

การกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม  
โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง

นางสาวมณีวัลย์ เนตรรังษี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

REMOVAL OF COPPER CHROMIUM AND NICKEL FROM INDUSTRIAL WASTEWATER  
BY CONTINUOUS FLOW ELECTROCHEMISTRY

Miss Maneevan Netrangsi

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 2012  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงาน อุตสาหกรรมโดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง
โดย	นางสาวมณีวัลย์ เนตรรังษี
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนพงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	อาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนพงศ์)

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

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งามเสวี)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรรณวดี สุวัณมิยะ)

มณีวัลย์ เนตรรังษี : การกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง (REMOVAL OF COPPER CHROMIUM AND NICKEL FROM INDUSTRIAL WASTEWATER BY CONTINUOUS FLOW ELECTROCHEMISTRY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. เขมรัฐ โอสถาปนีย์, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อ.ดร. เจริญขวัญ ไกรยา, 131 หน้า

น้ำเสียจากการผลิตแทนพิมพ์เป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในปริมาณสูง เนื่องจากทองแดง โครเมียมและนิกเกิลเป็นส่วนประกอบสำคัญในกระบวนการผลิตแทนพิมพ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพ์พร้อมกันในขั้นตอนเดียว ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง จัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนด แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล พบว่าเมื่อลดอัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้ดีขึ้น โดยสามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ เมื่อเดินระบบที่อัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล พบว่าสามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้เร็วขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้น โดยสามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.84 กำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.85 และกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 97.72 ในเวลา 25 นาที ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 5370323921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : COPPER / CHROMIUM / NICKEL / CONTINUOUS FLOW / ELECTROCHEMISTRY / WASTEWATER

MANEEVAN NETRANGSI : REMOVAL OF COPPER CHROMIUM AND NICKEL FROM INDUSTRIAL WASTEWATER BY CONTINUOUS FLOW ELECTROCHEMISTRY. ADVISOR: ASST.PROF.KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., CO-ADVISOR: CHAROENKWAN KRAIYA, Ph.D., 131 pp.

Wastewater from printing - press industry contains high concentrations of copper chromium and nickel since these metals are major component in required chemicals used in the industrial. Aim of this research is to study a possibility for simultaneously remove of copper, chromium and nickel ions from the printing – press wastewater using continuous flow electrochemistry method. Two - compartment electrochemical cell equipped with graphite electrodes was employed. The studies were divided into two parts. First, study the best flow rate of wastewater to remove of copper, chromium and nickel. Results indicate that metal removal occurred better at lower flow rate. The concentrations of copper, chromium and nickel were reduced until passed the Thailand's industrial water quality standard within 60, 90 and 90 min, respectively, at the first sampling point of the electrochemical cell when using a fixed flow rate of 2.8 ml/min. Second, study the best current density for removal of copper, chromium and nickel. Results indicate that metal removal occurred faster at higher current density. The 99.84% copper, 99.85% chromium and 97.72% nickel were eliminated within 25 min, at the second sampling point of the electrochemical cell when  $15.43 \text{ A/m}^2$  was applied.

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

Field of Study : ..... Environmental Engineering ..... Advisor's Signature.....

Academic Year : ..2012..... Co- advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ที่ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร. เจริญขวัญ ไกรยา ผู้ให้คำปรึกษา แนะนำทาง หลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรธวัช สุวัณณิกะ ที่ได้ให้คำชี้แนะ คำปรึกษา และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และงบประมาณบางส่วนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (หมายเลขโครงการ FW6521)

ขอบคุณครอบครัว พี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในช่วงการทำวิจัยมาโดยตลอด

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ทองแดง.....	4
2.1.1 โลหะวิทยาของทองแดง.....	4
2.1.2 ความเป็นพิษของทองแดง.....	4
2.2 โครเมียม.....	5
2.2.1 โลหะวิทยาของโครเมียม.....	5
2.2.2 ความเป็นพิษของโครเมียม.....	5
2.3 นิกเกิล.....	6
2.3.1 โลหะวิทยาของนิกเกิล.....	6
2.3.2 ความเป็นพิษของนิกเกิล.....	7
2.4 น้ำเสียอุตสาหกรรม.....	7
2.5 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน.....	8
2.5.1 การแยกด้วยไฟฟ้า.....	8
2.5.2 การตกตะกอนทางเคมี.....	9

	หน้า
2.6 กระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	10
2.6.1 เซลล์กัลวานิก.....	11
2.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลต์.....	11
2.6.3 การนำพาไอออนในสารละลาย.....	14
2.6.4 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	16
2.6.5 โพลาริเซชัน.....	19
2.6.6 กฎฟาราเดย์.....	20
2.6.7 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า.....	21
2.7 วิธีการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	22
2.7.1 การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	22
2.7.2 การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	23
2.8 ขั้วไฟฟ้า.....	24
2.9 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี.....	25
2.9.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว.....	26
2.9.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน.....	26
2.9.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม.....	27
2.9.4 แบบไบโพลาร์.....	28
2.10 การแยกโลหะโดยอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้า.....	28
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>39</b>
3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี.....	39
3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	39
3.1.2 สารเคมี.....	40
3.1.3 การเตรียมน้ำเสียจริงและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง....	40
3.2 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า.....	41
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	44
3.3.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาที่อัตราการไหลที่สูงสุดในการกำจัด ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล.....	44



3.3.2 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่สูงสุดในการ กำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล.....	46
3.4 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์.....	48
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....</b>	<b>49</b>
4.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่มีต่อการ กำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพ์.....	50
4.2 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการ กำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพ์.....	56
4.3 พีเอช.....	64
4.4 ประสิทธิภาพเชิงกระแส.....	69
4.5 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด.....	76
4.5.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี.....	76
4.5.2 ค่าใช้จ่ายด้านเคมีไฟฟ้า.....	76
4.5.3 ค่าหัวไฟฟ้า.....	77
4.6 แนวคิดการนำไปใช้งานจริง.....	77
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>79</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	79
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม.....	80
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>81</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>85</b>
ภาคผนวก ก ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง.....	86
ภาคผนวก ข วิธีการคำนวณ.....	127
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>131</b>

## สารบัญญัตราง

ตารางที่	หน้า
2.1	9
2.2	37
2.2	38
3.1	41
3.2	45
3.3	47
3.4	48
4.1	49
4.2	54
4.3	55
4.4	55
4.5	57
4.6	61
4.7	61
4.8	67
4.9	70

ตารางที่	หน้า
4.10 แสดงเวลาและประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดในการกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์ ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	70
4.11 แสดงเวลาและประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดในการกำจัดนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์ค่า มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่ อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	71
ก.1 ค่าพีเอชของทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อ ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของ น้ำเสียตัวอย่าง 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที .....	87
ก.2 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล ของน้ำเสียตัวอย่าง 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4.....	88
ก.3 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล ของน้ำเสียตัวอย่าง 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4.....	89
ก.4 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อ ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของ น้ำเสียตัวอย่าง 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4.....	90
ก.5 ค่าพีเอชของทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อ ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของ น้ำเสียตัวอย่าง 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที.....	91
ก.6 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล ของน้ำเสียตัวอย่าง 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4.....	92
ก.7 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล ของน้ำเสียตัวอย่าง 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4.....	93







ตารางที่	หน้า
ก.22 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4.....	121
ก.22 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (ต่อ)	122
ก.23 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 .....	123
ก.23 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (ต่อ).	124
ก.24 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 .....	125
ก.24 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (ต่อ).....	126

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบเกิดการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า.....	13
2.2	การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน.....	15
2.3	การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่.....	16
2.4	(ก) กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า เรียกว่า กระบวนการฟาราเดอิก.....	17
2.4	(ข) กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า เรียกว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก.....	17
2.5	(ก) ก่อนการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก.....	18
2.5	(ข) หลังการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก.....	18
2.6	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	22
2.6	(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	22
2.7	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	24
2.7	(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	24
2.8	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว.....	26
2.9	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน.....	27
2.10	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม.....	27
2.11	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์.....	28
2.12	โพลาริเซชันของ Cu, M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> .....	29
2.13	โพลาริเซชันของ M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> .....	30
2.14	โพลาริเซชันของทองแดงกับสังกะสีและสารเชิงซ้อนของทองแดงกับสังกะสี.....	31
3.1	(ก) ขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ใช้ทดลอง.....	40
3.1	(ข) ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ใช้ทดลอง.....	40
3.2	เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายฝั่งแคโทดและแอโนดด้วยแผ่นแก้วพรุน.....	42
3.3	เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง.....	42



ภาพที่	หน้า
3.4 การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่องที่ใช้ในการทดลอง.....	43
3.4 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาอัตราการไหลที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิล.....	45
3.5 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล.....	47
4.1 (ก) ร้อยละการกำจัดทองแดงออกจากร้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร เทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	51
4.1 (ข) ร้อยละการกำจัดทองแดงออกจากร้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร เทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	51
4.1 (ค) ร้อยละการกำจัดทองแดงออกจากร้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร เทียบกับเวลาที่อัตราเร็วในการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	51
4.1 (ง) ร้อยละการกำจัดทองแดงออกจากร้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร เทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	51
4.2 (ก) ร้อยละการกำจัดโครเมียมออกจากร้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร เทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	52
4.2 (ข) ร้อยละการกำจัดโครเมียมออกจากร้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร เทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	52
4.2 (ค) ร้อยละการกำจัดโครเมียมออกจากร้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร เทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร.....	52
4.2 (ง) ร้อยละการกำจัดโครเมียมออกจากร้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร เทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 4	





ภาพที่	หน้า
4.8 (ข) ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	65
4.8 (ค) ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	65
4.8 (ง) ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	65
4.9 ความเข้มข้นของทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลกับค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	66
4.10 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชที่มีต่อการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ.....	69
4.11 (ก) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของทองแดงเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	73
4.11 (ข) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของทองแดงเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	73
4.11 (ค) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของทองแดงเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	73
4.11 (ง) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของทองแดงเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	73
4.12 (ก) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของโคโรเนียมเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	74

ภาพที่	หน้า
4.12 (ข) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของโครเมียมเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	74
4.12 (ค) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของโครเมียมเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	74
4.12 (ง) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของโครเมียมเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	74
4.13 (ก) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	75
4.13 (ข) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	75
4.13 (ค) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	75
4.13 (ง) ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที.....	75

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการพัฒนาประเทศภายใต้แผนพัฒนาเศรษฐกิจแห่งชาติ ที่มุ่งเน้นการเพิ่มสมรรถนะและขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ ทำให้ภาคอุตสาหกรรมเติบโตอย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชน รวมถึงทรัพยากรและสิ่งแวดล้อมของประเทศที่เสื่อมโทรมและหมดไป ทำให้เกิดปัญหามลพิษทั้งทางน้ำและอากาศ รวมถึงกาสารพิษที่อันตรายและบำบัดได้ยาก (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) อุตสาหกรรมหลายประเภทใช้โลหะหนักเป็นส่วนประกอบในกระบวนการผลิตปริมาณมาก เช่น อุตสาหกรรมผลิตแท่นพิมพ์ที่ใช้โลหะทองแดง โลหะโครเมียมและโลหะนิกเกิลปริมาณมากในกระบวนการผลิต โดยน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแท่นพิมพ์แห่งหนึ่งมีปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลสูงถึง 248, 161 และ 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งน้ำเสียที่ปนเปื้อนทองแดง โครเมียมและนิกเกิลมีอันตรายมาก หากมีการปล่อยทิ้งโดยไม่มีการบำบัดหรือบำบัดได้ไม่ดีพอจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในระยะยาว จึงสมควรอย่างยิ่งที่จะกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่ปนเปื้อนมากับน้ำเสียของกระบวนการผลิตเพื่อลดการปนเปื้อนของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลไว้ไม่เกิน 2.0, 0.25 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ถึงจะสามารถปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

งานวิจัยนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลพร้อมกันในหนึ่งขั้นตอน ด้วยวิธีการเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง ซึ่งวิธีทางเคมีไฟฟ้าเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องแยกสารรบกวนชนิดอื่นๆ ออกจากตัวอย่างที่วิเคราะห์และไม่มีการเติมสารเคมีเพิ่มในขั้นตอนการกำจัด (Scott และคณะ, 1997)

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง ได้แก่ อัตราการไหลและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
- 1.2.2 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแท่งพิมพ์โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง
- 1.2.3 ประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้นด้านสารเคมีและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลโดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัย ได้แก่

- 1.3.1 น้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตแท่งพิมพ์
- 1.3.2 หาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ อัตราการไหลและค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
- 1.3.3 วัดปริมาณความเข้มข้นของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลือในน้ำตัวอย่างด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) แล้วนำข้อมูลที่ได้มาประเมินประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล
- 1.3.4 คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด และคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งพิมพ์เท่านั้น

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิล โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง
- 1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการนำระบบไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก
- 1.4.3 ทราบค่าใช้จ่ายเบื้องต้นโดยประมาณ ในการกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลจากน้ำเสียอุตสาหกรรมขนาดเล็ก โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทองแดง (สมชาย พวงเพิกคิก และคณะ, 2554: ออนไลน์)

##### 2.1.1 โลหะวิทยาของทองแดง

ทองแดงเกิดขึ้นตามธรรมชาติในรูปของทองแดงบริสุทธิ์หรือสินแร่ โดยรวมตัวอยู่กับหิน ททราย ดินหรือดินเหนียว สินแร่ทองแดงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. ทองแดงบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ ซึ่งมีทองแดงอยู่ถึงร้อยละ 99
2. แร่ซัลไฟด์ (Sulfide Ores) ทองแดงรวมตัวกับกำมะถันเป็นทองแดงซัลไฟด์ในแร่บางชนิดอาจมีธาตุอื่น เช่น ดีบุกหรือเหล็กปนอยู่ด้วย สินแร่ทองแดงในรูปของซัลไฟด์ที่สำคัญๆ แร่เหล่านี้มีทองแดงอยู่ร้อยละ 40 ถึง 80
3. แร่ออกไซด์ (Oxide Ores) ทองแดงรวมตัวกับออกซิเจนอยู่ในรูปของออกไซด์ ซึ่งมีทองแดงอยู่ร้อยละ 45 ถึง 89

ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรมเป็นที่สองรองจากเหล็ก เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงและเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงใช้ทำอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ทองแดงมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ต่ำ จึงเป็นสื่อไฟฟ้าอย่างดีและถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น สายไฟฟ้า วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เครื่องจักรกล และอาวุธยุทโธปกรณ์ต่างๆ

ทองแดงเป็นโลหะที่ทนต่อการสึกกร่อนตามธรรมชาติได้ดีมาก นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบสำคัญของโลหะผสม (Alloys) อีกหลายชนิด เช่น ทองเหลือง (Brass) หรือทองบรอนซ์ (Bronze)

##### 2.1.2 ความเป็นพิษของทองแดง (ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา, 2554: ออนไลน์)

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับ ช่องทางที่ได้รับ และสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูด

กลับเข้าสู่ร่างกายได้ โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่บริเวณตับและสมอง

เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ การทำงานของหัวใจผิดปกติ เกิดอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน ทำให้ตับเกิดการบวมพองและไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson Diseases คือ ร่างกายสั่งอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูก น้ำลายไหล และควบคุมการพูดลำบาก

## 2.2 โครเมียม

### 2.2.1 โลหะวิทยาของโครเมียม

โครเมียมมีสถานะเป็นของแข็ง เป็นธาตุในหมู่ 6 ของตารางธาตุ เป็นโลหะมันวาวสีเทา ที่สามารถขัดเป็นในได้ดี และมีจุดหลอมเหลวสูง ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และสามารถตีขึ้นรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ มีการนำโครเมียมและสารประกอบโครเมียมมาใช้หลายประเภท เช่น การชุบโลหะ, ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์, ผลิตเม็ดสี, ชุบเครื่องประดับ, การย้อมผ้า เป็นต้น มีสถานะออกซิเดชันหลายสถานะที่พบมากที่สุด คือ โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โดยที่โครเมียม (III) เป็นสถานะที่มีความเสถียรมากที่สุด ส่วนสถานะโครเมียม (VI) มีความเป็นพิษสูงสุด

### 2.2.2 ความเป็นพิษของโครเมียม (สุรางค์ อนุกุล, 2542)

ความเป็นพิษของโครเมียมและสารประกอบโครเมียม สามารถแบ่งออกเป็นความเป็นพิษแบบเฉียบพลันและความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน มักพบในกรณีได้รับโดยการกินเฮกซะวาเลนท์โครเมียม เช่น กรดโครมิก ทำให้เกิดการระคายเคือง ทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง เป็นอันตรายต่อกระเพาะอาหารและลำไส้ ไตวายเสียชีวิตได้ ปริมาณเฮกซะวาเลนท์โครเมียมที่ทำให้เสียชีวิตได้ในผู้ใหญ่ คือ 1-3 กรัม

ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง มักพบในคนงานที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมและสารประกอบโครเมียมเป็นเวลานานๆ มีความเป็นพิษต่อผิวหนังและทางเดินหายใจ มักมีสาเหตุจากการสัมผัสสะเก็ดเวลาเลนที่โครเมียมเป็นระยะเวลาสั้นๆ ทำให้เกิดแผลเรื้อรังได้ โดยบริเวณที่สัมผัสมักได้แก่ มือและแขน ระบบทางเดินหายใจเกิดการระคายเคืองต่อเยื่อปอดอักเสบ ตาแดง น้ำตาไหล น้ำมูกไหล คัดและแสบจมูก ในกรณีที่รุนแรงอาจเกิดแผลเรื้อรังในเยื่อจมูกจนเกิดผนังจมูกทะลุได้ และเป็นสารก่อให้เกิดมะเร็ง (carcinogenicity) โดยหน่วยงาน The International Agency for Research on Cancer (IARC) และ US Toxicology Program จัดสะเก็ดเวลาเลนที่โครเมียมเป็น human carcinogen เพราะมีความสามารถในการละลายน้ำที่ดี ในคนงานที่ทำงานสัมผัสกับสะเก็ดเวลาเลนที่โครเมียมเป็นเวลามากกว่า 30 ปีขึ้นไป จะมีความเสี่ยงสูงในการเกิดโรคมะเร็ง และพบว่าเป็นโรคมะเร็งปอดมากกว่าโรคมะเร็งชนิดอื่น

## 2.3 นิกเกิล (สุรางค์ อนุกุล, 2542)

### 2.3.1 โลหะวิทยาของนิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความต้านทานต่อการเกิดออกซิเดชันและการกัดกร่อนสูง เป็นโลหะที่มีสีขาวสวยงาม มีความเหนียวและอ่อนตัวสูง สามารถขึ้นรูปเย็นได้โดยง่าย มีความคล้ายกับเหล็กในด้านความเหนียวและความแข็งแรงมากกว่าเหล็ก มีความคล้ายกับทองแดงในด้านการเกิดสารประกอบออกไซด์ ซึ่งจะไม่เกิดที่อุณหภูมิห้องแต่จะเกิดเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 700 ถึง 800 องศาเซลเซียส นอกจากนี้นิกเกิลสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายของแข็งที่มีความเหนียว ประมาณร้อยละ 60 ของนิกเกิลจะใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม ส่วนที่เหลือจะใช้ทำโลหะนิกเกิลผสมที่ใช้ในงานพิเศษที่ทนการกัดกร่อนสูงๆ และใช้เคลือบผิวเหล็ก (Electroplating) โดยอาศัยคุณสมบัติทนการกัดกร่อนและให้สารละลายของแข็งได้ง่าย เมื่อพิจารณาคุณสมบัติเชิงกล จะพบว่ามีความสมบัติเทียบเท่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ ที่เหนือกว่าตรงที่สามารถรักษาความเหนียวได้ดีในช่วงอุณหภูมิต่ำ คุณสมบัติตัวนำไฟฟ้าของนิกเกิลจะสูงไม่เท่าทองแดงและอะลูมิเนียม ในบรรยากาศใช้งานถ้ามีแก๊สของกำมะถันอยู่ด้วยจะมีส่วนทำให้นิกเกิลขาดความต้านทานที่ดี และอาจเปราะแตกง่าย ส่วนใหญ่จะไม่ใช้นิกเกิลในสภาพโลหะบริสุทธิ์ เพราะนิกเกิลมีราคาสูงเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ จะใช้ในลักษณะโลหะผสมและกรณีที่มีความจำเป็นเพื่ออาศัยคุณสมบัติพิเศษของนิกเกิลเท่านั้น

### 2.3.2 ความเป็นพิษของนิกเกิล

นิกเกิลอาจถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายทางการหายใจ ผิวหนัง และทางเดินอาหาร ภาวะพิษของนิกเกิลเกิดจากการรับสัมผัสทางการหายใจและจากอาชีพเป็นหลัก โดยความสามารถในการถูกดูดซึมขึ้นกับความสามารถในการละลายในน้ำของสารประกอบนิกเกิล สารที่ละลายน้ำได้ดี ได้แก่ นิกเกิลคาร์บอนิล ซึ่งเป็นสารประกอบที่ถูกดูดซึมได้ดีกว่าสารประกอบที่ละลายในน้ำได้ไม่ดี เช่น นิกเกิลออกไซด์และนิกเกิลซัลไฟด์ โดยนิกเกิลถูกกำจัดจากร่างกายทางปัสสาวะ

การสัมผัสนิกเกิลคาร์บอนิลทางการหายใจจะทำให้เกิดอาการไข้ ไอ เจ็บหน้าอก หายใจลำบาก และปวดศีรษะ หลังจากนั้น 12 ถึง 36 ชั่วโมง อาจเกิดภาวะปอดอักเสบเฉียบพลัน ซึ่งอาจทำให้ผู้ป่วยเสียชีวิตจากภาวะการหายใจล้มเหลว การฟื้นตัวจากภาวะปอดอักเสบนี้ใช้เวลาหลายสัปดาห์ถึงหลายเดือน ซึ่งผู้ป่วยจะยังคงมีอาการอ่อนเพลียและเหนื่อยง่ายในระยะยาว

การสัมผัสนิกเกิลที่ผิวหนัง อาจทำให้เกิดภาวะผิวหนังอักเสบเป็นผื่นสัมผัส (Contact Dermatitis) หรือเป็นผื่นแพ้ในส่วนอื่นๆ ของร่างกาย ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาภูมิแพ้ ผู้ป่วยที่แพ้จะเกิดผื่นได้แม้สัมผัสนิกเกิลเพียงเล็กน้อย

ผู้ที่ดื่มน้ำที่มีการปนเปื้อนนิกเกิลอาจมีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดมวนท้อง และท้องเสีย มีรายงานอุบัติการณ์ของมะเร็งในโพรงจมูกและที่ปอดเพิ่มขึ้นในกลุ่มคนงานที่รับสัมผัสนิกเกิล

### 2.4 น้ำเสียอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545 และมันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

น้ำเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภท น้ำเสียส่วนใหญ่มักเป็นน้ำล้างจากกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การล้างถัง หรือภาชนะที่ใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้น้ำเสียมีสิ่งเจือปนจากวัตถุอันตราย

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนับว่ามีความสกปรกสูงกว่าน้ำเสียจากชุมชน ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จึงตั้งอยู่นอกเทศบาล เพื่อลดความเดือดร้อนรำคาญต่อชาวบ้านข้างเคียง น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบหลักสามารถบำบัดได้ง่าย เช่น โรงงานแปรรูปอาหาร เครื่องดื่ม โรงงานฟอกย้อม และโรงฆ่าสัตว์ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทจะบำบัดได้ยาก เนื่องจากมีโลหะหนักหรือ

สารประกอบบางชนิดปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียด้วย เช่น โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โรงงานปิโตรเคมี และ โรงงานชุบโลหะ

## 2.5 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน ในการพิจารณาว่าจะเลือกใช้กระบวนการใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ คือ ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำทิ้งที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องใช้ในการบำบัดทั้งหมด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและตรวจสอบคุณภาพ ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่หรือกากที่ต้องกำจัด โดยวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่

### 2.5.1 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยไอออนของโลหะจะเกิดการรีดักชันที่ขั้วของแคโทด โดยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดมักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยขั้วแคโทดมักจะทำด้วยเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม และแผ่นผ้าคาร์บอน ส่วนขั้วแอโนดมักจะทำด้วยแพลทินัม ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ ตะกั่ว และแกรไฟต์ การแยกด้วยไฟฟ้าจะทำได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแยกเกิดได้ดีขึ้น 故ที่ใช้ในการแยกควรจะทำให้มีน้ำกระเพื่อมหรือมีการกวน เพื่อให้แน่ใจว่าเกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ดีขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่ของแคโทดและแอโนด และอัตราการเคลื่อนย้ายมวล ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเข้าเกาะของโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งเหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำไปขาย โดยประสิทธิภาพของระบบนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง

สำหรับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว ก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต้องมีค่าพารามิเตอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

## ตารางที่ 2.1 มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH Value)	5.5 - 9.0
2. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. สังกะสี ( $Zn^{2+}$ )	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium, $Cr^{3+}$ )	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
4. โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Trivalent Chromium, $Cr^{6+}$ )	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
6. ทองแดง ( $Cu^{2+}$ )	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
7. นิกเกิล ( $Ni^{2+}$ )	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

กระบวนการเคมีไฟฟ้าเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะได้ดี โดยไอออนโลหะในน้ำเสียจะถูกกำจัดอยู่ในรูปของโลหะบนขั้วไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งเป็นวิธีที่จะใช้ในการศึกษาการกำจัดทองแดงและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้ ดังนั้นจะขอกล่าวรายละเอียดของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

### 2.5.2 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของสารที่ละลายได้ ไปอยู่ในรูปที่ไม่ละลาย โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี โลหะหนักในน้ำเสียมักจะอยู่ในรูปของสารละลาย ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกจากน้ำได้ด้วยวิธีตกตะกอนหรือกรองเพียงอย่างเดียว จึงจำเป็นต้องทำให้เกิดการตกตะกอนของแข็งก่อน จากนั้นจึงทำให้ตะกอนของแข็งรวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อให้สามารถแยกออกจากน้ำได้

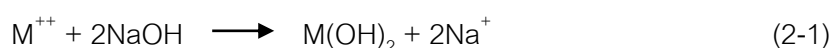
ในการตกตะกอนต้องพิจารณาถึงค่าพีเอช หลังการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีแล้ว โดยทั่วไปจะมีพีเอชที่สูงกว่า 7 จึงจะได้ผลดี และพบว่าในแต่ละมลสารจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมแตกต่างกัน ดังนั้นในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึงพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

สารเคมีที่นิยมใช้ในการปรับพีเอช ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ( $CaO$ ) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $NaOH$ ) แคลเซียมออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีราคาถูก แต่ละลายน้ำได้น้อย

นอกจากนี้ยังทำให้ตกผลึกในรูปของหินปูน ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนมาก ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ นั้นมีราคาแพงกว่าและเกิดอันตรายได้มากกว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ แต่ในการใช้งานจะใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า จึงทำให้เกิดตะกอนน้อยกว่า

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลาย น้ำต่ำแล้วอาจทำการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายน้ำมีค่าลดลง โดยการปรับค่าพีเอชหรือเปลี่ยนอุณหภูมิ เพื่อให้สารประกอบโลหะนั้น มีความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยการเติมสารเคมี คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ลงไปทำปฏิกิริยากับโลหะไอออนที่อยู่ในสารละลาย และจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2-1 โดย  $\text{M}^{++}$  คือ โลหะไอออน



การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง (Amphoteric property) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชที่กว้าง ซึ่งโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชในน้ำเสียเปลี่ยนจากค่าที่โลหะหนักสามารถตกตะกอนเป็นผลึกโลหะไฮดรอกไซด์ได้

ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ผ่านการบำบัด ด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในน้ำเสีย ชนิดของสารตกตะกอนที่ใช้ สภาพวะที่เกิดปฏิกิริยาโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าพีเอช และสารอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำเสียซึ่งอาจเป็นตัวยับยั้งการตกตะกอน (Freeman, 1989)

## 2.6 กระบวนการเคมีไฟฟ้า

กระบวนการเคมีไฟฟ้าจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองครึ่งเซลล์ ครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนและอีกครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน โดยครึ่งเซลล์อันหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายของไอออนโลหะนั้น นำครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองชนิดมาประกอบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้าโดยต่อสารละลายทั้งสองด้วยสะพานเกลือ

(Salt Bridge) นอกจากนี้เซลล์เคมีไฟฟ้าอาจไม่ใช่สะพานเกลือ โดยให้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มในสารละลายเดียวกัน เซลล์เคมีไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ คือ

### 2.6.1 เซลล์กัลวานิก (Galvanic Cell)

ทำหน้าที่ให้พลังงานไฟฟ้า เป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ เกิดการไหลของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าภายนอก ตัวอย่างของเซลล์กัลวานิก เช่น เซลล์เชื้อเพลิงและเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

#### 1. เซลล์ปฐมภูมิ (Primary Cell)

เซลล์ปฐมภูมิ หมายถึง เซลล์ที่ผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาเคมี เมื่อปฏิกิริยาภายในเซลล์เกิดขึ้นและดำเนินไปข้างหน้าจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับอีกไม่ได้ เซลล์ประเภทนี้เมื่อสร้างเสร็จแล้วสามารถนำไปใช้ได้ทันที เมื่อเริ่มปฏิกิริยาในเซลล์ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์ ในที่สุด ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองจะเท่ากัน เรียกว่า เซลล์อยู่ในภาวะสมดุล เซลล์ประเภทนี้เมื่อใช้หมดแล้วจะนำมาอัดไฟใหม่ไม่ได้ เช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์แอลคาไลน์ และเซลล์ปรอท ซึ่งเซลล์เหล่านี้มีรูปแบบของเซลล์ต่างกันแต่มีหลักการทำงานเดียวกัน

#### 2. เซลล์ทุติยภูมิ (Secondary Cell)

เซลล์ทุติยภูมิ หมายถึง เซลล์ที่สร้างเสร็จแล้วยังไม่มีกระแสไฟฟ้า ก่อนการนำไปใช้งานต้องทำการอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปก่อน เมื่อกระแสไฟฟ้าหมดก็สามารถนำมาอัดไฟใหม่และนำกลับไปใช้ได้อีกเป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ตัวอย่างเซลล์ทุติยภูมิ เช่น แบตเตอรี่โทรศัพท์เคลื่อนที่และแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด

### 2.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic Cell)

เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็นการแยกหรือ



สังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์โลหะอะลูมิเนียม การแยกของโลหะเงินหรือทอง และการชุบโลหะ

ในการใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น โดยเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

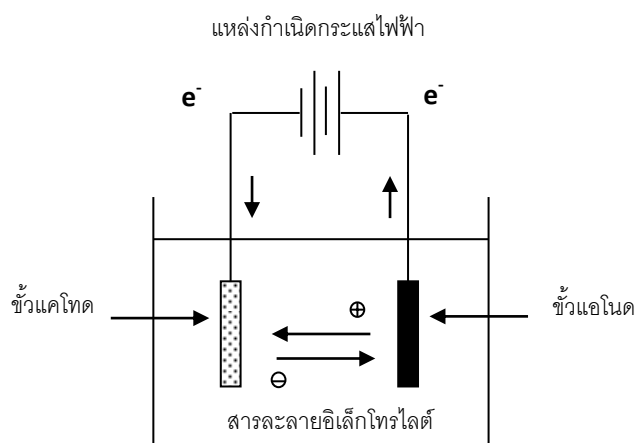
หลักการทำงานของเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะเกิดขึ้นเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงไหลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น โดยขั้วไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนไหลลงไปขั้วจะแสดงคุณสมบัติเป็นขั้วลบ (Negative Electrode) เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบมีจำนวนมากขึ้น และเรียกขั้วลบนี้ว่าขั้วแคโทด (Cathode) โดยขั้วแคโทดนี้จะต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในทางตรงกันข้าม แหล่งกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายอิเล็กตรอนให้กับขั้วหนึ่งก็จะต้องมีการดูดอิเล็กตรอนจากขั้วตรงข้ามขึ้นมา ทำให้ขั้วเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนจึงแสดงอำนาจเป็นประจุบวก (Positive Electrode) และเรียกขั้วบวกนี้ว่า ขั้วแอโนด (Anode) โดยขั้วแอโนดนี้จะต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่

การที่จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ได้ จะต้องมีการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) โดยจะมีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกันบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดครึ่งปฏิกิริยาที่แต่ละขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2-2) ส่วนขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่าขั้วแคโทด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2-3) องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้างแสดงในภาพที่ 2.1 และการเกิดครึ่งปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้รับจะต้องเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่เสียไปเสมอ

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด



ภาพที่ 2.1 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (วรรณรัตน์ วัฒนชัย, 2547)

เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์ติกเซลล์เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก ความยากง่ายในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนที่อยู่ในสารละลายนั้น ซึ่งสามารถดูได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่า  $E^0$  ถ้าสารละลายอยู่ในสภาวะมาตรฐาน ในกรณีของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดการแข่งขันในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของไอออนต่างๆ ในสารละลายและโมเลกุลของน้ำ ในการพิจารณาจะแยกอธิบายการแข่งขันในการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทดและแอโนดออกจากกันดังนี้

ปฏิกิริยาที่แคโทด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิดได้ 2 กรณี คือ

1. ไอออนบวกกฏรีดิวซ์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น ไอออนโลหะกฏรีดิวซ์เป็นโลหะ
2. โมเลกุลของน้ำอาจกฏรีดิวซ์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน และไฮดรอกไซด์ไอออน

ปฏิกิริยาที่แอโนด เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจเกิดได้ 2 กรณี คือ

1. ไอออนลบถูกออกซิไดซ์เป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น คลอไรด์ไอออนเป็นแก๊สคลอรีน
2. โมเลกุลของน้ำอาจถูกออกซิไดซ์ให้เป็นโมเลกุลของออกซิเจนและไฮโดรเจนไอออน

ในการทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์อิเล็กโทรไลติกนั้น อาจแยกพิจารณาเป็นปฏิกิริยาที่แอโนดและปฏิกิริยาที่แคโทด หรือพิจารณาปฏิกิริยารวมของทั้งสองครึ่งปฏิกิริยาว่าคู่ใดที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยที่สุด ปฏิกิริยาคู่หนึ่งจะเกิดขึ้นก่อนซึ่งการพิจารณาทั้งสองแบบนี้มีความจำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยา และหากทราบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวแล้วจะทำให้การทำนายมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ลักษณะรูปร่างและสภาวะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ลักษณะการถ่ายโอนมวลไปยังขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของไอออนที่ผิว ชนิดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารอื่นๆ ที่ปนอยู่ในสารละลาย เช่น ตัวทำละลาย ค่าพีเอชของสารละลาย ค่าการนำไฟฟ้า ความเร็วจำกัดของไอออนในสารละลาย ค่าศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความดัน และเวลา

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าเกิดจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดและความต้านทานภายในเซลล์ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (2-4)

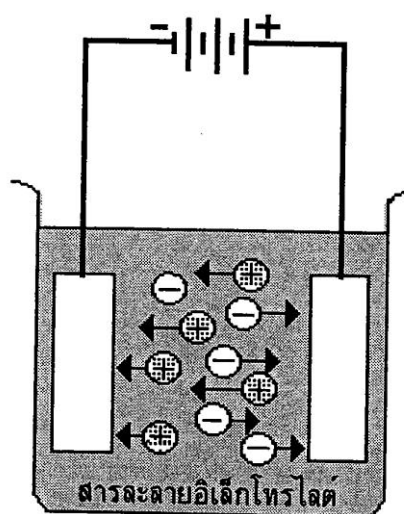
$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathod}} - E_{\text{anod}} - IR \quad (2-4)$$

### 2.6.3 การนำพาไอออนในสารละลาย

ไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ด้วย 3 กลไกด้วยกันคือ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และคอนเวกชันหรือการพา (Convection) กระบวนการนำพาไอออนทั้งสามกลไกนี้ เกิดขึ้นทั้งกับขั้วแอโนดและขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นเองกับไอออนในสารละลายหรือถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ ขึ้นกับเทคนิคการวิเคราะห์นั้นๆ

### 1. ไมเกรชัน (Migration)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกเคลื่อนเข้าหาขั้วลบและไอออนลบเคลื่อนไปทางขั้วบวก ดังภาพที่ 2.2 ความเร็วของการที่ไอออนเคลื่อนเข้าหาหรือเคลื่อนออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้นเพิ่มหรือลดไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนอื่นที่มีประจุชนิดเดียวกับไอออนที่ต้องการอยู่ในสารละลายด้วย จะเกิดการแย่งกันเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรนั้นเนื่องจากไอออนที่ต้องการจะลดลงไปด้วย เช่น การที่สะพานเกลือเป็นสารละลายของโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นมากกว่าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ 50 ถึง 100 เท่า ทำให้ทั้งโพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) และคลอไรด์ไอออน ( $Cl^-$ ) แย่งเคลื่อนเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าแทนไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ เกิดผลดีคือ ทำให้ไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบไมเกรชันแต่เคลื่อนที่แบบการแพร่แทน

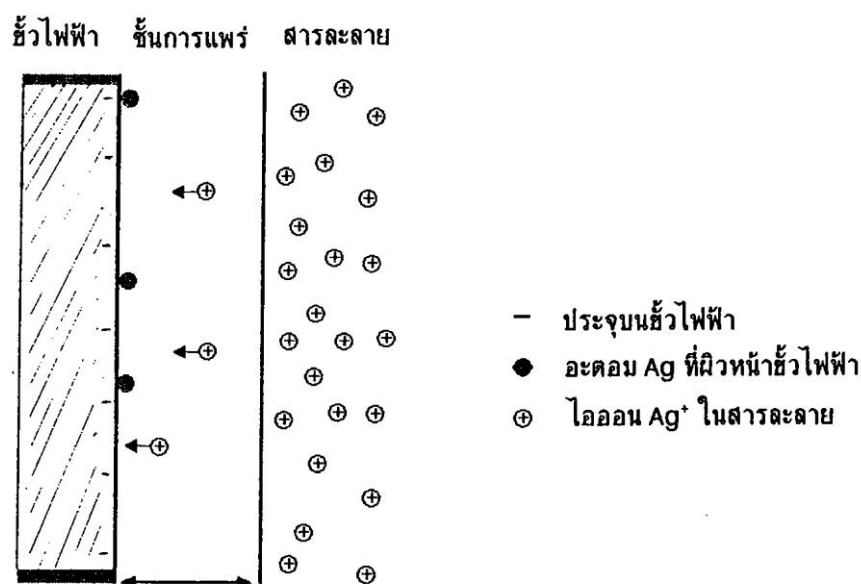


ภาพที่ 2.2 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

### 2. การแพร่ (Diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น อัตราความเร็วของการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เช่น การพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดในสารละลายที่ประกอบด้วยไอออนเงิน ( $Ag^+$ ) ในความเข้มข้นที่มากกว่าที่ผิวหน้าของ

ขั้วไฟฟ้าจึงเกิดการแพร่ของไอออนเงินในสารละลาย และที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าต่างกันมากการแพร่ก็ยิ่งเกิดอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่  
(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

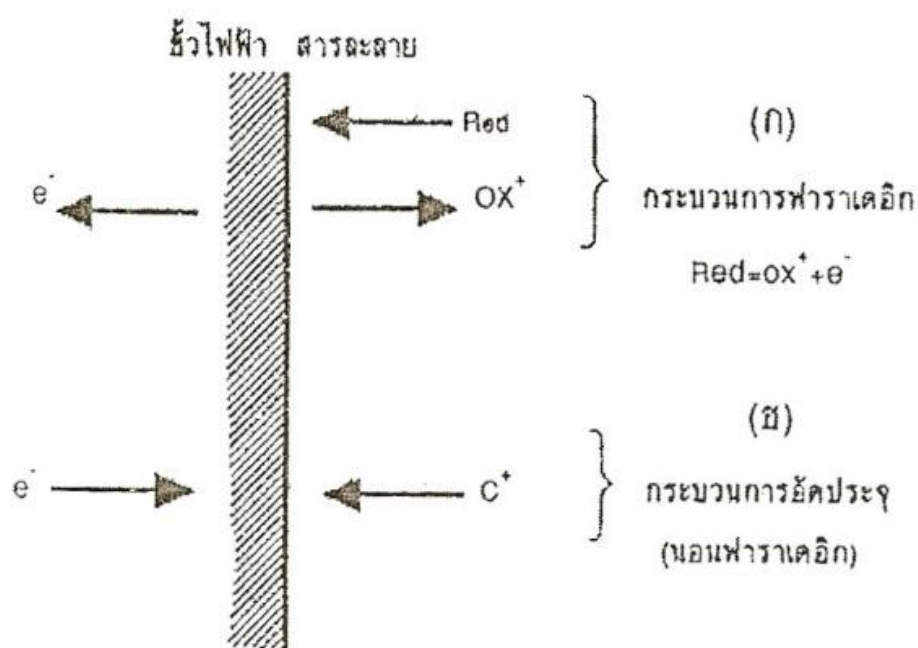
### 3. คอนเวกชันหรือการพา (Convection)

การที่ไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความหนาแน่นของสารละลายหรือด้วยกลไกภายนอก เช่น การคนหรือเขย่าสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนตัวของไอออนภายในสารละลาย

#### 2.6.4 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและจ่ายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic Process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการดังกล่าวที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์เคมีไฟฟ้านั้นได้เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic Current) ดังภาพที่ 2.4 (ก)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้ที่บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้า ไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้น แต่ก็ เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Non - Faradaic Process) กระแสไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า กระแสนอนฟาราเดอิก (Non - Faradaic Current) ดังภาพที่ 2.4 (ข)

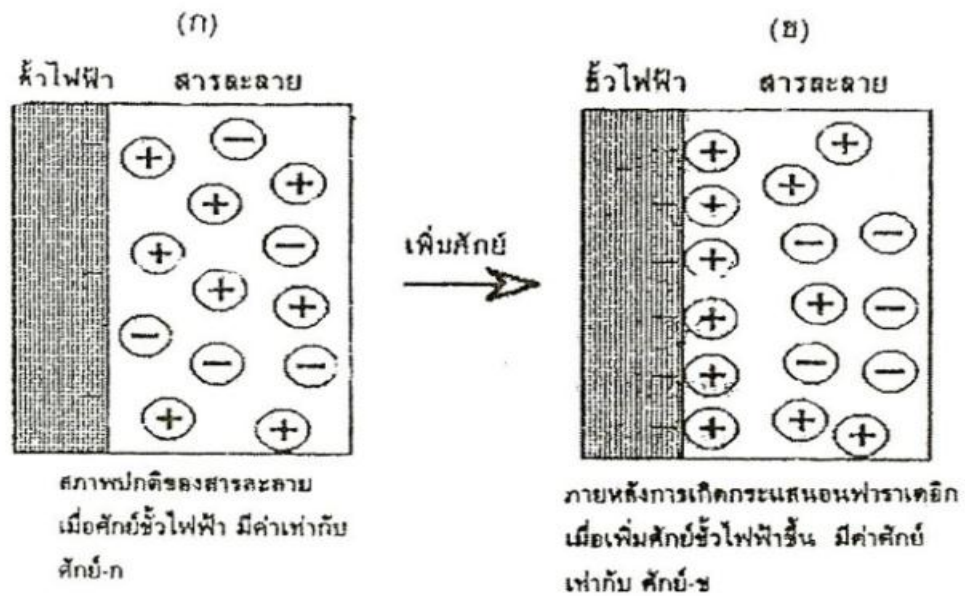


ภาพที่ 2.4 (ก) กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า กระบวนการฟาราเดอิก

(ข) กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก

(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้า แต่ขึ้นกับสภาวะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่ ตัวอย่างกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้างดภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 (ก) ก่อนการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก

(ข) หลังการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก

(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

ในภาพที่ 2.5 (ก) เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์-ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้น โดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลายมาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆ ในสารละลายมีการกระจายตัวในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้ เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้าดังในภาพที่ 2.5 (ข) สมมุติให้เท่ากับ-ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์-ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ทันที โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่งกระแสไฟฟ้าก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสไฟฟ้าที่ไหลชั่วขณะหนึ่งเรียกว่า กระแสไฟฟ้าจากการอัดซึ่งเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนฟาราเดอิกเป็นฟาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้โดย

1. ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้
2. ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนฟาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสฟาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารตีโพลาริเซชันและขั้วไฟฟ้าขณะนี้ถูกเรียกว่า ขั้วตีโพลาริเซชัน

ในการวิเคราะห์การเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรอย่างต่อเนื่องและสัมพันธ์กับความต่างศักย์ของวงจร ขึ้นกับความต่อเนื่องของการดำเนินไปของปฏิกิริยาการรับและจ่ายอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ถ้าปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลง ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าย่อมเปลี่ยนไปด้วย เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ว่า โพลาริเซชัน ขณะที่เกิดโพลาริเซชันขั้วไฟฟ้าถูกโพลาริเซชัน ทำให้กระแสไฟฟ้าในวงจรลดลง การที่จะทำให้โพลาริเซชันหมดไปจำเป็นต้องมีการเพิ่มหรือให้ศักย์ไฟฟ้าแก่วงจรนั้นๆ เพื่อช่วยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ ส่วนเกินของศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่วงจรนี้ มีชื่อเรียกเฉพาะว่า ศักย์เกินตัว (Overpotential Overvoltage)

### 2.6.5 โพลาริเซชัน

โพลาริเซชัน หมายถึง สภาพของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ต้องการ ( $E_{\text{applied}}$ ) เพื่อที่จะให้เกิดกระแสไฟฟ้า  $i$  แอมแปร์ ในวงจรที่มีค่ากระแสไฟฟ้ามากผิดไปจากความต้องการ โดยเฉพาะในบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรค่อนข้างสูง ค่า  $E_{\text{applied}}$  ที่ต้องการเพิ่มขึ้นจากค่าที่วัดได้ โดยจะเรียกค่า  $E$  ที่เพิ่มขึ้นนี้ว่า  $E_{\text{overvoltage}}$  หรือ  $E_{\text{overpotential}}$

โพลาริเซชันอาจเกิดขึ้นได้ทั้งสองขั้วไฟฟ้าในเซลล์เดียวกันขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้

- ขนาดและรูปร่างและองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้า
- องค์ประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- อุณหภูมิและอัตราเร็วในการกวนสารละลาย



- ความหนาแน่นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สมบัติทางกายภาพของสาร

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

### 1. โพลาริเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration Polarization)

เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่ง สารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้นหรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็น ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลายและขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลาย จะมีส่วนทำให้เกิดโพลาริเซชันขึ้นไม่มากนักน้อย ซึ่งผลของการเกิดโพลาริเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจรเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรเป็นไปตามปกติ

### 2. โพลาริเซชันแบบจลน์ (Kinetic Polarization)

เกิดขึ้นจากการชะลอลงของการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออน จะส่งผลต่อการเกิดโพลาริเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จะช่วยลดการเกิดโพลาริเซชันแบบที่กล่าวไว้ได้

## 2.6.6 กฎฟาราเดย์

ใน ค.ศ.1834 ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้ากับปริมาณสารที่เกิดขึ้นในการแยกสลายด้วยไฟฟ้าและกล่าวว่า

1. ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นปฏิภาคกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลาย
2. ปริมาณสารแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยการผ่านไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเป็นปฏิภาคกับน้ำหนักสมมูลของสาร

จากกฎฟาราเดย์สามารถคำนวณหาประจุได้ดังสมการที่ 2-5)

$$Q = \int_0^t I dt = mnF \quad (2-5)$$

โดย	Q	คือ จำนวนประจุ (คูลอมบ์)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	t	คือ ช่วงเวลาในการทำปฏิกิริยา (วินาที)
	m	คือ จำนวนโมลของสารตั้งต้นที่เปลี่ยนไป (กรัมโมล)
	n	คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา (อิเล็กวาเลนซ์ต่อกรัมโมล)
	F	คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่ออิเล็กวาเลนซ์)

### 2.6.7 ประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า (Current Efficiency)

ในการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการเคมีไฟฟ้า นิยมวัดจากค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้เพราะกระแสไฟฟ้าเป็นต้นทุนที่มีมูลค่าสูงที่สุด ดังนั้นกระบวนการที่สามารถใช้กระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นกระบวนการที่ดี ซึ่งประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าหาได้จากมวลที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2-6)

$$\text{Current Efficiency (t)\%} = \frac{nF(C_o - C_t)V}{\int_0^t I(t)dt} \times 100 \quad (2-6)$$

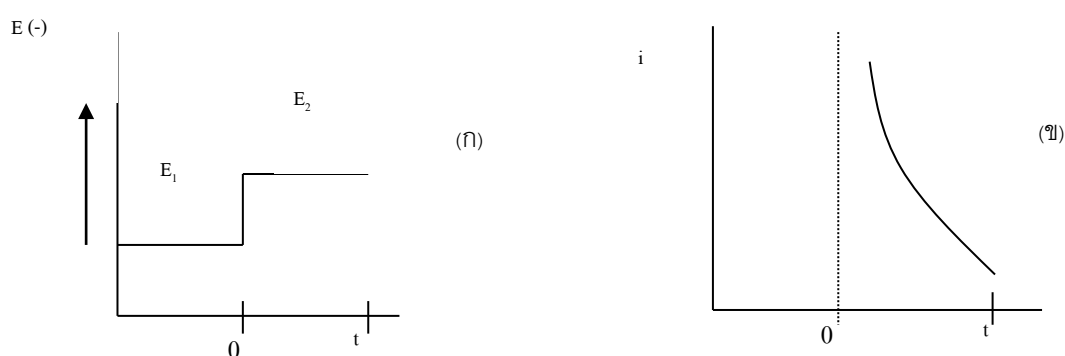
โดย	n	=	ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่ออิเล็กวาเลนซ์)
	C <sub>o</sub>	=	ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมลต่อลิตร)
	C <sub>t</sub>	=	ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมลต่อลิตร)
	V	=	ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)
	I(t)	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

## 2.7 วิธีการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า

จากหลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้าที่มีความเกี่ยวข้องของหลักการทางไฟฟ้าและหลักการทางเคมี ดังนั้นการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า จึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่และการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งหลักการควบคุมในแต่ละแบบมีดังนี้

### 2.7.1 การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Controlled - Potential Method or Potentiostatic Mode)

หลักการของการควบคุมนี้คือ การควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ในกระบวนการให้มีค่าคงที่ ซึ่งจะส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิวของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของไอออนของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จาก  $E_1$  เป็น  $E_2$  ที่ขั้วแคโทด



ภาพที่ 2.6 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

(Friedrich, 1962)

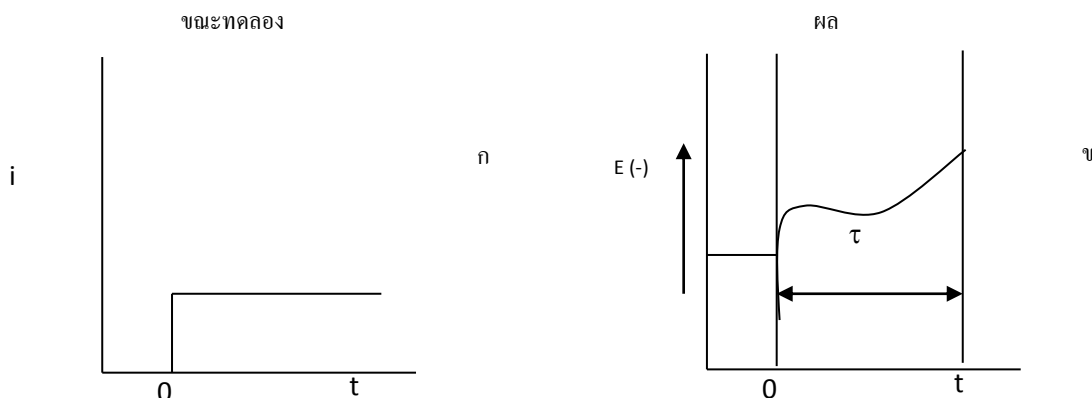
$E_1$  คือ ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ  $E_2$  คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น Diffusion Limited Rate หรือ Mass Transfer Limited ซึ่งตัวออกซิไดซ์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังภาพที่ 2.6 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ( $i = kC$ )

### 2.7.2 การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ (Controlled – Current Method or Galvanostatic Mode)

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric Technique โดยการควบคุมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วไฟฟ้าคงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้สารออกซิไดซ์ ( $M^{n+}$ ) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (2-7)



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง  $M^{n+}/M$  ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ  $M^{n+}$  ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยที่กระแสไฟฟ้าคงที่เรียกว่า Transition Time ( $\tau$ ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่  
 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่  
 (Friedrich, 1962)

## 2.8 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ในแต่ละครึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญคือ ขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า โดยในเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ จะต้องประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วคือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งในแต่ละขั้วนั้น จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ไม่เหมือนกัน นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้ายังสามารถแบ่งได้ตามหน้าที่ภายในเซลล์ ได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode) มีหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับสื่อภายนอก แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงถูกต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า เพื่อใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน
3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary Electrode) ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือ กระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน

วัสดุที่เลือกนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม เฮลิกซ์คาร์บอน และ แกรไฟต์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า

โดยแกรไฟต์เป็นอีกรูปหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะที่บดเสง และเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แต่จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าได้น้อย

ในขณะเดียวกันคาร์บอนเป็นตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ที่เฉื่อย ซึ่งมีประโยชน์ในการทำเป็นขั้วไฟฟ้า หรือเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้แก่วัสดุชนิดอื่นๆ นอกจากนี้คาร์บอนยังมีราคาถูกและหาได้ง่ายในรูปแบบต่างๆ อีกด้วย ในสภาพของแข็งคาร์บอนทำให้อยู่ในรูปแบบแท่งทรงแท่งหรือเป็นแผ่นก็ได้ นอกจากนี้ยังทอเป็นแผ่นผ้าให้แก๊สแพร่ผ่านได้ ผงคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมาก จึงเป็นประโยชน์ต่อการใช้รองรับสารเร่งปฏิกิริยาและทำขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวสูง เนื่องจากโครงสร้างทำให้เกิดความพรุนได้โครงสร้างเป็นชั้นๆ จึงมีการนำคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นสารสอดใส่หรือเป็นตัวกลางสำหรับการเก็บไฮโดรเจน

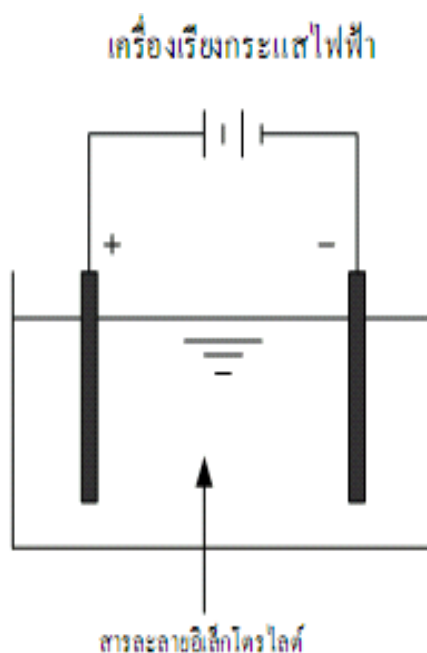
คาร์บอนเป็นหนึ่งในวัสดุที่นิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับทำขั้วไฟฟ้า ไม่ว่าจะในรูปแบบผงหรือผ้าทอ โดยมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 2,000 ตารางเมตรต่อกรัม และขนาดของรูพรุนจากน้อยกว่า 2 นาโนเมตร จนถึงมากกว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งผู้ผลิตอุตสาหกรรมสามารถปรับให้มีประสิทธิภาพการทำงานได้สูงสุด โดยการปรับแต่งอัตราส่วนระหว่างช่อง (Channels) ใหญ่ ซึ่งเป็นทางเข้าของไอออนต่อช่องที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งมีส่วนสำคัญกับพื้นที่ผิวและเพิ่มความจุ

## 2.9 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้า

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้นแต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอน ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง สำหรับการกำจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 4 รูปแบบ ดังนี้ (Mollah, 2004)

### 2.9.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar Electrode Single Cell)

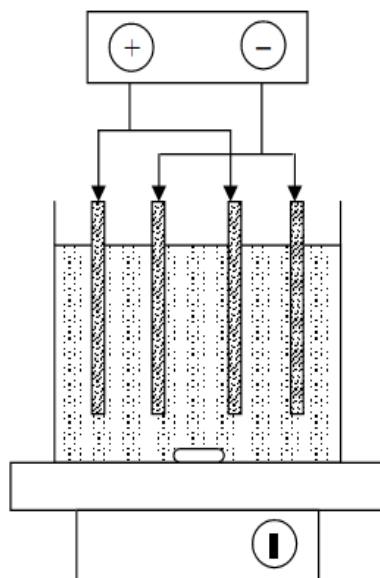
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุดคือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนด และอีกขั้วเป็นแคโทด ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งการจัดเรียงแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่และมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามาก



ภาพที่ 2.8 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Pretourius, 1991)

### 2.9.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน (Monopolar Electrode with Cell in Parallel)

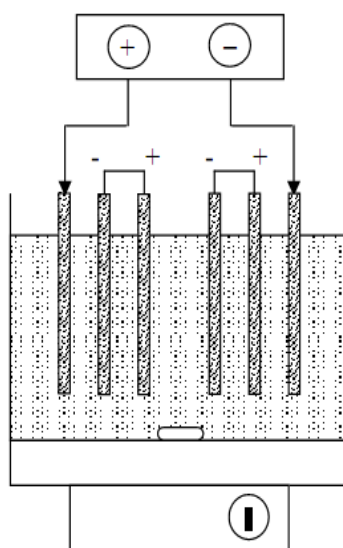
กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมโนโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวต่อขนาน ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)

### 2.9.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Monopolar Electrode with Cell in Series)

มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆ เซลล์มาต่อกัน โดยมีการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละขั้วไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.10

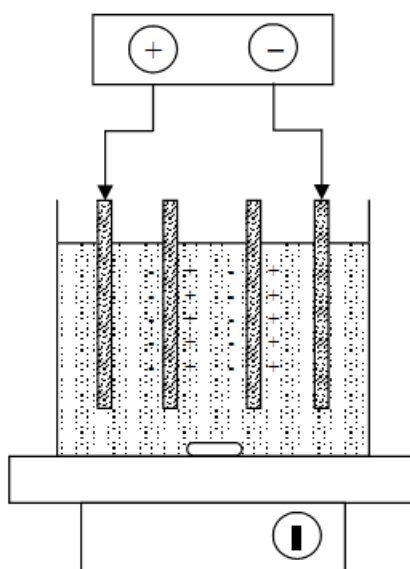


ภาพที่ 2.10 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)



#### 2.9.4 แบบไบโพลาร์ (Bipolar Electrode)

มีจุดเชื่อมของขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด ดังภาพที่ 2.11 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วลบซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วบวก ซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ในทางไฟฟ้านั้นขั้วไฟฟ้าจะมีการจัดเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะการใช้งาน



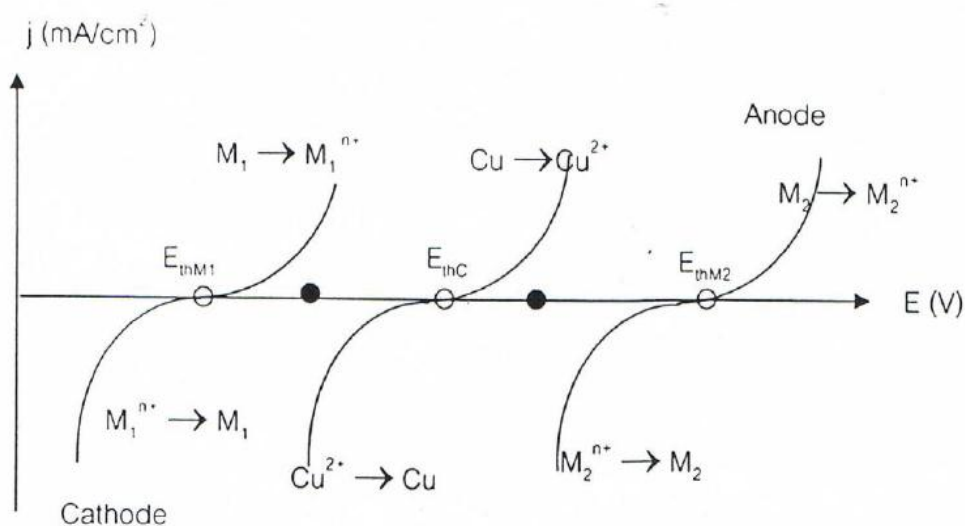
ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Chen, 2004)

#### 2.10 การแยกโลหะโดยอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้า (เก็จวลี พฤษาพร, 2548)

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนโดยใช้หลักการแยกด้วยเคมีไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าคือ การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์เคมีไฟฟ้าและเกิดปฏิกิริยาการพอกพูนของไอออนโลหะที่ขั้ว ตัวแปรที่มีผลต่อการพอกพูน ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลา และอัตราเร็วในการกวน

การแยกโลหะโดยใช้ไฟฟ้าสามารถทำได้ในรูปแบบของการแยกโลหะออกทีละชนิด (Selective Metal Deposition) หรือการแยกโลหะร่วม (Codeposition)

การแยกโลหะแต่ละชนิดจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือน้ำเสียจะใช้การพิจารณาค่า ศักย์ไฟฟ้าและกราฟโพลาริเซชันของโลหะแต่ละตัว เช่น ในสารละลายที่มีไอออนของ Cu,  $M_1$ ,  $M_2$  ซึ่งมีกราฟโพลาริเซชัน ดังภาพที่ 2.12 จะสามารถพิจารณาระบบได้ดังนี้



ภาพที่ 2.12 โพลาริเซชันของ Cu,  $M_1$ ,  $M_2$  (แก้จวลี พงกษาทรร, 2548)

1. ถ้าไอออน  $M_1$  และ  $M_2$  ไม่เป็นไอออนโลหะ พบว่า ไอออน  $M_1$  และ  $M_2$  จะไม่เกิดปฏิกิริยาการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า แต่อาจตกตะกอนหรือคงอยู่ในรูปของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

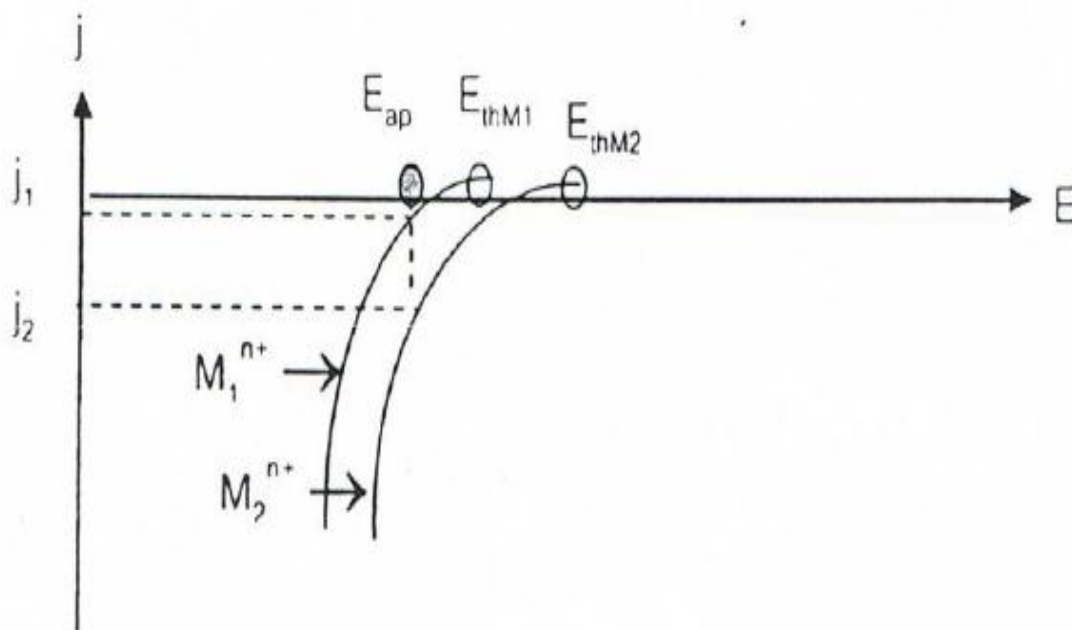
2. ถ้าไอออน  $M_1$  และ  $M_2$  เป็นไอออนโลหะ โดยมี  $E_{M_2} > E_{Cu} > E_{M_1}$  การที่จะแยกโลหะแต่ละตัวออกจากกันนั้น เริ่มแรกจะต้องแยกโลหะ  $M_2$  ก่อนเนื่องจากมีค่าศักย์รีดักชันสูงสุด โดยต้องกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่างค่า  $E_{thM_2}$  กับ  $E_{thCu}$  ก่อนเพื่อให้  $M_2$  แยกออกไปจากสารละลายทั้งหมด จากนั้นจึงเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าเป็นระหว่างค่า  $E_{thCu}$  กับ  $E_{thM_1}$  เพื่อให้แยก Cu จนหมด จากนั้นจึงแยก  $M_1$  ต่อไป โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าค่า  $E_{thM_1}$

3. ในกรณีที่ต้องการแยกโลหะจากของแข็ง ให้ใช้ของแข็งนั้นเป็นขั้วแอโนด ซึ่งขั้วนี้จะเป็นขั้วแบบละลายได้ (Soluble Anode) ถ้าของแข็งนั้นมีองค์ประกอบเป็น Cu,  $M_1$  และ  $M_2$  ถ้าต้องการแยก Cu ออกจากแอโนดและแยกโดยให้ไปพอกพูนที่แคโทด ให้ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ไม่มีไอออนของ  $M_1$ ,  $M_2$  และกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดอยู่ต่ำกว่า  $E_{thM_2}$  เพื่อไม่ให้  $M_2$  ถูกออกซิไดซ์ แต่  $M_1$  และ Cu จะถูกออกซิไดซ์ออกมาทำให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะมี  $Cu^{2+}$  และ

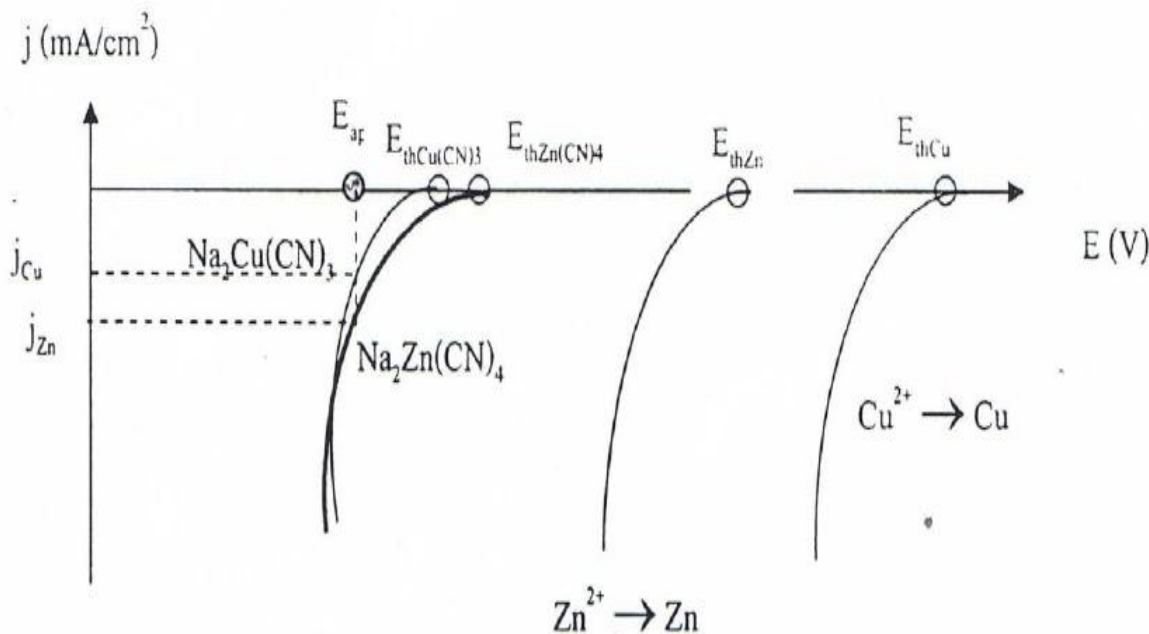
$M_1^{n+}$  เพื่อให้ Cu ไปพอกพูนที่แคโทดอย่างเดียวจึงต้องกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดอยู่ระหว่าง  $E_{Cu}$  กับ  $E_{M1}$

ในทำนองเดียวกันถ้าต้องการให้มีการแยกโลหะร่วมของโลหะหลายชนิดก็สามารถทำได้ โดยการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ขั้วไฟฟ้า ดังตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันภาพที่ 2.13 โดยแสดงเฉพาะส่วนของเส้นกราฟแคโทดิก (Cathodic Curve) หรือส่วนของปฏิกิริยารีดักชันของโลหะ  $M_1$  และ  $M_2$  ซึ่งมีค่าศักย์เกินตัวเท่ากับศูนย์ สามารถพิจารณาได้ว่า ถ้าต้องการแยกโลหะ  $M_1$  และ  $M_2$  ออกมาพร้อมกันต้องกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลของโลหะ  $M_1$  ( $E_{ap} < E_{th1}$ ) ระบบจะเกิดการพอกพูนของทั้ง  $M_1$  และ  $M_2$  ร่วมกัน

การแยกโลหะร่วมเกิดขึ้นได้ยากในบางครั้งเนื่องจากค่าศักย์สมดุลที่ต่างกันมาก ดังนั้น การลดค่าศักย์สมดุลมาให้ใกล้เคียงกันจะทำให้เกิดการแยกโลหะร่วมได้ดียิ่งขึ้น เช่น กรณีของ ทองแดงกับสังกะสี (Cu/Zn) ดังในภาพที่ 2.14 ซึ่งมีค่าศักย์สมดุลต่างกัน แต่สามารถทำให้ค่าศักย์สมดุลมาใกล้เคียงกันได้ด้วยการใช้ไอออนที่อยู่ในรูปของสารเชิงซ้อน คือ  $Cu(CN)_3^{2-}$  กับ  $Zn(CN)_4^{2-}$  ไอออนในรูปสารเชิงซ้อนจะช่วยทำให้ค่าศักย์สมดุลของสารเปลี่ยนแปลงได้



ภาพที่ 2.13 โพลาริเซชันของ  $M_1$ ,  $M_2$  (เก็จวดี พฤษาทร, 2548)



ภาพที่ 2.14 โพลาริเซชันของทองแดงกับสังกะสีและสารเชิงซ้อนของทองแดงกับสังกะสี  
(แก้จวดี พฤษชาทร, 2548)

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ฉัฐบรรณ วรรณรัตน์ (2542) ได้ทำการศึกษาผลของตัวแปรและภาวะที่เหมาะสม สำหรับการแยกนิกเกิลด้วยกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า ใช้สารละลายนิกเกิลสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1 กรัมต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ปริมาตรสารละลายเท่ากับ 1 ลิตร ขั้วแคโทดทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม พื้นที่ผิว 89 ตารางเซนติเมตร ขั้วแอโนดทำจากโลหะไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ พื้นที่ผิว 82 ตารางเซนติเมตร ผลการทดลองพบว่า ค่าพีเอชและปริมาณกระแสไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยในช่วงพีเอช 3 ถึง 3.5 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นสภาวะที่ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 32 ในการแยกนิกเกิลที่ร้อยละ 60 โดยปรับค่าพีเอชด้วยกรดซัลฟูริก และหากปรับค่าพีเอชด้วยกรดบอริกจะให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อย ในขณะที่สารลดแรงตึงผิวปนเปื้อนในน้ำเสีย ทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง โดยเฉพาะสารลดแรงตึงผิวจำพวกสารที่มีประจุลบ โดยหากมีการปนเปื้อนเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพลดลงร้อยละ 70

Fourcade และ Tzedakis (2000) ได้ทำการศึกษาถึงวิธีการทางไฟฟ้าเคมี ในการเกิดการพอกพูนของเงินจากสารละลายซิลเวอร์ไอโอไดน์บนขั้วอิเล็กโทรดเงิน ศึกษาถึงปริมาณประจุไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้และค่าของกระแส ณ จุดศักย์ต่างๆ ที่ให้แก่วงจร ได้แสดงให้เห็นถึงการดูดติดของซิลเวอร์ไอโอไดน์ที่ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้น กลไกของการเกิดการพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นได้ใน 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกซิลเวอร์ไอโอไดน์จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วอิเล็กโทรดเงินที่ค่ากระแส 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สองซิลเวอร์ไอโอไดน์สามารถเกิดปฏิกิริยาบนขั้วอิเล็กโทรดในรูปแบบของการดูดติด จะเกิดที่ค่ากระแส 31 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้นตอนที่สามเกิดปฏิกิริยาของอนุภาคของแข็งของซิลเวอร์ไอโอไดน์ ซึ่งขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนหลัก เมื่อเทียบกับในสองขั้นตอนแรกเพราะใช้ค่ากระแสมากที่สุด คือ 72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

มะลิ หุ่นสม (2544) ได้ศึกษาถึงการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เพื่อการนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โคโรเนียม และนิกเกิลจากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ การนำกลับคืนของโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้มีการพัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับของโลหะโคโรเนียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่สามเป็นการนำกลับของโลหะผสมของทองแดง โคโรเนียม และนิกเกิล จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบมีเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่า โลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัว ซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โคโรเนียม และนิกเกิล ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 90 และ 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

Rana และคณะ (2004) ได้ศึกษาการกำจัดโคโรเนียมไอออนจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าเคมี ใช้ขั้วแคโทดเป็นคาร์บอนแอโรเจล (Carbon Aerogel) โดยทำการทดลองที่พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าพีเอชเริ่มต้น 2 ถึง 7 ความเข้มข้นของโคโรเนียม 2 ถึง 8 มิลลิกรัมต่อลิตร และกระแสไฟฟ้า 0.3 ถึง 1.3 แอมแปร์ ผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้น และกระแสไฟฟ้า มีผลต่อการเคลื่อนที่ของโลหะ โดยไอออนโลหะจะเคลื่อนที่มากขึ้นเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นลดลง และกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น สภาวะการกำจัดโคโรเนียมที่ดีที่สุด คือ ค่าพีเอชเริ่มต้น 2 และกระแสไฟฟ้า 0.8 แอมแปร์ สามารถกำจัดโคโรเนียมได้ร้อยละ 98.5

ศรายุทธ ลาภพูนผล (2549) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอนลอย โดยศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้าที่ 1 3 5 และ 7 แอมแปร์ ระยะระหว่างขั้วที่ 1 1.5 และ 2 เซนติเมตร คิดเป็นพื้นที่ผิว 722 541.5 และ 361 ตารางเซนติเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ 21.11 31.67 และ 63.33 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 15 30 และ 45 นาที ตามลำดับ ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0.24 ถึง 1.59 และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนมีค่าอยู่ระหว่าง 16.9 ถึง 74.9 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเสียเข้าถังปฏิกิริยา 21.11 มิลลิลิตรต่อนาที (เวลาทำปฏิกิริยา 45 นาที) ค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงสุดมากกว่าร้อยละ 99

Orinakova และคณะ (2006) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายคลอไรด์และสารละลายซัลเฟต ที่มีผลต่อลักษณะการพอกพูนด้วยไฟฟ้าของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG (Paraffin Impregnated Graphite) พบว่ากลไกการพอกพูนของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG แตกต่างกัน โดยสารละลายคลอไรด์จะเป็นกลไกของ  $\text{Ni}^{2+}$  รั่วอิเล็กตรอนเกิดเป็น  $\text{NiCl}^+$  ขณะที่สารละลายซัลเฟตจะเป็นกลไกของ  $\text{H}^+$  รั่วอิเล็กตรอนเกิดเป็น  $\text{NiOH}^+$  เมื่อนำขั้วไฟฟ้าไปตรวจสอบด้วย SEM (Scanning Electron Micrographs) เชื่อได้ว่าคุณภาพการพอกพูนของนิกเกิลบนขั้วไฟฟ้า PIG น่าจะมีผลมาจากชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกัน

Oztekin และ Yazicigil (2006) ได้ศึกษาการนำโลหะกลับคืนจากสารละลายผสมคีเลต ได้แก่ EDTA NTA และซีเตรต โดยวิธีพอกพูนด้วยไฟฟ้า จัดเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบมีรอยต่อของสารละลาย กั้นสารละลายด้วยเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (commercial cation-exchange membrane; CEM) ใช้คีเลตเอเจนเป็นสารละลายฝั่งแคโทดและใช้  $\text{NaNO}_3$  เป็นสารละลายฝั่งแอโนด ผลการศึกษาพบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายฝั่งแคโทดและแอโนด ความเข้มข้นของโลหะและชนิดของเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน คีเลตเอเจน และโลหะบนขั้วที่สามารถนำกลับคืนได้เป็นตัวกำหนดความสามารถในการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยสามารถนำโลหะกลับคืนได้มากขึ้นเมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายฝั่งแอโนด ความเข้มข้นและ

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการพอกพูนด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีการที่เหมาะสมในการนำโลหะกลับคืนภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

ตติ จิตรู (2550) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีในระบบที่ละเทและต่อเนื่อง ผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้ร้อยละ 99 ที่ทุกสภาวะการทดลอง การเพิ่มกระแสไฟฟ้าทำให้ระยะเวลาทำปฏิกิริยาลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานลดลงด้วย ในระบบต่อเนื่องต้องการระยะเวลาเก็บกักประมาณ 20 120 และ 180 นาที ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เพื่อกำจัดเฮกซะวาเลนทีคงเหลือไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยระบบที่ละเทสามารถกำจัดเฮกซะวาเลนทีโครเมียมได้ 0.52 0.77 และ 0.56 มิลลิกรัมต่อลิตร และระบบต่อเนื่องกำจัดได้ 0.38 0.31 และ 0.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 20 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พีเอชสุดท้ายของน้ำทิ้งมีค่าประมาณ 9.5 ถึง 11 ซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

ปทุมทิพย์ เสมอภาค (2550) ได้ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจาง โดยใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้าและเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับขั้วโลหะ ผลการทดลองพบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแยกนิกเกิลและสังกะสีออกจากสารละลายเดี่ยว นิกเกิลและสังกะสีเจือจางที่ความเข้มข้น 22 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อใช้ผ้าคาร์บอนเป็นขั้วไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าฝั่งแคโทดประมาณ 15.2 และ 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 โดยสามารถแยกนิกเกิลและสังกะสีได้มากกว่าร้อยละ 94 และ 80 ในเวลา 6 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพเชิงกระแสไฟฟ้าเท่ากับร้อยละ 11.9 และ 14.9 สำหรับสังกะสี ในการกำจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางผสมจะต้องใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเพื่อให้ได้ร้อยละการกำจัดเท่าเดิม โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดนิกเกิลและสังกะสีคือ 130 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และ 150 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อการขจัด พบว่าเวลาและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการขจัดนิกเกิลและสังกะสีมาก

Emamjomeh และ Sivakumar (2009) ได้ศึกษาการกำจัดฟลูออไรด์ด้วยวิธีตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้า ทำการทดลองแบบไหลต่อเนื่อง มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลาย

เซลล์ โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสที่ 12.5 ถึง 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลที่ 150 ถึง 400 มิลลิลิตรต่อนาที พีเอชเริ่มต้นที่ 4 ถึง 8 และความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้นที่ 5 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดฟลูออไรด์สูงถึงร้อยละ 99 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 50 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล 150 มิลลิลิตรต่อนาที พีเอชเท่ากับ 6 และความเข้มข้นฟลูออไรด์เริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

พิชิต ลีกุล (2553) ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรมโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียมีสังกะสีปนเปื้อน 155 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.7 และค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่าขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมความหนาแน่นกระแส คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้ร้อยละ 98 ภายในเวลา 30 นาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 37.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบนี้สามารถลดระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจริงลงได้มาก พร้อมกับการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัด จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงได้ร้อยละ 98 ภายในเวลา 50 นาที โดยคิดเป็นร้อยละ 100 ของประสิทธิภาพเชิงกระแส

ศรัณญ์ ศรีธัญรัตน์ (2553) ได้ศึกษาการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจริงจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า โดยจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย และควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ผลการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 976 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ขั้วแกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 1 ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 140 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด 0.5 โมลต่อลิตร จัดเป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยกำจัดนิกเกิลที่นาที่ที่ 12 ได้ร้อยละ 99.96 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 33.89 ในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 25.96 และผลการทดลองในน้ำเสียจริง สำหรับเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิล 1,281 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกำจัดนิกเกิลที่นาที่ที่ 60 ได้ร้อยละ 99.06 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 61.34 ในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 31.15 ส่วนเซลล์



เคมีไฟฟ้าแบบไม่มีรอยต่อของสารละลาย สามารถกำจัดนิกเกิลที่นาที่ที่ 60 ได้ร้อยละ 44.52 ให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดร้อยละ 23.62 ในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 24.09

Akbal และ Camci (2011) ได้ศึกษาการกำจัดทองแดง โคโรเนียม และนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้า มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบอนุกรม โดยใช้เหล็กและอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง โคโรเนียม และนิกเกิลจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าฝั่งแอโนด และอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าฝั่งแคโทด สามารถกำจัดทองแดง โคโรเนียม และนิกเกิลได้ร้อยละ 100 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พีเอชเท่ากับ 3 หลังจากตกตะกอนร่วมด้วยกระแสไฟฟ้า 20 นาที โดยใช้พลังงาน 10.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	ลักษณะน้ำตัวอย่าง	องค์ประกอบโลหะหนักในตัวอย่าง	รูปแบบเซลล์เคมีไฟฟ้า	ชนิดขั้วไฟฟ้าแอโนด	ชนิดขั้วไฟฟ้าแคโทด	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	ร้อยละการกำจัด	อัตราการไหล	เวลาที่ใช้การกำจัด
มะลิ หุ่นสม, 2544	น้ำเสียโรงงานชุบโลหะ	Cu <sup>2+</sup> 283 mg/l Cr <sup>6+</sup> 220 mg/l Ni <sup>2+</sup> 128 mg/l	มีรอยต่อด้วยเยื่อเลือกผ่านไอออนลบ	แพลทินัม	เหล็กกล้าไร้สนิม	Cu <sup>2+</sup> 10 A/m <sup>2</sup> Cr <sup>6+</sup> 90 A/m <sup>2</sup> Ni <sup>2+</sup> 90 A/m <sup>2</sup>	Cu <sup>2+</sup> 98.9 Cr <sup>6+</sup> 99 Ni <sup>2+</sup> 99	420 มล./นาที่	Cu <sup>2+</sup> 5 ชม. Cr <sup>6+</sup> 13 ชม. Ni <sup>2+</sup> 13 ชม.
ศรายุทธ ลากพูนผล, 2549	น้ำเสียสังเคราะห์	Cr <sup>6+</sup> 20 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	เหล็ก	เหล็ก	69 A/m <sup>2</sup>	99	21.11 มล./นาที่	2 ชม,
ตติ จิตรู, 2550	น้ำเสียสังเคราะห์	Cr <sup>6+</sup> 100 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	เหล็ก	เหล็ก	50.81 A/m <sup>2</sup>	99	10 มล./นาที่	2 ชม.
Emamjomeh และ Sivakumar, 2009	น้ำเสียสังเคราะห์	F <sup>-</sup> 10 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	อะลูมิเนียม	อะลูมิเนียม	50 A/m <sup>2</sup>	99	150 มล./นาที่	53 นาที
ฉัฐบรรณ วรณรัตน์, 2542	น้ำเสียสังเคราะห์	Ni <sup>2+</sup> 1,000 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	ไทเทเนียมเคลือบรูทินเนียมออกไซด์	เหล็กกล้าไร้สนิม	140 A/m <sup>2</sup>	89.95		8.15 ชม.

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	ลักษณะน้ำ ตัวอย่าง	องค์ประกอบ โลหะหนักใน ตัวอย่าง	รูปแบบเซลล์ เคมีไฟฟ้า	ชนิด ขั้วไฟฟ้า แอโนด	ชนิด ขั้วไฟฟ้า แคโทด	ค่าความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า	ร้อยละการ กำจัด	อัตรา การไหล	เวลาที่ใช้ การกำจัด
ปทุมทิพย์ เสมอภาค, 2550	น้ำเสีย สังเคราะห์	Ni <sup>2+</sup> 22 mg/l Zn <sup>2+</sup> 100 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	ไทเทเนียม เคลือบรูที เนียมออกไซด์	ผ้าคาร์บอน	Ni <sup>2+</sup> 130 A/m <sup>2</sup> Zn <sup>2+</sup> 150 A/m <sup>2</sup>	Ni <sup>2+</sup> 90.7 Zn <sup>2+</sup> 79.5		6 ชม.
พิชิต ลีกุล, 2553	น้ำเสีย โรงงานผลิตเส้น ใย	Zn <sup>2+</sup> 155 mg/l	มีรอยต่อด้วยแผ่น แก้วพูน	แกรไฟต์	เหล็กกล้าไร้ สนิม	37.5 A/m <sup>2</sup>	98		50 นาที
ศรัณยู ศรีวัชรรัตน์, 2553	น้ำเสียจาก ห้องปฏิบัติการ เคมีวิเคราะห์	Ni <sup>2+</sup> 1,281 mg/l	มีรอยต่อด้วยวุ้น อิมด้วยด้วย โซเดียมคลอไรด์	แกรไฟต์	แกรไฟต์	140 A/m <sup>2</sup>	99.06		60 นาที
Akbal และ Camci, 2011	น้ำเสีย โรงงานชุบโลหะ	Cu <sup>2+</sup> 45 mg/l Cr <sup>6+</sup> 44.4 mg/l Ni <sup>2+</sup> 394 mg/l	ไม่มีรอยต่อ	เหล็ก	อะลูมิเนียม	Cu <sup>2+</sup> 100 A/m <sup>2</sup> Cr <sup>6+</sup> 100 A/m <sup>2</sup> Ni <sup>2+</sup> 100 A/m <sup>2</sup>	Cu <sup>2+</sup> 100 % Cr <sup>6+</sup> 100 % Ni <sup>2+</sup> 100 %		20 นาที

## บทที่ 3

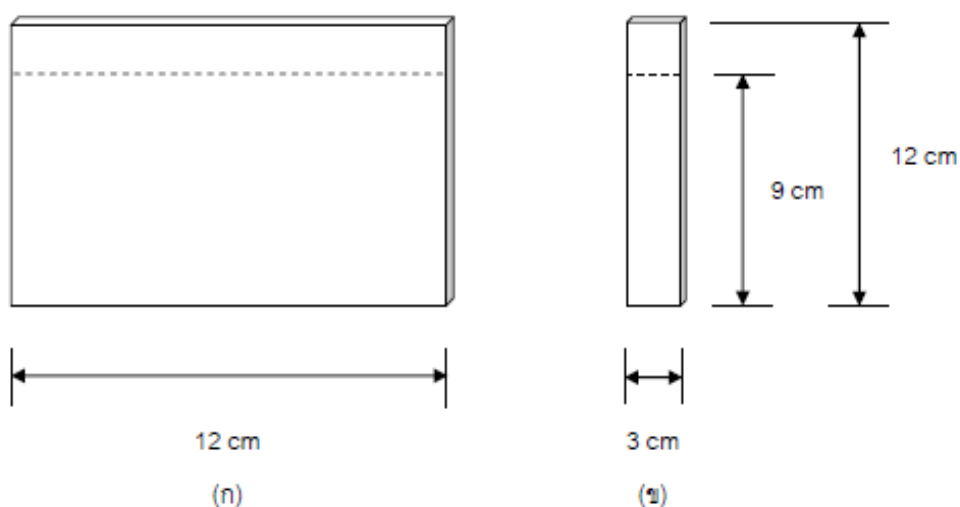
### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ณ ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถังปฏิกริยาทำจากอะคริลิกขนาด (กว้าง × ยาว × สูง) 15 × 16 × 12 ลูกบาศก์เซนติเมตร และมีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell Volume Ratio; A/V) ฝั่งหัวแคโทดเท่ากับ 64.8 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
2. ถังเก็บน้ำเสีย
3. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) : GW, INSTEK
4. เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)  
: GBC, Avanza
5. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH Meter) : Mettler Toledo, model Seven Multi pH/Conductivity
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง (4 Digital Balance) : Mettler-Toledo, Dragon 204
7. เครื่องสูบน้ำที่ปรับอัตราการไหลของน้ำได้
8. กระดาษกรอง (Filter Paper)
9. กระดาษทราย (Sand Paper)
10. ชุดอุปกรณ์เครื่องแก้วทั่วไป
11. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำด้วยแกรไฟต์ขนาด 12 x 9 ตารางเซนติเมตร และ 3 x 9 ตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 (ก) ขั้วไฟฟ้าแอนโนดที่ใช้ทดลอง  
(ข) ขั้วไฟฟ้าแคโทดที่ใช้ทดลอง

### 3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)
2. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid, HCl)
3. น้ำกลั่น

### 3.1.3 การเตรียมน้ำเสียจริงและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำเสียจริงเป็นน้ำที่เก็บจากน้ำทิ้งในกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตแท่นพิมพ์ โดยเก็บใส่ถังพลาสติกสีดำ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3.1
2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยเตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ 29.25 กรัม ละลายในน้ำจนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด	ความเข้มข้น	หน่วย
พีเอช	3.4	-
ทองแดง	248	mg/L
โครเมียม	161	mg/L
นิกเกิล	14	mg/L
ซัลเฟต	1,745	mg/L
ไนเตรท	1.2	mg/L
ของแข็งละลายทั้งหมด	2,735	mg/L

### 3.2 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

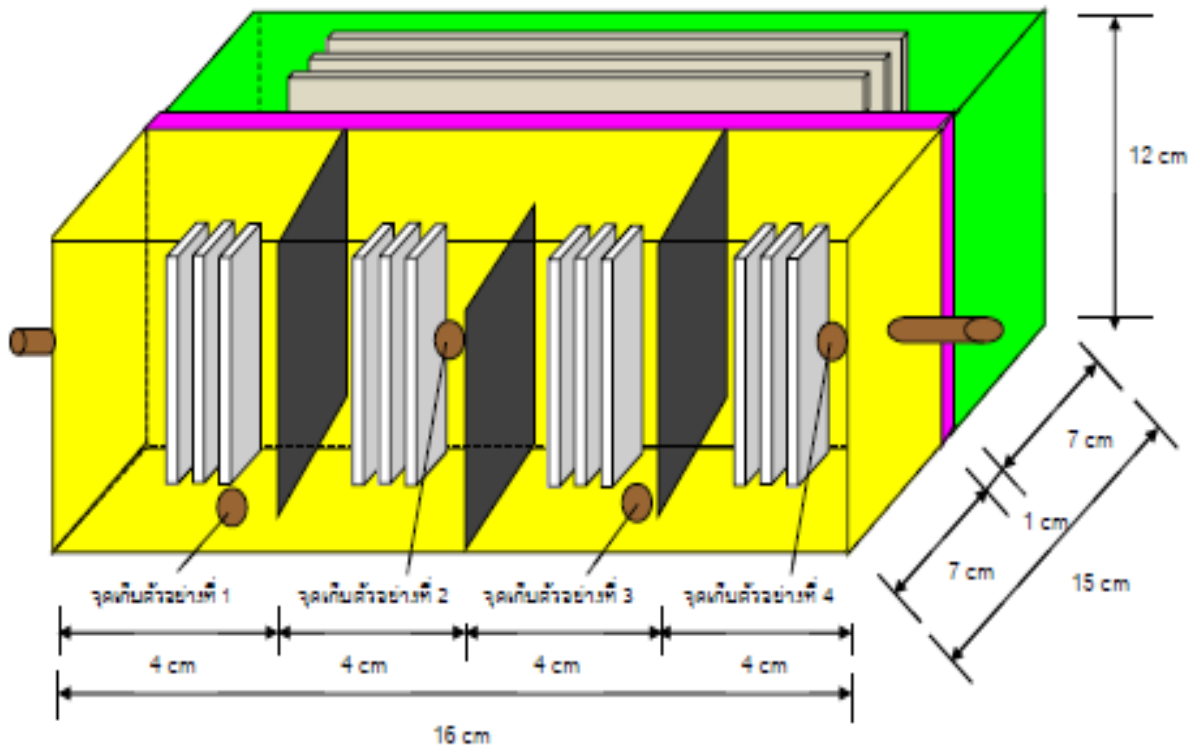
การกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ มีการจัดเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดย

1. ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิกขนาด (กว้าง × ยาว × สูง) 15 × 16 × 12 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.2

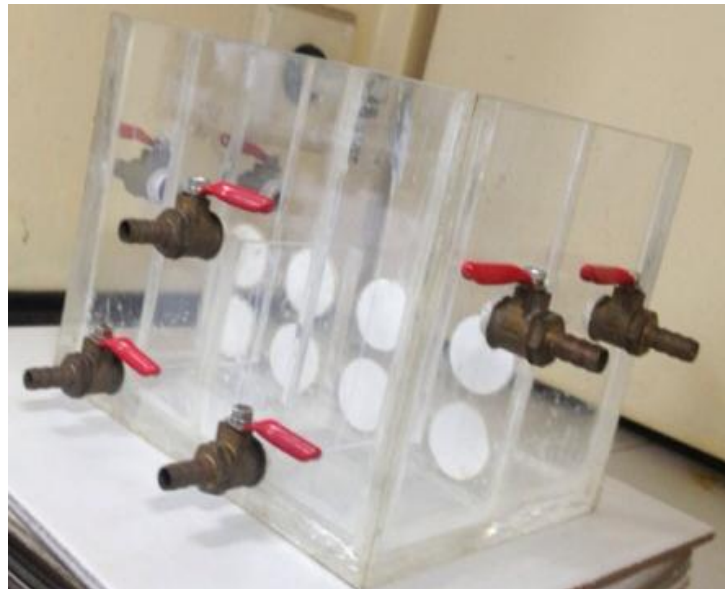
2. ในถังปฏิกิริยา แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทดบรรจุ น้ำเสีย ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร และส่วนครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนดบรรจุสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เชื่อมกลางด้วยแผ่นแก้วพรุน

3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบแกรไฟต์ – แกรไฟต์

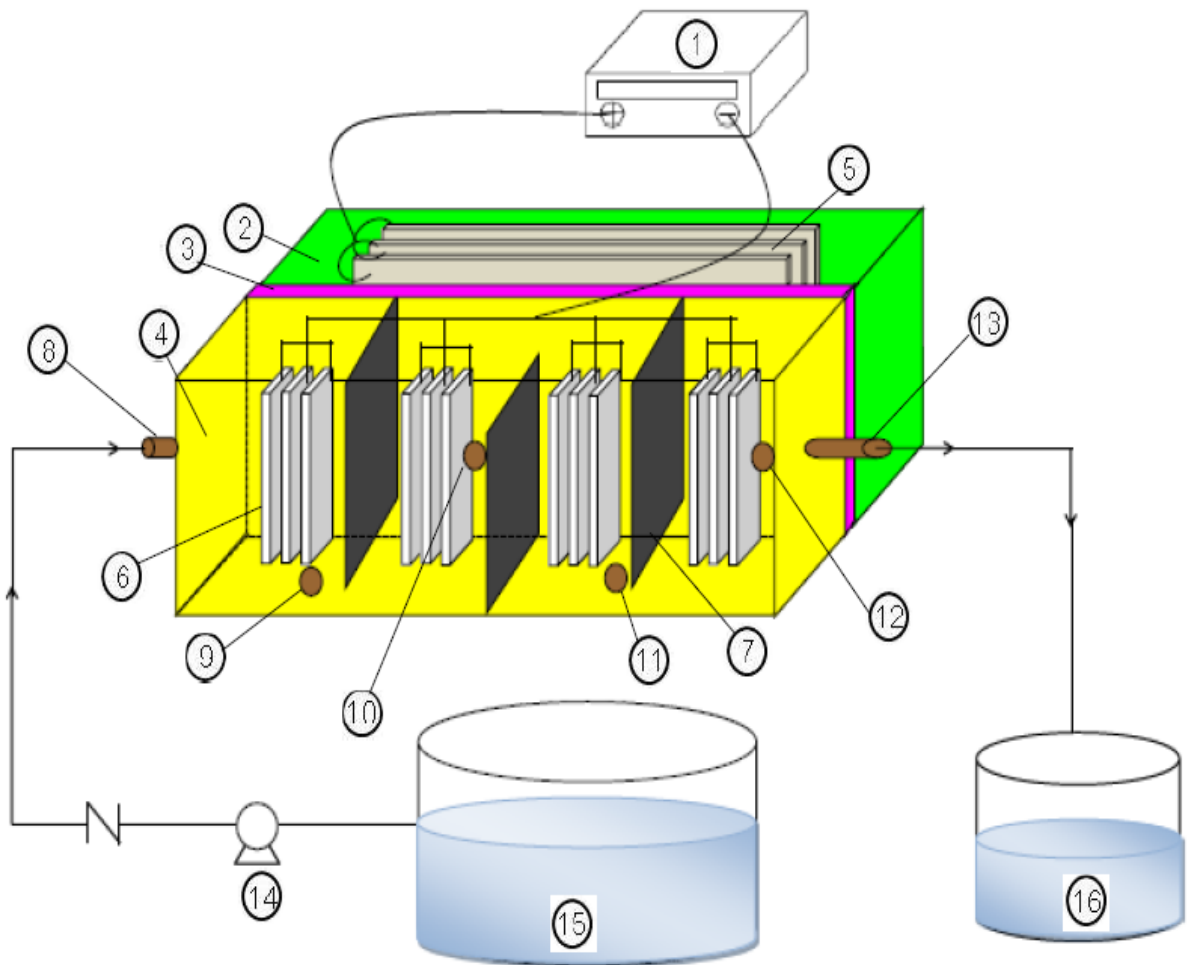
4. ต่อแผ่นแกรไฟต์ขนาด 12 × 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น เข้าที่ขั้วบวก (แอโนด) และต่อแผ่นแกรไฟต์ขนาด 3 × 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 12 แผ่น เข้าที่ขั้วลบ (แคโทด) ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.2 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดยกั้นสารละลายฝั่งแคโทดและแอโนดด้วยแผ่นแก้วพอรัน



ภาพที่ 3.3 เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบมีรอยต่อของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.4 การตกตะกอนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่องที่ใช้ในการทดลอง

- |   |                                   |
|---|-----------------------------------|
| 1. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเครื่องที่ 1 | 9. จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1        |
| 2. เครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด       | 10. จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2       |
| 3. แผ่นแก้วพูน                          | 11. จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 3       |
| 4. เครื่องเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด       | 12. จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 4       |
| 5. ขั้วไฟฟ้าแอโนด                       | 13. ทางน้ำออก                     |
| 6. ขั้วไฟฟ้าแคโทด                       | 14. เครื่องสูบน้ำ                 |
| 7. แผ่นกั้น                             | 15. ถังเก็บน้ำเสีย                |
| 8. ทางน้ำเข้า                           | 16. ถังเก็บน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว |



### 3.3 การดำเนินงานวิจัย

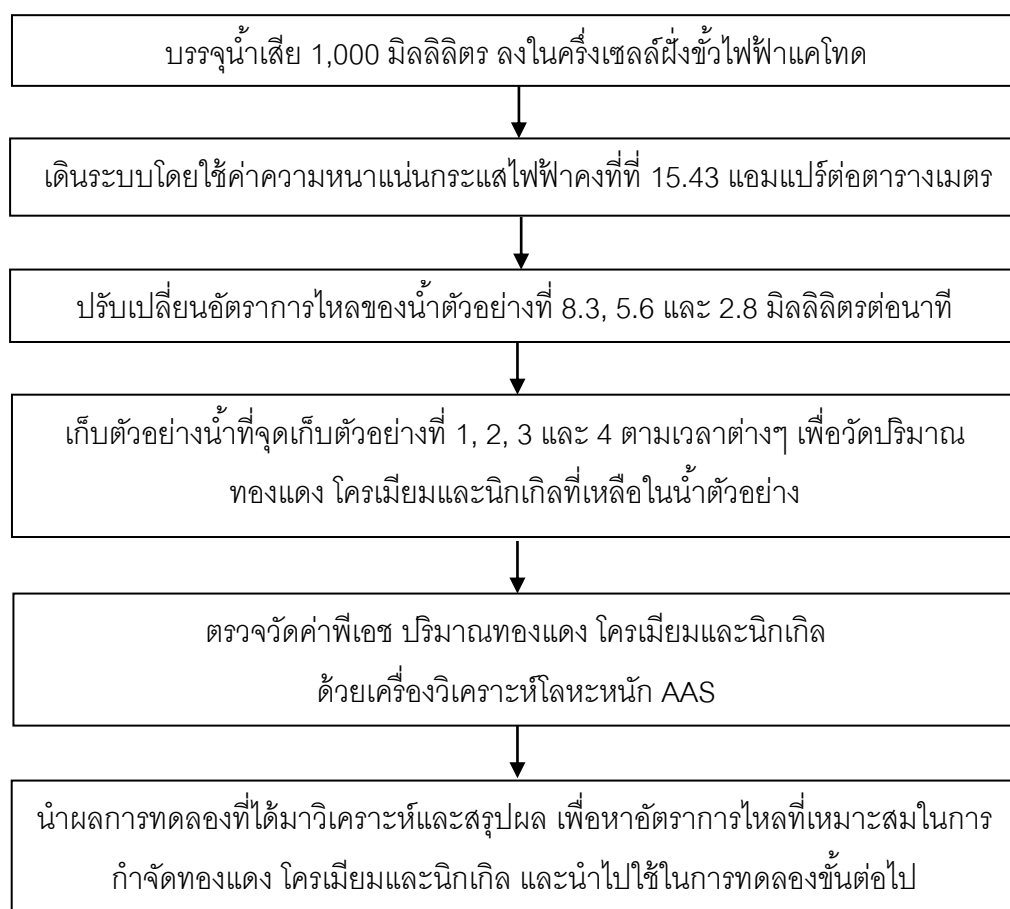
ศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียจริง โรงงานผลิตแท่งพิมพ์ โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนการทดลอง

#### 3.3.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล

1. บรรจุน้ำเสียปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ลงในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
2. บรรจุน้ำละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ลงในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์แบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์ต่อขนาน ลงในแต่ละครึ่งเซลล์ตามภาพที่ 3.3
4. เดินระบบโดยใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)
5. ปรับอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามเวลาต่างๆ เพื่อนำไปตรวจวัดค่าพีเอชและปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลือในน้ำตัวอย่าง ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
7. ทำการทดลองข้อ 1 - 6 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
8. ทำการทดลองข้อ 1 - 7 ซ้ำ โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างเป็น 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ
9. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหมาะสม และนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1

การทดลอง	ศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล
ตัวแปรอิสระ	1. อัตราการไหลของน้ำตัวอย่าง
ตัวแปรควบคุม	1. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร 2. เซลล์เคมีไฟฟ้าและชนิดของขั้วไฟฟ้า ได้แก่ แกรไฟต์ - แกรไฟต์ 3. ปริมาตรของน้ำเสียที่ใช้บำบัด 1 ลิตร
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณทองแดงที่เหลือในน้ำเสีย 2. ปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสีย 3. ปริมาณนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสีย 4. ค่าพีเอช



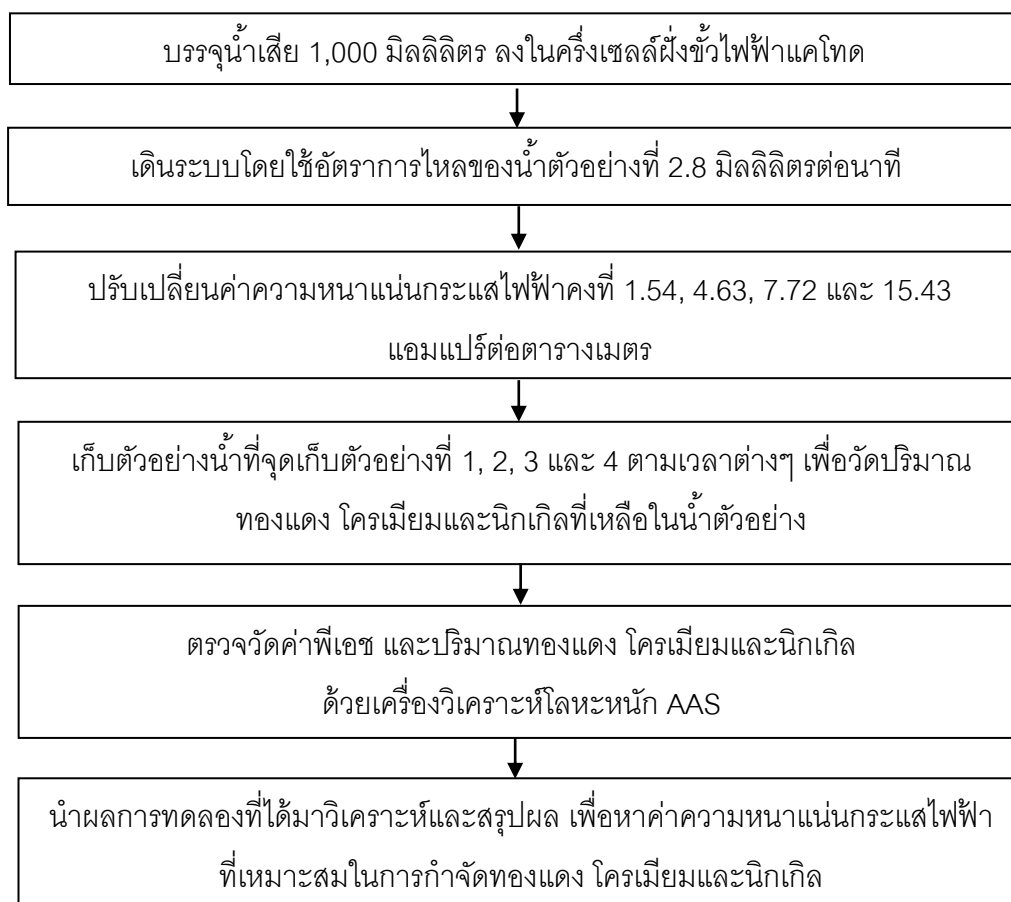
ภาพที่ 3.4 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล

### 3.3.2 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการกำจัด ทองแดง โครเมียมและนิกเกิล

1. บรรจุน้ำเสียปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ลงในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแคโทด
2. บรรจุน้ำละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ลงในครึ่งเซลล์ฝั่งขั้วไฟฟ้าแอโนด
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแกรไฟต์แบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์ต่อขนาน
4. เดินระบบโดยใช้อัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที
5. ให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้า 0.1 แอมแปร์ ซึ่งคิดเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร
6. เก็บตัวอย่างน้ำที่จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามเวลาต่างๆ เพื่อนำไปตรวจวัดค่าพีเอชและปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลือในน้ำตัวอย่าง ด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก AAS
7. ทำการทดลองข้อ 1 - 6 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
8. ทำการทดลองข้อ 1 - 7 ซ้ำ โดยเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ขั้วไฟฟ้าเป็น 0.3, 0.5 และ 1 แอมแปร์ ซึ่งคิดเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ
9. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้กำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหมาะสม

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2

การทดลอง	ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล
ตัวแปรอิสระ	1. ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ตัวแปรควบคุม	1. อัตราเร็วในการไหลของน้ำตัวอย่างที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที 2. เซลล์เคมีไฟฟ้าและชนิดของขั้วไฟฟ้า ได้แก่ แกรไฟต์ – แกรไฟต์ 3. ปริมาตรของน้ำเสียที่ใช้บำบัด 1 ลิตร
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณทองแดงที่เหลือในน้ำเสีย 2. ปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสีย 3. ปริมาณนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสีย 4. ค่าพีเอช



ภาพที่ 3.5 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล

### 3.4 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการทำวิจัยนี้ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณทองแดง ปริมาณโครเมียม และปริมาณนิกเกิล

#### ตารางที่ 3.4 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัดค่า
ค่าพีเอช	pH Meter
ปริมาณทองแดง	AAS
ปริมาณโครเมียม	AAS
ปริมาณนิกเกิล	AAS

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง มีการต่อขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนานทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการทดลองกับน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล และ 2) ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิล จากนั้นทำการวิเคราะห์กระบวนการกำจัดโลหะไอออนออกจากน้ำเสียผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในแต่ละช่วงเวลา ประเมินประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการกำจัด

วิเคราะห์พารามิเตอร์ในน้ำเสีย ได้แก่ พีเอช ปริมาณทองแดง ปริมาณโครเมียม ปริมาณนิกเกิล ปริมาณซัลเฟต ปริมาณไนเตรท และของแข็งละลายทั้งหมด

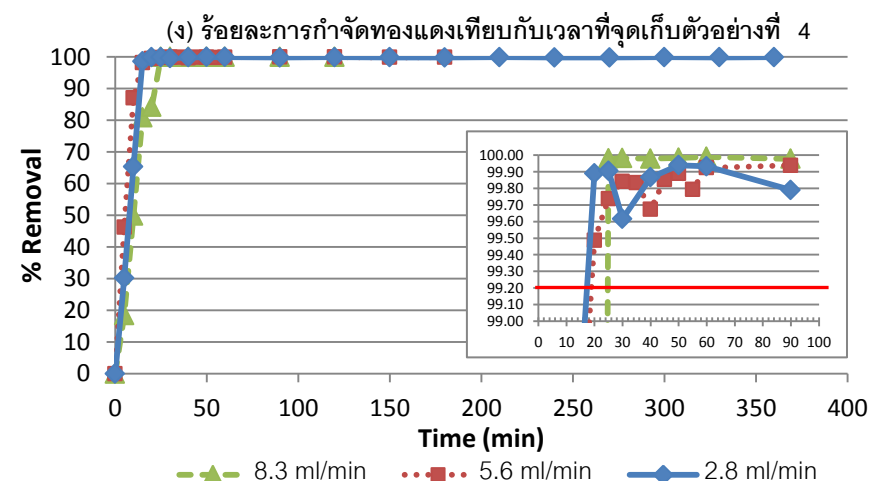
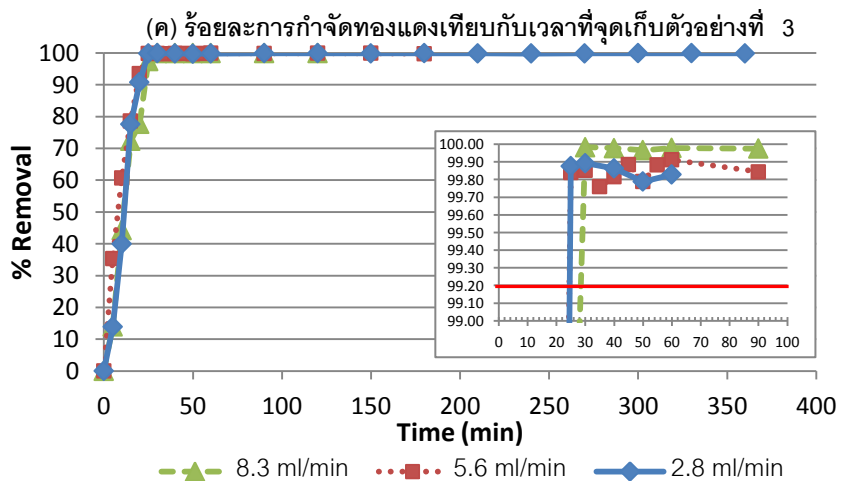
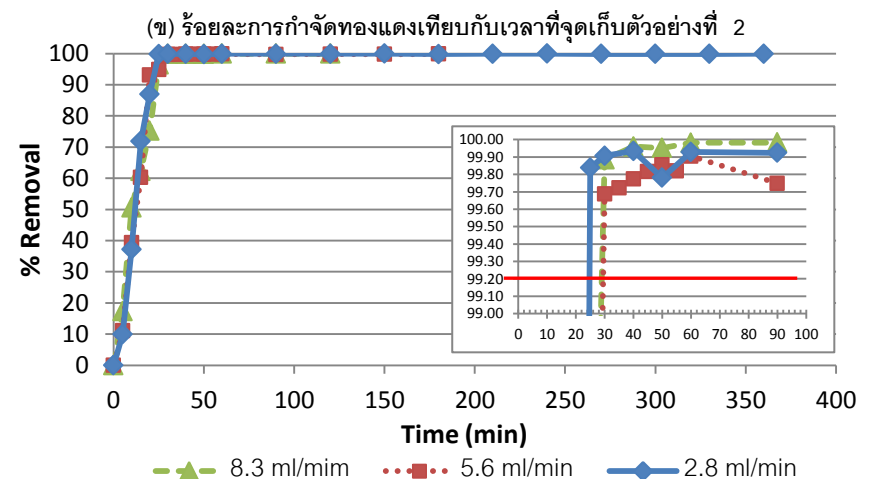
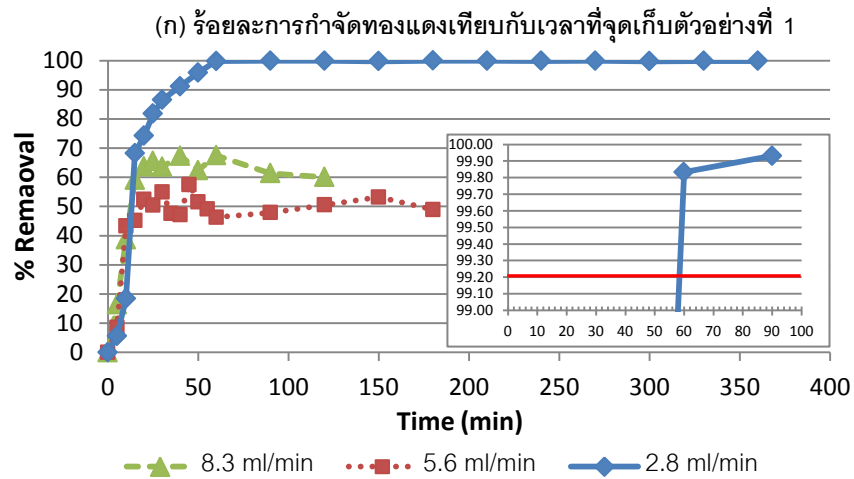
#### ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งพิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	ค่า/ปริมาณ	หน่วย
พีเอช	3.4	-
ทองแดง	248	mg/L
โครเมียม	161	mg/L
นิกเกิล	14	mg/L
ซัลเฟต	1,745	mg/L
ไนเตรท	1.2	mg/L
ของแข็งละลายทั้งหมด	2,735	mg/L

#### 4.1 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่มีต่อการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนิน

ศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่มีต่อการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแทนนิน โดยติดตามวัดปริมาณความเข้มข้นของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการเดินระบบโดยใช้อัตราการไหลที่ 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เก็บน้ำเสียตัวอย่าง 4 ตำแหน่ง คือ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.1 - 4.3

ภาพที่ 4.1 (ก), 4.2 (ก) และ 4.3 (ก) แสดงร้อยละการกำจัดของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตร ด้วยอัตราการไหลต่างๆ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 พบว่าทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างถูกกำจัดอย่างรวดเร็วในช่วงต้น และเริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ หรือคงที่เมื่อเวลาของการกำจัดผ่านไปกว่า 1 ชั่วโมง โดยผลการทดลองในภาพที่ 4.1 (ก), 4.2 (ก) และ 4.3 (ก) พบว่า สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างให้ลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดความเข้มข้นของทองแดง โครเมียม และนิกเกิลไม่เกิน 2.0, 0.25 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (เมื่อคิดเป็นร้อยละการกำจัดเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงที่ 248 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียม 161 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิกเกิล 14 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ร้อยละการกำจัดต้องมากกว่า 99.19, 99.84 และ 92.86 ตามลำดับ จึงจะผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม) เมื่อเดินระบบโดยใช้อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่างที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ ซึ่ง ณ เวลาดังกล่าวนี้พบทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างเหลืออยู่เพียง 0.42, 0.25 และ 0.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละของการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่ 99.83, 99.85 และ 97.08 ตามลำดับ แต่ไม่พบว่าปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 5.6 และ 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ทั้งนี้เป็นเพราะอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบสูง หมายถึงระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียให้อยู่ในระบบ (ช่องกักเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1) เพื่อทำการกำจัดมีน้อยลง (เมื่อเดินระบบที่อัตราไหล 2.8, 5.6 และ 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำเสียถูกกักเก็บอยู่ในช่องกักเก็บตัวอย่างที่ 1 เป็นเวลา 90, 45 และ 30 นาที ตามลำดับ) ส่งผลให้ค่าร้อยละของการกำจัดมีค่าน้อย ปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่างจึงยังคง

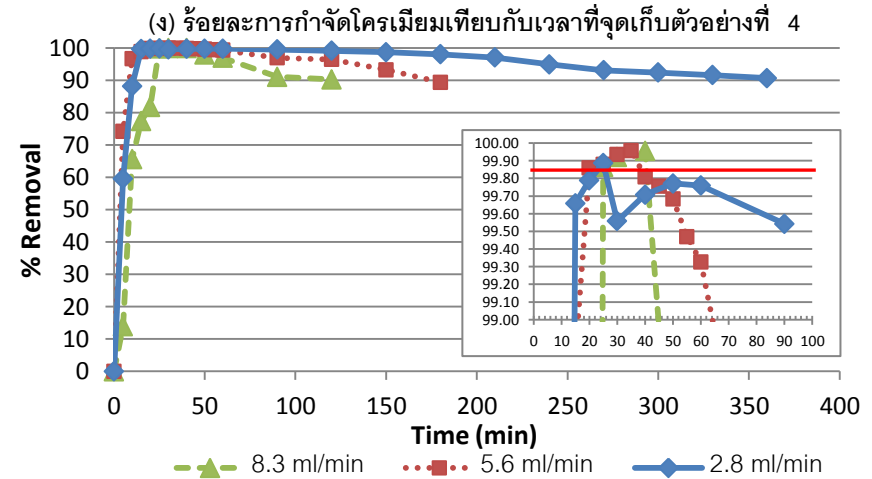
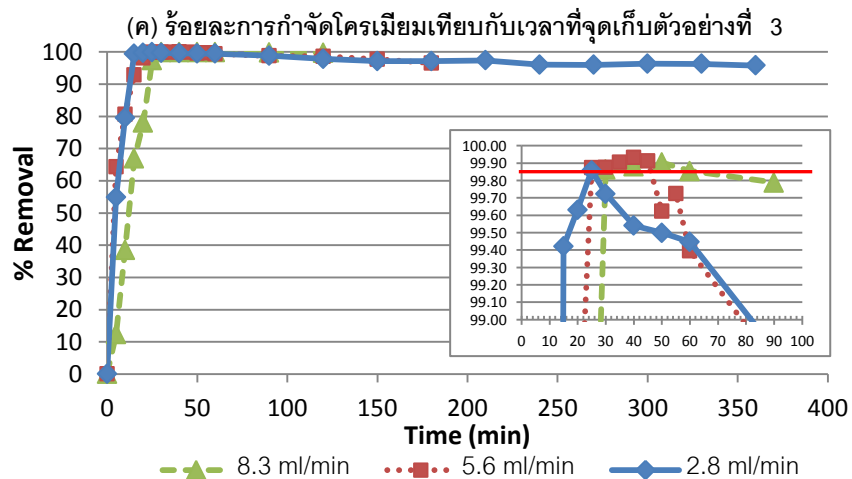
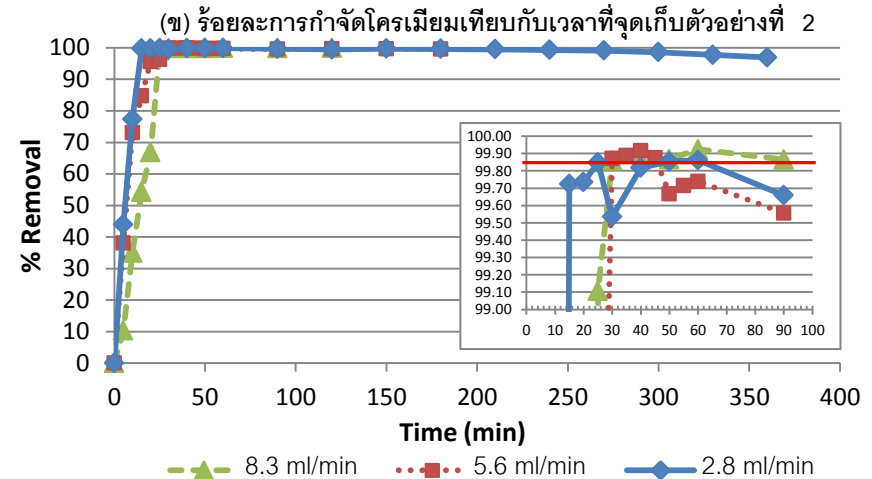
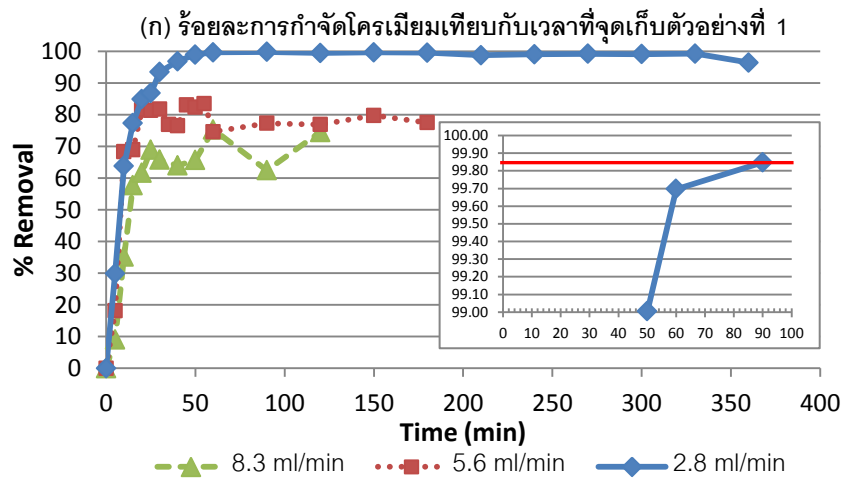


ภาพที่ 4.1 ร้อยละการกำจัดทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตรเทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

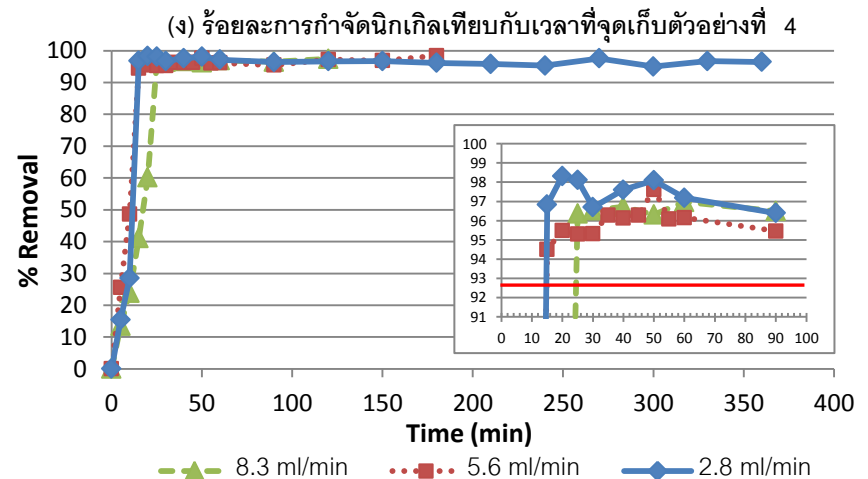
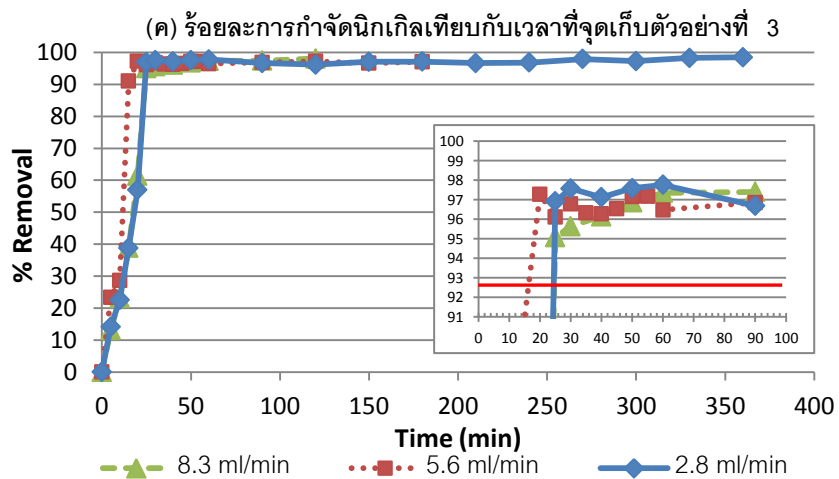
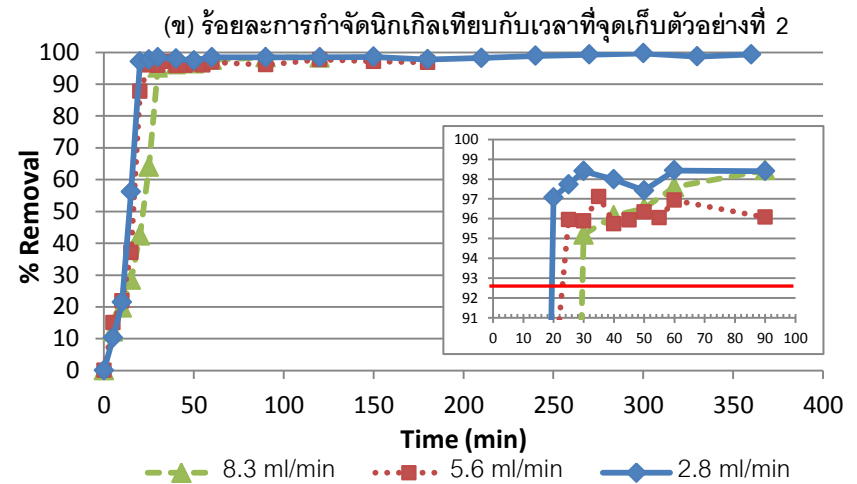
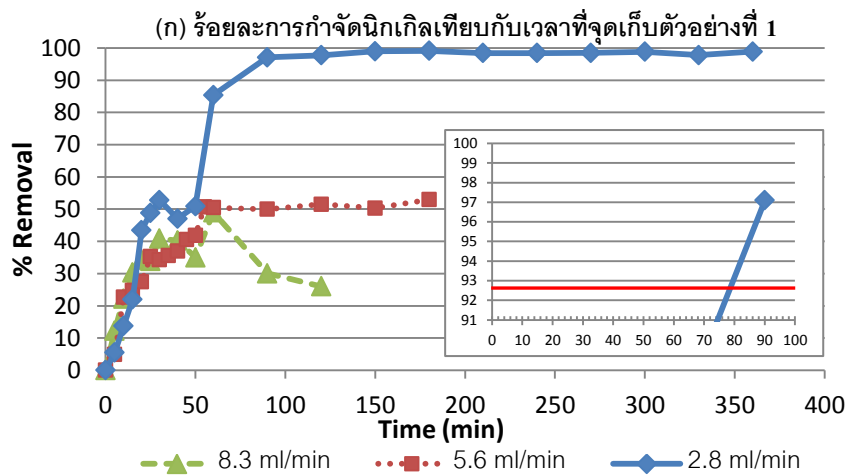
ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4

ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร





ภาพที่ 4.2 ร้อยละการกำจัดโครเมียมออกจากน้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตรเทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4  
ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร



ภาพที่ 4.3 ร้อยละการกำจัดนิกเกิลออกจากน้ำเสียตัวอย่างปริมาตร 1 ลิตรเทียบกับเวลาที่อัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อยู่ในระดับที่สูงกว่าเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้การควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบด้วยปั๊มที่ใช้งาน เกิดขึ้นได้ไม่ราบเรียบคงที่ตลอดเวลา ซึ่งสังเกตได้จากการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของจุดข้อมูล ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (ก), 4.2 (ก) และ 4.3 (ก)

ภาพที่ 4.1 (ข), 4.1 (ค), 4.1 (ง), 4.2 (ข), 4.2 (ค), 4.2 (ง), 4.3 (ข), 4.3 (ค) และ 4.3 (ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่าง ปริมาตร 1 ลิตร ด้วยอัตราการไหลต่างๆ ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะคล้ายคลึงกับที่เกิดขึ้น ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ภาพที่ 4.1 (ก), 4.2 (ก) และ 4.3 (ก)) นั่นคือ อัตราการกำจัดโลหะไอออนเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงต้นของการกำจัด โดยพบปริมาณทองแดง โครเมียม และนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่างที่ 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 - 4 ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 - 4.4

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2, 3 และ 4 พบปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ที่ทุกอัตราการไหล ดังนี้ ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.84 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 30, และ 25 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.85 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 30, และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.19 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 25 และ 25 นาที ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.2** แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดทองแดงให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อัตราการไหล ของน้ำเสีย ตัวอย่าง (มล./นาท)	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)
8.3	-	-	30	99.89	30	99.98	25	99.98
5.6	-	-	30	99.96	25	99.84	25	99.74
2.8	60	99.83	25	99.84	25	99.88	20	99.89

ตารางที่ 4.3 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อัตราการไหล ของน้ำเสีย ตัวอย่าง (มล./นาท)	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)
8.3	-	-	30	99.86	30	99.86	25	99.86
5.6	-	-	30	99.87	25	99.87	20	99.86
2.8	90	99.85	25	99.85	25	99.86	25	99.89

ตารางที่ 4.4 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

อัตราการไหล ของน้ำเสีย ตัวอย่าง (มล./นาท)	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาท)	การ กำจัด (%)
8.3	-	-	30	95.19	25	95.07	25	96.37
5.6	-	-	25	95.95	20	97.28	15	94.50
2.8	90	97.08	25	97.72	25	96.91	15	96.83

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 3 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.84 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 25 และ 25 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.86 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 30, 25 และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.07 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 25, 20 และ 25 นาที ตามลำดับ

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 4 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.74 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 25, 25 และ 20 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.86 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3,

5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 25, 20 และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 94.50 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นระยะเวลา 25, 15 และ 15 นาที ตามลำดับ

อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะแปรผกผันกับระยะเวลาในการเก็บกักน้ำเสียให้อยู่ในระบบ โดยพบว่าแนวโน้มในการกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง หรือนั่นคือการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียให้อยู่ภายในระบบกำจัด เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ได้ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ แต่เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 และ 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่าไม่สามารถกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ได้ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 ในการทดลองต่อจากนี้จึงเลือกเดินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

#### 4.2 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินพิมพ์

ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อการกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแทนนินพิมพ์ โดยติดตามวัดปริมาณความเข้มข้นของทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ เมื่อทำการเดินระบบด้วยอัตราการไหลที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ผลการทดลองแสดงดังแสดงในภาพที่ 4.4 - 4.6

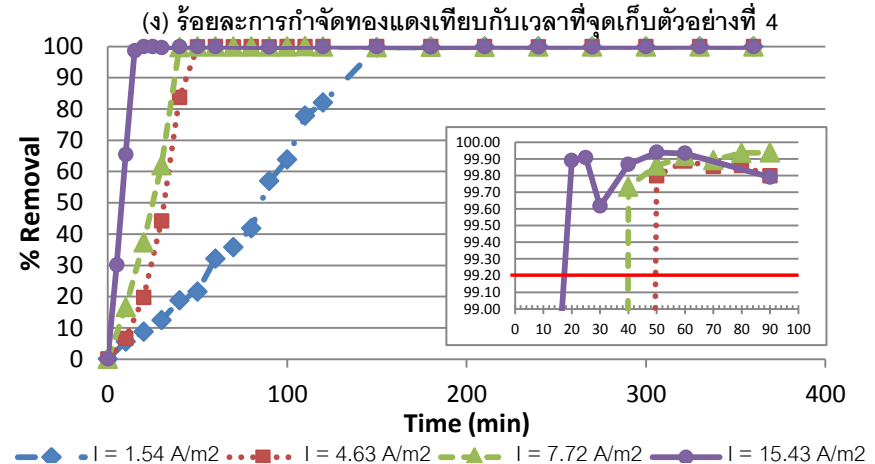
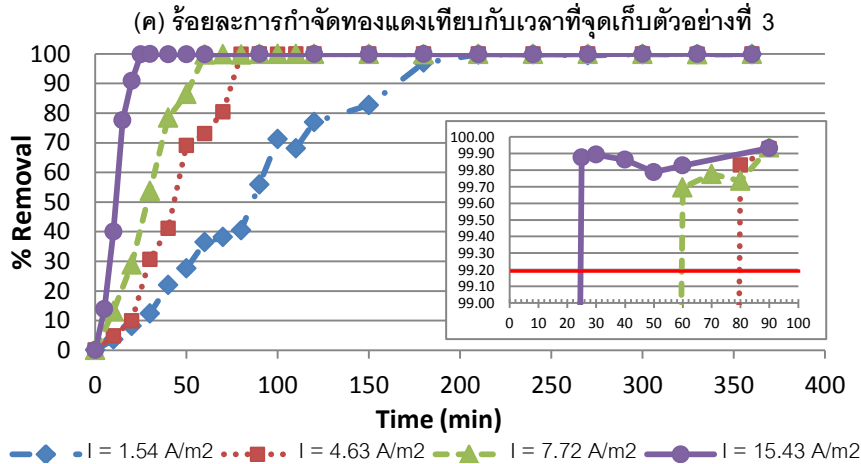
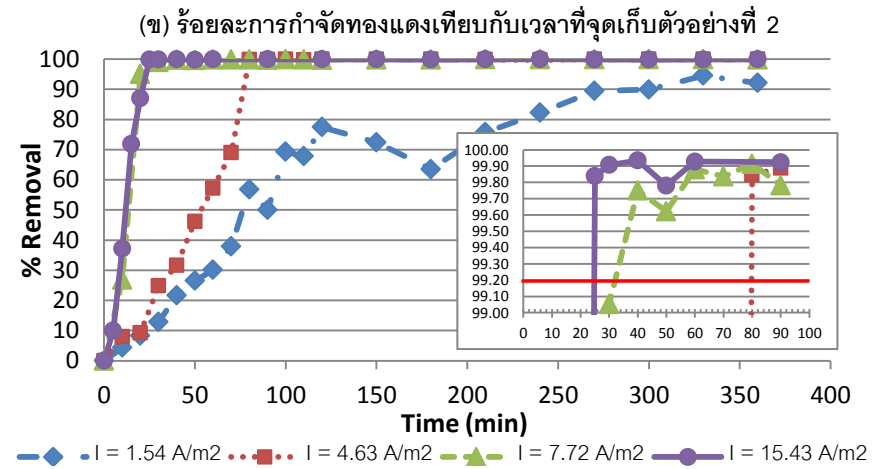
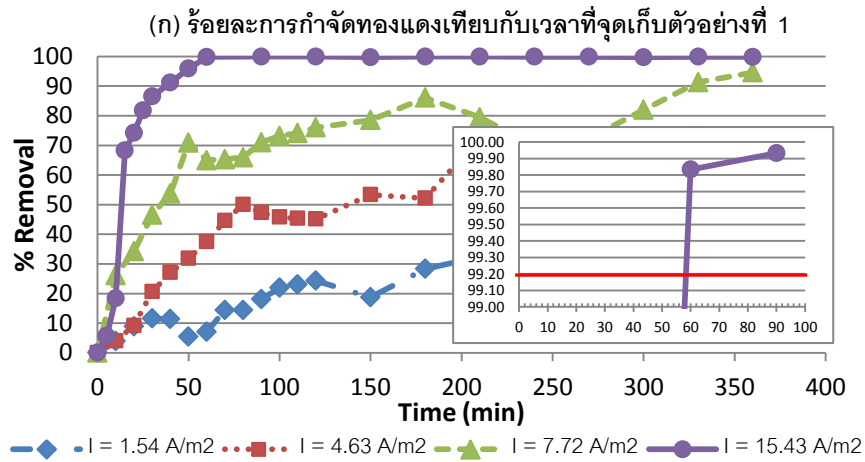
ภาพที่ 4.4 (ก), 4.5 (ก) และ 4.6 (ก) แสดงร้อยละการกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลที่ถูกกำจัดออกจากน้ำเสียตัวอย่างเทียบกับเวลา ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 พบว่าทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างถูกกำจัดอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการกำจัด และเริ่มเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ หรือคงที่เมื่อเวลาของการกำจัดผ่านไปกว่า 2 ชั่วโมง ทั้งนี้อัตราเร็วในการกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลในช่วงต้นของการกำจัดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ คือ อัตราการกำจัดโลหะไอออนเกิดขึ้นได้รวดเร็ว เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแก่ระบบมากขึ้น (ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างเส้นกราฟในแต่ละรูป) เป็นผลให้ปริมาณโลหะไอออนที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างมีค่าน้อยเมื่อเวลาของการกำจัดดำเนินไป โดยผล

การทดลองในภาพที่ 4.4 (ก), 4.5 (ก) และ 4.6 (ก) พบปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำตัวอย่างลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่ 2.0, 0.25 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 1 เป็นระยะเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ ซึ่ง ณ เวลาดังกล่าวนี้พบทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำตัวอย่างเหลืออยู่เพียง 0.42, 0.25 และ 0.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละของการกำจัดทองแดงและโครเมียมที่ 99.83 99.85 และ 97.08 ตามลำดับ แต่ไม่พบว่าปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63 และ 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลานานถึง 6 ชั่วโมง

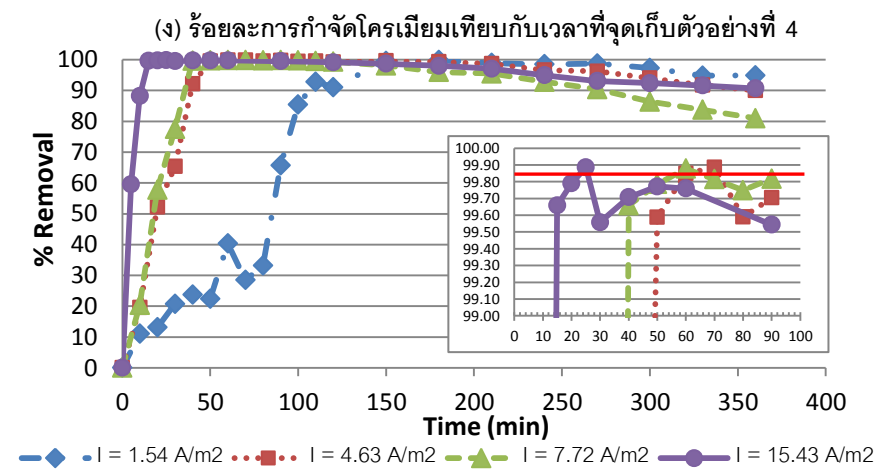
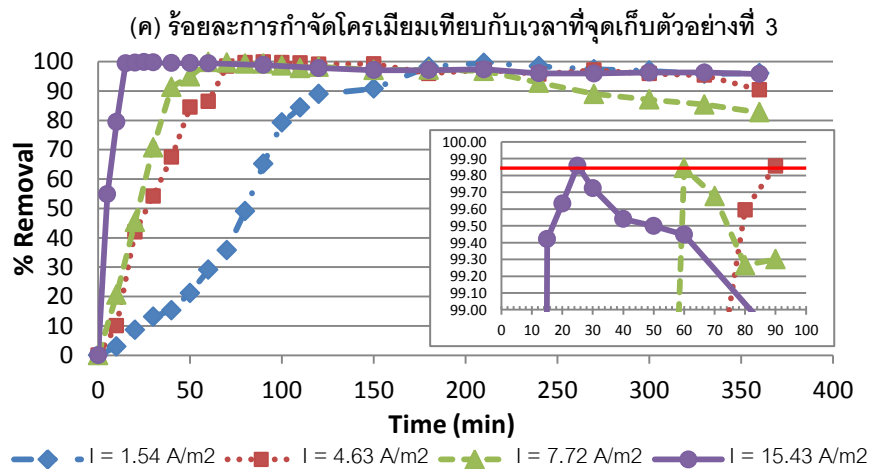
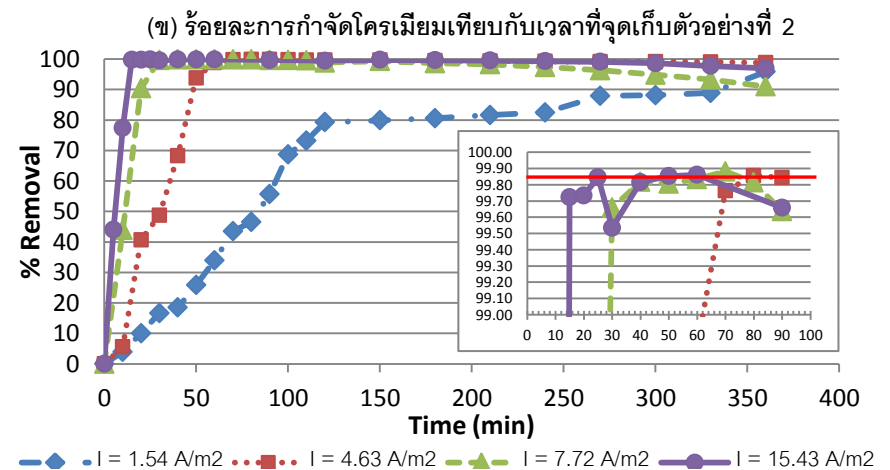
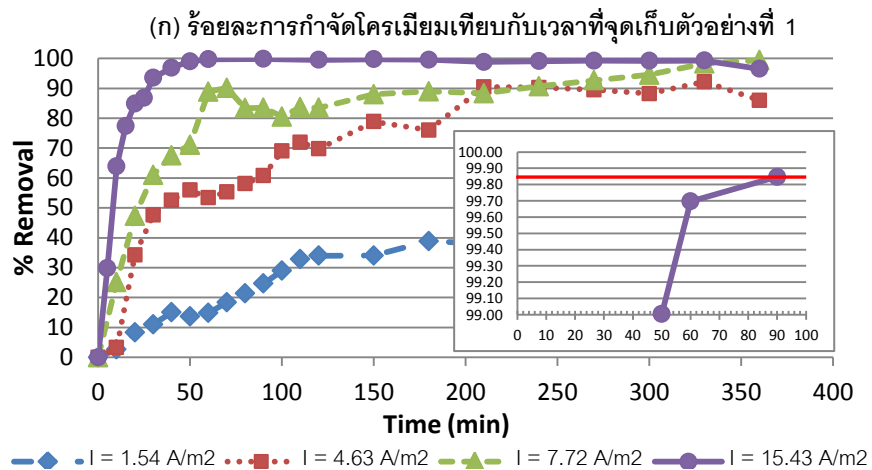
ภาพที่ 4.4 (ข), 4.4 (ค), 4.4 (ง), 4.5 (ข), 4.5 (ค), 4.5 (ง), 4.6 (ข), 4.6 (ค) และ 4.6 (ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียตัวอย่างเทียบกับเวลา ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันกับที่เกิดขึ้น ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ภาพที่ 4.4 (ก), 4.5 (ก) และ 4.6 (ก)) นั่นคือ อัตราการกำจัดโลหะไอออนเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงต้นของการกำจัด โดยเฉพาะเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแก่ระบบมากขึ้น และปริมาณโลหะไอออนที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่างมีค่าน้อยเมื่อเวลาของการกำจัดดำเนินไป โดยพบปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลในน้ำตัวอย่างลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 - 4 ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 - 4.7

**ตารางที่ 4.5** แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดทองแดงให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาที)	การ กำจัด (%)
1.54	-	-	-	-	210	99.74	150	99.63
4.63	-	-	80	99.85	80	99.83	50	99.80
7.72	-	-	40	99.75	60	99.69	40	99.73
15.43	60	99.83	25	99.84	25	99.88	20	99.89

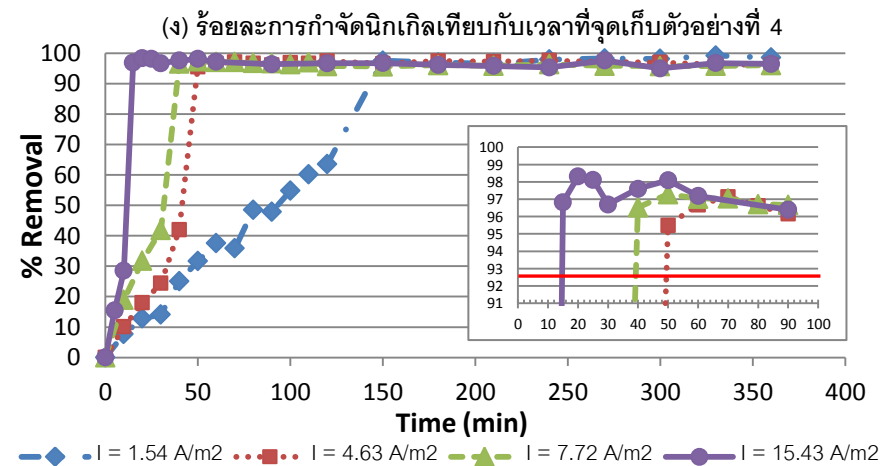
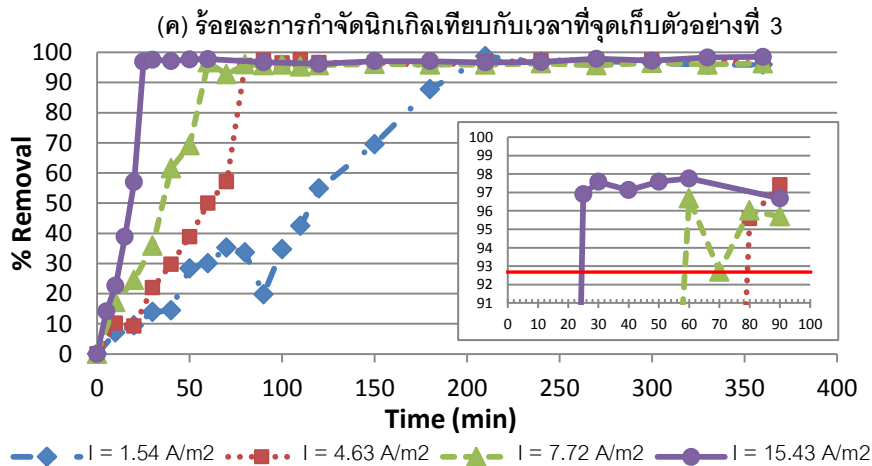
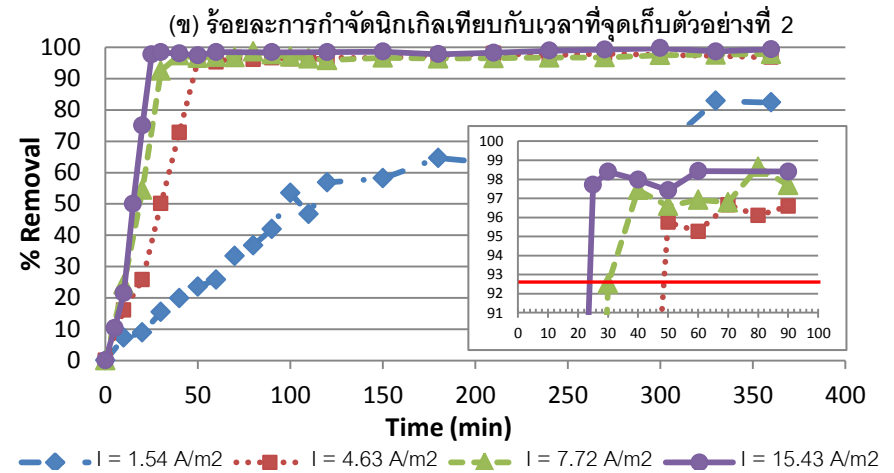
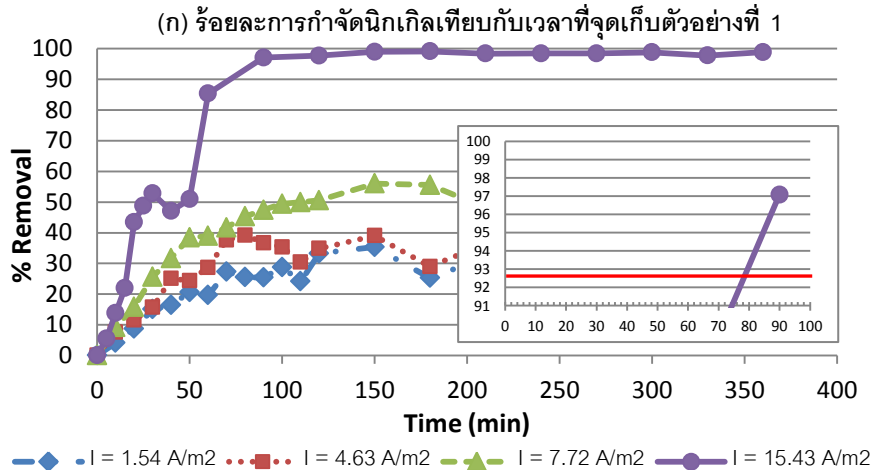


ภาพที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดทองแดงเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.5 ร้อยละการกำจัดโครเมียมเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที





ภาพที่ 4.6 ร้อยละการกำจัดนิเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่ออนาที

ตารางที่ 4.6 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาทิจ)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาทิจ)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาทิจ)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาทิจ)	การ กำจัด (%)
1.54	-	-	-	-	-	-	180	99.85
4.63	-	-	80	99.86	90	99.86	70	99.89
7.72	-	-	70	99.88	60	99.84	60	99.88
15.43	90	99.85	25	99.85	25	99.86	25	99.89

ตารางที่ 4.7 แสดงเวลาและร้อยละการกำจัดนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาทิจ)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาทิจ)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาทิจ)	การ กำจัด (%)	เวลา (นาทิจ)	การ กำจัด (%)
1.54	-	-	-	-	210	98.68	150	97.53
4.63	-	-	50	95.75	80	95.58	50	95.49
7.72	-	-	40	97.44	60	96.67	40	96.52
15.43	90	97.08	25	97.72	25	96.91	15	96.83

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 ไม่พบว่าปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นเวลานานถึง 6 ชั่วโมง แต่พบว่า ปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์

ต่อตารางเมตร โดยสามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.75 ที่เวลา 80, 40 และ 25 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.85 ที่เวลา 80, 70 และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.75 ที่เวลา 50, 40 และ 25 นาที ตามลำดับ

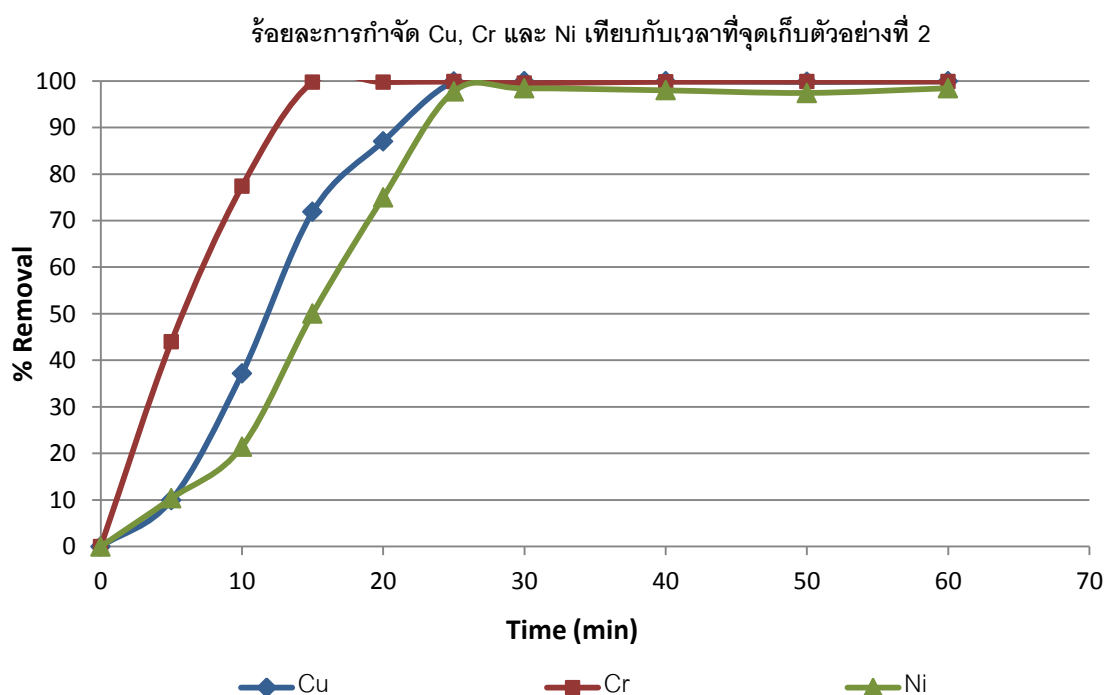
ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 3 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.69 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 210, 80, 60 และ 25 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.84 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 90, 60 และ 25 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.58 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 210, 80, 60 และ 25 นาที ตามลำดับ

ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 4 พบปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ ที่ทุกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า โดยระยะเวลาที่ใช้ในการกำจัดโลหะไอออนออกจากน้ำเสียลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้มีความมากขึ้น ดังนี้ ณ จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 4 สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่าร้อยละ 99.63 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 150, 50, 40 และ 20 นาที ตามลำดับ สามารถกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 99.85 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 180, 70, 60 และ 20 นาที ตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลได้มากกว่าร้อยละ 95.49 เมื่อควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เป็นระยะเวลา 150, 50, 40 และ 15 นาที ตามลำดับ

ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลถูกกำจัดได้พร้อมกันอย่างรวดเร็ว ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ในเวลา 25 นาที โดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการใช้ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้กระแสไฟฟ้าเพียงจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 2 สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้อย่างรวดเร็วโดยไม่จำเป็นต้องให้กระแสไฟฟ้าในจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ 4 เพิ่มเติม และสามารถลดขนาดถึงปฏิบัติการหรือขนาดระบบบำบัดลงได้ครั้งหนึ่ง ทำให้ประหยัดค่าไฟฟ้าและค่าก่อสร้างระบบลงได้ และจากผลการศึกษาเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Akbal และ Camci (2011) พบว่า Akbal และ Camci ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 100 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ในการกำจัด

ทองแดง โครเมียม และนิกเกิล แต่ในงานวิจัยนี้ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพียง 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสีย ตัวอย่าง (ภาพที่ 4.7) พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดียวกัน โดยภาพรวมแล้วค่าร้อยละของการกำจัดโครเมียมมีค่ามากกว่าร้อยละของการกำจัดทองแดงและมากกว่าร้อยละของการกำจัดนิกเกิล นั้นแสดงว่าโครเมียมถูกกำจัดออกจากระบบได้ง่ายกว่าทองแดง และทองแดงถูกกำจัดออกจากระบบได้ง่ายกว่านิกเกิล โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของโครเมียม,  $E^\circ = 1.33$  โวลต์ ซึ่งมีความมากกว่าค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของทองแดง,  $E^\circ = 0.34$  โวลต์ และมีความมากกว่าค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของนิกเกิล,  $E^\circ = -0.26$  โวลต์ ดังนั้นโครเมียมมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดได้ดีกว่าทองแดงและนิกเกิล ปฏิริยาการกำจัดผ่านกระบวนการรีดักชันจึงเกิดขึ้นได้ดีกว่าและเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมากขึ้น อัตราการลดลงของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจะสูงขึ้น เป็นผลให้ใช้เวลาในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลน้อยลง



ภาพที่ 4.7 ร้อยละการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2

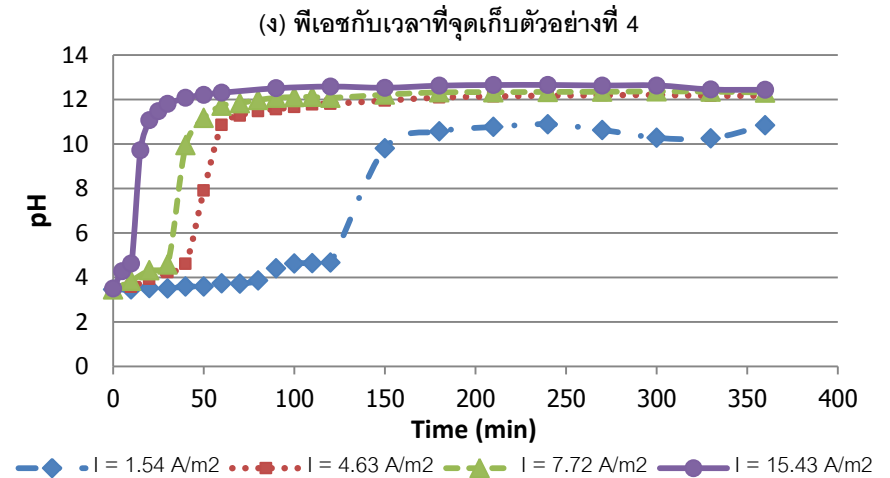
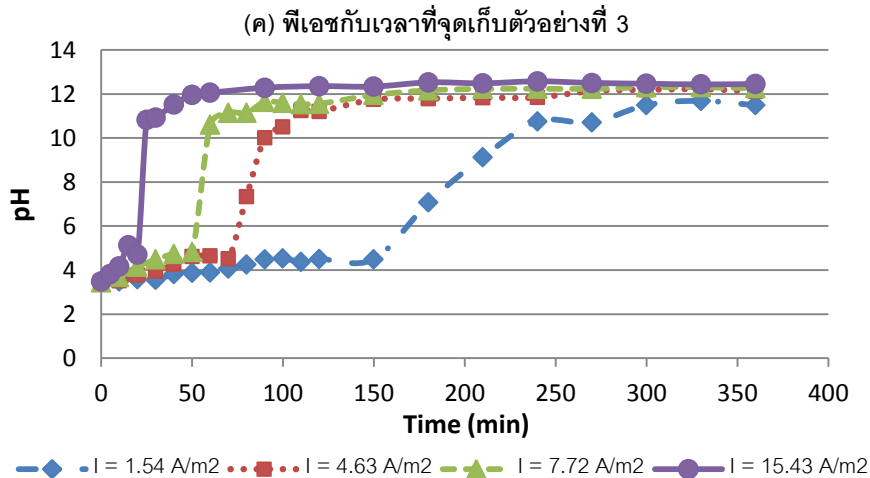
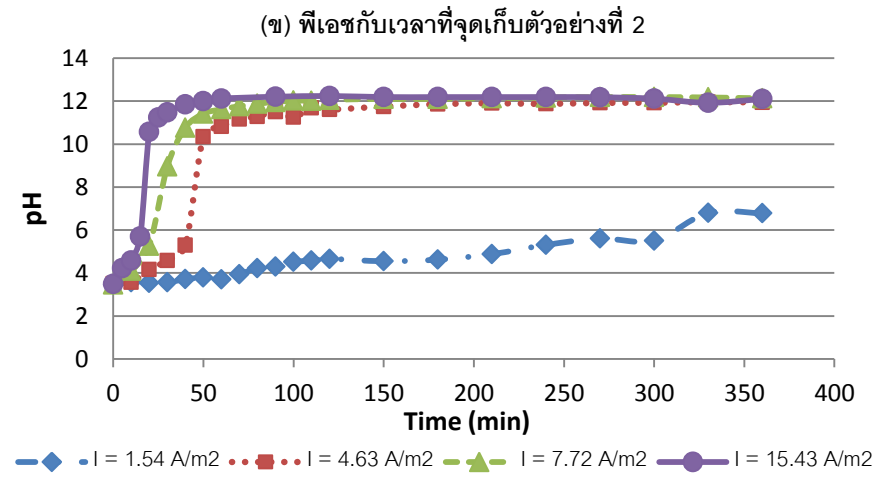
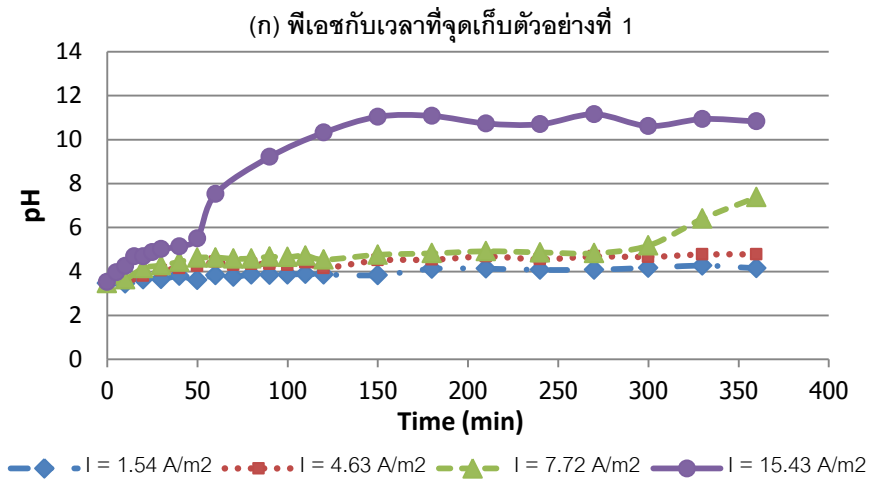
### 4.3 พีเอช

น้ำเสียจริงโรงงานผลิตแทนพิมพ์มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3.4 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ ต่อตารางเมตร ทำการตรวจวัดค่าพีเอชจากน้ำเสียจริงตลอดช่วงการทดลอง โดยมีการเปลี่ยนแปลงของพีเอชเกิดขึ้นดังภาพที่ 4.8 และสามารถอธิบายสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในแต่ละช่วงเวลาได้ โดยอาศัยปฏิกิริยาที่ (4.1) – (4.11)

ปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าแคโทด	$E^\circ$ (Volt)
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+} + 7H_2O$	$E^\circ = 1.33$ (4-1)
$NO_3^- + 4H^+ + 3e^- \rightarrow NO + 2H_2O$	$E^\circ = 0.96$ (4-2)
$Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$	$E^\circ = 0.34$ (4-3)
$SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \rightarrow SO_2 + 2H_2O$	$E^\circ = 0.17$ (4-4)
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	$E^\circ = 0$ (4-5)
$Ni^{2+} + 2e^- \rightarrow Ni$	$E^\circ = -0.26$ (4-6)
$Cr^{3+} + 3e^- \rightarrow Cr$	$E^\circ = -0.74$ (4-7)
$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$	$E^\circ = -0.828$ (4-8)
$Cu^{2+} + 2OH^- \rightarrow Cu(OH)_2$	(4-9)
$Cr^{3+} + 3OH^- \rightarrow Cr(OH)_3$	(4-10)
$Ni^{2+} + 2OH^- \rightarrow Ni(OH)_2$	(4-11)

ภาพที่ 4.8 แสดงค่าพีเอชของน้ำเสียที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลา พบว่าทุกความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในทุกๆ จุดเก็บตัวอย่าง ค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดลองด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงหลักๆ ดังนี้

1) ช่วงเริ่มต้นการทดลอง การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ อันเป็นผลเนื่องมาจากการดำเนินไปของปฏิกิริยา (4-1) ถึง (4-7) ซึ่งเป็นการกำจัดโครเมียม ทองแดงและนิกเกิลออกจากระบบผ่านปฏิกิริยารีดักชัน (พิจารณาภาพ 4.9 ประกอบ) พร้อมทั้งกับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ  $H^+$  ไอออน ซึ่งมีอยู่ปริมาณหนึ่งในน้ำตัวอย่าง (ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย

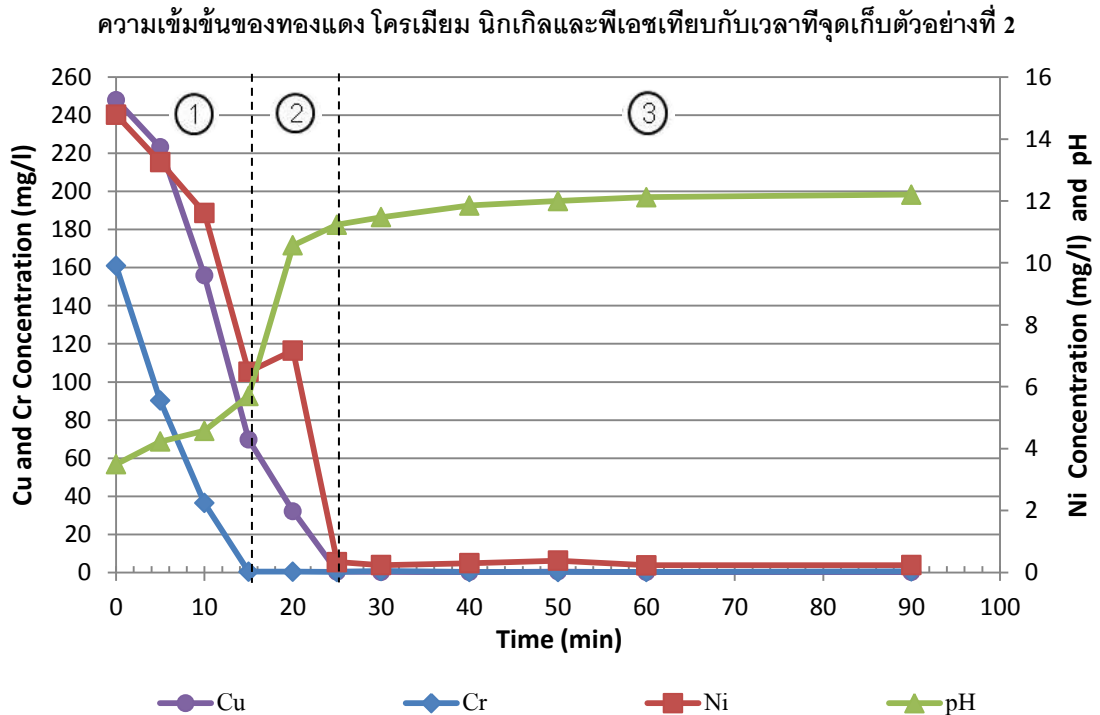


ภาพที่ 4.8 ค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ต่างๆ

(ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4

ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ตัวอย่างเท่ากับ 3.4) ส่งผลให้ความเป็นกรดของน้ำตัวอย่างลดลง ค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.9 ความเข้มข้นของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลกับค่าพีเอชเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ภาพที่ 4.9 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชกับปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในน้ำตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ ของการกำจัด ที่จุดเก็บตัวอย่างน้ำที่ 2 เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร จากภาพพบว่า ในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง โครเมียมและทองแดงถูกกำจัดอย่างรวดเร็ว จนความเข้มข้นลดลงจนเข้าใกล้ค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งฯ และนิกเกิลซึ่งเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ช้าที่สุด แสดงค่าความเข้มข้นที่ลดลงน้อยที่สุดในช่วงเริ่มต้นของการทดลองนี้ การเพิ่มขึ้นค่าพีเอชในน้ำตัวอย่างของช่วงการทดลองนี้ เกิดขึ้นจนถึงพีเอชประมาณ 5.5 - 6

2) เมื่อปริมาณโลหะไอออนในน้ำตัวอย่างลดลง ประกอบกับปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ถูกควบคุมไว้ที่ค่าคงที่ค่าเดิม เป็นผลให้ปฏิกิริยารีดักชันที่ (4-8) เริ่มดำเนินไปร่วมกับปฏิกิริยา (4-1) ถึง (4-7) และด้วยสารตั้งต้นของปฏิกิริยา (4-8) คือ  $H_2O$  ซึ่งมีปริมาณมากมายในตัวอย่างที่ทำการทดลอง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์  $OH^-$  ไอออน เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่ 2 ของการทดลอง จากค่าพีเอชประมาณ 5.5 – 6 ไปเป็นพีเอชประมาณ 10

ปริมาณ  $OH^-$  ไอออนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (4-8) ยังผลให้เกิดปฏิกิริยาตกตะกอนร่วมขึ้น ดังแสดงไว้ในปฏิกิริยาที่ (4-9) ถึง (4-11) ซึ่งปฏิกิริยาการตกตะกอนทั้ง 3 นี้ นับเป็นปฏิกิริยาร่วมที่สำคัญในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสีย การดำเนินไปของปฏิกิริยาทั้ง 3 ส่งผลให้ทองแดง โครเมียมและนิกเกิลถูกกำจัดออกไปจากน้ำเสียได้รวดเร็วขึ้นในช่วงที่ 2 ของการทดลองนี้ (ภาพที่ 4.9)

3) เมื่อโลหะไอออนทั้งสามถูกกำจัดออกจนหมดแล้วและน้ำตัวอย่างมีค่าพีเอชค่อนข้างสูง (ประมาณ 10) การดำเนินไปของปฏิกิริยา (4-1) ถึง (4-7) และ (4-9) ถึง (4-11) สิ้นสุดลง การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในช่วงนี้ท้ายของการทดลองนี้ เกิดเนื่องมาจากการดำเนินไปของปฏิกิริยา (4-8) เท่านั้น จากภาพที่ 4.8 และ 4.9 การเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในช่วงท้ายนี้ เกิดขึ้นอย่างช้าๆ หรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง สาเหตุที่เห็นเป็นเช่นนี้เนื่องจาก ในบริเวณที่ค่าพีเอชสูง การเพิ่มขึ้นของ 1 พีเอชยูนิต ต้องใช้  $OH^-$  ไอออนเป็นจำนวนมาก (ปฏิกิริยาที่ 4-12) ดังแสดงในตารางที่ 4.8 ทำให้พบการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในช่วงท้ายของการทดลองนี้เกิดขึ้นช้าลงอย่างมากหรือจนอาจจะไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงได้

$$pH = -\log [H^+] \quad (4-12)$$

ตารางที่ 4.8 แสดงตัวอย่างปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพีเอช 1 ยูนิต

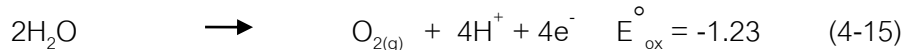
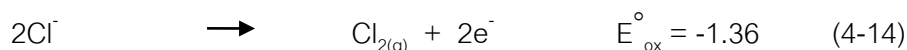
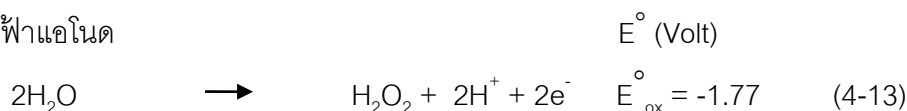
การเพิ่มของ pH จากค่าหนึ่งไปค่าหนึ่ง	$[OH^-]$ (mol/L)
7 → 8	$9 \times 10^{-7}$
9 → 10	$9 \times 10^{-5}$
11 → 12	$9 \times 10^{-3}$

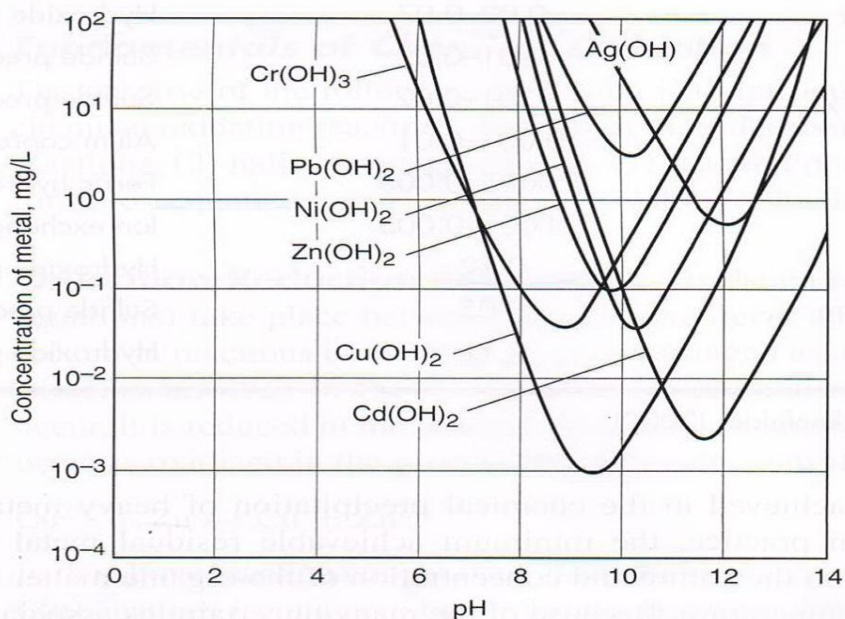


นอกจากนี้ที่ระดับพีเอช 11 พบการเพิ่มขึ้นของโครเมียมในน้ำตัวอย่าง (หรือการลดลงของ ร้อยละการกำจัดโครเมียม ดังแสดงไว้ในภาพที่ 4.5) อันแสดงถึงความเป็นไปได้ในการละลายกลับ ของตะกอน  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  ที่คาดว่าเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงที่ 2 ของการเพิ่มค่าพีเอช ภาพที่ 4.10 แสดง อิทธิพลของค่าพีเอชต่อการละลายของตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ จากภาพที่ 4.10 พบว่า ตะกอน  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  สามารถละลายได้ที่พีเอชต่ำกว่าตะกอน  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  และ  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  และเริ่มละลาย กลับได้ตั้งแต่พีเอช 9 จึงสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำตัวอย่าง เพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชสูงกว่า 11 ซึ่งจากการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่เก็บและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบเป็นระยะเวลาสั้นเกินไป ส่งผลให้ค่าพีเอชสูงขึ้น และเป็นสาเหตุให้ตะกอนของโลหะหนักละลายกลับคืนในรูปของสารละลาย ทำให้พบการเพิ่มขึ้นของโลหะ ในน้ำตัวอย่าง

ทั้งนี้เวลาที่ใช้ในแต่ละช่วงของการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ กล่าวคือ เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบมีค่ามาก เวลาที่ใช้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงพีเอชช่วงที่ 1 จะมีค่าน้อย ทำให้พบช่วงการเปลี่ยนแปลง ความชันของกราฟในภาพที่ 4.8 (ช่วงที่ 2 ของการเปลี่ยนแปลงพีเอช) เร็วขึ้น เช่น ณ จุดเก็บ ตัวอย่างที่ 2 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร การเพิ่มขึ้นของพีเอช ในช่วงที่ 1 สิ้นสุดลงภายในเวลา 15 นาที และที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4.63 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร การเพิ่มขึ้นของพีเอชในช่วงที่ 1 สิ้นสุดลง ณ เวลา 40 นาที เป็นต้น สำหรับข้อไฟฟ้า แอนโนด ความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาได้ถูกนำเสนอไว้ในปฏิกิริยาที่ (4-13) ถึง (4-15)

ปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้าแอนโนด





ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชที่มีต่อการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ

(Metcalf และ Eddy, 2004)

#### 4.4 ประสิทธิภาพเชิงกระแส

จากที่กล่าวมาในหัวข้อข้างต้น พบว่าในขณะที่ทำการควบคุมค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ณ เวลาต่าง ๆ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นบนขั้วแคโทดมีมากกว่าหนึ่งปฏิกริยาขึ้นไป ดังนั้นปริมาณกระแสที่ให้แก่ระบบจึงไม่ได้ถูกใช้ไปสำหรับการกำจัดทองแดง โคโรเนียมและนิกเกิลเท่านั้น ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วในการกำจัดโลหะไอออนที่ต้องการออกจากสารละลายเทียบกับปริมาณพลังงานหรือกระแสไฟฟ้าที่ให้กับระบบ ณ ช่วงเวลาหนึ่งๆ

ผลการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงกระแส แสดงดังตารางที่ 4.9 - 4.11 และภาพที่ 4.11 - 4.13 พบว่า ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 55.39, 28.87, 65.79 และ 57.25 ณ นาทีที่ 20, 30, 10 และ 15 ตามลำดับ โคโรเนียมมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 62.25, 85.48, 75.18 และ 95.70 ณ นาทีที่ 20, 20, 10 และ 10 ตามลำดับ และ

นิกเกิลมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 4.06, 2.05, 1.49 และ 1.76 ณ นาที่ที่ 30, 10, 10 และ 20 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.9** แสดงเวลาและประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดในการกำจัดทองแดงให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บตัวอย่าง 1		จุดเก็บตัวอย่าง 2		จุดเก็บตัวอย่าง 3		จุดเก็บตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
1.54	20	55.39	80	89.15	100	89.34	110	88.78
4.63	30	28.87	80	52.30	50	57.88	40	87.60
7.72	10	65.79	20	119.35	40	49.27	40	62.64
15.43	15	57.25	15	60.15	15	64.93	15	82.50

**ตารางที่ 4.10** แสดงเวลาและประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดในการกำจัดโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บตัวอย่าง 1		จุดเก็บตัวอย่าง 2		จุดเก็บตัวอย่าง 3		จุดเก็บตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)	เวลา (นาที่)	ประสิทธิภาพเชิงกระแส (%)
1.54	20	62.25	100	102.78	100	118.42	10	165.18
4.63	20	85.48	20	101.44	20	104.92	20	129.90
7.72	10	75.18	20	135.07	30	70.37	20	86.53
15.43	10	95.70	5	131.45	5	164.22	5	178.00

**ตารางที่ 4.11** แสดงเวลาและประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดในการกำจัดนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ณ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่ออนาที

ความ หนาแน่น กระแสไฟฟ้า (A/m <sup>2</sup> )	จุดเก็บ ตัวอย่าง 1		จุดเก็บ ตัวอย่าง 2		จุดเก็บ ตัวอย่าง 3		จุดเก็บ ตัวอย่าง 4	
	เวลา (นาท)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส	เวลา (นาท)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส	เวลา (นาท)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส	เวลา (นาท)	ประสิทธิภาพ เชิง กระแส
		(%)		(%)		(%)		(%)
1.54	30	4.06	10	5.86	10	5.77	10	6.25
4.63	10	2.05	50	5.17	80	3.22	50	5.14
7.72	10	1.49	30	4.99	10	2.79	40	3.90
15.43	20	1.76	20	3.93	25	3.13	15	5.20

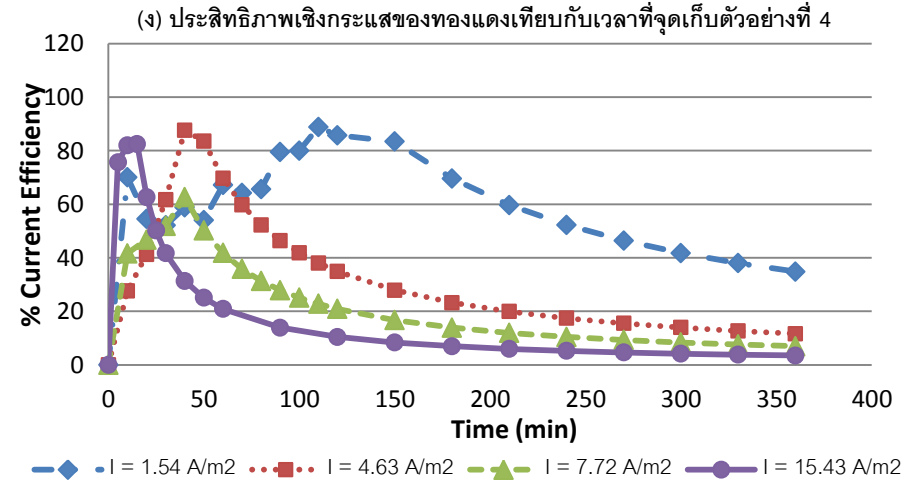
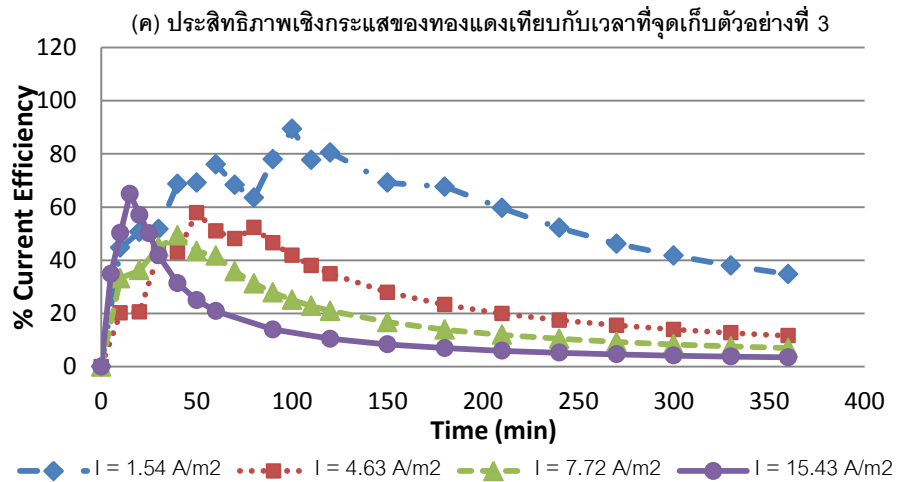
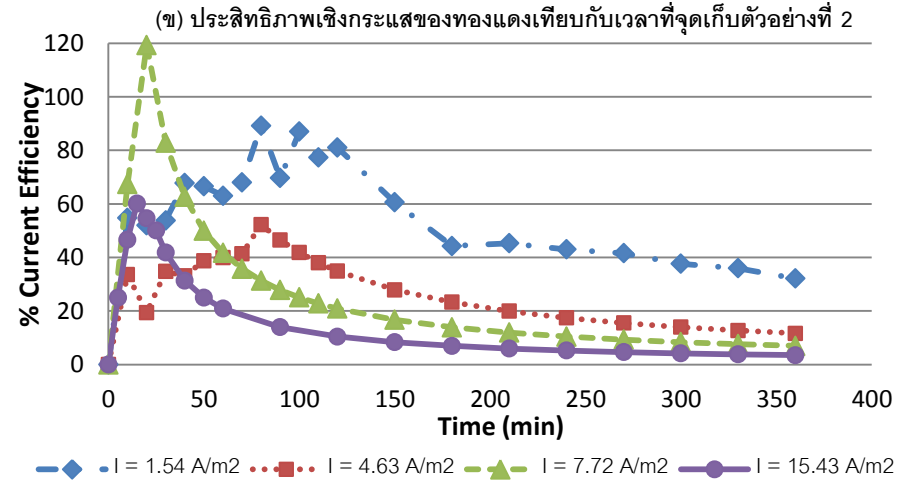
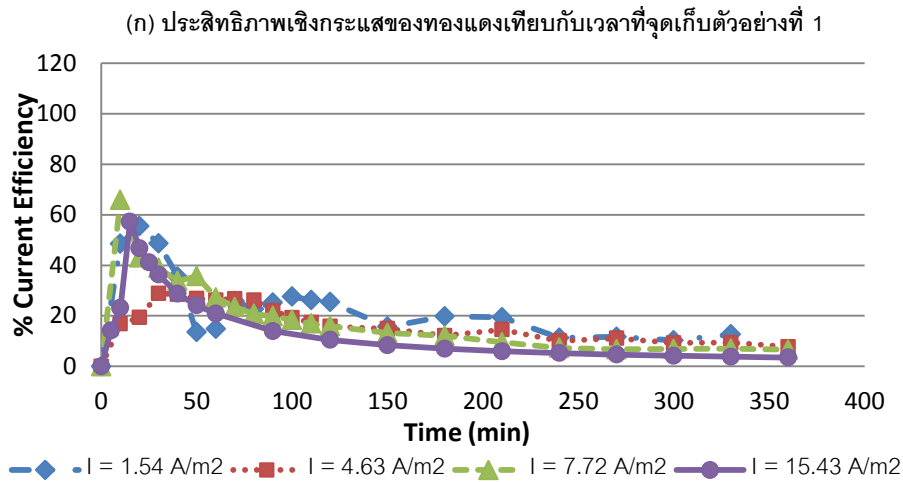
ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 89.15, 52.30, 119.35 และ 60.15 ณ นาที่ที่ 80, 80, 20 และ 15 ตามลำดับ โครเมียมมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 102.78, 101.44, 135.07 และ 131.45 ณ นาที่ที่ 100, 20, 20 และ 5 ตามลำดับ และนิกเกิลมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 5.86, 5.17, 4.99 และ 3.93 ณ นาที่ที่ 10, 50, 30 และ 20 ตามลำดับ

ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 89.34, 57.88, 49.27 และ 64.93 ณ นาที่ที่ 110, 50, 40 และ 15 ตามลำดับ โครเมียมมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 118.42, 104.92, 70.37 และ 164.22 ณ นาที่ที่ 100, 20, 30 และ 5 ตามลำดับ และนิกเกิลมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 5.77, 3.22, 2.79 และ 3.13 ณ นาที่ที่ 10, 80, 10 และ 25 ตามลำดับ

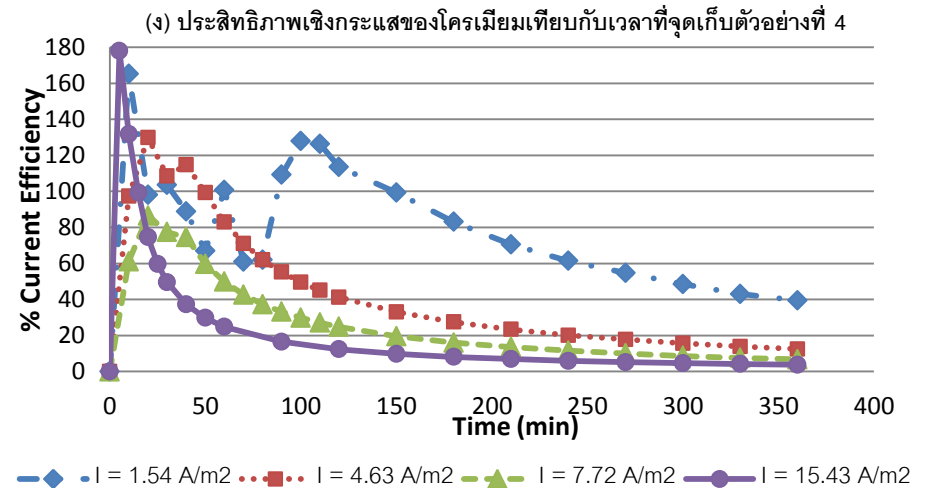
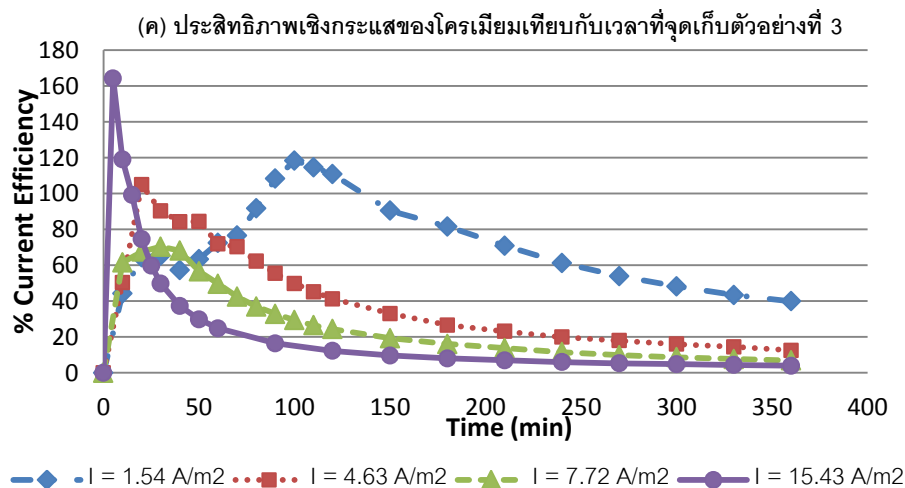
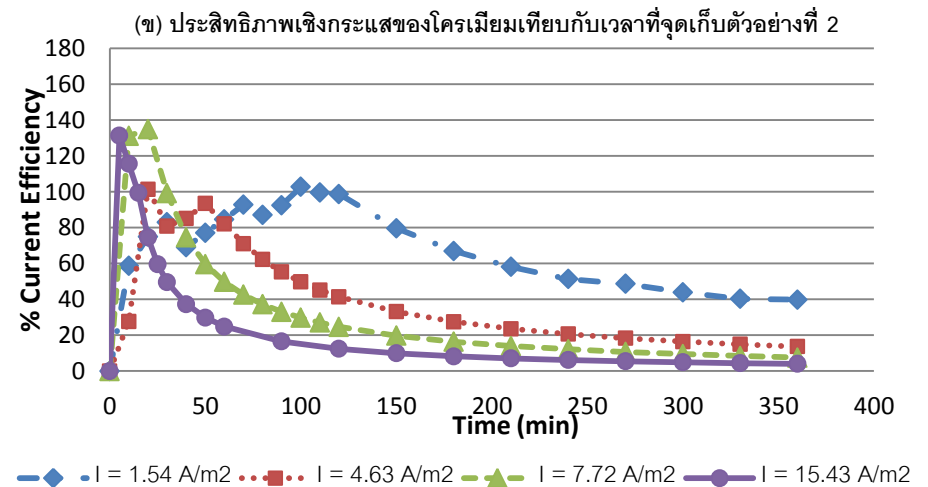
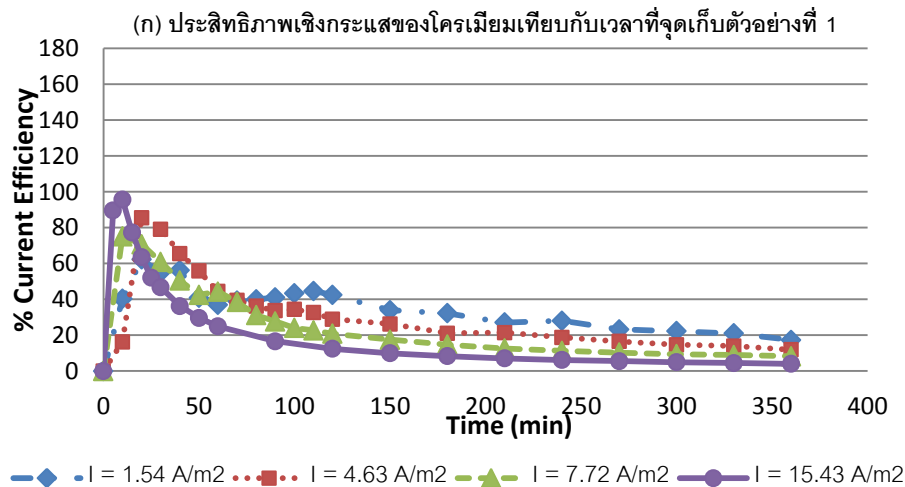
ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 88.78, 87.60, 62.64 และ 82.50 ณ นาทีที่ 110, 40, 40 และ 15 ตามลำดับ โครเมียมมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 165.18, 129.90, 86.53 และ 178.00 ณ นาทีที่ 10, 20, 20 และ 5 ตามลำดับ และนิกเกิลมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร คือร้อยละ 6.25, 5.14, 3.90 และ 5.20 ณ นาทีที่ 10, 50, 40 และ 15 ตามลำดับ

ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสจะมีค่าลดลงเมื่อผ่านค่าสูงสุดมาแล้ว ซึ่งเป็นผลสอดคล้องกับปริมาณทองแดง โครเมียมและนิกเกิลที่เหลืออยู่ในสารละลายน้อย ณ เวลาดังกล่าว ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้ไปในระบบ ถูกใช้ไปกับการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสที่คำนวณได้มีค่าลดลงเมื่อเวลาดำเนินผ่านไป และพบว่าเวลาที่เกิดประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงมีแนวโน้มลดลง เมื่อค่าความหนาแน่นกระแสที่ไฟฟ้าให้กับระบบมีค่ามากขึ้น เช่น ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ทองแดงมีค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสสูงสุดที่เวลา 80, 80, 20 และ 15 นาที เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

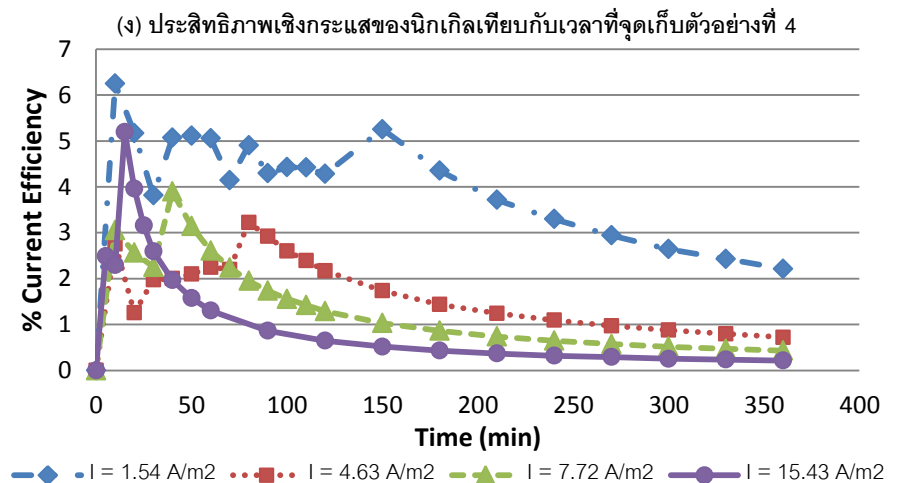
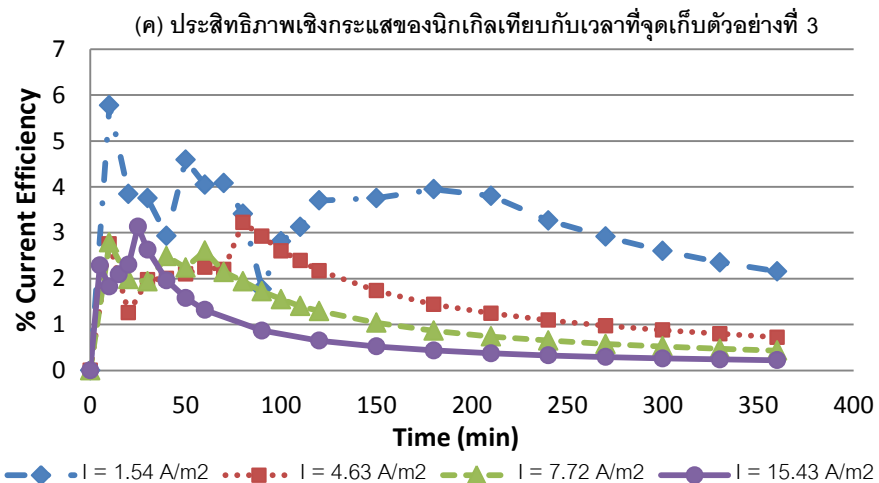
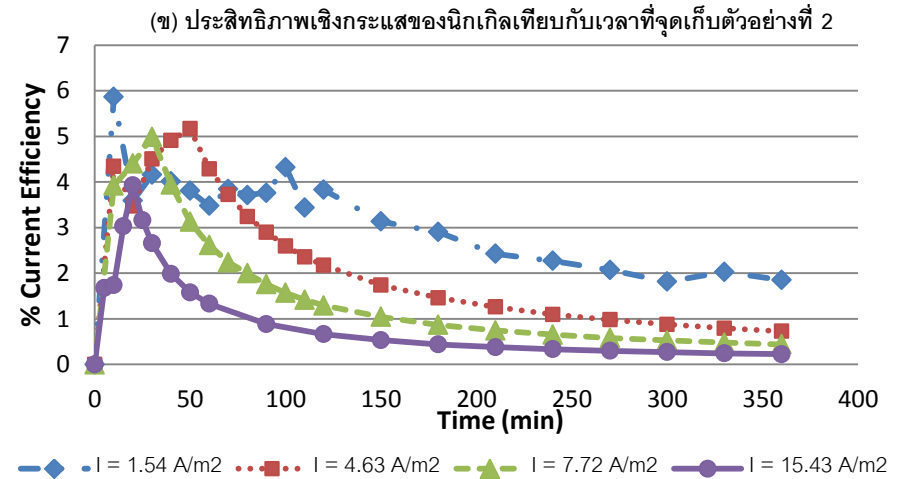
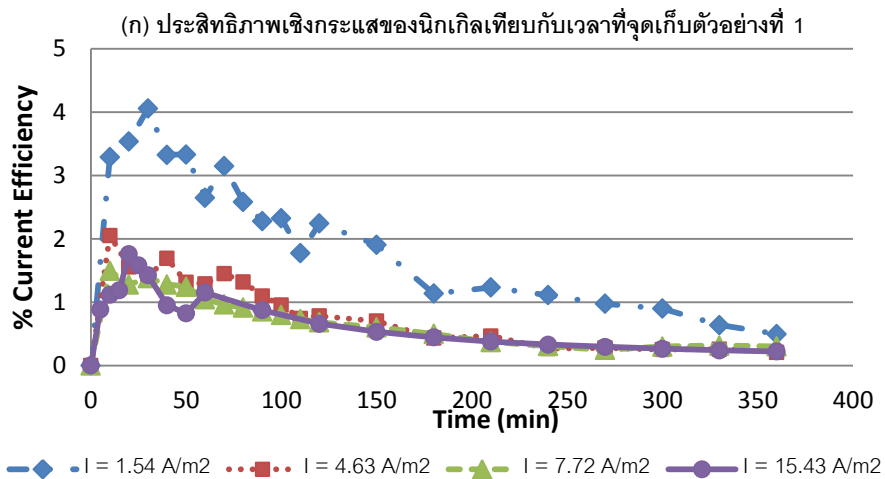
จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียจริง พบว่าเมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลที่ 2.8 มิลลิเมตรต่อนาที และควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้พร้อมกันอย่างรวดเร็ว ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 โดยสามารถกำจัดทองแดง ณ นาทีที่ 25 ให้ลดลงเหลือ 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นทองแดงเริ่มต้น 248 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.84 สามารถกำจัดโครเมียม ณ นาทีที่ 25 ให้ลดลงเหลือ 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 161 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 99.85 และสามารถกำจัดนิกเกิล ณ นาทีที่ 25 ให้ลดลงเหลือ 0.34 มิลลิกรัมต่อลิตร จากความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น 14 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดที่ 97.72 ซึ่งจากการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการให้กระแสไฟฟ้าเพียงจุดเก็บตัวอย่างที่ 1 และ 2 สามารถกำจัดทองแดงและโครเมียมให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ โดยไม่จำเป็นต้องให้กระแสไฟฟ้าในจุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ 4 เพิ่มเติม



ภาพที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของทองแดงเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.12 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของโครเมียมเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 4.13 ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของนิกเกิลเทียบกับเวลาเมื่อควบคุมความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ณ จุดเก็บตัวอย่างต่างๆ (ก) จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 (ข) จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 (ค) จุดเก็บตัวอย่างที่ 3 และ (ง) จุดเก็บตัวอย่างที่ 4 ควบคุมอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที



#### 4.5 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

จากผลการทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนทัม โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง มีค่าใช้จ่ายอยู่หลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือ ค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้า สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการนี้จะไม่ขอคำนึงถึงค่าเครื่องมือ อันได้แก่ อุปกรณ์เครื่องแก้ว ปิเปต เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า และเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก เป็นต้น เนื่องจากราคาต้นทุนและขนาด/ปริมาณการใช้อุปกรณ์เหล่านี้ในระดับอุตสาหกรรมมีความแตกต่างจากระดับห้องปฏิบัติการค่อนข้างมาก ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัดนี้ จึงขอพิจารณาเฉพาะค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี ค่าไฟฟ้า และค่าชั่วโมงไฟฟ้าเท่านั้น

##### 4.5.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝังขั้วไฟฟ้าแอโนด ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีราคา 12 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในระดับอุตสาหกรรม)

น้ำเสีย 1,000 มิลลิลิตร ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร (โซเดียมคลอไรด์ 29.25 กรัม) ดังนั้นจึงเสียค่าโซเดียมคลอไรด์ 0.351 บาท ซึ่งถ้า น้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องเสียค่าโซเดียมคลอไรด์ 351 บาท

##### 4.5.2 ค่าใช้จ่ายด้านเคมีไฟฟ้า

การคำนวณค่าใช้จ่ายทางเคมีไฟฟ้า จะคำนวณเฉพาะราคาค่าไฟฟ้าโดยไม่ได้คำนวณถึงต้นทุนที่ใช้ทั้งหมดในการบำบัด เพราะการทดลองนี้เป็นการทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติมากน้อยเพียงใด ซึ่งมีสูตรคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า (kWh/m}^3\text{)} &= \frac{\text{แรงดันไฟฟ้า (volt)} \times \text{กระแสไฟฟ้า (A)} \times \text{เวลา (hr)}}{\text{ปริมาตรน้ำเสียที่บำบัด (L)}} \\ &= \frac{7.4 \text{ volt} \times 1 \text{ A} \times \left(\frac{25}{60}\right) \text{ hr}}{1 \text{ L}} \\ &= 3.08 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากพลังงานในการบำบัดคูณกับราคาค่าไฟฟ้าต่อยูนิต  
ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times (\text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\ &= 3.08 \times 2.5 \\ &= 7.7 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นวิธีทางไฟฟ้าเคมีมีค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าสำหรับ 4 ช่องการบำบัดอยู่ที่ 7.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หากสามารถระงับการจ่ายไฟในช่องการบำบัดที่ 3 และ 4 ได้ กำลังไฟฟ้าที่ใช้และค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้าจะลดลงเหลือน้อยกว่า 3.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร และ 7.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ

จากผลการศึกษาเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Akbal และ Camci (2011) พบว่า Akbal และ Camci ใช้พลังงานไฟฟ้า 10.07 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 25.18 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ในการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิล แต่ในงานวิจัยนี้ใช้พลังงานไฟฟ้าเพียง 3.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร คิดเป็นค่าไฟฟ้า 7.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งน้อยกว่า Akbal และ Camci ถึง 3 เท่า

#### 4.5.3 ค่าขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำจากแกรไฟต์ โดยขั้วไฟฟ้าแคโทดขนาด 3 x 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 12 แผ่น ราคา 1,200 บาท และขั้วไฟฟ้าแอโนดขนาด 12 x 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น ราคา 1,050 บาท รวมค่าขั้วไฟฟ้าฝั่งแคโทดและแอโนดเท่ากับ 2,250 บาท

#### 4.6 แนวคิดการนำไปใช้งานจริง

##### Plant Scale

อัตราน้ำเสียไหลก่อนเข้าถังบำบัดเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน (โรงงานขนาดเล็ก) ระยะเวลาที่เก็บน้ำสำหรับวิธีการเคมีไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ 180 นาที

คำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ขนาดถังบำบัด} &= 180 \text{ min} \times \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1 \text{ day}} \\ &= 0.125 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

ในงานวิจัยนี้ใช้พื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell Volume Ratio; A/V) ผัง  
ขั้วแคโทดเท่ากับ 64.8 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned} \frac{A}{V} &= 64.8 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \\ \frac{A}{0.125 \text{ m}^3} &= 64.8 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \\ \therefore A &= 64.8 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3} \times 0.125 \text{ m}^3 = 8.1 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ขนาดขั้วไฟฟ้า (A)} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น} \\ &= 0.35 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 2 \text{ ด้าน} \times 12 \text{ แผ่น} \\ &= 8.4 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{A}{V} = \frac{8.4 \text{ m}^2}{0.125 \text{ m}^3} = 67.2 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$$

$$\begin{aligned} \text{กระแสไฟฟ้า (A)} &= \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/m}^2) \times \text{พื้นที่ขั้วไฟฟ้าแคโทด (m}^2) \\ &= 15.43 \text{ (A/m}^2) \times 8.4 \text{ m}^2 \\ &= 130 \text{ A} \end{aligned}$$

ในการออกแบบสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ใช้ถังบำบัดขนาด 0.125 ลูกบาศก์  
เมตร ใช้ขั้วไฟฟ้าขนาดกว้าง 0.35 เมตร ยาว 1 เมตร จำนวน 12 แผ่น และให้กระแสไฟฟ้า 130  
แอมแปร์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียจริง โรงงานผลิตแทนทิมพ์ โดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง โครเมียมและนิกเกิลเท่ากับ 248, 161 และ 14 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำการทดลองที่อัตราการไหล 2.8, 5.6 และ 8.3 มิลลิตรต่อนาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

1. เมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เดินระบบด้วยอัตราการไหลที่ 8.3, 5.6 และ 2.8 มิลลิตรต่อนาที พบว่าที่อัตราการไหล 2.8 มิลลิตรต่อนาที สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้ร้อยละ 99.83 99.85 และ 97.08 ตามลำดับ ในเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 1
2. เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหลคงที่ที่ 2.8 มิลลิตรต่อนาที ให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1.54, 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้พร้อมกันอย่างรวดเร็ว ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ในเวลา 25 นาที โดยสามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้ร้อยละ 99.84, 99.85 และ 97.72 ตามลำดับ
3. พลังงานที่ใช้ในการทดลองการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียจริง คือ 3.08 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นค่าไฟฟ้าไม่เกิน 7.7 บาทต่อลูกบาศก์เมตร โดยค่าใช้จ่ายที่คิดไม่รวมค่าเครื่องมือ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เสนอให้ศึกษาการกำจัดไอออนซัลเฟตก่อน ซึ่งผลของไอออนซัลเฟตและไอออนอื่นๆ ที่มีความสามารถรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าทองแดง โครเมียมและนิกเกิลส่งผลทำให้ความสามารถในการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าลดลง
2. เสนอให้ศึกษาการปรับเปลี่ยนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบในแต่ละจุดเก็บตัวอย่าง
3. เสนอให้ศึกษาการกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลโดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง ด้วยการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

## 5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

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

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2549. การบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มิตินราการพิมพ์.
- เกื้อจวลี พุกษาทร. 2548. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเคมีไฟฟ้าประยุกต์. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. 2543. มาตรฐานคุณภาพน้ำและเกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.
- ฉัฐบรรณ วรธนรัตน์. 2542. ผลของตัวแปรต่ออิเล็กทรอนิกส์ชั้นของนิกเกิล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัย ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ตติ จิตรู. 2550. การศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีในระบบที่ละเทและต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปทุมทิพย์ เสมอภาค. 2550. การขจัดนิกเกิลและสังกะสีจากสารละลายเจือจางโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบผ้าคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัย ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิชิต ลีกุล. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2552. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 4 กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนัส สติรจินดา. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัย ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- มันสิน ตันฑุลเวศน์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศน์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1.  
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษ. สมาคมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- ลาวัลย์ ศรีพงศ์. 2543. การวิเคราะห์เชิงเคมีไฟฟ้า. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัย  
ศิลปากร.
- วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนัก  
จากโรงงานประกอบรถยนต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศรายุทธ ลาภพูนผล. 2549. การกำจัดโครเมียมโดนกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยก  
ตะกอนลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศรีธัญ ศรีรัษฎรัตน์. 2553. การกำจัดนิเกิลจากของเสียห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการพอกพูนด้วย  
ไฟฟ้าแบบควบคุมกระแสไฟฟ้าให้คงที่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชา  
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภชัย ใช้เทียมวงศ์. 2543. ปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 6 กรุงเทพมหานคร:  
สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสิ่งเป็นพิษ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
[http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc\\_toxic/a\\_tx\\_1\\_001c.asp?info\\_id=296](http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296). [2554,  
ตุลาคม 10]
- สมชาย พวงเพ็ชร์ และชูศักดิ์ แซ่มเกษม. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 2 เรื่อง  
ทองแดง. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://guru.sanook.com/enc\\_preview.php?id=632](http://guru.sanook.com/enc_preview.php?id=632).  
[2554, ตุลาคม 10]
- สุรางค์ อนุกุล. 2542. ปฏิบัติการเคมีคุณภาพวิเคราะห์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Akbal, F., and Camci, S. 2011. Copper chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. Desalination. 269: 214–222.
- Benjamin, M.M. 2002. Water Chemistry. NY : McGraw-Hill.
- Chen, G. 2004. Electrocoagulation technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38: 11-44.
- Emamjomeh, M.M., and Sivakumar, M. 2009. Fluoride removal by a continuous flow electrocoagulation reactor. Journal of environmental management. 90: 1204-1212.
- Fourcade, F. and Tzedakis, T. 2000. Study of the mechanism of the electrochemical deposition of silver from an aqueous silver iodide suspension. Journal of Electroanalytical Chemistry. 493: 20-27.
- Friedrich, H. 1962. Ion Exchange. New York: McGraw-Hill.
- Mollah, M.Y.A., et al. 2004. Fundamentals present and future perspective of electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials. B114: 189-199.
- 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.
- Oztekin, Y., and Yazicigil, Z. 2006. Recovery of metals from complexed solutions by Electrodeposition. Desalination. 190: 79–88.
- Patterson, J.W. 1985. Industrial wastewater treatment technology. Boston: Butterworth Publisher.
- Pertorius, W., Johannes, W., and Lempert, G. 1991. Electrolytic Iron flocculants production with bipolar electrode in series arrangement. Water SA. 17: 133-13.
- Rana, P., Mohan, N. and Rajagopal, C. 2004, Electrochemical removal of chromium from wastewater by using carbon aerogel electrodes, Water Research. 38: 2811-2820.



Schlesinger, M., and Paunovic, M. 2000. Modern electroplating. New York: Wiley.

Scott, K., Chen, X., A0tkinson, J.W., Todd, M., and Armstrong R.D. 1997.  
Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the  
manufacture of circuit boards. Conservation and Recycling. 20: 43-55.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.  
ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

ตารางที่ ก.1 ค่าพีเอชของทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราเร็วไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 8.3 มิลลิเมตรต่อนาที (n = 3)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
0	3.50	0.01	3.46	0.04	3.48	0.01	3.48	0.01
5	4.22	0.03	4.31	0.01	4.37	0.03	4.37	0.06
10	4.23	0.02	4.52	0.06	4.54	0.01	4.58	0.06
15	4.69	0.62	4.59	0.01	4.64	0.04	4.74	0.05
20	4.25	0.04	4.53	0.16	4.50	0.32	4.80	0.02
25	4.59	0.03	5.84	0.27	10.03	0.50	10.16	0.06
30	4.46	0.13	10.12	0.13	10.60	0.23	10.83	0.66
40	4.64	0.04	11.17	0.06	11.20	0.06	11.67	0.12
50	4.57	0.02	11.29	0.07	11.72	0.08	11.72	0.13
60	4.74	0.06	11.56	0.13	11.90	0.05	11.75	0.17
90	4.66	0.14	11.46	0.44	12.05	0.04	11.44	0.68
120	4.64	0.07	11.73	0.29	12.16	0.01	11.48	0.49

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	248.66	0.64	0.00	0.00	248.05	0.28	0.00	0.00	248.76	0.93	0.00	0.00	249.38	1.60	0.00	0.00
5	207.73	4.99	16.46	41.43	204.91	1.99	17.39	43.67	213.85	2.40	14.03	35.34	203.34	2.98	18.46	46.61
10	152.49	4.33	38.67	48.68	122.54	3.27	50.60	63.53	138.54	2.57	44.31	55.80	124.97	5.13	49.89	62.98
15	101.70	0.71	59.10	49.59	93.41	1.46	62.34	52.18	68.75	1.00	72.36	60.75	47.77	1.11	80.85	68.04
20	90.22	3.91	63.72	40.10	61.36	1.02	75.26	47.25	55.40	3.20	77.73	48.94	39.37	1.03	84.21	53.15
25	85.49	1.32	65.62	33.04	8.74	0.86	96.48	48.45	6.48	1.28	97.39	49.06	0.05	0.01	99.98	50.48
30	90.56	8.90	63.58	26.68	0.29	0.05	99.89	41.80	0.04	0.03	99.98	41.97	0.04	0.02	99.98	42.07
40	81.11	0.78	67.38	21.20	0.10	0.03	99.96	31.38	0.06	0.01	99.98	31.47	0.05	0.01	99.98	31.55
50	93.41	11.58	62.43	15.72	0.12	0.04	99.95	25.10	0.08	0.02	99.97	25.18	0.04	0.00	99.98	25.24
60	80.78	2.36	67.51	14.16	0.05	0.02	99.98	20.92	0.05	0.05	99.98	20.98	0.03	0.01	99.99	21.04
90	96.01	10.88	61.39	8.59	0.04	0.03	99.98	13.95	0.06	0.03	99.98	13.99	0.06	0.01	99.98	14.02
120	99.29	9.35	60.07	6.30	0.08	0.03	99.97	10.46	0.05	0.02	99.98	10.49	0.06	0.04	99.98	10.52

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 8.3 มิลลิเมตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	161.25	0.78	0.00	0.00	160.95	0.86	0.00	0.00	160.69	0.37	0.00	0.00	160.98	0.88	0.00	0.00
5	146.72	2.45	9.01	26.97	144.36	4.23	10.30	30.78	140.88	2.36	12.33	36.76	138.46	2.88	13.99	41.80
10	104.41	4.37	35.25	52.74	104.62	4.29	35.00	52.27	98.90	2.34	38.45	57.34	55.42	3.01	65.57	97.95
15	68.10	17.47	57.77	57.62	73.51	2.45	54.33	54.09	53.27	2.87	66.85	66.45	36.36	2.04	77.41	77.09
20	61.73	1.30	61.72	46.17	53.40	3.85	66.82	49.90	35.36	3.87	77.99	58.15	29.34	1.07	81.77	61.08
25	49.97	11.55	69.01	41.31	1.44	0.13	99.11	59.21	4.19	1.41	97.39	58.09	0.22	0.02	99.86	59.67
30	55.05	6.80	65.86	32.85	0.23	0.01	99.86	49.71	0.22	0.01	99.86	49.64	0.13	0.02	99.92	49.75
40	58.07	1.32	63.99	23.94	0.21	0.03	99.87	37.29	0.19	0.01	99.88	37.23	0.07	0.01	99.96	37.33
50	55.32	6.69	65.69	19.66	0.21	0.09	99.87	29.83	0.16	0.01	99.90	29.79	3.29	0.51	97.96	29.27
60	39.71	9.42	75.37	18.80	0.12	0.01	99.92	24.87	0.23	0.01	99.85	24.82	4.93	0.21	96.94	24.14
90	60.50	11.81	62.48	10.39	0.22	0.01	99.86	16.57	0.34	0.03	99.79	16.53	14.37	1.78	91.07	15.12
120	41.05	5.30	74.54	9.29	0.16	0.02	99.90	12.43	0.49	0.08	99.70	12.39	15.68	1.68	90.26	11.24

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 8.3 มิลลิเมตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	14.67	0.06	0.00	0.00	14.67	0.17	0.00	0.00	14.68	0.15	0.00	0.00	14.46	0.09	0.00	0.00
5	12.87	0.38	12.27	1.97	12.89	0.93	12.17	1.96	12.75	0.52	13.15	2.12	12.50	0.66	13.52	2.14
10	11.41	0.25	22.20	1.78	11.77	0.42	19.77	1.59	11.28	0.41	23.13	1.86	11.01	0.35	23.83	1.89
15	10.22	0.21	30.32	1.62	10.49	0.25	28.49	1.53	8.98	0.77	38.83	2.08	8.52	0.47	41.09	2.17
20	9.63	0.85	34.32	1.38	8.45	0.42	42.40	1.70	5.67	0.65	61.35	2.47	5.75	1.03	60.21	2.38
25	9.69	0.23	33.92	1.09	5.28	0.21	63.98	2.06	0.72	0.08	95.07	3.06	0.52	0.02	96.37	3.05
30	8.67	0.30	40.88	1.10	0.71	0.12	95.19	2.55	0.64	0.03	95.64	2.56	0.50	0.10	96.53	2.55
40	8.76	0.37	40.26	0.81	0.56	0.07	96.16	1.93	0.57	0.00	96.14	1.93	0.47	0.09	96.72	1.92
50	9.53	0.43	35.05	0.56	0.51	0.12	96.53	1.55	0.46	0.01	96.87	1.56	0.53	0.24	96.31	1.53
60	7.48	0.20	49.01	0.66	0.35	0.04	97.60	1.31	0.39	0.03	97.35	1.30	0.44	0.18	96.97	1.28
90	10.26	0.69	30.04	0.27	0.23	0.02	98.45	0.88	0.38	0.10	97.40	0.87	0.51	0.12	96.50	0.85
120	10.85	0.23	26.01	0.17	0.25	0.05	98.31	0.66	0.28	0.05	98.07	0.66	0.37	0.16	97.41	0.64

ตารางที่ ก.5 ค่าพีเอชของทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อ ตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 5.6 มิลลิเมตรต่อนาที (n = 3)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
0	3.48	0.01	3.43	0.03	3.45	0.03	3.46	0.03
5	3.93	0.05	4.19	0.07	4.37	0.04	4.42	0.15
10	4.33	0.21	4.42	0.05	4.51	0.11	4.75	0.28
15	4.43	0.11	4.86	0.38	5.01	0.44	10.55	0.20
20	4.60	0.01	6.21	0.05	6.61	0.18	11.10	0.54
25	4.60	0.08	6.63	0.74	10.79	0.10	11.45	0.25
30	4.74	0.23	11.07	0.67	11.37	0.08	11.77	0.27
35	4.70	0.25	11.13	0.66	11.14	0.61	11.85	0.28
40	4.59	0.20	11.15	0.82	11.45	0.35	11.92	0.18
45	4.58	0.33	11.54	0.36	11.87	0.06	12.04	0.23
50	4.94	0.54	11.64	0.29	11.95	0.12	12.09	0.23
55	4.82	0.30	11.66	0.23	11.88	0.01	12.06	0.28
60	4.51	0.11	11.62	0.25	11.80	0.08	12.13	0.19
90	4.64	0.33	11.86	0.10	12.10	0.07	12.25	0.10
120	4.78	0.56	11.12	1.27	12.14	0.13	12.29	0.01
150	4.77	0.04	11.23	0.98	12.14	0.24	12.33	0.00
180	5.14	1.02	11.77	0.09	12.17	0.05	12.25	0.13



ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	247.84	0.59	0.00	0.00	248.16	0.63	0.00	0.00	248.51	0.28	0.00	0.00	248.53	0.40	0.00	0.00
5	226.62	6.67	8.56	21.48	220.58	4.49	11.11	27.92	160.66	3.76	35.35	88.93	133.58	15.39	46.25	116.37
10	140.61	6.02	43.26	54.28	150.43	3.51	39.38	49.47	97.57	1.09	60.74	76.40	32.28	10.72	87.01	109.46
15	135.80	7.49	45.21	37.81	98.55	2.54	60.29	50.49	53.17	6.46	78.61	65.92	4.59	1.81	98.15	82.32
20	117.96	24.83	52.41	32.87	16.91	2.32	93.19	58.53	16.07	3.20	93.54	58.83	1.28	0.09	99.49	62.58
25	122.88	9.87	50.42	25.30	12.77	1.95	94.85	47.66	0.40	0.47	99.84	50.24	0.65	0.18	99.74	50.19
30	111.60	1.63	54.97	22.99	0.78	0.05	99.69	41.74	0.37	0.30	99.85	41.87	0.39	0.46	99.84	41.87
35	129.98	10.36	47.56	17.05	0.69	0.06	99.72	35.79	0.60	0.06	99.76	35.85	0.41	0.18	99.83	35.88
40	131.12	16.67	47.10	14.77	0.56	0.04	99.77	31.33	0.46	0.05	99.82	31.39	0.81	0.19	99.67	31.35
45	105.40	4.31	57.47	16.02	0.46	0.01	99.82	27.86	0.29	0.09	99.89	27.92	0.37	0.21	99.85	27.92
50	120.02	5.76	51.57	12.94	0.36	0.07	99.85	25.09	0.52	0.05	99.79	25.11	0.27	0.28	99.89	25.13
55	126.21	2.42	49.07	11.19	0.45	0.14	99.82	22.80	0.29	0.33	99.88	22.84	0.51	0.02	99.79	22.83
60	133.03	16.86	46.32	9.69	0.24	0.04	99.91	20.92	0.22	0.20	99.91	20.95	0.19	0.19	99.92	20.95
90	129.12	18.43	47.90	6.68	0.63	0.35	99.75	13.92	0.39	0.10	99.84	13.95	0.15	0.17	99.94	13.97
120	122.64	16.64	50.52	5.28	0.36	0.01	99.86	10.45	0.22	0.07	99.91	10.47	0.13	0.09	99.95	10.48
150	115.96	0.20	53.21	4.45	0.48	0.33	99.81	8.36	0.25	0.04	99.90	8.38	0.35	0.24	99.86	8.38
180	126.56	18.30	48.93	3.41	0.30	0.03	99.88	6.97	0.56	0.08	99.78	6.97	0.26	0.23	99.90	6.98

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	161.00	1.07	0.00	0.00	161.26	0.06	0.00	0.00	161.37	0.75	0.00	0.00	161.49	0.37	0.00	0.00
5	131.79	3.73	18.14	54.20	99.91	2.18	38.05	113.87	57.54	3.05	64.34	192.70	41.58	3.01	74.26	222.55
10	51.02	7.73	68.31	102.06	43.53	2.94	73.01	109.25	31.30	2.11	80.61	120.70	5.37	1.44	96.67	144.87
15	49.92	6.95	69.00	68.72	24.65	5.95	84.72	84.51	11.54	1.71	92.85	92.69	1.93	0.13	98.81	98.71
20	29.61	0.72	81.61	60.96	7.13	1.10	95.58	71.52	3.08	0.68	98.09	73.44	0.23	0.02	99.86	74.82
25	29.95	3.39	81.40	48.64	6.03	1.09	96.26	57.62	0.20	0.02	99.87	59.82	0.20	0.02	99.88	59.87
30	29.25	6.65	81.83	40.75	0.21	0.04	99.87	49.82	0.20	0.04	99.88	49.85	0.10	0.04	99.94	49.92
35	37.14	15.78	76.93	32.84	0.18	0.03	99.89	42.71	0.15	0.03	99.91	42.74	0.07	0.03	99.96	42.80
40	37.73	11.55	76.56	28.60	0.14	0.01	99.92	37.38	0.11	0.02	99.93	37.41	0.31	0.10	99.81	37.39
45	27.28	0.25	83.06	27.57	0.20	0.20	99.88	33.21	0.14	0.13	99.91	33.25	0.39	0.03	99.76	33.22
50	28.34	9.91	82.40	24.62	0.54	0.15	99.67	29.83	0.61	0.40	99.62	29.84	0.51	0.17	99.68	29.88
55	26.56	3.39	83.51	22.68	0.46	0.01	99.72	27.13	0.44	0.09	99.72	27.15	0.86	0.11	99.47	27.10
60	40.84	12.60	74.63	18.58		0.14	99.74	24.88	0.98	0.01	99.40	24.81	1.09	0.36	99.33	24.81
90	36.53	10.15	77.31	12.83	0.72	0.11	99.56	16.55	2.01	0.94	98.75	16.43	4.89	0.91	96.97	16.15
120	37.15	20.51	76.92	9.58	0.62	0.19	99.61	12.42	2.21	0.79	98.63	12.31	5.69	1.35	96.48	12.05
150	32.49	0.33	79.82	7.95	0.51	0.14	99.68	9.94	3.71	0.00	97.70	9.75	10.90	0.62	93.25	9.32
180	36.18	14.74	77.53	6.43	0.71	0.37	99.56	8.28	5.57	0.65	96.55	8.03	17.14	1.08	89.39	7.44

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	14.65	0.15	0.00	0.00	14.69	0.11	0.00	0.00	14.72	0.06	0.00	0.00	14.68	0.07	0.00	0.00
5	13.93	0.06	4.92	0.79	12.48	0.34	15.04	2.42	11.28	0.30	23.34	3.77	10.93	0.74	25.58	4.12
10	11.33	0.33	22.67	1.82	11.48	0.24	21.85	1.76	10.51	0.52	28.61	2.31	7.55	0.61	48.58	3.91
15	11.02	0.18	24.79	1.33	9.25	1.29	37.07	1.99	1.33	0.16	91.00	4.89	0.81	0.15	94.50	5.07
20	10.62	0.04	27.48	1.10	1.80	0.10	87.76	3.53	0.40	0.11	97.28	3.92	0.66	0.29	95.49	3.84
25	9.47	0.40	35.31	1.13	0.60	0.03	95.95	3.09	0.57	0.07	96.11	3.10	0.69	0.06	95.30	3.07
30	9.62	1.06	34.31	0.92	0.61	0.04	95.88	2.57	0.47	0.02	96.79	2.60	0.69	0.03	95.32	2.56
35	9.43	1.29	35.64	0.82	0.42	0.02	97.12	2.23	0.54	0.07	96.32	2.22	0.54	0.05	96.29	2.21
40	9.24	1.53	36.94	0.74	0.63	0.33	95.75	1.93	0.55	0.34	96.27	1.94	0.57	0.12	96.14	1.93
45	8.70	1.11	40.56	0.72	0.60	0.01	95.93	1.72	0.51	0.30	96.53	1.73	0.54	0.19	96.29	1.72
50	8.52	1.99	41.82	0.67	0.54	0.08	96.33	1.55	0.42	0.20	97.15	1.57	0.35	0.38	97.62	1.57
55	7.22	0.49	50.71	0.74	0.58	0.20	96.04	1.41	0.42	0.29	97.17	1.42	0.57	0.20	96.09	1.41
60	7.26	0.18	50.46	0.68	0.45	0.20	96.93	1.30	0.52	0.28	96.47	1.30	0.56	0.25	96.16	1.29
90	7.33	0.17	49.97	0.45	0.58	0.43	96.07	0.86	0.46	0.27	96.85	0.87	0.67	0.11	95.46	0.85
120	7.10	0.17	51.52	0.34	0.33	0.24	97.75	0.66	0.41	0.24	97.21	0.65	0.41	0.19	97.20	0.65
150	7.28	0.33	50.32	0.27	0.42	0.20	97.14	0.52	0.50	0.41	96.61	0.52	0.46	0.31	96.87	0.52
180	6.89	1.09	52.94	0.24	0.47	0.35	96.79	0.43	0.43	0.37	97.07	0.43	0.23	0.09	98.42	0.44

ตารางที่ ก.9 ค่าพีเอชของทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที (n = 3)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
0	3.52	0.10	3.49	0.06	3.48	0.06	3.50	0.07
5	3.95	0.12	4.23	0.05	3.82	0.05	4.29	0.07
10	4.24	0.17	4.58	0.06	4.16	0.19	4.63	0.11
15	4.68	0.02	5.70	1.27	5.13	1.21	9.71	0.12
20	4.68	0.15	10.56	0.46	4.70	0.29	11.07	0.23
25	4.87	0.14	11.23	0.23	10.82	0.72	11.48	0.18
30	5.02	0.18	11.48	0.20	10.92	0.98	11.80	0.11
40	5.14	0.25	11.85	0.11	11.53	0.61	12.07	0.06
50	5.51	0.31	12.00	0.11	11.96	0.20	12.21	0.03
60	7.52	2.07	12.12	0.11	12.06	0.16	12.30	0.01
90	9.21	0.49	12.21	0.06	12.29	0.23	12.50	0.04
120	10.32	0.80	12.24	0.07	12.36	0.25	12.58	0.08
150	11.04	0.92	12.19	0.06	12.34	0.18	12.52	0.12
180	11.08	0.72	12.19	0.08	12.53	0.15	12.62	0.06
210	10.74	0.63	12.19	0.08	12.49	0.19	12.65	0.09

ตารางที่ ก.9 ค่าพีเอชของทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที (n = 3) (ต่อ)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
240	10.70	0.60	12.19	0.10	12.58	0.11	12.65	0.09
270	11.16	0.61	12.18	0.07	12.50	0.18	12.62	0.12
300	10.62	1.17	12.12	0.22	12.47	0.17	12.63	0.11
330	10.94	0.76	11.92	0.52	12.44	0.32	12.45	0.37
360	10.83	0.77	12.10	0.26	12.45	0.28	12.43	0.42

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	248.58	1.37	0.00	0.00	248.02	0.71	0.00	0.00	247.99	0.63	0.00	0.00	248.00	0.92	0.00	0.00
5	234.65	2.44	5.60	14.10	223.28	2.23	9.97	25.04	213.56	1.89	13.88	34.85	173.21	2.18	30.15	75.71
10	202.88	1.85	18.38	23.13	155.88	2.48	37.15	46.64	148.77	6.19	40.01	50.23	85.88	8.57	65.37	82.06
15	78.93	5.21	68.25	57.25	69.78	2.66	71.87	60.15	55.59	5.10	77.58	64.93	3.52	0.72	98.58	82.50
20	63.94	6.24	74.28	46.73	32.18	1.75	87.03	54.63	22.73	3.10	90.83	57.01	0.28	0.11	99.89	62.70
25	45.27	3.31	81.79	41.17	0.40	0.30	99.84	50.14	0.31	0.27	99.88	50.15	0.23	0.11	99.91	50.17
30	33.53	1.94	86.51	36.28	0.23	0.05	99.91	41.81	0.27	0.23	99.89	41.80	0.95	1.36	99.62	41.68
40	22.03	2.49	91.14	28.67	0.16	0.13	99.93	31.37	0.34	0.28	99.86	31.34	0.33	0.35	99.87	31.34
50	10.22	0.62	95.89	24.13	0.54	0.70	99.78	25.05	0.53	0.32	99.79	25.05	0.15	0.09	99.94	25.09
60	0.42	0.29	99.83	20.94	0.18	0.04	99.93	20.91	0.43	0.46	99.83	20.89	0.17	0.10	99.93	20.91
90	0.17	0.05	99.93	13.97	0.19	0.03	99.92	13.94	0.17	0.09	99.93	13.94	0.52	0.62	99.79	13.92
120	0.16	0.04	99.94	10.48	0.21	0.06	99.92	10.45	0.21	0.14	99.91	10.45	0.20	0.06	99.92	10.45
150	0.13	0.36	99.76	8.37	0.08	0.05	99.97	8.37	0.38	0.35	99.85	8.36	0.36	0.29	99.86	8.36
180	0.08	0.02	99.97	6.99	0.45	0.17	99.82	6.96	0.20	0.08	99.92	6.97	0.51	0.70	99.79	6.96
210	0.12	0.04	99.95	5.99	0.15	0.12	99.94	5.97	0.33	0.24	99.87	5.97	0.27	0.09	99.89	5.97
240	0.27	0.26	99.89	5.24	0.06	0.07	99.98	5.23	0.45	0.35	99.82	5.22	0.45	0.33	99.82	5.22

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	0.22	0.20	99.91	4.66	0.28	0.16	99.89	4.64	0.38	0.33	99.85	4.64	0.48	0.62	99.81	4.64
300	0.60	0.50	99.76	4.18	0.35	0.52	99.86	4.18	0.15	0.10	99.94	4.18	0.27	0.15	99.89	4.18
330	0.26	0.35	99.90	3.81	0.26	0.23	99.90	3.80	0.16	0.14	99.93	3.80	0.31	0.24	99.87	3.80
360	0.36	0.45	99.85	3.49	0.14	0.11	99.95	3.49	0.32	0.24	99.87	3.48	0.28	0.20	99.89	3.48

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	161.50	1.53	0.00	0.00	161.07	1.59	0.00	0.00	161.39	0.69	0.00	0.00	161.00	1.30	0.00	0.00
5	113.25	1.78	29.88	89.55	90.24	7.02	43.97	131.45	72.91	2.36	54.82	164.22	65.09	9.19	59.57	178.00
10	58.37	2.57	63.86	95.70	36.47	2.38	77.36	115.63	33.12	2.11	79.48	119.03	19.02	3.07	88.19	131.75
15	36.54	9.39	77.37	77.30	0.44	0.37	99.72	99.37	0.93	0.81	99.42	99.27	0.55	0.74	99.66	99.26
20	24.38	1.67	84.91	63.62	0.43	0.24	99.73	74.53	0.59	0.44	99.63	74.61	0.34	0.04	99.79	74.54
25	21.30	1.50	86.81	52.04	0.25	0.35	99.85	59.69	0.23	0.14	99.86	59.82	0.18	0.13	99.89	59.69
30	10.49	1.13	93.50	46.71	0.75	0.70	99.54	49.59	0.44	0.60	99.72	49.78	0.71	0.60	99.56	49.58
40	5.05	2.92	96.87	36.29	0.29	0.34	99.82	37.30	0.74	0.66	99.54	37.27	0.47	0.35	99.71	37.24
50	1.63	1.26	98.99	29.67	0.24	0.14	99.85	29.85	0.81	0.92	99.50	29.80	0.37	0.30	99.77	29.81
60	0.49	0.35	99.70	24.90	0.22	0.12	99.86	24.88	0.89	0.43	99.45	24.82	0.39	0.20	99.76	24.84
90	0.25	0.08	99.85	16.63	0.55	0.35	99.66	16.55	1.89	1.48	98.83	16.45	0.74	0.49	99.54	16.52
120	0.84	0.16	99.48	12.42	0.86	0.55	99.47	12.39	3.49	2.92	97.84	12.21	1.39	1.33	99.13	12.34
150	0.45	0.32	99.72	9.96	0.44	0.34	99.73	9.94	4.67	1.12	97.10	9.70	2.15	1.03	98.66	9.83
180	0.67	1.08	99.58	8.29	0.65	0.20	99.60	8.27	4.65	1.74	97.12	8.08	3.16	1.95	98.04	8.14
210	1.92	1.70	98.81	7.05	0.79	0.37	99.51	7.08	4.27	1.80	97.35	6.94	4.72	2.27	97.07	6.91
240	1.47	1.25	99.09	6.19	1.11	0.77	99.31	6.18	6.42	2.08	96.02	5.99	8.14	2.71	94.94	5.91



ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	1.23	1.36	99.24	5.51	1.45	0.49	99.10	5.49	6.50	2.45	95.97	5.32	11.11	1.81	93.10	5.15
300	1.36	1.00	99.16	4.95	2.26	0.83	98.60	4.91	5.95	2.46	96.31	4.81	12.25	1.53	92.39	4.60
330	1.11	0.28	99.31	4.51	3.66	0.73	97.73	4.43	5.97	2.43	96.30	4.37	13.51	2.04	91.61	4.15
360	5.67	0.77	96.49	4.02	4.92	1.10	96.94	4.02	6.78	1.71	95.80	3.99	15.02	2.10	90.67	3.76

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	14.77	0.20	0.00	0.00	14.78	0.20	0.00	0.00	14.75	0.21	0.00	0.00	14.70	0.19	0.00	0.00
5	13.97	0.17	5.46	0.88	13.26	0.19	10.33	1.67	12.66	0.16	14.15	2.29	12.43	0.25	15.45	2.49
10	12.74	0.40	13.79	1.12	11.61	0.27	21.44	1.74	11.42	0.48	22.58	1.82	10.51	0.28	28.46	2.29
15	11.52	0.76	22.00	1.19	6.48	2.35	56.15	3.03	9.02	0.97	38.81	2.09	0.47	0.33	96.83	5.20
20	8.35	0.89	43.47	1.76	7.17	0.74	51.51	2.09	6.34	1.51	57.01	2.30	0.25	0.18	98.32	3.96
25	7.56	0.55	48.81	1.58	0.34	0.06	97.72	3.17	0.46	0.22	96.91	3.13	0.28	0.13	98.12	3.16
30	6.97	0.91	52.82	1.43	0.24	0.13	98.40	2.66	0.36	0.18	97.57	2.63	0.49	0.44	96.70	2.60
40	7.82	1.79	47.05	0.95	0.30	0.22	97.98	1.98	0.43	0.11	97.12	1.96	0.35	0.23	97.60	1.97
50	7.25	0.40	50.92	0.82	0.38	0.29	97.42	1.58	0.36	0.20	97.58	1.58	0.28	0.22	98.09	1.58
60	2.16	1.61	85.37	1.15	0.23	0.24	98.43	1.33	0.33	0.22	97.76	1.32	0.41	0.09	97.19	1.30
90	0.43	0.36	97.08	0.87	0.24	0.20	98.40	0.89	0.49	0.26	96.68	0.87	0.53	0.20	96.40	0.86
120	0.33	0.28	97.74	0.66	0.23	0.12	98.45	0.66	0.56	0.46	96.18	0.65	0.49	0.29	96.68	0.65
150	0.15	0.12	99.00	0.53	0.21	0.22	98.59	0.53	0.43	0.34	97.06	0.52	0.48	0.32	96.73	0.52
180	0.13	0.07	99.14	0.45	0.33	0.19	97.79	0.44	0.43	0.30	97.10	0.44	0.56	0.43	96.19	0.43
210	0.23	0.17	98.42	0.38	0.26	0.39	98.23	0.38	0.49	0.22	96.65	0.37	0.62	0.37	95.82	0.37
240	0.23	0.19	98.44	0.33	0.16	0.12	98.90	0.33	0.47	0.41	96.79	0.33	0.69	0.34	95.31	0.32

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	0.23	0.16	98.48	0.30	0.11	0.06	99.28	0.30	0.31	0.31	97.90	0.29	0.36	0.15	97.58	0.29
300	0.17	0.15	98.84	0.27	0.04	0.04	99.70	0.27	0.41	0.09	97.25	0.26	0.73	0.16	95.01	0.26
330	0.33	0.19	97.79	0.24	0.20	0.19	98.67	0.24	0.25	0.19	98.27	0.24	0.48	0.31	96.73	0.24
360	0.17	0.10	98.87	0.22	0.10	0.09	99.35	0.22	0.22	0.22	98.49	0.22	0.52	0.49	96.47	0.22

ตารางที่ ก.13 ค่าพีเอชของทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที (n = 3)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
0	3.47	0.02	3.46	0.01	3.46	0.01	3.46	0.01
10	3.45	0.09	3.57	0.15	3.48	0.08	3.46	0.05
20	3.63	0.14	3.54	0.03	3.59	0.03	3.52	0.03
30	3.64	0.10	3.57	0.04	3.56	0.08	3.51	0.11
40	3.79	0.08	3.71	0.03	3.82	0.09	3.60	0.23
50	3.61	0.22	3.79	0.12	3.88	0.09	3.59	0.02
60	3.83	0.08	3.70	0.36	3.89	0.31	3.74	0.27
70	3.76	0.04	3.94	0.28	4.06	0.14	3.72	0.19
80	3.86	0.10	4.23	0.24	4.26	0.11	3.87	0.40
90	3.84	0.10	4.29	0.11	4.49	0.06	4.42	0.10
100	3.85	0.09	4.52	0.13	4.53	0.13	4.63	0.02
110	3.88	0.07	4.57	0.02	4.37	0.25	4.64	0.01
120	3.86	0.14	4.66	0.05	4.51	0.19	4.67	0.08
150	3.83	0.18	4.55	0.03	4.49	0.16	9.81	0.13
180	4.12	0.21	4.62	0.05	7.07	2.01	10.56	0.36

ตารางที่ ก.13 ค่าพีเอชของทองแดง โครเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที (n = 3) (ต่อ)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
210	4.13	0.12	4.88	0.12	10.76	0.27	10.76	0.22
240	4.07	0.10	5.31	0.61	9.85	1.16	10.89	0.49
270	4.08	0.22	5.61	1.02	7.47	2.81	10.63	1.22
300	4.17	0.19	5.51	0.75	10.92	0.93	10.28	0.98
330	4.26	0.27	6.81	2.64	9.87	1.66	8.05	1.96
360	4.15	0.24	6.78	2.97	10.97	0.67	7.23	3.15

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	248.04	0.45	0.00	0.00	248.00	0.13	0.00	0.00	247.91	0.21	0.00	0.00	248.05	0.53	0.00	0.00
10	238.47	0.95	3.86	48.44	237.18	1.72	4.36	54.75	239.08	3.68	3.56	44.68	234.22	8.65	5.58	70.04
20	226.15	2.26	8.82	55.39	227.45	4.83	8.29	52.01	227.90	7.39	8.07	50.64	226.50	10.29	8.69	54.55
30	219.22	2.35	11.62	48.63	216.10	3.86	12.86	53.83	217.25	7.15	12.37	51.73	217.18	14.21	12.44	52.09
40	219.98	1.93	11.31	35.50	194.40	8.58	21.61	67.83	193.63	12.01	21.89	68.69	201.60	25.81	18.73	58.79
50	234.71	2.03	5.37	13.50	182.22	13.39	26.53	66.60	179.58	19.44	27.56	69.17	194.70	26.88	21.51	54.01
60	230.50	8.57	7.07	14.79	173.27	8.01	30.13	63.05	157.75	14.86	36.37	76.06	168.42	32.01	32.10	67.19
70	212.33	14.56	14.40	25.82	153.90	4.88	37.94	68.05	153.45	16.68	38.10	68.31	159.32	11.72	35.77	64.17
80	212.24	4.03	14.43	22.65	107.10	10.96	56.81	89.15	147.58	24.34	40.47	63.48	144.33	17.99	41.81	65.63
90	203.19	8.91	18.08	25.23	124.07	9.86	49.97	69.70	109.33	38.15	55.90	77.94	106.77	24.73	56.96	79.46
100	193.65	3.05	21.93	27.53	76.16	5.56	69.29	86.99	71.42	26.49	71.19	89.34	89.92	22.74	63.75	80.05
110	191.04	4.18	22.98	26.23	79.88	8.07	67.79	77.36	79.03	17.87	68.12	77.71	55.13	2.81	77.78	88.78
120	187.76	7.56	24.30	25.43	55.87	1.42	77.47	81.05	57.13	2.37	76.96	80.48	44.78	2.30	81.95	85.75
150	201.63	5.59	18.71	15.66	68.45	1.84	72.40	60.59	43.00	25.52	82.65	69.15	0.92	0.56	99.63	83.40
180	177.80	6.79	28.32	19.75	90.59	2.05	63.47	44.27	7.46	1.98	96.99	67.62	0.53	0.33	99.79	69.61
210	167.55	6.09	32.45	19.40	60.14	8.92	75.75	45.28	0.64	0.84	99.74	59.60	0.33	0.24	99.87	59.71
240	194.57	7.33	21.55	11.28	44.15	17.56	82.20	43.00	0.55	0.10	99.78	52.17	0.17	0.04	99.93	52.28

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	185.83	22.27	25.08	11.66	26.26	7.76	89.41	41.57	1.30	0.96	99.47	46.23	0.54	0.30	99.78	46.40
300	187.28	11.12	24.49	10.25	24.97	4.05	89.93	37.63	0.38	0.06	99.85	41.77	0.53	0.33	99.79	41.77
330	165.63	9.78	33.22	12.64	13.53	11.73	94.54	35.97	0.49	0.33	99.80	37.95	0.32	0.26	99.87	38.00
360	189.46	11.22	23.62	8.24	19.58	16.84	92.11	32.12	0.37	0.35	99.85	34.81	0.26	0.18	99.90	34.84

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	161.21	0.55	0.00	0.00	161.23	0.78	0.00	0.00	161.12	0.63	0.00	0.00	161.33	0.45	0.00	0.00
10	156.87	1.41	2.69	40.30	154.90	2.09	3.92	58.68	156.35	3.65	2.96	44.23	143.53	1.58	11.03	165.18
20	147.79	1.91	8.32	62.25	145.08	3.24	10.01	74.92	147.22	1.31	8.63	64.49	140.20	3.41	13.10	98.05
30	143.46	1.42	11.01	54.90	134.42	2.73	16.63	82.93	139.98	2.87	13.12	65.37	127.88	14.38	20.73	103.47
40	136.96	1.63	15.04	56.26	131.47	1.83	18.46	69.04	136.42	5.86	15.33	57.30	123.02	7.79	23.75	88.89
50	139.23	7.69	13.63	40.79	119.63	7.69	25.80	77.20	126.97	4.06	21.20	63.38	125.28	11.20	22.35	66.91
60	137.29	4.94	14.84	37.00	106.52	10.00	33.93	84.61	114.23	6.38	29.10	72.51	96.18	16.68	40.38	100.76
70	131.56	4.17	18.39	39.31	91.18	6.80	43.44	92.85	103.40	3.77	35.82	76.51	115.42	15.08	28.46	60.87
80	126.77	6.30	21.37	39.95	86.15	10.85	46.57	87.08	82.02	7.68	49.09	91.75	107.87	12.62	33.14	62.01
90	121.40	2.73	24.69	41.05	71.51	16.98	55.64	92.50	56.05	10.46	65.21	108.33	55.44	1.27	65.64	109.18
100	114.48	19.88	28.98	43.36	50.47	2.45	68.70	102.78	33.50	5.83	79.21	118.42	23.56	3.31	85.40	127.85
110	108.28	27.18	32.83	44.65	43.22	1.52	73.20	99.55	25.18	1.88	84.37	114.68	11.62	0.69	92.80	126.30
120	106.38	24.76	34.01	42.40	33.48	1.86	79.23	98.79	17.79	7.49	88.96	110.83	14.47	2.97	91.03	113.57
150	106.30	24.00	34.06	33.97	32.43	2.21	79.89	79.68	14.81	9.72	90.81	90.51	0.72	0.30	99.55	99.36
180	98.60	16.81	38.84	32.28	31.33	3.56	80.57	66.97	2.85	2.78	98.23	81.59	0.24	0.07	99.85	83.05
210	99.87	21.60	38.05	27.11	29.64	5.51	81.62	58.15	0.70	0.31	99.57	70.89	1.74	0.55	98.92	70.52
240	88.75	16.12	44.95	28.02	28.32	6.19	82.44	51.39	2.60	2.41	98.39	61.29	2.43	1.16	98.50	61.44



ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	93.52	16.59	41.99	23.27	19.50	16.84	87.90	48.71	4.27	1.20	97.35	53.91	1.99	1.63	98.76	54.76
300	89.40	19.10	44.54	22.21	19.14	14.29	88.13	43.95	5.04	6.66	96.87	48.28	4.40	2.47	97.27	48.54
330	86.47	14.40	46.36	21.02	17.95	13.56	88.87	40.29	6.77	5.43	95.80	43.40	8.42	5.91	94.78	43.00
360	93.79	6.58	41.82	17.38	6.72	4.05	95.83	39.83	6.37	2.61	96.05	39.89	8.21	2.30	94.91	39.47

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	14.76	0.02	0.00	0.00	14.75	0.02	0.00	0.00	14.77	0.02	0.00	0.00	14.75	0.04	0.00	0.00
10	14.16	0.05	4.06	3.29	13.68	0.08	7.26	5.86	13.72	0.05	7.13	5.77	13.61	0.08	7.73	6.25
20	13.47	0.18	8.74	3.53	13.44	0.13	8.88	3.59	13.37	0.18	9.50	3.85	12.86	0.21	12.79	5.17
30	12.54	0.10	15.04	4.06	12.47	0.08	15.44	4.16	12.72	0.58	13.90	3.75	12.66	0.29	14.15	3.81
40	12.34	0.03	16.44	3.32	11.82	0.54	19.85	4.01	12.63	0.95	14.49	2.93	11.05	0.52	25.09	5.07
50	11.72	0.32	20.59	3.33	11.27	0.53	23.55	3.81	10.59	1.50	28.34	4.59	10.08	0.73	31.65	5.12
60	11.86	0.76	19.64	2.65	10.94	0.64	25.81	3.48	10.34	0.89	30.00	4.05	9.21	0.47	37.56	5.06
70	10.74	0.88	27.23	3.15	9.84	0.48	33.28	3.84	9.56	1.73	35.29	4.08	9.46	0.54	35.87	4.14
80	10.99	0.46	25.54	2.58	9.33	1.02	36.74	3.71	9.80	0.87	33.70	3.41	7.59	0.30	48.54	4.90
90	11.02	0.70	25.38	2.28	8.57	0.43	41.91	3.76	11.86	5.66	19.72	1.77	7.69	1.15	47.83	4.29
100	10.52	0.48	28.74	2.33	6.86	0.61	53.49	4.32	9.64	3.60	34.74	2.81	6.67	1.17	54.80	4.43
110	11.20	0.22	24.11	1.77	7.85	0.77	46.74	3.43	8.50	1.71	42.45	3.12	5.87	0.78	60.18	4.42
120	9.85	0.98	33.27	2.24	6.36	0.45	56.84	3.83	6.67	0.26	54.86	3.70	5.38	0.14	63.55	4.28
150	9.54	0.19	35.36	1.91	6.17	0.56	58.16	3.13	4.50	0.06	69.54	3.75	0.36	0.21	97.53	5.26
180	11.03	0.19	25.29	1.14	5.22	0.13	64.63	2.90	1.81	2.23	87.72	3.95	0.45	0.12	96.92	4.35
210	10.04	1.11	32.02	1.23	5.46	0.12	62.99	2.42	0.20	0.19	98.68	3.80	0.51	0.16	96.52	3.71

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1.54 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
240	9.89	0.79	33.00	1.11	4.80	0.91	67.46	2.27	0.46	0.19	96.86	3.27	0.31	0.23	97.92	3.30
270	9.96	0.70	32.56	0.98	4.54	0.52	69.18	2.07	0.42	0.16	97.13	2.91	0.25	0.33	98.29	2.94
300	9.84	0.47	33.32	0.90	4.82	0.88	67.33	1.81	0.53	0.26	96.42	2.60	0.28	0.31	98.12	2.64
330	10.92	0.81	26.03	0.64	2.53	2.14	82.84	2.03	0.61	0.14	95.86	2.35	0.12	0.06	99.20	2.43
360	11.49	1.05	22.19	0.50	2.60	2.11	82.34	1.85	0.61	0.32	95.90	2.16	0.21	0.12	98.55	2.21

ตารางที่ ก.17 ค่าพีเอชของทองแดง โคโรเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที (n = 3)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
0	3.47	0.01	3.50	0.02	3.49	0.01	3.48	0.01
10	3.53	0.03	3.56	0.03	3.52	0.04	3.58	0.12
20	3.80	0.10	4.17	0.28	3.77	0.18	3.94	0.30
30	4.04	0.10	4.58	0.19	3.96	0.16	4.23	0.34
40	4.14	0.04	5.29	0.75	4.28	0.18	4.62	0.39
50	4.25	0.06	10.34	0.52	4.62	0.20	7.91	1.43
60	4.43	0.15	10.82	0.36	4.64	0.13	10.85	0.28
70	4.29	0.10	11.16	0.33	4.51	0.13	11.27	0.19
80	4.34	0.13	11.29	0.13	7.34	0.02	11.47	0.20
90	4.33	0.25	11.51	0.18	10.01	0.65	11.56	0.24
100	4.29	0.21	11.25	0.55	10.51	1.12	11.66	0.08
110	4.40	0.09	11.69	0.05	11.25	0.47	11.78	0.14
120	4.15	0.02	11.61	0.15	11.21	0.15	11.80	0.13
150	4.50	0.08	11.75	0.16	11.75	0.20	11.94	0.14
180	4.53	0.02	11.86	0.09	10.49	1.26	12.09	0.08

ตารางที่ ก.17 ค่าพีเอชของทองแดง โคโรเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที (n = 3) (ต่อ)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
210	4.68	0.10	11.90	0.14	11.83	0.09	12.13	0.09
240	4.55	0.05	11.87	0.19	11.84	0.30	12.17	0.07
270	4.68	0.07	11.92	0.13	12.13	0.08	12.18	0.07
300	4.66	0.01	11.93	0.14	12.19	0.08	12.20	0.07
330	4.77	0.19	11.96	0.10	12.22	0.14	12.16	0.16
360	4.77	0.12	11.94	0.12	12.12	0.13	12.17	0.13

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	248.66	2.12	0.00	0.00	248.33	1.84	0.00	0.00	248.36	1.58	0.00	0.00	248.26	1.58	0.00	0.00
10	238.70	13.90	4.01	16.81	228.42	8.04	8.02	33.59	236.38	8.09	4.82	20.21	231.88	7.30	6.60	27.63
20	225.73	10.60	9.22	19.34	225.35	10.16	9.25	19.39	223.98	1.51	9.82	20.57	199.35	27.93	19.70	41.26
30	197.34	6.81	20.64	28.87	186.55	2.40	24.88	34.75	172.27	13.92	30.64	42.80	138.63	27.94	44.16	61.66
40	181.29	14.42	27.09	28.42	169.77	2.67	31.64	33.14	146.38	11.54	41.06	43.02	40.60	6.09	83.65	87.60
50	169.27	15.07	31.93	26.79	133.64	3.34	46.18	38.70	76.83	2.81	69.06	57.88	0.50	0.42	99.80	83.61
60	155.47	7.74	37.48	26.21	106.20	4.17	57.24	39.97	66.95	5.01	73.04	51.02	0.28	0.15	99.89	69.74
70	137.82	3.77	44.58	26.72	76.91	3.54	69.03	41.32	48.84	3.90	80.34	48.09	0.36	0.25	99.85	59.75
80	124.27	2.48	50.03	26.24	0.38	0.17	99.85	52.30	0.42	0.34	99.83	52.29	0.35	0.39	99.86	52.29
90	131.03	10.21	47.30	22.05	0.28	0.28	99.89	46.50	0.18	0.13	99.93	46.53	0.50	0.41	99.80	46.45
100	134.73	13.01	45.82	19.22	0.20	0.08	99.92	41.87	0.35	0.13	99.86	41.85	0.19	0.15	99.92	41.86
110	135.92	16.97	45.34	17.29	0.71	1.07	99.71	37.98	0.29	0.12	99.88	38.05	0.29	0.11	99.89	38.04
120	136.48	3.00	45.12	15.77	0.06	0.05	99.98	34.91	0.23	0.15	99.91	34.89	0.26	0.17	99.90	34.87
150	116.03	12.35	53.34	14.92	0.18	0.13	99.93	27.91	0.29	0.20	99.88	27.90	0.25	0.18	99.90	27.90
180	118.91	10.14	52.18	12.16	0.07	0.03	99.97	23.27	0.22	0.15	99.91	23.26	0.22	0.17	99.91	23.25
210	68.30	4.57	72.53	14.49	0.41	0.38	99.84	19.92	0.21	0.19	99.92	19.94	0.18	0.12	99.93	19.93
240	105.08	14.31	57.74	10.09	0.65	0.50	99.74	17.41	0.22	0.24	99.91	17.45	0.38	0.33	99.85	17.43

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	70.99	5.63	71.45	11.10	0.20	0.16	99.92	15.51	0.16	0.10	99.93	15.51	0.18	0.14	99.93	15.50
300	83.55	2.83	66.40	9.29	0.19	0.20	99.92	13.96	0.20	0.11	99.92	13.96	0.14	0.09	99.94	13.96
330	65.13	20.86	73.81	9.38	0.21	0.18	99.92	12.69	0.36	0.44	99.86	12.68	0.23	0.11	99.91	12.68
360	83.40	2.58	66.46	7.75	0.21	0.17	99.92	11.63	0.26	0.10	99.90	11.63	0.21	0.15	99.92	11.63

ตารางที่ ก.19 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	161.25	1.02	0.00	0.00	161.19	0.40	0.00	0.00	161.62	0.45	0.00	0.00	161.04	0.35	0.00	0.00
10	155.98	2.20	3.27	16.30	152.24	1.14	5.55	27.67	145.37	3.76	10.05	50.25	129.60	1.18	19.52	97.25
20	105.98	1.89	34.28	85.48	95.60	2.51	40.69	101.44	93.78	5.37	41.98	104.92	77.05	14.84	52.15	129.90
30	84.50	1.08	47.60	79.14	82.68	2.07	48.70	80.94	74.03	6.62	54.19	90.31	55.82	8.93	65.34	108.48
40	76.45	2.38	52.59	65.58	51.12	0.98	68.29	85.12	52.63	5.00	67.44	84.28	12.64	4.62	92.15	114.75
50	71.02	3.39	55.96	55.82	9.99	0.27	93.80	93.54	25.15	2.06	84.44	84.42	0.66	0.87	99.59	99.22
60	75.18	3.23	53.38	44.38	1.91	0.68	98.81	82.11	21.92	2.08	86.44	72.02	0.24	0.17	99.85	82.90
70	72.03	3.13	55.33	39.43	0.38	0.43	99.76	71.06	2.50	0.14	98.46	70.31	0.19	0.14	99.89	71.08
80	67.57	3.81	58.10	36.22	0.23	0.10	99.86	62.23	0.65	0.33	99.60	62.24	0.66	0.84	99.59	62.01
90	63.28	4.30	60.76	33.67	0.25	0.11	99.84	55.31	0.23	0.05	99.86	55.47	0.48	0.13	99.70	55.18
100	49.99	4.24	69.00	34.42	0.39	0.23	99.76	49.74	0.63	0.43	99.61	49.80	0.83	0.59	99.49	49.56
110	45.25	4.70	71.94	32.62	0.54	0.30	99.66	45.17	0.75	0.52	99.54	45.24	0.73	0.62	99.55	45.08
120	48.82	4.79	69.72	28.98	0.51	0.24	99.69	41.42	1.43	0.65	99.12	41.29	1.23	0.95	99.24	41.19
150	34.09	2.43	78.86	26.22	0.65	0.26	99.60	33.10	1.20	1.27	99.26	33.08	0.60	0.60	99.63	33.08
180	38.67	2.63	76.02	21.07	0.84	0.25	99.48	27.55	6.52	4.95	95.97	26.65	1.14	0.80	99.29	27.48
210	15.38	0.24	90.47	21.49	1.01	0.79	99.38	23.59	4.56	1.22	97.18	23.13	2.11	0.59	98.69	23.41
240	15.76	0.77	90.23	18.75	1.27	0.86	99.21	20.61	6.90	1.68	95.73	19.94	5.44	2.00	96.62	20.05



ตารางที่ ก.19 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	16.98	1.65	89.47	16.53	1.38	0.69	99.14	18.31	4.64	0.40	97.13	17.98	6.02	0.25	96.26	17.76
300	18.97	4.48	88.23	14.67	1.42	0.82	99.12	16.47	6.65	2.42	95.89	15.98	9.66	0.49	94.00	15.61
330	12.63	2.14	92.17	13.93	1.57	0.98	99.03	14.96	7.46	2.88	95.38	14.45	13.30	1.88	91.74	13.85
360	22.60	1.57	85.99	11.91	1.98	1.24	98.77	13.68	15.60	1.80	90.35	12.55	16.05	2.76	90.03	12.46

ตารางที่ ก.20 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	14.77	0.02	0.00	0.00	14.78	0.04	0.00	0.00	14.77	0.05	0.00	0.00	14.73	0.03	0.00	0.00
10	13.65	0.32	7.60	2.05	12.40	1.07	16.08	4.34	13.26	0.54	10.23	2.76	13.24	0.23	10.09	2.72
20	13.07	0.16	11.55	1.56	10.98	1.79	25.72	3.47	13.39	0.61	9.30	1.25	12.09	0.84	17.95	2.41
30	12.46	0.34	15.66	1.41	7.38	2.01	50.05	4.50	11.53	1.48	21.95	1.97	11.14	1.98	24.40	2.19
40	11.07	0.23	25.07	1.69	4.03	2.56	72.76	4.91	10.38	0.61	29.73	2.00	8.55	2.54	41.98	2.82
50	11.17	0.43	24.37	1.32	0.63	0.34	95.75	5.17	9.03	1.70	38.87	2.10	0.66	0.12	95.49	5.14
60	10.54	0.61	28.66	1.29	0.70	0.16	95.27	4.29	7.39	1.83	49.97	2.25	0.49	0.22	96.68	4.34
70	9.22	0.72	37.62	1.45	0.49	0.25	96.66	3.73	6.33	1.05	57.10	2.20	0.42	0.26	97.14	3.73
80	8.99	1.47	39.18	1.32	0.58	0.09	96.10	3.24	0.65	0.06	95.58	3.22	0.50	0.38	96.61	3.25
90	9.36	1.14	36.68	1.10	0.50	0.14	96.59	2.90	0.38	0.21	97.40	2.92	0.57	0.13	96.16	2.87
100	9.55	0.30	35.35	0.95	0.55	0.29	96.25	2.60	0.52	0.37	96.47	2.60	0.46	0.30	96.90	2.61
110	10.28	0.79	30.38	0.75	0.60	0.28	95.95	2.36	0.37	0.24	97.51	2.39	0.49	0.13	96.70	2.37
120	9.63	1.13	34.84	0.78	0.48	0.08	96.77	2.18	0.50	0.23	96.62	2.17	0.39	0.25	97.37	2.18
150	9.00	0.58	39.06	0.70	0.52	0.16	96.48	1.74	0.51	0.12	96.53	1.74	0.50	0.01	96.58	1.73
180	10.49	0.11	28.97	0.43	0.39	0.14	97.34	1.46	0.62	0.37	95.79	1.44	0.38	0.11	97.43	1.46
210	9.39	0.83	36.45	0.47	0.29	0.16	98.05	1.26	0.48	0.02	96.77	1.24	0.41	0.01	97.19	1.25
240	11.24	0.14	23.89	0.27	0.37	0.15	97.47	1.10	0.40	0.18	97.32	1.09	0.35	0.18	97.61	1.09

ตารางที่ ก.20 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4.63 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	10.66	1.37	27.83	0.28	0.30	0.20	97.96	0.98	0.39	0.08	97.34	0.97	0.43	0.11	97.09	0.97
300	10.61	0.52	28.20	0.25	0.36	0.08	97.58	0.88	0.38	0.02	97.46	0.88	0.45	0.07	96.96	0.87
330	10.05	0.96	31.99	0.26	0.41	0.13	97.20	0.80	0.34	0.13	97.68	0.80	0.55	0.25	96.30	0.79
360	10.61	1.51	28.16	0.21	0.48	0.22	96.76	0.73	0.58	0.26	96.10	0.72	0.56	0.27	96.18	0.72

ตารางที่ ก.21 ค่าพีเอชของทองแดง โคโรเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที (n = 3)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
0	3.47	0.02	3.46	0.05	3.45	0.04	3.46	0.05
10	3.64	0.13	4.10	0.11	3.69	0.21	3.86	0.11
20	4.15	0.09	5.27	0.48	4.16	0.17	4.33	0.06
30	4.27	0.02	8.96	1.77	4.48	0.14	4.58	0.13
40	4.44	0.11	10.76	1.05	4.74	0.16	9.94	1.01
50	4.62	0.07	11.42	0.43	4.82	0.13	11.17	0.17
60	4.63	0.01	11.62	0.27	10.61	0.61	11.71	0.11
70	4.58	0.08	11.77	0.34	11.15	0.79	11.83	0.13
80	4.59	0.30	11.88	0.17	11.15	0.70	11.97	0.03
90	4.66	0.19	11.96	0.15	11.64	0.37	12.07	0.07
100	4.65	0.17	12.03	0.08	11.60	0.18	12.10	0.07
110	4.72	0.24	12.02	0.08	11.54	0.28	12.11	0.06
120	4.53	0.11	12.06	0.07	11.56	0.58	12.07	0.09
150	4.76	0.07	12.10	0.06	11.95	0.06	12.21	0.09
180	4.82	0.18	12.10	0.12	12.17	0.08	12.32	0.04

ตารางที่ ก.21 ค่าพีเอชของทองแดง โคโรเมียมและนิกเกิล ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที (n = 3) (ต่อ)

time (min)	pH P.1		pH P.2		pH P.3		pH P.4	
	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD	$\bar{x}$	SD
210	4.92	0.19	12.14	0.10	12.23	0.09	12.32	0.01
240	4.87	0.05	12.17	0.03	12.24	0.09	12.34	0.02
270	4.83	0.02	12.19	0.08	12.23	0.12	12.34	0.02
300	5.17	0.18	12.19	0.07	12.30	0.02	12.36	0.04
330	6.40	1.02	12.17	0.10	12.30	0.05	12.35	0.06
360	7.38	0.39	12.13	0.11	12.26	0.04	12.31	0.08

ตารางที่ ก.22 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	248.22	1.27	0.00	0.00	247.99	0.29	0.00	0.00	248.03	0.64	0.00	0.00	248.15	0.56	0.00	0.00
10	183.23	15.36	26.18	65.79	181.43	11.43	26.84	67.38	215.23	7.73	13.22	33.20	207.02	5.15	16.57	41.63
20	163.23	14.82	34.24	43.02	12.20	1.03	95.08	119.35	176.37	5.16	28.89	36.28	155.74	2.63	37.24	46.78
30	132.70	1.97	46.54	38.98	2.35	1.78	99.05	82.89	114.88	9.50	53.68	44.93	94.37	3.15	61.97	51.89
40	114.89	1.21	53.71	33.75	0.62	0.83	99.75	62.61	53.35	5.75	78.49	49.27	0.67	0.81	99.73	62.64
50	72.22	5.68	70.91	35.64	0.94	1.39	99.62	50.02	33.78	3.81	86.38	43.38	0.35	0.15	99.86	50.17
60	86.92	2.49	64.98	27.22	0.30	0.16	99.88	41.79	0.76	1.14	99.69	41.72	0.21	0.08	99.92	41.83
70	86.12	7.55	65.31	23.44	0.41	0.48	99.84	35.81	0.55	0.34	99.78	35.79	0.27	0.03	99.89	35.85
80	84.60	12.10	65.92	20.71	0.21	0.08	99.91	31.36	0.66	0.94	99.74	31.30	0.16	0.04	99.94	31.38
90	71.97	20.03	71.01	19.83	0.54	0.57	99.78	27.83	0.16	0.19	99.94	27.88	0.16	0.01	99.94	27.90
100	66.55	14.15	73.19	18.39	0.14	0.04	99.95	25.09	0.20	0.09	99.92	25.09	0.12	0.07	99.95	25.11
110	64.13	13.54	74.16	16.94	0.39	0.44	99.84	22.79	0.23	0.17	99.91	22.81	0.10	0.04	99.96	22.83
120	59.49	8.62	76.03	15.92	0.54	0.40	99.78	20.88	0.11	0.06	99.96	20.92	0.14	0.16	99.94	20.92
150	53.35	5.16	78.51	13.15	0.25	0.23	99.90	16.72	0.08	0.02	99.97	16.73	0.82	1.13	99.67	16.69
180	34.57	9.54	86.07	12.02	0.32	0.43	99.87	13.93	0.51	0.71	99.79	13.92	0.53	0.64	99.79	13.93
210	51.11	8.29	79.41	9.50	0.15	0.09	99.94	11.95	0.12	0.06	99.95	11.95	0.53	0.53	99.79	11.94
240	75.07	5.48	69.76	7.30	0.11	0.10	99.96	10.46	0.20	0.05	99.92	10.45	0.18	0.07	99.93	10.46

ตารางที่ ก.22 ผลการทดลองการกำจัดทองแดงจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Cu] mg/L				P.2 [Cu] mg/L				P.3 [Cu] mg/L				P.4 [Cu] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	68.37	6.90	72.46	6.74	0.09	0.05	99.96	9.30	0.18	0.20	99.93	9.29	0.15	0.08	99.94	9.30
300	44.76	9.51	81.97	6.87	0.19	0.13	99.92	8.36	0.14	0.03	99.94	8.37	0.23	0.02	99.91	8.37
330	21.55	7.70	91.32	6.95	0.17	0.06	99.93	7.60	0.38	0.17	99.85	7.60	0.22	0.05	99.91	7.61
360	13.36	3.10	94.62	6.60	0.40	0.54	99.84	6.96	0.14	0.07	99.94	6.97	0.26	0.18	99.90	6.97

ตารางที่ ก.23 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	161.06	0.26	0.00	0.00	161.05	0.61	0.00	0.00	160.72	1.33	0.00	0.00	161.26	0.71	0.00	0.00
10	120.55	9.50	25.15	75.18	90.38	18.63	43.88	131.14	127.55	16.24	20.64	61.55	128.32	4.93	20.43	61.15
20	84.83	9.81	47.33	70.74	15.49	3.26	90.38	135.07	87.90	10.40	45.31	67.57	68.02	1.78	57.82	86.53
30	62.75	3.20	61.04	60.81	0.55	0.22	99.66	99.29	46.97	9.06	70.78	70.37	36.21	4.26	77.54	77.36
40	52.27	6.30	67.55	50.47	0.29	0.06	99.82	74.59	13.88	3.23	91.36	68.13	0.55	0.54	99.66	74.57
50	46.60	3.07	71.06	42.48	0.31	0.20	99.81	59.66	8.04	2.18	95.00	56.67	0.35	0.16	99.79	59.73
60	17.94	1.58	88.86	44.27	0.27	0.10	99.83	49.73	0.25	0.10	99.84	49.63	0.20	0.15	99.88	49.82
70	15.90	1.05	90.13	38.48	0.19	0.16	99.88	42.65	0.52	0.29	99.68	42.47	0.30	0.07	99.81	42.68
80	26.85	5.64	83.33	31.13	0.30	0.37	99.81	37.29	1.18	0.98	99.26	37.01	0.41	0.14	99.75	37.32
90	26.59	10.67	83.49	27.73	0.59	0.43	99.64	33.09	1.12	1.07	99.30	32.91	0.29	0.28	99.82	33.19
100	31.43	12.97	80.49	24.06	0.55	0.37	99.66	29.79	2.23	0.63	98.61	29.41	0.46	0.47	99.72	29.84
110	26.34	15.45	83.65	22.73	0.68	0.62	99.58	27.06	3.52	0.46	97.81	26.52	0.68	0.63	99.58	27.09
120	26.65	2.66	83.46	20.79	1.88	1.39	98.83	24.62	2.80	0.15	98.26	24.42	1.14	0.73	99.29	24.76
150	19.31	3.78	88.01	17.54	1.11	0.77	99.31	19.79	4.52	0.11	97.19	19.33	3.00	1.95	98.14	19.58
180	17.82	11.81	88.94	14.77	2.20	1.16	98.63	16.38	4.51	0.40	97.20	16.11	6.48	1.25	95.98	15.96
210	18.85	2.36	88.30	12.57	2.83	1.57	98.25	13.98	5.07	0.32	96.85	13.76	7.22	1.09	95.52	13.61
240	15.02	2.24	90.67	11.29	4.29	2.07	97.34	12.12	11.59	1.30	92.79	11.53	11.54	3.18	92.85	11.58



ตารางที่ ก.23 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Cr] mg/L				P.2 [Cr] mg/L				P.3 [Cr] mg/L				P.4 [Cr] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	11.79	0.65	92.68	10.26	5.95	2.43	96.31	10.66	17.67	0.91	89.00	9.83	15.45	5.17	90.42	10.02
300	8.82	4.15	94.52	9.42	8.28	2.81	94.86	9.45	20.77	1.46	87.08	8.66	22.00	2.23	86.36	8.62
330	2.74	1.86	98.30	8.90	10.87	4.40	93.25	8.45	23.45	4.03	85.41	7.72	26.20	4.21	83.75	7.60
360	0.97	0.34	99.40	8.25	14.49	2.93	91.01	7.56	27.81	4.79	82.69	6.85	30.64	4.33	81.00	6.73

ตารางที่ ก.24 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
0	14.76	0.06	0.00	0.00	14.77	0.03	0.00	0.00	14.76	0.01	0.00	0.00	14.74	0.02	0.00	0.00
10	13.39	0.16	9.24	1.49	11.19	0.51	24.24	3.92	12.22	0.39	17.23	2.79	11.95	0.41	18.93	3.06
20	12.42	0.34	15.81	1.28	6.73	2.53	54.44	4.41	11.14	0.21	24.55	1.99	10.05	0.92	31.78	2.57
30	10.98	1.11	25.60	1.38	1.10	0.57	92.52	4.99	9.46	0.74	35.90	1.94	8.56	0.42	41.90	2.26
40	10.08	0.63	31.68	1.28	0.38	0.20	97.44	3.94	5.68	1.04	61.54	2.49	0.51	0.10	96.52	3.90
50	9.08	0.40	38.47	1.24	0.50	0.31	96.60	3.13	4.55	1.22	69.15	2.24	0.40	0.13	97.29	3.14
60	9.01	0.71	38.92	1.05	0.46	0.26	96.92	2.61	0.49	0.23	96.67	2.61	0.44	0.28	97.03	2.61
70	8.60	0.51	41.71	0.96	0.47	0.12	96.79	2.24	1.08	1.28	92.71	2.14	0.44	0.13	97.04	2.24
80	8.08	0.10	45.27	0.92	0.20	0.14	98.65	2.00	0.59	0.40	96.01	1.94	0.48	0.27	96.72	1.95
90	7.75	0.26	47.46	0.85	0.34	0.20	97.70	1.76	0.64	0.19	95.70	1.72	0.49	0.30	96.67	1.74
100	7.47	0.11	49.39	0.80	0.45	0.31	96.98	1.57	0.61	0.19	95.89	1.55	0.54	0.29	96.37	1.56
110	7.38	0.09	49.96	0.73	0.53	0.31	96.41	1.42	0.69	0.11	95.34	1.40	0.44	0.32	96.98	1.42
120	7.29	0.08	50.58	0.68	0.61	0.08	95.89	1.29	0.63	0.27	95.76	1.29	0.63	0.20	95.73	1.29
150	6.49	0.36	56.04	0.60	0.49	0.28	96.67	1.04	0.57	0.17	96.12	1.04	0.64	0.19	95.65	1.03
180	6.56	0.36	55.55	0.50	0.53	0.30	96.43	0.87	0.59	0.44	95.98	0.86	0.58	0.23	96.07	0.86
210	7.66	0.67	48.11	0.37	0.52	0.32	96.49	0.74	0.61	0.20	95.88	0.74	0.61	0.21	95.87	0.74
240	8.01	1.30	45.74	0.31	0.48	0.16	96.73	0.65	0.54	0.13	96.32	0.65	0.54	0.13	96.32	0.65

ตารางที่ ก.24 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7.72 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 1, 2, 3 และ 4 (n = 3) (ต่อ)

time (min)	P.1 [Ni] mg/L				P.2 [Ni] mg/L				P.3 [Ni] mg/L				P.4 [Ni] mg/L			
	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency	$\bar{x}$	SD	% Removal	% Current efficiency
270	8.66	1.46	41.28	0.25	0.48	0.10	96.77	0.58	0.64	0.16	95.68	0.57	0.61	0.19	95.83	0.57
300	6.54	0.21	55.66	0.30	0.38	0.17	97.45	0.53	0.52	0.05	96.50	0.52	0.63	0.22	95.75	0.52
330	5.28	1.14	64.24	0.31	0.35	0.22	97.64	0.48	0.60	0.13	95.96	0.47	0.62	0.22	95.78	0.47
360	4.76	0.27	67.77	0.30	0.32	0.23	97.82	0.44	0.54	0.21	96.35	0.43	0.58	0.16	96.03	0.43

ภาคผนวก ข  
วิธีการคำนวณ

## ข.1 วิธีคำนวณผลการทดลอง

### 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

$$\text{Current efficiency (t) \%} = \frac{nF(C_0 - C_t)V \times 100\%}{\int_0^t i(t) dt}$$

โดย  $n$  = ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องต่อโมล

$F$  = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมป์/eq)

$C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้น (โมล/ลิตร)

$C_t$  = ความเข้มข้น ณ เวลาใดๆ (โมล/ลิตร)

$V$  = ปริมาตรของสารละลาย (ลิตร)

$i$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

### ข.1.3 ตัวอย่างการคำนวณ

นำความเข้มข้นของแดงเริ่มต้นในน้ำเสียจริงโรงงานผลิตแทนพิมพ์ที่เวลา 20 และ 25 นาที ณ จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 เมื่อเดินระบบด้วยอัตราเร็วในการไหลของน้ำเสีย 2.8 มิลลิลิตรต่อ นาทีและควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าที่ 1 แอมแปร์ มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่า ร้อยละการกำจัดทองแดงและค่าประสิทธิภาพเชิงกระแส โดย

ความเข้มข้นของแดงเริ่มต้นในน้ำเสียจริง 248.02 มิลลิกรัมต่อลิตร  
 เวลา 20 นาที ความเข้มข้นของทองแดง 32.18 มิลลิกรัมต่อลิตร  
 เวลา 25 นาที ความเข้มข้นของทองแดง 0.40 มิลลิกรัมต่อลิตร

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

แทนค่า ที่เวลา 20 นาที

$$= \frac{(248.02 - 32.18) \times 100\%}{248.02}$$

$$= 87.03\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที ร้อยละการกำจัดทองแดง คือ 87.03%

แทนค่า ที่เวลา 25 นาที

$$= \frac{(248.02 - 0.40) \times 100\%}{248.02}$$

$$= 99.84\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 25 นาที ร้อยละการกำจัดทองแดง คือ 99.84%

$$\text{Current efficiency (t) \%} = \frac{nF(C_0 - C_t)V \times 100\%}{\int_0^t (t) dt}$$

แทนค่า ที่เวลา 25 นาที

$$= \frac{2 \times 96500 \left[ \frac{(248.02 - 0.40)}{63.5463 \times 1000} \right] \text{mol Cu}^{2+} \times 1L \times 100\%}{1A \times 25 \text{ min} \times (60 \text{ sec/min})}$$

$$= 50.14\%$$

ดังนั้น เมื่อเวลา 25 นาที ค่าประสิทธิภาพเชิงกระแสของทองแดง คือ 50.14%

## ข.2 วิธีคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น} \\ &= 3 \text{ เซนติเมตร} \times 9 \text{ เซนติเมตร} \times 2 \text{ ด้าน} \times 12 \text{ แผ่น} \\ &= 648 \text{ ตารางเซนติเมตร} \\ &= 0.0648 \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

ใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 1 แอมแปร์

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า} &= \frac{\text{กระแสไฟฟ้า}}{\text{พื้นที่ขั้วแคโทด}} \\ &= \frac{1 A}{0.0648 m^2} \\ &= 15.43 A/m^2 \end{aligned}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวมณีวัลย์ เนตรรังษี อายุ 25 ปี เกิดวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 สำเร็จ การศึกษามัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสุรศักดิ์มนตรี กรุงเทพมหานคร ปีการศึกษา 2548 สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2552 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี 2553