเมื่อซัลเฟตเกิดการรับอิเล็กตรอนจะทำให้เกิดเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์จะรบกวนการเกาะของโลหะบริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าแคโทด
4. เสนอให้มีการติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด เนื่องจากน้ำเสียเมื่อมีการให้อิเล็กตรอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสีย หากน้ำเสียมีคลอไรด์ คลอไรด์จะเป็นตัวให้อิเล็กตรอน แต่เมื่อคลอไรด์มีปริมาณลดลง คาดว่าตัวที่ให้อิเล็กตรอนอาจจะเป็นน้ำ ซึ่งเมื่อน้ำให้อิเล็กตรอนย่อมทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดอย่างแน่นอน
5. เสนอให้มีการศึกษาความเหมาะสมของปริมาตรน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดและฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดที่แตกต่างกัน เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดน้ำเสียฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดคาดว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด ซึ่งควรหาค่าที่เหมาะสม เช่น ปริมาตรน้ำเสียฝั่งแอโนด และฝั่งแคโทดที่เท่ากัน ยกตัวอย่างการใช้ปริมาตรน้ำเสียฝั่งแอโนด และฝั่งแคโทด 200 มิลลิลิตร
6. เสนอให้มีการศึกษาประสิทธิภาพเมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบไม่มีรอยต่อของสารละลายที่แตกต่างกัน เช่น อาจเปรียบเทียบกับแบบแผ่นแก้วรูพรุน หรือแบบอื่นๆ

5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาแนวทางในการกำจัดนิกเกิล ทองแดง และโครเมียม ซึ่งจากงานวิจัยนี้ สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปปรับใช้เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์กับโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้การขยายสเกล (Scale up) สิ่งที่ต้องทราบ ก็คือ ค่ากระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่หน้าตัดสารละลาย (Current density) และพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell volume ratio) โดยจะใช้ค่า Current density ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม และใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายให้มีค่าเท่ากัน (Cameselle และคณะ, 2005) ยกตัวอย่างเช่น โรงงานผลิตแม่พิมพ์มีปริมาณน้ำเสีย วันละ 20 ลูกบาศก์เมตร มีระยะเวลาเก็บ 20 นาที

คำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ขนาดถังบำบัด} &= 20 \text{ นาที} \times \frac{1 \text{ ชม.}}{60 \text{ นาที}} \times \frac{1 \text{ วัน}}{24 \text{ ชม.}} \times \frac{20 \text{ ลบ.ม.}}{1 \text{ วัน}} \\ &= 0.278 \text{ ลบ.ม.} \end{aligned}$$

ในงานวิจัยนี้มีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell Volume Ratio; A/V) ฝั่ง
ขั้วไฟฟ้าแคโทดเท่ากับ 120 ตร.ม./ลบ.ม.

$$A/V = 120 \text{ ตร.ม./ลบ.ม.}$$

$$A/0.278 \text{ m}^3 = 120 \text{ ตร.ม./ลบ.ม.}$$

$$A = 33.36 \text{ ตร.ม.}$$

$$\text{ขนาดขั้วไฟฟ้า (A)} = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น}$$

$$= 1 \text{ ม.} \times 2 \text{ ม.} \times 2 \times 10 \text{ แผ่น}$$

$$= 40 \text{ ตร.ม.}$$

$$A/V = 40 \text{ ตร.ม./0.278 ลบ.ม.}$$

$$= 144 \text{ ตร.ม./ลบ.ม.}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้า (A)} = \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m}^2\text{)} \times \text{พื้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด (m}^2\text{)}$$

$$= 10.42 \text{ แอมแปร์/ตร.ม.} \times 40 \text{ ตร.ม.}$$

$$= 416.8 \text{ แอมแปร์}$$

ในการออกแบบสำหรับโรงงานผลิตแม่พิมพ์โดยใช้ถังบำบัดขนาด 0.278 ลูกบาศก์เมตร ใช้
ขั้วไฟฟ้า ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 2 เมตร จำนวน 10 แผ่น และใช้กระแสไฟฟ้า 416.8 แอมแปร์

รายการคำนวณนี้เป็นเพียงการยกตัวอย่าง ในการใช้จริงควรคำนวณและออกแบบโดย
คำนึงถึงหลายปัจจัย อาทิเช่น ขนาดถัง ระยะเวลาที่เก็บ ขนาดของขั้วไฟฟ้า และอื่นๆ

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษ. สมาคมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. .
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.
- คงศักดิ์ โชติกุลสุวรรณ. 2545. การแยกสังกะสีจากน้ำเสียโรงชุบสังกะสีชนิดไซยาไนด์ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- จิราพร ชูบัณฑิต. ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมี. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <https://sites.google.com/site/itg65620114132/swn-prakxb-khxng-sell-fifa-khemi>. [2557, กรกฎาคม 23]
- ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์. 2542. ผลของตัวแปรต่ออิเล็กโทรดโพสิชันของนิกเกิล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชวลิต สวายนาม. 2557. สัมภาษณ์. 12 มิถุนายน 2557.
- ตติ จิตรู. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดเฮกซะวาเลนท์โครเมียมโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีในระบบที่ละเทและต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปทุมทิพย์ เสมอภาค. 2550. การขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบผ้าคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริเมฆ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- พิชิต ลีกุล. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2552. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ภัคพงศ์ เจริญจิตร. 2546. การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียซีโอดีด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- มันสิน ตันทุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลาวัลย์ ศรีพงศ์. 2543. การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ศรีณัฐ ศรีธัญรัตน์. 2553. การกำจัดนิเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศรายุทธ ลาภพูนผล. 2549. การกำจัดโครเมียมโดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. 2548. เคมีวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สันหัตต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2549. ระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.
- หทัยทัต ชื้อสุวรรณ. 2544. การนำโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2539. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Abdo, M. S. and Sedahmed, G. H. 1991. A new technique for removing hexavalent Chromium from wastewater and energy generation via galvanic reduction with scap iron. World Congress of Chemical Engineering. 16-21: 10-14.
- Akbal, F. and Camci, S. 2011. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. Desalination. 269: 214-222.
- Bassam, A., Yusuf, Y. and Savas, K. 2012. Electrocoagulation of heavy metals containing model wastewater using monopolar iron electrodes. Separation and Purification Technology. 86(2012): 248-254.
- 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.
- Chen, G. 2004. Electrocoagulation technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38: 11-44.
- Chen, P. J. and Lim, L. L. 2005. Recovery of precious metals by an electrochemical deposition method. Chemosphere. 60: 1384-1392.
- Emamjomeh, M. M. and Sivakumar, M. 2009. Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. Journal of environmental management. 90: 1204-1212.
- Freeman, H. M. 1989. Handbook of hazardous waste treatment and disposal. USA: McGraw Hill Book.
- Friedrich, H. 1962. Ion Exchange. New York: McGraw-Hill.
- Hanay, O. and Hasar, H. 2011. Effect of anions on removing Cu^{2+} , Mn^{2+} and Zn^{2+} in electrocoagulation process using aluminum electrodes. Journal of Hazardous Materials. 189: 572-576.
- Hunsom, M., Pruksathorn, K., Damronglerd, S., Vergnes, H. and Duverneuil, P. 2005. Electrochemical treatment of heavy metals (Cu^{2+} , Cr^{6+} , Ni^{2+}) from industrial effluent and modeling of copper reduction. Water Research. 39(4): 610-616.
- Konstantinos, D., Achilleas, C. and Evgenia, V. 2011. Removal of nickel, copper, zinc and chromium from synthetic and industrial wastewater by electrocoagulation. International journal of environmental sciences. 1(5): 697-710.
- Liqing, L., Hong, Z., Zhanfang, C. and Lu, Y. 2011. Recovery of copper(II) and nickel(II) from plating wastewater by solvent extraction. Journal of chemical engineering. 19(6): 926-930.

- Metcalf and Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F. L. and Stensel, H. D. 2004. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. USA: McGraw-Hill Education.
- Mohanty, U. S., Tripathy, B. C., Singh, P. and Das, S. C. 2002. Effect of Cr^{3+} on the electrodeposition of nickel from acidic sulfate solutions. Minerals Engineering. 15: 531-537.
- Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmes, M., Parga, J. and Cocke, D. L. 2004. Fundamentals present and future perspective of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. B114: 189-199.
- Ohsasa, K., Nakakura, H. and Sambuichi, M. 1991. Development of electroflotation technique using sacrificial electrodes for treatment of oily wastewater. World Congress of Chemical Engineering. 16-21: 1-2.
- 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.
- Oztekim, Y. and Yazicigil, Z. 2006. Recovery of metals from complexed solution by electrodeposition. Desalination. 190: 79-88.
- Patterson, J. W. 1985. Industrial wastewater treatment technology. Boston: Butterworth Publisher.
- Peng, C., Liu, Y., Bi, J., Xu, H. and Ahmed, A. 2011. Recovery of copper and water from copper-electroplating wastewater by the combination process of electrolysis and electrodialysis. Journal of Hazardous Materials. 189: 814-820.
- Pretorius, W., Johannes, W. and Lempert, G. 1991. Electrolytic Iron flocculants production with bipolar electrode in series arrangement. Water SA. 17: 133-138.
- Stojan, D. 2010. Electrodeposition: Theory and Practice. New York: Springer.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมซัลเฟตเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.34	15.75	15.95	15.39	15.70	0.28	0.00	0.00
5	3.44	15.65	15.68	15.43	15.59	0.14	0.70	0.24
10	3.69	15.36	15.76	15.69	15.60	0.21	0.59	0.10
20	4.17	14.41	15.64	14.56	14.87	0.67	5.27	0.45
30	4.47	14.45	15.46	14.39	14.77	0.60	5.92	0.34
40	4.65	13.11	14.68	13.24	13.68	0.87	12.87	0.55
60	8.55	0.86	11.34*	0.32	0.59	-	96.24	2.76
80	10.96	0.82	0.96	0.16	0.65	0.43	95.88	2.06
90	11.36	0.81	0.94	0.22	0.66	0.38	95.82	1.83
100	11.57	0.75	0.96	0.19	0.63	0.40	95.97	1.65
120	11.90	0.88	1.15	0.18	0.74	0.50	95.31	1.37

เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมซัลเฟต เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.34	215.45	215.16	210.83	213.81	2.59	0.00	0.00
5	3.44	211.08	223.45	207.88	214.14	8.22	-0.15	-0.65
10	3.69	203.19	215.30	202.79	207.09	7.11	3.14	6.80
20	4.17	155.31	146.98	146.23	149.51	5.04	30.08	32.55
30	4.47	85.84	112.76	103.12	100.57	13.64	52.96	38.21
40	4.65	38.07	60.90	45.86	48.28	11.61	77.42	41.90
60	8.55	ND	9.46*	0.02	0.02	-	>99.99	36.07
80	10.96	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	27.06
90	11.36	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	24.05
100	11.57	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	21.65
120	11.90	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	18.04

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และ เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมซัลเฟต เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.34	105.13	108.93	102.67	105.58	3.15	0.00	0.00
5	3.44	97.86	106.22	108.09	104.06	5.45	1.44	5.64
10	3.69	99.25	106.43	98.32	101.33	4.44	4.02	7.88
20	4.17	78.91	99.03	85.47	87.80	10.26	16.83	16.49
30	4.47	61.49	104.26*	70.88	66.19	-	37.31	24.37
40	4.65	38.14	87.18*	45.73	41.94	-	60.28	29.53
60	8.55	ND	32.26*	ND	ND	-	>99.96	32.64
80	10.96	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	24.48
90	11.36	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	21.76
100	11.57	ND	ND	ND	0.06	-	>99.94	19.58
120	11.90	ND	ND	ND	0.06	-	>99.94	16.32

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมไนเตรทเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.38	16.43	15.75	15.87	16.02	0.36	0.00	0.00
5	3.54	16.45	15.66	15.94	16.02	0.40	0.00	0.00
10	3.78	15.92	16.12	15.39	15.81	0.38	1.29	0.23
20	4.19	16.30	15.67	15.89	15.95	0.32	0.40	0.03
30	4.45	16.03	15.03	15.32	15.46	0.51	3.48	0.20
40	4.58	13.49	13.31	13.71	13.50	0.20	15.69	0.69
60	7.70	4.52*	0.33	0.38	0.36	-	97.78	2.86
80	10.87	0.35	0.23	0.25	0.28	0.06	98.27	2.16
90	11.29	0.22	0.27	0.23	0.24	0.03	98.50	1.92
100	11.55	0.35	0.26	0.19	0.27	0.08	98.34	1.73
120	11.87	0.24	0.31	0.15	0.23	0.08	98.54	1.44

เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมไนเตรท เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.38	214.34	217.92	210.10	214.12	3.91	0.00	0.00
5	3.54	217.88	219.46	192.47	209.94	15.15	1.95	8.47
10	3.78	204.98	211.47	208.35	208.27	3.25	2.73	5.93
20	4.19	191.55	170.91	159.29	173.92	16.34	18.78	20.35
30	4.45	156.48	122.73	115.22	131.48	21.98	38.60	27.89
40	4.58	91.88	65.75	64.37	74.00	15.50	65.44	35.46
60	7.70	0.20	0.05	0.02	0.09	0.10	99.96	36.11
80	10.87	ND	0.05	ND	0.05	-	>99.98	27.09
90	11.29	0.02	ND	0.05	0.04	-	>99.98	24.08
100	11.55	0.02	0.05	0.02	0.03	0.02	99.99	21.67
120	11.87	ND	0.02	0.05	0.04	-	>99.98	18.06

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมไนเตรท เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.38	97.61	97.47	102.73	99.27	3.00	0.00	0.00
5	3.54	103.11	105.76	101.45	103.44	2.17	-4.20	-15.48
10	3.78	95.26	113.81	108.77	105.95	9.59	-6.73	-12.39
20	4.19	98.49	90.36	85.60	91.48	6.52	7.84	7.23
30	4.45	89.35	66.08	67.21	74.21	13.12	25.24	15.50
40	4.58	77.44*	42.61	46.43	44.52	-	55.15	25.40
60	7.70	7.82*	ND	ND	ND	-	>99.96	30.69
80	10.87	ND	ND	0.06	0.06	-	>99.94	23.02
90	11.29	ND	0.06	0.06	0.06	-	>99.94	20.46
100	11.55	ND	ND	0.06	0.06	-	>99.94	18.41
120	11.87	ND	ND	0.06	0.06	-	>99.94	15.34

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และ เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.95	14.87	15.89	16.48	15.75	0.81	0.00	0.00
5	3.17	14.48	16.30	16.75	15.84	1.20	-0.61	-0.21
10	3.44	14.56	15.64	15.92	15.37	0.72	2.37	0.41
20	3.87	14.03	15.20	15.86	15.03	0.93	4.55	0.39
30	4.11	13.11	14.45	14.32	13.96	0.74	11.35	0.65
40	4.36	11.19	12.52	11.30	11.67	0.74	25.89	1.12
60	8.92	0.23	0.58	0.69	0.50	0.24	96.82	2.79
80	11.01	0.29	0.56	0.54	0.46	0.15	97.06	2.09
90	11.39	0.23	0.54	0.61	0.46	0.20	97.08	1.86

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.95	209.51	197.77	192.67	199.98	8.64	0.00	0.00
5	3.17	197.43	181.17	174.02	184.21	12.00	7.89	31.94
10	3.44	188.24	169.43	152.25	169.97	18.00	15.01	30.38
20	3.87	156.88	141.13	94.77*	149.01	-	25.49	25.80
30	4.11	115.08	92.41	45.23*	103.75	-	48.12	32.48
40	4.36	54.45	48.66	10.89*	51.56	-	74.22	37.57
60	8.92	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	33.74
80	11.01	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	25.31
90	11.39	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	22.49

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.95	100.13	96.39	94.53	97.02	2.85	0.00	0.00
5	3.17	97.45	95.02	92.87	95.11	2.29	1.96	7.06
10	3.44	96.46	91.35	89.08	92.30	3.78	4.87	8.76
20	3.87	89.16	83.64	75.22	82.67	7.02	14.78	13.31
30	4.11	76.48	66.30	56.44	66.41	10.02	31.55	18.94
40	4.36	52.35	47.18	32.74	44.09	10.16	54.55	24.56
60	8.92	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	30.00
80	11.01	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	22.50
90	11.39	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	20.00

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้น้ำเสียเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.99	15.12	15.25	15.64	15.34	0.27	0.00	0.00
5	3.50	14.76	14.86	14.67	14.76	0.10	3.74	1.26
10	3.76	14.65	14.73	14.52	14.63	0.11	4.59	0.77
20	3.87	13.32	14.68	13.48	13.83	0.74	9.85	0.83
30	4.03	12.46	13.03	12.91	12.80	0.30	16.54	0.93
40	4.57	9.56	10.43	10.20	10.06	0.45	34.38	1.45
60	9.97	0.50	0.50	0.60	0.53	0.06	96.52	2.70
80	11.09	0.50	0.50	0.50	0.50	0.00	96.74	2.03
90	11.40	0.50	0.05	0.60	0.53	0.06	96.52	1.80

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้น้ำเสียเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.99	195.40	196.24	196.43	196.02	0.55	0.00	0.00
5	3.50	184.14	181.44	172.22	179.27	6.25	8.55	33.93
10	3.76	173.66	159.13	135.49	156.09	19.27	20.37	40.42
20	3.87	116.57	89.15	88.31	98.01	16.08	50.00	49.61
30	4.03	55.18	45.27	41.35	47.27	7.13	75.89	50.20
40	4.57	3.03*	18.10	12.06	15.08	-	92.31	45.80
60	9.97	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	33.07
80	11.09	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	24.81
90	11.40	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	22.05

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้น้ำเสียเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.99	96.12	98.76	98.13	97.67	1.38	0.00	0.00
5	3.50	89.56	93.04	92.15	91.58	1.81	6.23	22.59
10	3.76	77.74	91.46	87.22	85.47	7.02	12.49	22.64
20	3.87	39.91*	85.87	75.43	80.65	-	17.43	15.79
30	4.03	6.98*	71.49	49.52	60.51	-	38.05	22.99
40	4.57	ND*	42.18	28.67	35.43	-	63.73	28.88
60	9.97	0.07	ND	ND	0.07	-	>99.93	30.19
80	11.09	0.07	ND	ND	0.07	-	>99.93	22.64
90	11.40	0.05	ND	ND	0.05	-	>99.95	20.13

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้น้ำประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.73	15.65	16.13	16.32	16.03	0.35	0.00	0.00
5	2.88	15.81	15.69	15.78	15.76	0.06	1.70	0.60
10	3.16	15.19	16.31	16.48	15.99	0.70	0.25	0.04
20	3.42	15.34	15.09	14.48	14.97	0.44	6.63	0.58
30	3.93	14.20	13.87	13.22	13.76	0.50	14.16	0.83
40	4.42	12.11	12.68	9.35	11.38	1.78	29.02	1.28
60	7.46	0.56	0.38	0.63	0.52	0.13	96.74	2.83
80	10.95	0.61	0.31	0.59	0.50	0.17	96.86	2.13
90	11.36	0.59	0.29	0.62	0.50	0.18	96.88	1.89

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้น้ำประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.73	198.43	211.61	195.88	201.97	8.44	0.00	0.00
5	2.88	188.08	211.13	183.67	194.29	14.75	3.80	15.55
10	3.16	174.86	222.43*	158.35	166.61	-	17.51	35.81
20	3.42	111.19	172.31*	87.86	99.53	-	50.72	51.86
30	3.93	61.73	130.44*	39.12	50.43	-	75.03	51.14
40	4.42	31.11	70.08	4.23*	50.60	-	74.95	38.31
60	7.46	ND	0.09	ND	0.09	-	>99.96	34.06
80	10.95	ND	0.05	ND	0.05	-	>99.98	25.55
90	11.36	ND	0.05	ND	0.05	-	>99.98	22.71

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้น้ำประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.73	96.25	102.23	98.66	99.05	3.01	0.00	0.00
5	2.88	97.08	100.28	98.43	98.60	1.61	0.45	1.67
10	3.16	95.22	108.40	95.32	99.65	7.58	-0.61	-1.11
20	3.42	92.91	92.58	87.23	90.91	3.19	8.22	7.55
30	3.93	87.07	80.42	70.66	79.38	8.25	19.85	12.16
40	4.42	62.45	56.11	28.84*	59.28	-	40.15	18.45
60	7.46	ND	0.07	ND	0.07	-	>99.93	30.62
80	10.95	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	22.97
90	11.36	ND	0.07	ND	0.07	-	>99.93	20.42

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสม ผังขั้วไฟฟ้าแคโทด 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.26	14.91	14.36	16.73	15.33	1.24	0.00	0.00
10	3.87	14.12	13.76	14.32	14.07	0.28	8.26	1.39
20	4.23	13.66	13.73	12.59	13.33	0.64	13.09	1.10
30	4.47	12.02	11.72	10.49	11.41	0.81	25.59	1.43
40	4.75	9.66	9.12	8.25	9.01	0.71	41.24	1.73
50	8.14	0.58	0.41	0.42	0.47	0.10	96.93	3.26
60	10.47	0.43	0.41	0.39	0.41	0.02	97.33	2.73
70	11.06	0.37	0.4	0.42	0.40	0.03	97.41	2.34
80	11.39	0.44	0.44	0.43	0.44	0.01	97.15	2.04

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.26	198.86	198.22	197.01	198.03	0.94	0.00	0.00
10	3.87	174.26	168.34	161.72	168.11	6.27	15.11	30.29
20	4.23	139.55	130.16	117.46	129.06	11.09	34.83	34.91
30	4.47	83.08	78.45	62.66	74.73	10.71	62.26	41.61
40	4.75	30.64	30.13	11.28*	30.39	-	84.66	42.43
50	8.14	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	99.97	40.09
60	10.47	0.02	0.05	ND	0.04	-	>99.98	33.41
70	11.06	ND	0.02	ND	0.02	-	>99.99	28.64
80	11.39	0.08	0.02	ND	0.05	-	>99.98	25.05

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 200 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.26	101.12	102.49	101.82	101.81	0.69	0.00	0.00
10	3.87	99.92	100.15	88.49	96.19	6.67	5.52	10.44
20	4.23	84.16	83.52	70.07	79.25	7.96	22.16	20.93
30	4.47	60.35	57.26	41.49	53.03	10.12	47.91	30.18
40	4.75	28.54	25.09	9.40*	26.82	-	73.66	34.80
50	8.14	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	37.78
60	10.47	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	31.48
70	11.06	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	26.98
80	11.39	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	23.61

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.19 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสม
ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 400 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)			ประสิทธิ ภาพกำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิงกระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
0	3.28	14.12	13.86	13.99	0.00	0.00
10	3.80	14.08	13.88	13.98	0.07	0.01
20	4.05	12.44	13.80	13.12	6.22	0.48
30	4.19	12.11	11.68	11.90	14.97	0.77
40	4.54	9.72	8.67	9.20	34.27	1.31
45	4.69	9.45	8.39	8.92	36.24	1.23
50	5.16	6.81	6.2	6.51	53.50	1.64
60	9.45	0.22	0.27	0.25	98.25	2.51
70	10.59	0.24	0.27	0.26	98.18	2.15



ตารางที่ ก.20 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 400 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)			ประสิทธิ ภาพกำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิงกระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
0	3.28	197.23	194.76	196.00	0.00	0.00
10	3.80	163.51	165.86	164.69	15.97	31.70
20	4.05	115.13	113.08	114.11	41.78	41.45
30	4.19	73.86	69.45	71.66	63.44	41.96
40	4.54	42.88	39.20	41.04	79.06	39.22
45	4.69	20.43	19.56	20.00	89.80	39.60
50	5.16	2.21	1.63	1.92	99.02	39.30
60	9.45	ND	ND	ND	>99.99	33.07
70	10.59	ND	ND	ND	>99.99	28.34

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.21 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 400 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)			ประสิทธิ ภาพกำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิงกระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย		
0	3.28	108.37	107.71	108.04	0.00	0.00
10	3.80	103.35	103.66	103.51	4.20	8.42
20	4.05	97.12	98.06	97.59	9.67	9.70
30	4.19	84.16	82.68	83.42	22.79	15.23
40	4.54	43.91	52.21	48.06	55.52	27.83
45	4.69	32.49	23.92	28.21	73.89	32.93
50	5.16	14.44	15.03	14.74	86.36	34.63
60	9.45	ND	ND	ND	>99.96	33.41
70	10.59	ND	ND	ND	>99.96	28.63

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร



ตารางที่ ก.22 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสม
ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 600 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.38	12.12	12.34	11.66	12.04	0.35	0.00	0.00
10	4.18	11.48	11.8	11.33	11.54	0.24	4.18	0.55
20	4.35	11.15	11.73	11.41	11.43	0.29	5.07	0.33
30	4.48	10.13	11.65	10.38	10.72	0.82	10.96	0.48
40	4.86	7.68	7.41	7.39	7.49	0.16	37.76	1.25
45	5.53	3.27	2.90	2.82	3.00	0.24	75.11	2.20
50	8.51	0.5	0.5	0.5	0.50	0.00	95.85	2.53
60	10.26	0.5	0.5	0.5	0.50	0.00	95.85	2.11
70	11.29	0.4	0.5	0.5	0.47	0.06	96.12	1.81

ตารางที่ ก.23 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 600 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.38	205.19	203.01	209.86	206.02	3.50	0.00	0.00
10	4.18	172.68	178.31	163.11	171.37	7.68	16.82	35.08
20	4.35	115.82	114.40	129.63	119.95	8.41	41.78	43.57
30	4.48	55.21	64.72	49.25	56.39	7.80	72.63	50.49
40	4.86	9.13	9.89	7.09	8.70	1.45	95.78	49.94
45	5.53	1.12	1.86	0.57	1.18	0.65	99.43	46.08
50	8.51	0.1	0.05	0.05	0.07	0.03	99.97	41.70
60	10.26	0.1	0.05	0.01	0.05	0.05	99.97	34.75
70	11.29	0.01	ND	0.01	0.01	-	>99.99	29.79

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.24 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 600 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.38	96.46	97.52	96.98	96.99	0.53	0.00	0.00
10	4.18	90.35	94.19	90.73	91.76	2.12	5.39	9.71
20	4.35	75.16	79.08	79.46	77.90	2.38	19.68	17.71
30	4.48	58.51	55.11	58.06	57.23	1.85	41.00	24.60
40	4.86	26.87	30.47	26.30	27.88	2.26	71.25	32.06
45	5.53	6.99	8.33	3.61	6.31	2.43	93.49	37.40
50	8.51	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	35.98
60	10.26	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	29.99
70	11.29	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	25.70

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.25 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสม ผังขั้วไฟฟ้าแคโทด 800 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.22	14.75	13.3	14.32	14.12	0.74	0.00	0.00
10	3.97	13.86	13.51	14.59	13.99	0.55	0.97	0.15
20	4.23	13.68	12.23	13.76	13.22	0.86	6.37	0.49
30	4.40	11.76	11.29	11.88	11.64	0.31	17.56	0.91
40	4.59	9.35	9.66	8.91	9.31	0.38	34.10	1.32
45	5.50	4.68	2.31	0.36*	3.50	-	75.25	2.59
50	7.90	0.37	0.31	0.28	0.32	0.05	97.73	3.03
60	10.33	0.29	0.28	0.34	0.30	0.03	97.85	2.52
70	11.00	0.31	0.26	0.31	0.29	0.03	97.92	2.17

เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.26 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วหมุนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 800 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.22	193.11	195.28	196.76	195.05	1.84	0.00	0.00
10	3.97	161.08	166.41	167.86	165.12	3.57	15.35	30.30
20	4.23	108.23	123.71	114.15	115.36	7.81	40.85	40.34
30	4.40	53.26	61.59	54.41	56.42	4.51	71.07	46.78
40	4.59	11.11	11.78	2.34*	11.45	-	94.13	46.47
45	5.50	1.12	1.27	0.02*	1.20	-	99.39	43.61
50	7.90	ND	ND	0.02	0.02	-	>99.99	39.49
60	10.33	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	32.91
70	11.00	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	28.21

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.27 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 800 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.22	101.84	103.29	103.34	102.82	0.85	0.00	0.00
10	3.97	91.68	90.97	82.16	88.27	5.30	14.15	27.01
20	4.23	71.87	65.13	55.67	64.22	8.14	37.54	35.82
30	4.40	46.88	42.31	17.98*	44.60	-	56.63	36.02
40	4.59	17.98	14.65	ND*	16.32	-	84.13	40.14
45	5.50	0.96	0.14	ND*	0.55	-	99.47	42.18
50	7.90	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	38.15
60	10.33	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	31.79
70	11.00	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	27.25

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.28 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสม
ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 1000 รอบต่อนาที

เวลา (นาที)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.27	12.06	11.44	11.59	11.70	0.32	0.00	0.00
10	4.13	11.57	12.97	10.46	11.67	1.26	0.26	0.03
20	4.34	11.12	11.81	11.07	11.33	0.41	3.11	0.20
30	4.45	10.16	10.58	10.28	10.34	0.22	11.60	0.50
40	4.92	7.86	7.71	6.48	7.35	0.76	37.16	1.19
45	5.53	3.21	2.16	2.64	2.67	0.53	77.17	2.20
50	7.79	0.42	0.48	0.50	0.47	0.04	96.01	2.46
60	10.24	0.33	0.45	0.41	0.40	0.06	96.61	2.06
70	10.85	0.42	0.41	0.39	0.41	0.02	96.52	1.77

ตารางที่ ก.29 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วหมุนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 1000 รอบต่อนาที

เวลา (นาท.)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.27	205.47	200.62	211.94	206.01	5.68	0.00	0.00
10	4.13	185.89	176.39	156.44	172.91	15.03	16.07	33.51
20	4.34	114.54	103.27	89.41	102.41	12.59	50.29	52.44
30	4.45	46.71	35.08	32.22	38.00	7.67	81.55	56.70
40	4.92	5.13	6.29	10.64*	5.71	-	97.23	50.70
45	5.53	1.10	1.24	2.68	1.67	0.87	99.19	45.97
50	7.79	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	99.98	41.70
60	10.24	ND	0.05	ND	0.05	-	>99.98	34.75
70	10.85	ND	ND	0.01	0.01	-	>99.99	29.79

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.30 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 1000 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.27	95.37	99.18	100.93	98.49	2.84	0.00	0.00
10	4.13	95.74	101.33	87.38	94.82	7.02	3.73	6.82
20	4.34	73.70	78.51	71.33	74.51	3.66	24.35	22.25
30	4.45	54.58	75.09	57.86	62.51	11.02	36.53	22.26
40	4.92	21.32	33.38	16.91	23.87	8.53	75.76	34.62
45	5.53	4.23*	21.08	22.55	21.82	-	77.85	31.62
50	7.79	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	36.54
60	10.24	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	30.45
70	10.85	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	26.10

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.31 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสม ผังขั้วไฟฟ้าแคโทด 1200 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.34	10.4	11.68	11.92	11.33	0.82	0.00	0.00
10	4.16	10.46	11.67	11.85	11.33	0.76	0.06	0.01
20	4.32	9.46	10.89	10.65	10.33	0.77	8.82	0.55
30	4.45	7.71	9.62	9.88	9.07	1.18	19.97	0.83
40	4.91	7.03	7.48	7.66	7.39	0.32	34.79	1.08
45	5.55	2.18	4.73	1.11	2.67	1.86	76.41	2.11
50	7.99	0.38	0.37	0.37	0.37	0.01	96.71	2.40
60	10.14	0.38	0.39	0.37	0.38	0.01	96.65	2.00
70	10.94	0.39	0.4	0.35	0.38	0.03	96.65	1.72

ตารางที่ ก.32 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 1200 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.34	217.92	216.43	216.49	216.95	0.84	0.00	0.00
10	4.16	173.18	174.85	173.26	173.76	0.94	19.91	43.72
20	4.32	104.41	103.36	112.88	106.88	5.22	50.73	55.71
30	4.45	28.32	34.16	39.89	34.12	5.79	84.27	61.70
40	4.91	3.21	3.12	3.66	3.33	0.29	98.47	54.07
45	5.55	0.46	0.41	0.33	0.40	0.07	99.82	48.72
50	7.99	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	99.98	43.92
60	10.14	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	99.98	36.60
70	10.94	ND	0.01	0.05	0.03	-	>99.99	31.37

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.33 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความเร็วกวนผสมฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 1200 รอบต่อนาที

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.34	100.37	95.53	99.19	98.36	2.52	0.00	0.00
10	4.16	90.43	90.94	89.67	90.35	0.64	8.15	14.88
20	4.32	83.14	82.56	72.86	79.52	5.78	19.16	17.49
30	4.45	62.33	68.18	55.05	61.85	6.58	37.12	22.59
40	4.91	22.49	24.97	20.34	22.60	2.32	77.02	35.15
45	5.55	1.79	1.48	1.03	1.43	0.38	98.54	39.98
50	7.99	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	36.50
60	10.14	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	30.41
70	10.94	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	26.07

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.34 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.22	14.75	13.3	14.32	14.12	0.74	0.00	0.00
10	3.97	13.86	13.51	14.59	13.99	0.55	0.97	0.15
20	4.23	13.68	12.23	13.76	13.22	0.86	6.37	0.49
30	4.40	11.76	11.29	11.88	11.64	0.31	17.56	0.91
40	4.59	9.35	9.66	8.91	9.31	0.38	34.10	1.32
45	5.50	4.68	2.31	0.36*	3.50	-	75.25	2.59
50	7.90	0.37	0.31	0.28	0.32	0.05	97.73	3.03
60	10.33	0.29	0.28	0.34	0.30	0.03	97.85	2.52
70	11.00	0.31	0.26	0.31	0.29	0.03	97.92	2.17

เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.35 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท.)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.22	193.11	195.28	196.76	195.05	1.84	0.00	0.00
10	3.97	161.08	166.41	167.86	165.12	3.57	15.35	30.30
20	4.23	108.23	123.71	114.15	115.36	7.81	40.85	40.34
30	4.40	53.26	61.59	54.41	56.42	4.51	71.07	46.78
40	4.59	11.11	11.78	2.34*	11.45	-	94.13	46.47
45	5.50	1.12	1.27	0.02*	1.20	-	99.39	43.61
50	7.90	ND	ND	0.02	0.02	-	>99.99	39.49
60	10.33	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	32.91
70	11.00	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	28.21

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.36 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.17 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.22	101.84	103.29	103.34	102.82	0.85	0.00	0.00
10	3.97	91.68	90.97	82.16	88.27	5.30	14.15	27.01
20	4.23	71.87	65.13	55.67	64.22	8.14	37.54	35.82
30	4.40	46.88	42.31	17.98*	44.60	-	56.63	36.02
40	4.59	17.98	14.65	ND*	16.32	-	84.13	40.14
45	5.50	0.96	0.14	ND*	0.55	-	99.47	42.18
50	7.90	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	38.15
60	10.33	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	31.79
70	11.00	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	27.25

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.37 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.63	12.24	12.19	12.40	12.28	0.11	0.00	0.00
5	2.80	12.44	11.86	11.64	11.98	0.41	2.44	0.44
10	3.01	11.51	11.65	11.65	11.60	0.08	5.47	0.49
20	3.76	10.98	11.53	10.50	11.01	0.51	10.34	0.46
25	4.17	10.81	11.02	10.73	10.85	0.15	11.58	0.42
30	4.40	10.10	10.14	7.17*	10.12	-	17.58	0.53
35	4.78	8.27	9.05	0.36*	8.66	-	29.46	0.75
40	7.11	0.47	0.69	0.38	0.51	0.15	95.82	2.15
50	9.40	0.37	0.50	0.43	0.43	0.06	96.48	1.73

เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.38 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท.)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.63	189.62	192.38	195.42	192.47	2.90	0.00	0.00
5	2.80	171.99	173.80	177.47	174.42	2.79	9.38	24.37
10	3.01	155.39	157.02	145.17	152.53	6.42	20.75	26.96
20	3.76	118.15	119.40	66.25*	118.78	-	38.29	24.87
25	4.17	97.70	98.75	27.21*	98.23	-	48.97	25.44
30	4.40	60.76	61.40	5.62*	61.08	-	68.27	29.56
35	4.78	16.90	17.08	0.10*	16.99	-	91.17	33.84
40	7.11	0.52	0.53	0.07*	0.53	-	99.73	32.39
50	9.40	0.059	0.06	0.06	0.06	0.00	99.97	25.97

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.39 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.25 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.63	100.86	96.27	96.84	97.99	2.50	0.00	0.00
5	2.80	98.61	93.93	89.55	94.03	4.53	4.04	9.80
10	3.01	92.25	93.96	87.27	91.16	3.48	6.97	8.45
20	3.76	83.31	87.21	66.24	78.92	11.15	19.46	11.80
25	4.17	68.8	80.16	46.44	65.13	17.16	33.53	16.26
30	4.40	49.58	65.54	12.05	42.39	27.46	56.74	22.93
35	4.78	18.96	38.20	ND*	28.58	-	70.83	24.54
40	7.11	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	30.30
50	9.40	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	24.24

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.40 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.15	10.35	9.88	9.77	10.00	0.31	0.00	0.00
5	3.96	9.87	9.35	9.82	9.68	0.29	3.20	0.35
10	4.34	9.73	9.78	9.45	9.65	0.18	3.47	0.19
20	5.10	8.28	8.46	9.26	8.67	0.52	13.33	0.37
25	8.18	0.38	0.29	0.24	0.30	0.07	96.97	2.13
30	10.21	0.30	0.27	0.31	0.29	0.02	97.07	1.77
35	10.94	0.25	0.32	0.20	0.26	0.06	97.43	1.53
40	11.42	0.22	0.29	0.23	0.25	0.04	97.53	1.34
50	11.87	0.26	0.37	0.26	0.30	0.06	97.03	1.06

ตารางที่ ก.41 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.15	208.89	196.33	188.79	198.00	10.15	0.00	0.00
5	3.96	175.04	174.83	163.27	171.05	6.74	13.61	27.29
10	4.34	136.18	136.69	102.37*	136.44	-	31.09	31.17
20	5.10	16.55	13.41	0.63*	14.98	-	92.43	46.32
25	8.18	0.32*	ND	ND	ND	-	>99.99	40.09
30	10.21	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	33.41
35	10.94	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	28.64
40	11.42	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	25.06
50	11.87	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	20.04

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.42 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8.33 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.15	95.40	95.45	102.37	97.74	4.01	0.00	0.00
5	3.96	90.67	91.69	91.86	91.41	0.64	6.48	11.75
10	4.34	88.48	69.35	69.48	75.77	11.01	22.48	20.39
20	5.10	28.34	16.72	3.34*	22.53	-	76.95	34.90
25	8.18	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	36.26
30	10.21	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	30.22
35	10.94	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	25.90
40	11.42	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	22.67
50	11.87	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	18.13

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.43 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.17	9.15	9.27	9.61	9.34	0.24	0.00	0.00
5	4.25	9.13	8.88	9.21	9.07	0.17	2.89	0.24
10	4.47	8.68	8.43	8.91	8.67	0.24	7.17	0.29
15	4.85	8.22	7.42	7.29	7.64	0.50	18.19	0.50
20	9.30	0.38	0.41	0.32	0.37	0.05	96.04	1.97
25	10.71	0.36	0.39	0.38	0.38	0.02	95.97	1.57
30	11.27	0.37	0.43	0.345	0.38	0.04	95.92	1.31
35	11.60	0.48	0.5	0.387	0.46	0.06	95.12	1.11
40	11.86	0.42	0.51	0.306	0.41	0.10	95.59	0.98

ตารางที่ ก.44 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.17	190.20	195.11	198.69	194.67	4.26	0.00	0.00
5	4.25	157.42	165.23	164.78	162.48	4.38	16.54	26.07
10	4.47	69.12	83.38	114.75	89.08	23.34	54.24	42.76
15	4.85	6.21	9.22	28.57*	7.72	-	96.04	50.47
20	9.30	ND	ND	0.08	0.08	-	>99.96	39.40
25	10.71	ND	ND	0.05	0.05	-	>99.97	31.52
30	11.27	ND	ND	0.03	0.03	-	>99.98	26.27
35	11.60	ND	ND	0.03	0.03	-	>99.98	22.52
40	11.86	ND	ND	0.03	0.03	-	>99.98	19.70

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.45 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.17	105.19	100.57	100.72	102.16	2.63	0.00	0.00
5	4.25	90.84	86.68	81.64	86.39	4.61	15.44	23.42
10	4.47	45.19	57.03	40.50	47.57	8.52	53.43	40.52
15	4.85	8.13	13.44	22.50	14.69	7.26	85.62	43.29
20	9.30	ND	0.06	ND	0.06	-	>99.94	37.90
25	10.71	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	30.32
30	11.27	ND	0.06	ND	0.06	-	>99.94	25.27
35	11.60	0.06	0.10	ND	0.08	-	>99.92	21.65
40	11.86	0.07	0.10	ND	0.09	-	>99.92	18.94

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.46 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 1

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.09	8.85	9.15	9.23	9.08	0.20	0.00	0.00
5	3.92	8.85	8.76	8.86	8.82	0.06	2.79	0.22
10	4.29	8.13	9.12	7.59	8.28	0.78	8.78	0.35
20	4.62	7.85	8.36	0.52*	8.11	-	10.71	0.27
25	5.13	5.45	6.72	0.49*	6.09	-	32.96	0.87
30	7.94	0.57	3.93*	0.51	0.54	-	94.05	2.08
35	8.91	0.41	0.48	0.43	0.44	0.04	95.15	2.70
40	9.63	0.47	0.49	0.46	0.47	0.02	94.79	2.36
50	10.58	0.51	0.46	0.44	0.47	0.04	94.82	1.89

เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.47 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 1

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.09	200.42	203.57	203.49	202.49	1.80	0.00	0.00
5	3.92	178.86	171.36	149.65	166.62	15.17	17.71	29.05
10	4.29	118.7	141.41	78.35*	130.06	-	35.77	29.33
20	4.62	30.28	53.86	ND*	42.07	-	79.22	40.60
25	5.13	3.16	23.84	ND*	13.50	-	93.33	51.02
30	7.94	0.01	0.40	ND	0.21	-	99.90	45.51
35	8.91	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	58.57
40	9.63	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	51.25
50	10.58	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	41.00

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.48 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 1

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.09	105.34	101.84	103.35	103.51	1.76	0.00	0.00
5	3.92	97.34	100.22	86.55	94.70	7.21	8.51	13.08
10	4.29	69.49	75.67	50.41	65.19	13.17	37.02	28.45
20	4.62	22.27	37.40	ND*	29.84	-	71.18	34.18
25	5.13	5.16	21.82	0.07*	13.49	-	86.97	44.55
30	7.94	0.10	0.20	0.07	0.12	0.07	99.88	42.64
35	8.91	0.10	0.07	0.07	0.08	0.02	99.92	54.84
40	9.63	0.10	0.07	ND	0.09	-	>99.92	47.99
50	10.58	0.10	0.20	0.07	0.12	0.07	99.88	38.38

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.49 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 2

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.23	9.22	11.44	10.34	10.33	1.11	0.00	0.00
5	4.09	9.40	9.88	9.74	9.67	0.25	6.39	0.58
10	4.35	8.42	8.13	7.58	8.04	0.43	22.16	1.00
15	4.87	6.11	6.71	6.18	6.33	0.33	38.71	1.17
20	9.11	0.13	0.17	0.14	0.15	0.02	98.58	2.23

ตารางที่ ก.50 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 2

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.23	189.13	191.28	195.6	192.00	3.30	0.00	0.00
5	4.09	144.19	152.65	144.43	147.09	4.82	23.39	36.38
10	4.35	73.21	77.58	66.34	72.38	5.67	62.30	48.44
15	4.87	7.10	10.87	9.05	9.01	1.89	95.31	49.40
20	9.11	0.04	0.10	0.08	0.07	0.03	99.96	38.86

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.51 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 2

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.23	116.84	116.68	117.43	116.98	0.40	0.00	0.00
5	4.09	92.51	97.64	111.08	100.41	9.59	14.17	24.61
10	4.35	60.79	65.53	67.19	64.50	3.32	44.86	38.96
15	4.87	16.22	17.49	19.30	17.67	1.55	84.90	49.15
20	9.11	0.07	ND*	0.07	0.07	-	99.94	43.40

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.52 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 3

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.99	9.66	9.13	9.21	9.33	0.29	0.00	0.00
5	3.66	8.66	8.21	8.32	8.40	0.23	10.04	0.82
10	4.24	8.23	8.31	7.95	8.16	0.19	12.54	0.51
15	4.46	7.56	7.43	7.20	7.40	0.18	20.75	0.57
20	4.86	6.45	6.85	6.71	6.67	0.20	28.54	0.73
25	7.94	0.17	0.29	0.74	0.40	0.30	95.71	1.96
30	9.52	0.16	0.23	0.23	0.21	0.04	97.79	3.33
35	10.40	0.15	0.24	0.26	0.22	0.06	97.68	2.86
40	10.83	0.14	0.15	0.13	0.14	0.01	98.50	2.52
50	11.43	0.16	0.23	0.14	0.18	0.05	98.11	2.01

ตารางที่ ก.53 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 3

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.99	193.49	189.47	192.96	191.97	2.18	0.00	0.00
5	3.66	159.34	166.78	147.40	157.84	9.78	17.78	27.64
10	4.24	111.08	121.58	76.81*	116.33	-	39.40	30.63
15	4.46	55.35	63.86	6.12*	59.61	-	68.95	35.74
20	4.86	6.31	14.70	0.08	7.03	7.34	96.34	46.81
25	7.94	0.21	3.98*	0.04	0.13	-	99.93	38.85
30	9.52	0.08	0.08	0.08	0.08	0.00	99.96	64.76
35	10.40	0.04	0.08	0.04	0.05	0.02	99.97	55.51
40	10.83	ND*	0.04	0.08	0.06	-	99.97	48.57
50	11.43	0.04	0.08	0.08	0.07	0.02	99.97	38.86

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.54 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 3

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	2.99	107.12	100.98	98.43	102.18	4.47	0.00	0.00
5	3.66	101.16	87.88	83.61	90.88	9.15	11.05	16.77
10	4.24	62.34	65.49	72.32	66.72	5.10	34.70	26.32
15	4.46	41.93	33.16	45.23	40.11	6.24	60.75	30.72
20	4.86	11.32	9.22	17.51	12.68	4.31	87.59	41.52
25	7.94	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	37.91
30	9.52	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	63.19
35	10.40	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	54.16
40	10.83	ND	0.07	ND	0.07	-	>99.93	47.38
50	11.43	ND	0.07	ND	0.07	-	>99.93	15.16

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ก.55 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 4

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.10	11.02	9.76	10.26	10.35	0.63	0.00	0.00
5	3.31	10.32	9.25	9.85	9.81	0.54	5.22	0.59
10	3.92	9.35	8.4	9.12	8.96	0.50	13.43	0.76
15	4.32	8.86	8.16	8.42	8.48	0.35	18.04	0.68
20	4.42	8.44	7.16	7.92	7.84	0.64	24.23	0.69
25	4.70	7.64	7.48	7.03	7.38	0.32	28.64	0.87
30	6.84	6.50	4.22	6.82	5.85	1.42	43.49	1.10
35	8.35	5.19*	0.13	0.37	0.25	-	97.58	3.16
40	9.68	0.23	0.14	0.24	0.20	0.06	98.03	2.78
50	10.22	0.16	0.13	0.18	0.16	0.03	98.49	2.23

เครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.56 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 4

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.10	198.56	188.78	187.88	191.74	5.92	0.00	0.00
5	3.31	186.32	147.31	172.62	168.75	19.79	11.99	23.27
10	3.92	165.19	131.13	168.20	154.84	20.59	19.24	18.68
15	4.32	130.79	82.19	113.10	108.69	24.60	43.31	28.03
20	4.42	88.95	19.06	75.58	61.20	37.10	68.08	33.04
25	4.70	56.26	3.11*	21.45	38.86	-	79.74	41.27
30	6.84	20.36*	ND	0.13	0.13	-	>99.93	43.11
35	8.35	2.14*	0.04	0.064	0.05	-	99.97	55.45
40	9.68	0.16	ND	0.04	0.10	-	>99.95	48.50
50	10.22	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	38.82

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.57 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 4

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.10	107.22	99.94	96.36	101.17	5.53	0.00	0.00
5	3.31	97.98	94.42	92.82	95.07	2.64	6.03	11.32
10	3.92	102.38	91.03	83.64	92.35	9.44	8.72	8.19
15	4.32	77.64	69.33	75.14	74.04	4.26	26.82	16.79
20	4.42	55.06	50.87	63.65	56.53	6.52	44.13	20.72
25	4.70	32.19	16.52	41.64	30.12	12.69	70.23	35.17
30	6.84	13.78	4.41*	18.35	16.07	-	84.12	35.10
35	8.35	5.49*	0.07	0.07	0.07	-	99.93	53.61
40	9.68	ND	0.07	0.07	0.07	-	>99.93	46.91
50	10.22	ND	0.07	0.23	0.15	-	>99.85	37.50

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.58 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 5

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.15	10.35	9.88	9.77	10.00	0.31	0.00	0.00
5	3.96	9.87	9.35	9.82	9.68	0.29	3.20	0.35
10	4.34	9.73	9.78	9.45	9.65	0.18	3.47	0.19
20	5.10	8.28	8.46	9.26	8.67	0.52	13.33	0.37
25	8.18	0.38	0.29	0.24	0.30	0.07	96.97	2.13
30	10.21	0.30	0.27	0.31	0.29	0.02	97.07	1.77
35	10.94	0.25	0.32	0.20	0.26	0.06	97.43	1.53
40	11.42	0.22	0.29	0.23	0.25	0.04	97.53	1.34
50	11.87	0.26	0.37	0.26	0.30	0.06	97.03	1.06

ตารางที่ ก.59 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 5

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.15	208.89	196.33	188.79	198.00	10.15	0.00	0.00
5	3.96	175.04	174.83	163.27	171.05	6.74	13.61	27.29
10	4.34	136.18	136.69	102.37*	136.44	-	31.09	31.17
20	5.10	16.55	13.41	0.63*	14.98	-	92.43	46.32
25	8.18	0.32*	ND	ND	ND	-	>99.99	40.09
30	10.21	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	33.41
35	10.94	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	28.64
40	11.42	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	25.06
50	11.87	ND	ND	ND	ND	-	>99.99	20.04

ND ของ $\text{Cu}^{2+} = \leq 0.01$ มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น

ตารางที่ ก.60 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า เมื่อใช้วิธีการปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามรูปแบบที่ 5

เวลา (นาท)	พีเอช	ความเข้มข้น (มก./ล.)				ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ประสิทธิ ภาพ กำจัด (%)	ประสิทธิ ภาพเชิง กระแส (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
0	3.15	95.40	95.45	102.37	97.74	4.01	0.00	0.00
5	3.96	90.67	91.69	91.86	91.41	0.64	6.48	11.75
10	4.34	88.48	69.35	69.48	75.77	11.01	22.48	20.39
20	5.10	28.34	16.72	3.34*	22.53	-	76.95	34.90
25	8.18	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	36.26
30	10.21	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	30.22
35	10.94	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	25.90
40	11.42	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	22.67
50	11.87	ND	ND	ND	ND	-	>99.96	18.13

ND ของ Cr = ≤ 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร และเครื่องหมาย * แทนค่าที่ตัดทิ้งเนื่องจากมีค่าสูงหรือต่ำเกินไป เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งอื่น



ภาคผนวก ข
วิธีการคำนวณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ข.1 วิธีการคำนวณ

ข.1.1 ร้อยละการกำจัด

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

W_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

W_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

ข.1.2 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส

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

โดย n = ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์/eq)

C_o = ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)

C_t = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)

V = ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

$I(t)$ = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

ข.1.3 ตัวอย่างการคำนวณ

ในที่นี้ จะนำความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแม่พิมพ์ ที่เวลา 5 และ 15 นาที มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่าร้อยละการกำจัด และค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.42 แอมแปร์ต่อตารางเมตร (คิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์) โดยใช้การจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย

ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง 194.67 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา 5 นาที ความเข้มข้นของทองแดง 162.48 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา 15 นาที ความเข้มข้นของทองแดง 14.67 มิลลิกรัมต่อลิตร

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

แทนค่า ที่เวลา 5 นาที

$$= \frac{(194.67 - 162.48) \times 100\%}{194.67}$$

$$= 16.54 \%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 5 นาที ร้อยละการกำจัดทองแดง คือ 16.54 %

แทนค่า ที่เวลา 15 นาที

$$= \frac{(194.67 - 14.67) \times 100\%}{194.67}$$

$$= 92.46 \%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 15 นาที ร้อยละการกำจัดนิกเกิล คือ 92.46 %

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

แทนค่า ที่เวลา 15 นาที

$$= \frac{2 \times 96500 \times [(194.67 - 14.67)] / (63.5463 \times 1000) \times 0.2 \text{ L} \times 100\%}{0.25 \text{ A} \times 15 \times 60}$$

$$= 48.59 \%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 15 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส คือ 48.59 %

ข.1.4 วิธีคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$$\text{พื้นที่ขั้วแคโทด} = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น}$$

$$= 4 \times 5 \times 2 \times 6$$

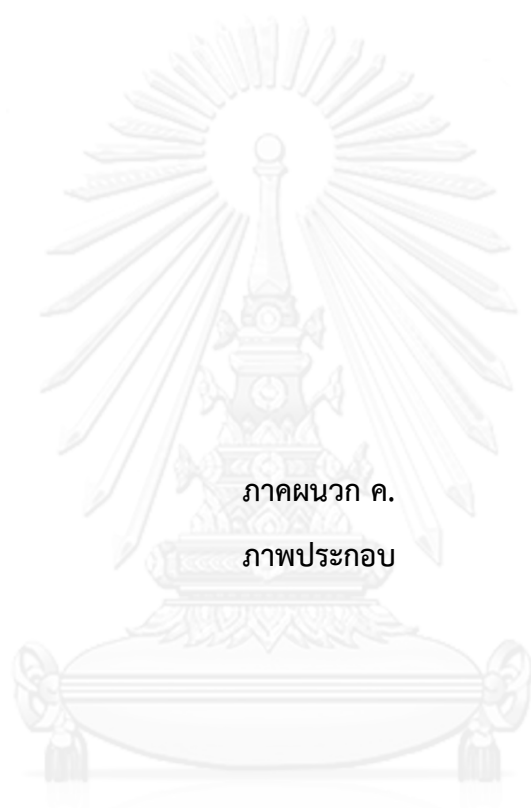
$$= 0.024 \text{ ตารางเมตร}$$

$$\text{ใช้กระแสไฟฟ้า 0.25 แอมแปร์} = \text{กระแสไฟฟ้า} / \text{พื้นที่ขั้วแคโทด}$$

$$= 0.25 / 0.024$$

$$= 10.42 \text{ แอมแปร์ต่อตร.ม.}$$

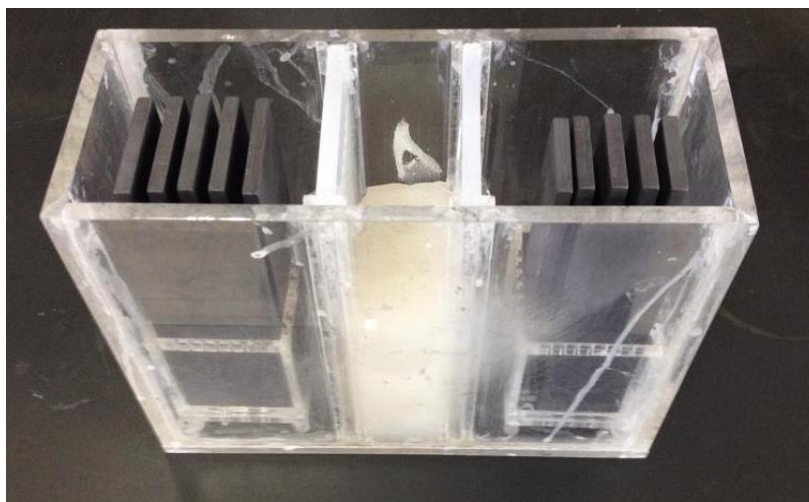
ดังนั้น ที่กระแสไฟฟ้า 0.25 A จะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 10.42 แอมแปร์ต่อตร.ม.



ภาคผนวก ค.

ภาพประกอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาพ ค.1 เซลล์ไฟฟ้าเคมีจริงแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง



ภาพ ค.2 การทำปฏิกิริยาขณะทำการทดลองในช่วงแรกของการทดลอง



ภาพ ค.3 การทำปฏิกิริยาขณะทำการทดลองในช่วงท้ายของการทดลอง



ภาคผนวก ง.

เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง ง.1 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

1. ความเป็นกรดและต่าง (pH)	5.5-9.0
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	- ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด

ตาราง ง.1 ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรมตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 (ต่อ)

13. ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)0	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)	
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
2. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
3. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.
12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศุภชัย บุญประเสริฐพร อายุ 26 ปี เกิดวันที่ 10 กันยายน พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษา มัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการใหญ่ นนทบุรี ปีการศึกษา 2548 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปี 2552 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2553

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

ศุภชัย บุญประเสริฐพร เจริญขวัญ ไกรยา และ เขมรัฐ โอสถาปนธ์

“การกำจัดทองแดง นิกเกิล และโครเมียมจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตแม่พิมพ์ด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13 วันที่ 26-28 มีนาคม 2557 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ กรุงเทพฯ หน้า 113-114 (รหัสบทความ 26R5-01)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY