

การกำจัดโครเมียมและทองแดงอย่างต่อเนื่องจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินพิมพ์
โดยใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้า



นางสาวปรีญา ปานทอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTINUOUS REMOVAL OF CHROMIUM AND COPPER FROM PRINTING PRESS
EFFLUENT USING ELECTROCHEMICAL METHOD

Miss Preeya Panthong



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 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดโครเมียมและทองแดงอย่างต่อเนื่องจากน้ำเสีย โรงงานผลิตแทนทัมพ์โดยใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้า
โดย	นางสาวปรียา ปานทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เจริญขวัญ ไกรยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์)

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

.....กรรมการ
(ดร.อรอนงค์ ลาภปริสุทธิ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป ผาริโน)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒน์ิกะ)

ปรียา ปานทอง : การกำจัดโครเมียมและทองแดงอย่างต่อเนื่องจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนทิมพ์โดยใช้วิธีการทางเคมีไฟฟ้า (CONTINUOUS REMOVAL OF CHROMIUM AND COPPER FROM PRINTING PRESS EFFLUENT USING ELECTROCHEMICAL METHOD) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.เขมรัฐ โอสถาพันธุ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.เจริญขวัญ ไกรยา, 128 หน้า.

น้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนทิมพ์มีการปนเปื้อนของโครเมียมและทองแดงในปริมาณสูง เนื่องจากโครเมียมและทองแดงเป็นส่วนประกอบสำคัญในกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนทิมพ์แบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดและขั้วแอนโนด อัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง และการทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง ผลการทดลอง การทดลองส่วนที่ 1 ถึงปฏิกิริยาแบบกั้นขั้ว-ขาวสามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่างให้ลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่อนุญาตให้ค่าความเข้มข้นของโครเมียมและทองแดงมีได้ไม่เกิน 0.25 และ 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ภายใน 20 และ 30 นาที ตามลำดับ ซึ่งถึงปฏิกิริยาแบบกั้นขั้ว-ขาวสามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่างได้เร็วกว่าถึงปฏิกิริยาแบบกั้นบน-ล่าง ดังนั้นจึงเลือกถึงปฏิกิริยาแบบกั้นขั้ว-ขาวในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่าง การทดลองส่วนที่ 2 เลือกใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงได้เร็วกว่าใช้น้ำประปาและน้ำเสียโรงงานผลิตแทนทิมพ์ และการทดลองส่วนที่ 3 เพื่อเป็นการลดพลังงานและค่าใช้จ่ายในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่างจึงเลือกให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่อง 2, 3 และ 4 เป็น 7, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตรตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570279121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: CHROMIUM, COPPER, ELECTROCHEMICAL, WASTEWATER TREATMENT, HEAVY METAL REMOVAL

PREEYA PANTHONG: CONTINUOUS REMOVAL OF CHROMIUM AND COPPER FROM PRINTING PRESS EFFLUENT USING ELECTROCHEMICAL METHOD. ADVISOR: ASSOC. PROF.KHEMARATH OSATHAPHAN, Ph.D., CO-ADVISOR: CHAROENKWAN KRAIYA, Ph.D., 128 pp.

Printing press effluent contains high concentration chromium and copper. Due to chromium and copper are major component in industrial operation. The propose of this study is continuous removal of chromium and copper from wastewater by electrochemical using graphite electrodes and Fixed flow rate 5.6 ml/min Experiment was divided into 3 parts First, experimental study of optimum reactor. Second, experimental study of optimum electrolyte. and Third, experimental study of optimum current density. The results show that first, The optimum reactor is left-right baffled channel can remove chromium and copper passed the control of industrial effluent standard allow to chromium and copper not exceed 0.25 and 2.00 mg/L at 20 and 30 min respectively Second, Using of NaCl 0.5 M showed better result. and Third, Choose the condition channel 2, 3 and 4 provide current density 7, 5 and 0 A/m² respectively cause low consumption energy and low cost.

Department: Environmental
Engineering

Field of Study: Environmental
Engineering

Academic Year: 2015

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.เจริญขวัญ ไกรยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำแนะนำและคำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัยนี้ ตลอดจนการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน อาจารย์.ดร.อรอนงค์ ลากปรีสุทธิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนาธิป ฝาริโน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรรณวดี สุวัฒน์ิเก ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำแนะนำ แก่ทีมงานวิจัย ตรวจสอบความถูกต้องความเหมาะสมของเนื้อหาวิทยานิพนธ์ในด้านต่างๆ เพื่อปรับปรุงแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกๆ ท่านที่ได้ให้ความรู้ในทุกๆรายวิชาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับการสนับสนุนด้านงบประมาณจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือให้กำลังใจ ให้การสนับสนุน และคำปรึกษาต่างๆ ในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 โครเมียม	3
2.1.1 ลักษณะทั่วไปของโครเมียม.....	3
2.1.2 ความเป็นพิษของโครเมียม.....	3
2.2 ทองแดง	4
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของทองแดง.....	4
2.2.2 ความเป็นพิษของทองแดง.....	4
2.3 น้ำเสียจากอุตสาหกรรม	5
2.4 เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสีย	6
2.5 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน	8
2.5.1 การตกตะกอนทางเคมี.....	8

2.5.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน.....	10
2.5.3 การระเหย	11
2.5.4 การดูดติดผิว.....	11
2.5.5 การแพร่ย้อนกลับ	11
2.5.6 การแลกเปลี่ยนไอออน.....	12
2.5.7 การแยกด้วยไฟฟ้า	12
2.6 กระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	13
2.6.1 เซลล์กัลวานิก	14
2.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลต์	14
2.6.3 การนำพาไอออนสารละลาย	17
2.6.4 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า.....	20
2.6.5 โพลาริเซชัน.....	22
2.6.6 กฎฟาราเดย์.....	24
2.7 วิธีการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า	24
2.7.1 การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	24
2.7.2 การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่.....	25
2.8 ขั้วไฟฟ้า.....	26
2.9 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้า	28
2.9.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว.....	28
2.9.2 โมโนโพลาร์แบบขนาน.....	29
2.9.3 โมโนโพลาร์แบบอนุกรม.....	29
2.9.4 แบบไบโพลาร์.....	30
2.10 การแยกโลหะโดยอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้า	30

2.11	ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	33
2.12	หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า.....	33
2.13	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัย	41
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์	41
3.1.1	เครื่องมือและอุปกรณ์.....	41
3.1.2	สารเคมี.....	43
3.1.3	การเตรียมน้ำเสียและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง	43
3.1.4	การเตรียมสารละลายมาตรฐาน	44
3.1.5	การหาขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) และการหา ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ).....	45
3.2	การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	46
3.3	การดำเนินการวิจัย.....	49
3.3.1	ศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำมวลหนึ่งที่เคลื่อน ณ เวลาต่างๆ	49
ภาพที่ 3.5	ศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำที่เคลื่อน ณ เวลาต่างๆ	49
3.3.2	การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและ ทองแดง	50
3.3.3	การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัด โครเมียมและทองแดง	52
3.3.4	การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัด โครเมียมและทองแดง	54
3.4	วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์.....	57
บทที่ 4	ผลการทดลองและการวิจารณ์	58

4.1 การหาขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) และการหาขีดจำกัดของ การวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)	58
4.2 ศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำมวลหนึ่งที่เคลื่อน ณ เวลาต่างๆ.....	58
4.3 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและ ทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์	59
4.4 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม และทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์	62
4.5 การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม และทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์	65
4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระหว่างการกำจัดโครเมียมและทองแดง.....	71
4.7 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด.....	74
4.8 เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	78
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุปผลการวิจัย	80
5.2 ข้อเสนอแนะ	81
5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม	81
รายการอ้างอิง	82
ภาคผนวก.....	86
ภาคผนวก ก	87
ภาคผนวก ข	121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	128

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม.....	13
ตารางที่ 2.2	สรุปลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
ตารางที่ 3.1	องค์ประกอบของน้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย	44
ตารางที่ 3.2	สารละลายมาตรฐานโครเมียม.....	45
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1.....	51
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2.....	53
ตารางที่ 3.5	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ให้ในแต่ละช่อง	55
ตารางที่ 3.6	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 3.....	56
ตารางที่ 3.7	วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด	57
ตารางที่ 4.1	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ให้ในแต่ละช่องบำบัด	65
ตารางที่ 4.2	แสดงตัวอย่างไฮดรอกไซด์ไอออนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพีเอช 1 ยูนิต.....	72
ตารางที่ 4.3	เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการกำจัดโครเมียมและทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 204.19 และ 260.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ	77
ตารางที่ 4.4	เปรียบเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	79

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1	ความสามารถในการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์	9
ภาพที่ 2.2	องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า.....	16
ภาพที่ 2.3	การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน	18
ภาพที่ 2.4	การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่.....	19
ภาพที่ 2.5	กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า	20
ภาพที่ 2.6	การอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้า.....	21
ภาพที่ 2.7	การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลา.....	25
ภาพที่ 2.8	ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้า.....	26
ภาพที่ 2.9	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมนโพลาร์เซลล์เดี่ยว.....	28
ภาพที่ 2.10	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมนโพลาร์แบบขนาน.....	29
ภาพที่ 2.11	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมนโพลาร์แบบอนุกรม	29
ภาพที่ 2.12	การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์.....	30
ภาพที่ 2.13	โพลาริเซชันของ Cu, M1, M2	31
ภาพที่ 2.14	โพลาริเซชันของ M1, M2.....	32
ภาพที่ 2.15	โพลาริเซชันของทองแดงกับสังกะสีและสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับสังกะสี.....	32
ภาพที่ 2.16	ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกั้นสารละลายฝั่งแคโทดและแอโนดด้วยแผ่นแก้วรูพรุน	37
ภาพที่ 3.1	ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อสารละลาย กั้นฝั่งแอโนดและแคโทดด้วยแผ่นแก้วรูพรุน	42
ภาพที่ 3.2	ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	43
ภาพที่ 3.3	การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า	47
ภาพที่ 3.4	ถึงปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลอง.....	48
ภาพที่ 3.5	ศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำที่เคลื่อน ณ เวลาต่างๆ	49

ภาพที่ 3.6 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง	51
ภาพที่ 3.7 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง.....	53
ภาพที่ 3.8 การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง.....	56
ภาพที่ 4.1 การเคลื่อนที่ของมวลน้ำมวลหนึ่ง ณ เวลาต่างๆ	59
ภาพที่ 4.2 ร้อยละการกำจัด (ก) โครเมียมและ (ข) ทองแดง เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง ..	61
ภาพที่ 4.3 ร้อยละการกำจัดโครเมียมและทองแดง เมื่อใช้ถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเท่ากันทั้ง 3 ช่อง	62
ภาพที่ 4.4 ร้อยละการกำจัด (ก) โครเมียมและ (ข) ทองแดง เมื่อใช้ถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง.....	64
ภาพที่ 4.5 ร้อยละการกำจัด (ก) โครเมียม และ (ข) ทองแดง เมื่อทำการบำบัดด้วยชุดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า CD-555, CD-550, CD-750 และ CD-1050	68
ภาพที่ 4.6 ร้อยละการกำจัด (ก) โครเมียม และ (ข) ทองแดง เมื่อทำการบำบัดด้วยชุดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า CD-555, CD-755 และ CD-1055	70
ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระหว่างการกำจัดโครเมียม และทองแดงแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา โดยติดตามมวลน้ำหนึ่งๆ ที่เคลื่อนที่ ณ ช่วงเวลาต่างๆ.....	73
ภาพที่ 4.8 ปริมาณโครเมียม และทองแดงที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างที่ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น	73
ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชที่มีต่อการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ	74

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพัฒนาอุตสาหกรรมภายในประเทศเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ภาคอุตสาหกรรมเติบโตอย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชน รวมถึงทรัพยากรสิ่งแวดล้อมที่เสื่อมโทรมและหมดไป ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ อากาศ และกาสารพิษที่อันตรายและบำบัดยาก อุตสาหกรรมหลายประเภทใช้โลหะหนักเป็นส่วนประกอบในกระบวนการผลิต เช่น อุตสาหกรรมผลิตแท่นพิมพ์ที่ใช้โลหะโครเมียมและทองแดงปริมาณมากในกระบวนการผลิต ซึ่งน้ำเสียที่ปนเปื้อนโครเมียมและทองแดง หากมีการปล่อยทิ้งโดยไม่มีการบำบัดหรือบำบัดได้ไม่ดีก็จะส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมในระยะยาว จึงสมควรอย่างยิ่งที่จะกำจัดโครเมียมและทองแดงในน้ำเสียให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม โดยกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมของโครเมียมและทองแดงไว้ไม่เกิน 0.25 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (กรมควบคุมมลพิษ, 2543) ถึงจะสามารถปล่อยน้ำทิ้งออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์แบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องใช้สารเคมีในขั้นตอนการกำจัด (Scott และคณะ, 1997)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ รูปแบบถังปฏิกริยา ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ในกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตในการวิจัย ได้แก่

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนนิน

1.3.2 สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ได้แก่ รูปแบบถังปฏิกริยา ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

1.3.3 วัดปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลือในตัวอย่างน้ำเสียด้วยเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

1.3.4 คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์และคำนวณค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมและทองแดงจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนิน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง ได้แก่ รูปแบบถังปฏิกริยา ชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางในการนำระบบไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

1.4.3 ทราบค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครเมียม

2.1.1 ลักษณะทั่วไปของโครเมียม

โครเมียม (Cr) เป็นธาตุในหมู่ (VI) B ในตารางธาตุ จัดเป็นธาตุทรานซิชัน เป็นโลหะมันวาวสีเทา สามารถตีเป็นแผ่น นำไฟฟ้าได้ดี จุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง ใช้เคลือบผิวโลหะเพื่อป้องกันการผุกร่อน และเพื่อความสวยงาม สามารถตีขึ้นรูปในอุตสาหกรรมต่างๆ มีการนำโครเมียมและสารประกอบโครเมียมมาใช้หลายประเภท เช่น การชุบโลหะ ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ชุบเครื่องประดับ การย้อมผ้า เป็นต้น มีสถานะออกซิเดชันหลายสถานะที่พบมากที่สุด คือ โครเมียม (III) และโครเมียม (VI) โดยที่โครเมียม (III) เป็นสถานะที่เสถียรมากที่สุด ส่วนโครเมียม (VI) มีความเป็นพิษสูงสุด

2.1.2 ความเป็นพิษของโครเมียม



สารประกอบโครเมียม (III) มีความเป็นอันตรายน้อยกว่าสารประกอบโครเมียม (VI) โดยสารประกอบโครเมียม (VI) เป็นสารที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองและมีฤทธิ์กัดกร่อน สามารถดูดซึมทางร่างกายได้โดยทางเดินอาหาร ทางผิวหนัง และทางเดินหายใจ สำหรับสารประกอบโครเมียมเป็นทั้งสารก่อการกลายพันธุ์และสารก่อมะเร็งเพราะจะไปรบกวนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอในเซลล์ (Hunter, 1969)

ความเป็นพิษของโครเมียมและสารประกอบโครเมียม สามารถแบ่งออกเป็นความเป็นพิษแบบเฉียบพลันและความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน มักพบในกรณีได้รับการกินเฮกซะวาเลนซ์โครเมียม เช่น กรดโครมิก ทำให้เกิดการระคายเคือง ทำให้มีอาการคลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง เป็นอันตรายต่อกระเพาะอาหารและลำไส้ ไตวายเสียชีวิตได้ ปริมาณโครเมียม (VI) ที่ทำให้เสียชีวิตในผู้ใหญ่ คือ 1-3 กรัม

ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง มักพบในคนที่ต้องทำงานสัมผัสกับโครเมียมและสารประกอบโครเมียมเป็นเวลานานๆ มีความเป็นพิษต่อผิวหนังและทางเดินหายใจ ทำให้เกิดแผลเรื้อรังได้ โดยบริเวณที่สัมผัส ได้แก่ มือและแขน ระบบทางเดินหายใจ ในกรณีที่รุนแรงอาจเกิดแผลเรื้อรังในเยื่อจมูกจนเกิดผนังกันจมูกทะลุ และเป็นสารก่อมะเร็ง

2.2 ทองแดง

2.2.1 ลักษณะทั่วไปของทองแดง

ทองแดงที่เกิดตามธรรมชาติอยู่ในรูปทองแดงบริสุทธิ์หรือสินแร่ โดยรวมตัวอยู่กับ หิน ทราย ดินหรือดินเหนียว สินแร่ทองแดงแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. ทองแดงบริสุทธิ์ตามธรรมชาติ
2. ซัลไฟด์ (Sulfide Ores) ทองแดงรวมตัวกับกำมะถันเป็นทองแดงซัลไฟด์
3. แร่ออกไซด์ (Oxide Ores) ทองแดงรวมตัวกับออกซิเจน เป็นทองแดงออกไซด์

ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้ประโยชน์และมีความสำคัญในด้านอุตสาหกรรม เนื่องจากทองแดงมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงและเป็นตัวนำความร้อนที่ดี จึงใช้ทำอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ทองแดงมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ต่ำจึงเป็นสื่อไฟฟ้าอย่างดีและถูกนำไปใช้อุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น สายไฟ เครื่องจักร โทรศัพท์ และอุปกรณ์ต่างๆ

2.2.2 ความเป็นพิษของทองแดง

อาการของพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับ ช่องทางที่ได้รับ และสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงดูดซึมได้ดีที่กระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน สะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง โดยสะสมมากที่สมองและตับ เมื่อได้รับทองแดงปริมาณมากจะเกิดความเป็นพิษต่อร่างกายคือคลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ การทำงานของหัวใจผิดปกติ เกิดอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อเวลานาน ทำให้เกิดความบกพร่องและไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย คือ อาการ Wilson Diseases ร่างกายสันตลอดเวลา กล้ามเนื้อเกร็ง และควบคุมการพูดลำบาก

2.3 น้ำเสียจากอุตสาหกรรม

น้ำเสียจากอุตสาหกรรม สามารถแยกตามประเภทของอุตสาหกรรมได้ดังนี้ (กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม, 2542)

2.3.1 อุตสาหกรรมอาหาร น้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้ จะมีความแตกต่างกันตามประเภทโรงงาน วัตถุประสงค์กระบวนการผลิต ลักษณะโดยทั่วไปจะประกอบด้วยอินทรีย์วัตถุ ตะกอนแขวนลอย ปริมาณและลักษณะน้ำเสีย มีความเปลี่ยนแปลงสูงตามฤดูกาลโดยเฉพาะประเภทผลไม้ น้ำที่ใช้ล้าง (บางครั้งเป็นน้ำร้อน) มักถูกปล่อยออกมาเป็นจำนวนมากโดยปกติแล้วจะไม่มีสารอันตราย เช่น โลหะหนัก แต่มีไขมัน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยเฉพาะพวกแป้งและเป็ยร์จะทำให้มีค่าบีโอดีสูง

2.3.2 อุตสาหกรรมสิ่งทอ มีความแตกต่างกันอย่างมากภายในส่วนประกอบของน้ำเสียระหว่างอุตสาหกรรมสิ่งทอธรรมชาติกับสิ่งทอทางด้านเคมีน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอธรรมชาติประกอบด้วยค่าบีโอดีที่มีความเข้มข้นสูง ไขมันและด่าง และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้านเคมีจะประกอบด้วยมลสาร เช่น สีย้อม และสารเคมีอื่นๆ

2.3.3 อุตสาหกรรมผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษใช้ต้นไม้จากธรรมชาติเป็นวัตถุดิบ นำมาเติมด้วยสารเคมีและนำไปต้มเอาเพียงเซลลูโลสมาใช้ทำผลิตภัณฑ์ นอกนั้นปล่อยส่วนประกอบอื่นๆ ให้เป็นวัตถุเจือปนลงในน้ำเสีย ทำให้น้ำเสียมีมลพิษสูง น้ำเสียจะมีลักษณะที่มีทั้งค่าบีโอดีและมีสีเจือปนที่ค่อนข้างสูง ส่วนในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษมีกระบวนการเพิ่มเติมคือ นำเยื่อกระดาษมาเติมด้วยตัวฟिलเลอร์ เพื่อทำให้เป็นแผ่นกระดาษ ลักษณะของน้ำเสียจึงประกอบไปด้วยเส้นใยละเอียดหรือกระดาษ และสารที่เป็นฟिलเลอร์ต่างๆ และยังเต็มไปด้วยวัสดุจำนวนมากที่ลอยในอยู่บนผิวน้ำ

2.3.4 อุตสาหกรรมเครื่องหนัง น้ำเสียจะมีค่าบีโอดีค่อนข้างสูงซึ่งมาจากสารแทนนินที่ใช้ในการฟอกหนังและจากหนังดิบ โครเมียมที่ใช้ในการฟอกหนังและสีจากการย้อม

2.3.5 อุตสาหกรรมผลิตเคมีภัณฑ์ น้ำเสียมักจะประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นตามประเภทของกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม สารเคมีที่ใช้มีหลายประเภทจะถูกปล่อยมากับน้ำเสีย เช่น สารอันตราย สารประกอบที่มีกลิ่นเหม็น มีสภาพเป็นกรดหรือเป็น ด่างสูง และมีสารประกอบที่มีค่าซีโอดีสูง เป็นต้น

2.3.6 อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมัน ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ น้ำมัน ที่มีอยู่ในสภาพอิมัลชัน (Emulsion) นอกจากนั้นน้ำเสียก็ยังเต็มไปด้วยสารที่มีกลิ่นเหม็น เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารประกอบซัลไฟด์ แอมโมเนีย เมอร์แคปแทน และฟีนอล ฯลฯ

2.3.7 อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เป็นน้ำเสียที่ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอินทรีย์ ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) และส่วนประกอบอื่นๆ ขึ้นกับประเภทของผลิตภัณฑ์

2.3.8 อุตสาหกรรมผลิตเหล็กและเหล็กกล้า เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในปริมาณสูง น้ำเสียเกิดจากกระบวนการทำความเย็นและทำความสะอาดสำหรับเตาหลอมถ่านโค้ก ประกอบด้วย แอมโมเนีย โซดาไนต์ ฟีนอล เป็นต้น นอกจากนี้ น้ำเสียที่มาจากกระบวนการกำจัดฝุ่นจากเตาหลอมจะ ประกอบด้วยของแข็งแขวนลอย (ฝุ่นของถ่านโค้กและแร่เหล็ก) และจากกระบวนการล้างด้วยกรด ประกอบด้วยกรด เหล็ก และน้ำมัน

2.3.9 อุตสาหกรรมผลิตโลหะที่ไม่ใช่เหล็ก สินแร่ดิบทองแดง ทองคำและเงิน โดยปกติมักจะประกอบด้วยสารเจือปนพวกแคดเมียม ตะกั่ว สารหนู สารเหล่านี้อาจจะถูกละลายออกมา ในระหว่างกระบวนการผลิตหรืออยู่ในน้ำเสียซึ่งอาจตกค้างในดินหรือเกิดการปนเปื้อนในน้ำใต้ดินหากมีการระบายน้ำเสียที่ไม่ได้มาตรฐานลงสู่ผิวดิน

2.3.10 อุตสาหกรรมการเคลือบโลหะ มีการใช้วัตถุติดและสารเคมีหลายตัวใน อุตสาหกรรมประเภทนี้ ดังนั้นในน้ำเสียจึงประกอบด้วยโลหะหนักหลายชนิด เช่น แคดเมียม สังกะสี ทองแดง โซดาไนต์ โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ กรด และต่าง ๆ

2.3.11 อุตสาหกรรมเซรามิกส์และซีเมนต์ มีน้ำเสียที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ แหวนลอยที่มีสภาพเป็นต่าง ส่วนของอุตสาหกรรมเซรามิกส์ยังมีสารจำพวกให้สีและสารพวกวัตถุ อันตรายเจือปนอยู่ด้วย

2.4 เทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสีย

วิธีการบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับสิ่งที่เจือปนอยู่ในน้ำเสีย โดยปกติของแข็งหรือตะกอนแขวนลอย ที่ลอยอยู่ในน้ำเสียมักบำบัดด้วยวิธีกายภาพ ตะกอนขนาดเล็กหรือสารละลายในน้ำเสียต้องบำบัดออก โดยใช้วิธีทางเคมีหรือวิธีทางชีวภาพ เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียมีหลายประเภท การเลือกใช้ระบบใด ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (มันสิน ตันฑุลเวศน์, 2542)

- ลักษณะของน้ำเสีย
- ระดับการบำบัด
- สภาพท้องถิ่น

ในกรณีที่น้ำเสียมีความสกปรกอยู่ในรูปของสารละลายอินทรีย์ต่างๆ เช่น โลหะหนักหรือสารพิษ การบำบัดน้ำเสียมักใช้กระบวนการทางเคมี เนื่องจากกระบวนการทางชีวภาพไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักหรือสารพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าการลงทุน น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะเป็นตัวอย่างของน้ำเสียที่มีโลหะหนัก เช่น โครเมียม ตะกั่ว ทองแดง และสังกะสี ระบบบำบัดที่ใช้จึงควรเป็นระบบบำบัดแบบเคมี ซึ่งมักแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยวิธีตกผลึกให้เกิดสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์ต่างๆ และตกตะกอนออกจากน้ำ

กระบวนการบำบัดโดยรวมที่ใช้ส่วนใหญ่ สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนได้ ดังนี้

1. ระบบบำบัดขั้นต้น (Preliminary Treatment) ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง การกำจัดตะกอนหนัก และการทำให้ลอย เป็นต้น
2. ระบบบำบัดขั้นสอง (Secondary Treatment) ได้แก่ การแยกและกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ และตะกอนแขวนลอย มักใช้ในกระบวนการทางชีววิทยา
3. ระบบบำบัดขั้นสาม (Tertiary Treatment) ได้แก่ การกำจัดสารอื่นๆ ที่เหลือจากระบบบำบัดขั้นสอง โดยเฉพาะสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ในแต่ละขั้นตอนการบำบัดจะใช้กระบวนการต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งได้ 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้คือ

1. กระบวนการทางกายภาพ (Physical Unit Processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง (Screening) การบดตัด (Comminution) การกวาด (Skimming) การกวน (Mixing) การทำให้ลอย (Flotation) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) และการกรอง (Filtration) เป็นต้น

2. กระบวนการทางเคมี (Chemical Unit Processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียโดยใช้สารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอามลสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การทำให้ตกตะกอน (Precipitation) การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) และการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น

3. กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Unit Processes) คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายและเปลี่ยนสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นแก๊สและได้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนขึ้น ได้แก่ ระบบแอกทีเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge) ระบบโปรยกรอง (Trickling Filter) สระเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter) และบ่อแอนแอโรบิกหรือบ่อเหม็น (Anaerobic Pond) เป็นต้น

4. กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical Unit Processes)

คือ วิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยวิธีทางกายภาพและทางเคมีรวมกัน ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) และการแพร่ย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เป็นต้น

2.5 การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อน

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน การพิจารณาเลือกกระบวนการบำบัดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในด้านต่างๆ คือ สมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำทิ้งที่ต้องการพื้นที่ใช้ในการบำบัดทั้งหมด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและตรวจสอบคุณภาพ ความยากง่ายในการเดินระบบและความปลอดภัย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่หรือกากที่ต้องกำจัด โดยสรุปวิธีการบำบัดต่างๆได้ดังนี้

2.5.1 การตกตะกอนทางเคมี

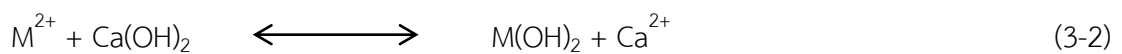
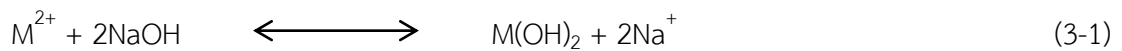
เป็นกระบวนการที่เติมสารเคมีลงไปในน้ำเสีย เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่มีอยู่ทำให้เกิดตะกอนเกลือของโลหะหนักที่ไม่ละลายในน้ำเสีย ก่อให้เกิดเป็นตะกอนที่สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ โดยทั่วไปแล้วนิยมตกตะกอนโลหะหนักในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ จึงมักเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide) แต่เนื่องจากราคาของแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาว (Lime) มีราคาถูกและหาได้ง่ายกว่า จึงเป็นที่นิยมมากกว่า วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้เป็นอย่างมากเพราะราคาถูก ง่ายต่อการควบคุมและปฏิบัติการ แต่มีข้อเสียคือจะต้องมีกระบวนการบำบัดตะกอนมารองรับ และไม่สามารถนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้อีก หรือหากจะนำกลับมาใช้ก็ต้องมีกระบวนการที่ยุ่งยากและซับซ้อนมารองรับ

นอกจากการเติมสารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำแล้วอาจทำการเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะนั้นมีความสามารถในการละลายน้อยลง (Patterson, 1985)

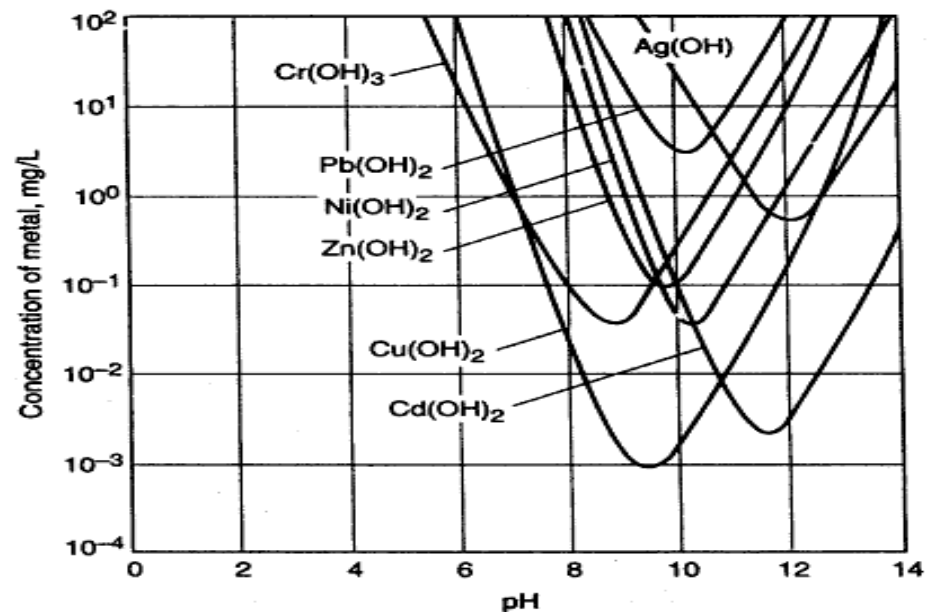
1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์

ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว จะมีค่าต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และบางครั้งอาจต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรก็ได้ โลหะไฮดรอกไซด์เป็นพวกแอมโฟเทอริก

(Amphoteric) คือ ที่พีเอชสูงและต่ำกว่าพีเอชที่สมดุลการตกตะกอนสามารถเพิ่มการละลายได้ โลหะต่างชนิดจะมีค่าพีเอชที่เหมาะสมต่างกัน สำหรับน้ำเสียที่มีโลหะหลายชนิดปนกันอยู่ การตกตะกอนของผลึกโลหะหนักแต่ละชนิด อาจจะใช้ค่าพีเอชที่แตกต่างกัน ดังนั้นการที่จะควบคุมความเข้มข้นของโลหะหนักทุกตัวที่ออกจากน้ำเสียให้มีระดับตามต้องการ อาจจำเป็นต้องใช้การตกตะกอนผลึกอื่นที่อาจเป็นไปได้ ใช้สารตกตะกอนคือ โซดาไฟ (NaOH) หรือปูนขาว (Ca(OH)₂) จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (3-1) และ (3-2) โดย M²⁺ แทนโลหะประจุบวกทั้งหมด



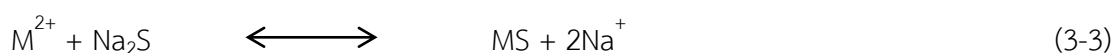
ความสามารถในการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ แสดงในภาพที่ 2.1 สำหรับการสร้างตะกอนของโครเมียมไฮดรอกไซด์ โดยโครเมียมที่อยู่ในรูปโดยโครเมียม (III) แล้วสามารถสร้างตะกอนแข็งในรูปของ Cr(OH)₃ ได้ โดยปรับพีเอชให้ได้ประมาณ 6 ถึง 10 ซึ่งเป็นช่วงที่โครเมียมตกตะกอนเป็นโลหะออกไซด์มากที่สุด



ภาพที่ 2.1 ความสามารถในการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ (Metcalf และ Eddy, 2003)

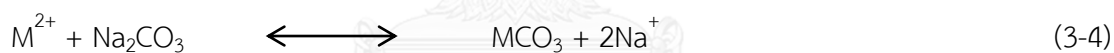
2. การตกตะกอนซัลไฟด์

ใช้สารตกตะกอน คือ โซเดียมซัลไฟด์ สูตรทางเคมี คือ Na_2S หรือ โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ สูตรทางเคมี คือ NaHS และ เฟอร์รัสซัลไฟด์ สูตรทางเคมี คือ FeS ซึ่งละลายน้ำได้เล็กน้อย โดยทำการเติมลงในสารละลายเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับโลหะไอออน จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ (3-3)



3. การตกตะกอนออกซาลेट ฟอสเฟต และคาร์บอเนต

แอนไอออนทั้งสามตัวนี้สามารถตกตะกอนกับแคตไอออนได้หลายตัว แต่เนื่องจากค่า ผลคูณของการละลายของตะกอนที่เกิดจากแอนไอออนเหล่านี้มีค่าไม่ต่างกันมากนัก ทำให้การควบคุมพีเอชเพื่อให้ความเข้มข้นของแอนไอออนเหล่านี้ต่างกันนั้นยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น การตกตะกอนจึงต้องมีการแยกด้วยวิธีอื่นอีกขั้นหนึ่งก่อน เช่น การแยกแคลเซียมออกจากแมกนีเซียมและโลหะอัลคาไลน์ ยกตัวอย่างปฏิกิริยาการตกตะกอนคาร์บอเนตดังสมการที่ (3.4) โดยนิยมทำการตกตะกอนในสารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน



2.5.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน

กระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันเป็นวิธีการทางเคมีอีกวิธีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการบำบัดของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนโลหะหนัก เป็นการเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษสามารถตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดกระบวนการออกซิเดชัน ได้แก่ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน เปอร์แมงกาเนต ไนเตรต เป็นต้น ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไอออน (III) ซัลเฟต เป็นต้น

2.5.3 การระเหย

การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric Evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) การระเหยเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ได้ง่าย แต่ต้องใช้ปริมาณพลังงานจำนวนมาก เพื่อให้ให้น้ำระเหยแห้งไปจนหมด ทำให้ค่าใช้จ่ายสูงมาก จึงไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณมากและมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำ

2.5.4 การดูดติดผิว



กระบวนการดูดติดผิวเป็นวิธีที่ใช้ในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับสูงได้ สารดูดติดผิวที่มักใช้ในระบบบำบัดคือ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) ซึ่งเป็นถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นผิวมากที่สุด โดยทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ เช่น คาร์บอนแบบเกล็ดสามารถกำจัดปรอทและเงินได้หมด อีกทั้งยังสามารถลดความเข้มข้นของโลหะชนิดอื่นๆได้ เช่น ตะกั่ว โครเมียม และทองแดง

การดูดติดผิวเป็นการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า สารที่ถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) โดยกลไกการดูดติดผิวเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดซับ

2.5.5 การแพร่ย้อนกลับ

การแพร่ย้อนกลับเป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรน ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable Membrane) เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่จะใช้จึงต้องทนต่อแรงดันได้สูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้น ได้แก่ การปรับค่าพีเอช การแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์รุนแรงออก และการกรองสารแขวนลอยออกเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน เป็นต้น

2.5.6 การแลกเปลี่ยนไอออน

เป็นวิธีการที่ใช้เรซิน (Resin) เป็นตัวแยกไอออนของโลหะออก โดยเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างน้ำเสียที่มีไอออนของโลหะหนักกับไอออนบนผิวของเรซิน ทำให้โลหะหนักเหล่านี้เกาะอยู่ที่ผิวของเรซินโดยเรซินที่ใช้ในการแยกโลหะหนัก คือ แคทไอออนเรซิน (Cationic Resin) วิธีการนี้แม้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่ค่าใช้จ่ายมาก เนื่องจากเรซินมีราคาแพง นอกจากนี้ยังไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงและมีการปนเปื้อนของสารหลายชนิด จึงนิยมเป็นกระบวนการบำบัดขั้นสุดท้ายเพื่อให้น้ำทิ้ง (Effluent) มีความสะอาดสูงมีการปนเปื้อนของโลหะในปริมาณที่ต่ำมาก

2.5.7 การแยกด้วยไฟฟ้า



วิธีการแยกโลหะออกจากน้ำเสียด้วยไฟฟ้าจัดเป็นวิธีที่เก่าแก่ที่สุด โดยไอออนของโลหะจะเกิดการรีดักชันที่ขั้วของแคโทด โดยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดมักจะทำด้วยโลหะที่เฉื่อยต่อปฏิกิริยา โดยขั้วแคโทดมักจะทำด้วยเหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิม และแผ่นฟาร์บอน ส่วนขั้วแอโนดมักจะทำด้วยแพลทินัม ไทเทเนียมเคลือบบุรูทีเนียมออกไซด์ ตะกั่ว และแกรไฟต์ การแยกด้วยไฟฟ้าจะทำได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง เพื่อให้ประสิทธิภาพในการแยกเกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ดีขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า ปัจจัยที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือ พื้นที่แคโทดและแอโนด และอัตราการเคลื่อนย้ายมวล ซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพในการเข้าเกาะของโลหะ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของแข็งซึ่งเหมาะต่อการนำกลับมาใช้ใหม่หรือนำไปขาย โดยประสิทธิภาพของระบบนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 90 ถึง 95 แต่มีข้อเสีย คือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานสูง

สำหรับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่านกระบวนการบำบัดแล้ว ก่อนปล่อยทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะต้องมีค่าพารามิเตอร์อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
1.ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	9.0-5.5
2.โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium, Cr ³⁺)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
3.ทองแดง (Cu ²⁺)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
4.ของแข็งละลายทั้งหมด (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร
5.ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา : (กรมควบคุมมลพิษ, 2543)

2.6 กระบวนการเคมีไฟฟ้า

กระบวนการเคมีไฟฟ้าจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองครึ่งเซลล์ ครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนและอีกครึ่งเซลล์หนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน โดยครึ่งเซลล์อันหนึ่งๆ จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นโลหะจุ่มอยู่ในสารละลายของไอออนโลหะนั้น นำครึ่งเซลล์ไฟฟ้าสองชนิดมาประกอบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้าโดยต่อสารละลายทั้งสองด้วยสะพานเกลือ (Salt Bridge) นอกจากนี้เซลล์เคมีไฟฟ้าอาจไม่ใช้สะพานเกลือโดยให้ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วจุ่มในสารละลายเดียวกัน เซลล์ไฟฟ้าแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามหน้าที่ คือ

2.6.1 เซลล์กัลวานิก

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

1. เซลล์ปฐมภูมิ (Primary Cell)

ปฏิกิริยาเป็นแบบไม่ผันกลับ ดังนั้นเมื่อเซลล์เสื่อมสภาพก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหล ไม่สามารถอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ เช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์เชื้อเพลิง

2. เซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell)

ปฏิกิริยาเคมีเป็นแบบผันกลับได้ สามารถอัดประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ได้โดยการต่อไฟฟ้ากระแสตรงจากภายนอกเซลล์เข้าสู่เซลล์ เช่น แบตเตอรี่สะสมไฟฟ้าแบบตะกั่ว เซลล์นิกเกิล-แคดเมียม

2.6.2 เซลล์อิเล็กโทรไลต์

เป็นเซลล์ที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารอิเล็กโทรไลต์ตามต้องการ การดำเนินไปของปฏิกิริยาไม่ต่อเนื่องสม่ำเสมอขึ้นกับพลังงานไฟฟ้าในรูปของศักย์ที่ได้รับ การใช้ประโยชน์จากเซลล์อิเล็กโทรไลต์ในทางการค้าเป็นการแยกหรือสังเคราะห์โลหะที่ต้องการ เช่น การสังเคราะห์โลหะอะลูมิเนียม การแยกของโลหะเงินหรือทองแดง และการชุบโลหะ

ในการใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักจะใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดภายนอกขับเคลื่อนให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้น โดยเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญอย่างน้อย 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากภายนอก สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

หลักการทำงานของเซลล์อิเล็กโทรไลต์จะเกิดขึ้นเมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงไหลจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอนขึ้น โดยขั้วไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนไหลลงไปที่ขั้วจะแสดงคุณสมบัติเป็นขั้วลบ (Negative Electrode) เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนซึ่งมีประจุลบมีจำนวนมากขึ้น และเรียกขั้วลบนี้ว่า ขั้วแคโทด (Cathode) โดยขั้วแคโทดนี้จะต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ในทางตรงกันข้ามแหล่งกำเนิดไฟฟ้าเมื่อมีการจ่ายอิเล็กตรอนให้กับขั้วหนึ่งก็จะต้องมีการดูดอิเล็กตรอนจากขั้วตรงกันข้ามขึ้นมา ทำให้ขั้วเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนจึงแสดงอำนาจเป็นประจุบวก (Positive Electrode) และเรียกขั้วบวกนี้ว่า ขั้วแอโนด (Anode) โดยขั้วแอโนดนี้จะต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่

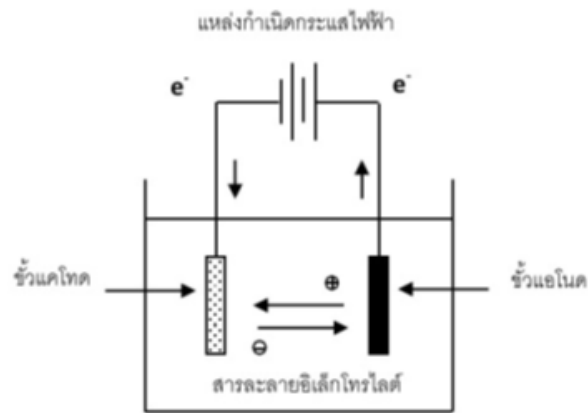
การที่จะเกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าครบวงจรในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ จะต้องมีการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ด้วย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Reaction) โดยจะมีการการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนกับบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดครึ่งปฏิกิริยาที่แต่ละขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเรียกว่า ขั้วแอโนด ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (3-5) ส่วนที่ขั้วไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันจะเรียกว่า ขั้วแคโทด ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (3-6) องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าดังแสดงในภาพที่ 2.2 และการเกิดครึ่งปฏิกิริยาในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนจำนวนอิเล็กตรอนที่ได้รับจะต้องเท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนที่เสียไปเสมอ

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด





ภาพที่ 2.2 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า วรรณรัตน์ วัฒนาชัย, 2547)

เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์เซลล์เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก ความยากง่ายในการทำให้เกิดปฏิกิริยาจึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการให้หรือรับอิเล็กตรอนของ ไอออนที่อยู่ในสารละลายนั้น ซึ่งสามารถดูได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าและค่า E^0 ถ้าสารละลายอยู่ใน สภาวะมาตรฐาน ในกรณีของสารละลายที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะเกิดการแข่งขันในการให้หรือรับ อิเล็กตรอนของไอออนต่างๆ ในสารละลายและโมเลกุลของน้ำ ในการพิจารณาจะแยกอธิบายการ แข่งขันในการเกิดปฏิกิริยาที่แคโทดและแอโนดออกจากกันดังนี้

ปฏิกิริยาที่แคโทด

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วปฏิกิริยารีดักชันอาจเกิด ได้ 2 กรณี คือ

1. ไอออนบวกกัฏริติวซ์เกิดเป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น ไอออนโลหะกัฏริติวซ์ เป็นโลหะ
2. โมเลกุลของน้ำอาจกัฏริติวซ์ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจน และ ไฮดรอกไซด์ไอออน

ปฏิกิริยาที่แอโนด

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้ว ปฏิกิริยาออกซิเดชันอาจ เกิดได้ 2 กรณี คือ

1. ไอออนลบถูกออกซิไดซ์เป็นสารที่ไม่มีประจุ เช่น คลอไรด์ไอออนเป็นแก๊สคลอรีน
2. โมเลกุลของน้ำอาจถูกออกซิไดซ์ให้เป็นโมเลกุลของออกซิเจนและไฮโดรเจนไอออน

ในการทำนายปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์อิเล็กโทรไลติกนั้น อาจแยกพิจารณาเป็นปฏิกิริยาที่แอโนดและปฏิกิริยาที่แคโทด หรือพิจารณาปฏิกิริยารวมของทั้งสองครึ่งปฏิกิริยาว่าคูใดที่ใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยที่สุด ปฏิกิริยาคู่นั้นจะเกิดขึ้นก่อนซึ่งการพิจารณาทั้งสองแบบนี้มีความจำเป็นต้องใช้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของปฏิกิริยา และหากทราบค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวแล้วจะทำให้การทำนายมีความแม่นยำยิ่งขึ้น ตัวแปรที่มีผลต่อปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้ามีดังนี้ ชนิดของขั้วไฟฟ้า ลักษณะรูปร่างและสถานะพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า ลักษณะการถ่ายโอนมวลไปยังขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นของไอออนที่ผิว ชนิดและความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สารอื่นๆ ที่ปนอยู่ในสารละลาย เช่น ตัวทำละลาย ค่าพีเอชของสารละลาย ค่าการนำไฟฟ้า ความเร็วจำกัดของไอออนในสารละลาย ค่าศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ความดัน และเวลา

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์เคมีไฟฟ้าเกิดจากความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดและความต้านทานภายในเซลล์ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (3-7)

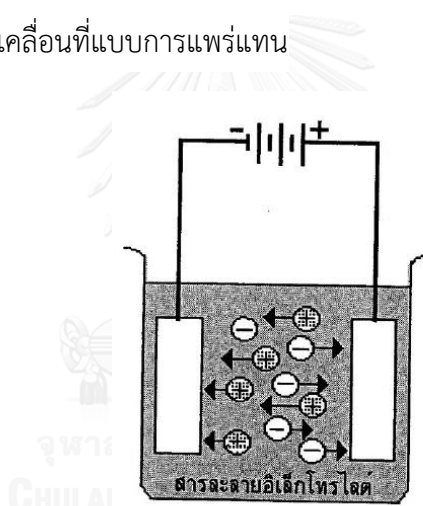
$$E_{\text{cell}} = E_{\text{cathod}} - E_{\text{anod}} - IR \quad (3-7)$$

2.6.3 การนำพาไอออนสารละลาย

ไอออนของสารอิเล็กโทรไลต์ในสารละลายถูกพาไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ด้วย 3 กลไกด้วยกัน คือ ไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และคอนเวกชันหรือการพา (Convection) กระบวนการนำพาไอออนทั้งสามกลไกนี้ เกิดขึ้นทั้งขั้วแอโนดและขั้วแคโทดสามารถเกิดขึ้นเองกับไอออนในสารละลายหรือถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการ ขึ้นกับเทคนิคการวิเคราะห์นั้นๆ

1. ไมเกรชัน (Migration)

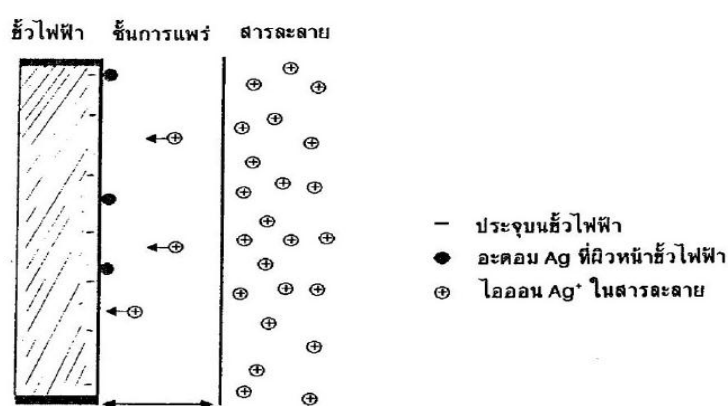
เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาขั้วลบและไอออนลบเคลื่อนที่ไปทางขั้วบวก ดังภาพที่ 2.3 ความเร็วของการที่ไอออนเคลื่อนที่เข้าหาหรือเคลื่อนออกจากผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า อาจเพิ่มหรือลดลงตามศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้นเพิ่มหรือลดไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนอื่นที่มีประจุชนิดเดียวกับไอออนที่ต้องการอยู่ในสารละลายด้วย จะเกิดการแย่งกันเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรอันเนื่องมาจากไอออนที่ต้องการลดลงไปด้วย เช่น การที่สะพานเกลือเป็นสารละลายของโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีความเข้มข้นมากกว่าไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ 50 ถึง 100 เท่า ทำให้ทั้งโพแทสเซียมไอออน (K^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) แย่งเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าแทนไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ เกิดผลคือทำให้ไอออนที่ต้องการวิเคราะห์ไม่เกิดการเคลื่อนที่แบบไมเกรชันแต่เคลื่อนที่แบบการแพร่แทน



ภาพที่ 2.3 การเคลื่อนที่ของไอออนแบบไมเกรชัน (เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

2. การแพร่ (Diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า จนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้น อัตราความเร็วของการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เช่น การพอกพูนของเงินที่ขั้วแคโทดในสารละลายที่ประกอบด้วยไอออนเงิน (Ag^+) ในความเข้มข้นที่มากกว่าที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจึงเกิดการแพร่ของไอออนเงินในสารละลาย และที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าต่างกันมากการแพร่ก็ยิ่งเกิดอย่างรวดเร็ว ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 การนำพาไอออนจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าด้วยการแพร่

(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

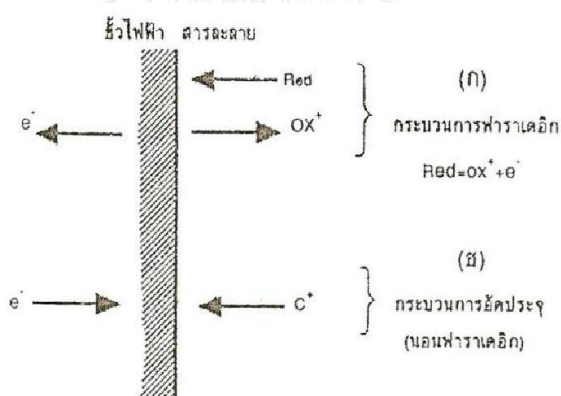
3. คอนเวกชันหรือการพา (Convection)

การที่ไอออนในสารละลายถูกพาเข้าหาหรือออกจากผิวหน้าขั้วไฟฟ้า เป็นผลจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ความหนาแน่นของสารละลาย หรือด้วยกลไกภายนอก เช่น การคนหรือเขย่าสารละลาย ซึ่งเป็นการเร่งการเคลื่อนตัวของไอออนภายในสารละลาย

2.6.4 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

ถ้าไอออนหรือประจุที่ตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้า สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้น และมีปฏิกิริยาของการรับและจ่ายอิเล็กตรอนเกิดขึ้น เรียกว่ากระบวนการฟาราเดอิก (Faradaic Process) ผลลัพธ์ของการเกิดกระบวนการดังกล่าวที่ขั้วไฟฟ้า ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรของเซลล์ไฟฟ้านั้นได้เรียกว่า เกิดกระแสฟาราเดอิก (Faradaic Current) ดังภาพที่ 2.5 (ก)

ถ้าไอออนหรือประจุที่ถูกพาไปผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เพียงแต่ถูกดูดซับไว้บริเวณรอยต่อของสารละลายกับขั้วไฟฟ้า ไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น โดยประจุที่ถูกดูดซับไว้มีการเรียงตัวตรงรอยต่อนั้น ในระหว่างการเกิดการเรียงตัวมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าขึ้นแต่ก็เป็นเพียงชั่วขณะที่การเรียงตัวยังไม่ยุติ เรียกกระบวนการที่เกิดขึ้นนี้ว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก (Non-Faradaic Current) ดังภาพที่ 2.5 (ข)



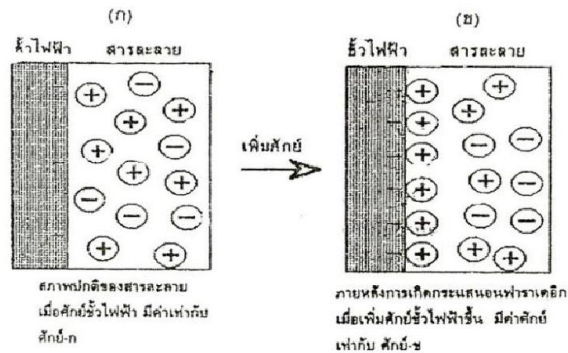
ภาพที่ 2.5 กระบวนการที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้า

(ก) กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า กระบวนการฟาราเดอิก

(ข) กระบวนการที่ขั้วไฟฟ้า เรียกว่า กระบวนการนอนฟาราเดอิก

(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

สำหรับเซลล์ไฟฟ้าเคมีหนึ่งๆ กระบวนการที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า จะเป็นกระบวนการ ฟาราเดอิกหรือนอนฟาราเดอิก ไม่ได้ขึ้นกับการจัดเซลล์หรือชนิดของเซลล์เคมีไฟฟ้าแต่ขึ้นกับสภาวะของการวิเคราะห์ ว่ามีอุณหภูมิพลวัตหรือจลน์ที่เหมาะสมกับการที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นตรงผิวหน้าขั้วไฟฟ้านั้นได้หรือไม่ ตัวอย่างกระบวนการนอนฟาราเดอิก ได้แก่ การอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้าดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 การอัดกระแสให้กับขั้วไฟฟ้า

(ก) ก่อนการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก

(ข) หลังการอัดกระแสในกระบวนการนอนฟาราเดอิก

(เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ, 2552)

ในภาพที่ 2.6 (ก) เดิมขั้วไฟฟ้ามีค่าศักย์ไฟฟ้าจำนวนหนึ่ง สมมุติให้เท่ากับศักย์ ก เมื่ออยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ธรรมชาติของการปรับสมดุลของไอออนในสารละลาย ทำให้เกิดการเรียงตัวของไอออนในชั้นสารละลายและที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นลักษณะสองชั้นโดยไอออนที่มีประจุบวกของสารละลายมาเรียงประชิดกับขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นแคโทด มีความหนาแน่นของไอออนตามความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้านั้น ส่วนไอออนอื่นๆในสารละลายมีการกระจายทั่วในสารละลายในสภาพสมดุลระหว่างประจุบวกและประจุลบ ชั้นของประจุที่ปรากฏนี้เมื่อมีการปรับเพิ่มค่าศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้าในภาพที่ 2.6 (ข) สมมุติให้เท่ากับ ข ซึ่งมีค่ามากกว่าศักย์ ก จะเกิดการปรับสมดุลของการเรียงตัวของไอออนในทั้งสองชั้นใหม่ที่ โดยไอออนบวกจากสารละลายถูกพามาที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สมดุลกับศักย์ที่เพิ่มขึ้น ระหว่างการเกิดการปรับสมดุลใหม่นี้มีการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นชั่วขณะหนึ่ง เมื่อไอออนเกิดการเรียงตัวในลักษณะสองชั้นที่สมดุลอีกครั้งหนึ่ง กระแสไฟฟ้าก็จะหมดไป กระบวนการทั้งหมดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้านี้ยังไม่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงเป็นนอนฟาราเดอิก และกระแสไฟฟ้าที่ไหลชั่วขณะหนึ่งเรียกว่า กระแสไฟฟ้าจากการอัดซึ่งเป็นกระแสนอนฟาราเดอิก

การทำให้กระบวนการเปลี่ยนจากนอนพาราเดอิกเป็นพาราเดอิกในทางปฏิบัติทำได้ โดย

1. ทำให้เกิดความต่างศักย์ของเซลล์ อยู่ในช่วงที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าขั้วไฟฟ้าได้

2. ที่ศักย์เดิมในกระบวนการนอนพาราเดอิก เติมสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ ที่ค่าของศักย์นั้นๆ ทำให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ เกิดการไหลของกระแสพาราเดอิกขึ้นได้ สารเคมีที่เติมนี้เรียกว่า สารตีโพลาริเซอร์และขั้วไฟฟ้าขณะนี้ถูกเรียกว่า ขั้วตีโพลาริซ์

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

2.6.5 โพลาริเซชัน

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

โพลาริเซชันอาจเกิดขึ้นได้ทั้งสองขั้วไฟฟ้าในเซลล์เดียวกันขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้

- ขนาดและรูปร่างและองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้า
- องค์ประกอบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- อุณหภูมิและอัตราเร็วในการกวนสารละลาย
- ความหนาแน่นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- สมบัติทางกายภาพของสาร

การที่ปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าต้องสะดุดหรือช้าลงอาจเป็นไปได้จาก 2 สาเหตุด้วยกัน คือ

1. โพล่าไรเซชันอันเนื่องมาจากความเข้มข้น (Concentration Polarization)

เกิดขึ้นจากความไม่ต่อเนื่องของการนำพาไอออนจากชั้นของสารละลายมายังผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเพื่อเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจเป็นเพราะเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะเวลาหนึ่ง สารละลายมีทั้งไอออนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาและไอออนที่เป็นผลของปฏิกิริยา การนำพาไอออนที่ต้องการจากชั้นสารละลายไปยังผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะเป็นไปโดยยากขึ้นหรือเป็นไปได้ช้าลง ทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าลดน้อยลงกว่าที่ควรจะเป็นความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์และสารตัวอย่าง กลไกการกวนสารละลายและขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลายจะมีส่วนทำให้เกิดโพล่าไรเซชันขึ้นไม่มากนักน้อย ซึ่งผลของการเกิดโพล่าไรเซชันนี้ส่งผลให้ต้องทำการเพิ่มศักย์ให้กับวงจรเพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรเป็นไปตามปกติ

2. โพล่าไรเซชันแบบจลน์ (Kinetic Polarization)

เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนหรือไอออนจากปฏิกิริยารีดอกซ์ถูกส่งข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับขั้วไฟฟ้าชะลอลง เพื่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร อาจเนื่องมาจากความแรงของไอออนไม่มากพอทำให้ไม่สามารถข้ามรอยต่อระหว่างสารละลายกับที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้ามาได้ ซึ่งถ้ามีการให้พลังงานไฟฟ้าโดยการเพิ่มศักย์ให้กับขั้วไฟฟ้านั้นจะมีผลทำให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรดำเนินต่อไปได้ดี ถ้าผลของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าเป็นการเกิดแก๊ส ซึ่งไม่แสดงไอออน จะส่งผลต่อการเกิดโพล่าไรเซชันแบบนี้ได้มาก แต่ถ้ามีการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายหรือลดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า จะช่วยลดการเกิดโพล่าไรเซชัน

2.6.6 กฎฟาราเดย์

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไฟฟ้ากับปริมาณสารที่เกิดขึ้นในการแยกสลายด้วยไฟฟ้าและกล่าวว่า

1. ปริมาณสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าเป็นปฏิกิริยากับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านสารละลาย
2. ปริมาณสารแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าโดยการผ่านกระบวนการไฟฟ้าปริมาณเท่ากันเป็นปฏิกิริยากับน้ำหนักสมมูลของสาร

จากกฎฟาราเดย์สามารถคำนวณหาประจุได้ดังสมการที่ (3-8)

$$Q = \int_0^t I dt = mnF \quad (3-8)$$

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

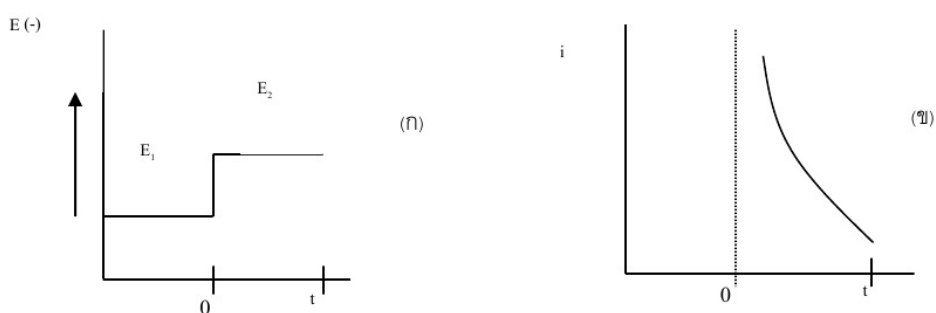
2.7 วิธีการควบคุมกระบวนการเคมีไฟฟ้า

จากหลักการของกระบวนการเคมีไฟฟ้า จึงสามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่และการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งหลักการควบคุมในแต่ละแบบมีดังนี้

2.7.1 การควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

การควบคุมค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ในกระบวนการให้มีค่าคงที่ ส่งผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าในระบบเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา โดยเมื่อปรับค่าความต่างศักย์เพียงพอ ไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่ผิว

ของขั้วแคโทด และเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของไอออนของโลหะที่บริเวณผิวหน้าของขั้วแคโทดมีค่าต่ำลง ทำให้ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วไฟฟ้าอ้างอิงมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าจึงต้องลดต่ำลง เพื่อควบคุมค่าความต่างศักย์ให้มีค่าคงที่ ผลที่เกิดจากการทำงานแบบควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ ดังภาพที่ 2.7 ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลา เมื่อมีการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จาก E_1 เป็น E_2 ที่ขั้วแคโทด



ภาพที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ากับเวลา

(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับเวลาในการควบคุมแบบศักย์ไฟฟ้าคงที่

(Friedrich, 1962)

E_1 คือ ค่าความต่างศักย์เริ่มต้นก่อนการเกิดปฏิกิริยา และ E_2 คือ ค่าความต่างศักย์ที่เป็น Diffusion Limited Rate หรือ Mass Transfer Limited ซึ่งออกซิโดซจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ทำให้ความเข้มข้นของไอออนบวกที่ผิวหน้าของขั้วแคโทดลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ การลดลงของความเข้มข้นของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีผลให้กระแสไฟฟ้าของระบบลดลงดังภาพที่ 2.7 (ข) เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้น ($i=kC$)

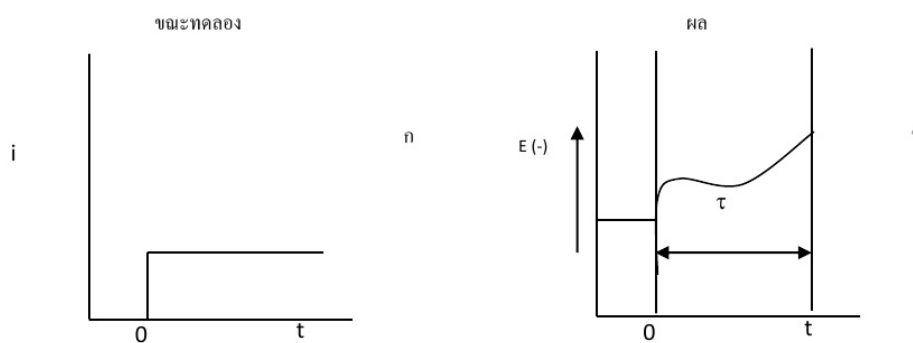
2.7.2 การควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่

รูปแบบการควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่นี้ อาจเรียกว่า Chronopotentiometry หรือ Chronopotentiometric Technique โดยการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าคงที่ ทำให้ค่าความต่างศักย์มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อควบคุมให้กระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งสองคงที่ ทำให้

สารออกซิไดซ์ (M^{n+}) เกิดปฏิกิริยารีดักชันกลายเป็นสารรีดิวซ์ (M) ด้วยอัตราที่คงที่ โดยมีปฏิกิริยาดังแสดงในสมการที่ (3-9)



ดังนั้นค่าความต่างศักย์จะแปรตามค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง M^{n+}/M ที่ผิวขั้วไฟฟ้ากับเวลา เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของ M^{n+} ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าจะลดลง ค่าความต่างศักย์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าก็จะลดลงเช่นกัน ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้าที่เรียกว่า Transition Time (τ) ซึ่งค่านี้สัมพันธ์กับความเข้มข้นและสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ในช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์โดยกระแสไฟฟ้า

- (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
 - (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับเวลาในการควบคุมแบบกระแสไฟฟ้าคงที่
- (Friedrich, 1962)

2.8 ขั้วไฟฟ้า

ขั้วไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์กับอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้าโดยในเซลล์เคมีไฟฟ้าหนึ่งๆ จะต้องประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วคือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งในแต่ละขั้วนั้น จะเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ไม่เหมือนกัน นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้ายังสามารถแบ่งได้ตามหน้าที่ภายในเซลล์ ได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working Electrode) มีหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ระหว่างสารอิเล็กโทรไลต์กับสื่อภายนอก แล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า

2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่มีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามการไหลของกระแสไฟฟ้า จึงถูกต่อเข้ากับเซลล์ไฟฟ้า เพื่อใช้วัดค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน

3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary Electrode) ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน

วัสดุที่เลือกการนำมาใช้ในการทำขั้วไฟฟ้ามีหลายชนิด เช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม และแกรไฟต์ โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า

โดยแกรไฟต์เป็นโครงสร้างหนึ่งของคาร์บอนซึ่งเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ มีลักษณะทึบแสงและเป็นเงามันที่คล้ายกับโลหะเล็กน้อย การจัดเรียงตัวของอะตอมในแกรไฟต์เกิดขึ้นเป็นระนาบแบบชั้นๆ โดยที่การยึดตัวระหว่างระนาบนั้นไม่ได้ยึดกันด้วยพันธะโควาเลนต์ แต่จะยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ โดยมีระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ระนาบเดียวกันเท่ากับ 1.415 อังสตรอม การนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดได้มากในทิศทางขนานกับระนาบของอะตอม แต่ในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบอะตอมจะเกิดการนำไฟฟ้าได้น้อย

ในขณะเดียวกันคาร์บอนเป็นตัวนำอิเล็กตรอนที่เฉื่อย ซึ่งมีประโยชน์ในการทำเป็นขั้วไฟฟ้าหรือเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้แก่วัสดุชนิดอื่นๆ นอกจากนี้คาร์บอนยังมีราคาถูกและหาได้ง่ายในรูปแบบต่างๆ อีกด้วย ในสภาพของแข็งคาร์บอนทำให้อยู่ในรูปแท่งทรงกระบอกหรือเป็นแผ่นก็ได้ นอกจากนี้ยังทอเป็นแผ่นผ้าให้แก๊สผ่านได้ ผงคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่ผิวมาก จึงเป็นประโยชน์ต่อการใช้รองรับสารเร่งปฏิกิริยาและทำขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวสูง เนื่องจากโครงสร้างทำให้เกิดความพรุนได้ โครงสร้างเป็นชั้นๆ จึงมีการนำคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นสารสอดไส้หรือเป็นตัวกลางสำหรับการเก็บไฮโดรเจน

คาร์บอนเป็นหนึ่งในวัสดุนิยมใช้กันมากที่สุดสำหรับทำขั้วไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นรูปผงหรือผ้าทอโดยมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 1,000 ถึง 2,000 กรัมต่อตารางเมตร และขนาดของรูพรุนจากน้อยกว่า 2 นาโนเมตร จนถึงมากกว่า 50 นาโนเมตร ซึ่งผู้ผลิตอุตสาหกรรมสามารถปรับให้มีประสิทธิภาพการทำงานได้สูงสุด โดยการปรับแต่งอัตราส่วนระหว่างช่อง (Channels) ใหญ่ ซึ่งเป็นทางเข้าของไอออนต่อช่องที่มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งส่วนสำคัญกับพื้นที่ผิวและเพิ่มความจุ

2.9 รูปแบบการวางขั้วไฟฟ้า

การวางขั้วไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์มีอยู่ 2 แบบ ขึ้นอยู่กับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวตั้งเพื่อให้ฟองแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยตะกอน ควรวางขั้วไฟฟ้าในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ทางด้านล่าง สำหรับการจัดเรียงตัวของแผ่นขั้วไฟฟ้ามีอยู่ 4 รูปแบบดังนี้ (Mollah และคณะ, 2004)

2.9.1 โมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว

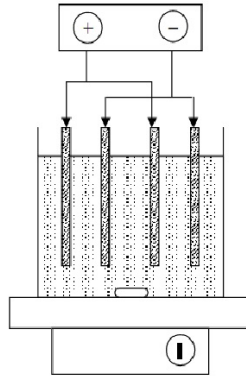
เป็นการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่ง่ายที่สุดคือ มีขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ โดยขั้วหนึ่งเป็นขั้วแอโนดและอีกขั้วเป็นแคโทด ดังภาพที่ 2.9 ซึ่งการจัดเรียงแบบนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากการนำไปประยุกต์ใช้นั้นต้องการขนาดใหญ่และมีพื้นที่ผิวทำปฏิกิริยามาก



ภาพที่ 2.9 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Pretorius และคณะ, 1991)

2.9.2 โมนิโพลาร์แบบขนาน

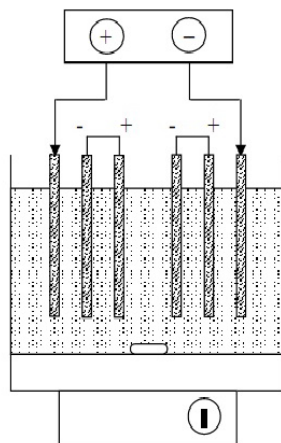
กระแสไฟฟ้าจะถูกแบ่งไปในแต่ละเซลล์ขึ้นอยู่กับความต้านทานภายในเซลล์นั้นๆ โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบจะเท่ากัน ลักษณะการต่อแบบโมนิโพลาร์แบบเซลล์เดี่ยวขนาน ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมนิโพลาร์แบบขนาน (Chen, 2004)

2.9.3 โมนิโพลาร์แบบอนุกรม

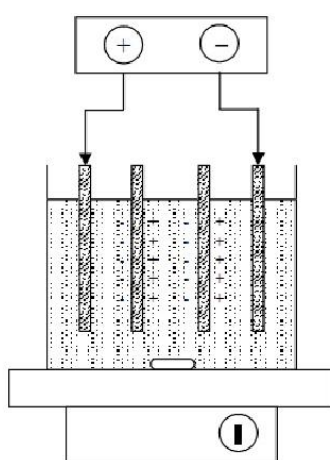
มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าคล้ายเซลล์เดี่ยวหลายๆเซลล์มาต่อกันโดยมีการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อให้ไฟฟ้ากระจายในแต่ละขั้วไฟฟ้า ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมนิโพลาร์แบบอนุกรม (Chen, 2004)

2.9.4 แบบไบโพลาร์

มีจุดเชื่อมขั้วไฟฟ้าเพียง 2 จุดเท่านั้น เฉพาะขั้วไฟฟ้าที่อยู่ปลายนอกสุด ดังภาพที่ 2.12 โดยแต่ละแผ่นของขั้วไฟฟ้ามีด้านหนึ่งเป็นขั้วแอโนดและอีกด้านเป็นขั้วแคโทด ในทางไฟฟ้านั้น ขั้วไฟฟ้าจะมีการเรียงเซลล์แบบอนุกรม โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านต้องการความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากความต้านทานที่สูงกว่าของเซลล์ที่ต่อแบบขนาน แต่จะมีกระแสไฟฟ้าของระบบเท่ากัน นั่นคือจะมีกระแสไฟฟ้าเดียวกันไหลผ่านขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ซึ่งการจัดเรียงขั้วแบบนี้ทำให้ง่ายต่อการติดตั้งและบำรุงรักษาในขณะการใช้งาน



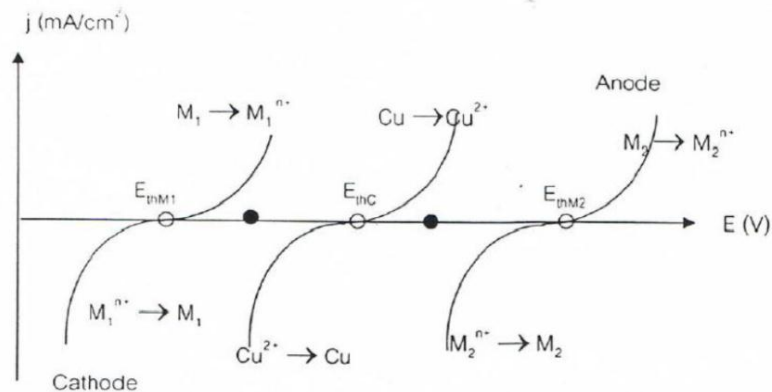
ภาพที่ 2.12 การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Chen, 2004)

2.10 การแยกโลหะโดยอาศัยหลักการเคมีไฟฟ้า

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักปนเปื้อนโดยใช้หลักการแยกด้วยเคมีไฟฟ้า ซึ่งเป็นลักษณะเดียวกับการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าคือ การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์เคมีไฟฟ้าและเกิดปฏิกิริยาพอกพูนของไอออนโลหะที่ขั้ว ตัวแปรที่มีผลต่อการพอกพูน ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลา และอัตราเร็วในการกวน (เก็จวลี พฤษชาทร, 2548)

การแยกโลหะโดยใช้ไฟฟ้าสามารถทำได้ในรูปแบบของการแยกโลหะออกทีละชนิด (Selective Metal Deposition) หรือการแยกโลหะร่วม (Codeposition)

การแยกโลหะแต่ละชนิดจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์หรือน้ำเสียจะให้การพิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าและกราฟโพลาริเซชันของโลหะแต่ละตัว เช่น ในสารละลายที่มีไอออนของ Cu , M_1 , M_2 ซึ่งมีกราฟโพลาริเซชัน ดังภาพที่ 2.13 จะสามารถพิจารณาระบบได้ดังนี้



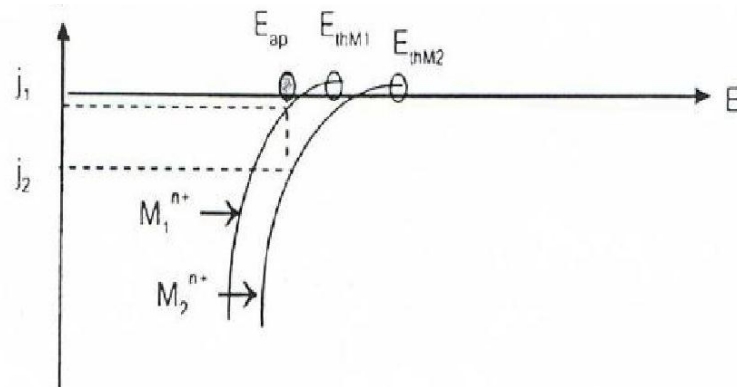
ภาพที่ 2.13 โพลาริเซชันของ Cu, M1, M2 (เก็จวลี พุกษาท, 2548)

1. ถ้าไอออน M_1 และ M_2 ไม่เป็นไอออนโลหะ พบว่า ไอออน M_1 และ M_2 จะไม่เกิดปฏิกิริยาการพอกพูนที่ขั้วไฟฟ้า แต่อาจตกตะกอนหรือคงอยู่ในรูปของไอออนในสารละลายเล็กโตรไลต์

2. ถ้าไอออน M_1 และ M_2 เป็นไอออนโลหะ โดยมี $E_{M2} > E_{Cu} > E_{M1}$ การที่จะแยกโลหะแต่ละตัวออกจากกันนั้น เริ่มแรกจะต้องแยกโลหะ M_2 ก่อนเนื่องจากมีค่าศักย์รีดักชันสูงสุด โดยต้องกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าอยู่ระหว่างค่า E_{thM2} กับ E_{thCu} ก่อนเพื่อให้ M_2 แยกออกไปจากสารละลายทั้งหมด จากนั้นจึงเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าเป็นค่าระหว่างค่า E_{thM2} กับ E_{thCu} เพื่อให้แยก Cu จนหมด จากนั้นจึงแยก M_1 ต่อไป โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าค่า E_{thM1}

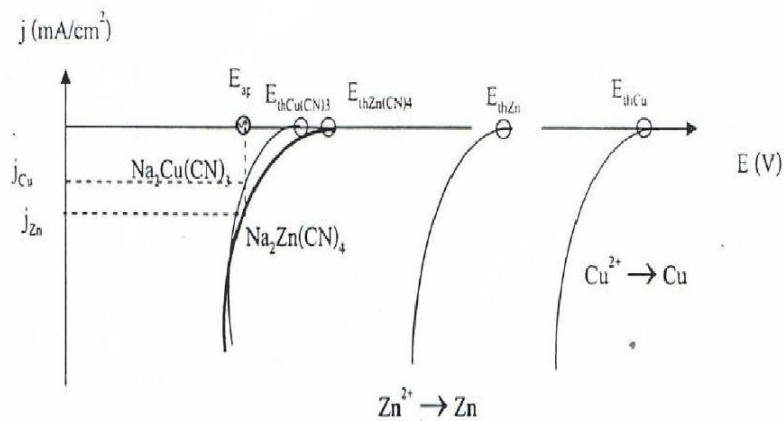
3. ในกรณีที่ต้องการแยกจากของแข็ง ให้ใช้ของแข็งเป็นขั้วแอโนด ซึ่งเป็นขั้วแบบละลายได้ (Soluble Anode) ถ้าของแข็งนั้นมีองค์ประกอบเป็น Cu, M_1 และ M_2 ถ้าต้องการแยก Cu ออกจากขั้วแอโนดและแยกโดยให้ไปพอกพูนที่ขั้วแคโทด ให้ใช้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ไม่มีไอออนของ M_1 , M_2 และกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดอยู่ต่ำกว่า E_{thM2} เพื่อไม่ให้ M_2 ถูกออกซิไดซ์ แต่ M_1 และ Cu จะถูกออกซิไดซ์ออกมาทำให้สารละลายอิเล็กโตรไลต์ จะมี Cu^{2+} และ M_1^{n+} เพื่อให้ Cu ไปพอกพูนที่ขั้วแคโทดอย่างเดียวจึงต้องกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดอยู่ระหว่าง E_{Cu} กับ E_{M1}

ในการทำงานเดียวกันถ้าต้องการให้มีการแยกโลหะร่วมของโลหะหลายชนิดก็สามารถทำได้โดยการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ขั้วไฟฟ้า ดังตัวอย่างกราฟโพลาริเซชันภาพที่ 2.14 โดยแสดงเฉพาะส่วนของเส้นกราฟแคโทดิก (Cathodic Curve) หรือสัณฐานของปฏิกิริยารีดักชันของโลหะ M_1 และ M_2 ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวเท่ากับศูนย์ สามารถพิจารณาได้ว่า ถ้าต้องการแยกโลหะ M_1 และ M_2 ออกมารวมกันต้องกำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าสมดุลของโลหะ M_1 ($E_{ap} < E_{th1}$) ระบบจะเกิดการพอกพูนของทั้ง M_1 และ M_2 ร่วมกัน



ภาพที่ 2.14 โพลาริเซชันของ M1, M2 (เก็จวลี พุกษาท, 2548)

การแยกโลหะร่วมเกิดขึ้นได้ยากในบางครั้งเนื่องจากค่าศักย์สมมูลที่ต่างกันมาก ดังนั้นการลดค่าศูนย์สมมูลมาให้ใกล้เคียงกันจะทำให้เกิดการแยกโลหะร่วมได้ดียิ่งขึ้น เช่น กรณีของ ทองแดงกับสังกะสี (Cu/Zn) ดังในภาพที่ 2.15 ซึ่งมีค่าศักย์สมมูลต่างกัน แต่สามารถทำให้ค่าศักย์สมมูลมาใกล้เคียงกันได้ด้วยการใช้ไอออนที่อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน คือ $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ กับ $\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$ ไอออนในรูปสารเชิงซ้อนจะช่วยทำให้ค่าศักย์สมมูลของสารเปลี่ยนแปลงได้



ภาพที่ 2.15 โพลาริเซชันของทองแดงกับสังกะสีและสารประกอบเชิงซ้อนของทองแดงกับสังกะสี (เก็จวลี พุกษาท, 2548)

2.11 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ทิศทางของไอออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับ การควบคุมดังนี้ (ปริเมฆ เจริญนพคุณ, 25545)

1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า โดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุไอออน ความสามารถของไอออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุไอออนและขนาดไอออน
3. อุณหภูมิในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายเท และรับอิเล็กตรอนโดยที่กระแสไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วอิเล็กโทรด
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า และจำนวนกระแสไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับระยะทางที่ไอออนเคลื่อนที่จากขั้วอิเล็กโทรด โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วน้อยจะมีผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
6. จำนวนประจุของไอออนมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายที่สามารถนำไฟฟ้าได้ จะมีผลทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้นๆ

2.12 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีไฟฟ้า

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเคมีไฟฟ้ามีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเคมีไฟฟ้า คือ

1. เครื่องปฏิกรณ์ควรเป็นแบบง่ายที่สุด และค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ควรเลือกการออกแบบระบบที่มีการกวนผสม
2. เครื่องปฏิกรณ์ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างสมบูรณ์ก่อนจะผ่านสู่ขั้นตอนอื่น ในกรณีที่มีกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการเคมีไฟฟ้ามาเกี่ยวข้อง ควรจะทำการแยกออกจากกระบวนการเคมีไฟฟ้า
3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลายต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจจะต้องใช้แผ่นกั้น หรือใบพัด

4. ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า
5. ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าน้อยเพราะระยะห่างขั้วไฟฟ้ายิ่งมากจะต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าสูงซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น
6. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้นต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการเคมีไฟฟ้า และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเคมีไฟฟ้า โดยสามารถคงทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน
7. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำขั้วนั้นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัด และปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจขึ้นได้

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มะลิ หุ่นสม (2544) ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เพื่อนำกลับของโลหะซึ่งประกอบด้วยทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะ งานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก คือ การนำกลับคืนของโลหะทองแดงจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบดั้งเดิมและแบบที่ได้พัฒนาขึ้น ส่วนที่สองเป็นการนำกลับของโลหะโครเมียมและนิกเกิลจากสารละลายสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบเยื่อเลือกผ่าน ส่วนที่สามเป็นการนำกลับของโลหะผสมทองแดง โครเมียม และนิกเกิล จากสารละลายสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในเครื่องปฏิกรณ์ดั้งเดิมแบบเยื่อเลือกผ่าน จากผลการทดลองพบว่า โลหะแต่ละชนิดมีภาวะที่ดีที่สุดของการนำกลับเฉพาะตัวซึ่งทำให้สามารถนำกลับโลหะทองแดง โครเมียม และนิกเกิล ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10, 90 และ 90 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

ศราวุธ ลาภพูนผล (2549) ศึกษาการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการเคมีไฟฟ้า ร่วมกับการแยกตะกอนลอยแบบไหลต่อเนื่องใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า จัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์หลายเซลล์แบบขนาน ศึกษาปัจจัยด้านกระแสไฟฟ้า ระยะระหว่างขั้ว พื้นผิว และอัตราการไหล ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0.24 ถึง 1.59 และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนมีค่าอยู่ระหว่าง 16.9 ถึง 74.9 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 69 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลน้ำเสีย 21.11 มิลลิลิตรต่อนาที เวลาทำปฏิกิริยา 45 นาที ค่าพลังงานไฟฟ้า 2,961.17 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงสุดมากกว่าร้อยละ 99

Zaroual และคณะ (2009) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไตรวาเลนซ์โครเมียมเพื่อใช้ออกแบบการทดลองการตกตะกอนร่วมด้วยไฟฟ้า ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พารามิเตอร์ที่ศึกษา ได้แก่ ค่าพีเอช ศักย์ไฟฟ้า เวลา และอุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อการตกตะกอนร่วมของไตรวาเลนซ์โครเมียมได้ทำแบบจำลองขึ้นมาเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองจากการวัดประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม การใช้พลังงานและการละลายของขั้วอะลูมิเนียมตามค่าพีเอช ศักย์ไฟฟ้า เวลา และอุณหภูมิ จากผลการทดลองสามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าพีเอช 4.32 ศักย์ไฟฟ้า 9.14 โวลต์ เวลา 10 นาที และอุณหภูมิ 27.5 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมร้อยละ 91 จะใช้พลังงาน 3.536 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

พิชิต ลีกุล (2553) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยกระบวนการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้าโดยควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง น้ำเสียมีสังกะสีปนเปื้อน 1.55 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 1.7 และค่าความนำไฟฟ้า 33.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่า ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสีด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบควบคุมความหนาแน่นกระแส คือ เหล็กกล้าไร้สนิมเป็นขั้วแคโทด และแกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด ซึ่งสามารถกำจัดสังกะสีได้ร้อยละ 98 ภายในเวลา 30 นาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 37.5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร โดยวิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าแบบนี้สามารถลดระยะเวลาในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียได้มาก พร้อมกับเพิ่มประสิทธิภาพเชิงกระแสของการกำจัด จากผลการทดลองสามารถกำจัดสังกะสีออกจากน้ำเสียจริงได้ร้อยละ 98 ภายในเวลา 50 นาที โดยคิดเป็นร้อยละ 100 ของประสิทธิภาพเชิงกระแส

Adhoum และคณะ (2004) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ มีทองแดง สังกะสี และโครเมียมเป็นองค์ประกอบ ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดง สังกะสี โครเมียมและค่าซีโอดี คือ 33, 41, 24 และ 302 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ทองแดงและสังกะสีถูกกำจัดอย่างรวดเร็วจนผ่านเกณฑ์หลังจาก 5 นาที โครเมียมจะถูกกำจัดช้ากว่า และถูกกำจัดจนถึง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจาก 20 นาที และค่าซีโอดีลดลงจนเหลือ 110 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจาก 25 นาที จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักและสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำ

Akbal และ Camci (2011) ศึกษาการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะโดยวิธีการตกตะกอนร่วมด้วยเคมีไฟฟ้า จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์ ใช้เหล็กและอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ค่าพีเอช และค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น สามารถกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลได้ร้อยละ 100 ที่เวลา 20 นาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พีเอชเท่ากับ 3 ใช้พลังงาน 10.07 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร

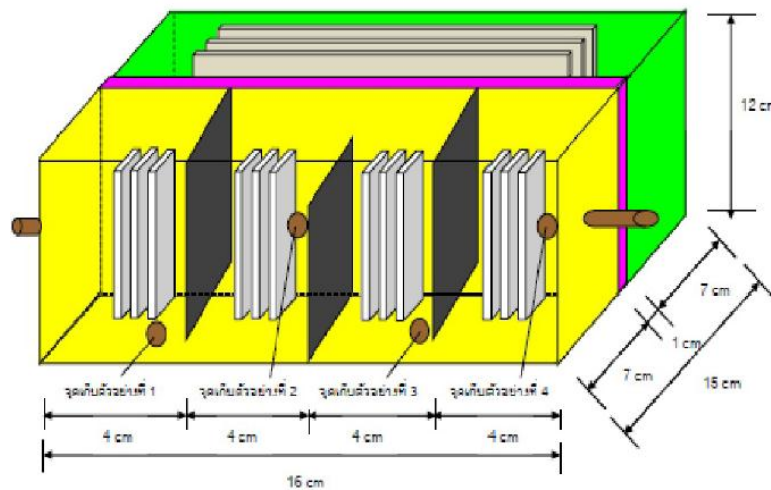
Khattab และคณะ (2014) ศึกษาประเภทของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 2 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ และโซเดียมซัลเฟต ในการกำจัดโครเมียม สารอิเล็กโทรไลต์ทั้ง 2 ชนิด มีความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เติกระบบในสถานะเดียวกัน ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม 300 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 0.81 มิลลิลิตรต่อนาที ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 500 แอมแปร์ต่อตารางเมตร หลังจากเดินระบบ 30 นาที โครเมียมลดลงจนถึง 134.2 และ 221 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซัลเฟต ตามลำดับ จากผลการทดลองการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์จะสามารถกำจัดโครเมียมได้ดีกว่าการใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซัลเฟต

Al-Shannag และคณะ (2015) ศึกษาการกำจัดทองแดง โครเมียม นิกเกิล และสังกะสีจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะ ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า เมื่อเดินระบบด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 45 นาที ใช้พลังงาน 6.25 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อลูกบาศก์เมตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมากกว่าร้อยละ 97 จากผลการทดลองพบว่าวิธีการตกตะกอนด้วยเคมีไฟฟ้า เมื่อเพิ่มเวลา และการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก และเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานในการกำจัดน้อย

งานวิจัยก่อนหน้า

มณีวัลย์ เนตรรังสี (2555) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์โดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง ใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้นเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดและขั้วแอโนด รูปแบบดังปฏิกิริยาแสดงดังภาพที่ 2.16 แบ่งการทดลองเป็น 2 ส่วน คือ การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างที่ดีที่สุดในการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิล ใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ปรับอัตราการไหลของน้ำตัวอย่างเป็น 8.3,

5.6 และ 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิล ใช้อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่าง 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที ปรับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 4.63, 7.72 และ 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ผลการทดลองส่วนที่ 1 อัตราการไหล 2.8 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิลได้ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ในเวลา 60, 90 และ 90 นาที ตามลำดับ แต่เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 และ 8.3 มิลลิลิตรต่อนาที ไม่สามารถกำจัดทองแดงโครเมียมและนิกเกิลให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม ได้ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 1 ผลการทดลองส่วนที่ 2 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 15.43 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดทองแดง โครเมียม และนิกเกิลได้ตั้งแต่จุดเก็บตัวอย่างที่ 2 ในเวลา 25 นาที



ภาพที่ 2.16 ถึงปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลายโดยกันสารละลายฟุ้งแคโทดและแอโนด ด้วยแผ่นแก้วรูพรุน (มณีวัลย์ เนตรรังสี, 2555)

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาคู่ต่อจากงานวิจัยของมณีวัลย์ เนตรรังสี (2555) ทำการศึกษา 3 เรื่อง ได้แก่

1. รูปแบบถังปฏิกริยา การกั้นถังปฏิกริยาที่แตกต่างกันจะทำให้มีลักษณะการเคลื่อนที่แตกต่างกัน รูปแบบถังปฏิกริยามี 2 รูปแบบ คือ

1) ถังปฏิกริยาแบบกั้นบน-ล่าง ถังปฏิกริยาแบบนี้จะเหมือนกับถังปฏิกริยาในงานวิจัยของมณีวัลย์ มีทิศทางการเคลื่อนที่ของน้ำในแนวดิ่งหรือน้ำจะมีการไหลขึ้นและลงสลับกัน

2) ถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา มีการเคลื่อนที่ของน้ำในแนวราบ

2. สารละลายอิเล็กทรไลต์ มี 3 ชนิด ได้แก่

1) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

2) น้ำประปา

3) น้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพ์

3. การให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่องไม่เท่ากัน การเพิ่มหรือลดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่องสามารถช่วยประหยัดพลังงานและค่าไฟฟ้าได้

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัย	น้ำ ตัวอย่าง	โลหะหนัก (มก./ล.)	ขั้วแอโนด	ขั้วแคโทด	ความ หนาแน่น กระแส ไฟฟ้า	เวลา (นาที)
มะลิ หุ่่นสม 2544	น้ำเสีย โรงงานชุบ โลหะ	Cu ²⁺ 283 Cr ⁶⁺ 220 Ni ²⁺ 128	แพลทินัม	เหล็กกล้า ไร้สนิม	Cu ²⁺ 10 A/m ² Cr ⁶⁺ 90 A/m ² Ni ²⁺ 90 A/m ²	Cr ²⁺ 300 Cr ⁶⁺ 780 Ni ²⁺ 780
ศรายุท ลาภพูนผล 2549	น้ำเสีย สังเคราะห์	Cr ⁶⁺ 20	เหล็ก	เหล็ก	69 A/m ²	120
Zaroual และคณะ 2009	น้ำเสีย สังเคราะห์	Cr ⁶⁺ 200	อะลูมิเนียม	อะลูมิเนียม	ศักย์ไฟฟ้า 9.14 V.	10
พิชิต สีกฤ 2553	น้ำเสีย โรงงาน อุตสาหกรรม	Zn ²⁺ 1.55	แกรไฟต์	เหล็กกล้า ไร้สนิม	37.5 A/m ²	30
Adhoum และคณะ 2004	น้ำเสีย โรงงานชุบ โลหะ	Cu ²⁺ 33 Zn ²⁺ 41 Cr ⁶⁺ 24	อะลูมิเนียม	อะลูมิเนียม	4.8 A/dm ²	Cu ²⁺ 5 Zn ²⁺ 5 Cr ⁶⁺ 20
Akbal และ Camci, 2011	น้ำเสีย โรงงานชุบ โลหะ	Cu ²⁺ 45 Ni ²⁺ 394 Cr ⁶⁺ 44.4	เหล็กกล้า ไร้สนิม	อะลูมิเนียม	Cu ²⁺ 100 A/m ² Ni ²⁺ 100 A/m ² Cr ⁶⁺ 100 A/m ²	20

ตารางที่ 2.2 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

งานวิจัย	น้ำ ตัวอย่าง	โลหะหนัก (มก./ล.)	ขั้วแอโนด	ขั้วแคโทด	ความหนาแน่น กระแส ไฟฟ้า	เวลา (นาที)
Khattab และคณะ 2014	น้ำเสีย โรงงานชุบ โลหะ	Cr ³⁺ 300	เหล็กกล้า ไร้สนิม	เหล็กกล้า ไร้สนิม	500 A/m ²	30
Al- Shannag และคณะ 2015	น้ำเสีย โรงงานชุบ โลหะ	Cu ²⁺ 33.3 Ni ²⁺ 57.6 Cr ³⁺ 93.2 Zn ²⁺ 20.4	แกรไฟต์	แกรไฟต์	4 mA/cm ²	45
มณีวัลย์ เนตรรังสี 2555	น้ำเสีย โรงงาน ผลิตแท่น พิมพ์	Cu ²⁺ 248 Ni ²⁺ 14 Cr ³⁺ 161	แกรไฟต์	แกรไฟต์	15.43 A/m ²	Cu ²⁺ 60 Ni ²⁺ 90 Cr ³⁺ 90

บทที่ 3

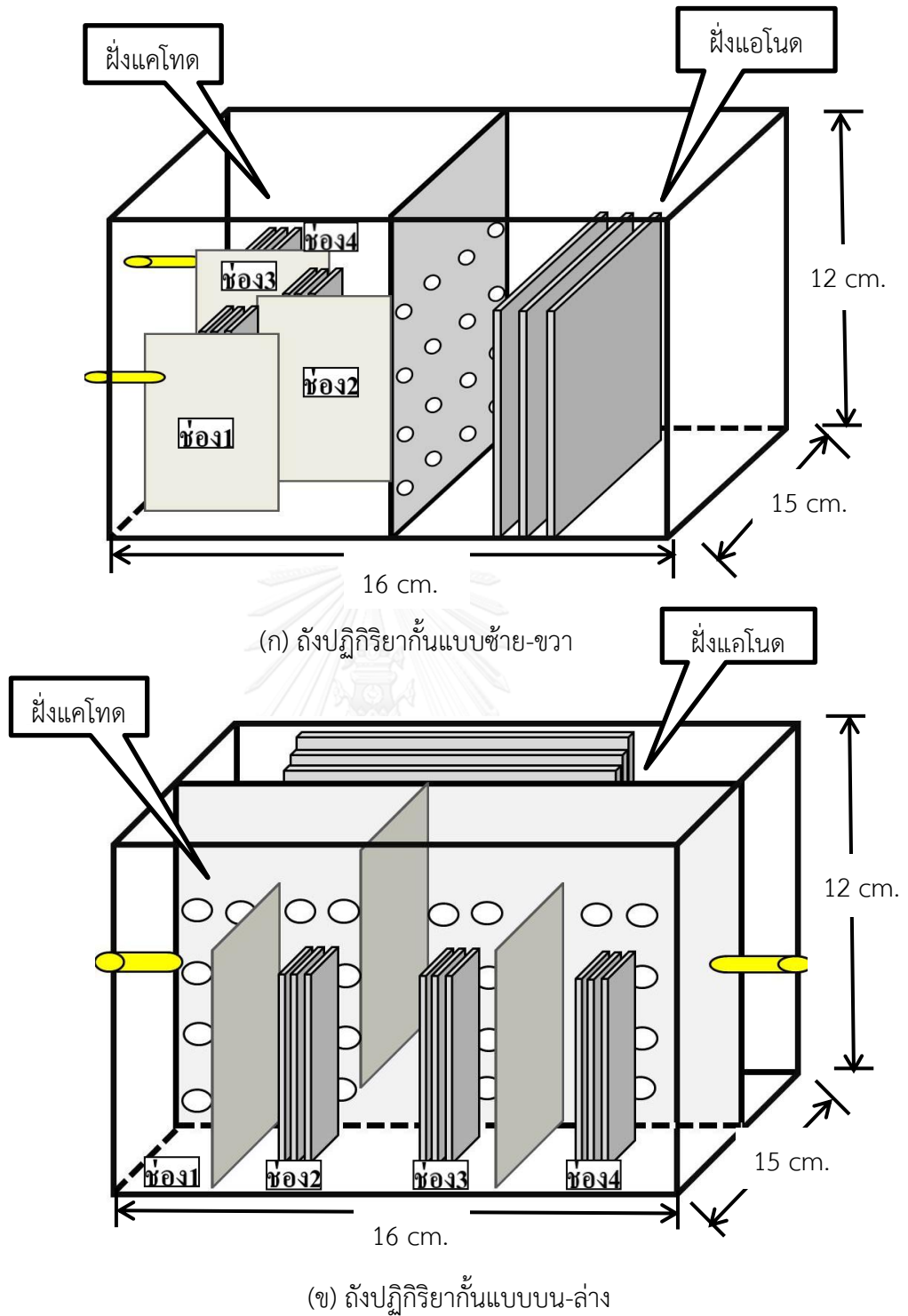
วิธีการดำเนินการวิจัย

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

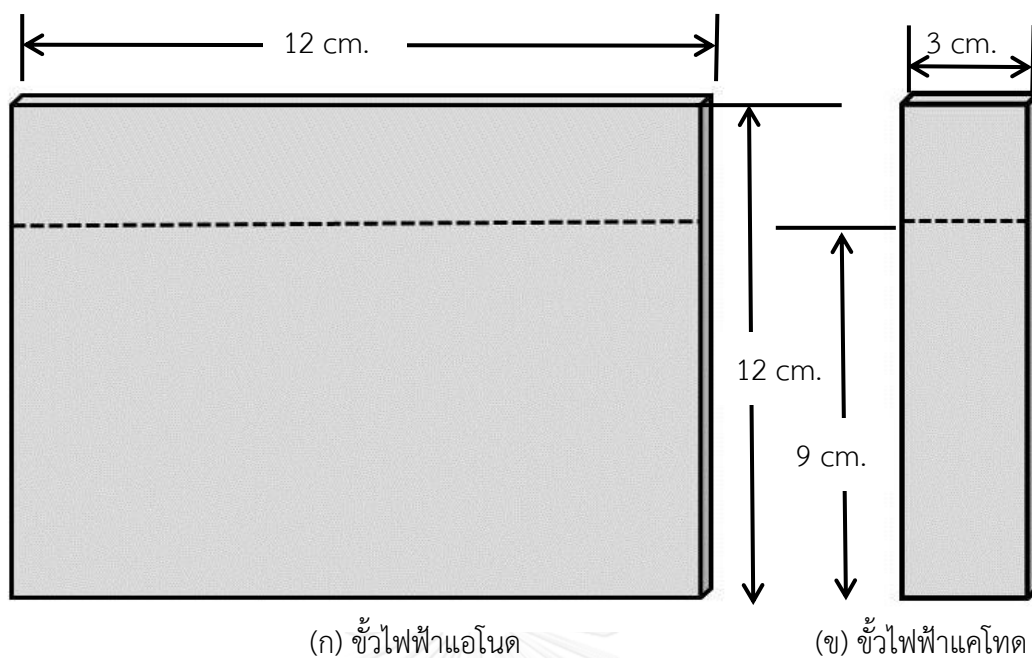
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถังปฏิกริยาทำจากอะคริลิกขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 15 x 16 x 12 ลูกบาศก์เซนติเมตร 2 ถังและมีพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell Volume Ratio; AV) ฝั่งแคโทดเท่ากับ 48.6 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร แสดงดังภาพที่ 3.1
2. ถังเก็บน้ำเสีย
3. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) : GW Instek GPR-30H100 Laboratory DC Power Supply
4. เครื่องมือวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) : GBC : Avanta GM 11
5. เครื่องวัดพีเอช (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) : Whatman เบอร์ 4
9. เครื่องแก้ว
10. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำด้วยแกรไฟต์ แสดงดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.1 ถังปฏิกริยาแบบมีรอยต่อสารละลายกันฝั้งแอโนดและแคโทดด้วยแผ่นแก้วรูพรุน



(ก) ขั้วไฟฟ้าแอนโนด

(ข) ขั้วไฟฟ้าแคโทด

ภาพที่ 3.2 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 สารเคมี

1. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium Chloride, NaCl)
2. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO₃)
3. น้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water, DI water)
4. สารละลายมาตรฐานโครเมียม 1000 mg/L
5. สารละลายมาตรฐานทองแดง 1000 mg/L

3.1.3 การเตรียมน้ำเสียและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการทดลอง

1. น้ำเสียเก็บจากน้ำทิ้งกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตแท่นพิมพ์ โดยเก็บใส่ถังพลาสติกสีดำ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 3.1
2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ 29.25 กรัม ละลายในน้ำจืดมีปริมาตร 1 ลิตร

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์ที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย
พีเอช	3.48	-
โครเมียม	243.30	mg/L
ทองแดง	260.70	mg/L
ซัลเฟต	1,745	mg/L
ไนเตรท	12	mg/L
ของแข็งละลายทั้งหมด	2,735	mg/L
ซีไอดี	119	mg/L

3.1.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

1. เตรียมสารละลายกรด 1% HNO_3

1.1 เตรียมน้ำกลั่นปราศจากไอออน (Deionized water, DI water)

ปริมาณ 800 มิลลิลิตร ใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร

1.2 นำกรดไนตริกเข้มข้น 65% (ในตู้ดูดควัน) ปริมาตร 15.40 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตร

1.3 เติมน้ำกลั่นปราศจากไอออนจนมีปริมาตรสุดท้าย 1000 มิลลิลิตร

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (Working solution chromium)

2.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานโครเมียม 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution chromium) ปริมาตร 2.5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร

2.2 ปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรด 1% HNO_3 จนมีปริมาตรสุดท้าย 25 มิลลิลิตร

3. เตรียมสารละลายมาตรฐานโครเมียม (Standard solution)

3.1 ปิเปตสารละลายมาตรฐานโครเมียม (Working solution) 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามปริมาตรต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ด้วยไมโครปิเปตใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.2 สารละลายมาตรฐานโครเมียม

ขวดที่	สารละลายมาตรฐานโครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาตรของ Working solution chromium 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (มิลลิลิตร)
1	1	0.25
2	3	0.75
3	5	1.25
4	7	1.75
5	10	2.50

3.2 ปรับปริมาตรด้วยกรด 1%HNO₃ จนมีปริมาตรสุดท้าย 25 มิลลิลิตร

3.3 นำสารละลายมาตรฐานไปวัดค่า Absorbance โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrometer เพื่อสร้าง Calibration Curve

หมายเหตุ : สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโลหะทองแดง ให้เตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution) ด้วยวิธีเดียวกัน

3.1.5 การหาขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) และการหาขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

LOD หมายถึง ค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่วิธีทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้

LOQ หมายถึง ค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดที่วิธีทดสอบสามารถวิเคราะห์ได้ในตัวอย่าง

เตรียมสารละลาย Sample blank 10 ซ้ำ อ่านค่าความเข้มข้นของโครเมียมและทองแดง คำนวณค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

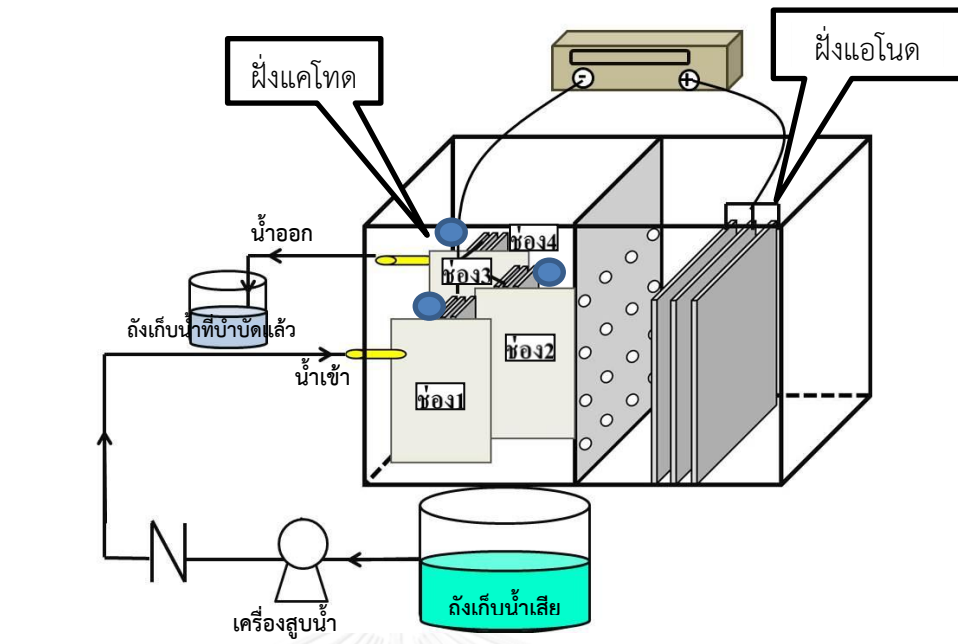
คำนวณค่า $LOD = \text{mean simple blank} + 3SD$

$LOQ = \text{mean simple blank} + 10SD$

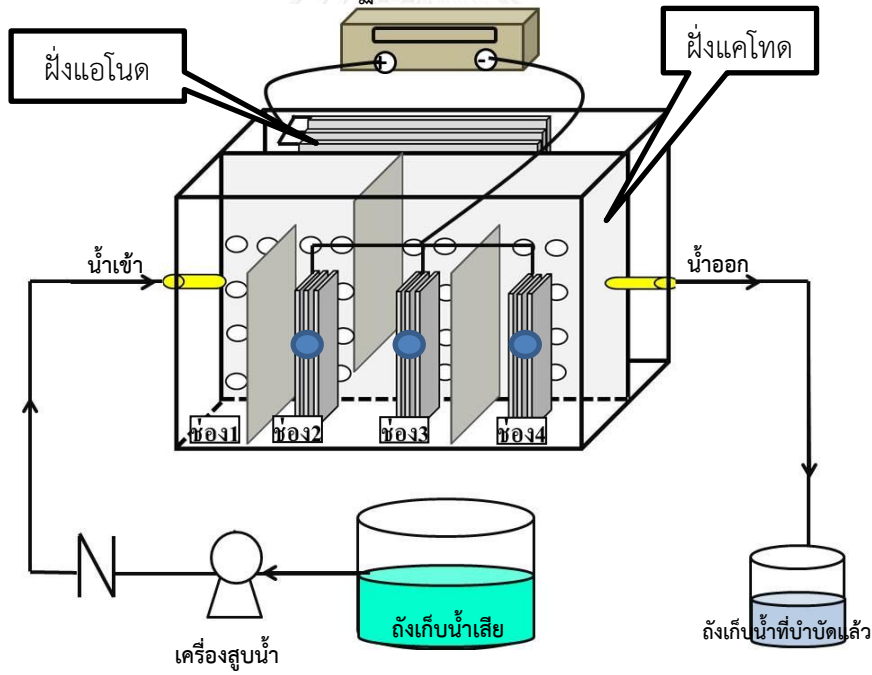
3.2 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

การกำจัดโครเมียมและทองแดงอย่างต่อเนื่องจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินพีโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า การทดลองนี้มีการจัดตั้งปฏิกิริยาแบบมีรอยต่อของสารละลาย โดย

1. ถังปฏิกิริยาทำจากอะคริลิกขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 15 x 16 x 12 ลูกบาศก์เซนติเมตร แสดงดังภาพที่ 3.1
2. ถังปฏิกิริยา แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ฝั่งแคโทด บรรจุน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร และฝั่งแอโนด บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ปริมาตร 1 ลิตร
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าโมโนโพลาร์แบบขนาน โดยฝั่งแอโนดใช้แกรไฟต์ ขนาด 12 x 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น และฝั่งแคโทดใช้แกรไฟต์ ขนาด 3 x 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 9 แผ่น ต่อเข้ากับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ฝั่งแอโนดต่อเข้ากับขั้วบวก และฝั่งแคโทดต่อเข้ากับขั้วลบ
4. ฝั่งแคโทด แบ่งเป็น 4 ช่อง กั้นด้วยแผ่นอะคริลิก แต่ละช่องยาว 4 เซนติเมตร เนื่องจากปั๊มที่ใช้งานควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบเกิดขึ้นไม่ราบเรียบคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นช่องแรกจะเป็นช่องว่างเพื่อให้ น้ำเสียเข้า ส่วนช่อง 2, 3 และ 4 บรรจุขั้วแคโทดขนาด 3 x 9 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น
5. ต่อเครื่องสูบน้ำกับถังเก็บน้ำเสีย ดังภาพที่ 3.3
6. เก็บตัวอย่างน้ำที่ช่อง 2, 3 และ 4



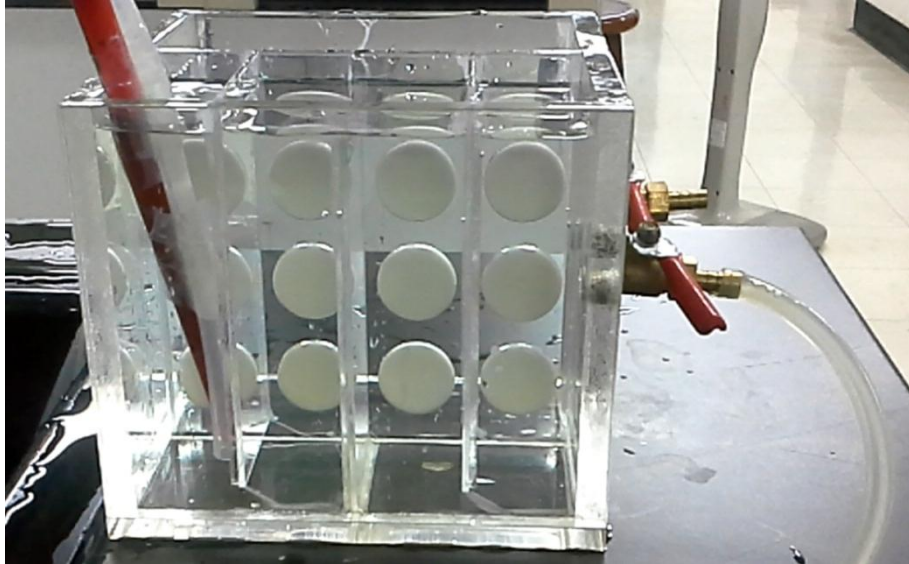
(ก) ถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา



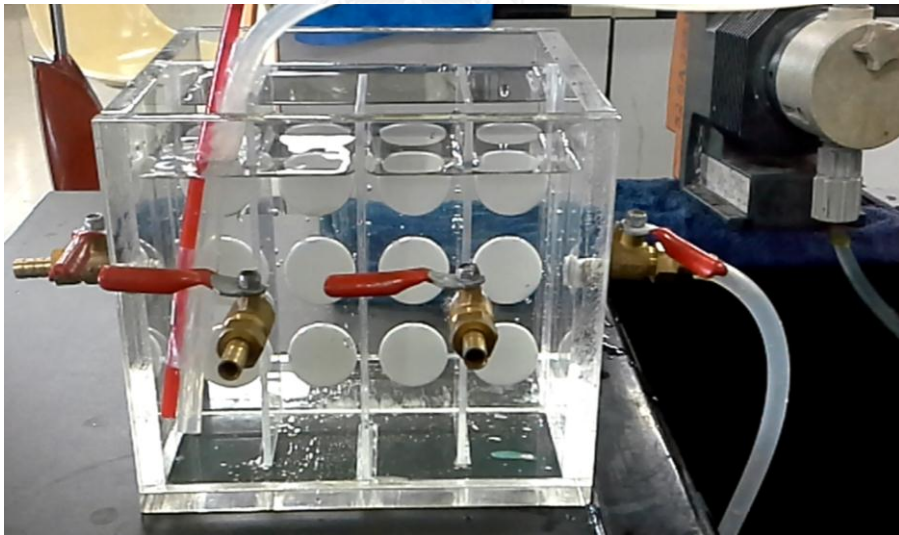
(ข) ถังปฏิกรณ์แบบกั้นบน-ล่าง

● จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

ภาพที่ 3.3 การจัดอุปกรณ์การทดลองโดยวิธีทางเคมีไฟฟ้า



(ก) ถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา



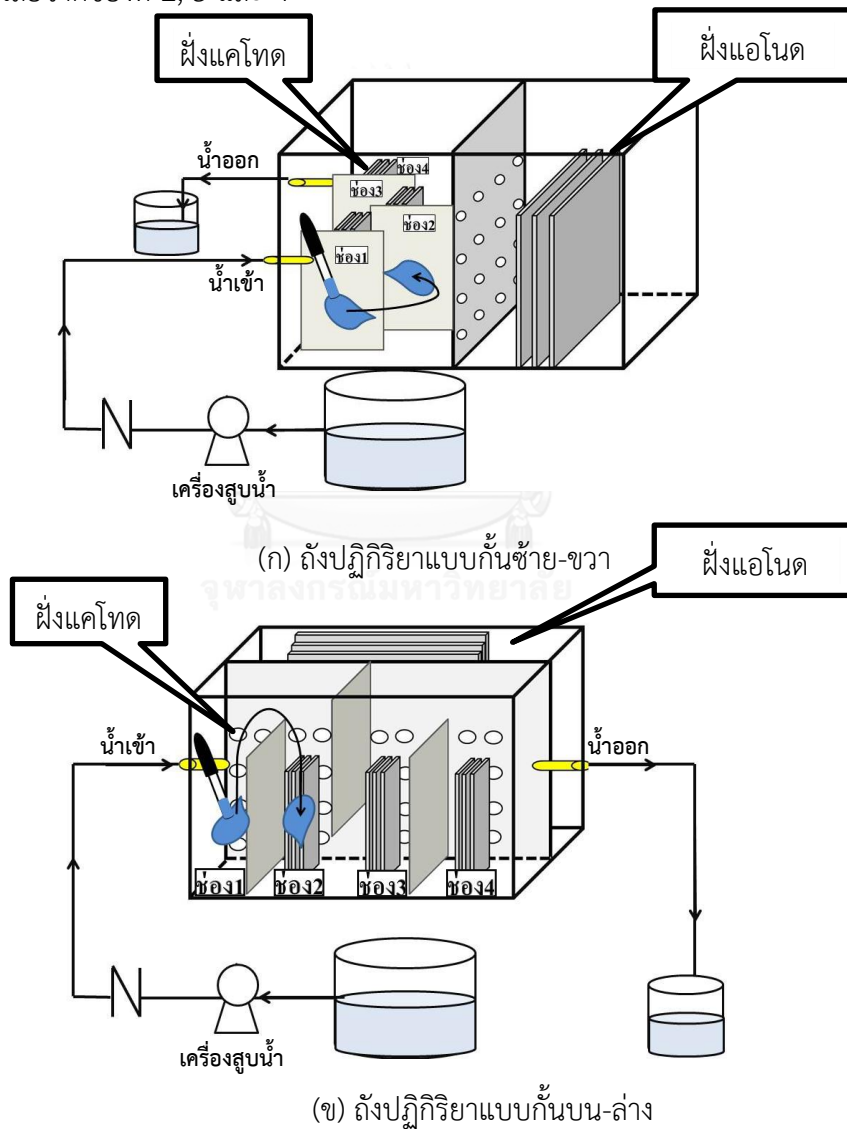
(ข) ถังปฏิกรณ์แบบกั้นบน-ล่าง

ภาพที่ 3.4 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3 การดำเนินการวิจัย

3.3.1 ศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำมวลหนึ่งที่เคลื่อน ณ เวลาต่างๆ

ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำที่เคลื่อนที่ผ่านช่องที่ 1, 2, 3 และ 4 โดยให้น้ำมีอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อวินาที แล้วทำการหยุดสปีดลงในน้ำและจับเวลาเพื่อติดตามผลการเคลื่อนที่ของมวลน้ำ ว่าใช้เวลานานเท่าไรในการเคลื่อนที่ไปในแต่ละช่อง แสดงดังภาพที่ 3.4 โดยนำผลที่ได้จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำมาใช้ในการแสดงผลการทดลองว่าในช่วงเวลาไหนเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากช่องที่ 2, 3 และ 4



ภาพที่ 3.5 ศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำที่เคลื่อน ณ เวลาต่างๆ

ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมและทองแดงแบบไหลต่อเนื่องโดยวิธีการทางเคมีไฟฟ้า แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ

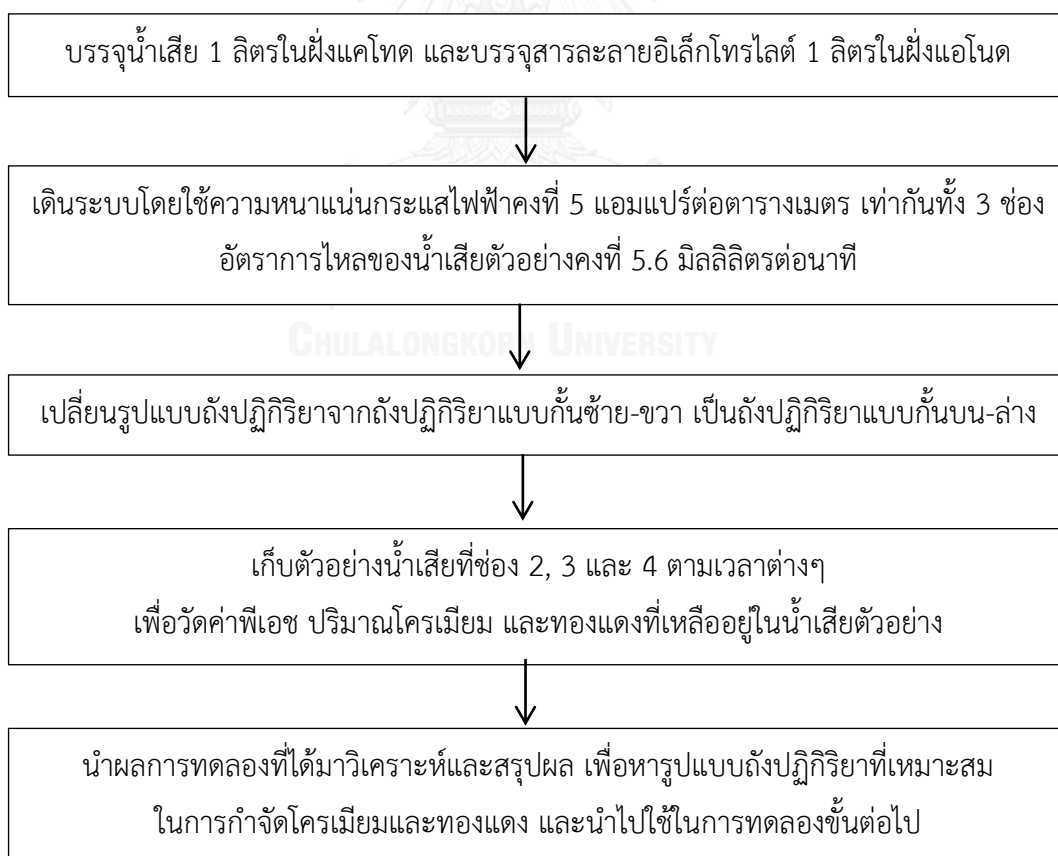
3.3.2 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง

ศึกษารูปแบบถังปฏิกิริยา 2 แบบ แสดงดังภาพที่ 3.1

1. บรรจุน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร ในฝั่งแคโทด
2. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เตรียมจากโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ในฝั่งแอโนด
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโพลาร์หลายเซลล์ต่อขนาน ในแต่ละครึ่งเซลล์ แสดงดังภาพที่ 3.3
4. เดินระบบใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากัน ทั้ง 3 ช่อง ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)
5. ปรับอัตราไหลของน้ำเสียตัวอย่างคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ช่อง 2, 3 และ 4 ตามเวลาต่างๆ เพื่อนำไปวัดค่าพีเอช ปริมาณโครเมียม และทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง
7. ทำการทดลองข้อ 1-6 ซ้ำอีก 3 ครั้ง
8. ทำการทดลองข้อ 1-7 ซ้ำโดยเปลี่ยนรูปแบบถังปฏิกิริยาจากถังปฏิกิริยาแบบก้นซ้าย-ขวา เป็นถังปฏิกิริยาแบบก้นบน-ล่าง
9. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อหารูปแบบถังปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงจากน้ำเสียตัวอย่าง

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 1

การทดลอง	ศึกษารูปแบบถังปฏิกริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง
ตัวแปรอิสระ	1. รูปแบบถังปฏิกริยา มี 2 แบบ คือ 1) ถังปฏิกริยาแบบก้นซ้าย-ขวา 2) ถังปฏิกริยาแบบก้นบน-ล่าง
ตัวแปรควบคุม	1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง 2. ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดและขั้วแอโนด 3. ปริมาณน้ำเสีย 1 ลิตร 4. อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที 5. ใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสีย 2. ปริมาณทองแดงที่เหลือในน้ำเสีย 3. ค่าพีเอช



ภาพที่ 3.6 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษารูปแบบถังปฏิกริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง

3.3.3 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง

ศึกษาสารอิเล็กโทรไลต์ 3 ชนิด คือ

- 1) โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร
- 2) น้ำประปา
- 3) น้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนพิมพ์

1. บรรจุน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร ในฝั่งแคโทด
2. บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร ในฝั่งแอโนด
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโพลาร์หลายเซลล์ต่อขนาน ในแต่ละครึ่งเซลล์ แสดงดังภาพที่ 3.3

4. เดินระบบด้วยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากัน ทั้ง 3 ช่อง ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply)
5. ปรับอัตราไหลของน้ำเสียตัวอย่างคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที
6. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ช่อง 2, 3 และ 4 ตามเวลาต่างๆ เพื่อนำไปวัดค่าพีเอช ปริมาณโครเมียม และทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง
7. ทำการทดลองข้อ 1-6 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
8. ทำการทดลองข้อ 1-7 ซ้ำโดยเปลี่ยนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็น น้ำประปา และน้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนพิมพ์ ตามลำดับ
9. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อหาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงจากน้ำเสียตัวอย่าง

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 2

การทดลอง	ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง
ตัวแปรอิสระ	1. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ 3 ชนิด คือ 1) โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร 2) น้ำประปา 3) น้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนนิน
ตัวแปรควบคุม	1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง 2. ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดและขั้วแอโนด 3. ปริมาณน้ำเสีย 1 ลิตร 4. อัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสีย 2. ปริมาณทองแดงที่เหลือในน้ำเสีย 3. ค่าพีเอช

บรรจุน้ำเสีย 1 ลิตรในฝั่งแคโทด และบรรจุสารอิเล็กโทรไลต์ 1 ลิตรในฝั่งแอโนด



เดินระบบโดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่างคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที



เปลี่ยนสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็น โซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร น้ำประปา และน้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนนิน ตามลำดับ



เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ช่อง 2, 3 และ 4 ตามเวลาต่างๆ เพื่อวัดค่าพีเอช ปริมาณโครเมียม และทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง



นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง และนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ภาพที่ 3.7 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง

3.3.4 การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง

ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าโดยให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่องไม่เท่ากัน

1. บรรจุน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร ในฝั่งแคโทด
2. บรรจุน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร ในฝั่งแคโทด
3. จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์ต่อขนาน ในแต่ละครึ่งเซลล์ แสดงดัง

ภาพที่ 3.3

4. ปรับอัตราไหลของน้ำเสียตัวอย่างคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที
5. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ช่อง 2, 3 และ 4 ตามเวลาต่างๆ เพื่อนำไปวัดค่าพีเอช ปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง
6. ทำการทดลองข้อ 1-6 ซ้ำอีก 2 ครั้ง
7. ทำการทดลองข้อ 1-7 ซ้ำโดยการเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่อง ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ด้วยเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางที่ 1 งดจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 4 พร้อมกับคงและปรับเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 2 เป็น 5, 7 และ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เรียกการทดลองดังกล่าวว่าชุด CD-550, CD-750 และ CD-1050 แนวทางที่ 2 คงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 4 เป็น 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พร้อมปรับเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 2 เป็น 7 และ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เรียกการทดลองดังกล่าวว่าชุด CD-755 และ CD-1055 นำผลการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่างทั้ง 2 แนวทางมาเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ให้ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง เรียกการทดลองดังกล่าวว่า ชุด CD-555 ซึ่งเป็นชุดอ้างอิง

ตารางที่ 3.5 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ให้ในแต่ละช่อง

การทดลองชุด	ช่อง 1	ช่อง 2	ช่อง 3	ช่อง 4
CD-555	0	5	5	5
CD-550	0	5	5	0
CD-750	0	7	5	0
CD-1050	0	10	5	0
CD-755	0	7	5	5
CD-1055	0	10	5	5

8. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อหาชุดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงจากน้ำเสียตัวอย่าง



ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองส่วนที่ 3

การทดลอง	ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง
ตัวแปรอิสระ	1. ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่อง ดังแสดงในตารางที่ 3.5
ตัวแปรควบคุม	1. ใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแคโทดและขั้วแอโนด 2. ปริมาณน้ำเสีย 1 ลิตร 3. อัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที 4. ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 1 ลิตรจากการทดลองส่วนที่ 2
ตัวแปรตาม	1. ปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสีย 2. ปริมาณทองแดงที่เหลือในน้ำเสีย 3. ค่าพีเอช

บรรจุน้ำเสีย 1 ลิตรในฝั่งแคโทด และบรรจุสารอิเล็กโทรไลต์ 1 ลิตรในฝั่งแอโนด



เดินระบบโดยใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง อัตราการไหลของน้ำเสียตัวอย่างคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที



เปลี่ยนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่อง ดังแสดงในตารางที่ 3.5



เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ช่อง 2, 3 และ 4 ตามเวลาต่างๆ เพื่อวัดค่าพีเอช ปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง



นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และสรุปผล เพื่อหาชุดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง และนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

ภาพที่ 3.8 การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง

3.4 วิธีการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์

วิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของการทำวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณโครเมียม และ ปริมาณทองแดง

ตารางที่ 3.7 วิธีมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจวัด

พารามิเตอร์	วิธีการตรวจวัดค่า
ค่าพีเอช	pH Meter
ปริมาณโครเมียม	AAS
ปริมาณทองแดง	AAS



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดโครเมียมและทองแดง ออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์แบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ทำการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการเคมีปริมาณวิเคราะห์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานผลิตแท่นพิมพ์ โดยการติดตามมวลน้ำหนึ่งๆ ที่เคลื่อนที่ผ่านช่องบำบัดด้วยอัตราการไหลคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน คือ 1) ศึกษารูปแบบถึงปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง 2) ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง และ 3) ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดง จากนั้นทำการวิเคราะห์การกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่าง และประเมินค่าใช้จ่ายในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่าง

4.1 การหาขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) และการหาขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

ผลการทดสอบขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) ของโครเมียมและทองแดง เท่ากับ 0.004 และ 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และการหาขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ของโครเมียมและทองแดง เท่ากับ 0.011 และ 0.012 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.2 ศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลน้ำมวลหนึ่งที่เคลื่อน ณ เวลาต่างๆ

ภาพที่ 4.1 แสดงผลการติดตามการเคลื่อนที่ของมวลน้ำของถึงปฏิกิริยาทั้ง 2 รูปแบบ มวลน้ำใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปในแต่ละช่อง 15 นาที ดังนั้นจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าที่อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที ในช่วงเวลา 0-15 นาทีเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากช่องที่ 2 ช่วงเวลา 20-30 นาทีเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากช่องที่ 3 และช่วงเวลา 35-45 นาทีเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากช่องที่ 4



(ก) ถังปฏิบัติการแบบก้นซ้าย-ขวา



(ข) ถังปฏิบัติการแบบก้นบน-ล่าง

ภาพที่ 4.1 การเคลื่อนที่ของมวลน้ำมวลหนึ่ง ณ เวลาต่างๆ

4.3 การทดลองส่วนที่ 1 ศึกษาแบบถังปฏิบัติการที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์

ถังปฏิบัติการที่ใช้ในการศึกษานี้มี 2 รูปแบบ คือ 1) ถังปฏิบัติการแบบก้นซ้าย-ขวา และ 2) ถังปฏิบัติการแบบก้นบน-ล่าง ติดตามการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์ โดยวัดโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ เก็บตัวอย่างน้ำเสีย 3 จุด คือ จุดเก็บตัวอย่างช่องที่ 2, 3 และ 4 ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.2

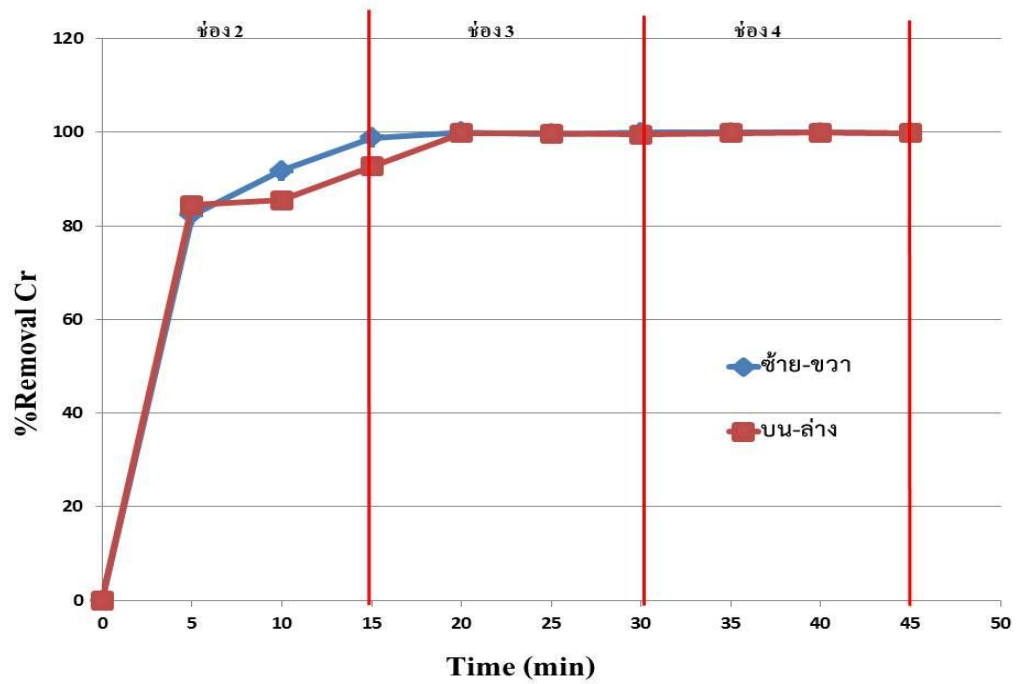
ภาพที่ 4.2 (ก) แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการกำจัดแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยติดตามการเคลื่อนที่ของมวลน้ำหนึ่งๆ ณ ช่วงเวลาต่างๆ พบว่า ถังปฏิบัติการแบบก้นซ้าย-ขวาสามารถกำจัดโครเมียมในน้ำเสียตัวอย่างให้มีค่าลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่อนุญาตให้ความเข้มข้นของโครเมียมมีได้ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัด 99.99 ภายใน 20 นาที ปริมาณโครเมียมที่เหลือในน้ำเสียตัวอย่างเพียง 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร และถังปฏิบัติการแบบก้นบน-ล่างไม่สามารถกำจัดโครเมียมให้มีค่าลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้

ภาพที่ 4.2 (ข) แสดงร้อยละการกำจัดทองแดงในน้ำเสียตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการกำจัดแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยติดตามการเคลื่อนที่ของมวลน้ำหนึ่งๆ ณ ช่วงเวลาต่างๆ พบว่า ถังปฏิบัติการแบบก้นซ้าย-ขวา และถังปฏิบัติการแบบก้นบน-ล่าง สามารถกำจัดทองแดงในน้ำเสียตัวอย่างให้มีค่าลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่อนุญาตให้ความเข้มข้น

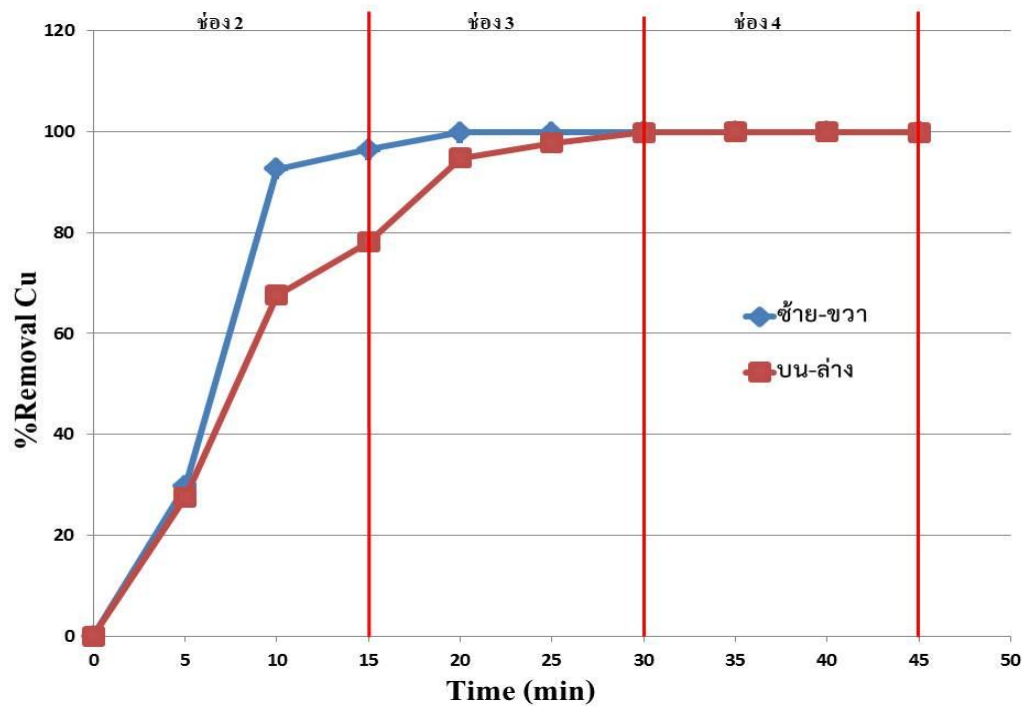
ของทองแดงมีได้ไม่เกิน 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัด 99.96 และ 99.92 ภายในเวลา 30 และ 35 นาที ปริมาณทองแดงที่เหลือในน้ำเสียตัวอย่างเพียง 0.10 และ 0.21 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นได้ว่าถึงปฏิบัติการแบบกั้นซ้าย-ขวาสามารถกำจัดทั้งโลหะโครเมียมและทองแดงให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ภายในช่องที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ส่วนถึงปฏิบัติการแบบกั้นบน-ล่างสามารถกำจัดทองแดงให้ผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ภายในช่องที่ 3 แต่ไม่สามารถกำจัดโครเมียมให้ลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ รูปแบบการกั้นถึงปฏิบัติการที่แตกต่างกันมีผลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของน้ำ โดยถึงปฏิบัติการแบบกั้นซ้าย-ขวาจะมีทิศทางการไหลของน้ำในแนวราบ (Horizontal) น้ำมีการกระจายและผสมกันอย่างทั่วถึงภายในถึงปฏิบัติการทำให้น้ำไหลผ่านได้ง่ายซึ่งจะทำให้ น้ำมีการเคลื่อนที่ได้ดี ส่วนถึงปฏิบัติการแบบกั้นบน-ล่างที่มีทิศทางการไหลของน้ำในแนวตั้ง (Vertical) ซึ่งน้ำจะวิ่งขึ้นบนลงล่างทำให้มีแรงต้านทานในการเคลื่อนที่ของน้ำ (Head loss) ระดับน้ำในแต่ละช่องจะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการเคลื่อนที่จากบนลงล่างจะไหลได้ดีกว่าการไหลของน้ำจากล่างขึ้นบนซึ่งในบางครั้งอาจจะเกิดพื้นที่ตาย (Dead zone) ทำให้เกิดการไหลลัดวงจรของน้ำเสีย (Short circuit) ทำให้การกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่างเกิดขึ้นได้ไม่ดีเท่าที่ควร (Kawamura, 2000) ดังนั้น ในการทดลองส่วนที่ 1 นี้จึงเลือกรูปแบบถึงปฏิบัติการแบบกั้นซ้าย-ขวาเพื่อนำมาใช้สำหรับการทดลองในขั้นต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่าง ภาพที่ 4.3 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดียวกัน โดยภาพรวมแล้วร้อยละการกำจัดของโครเมียมจะมีค่ามากกว่าค่าร้อยละการกำจัดของทองแดง แสดงว่าโครเมียมจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียตัวอย่างก่อนทองแดง โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของโครเมียม, $E^0 = 1.33$ โวลต์ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าศักย์รีดักชันมาตรฐานของทองแดง, $E^0 = 0.34$ โวลต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าโครเมียมมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดได้ดีกว่าทองแดง ปฏิบัติการกำจัดโครเมียมด้วยเคมีไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นได้รวดเร็วกว่าการกำจัดทองแดงด้วยเคมีไฟฟ้า

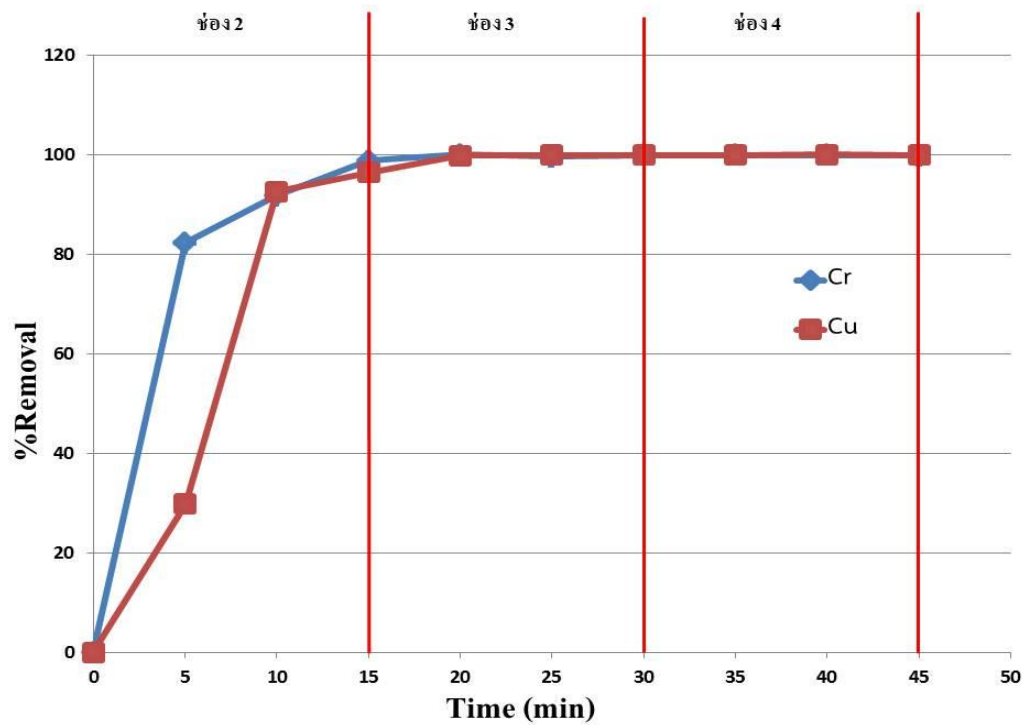


(ก) ร้อยละการกำจัดโครเมียม



(ข) ร้อยละการกำจัดทองแดง

ภาพที่ 4.2 ร้อยละการกำจัด (ก) โครเมียมและ (ข) ทองแดง เมื่อเดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง



ภาพที่ 4.3 ร้อยละการกำจัดโครเมียมและทองแดง เมื่อใช้ถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เตินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตรเท่ากันทั้ง 3 ช่อง

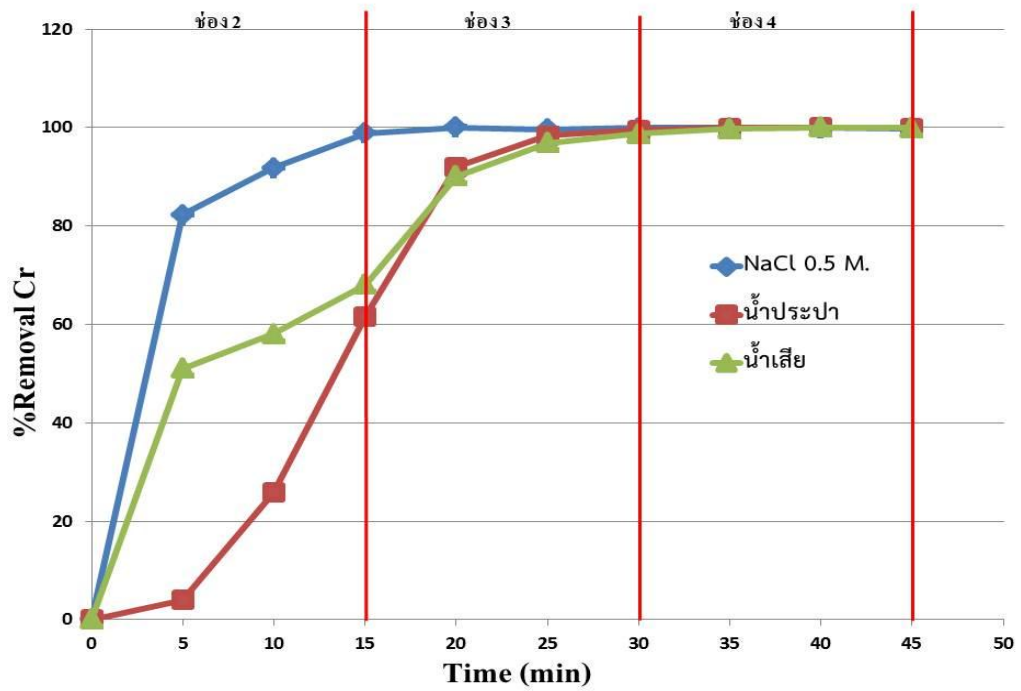
4.4 การทดลองส่วนที่ 2 ศึกษาชนิดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนิน

ศึกษาสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด 3 ชนิด คือ 1) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร 2) น้ำประปา และ 3) น้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนนิน ที่มีผลต่อการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนิน โดยวัดโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ เมื่อใช้ถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เตินระบบด้วยอัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เก็บตัวอย่างน้ำเสีย 3 จุด คือ จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียช่องที่ 2, 3 และ 4 ผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 4.4 และค่าของแข็งละลายทั้งหมดของโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร น้ำประปา และน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนิน คือ 3,669, 88 และ 2,735 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

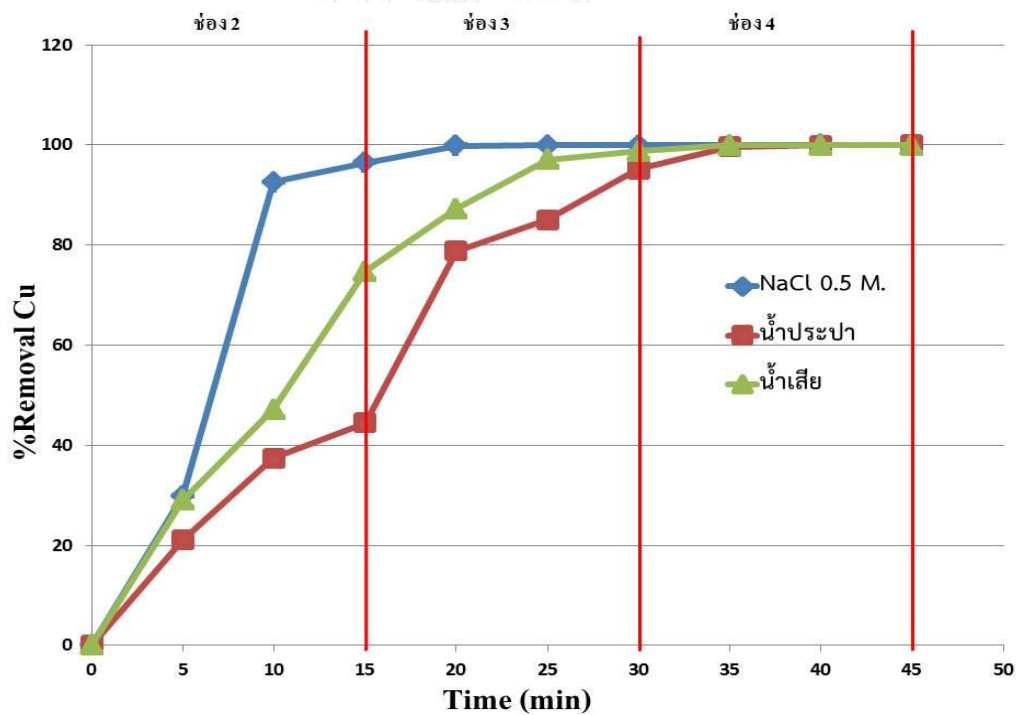
ภาพที่ 4.4 (ก) แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการกำจัดแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยติดตามการเคลื่อนที่ของมวลน้ำหนึ่งๆ ณ ช่วงเวลาต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าโครเมียมถูกกำจัดออกจากน้ำเสียตัวอย่างจนมีค่าลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัด คือ 99.99, 99.97 และ 99.98 ภายในเวลา 20, 35 และ 40 นาที เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร น้ำประปา และน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในฝั่งแอโนด ตามลำดับ

ภาพที่ 4.4 (ข) แสดงร้อยละการกำจัดทองแดงในน้ำเสียตัวอย่างหลังผ่านกระบวนการกำจัดแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยติดตามการเคลื่อนที่ของมวลน้ำหนึ่งๆ ณ ช่วงเวลาต่างๆ จากผลการทดลองพบว่าทองแดงถูกกำจัดออกจากน้ำเสียจนมีค่าลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมมีค่าไม่เกิน 2.00 มิลลิกรัมต่อลิตรภายในเวลา 20, 35 และ 35 นาที เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร น้ำประปา และน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์ ตามลำดับ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในฝั่งแอโนด

จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าโครเมียมและทองแดงถูกกำจัดออกจากน้ำเสียตัวอย่างได้เร็วที่สุดเมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในฝั่งแอโนด ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีและช่วยเพิ่มการนำกระแสไฟฟ้า (Ponce De Leon และ Pletcher, 1996) เมื่อมีปริมาณมาก (0.5 โมลต่อลิตร) ส่งผลให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าได้มาก เป็นผลให้ปฏิกิริยารีดักชันของโครเมียมและทองแดงในฝั่งแคโทดเกิดขึ้นได้ดี การกำจัดโลหะทั้งสองออกจากน้ำเสียจึงเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ซึ่งสังเกตได้จากค่าของแข็งละลายทั้งหมดของโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรจะมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับน้ำประปาและน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์เนื่องจากค่าของแข็งละลายทั้งหมดสามารถบอกถึงความสามารถในการนำไฟฟ้า ซึ่งจะนำไฟฟ้าได้มากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่แตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าในน้ำและพวกอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำมักจะแตกตัวเป็นไอออนที่มีประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น ดังนั้นในการทดลองส่วนที่ 2 จึงเลือกโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในฝั่งแอโนดเพื่อนำมาใช้สำหรับการทดลองในขั้นต่อไป



(ก) ร้อยละการกำจัดโครเมียม



(ข) ร้อยละการกำจัดทองแดง

ภาพที่ 4.4 ร้อยละการกำจัด (ก) โครเมียมและ (ข) ทองแดง เมื่อใช้ถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา
 เดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5
 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง

4.5 การทดลองส่วนที่ 3 ศึกษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินพิมพ์

ศึกษาผลของการให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่องการบำบัดที่แตกต่างกันที่มีต่อการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแทนนินพิมพ์ โดยติดตามวัดความเข้มข้นของโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ เมื่อใช้ถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นสารอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด เดินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ค่าต่างๆ ในแต่ละช่องการบำบัด ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1 เก็บตัวอย่างน้ำเสีย 3 ตำแหน่ง คือ จุดเก็บตัวอย่างช่อง 2, 3 และ 4 เพื่อวัดปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร) ที่ให้ในแต่ละช่องบำบัด

การทดลองชุด	ช่อง 1	ช่อง 2	ช่อง 3	ช่อง 4
CD-555 (ชุดอ้างอิง)	0	5	5 (Cr √ , Cu √)	5
CD-550	0	5	5 (Cr × , Cu ×)	0
CD-750	0	7	5 (Cr √ , Cu √)	0
CD-1050	0	10	5 (Cr √ , Cu √)	0
CD-755	0	7	5 (Cr √ , Cu √)	5
CD-1055	0	10	5 (Cr √ , Cu √)	5

“√” และ “×” ระบุตำแหน่งช่องการบำบัดที่ปริมาณโลหะมีค่า “ผ่าน” และ “ไม่ผ่าน” เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม

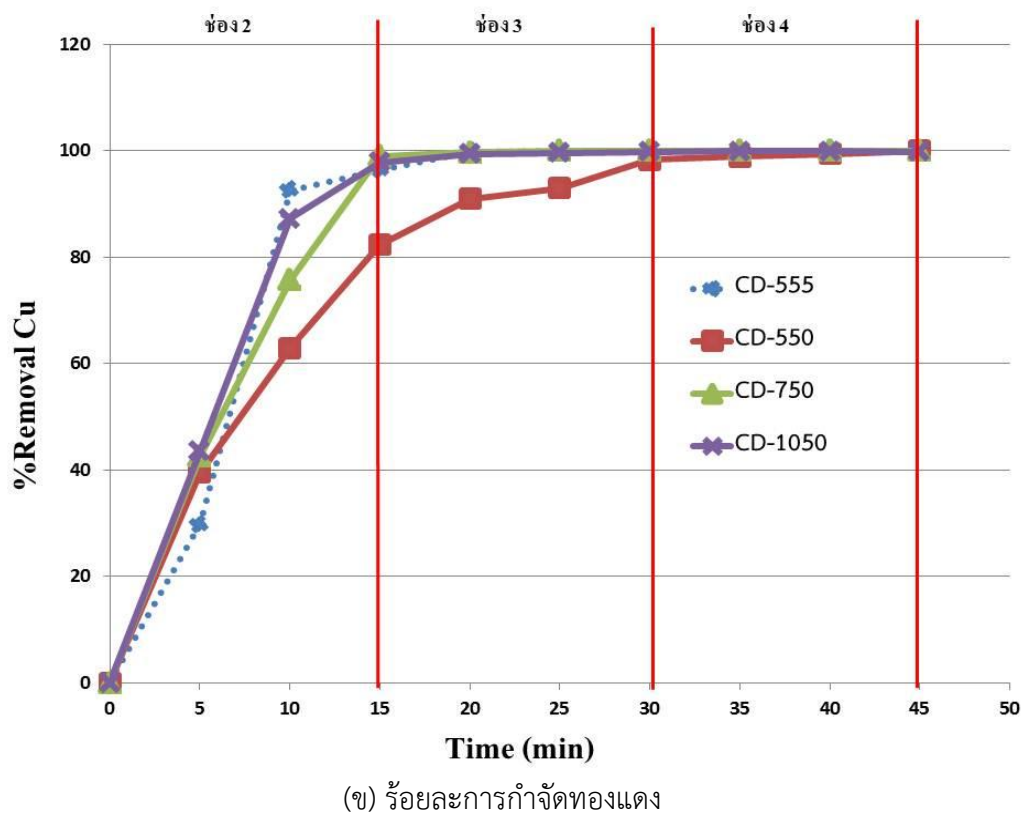
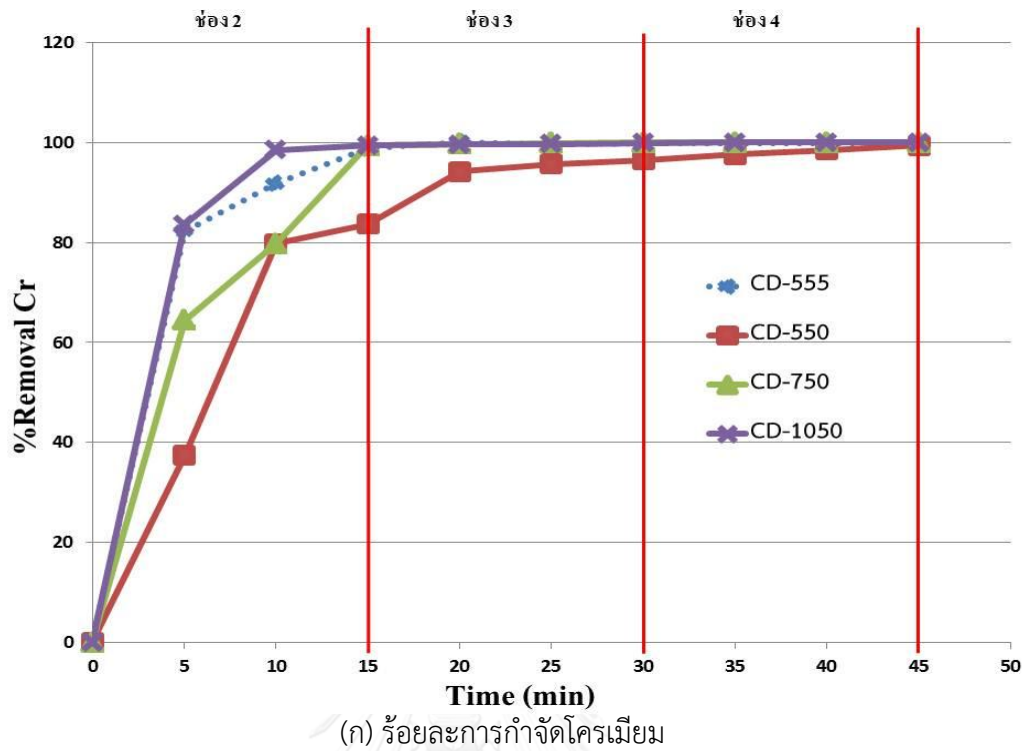
จากผลการทดลองในส่วนที่ 1 และ 2 จะเห็นว่า เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง โครเมียมและทองแดงจะถูกกำจัดออกจากน้ำเสียจนมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ในช่องที่ 3 ดังนั้นจึงน่าจะไม่มีความเป็นที่จะต้องให้กระแสไฟฟ้าในช่องที่ 4 อีกต่อไป ด้วยเหตุนี้ผู้ทดลองจึงทำการทดสอบ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แนวทาง คือ แนวทางที่ 1 ทำการทดลองโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 4 พร้อมกับทำการคงและปรับเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 2 เป็น 5, 7 และ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และเรียกการทดลองดังกล่าวว่า การทดลองชุด CD-550, CD-750 และ CD-1050 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) และสำหรับแนวทางการทดลองที่ 2 ทำการทดลองโดยคงค่าความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้าในช่องที่ 4 ไว้ตามเดิมที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร พร้อมทำการปรับเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 2 เป็น 7 และ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร และเรียกการทดลองดังกล่าวว่า การทดลองชุด CD-755 และ CD-1055 ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ค่าความเข้มข้นของโครเมียมและทองแดงที่ลดลงตามระยะเวลาของการกำจัดด้วยวิธีการปรับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของแต่ละชุดการทดลอง ได้ถูกนำมาแสดงเปรียบเทียบกับผลการกำจัดแบบคงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง (การทดลองชุด CD-555) ดังข้อมูลแสดงไว้ในภาพที่ 4.5 และ 4.6

ภาพที่ 4.5 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียมและทองแดงในน้ำเสียตัวอย่างมวลหนึ่งๆ ที่เคลื่อนที่ผ่านแต่ละช่องการบำบัด ซึ่งมีการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามการทดลองชุด CD-550, CD-750 และ CD-1050 เปรียบเทียบผลกับการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง (การทดลองชุด CD-555) พบว่า เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-550 ไม่สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงให้มีค่าต่ำกว่าค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ และเมื่อทำการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องการบำบัดที่ 2 ตามการทดลองชุด CD-750 และ CD-1050 พบว่า สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงให้มีค่าลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ ณ ช่องการบำบัดที่ 3 เช่นเดียวกับเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง (การทดลองชุด CD-555) ทั้งนี้การกำจัดโครเมียมและทองแดงในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในช่องที่ 3 ด้วยการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามการทดลองชุด CD-1050 พบว่า เหลือโครเมียมและทองแดงอยู่ในน้ำเสีย 0.13 และ 0.58 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียมและทองแดง 99.95 และ 99.78 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-1050 จะสูงกว่าปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-555 ที่มีโครเมียมและทองแดงเหลืออยู่ในน้ำเสีย 0.10 และ 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียมและทองแดง 99.95 และ 99.96 ตามลำดับ ในขณะที่การให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามชุดการทดลองที่ CD-750 สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงให้มีค่าเหลืออยู่เพียง 0.11 และ 0.00 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียมและทองแดง 99.96 และ 100.00 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-750 จะต่ำกว่าปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียเมื่อให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-555 ดังนั้น จากผลการทดลองทั้งหมดในแนวทางที่ 1 นี้ จึงสามารถสรุปได้ว่า การลดจ่ายกระแสไฟฟ้าในช่องบำบัดที่ 4 ควรจะทำความควบคู่กับการเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องการบำบัดที่ 2 เพื่อให้สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงให้มีความเข้มข้นลดลงจนผ่านเกณฑ์ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมภายในช่องที่ 3 ได้

นอกจากนี้การให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 2 สูงเกินไป เช่น CD-1050 ก็ไม่ได้ช่วยให้ปริมาณโครเมียมและทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในช่องที่ 3 มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ต่ำกว่า เช่น CD-750 หรือ CD-555 ดังนั้นในการศึกษาการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแนวทางที่ 1 เลือกการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-750

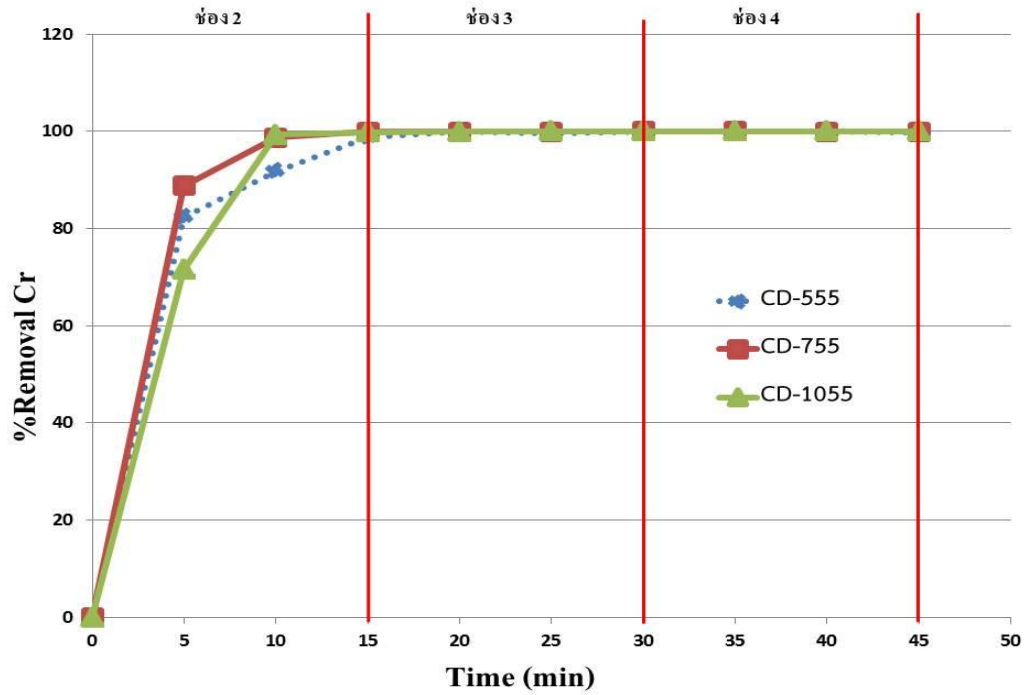




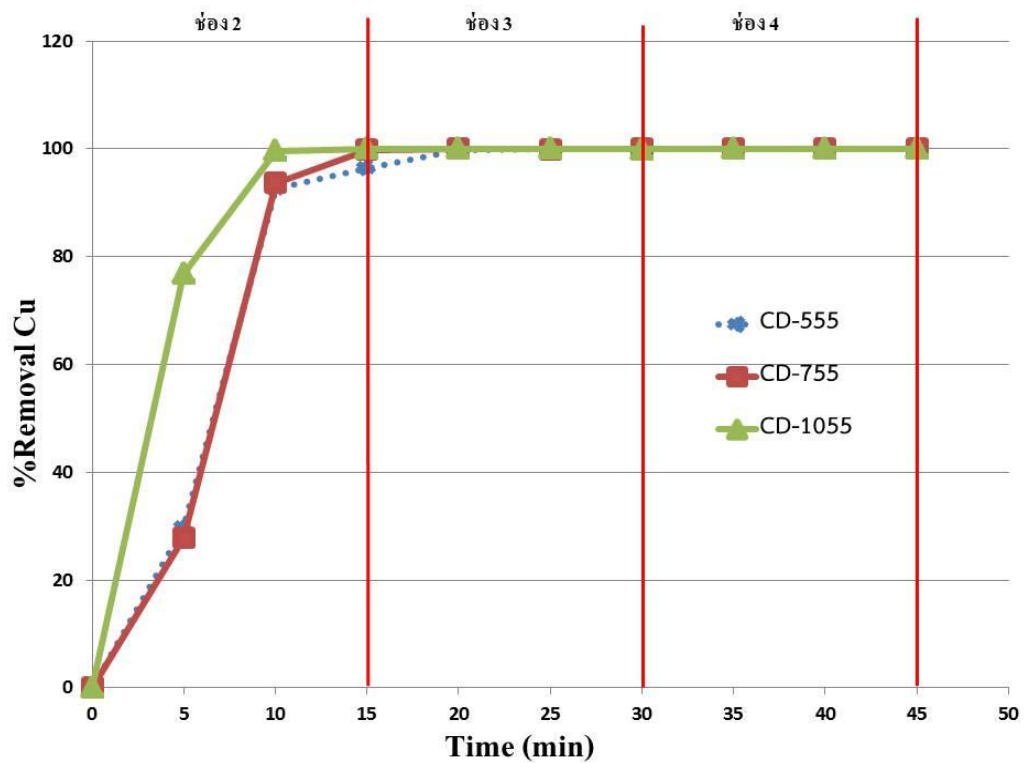
ภาพที่ 4.5 ร้อยละการกำจัด (ก) โครเมียม และ (ข) ทองแดง เมื่อทำการบำบัดด้วยชุดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า CD-555, CD-550, CD-750 และ CD-1050

ภาพที่ 4.6 แสดงร้อยละการกำจัดโครเมียมและทองแดงในน้ำเสียตัวอย่างมวลหนึ่งๆ ที่เคลื่อนที่ผ่านแต่ละช่องการบำบัด ซึ่งมีการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามการทดลองชุด CD-755 และ CD-1055 เปรียบเทียบผลกับการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 5 แอมแปร์ ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง (การทดลองชุด CD-555) พบว่า ทุกชุดความหนาแน่นกระแสที่ทดสอบ สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดง ให้มีค่าลดลงจนผ่านค่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมได้ภายในช่องบำบัดที่ 3 เหมือนกัน โดยปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในช่องที่ 3 มีค่า 0.09, 0.05 และ 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียม 99.95, 99.97 และ 99.96 ตามลำดับ และปริมาณทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดในช่องที่ 3 มีค่า 0.10, 0.07 และ 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดทองแดง 99.96, 100.00 และ 99.97 ตามลำดับ เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าตามชุดการทดลอง CD-555, CD-755 และ CD-1055 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวจะพบว่า การเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 2 จาก 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ไปเป็น 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร การทดลองชุด CD-1055 ไม่ได้ช่วยให้การกำจัดโครเมียมและทองแดงดีขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองชุด CD-755 และการเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 2 จาก 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ไปเป็น 7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร การทดลองชุด CD-755 สามารถช่วยให้การกำจัดโครเมียมและทองแดงดีขึ้น แต่ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการทดลองชุด CD-555 ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานด้านไฟฟ้า การเลือกใช้ชุดความหนาแน่นกระแส CD-555 ก็เพียงพอแล้วสำหรับการกำจัดโครเมียมและทองแดง ออกจากน้ำเสียนี้ 555 ดังนั้นในการศึกษาการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแนวทางที่ 2 เลือกการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-555

เมื่อทำการพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากทั้ง 2 แนวทางการทดลอง พบว่า ทั้งการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-555 และ CD-750 สามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมและทองแดงในน้ำเสียลงได้ค่อนข้างมาก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำวิธีการให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทั้ง 2 แบบมาคำนวณเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า ดังที่จะนำเสนอต่อไปในหัวข้อ 4.7.2



(ก) ร้อยละการกำจัดโครเมียม



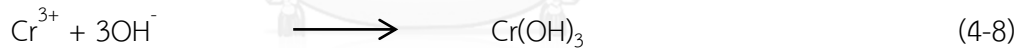
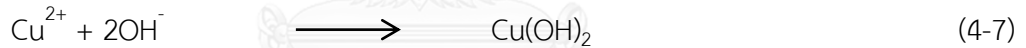
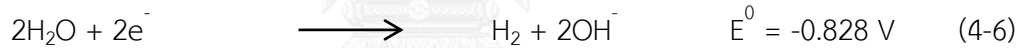
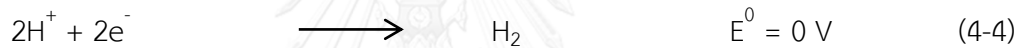
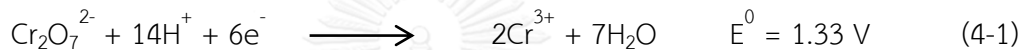
(ข) ร้อยละการกำจัดทองแดง

ภาพที่ 4.6 ร้อยละการกำจัด (ก) โครเมียม และ (ข) ทองแดง เมื่อทำการบำบัดด้วยชุดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า CD-555, CD-755 และ CD-1055

4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระหว่างการกำจัดโครเมียมและทองแดง

น้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนพิมพ์พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3.48 เมื่อใช้ถังปฏิกิริยาแบบ กั้นซ้าย-ขวา ทำการบำบัดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างน้ำเสีย 3 จุด คือ จุดเก็บตัวอย่างช่องที่ 2, 3 และ 4 และทำวัดค่าพีเอชโดยติดตามการเคลื่อนที่ของมวลน้ำ หนึ่งๆ ตลอดช่วงการทดลอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเกิดขึ้นดังภาพที่ 4.7 และสามารถ อธิบายสาเหตุการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชในแต่ละช่วงเวลาได้โดยอาศัยปฏิกิริยาที่ (4.1) ถึง (4.8)

ปฏิกิริยาบนขั้วแคโทด



ภาพที่ 4.7 แสดงค่าพีเอชของน้ำเสียที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการกำจัดโครเมียมและทองแดงเทียบกับเวลา พบว่า ค่าพีเอชของน้ำเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทดลอง โดยการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

1) ช่วงเริ่มต้นการทดลอง ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ โครเมียมและทองแดงถูกกำจัดออกจากน้ำเสียอย่างรวดเร็วผ่านปฏิกิริยารีดักชันที่ (4-1) และ (4-5) ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันพบปฏิกิริยารีดักชันของ H^+ ซึ่งเกิดขึ้นได้ง่ายผ่านปฏิกิริยาที่ (4-3) ส่งผลให้ความเป็นกรดของน้ำเสียมีค่าลดลง ค่าพีเอชของสารละลายจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

2) ช่วงที่ 2 ของการทดลอง เมื่อปริมาณไอออนโลหะหนักในน้ำเสียน้อยลง และปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ายังคงที่ ปฏิกริยารีดักชันของน้ำที่ (4-6) ดำเนินไปร่วมกับการเกิดปฏิกิริยา (4-1) ถึง (4-5) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ OH^- ขึ้น ส่งผลทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียมีค่าเพิ่มขึ้น จากค่าพีเอชประมาณ 5-6 ไปเป็นพีเอชประมาณ 10 และปริมาณ OH^- ที่เกิดขึ้นยังมีผลทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะ ดังปฏิกิริยาที่ (4-7) ถึง (4-8) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาร่วมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสีย

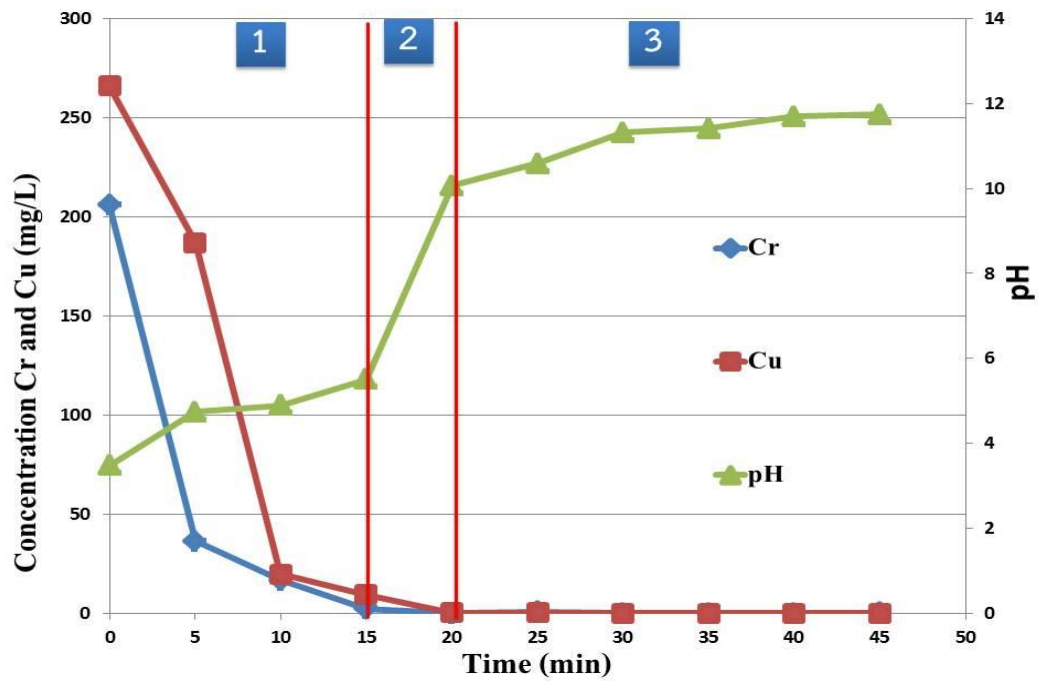
3) ช่วงที่ 3 ของการทดลอง เมื่อไอออนของโครเมียมและทองแดงถูกกำจัดหมดแล้ว และค่าพีเอชของน้ำเสยค่อนข้างสูง การดำเนินไปของปฏิกิริยา (4-1) ถึง (4-5) และ (4-7) ถึง (4-8) สิ้นสุดลง การเพิ่มขึ้นของพีเอชในช่วงนี้เกิดจากการดำเนินของปฏิกิริยา (4-6) เท่านั้น ค่าพีเอชในช่วงนี้จึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ หรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

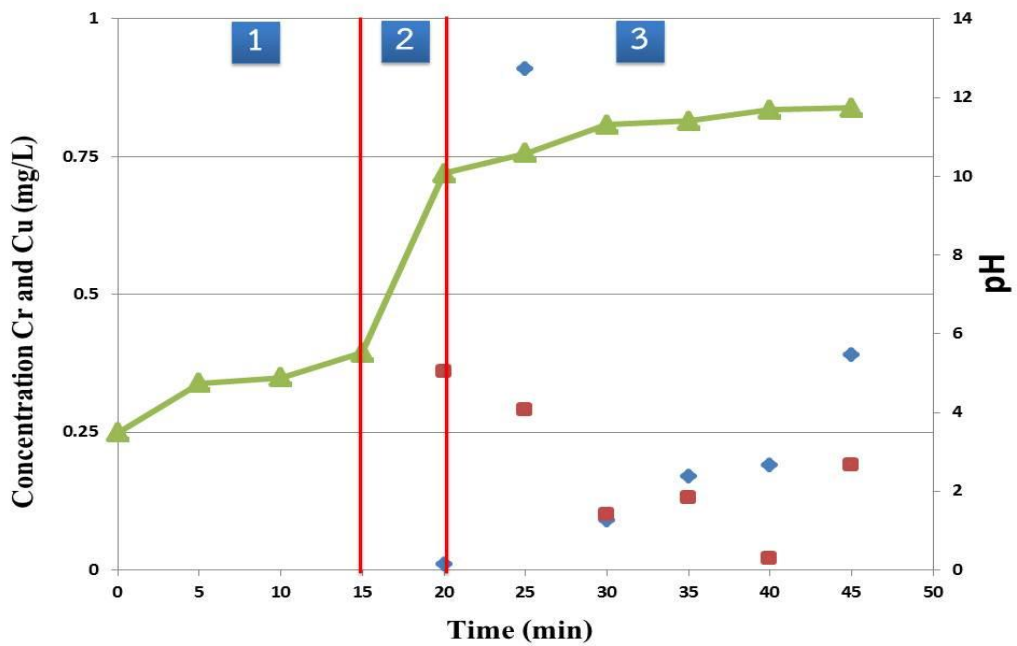
ตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างไฮดรอกไซด์ไอออนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพีเอช 1 ยูนิต

การเพิ่มของpH จากค่าหนึ่งไปค่าหนึ่ง	$[\text{OH}^-]$ (mol/L)
7 \longrightarrow 8	9×10^{-7}
9 \longrightarrow 10	9×10^{-5}
11 \longrightarrow 12	9×10^{-3}

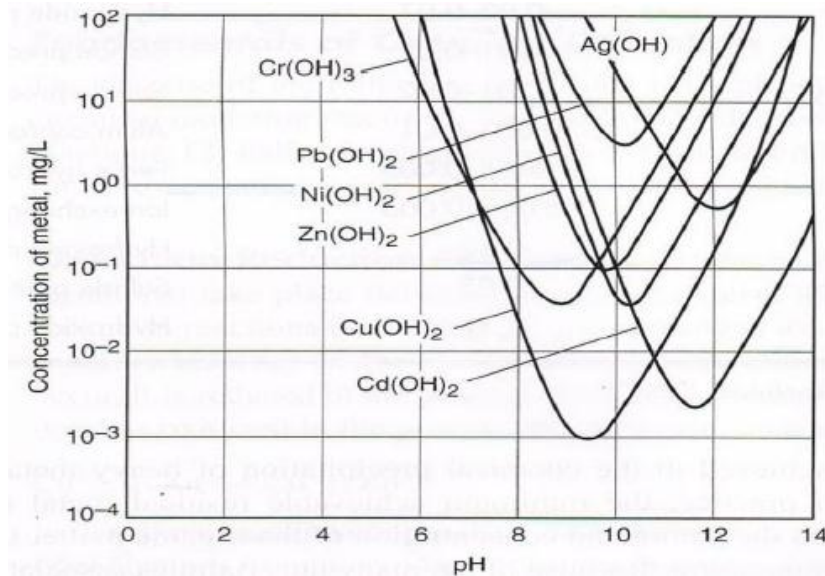
นอกจากนี้ที่พีเอช 11 พบการเพิ่มขึ้นของโครเมียมไอออนในน้ำเสยตัวอย่าง ดังภาพที่ 4.8 ที่แสดงถึงความเป็นไปได้ในการละลายกลับของตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ที่คาดว่าเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงที่ 2 ของการเพิ่มค่าพีเอช ภาพที่ 4.9 แสดงอิทธิพลของค่าพีเอชที่มีผลต่อการละลายของตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ จากภาพที่ 4.8 พบว่าตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ เริ่มละลายกลับได้ตั้งแต่ค่าพีเอชประมาณ 9 จึงสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบค่าความเข้มข้นโครเมียมในน้ำเสยตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชสูงกว่า



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระหว่างการกำจัดโครเมียม และทองแดงแบบไหล ต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา โดยติดตามมวลน้ำหนึ่งๆ ที่เคลื่อนที่ ณ ช่วงเวลาต่างๆ



ภาพที่ 4.8 ปริมาณโครเมียม และทองแดงที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างที่ค่าพีเอชเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชที่มีต่อการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ชนิดต่างๆ
(Metcalf และ Eddy, 2003)

4.7 วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด

จากผลการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่นพิมพ์แบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า มีค่าใช้จ่ายหลายด้าน เช่น ค่าเครื่องมือ ค่าสารเคมี และค่าไฟฟ้า สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการนี้จะไม่คิดค่าเครื่องมือ ได้แก่ อุปกรณ์เครื่องแก้ว เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า และเครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก เป็นต้น ดังนั้นในการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการบำบัด จะพิจารณาเฉพาะค่าสารเคมีและค่าไฟฟ้าเท่านั้น

4.5.1 ค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี

คำนวณค่าสารเคมีที่ใช้เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฝั่งแอโนด ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ มีราคา 12 บาทต่อกิโลกรัม (ราคาสารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรม)

น้ำเสีย 1 ลิตร ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1 ลิตร คิดเป็นน้ำหนักของโซเดียมคลอไรด์ที่ 29.25 กรัม หรือที่ราคา 0.351 บาทต่อลิตร ถ้าน้ำเสียมีปริมาตร 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องมีค่าใช้จ่ายสำหรับโซเดียมคลอไรด์เป็นเงิน 351 บาท

4.5.2 ค่าใช้จ่ายด้านไฟฟ้า

การคำนวณค่าไฟฟ้า จะคำนวณเฉพาะค่าไฟฟ้าโดยไม่ได้คำนวณถึงต้นทุนที่ใช้ทั้งหมดในการบำบัดเพราะเป็นการทดลองขนาดเล็ก เพื่อทดสอบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปปฏิบัติตามมากน้อยเพียงใด

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5-5-5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

- กำจัดโครเมียม

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= \frac{\text{แรงดันไฟฟ้า (volt)} \times \text{กระแสไฟฟ้า(A)} \times \text{เวลา(hr)}}{\text{ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด(Kg)}} \\
 &= \frac{16.6 \text{ V} \times 5 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr} + 16.6 \text{ V} \times 5 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr} + 16.6 \text{ V} \times 5 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr}}{(204.19 - 0.19) \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 1 \text{ L}} \times \frac{10^3 \text{ mg} \times 10^3 \text{ g}}{10^3 \text{ W}} \\
 &= 14.65 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม} \\
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้บำบัด} \times (\text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\
 &= 14.65 \frac{\text{kWhr}}{\text{kgCr}} \times 2.5 \text{ บาท} \\
 &= 36.65 \text{ บาทต่อกิโลกรัมโครเมียม}
 \end{aligned}$$

สำหรับการกำจัดโครเมียม ช่อง 2, 3 และ 4 ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทั้ง 3 ช่อง กำลังไฟฟ้าที่ใช้ คือ 14.65 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด คือ 36.65 บาทต่อกิโลกรัมโครเมียม

- กำจัดทองแดง

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= \frac{\text{แรงดันไฟฟ้า (volt)} \times \text{กระแสไฟฟ้า(A)} \times \text{เวลา(hr)}}{\text{ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด(Kg)}} \\
 &= \frac{16.6 \text{ V} \times 5 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr} + 16.6 \text{ V} \times 5 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr} + 16.6 \text{ V} \times 5 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr}}{(260.70 - 0.02) \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 1 \text{ L}} \times \frac{10^3 \text{ mg} \times 10^3 \text{ g}}{10^3 \text{ W}} \\
 &= 11.46 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมทองแดง}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้บำบัด} \times (\text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\
 &= 11.46 \frac{\text{kWhr}}{\text{kgCr}} \times 2.5 \text{ บาท} \\
 &= 28.65 \text{ บาทต่อกิโลกรัมทองแดง}
 \end{aligned}$$

สำหรับการกำจัดทองแดง ช่อง 2, 3 และ 4 ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทั้ง 3 ช่อง กำลังไฟฟ้าที่ใช้ คือ 11.46 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมทองแดง และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด คือ 28.65 บาทต่อกิโลกรัมทองแดง

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7-5-0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

- กำจัดโครเมียม

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= \frac{\text{แรงดันไฟฟ้า (volt)} \times \text{กระแสไฟฟ้า (A)} \times \text{เวลา (hr)}}{\text{ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด (Kg)}} \\
 &= \frac{20.1 \text{ V} \times 7 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr} + 16.6 \text{ V} \times 5 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr}}{(204.19 - 0.19) \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 1 \text{ L}} \times \frac{10^3 \text{ mg} \times 10^3 \text{ g}}{10^3 \text{ W}} \\
 &= 13.26 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้บำบัด} \times (\text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\
 &= 13.26 \frac{\text{kWhr}}{\text{kgCr}} \times 2.5 \text{ บาท} \\
 &= 33.15 \text{ บาทต่อกิโลกรัมโครเมียม}
 \end{aligned}$$

สำหรับการกำจัดโครเมียม ช่อง 2, 3 และ 4 ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ คือ 13.26 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด คือ 33.15 บาทต่อกิโลกรัมโครเมียม

- กำจัดทองแดง

$$\begin{aligned}
 \text{กำลังไฟฟ้า} &= \frac{\text{แรงดันไฟฟ้า (volt)} \times \text{กระแสไฟฟ้า (A)} \times \text{เวลา (hr)}}{\text{ปริมาณโลหะหนักที่ถูกกำจัด (Kg)}} \\
 &= \frac{20.1 \text{ V} \times 7 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr} + 16.6 \text{ V} \times 5 \text{ A} \times \frac{15}{60} \text{ hr}}{(260.70 - 0.02) \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 1 \text{ L}} \times \frac{10^3 \text{ mg} \times 10^3 \text{ g}}{10^3 \text{ W}} \\
 &= 10.38 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมทองแดง}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าไฟฟ้า} &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้บำบัด} \times (\text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\
 &= 10.38 \frac{\text{kWhr}}{\text{kgCr}} \times 2.5 \text{ บาท} \\
 &= 25.95 \text{ บาทต่อกิโลกรัมทองแดง}
 \end{aligned}$$

สำหรับการกำจัดทองแดง ช่อง 2, 3 และ 4 ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ คือ 10.38 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัมทองแดง และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด คือ 25.95 บาทต่อกิโลกรัมทองแดง

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบพลังงานและค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมและทองแดงแบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า ในถังปฏิกรณ์แบบก้นช้าย-ขวา อัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าเมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-750 จะใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการกำจัดโครเมียมและทองแดงน้อยกว่าเมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าแบบ CD-555

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการกำจัดโครเมียมและทองแดงที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 204.19 และ 260.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	พลังงานที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อกิโลกรัม)		ค่าไฟฟ้า (บาทต่อกิโลกรัม)	
	โครเมียม	ทองแดง	โครเมียม	ทองแดง
การทดลองชุด				
CD-555	14.65	11.46	36.65	28.65
CD-750	13.26	10.38	33.15	25.95

4.8 เปรียบเทียบกับการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาต่อจากงานวิจัยของมณีวัลย์ เนตรรังสี (2555) ทำการศึกษา 3 เรื่อง ได้แก่

1. รูปแบบถังปฏิกริยา การกั้นถังปฏิกริยาที่แตกต่างกันจะทำให้มีลักษณะการเคลื่อนที่แตกต่างกัน รูปแบบถังปฏิกริยามี 2 รูปแบบ คือ

1) ถังปฏิกริยาแบบกั้นบน-ล่าง ถังปฏิกริยาแบบนี้จะเหมือนกับถังปฏิกริยาในงานวิจัยของมณี

2) ถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา มีการเคลื่อนที่ของน้ำในแนวราบ

2. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ มี 3 ชนิด ได้แก่

1) โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

2) น้ำประปา

3) น้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพี

3. การให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่องไม่

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบกับการวิจัยที่เกี่ยวข้อง

	มณีวัลย์ เนตรรังษี, 2555	งานวิจัยนี้
แหล่งที่มา น้ำเสีย	น้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมผลิตแทนพิมพ์	น้ำเสียจากโรงงาน อุตสาหกรรมผลิตแทนพิมพ์
สารละลายอิเล็กโทรไลต์	NaCl 0.5 M	NaCl 0.5 M
ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า	เท่ากันทุกจุด 15.43 A/m^2	แต่ละจุดไม่เท่ากัน ช่องที่ 2, 4 และ 3 เป็น 7, 5 และ 0 A/m^2
รูปแบบถังปฏิกิริยา	ก้นบน-ล่าง	ก้นซ้าย-ขวา
ค่าไฟฟ้า	กิโลกรัม/บาท 124.65	กิโลกรัม/บาท 33.15
เวลาที่ใช้	นาที 90	นาที 45

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียโรงงานผลิตแท่งพิมพ์แบบไหลต่อเนื่องด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมและทองแดงเท่ากับ 243.30 และ 260.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำการทดลองที่อัตราการไหลของน้ำเสียคงที่ 5.6 มิลลิตรต่อนาที

1. ถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงได้เร็วกว่าถังปฏิกริยาแบบกั้นบน-ล่าง เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง และใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ พบว่าถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงออกจากน้ำเสียตัวอย่างให้ลดลงจนผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมในเวลา 20 และ 30 นาที ตามลำดับ

2. เมื่อใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถกำจัดโครเมียมและทองแดงได้ดีกว่าใช้น้ำประปาและน้ำเสีย เมื่อใช้ถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง และใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

3. เมื่อใช้ถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา ใช้โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 7, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ ใช้เวลาในการกำจัดโครเมียมและทองแดง 20 และ 30 นาที ตามลำดับ และค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดโครเมียมและทองแดงคือ 31.33 บาทต่อกิโลกรัมโลหะที่ถูกกำจัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

การนำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม

1. ใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell volume ratio) ให้มีค่าเท่ากับการทดลอง คือ 48.6 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร
2. นำความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม

การศึกษาเพิ่มเติม

1. เสนอให้ศึกษาการกำจัดโครเมียมและทองแดงด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมีแบบไหลต่อเนื่อง โดยการควบคุมค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

5.3 ความสำคัญทางวิศวกรรม

การขยายสเกล (Scale up) สิ่งที่ต้องทราบ คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) และพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย (Area/Cell volume ratio) โดยนำความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองไปใช้กับโรงงานอุตสาหกรรม และใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายให้มีค่าเท่ากัน (Cameselle และคณะ, 2005)

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. 2543. มาตรฐานคุณภาพน้ำและเกณฑ์ระดับคุณภาพน้ำในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม. 2542. ปัญหามลพิษ ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและคุณภาพชีวิต. กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม:

เก็จวลี พุกษาทร. 2548. เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเคมีไฟฟ้าประยุกต์. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปริเมษ เจริญนพคุณ. 2554. การกำจัดไนเตรทในน้ำทิ้งชุมชนด้วยไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

พิชิต ลีกุล. 2553. การเพิ่มประสิทธิภาพกำจัดสังกะสีจากน้ำเสียอุตสาหกรรม โดยกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีด้วยวิธีควบคุมกระแสอย่างต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เพ็ญศรี ทองนพเนื่อ. 2552. เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มณีวัลย์ เนตรรังสี. 2555. การกำจัดทองแดง โครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยวิธีเคมีไฟฟ้าแบบไหลต่อเนื่อง. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มะลิ หุ่นสม. 2544. การนำทองแดง โครเมียม และนิกเกิลกลับคืนจากน้ำเสียโรงงานชุบโลหะด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญา ดุษฎีบัณฑิต. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตันตุลเวศน์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วรรณรัตน์ วัฒนาชัย. 2547. กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

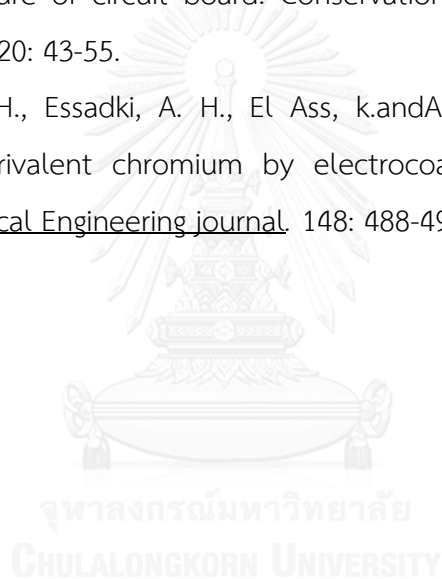
ศรายุทธ ลาภพูนผล. 2549. การกำจัดโครเมียมโดยกระบวนการไฟฟ้า-เคมี ร่วมกับการแยกตะกอน
ลอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตย์ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.



ภาษาอังกฤษ

- Adhoum, N., Monser, L., Bellakhal, N. and Belgaied, J. E. 2004. Treatment of electroplating wastewater containing Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cr(VI) by electrocoagulation. J Hazard Mater. 112: 207-213.
- Akbal, F. and Camcı, S. 2011. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. Desalination. 269: 214-222.
- Al-Shannag, M., Al-Qodah, Z., Bani-Melhem, K., Qtaishat, M. R. and Alkasrawi, M. 2015. Heavy metal ions removal from metal plating wastewater using electrocoagulation: Kinetic study and process performance. Chemical Engineering Journal. 260: 749-756.
- Cameselle, C., Pazos, M. and Sanroman, M. A. 2005. Selection of an electrolyte to enhance the electrochemical decolourisation of indigo. Optimisation and scale-up. Chemosphere. 60: 1080-1086.
- Chen, G. 2004. Electrocoagulation technologies in wastewater treatment. Separation and Purification Technology. 38.
- Friedrich, H. 1962. Ion Exchange. New York: McGraw-Hill.
- Hunter, D. 1969. The Diseases of Occupations. 4 ed. Boston, English.: Little Brown and Company.
- Kawamura, S. 2000. Integrated Design and operation of water treatment facilities. 2 edition Wiley: University of Michigan.
- Khattab, I. A., Shaffei, M. F., Shaaban, N. A., Hussein, H. S. and Abd El-Rehim, S. S. 2014. Comparison between fixed and fluidized bed cathodes and effect of supporting electrolyte in electrochemical removal of copper ion from dilute solutions. Egyptian Journal of Petroleum. 23: 87-91.
- Metcalf and Eddy. 2003. Wastewater Engineering Treatment Treatment and Reuse. U.S.A: McGraw-Hill.
- Mollah, M. Y., Morkovsky, P., Gomes, J. A., Kesmez, M., Parga, J. and Cocke, D. L. 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. Hazard Mater. 114: 199-210.

- Patterson, J. W. 1985. Industrial wastewater treatment technology. Boton: Butterworth Publisher.
- Ponce De Leon, C. and Pletcher, D. 1996. The removal of Pb(II) from aqueous solutions using a reticulated vitreous carbon cathode cell-the influence of the electrolyte. Electrochimica Acta. 41: 533-541.
- Pretorius, W., Johannes, W. and Lempert, G. 1991. Electrolytic Iron flocculant production with bipolar electrode in series arrangement. Water SA. 17.
- Scott, K., Chen, X., Atkinson, J. W., Todd, M. and Armstrong, R. D. 1997. Electrochemical recycling of tin, lead and copper from stripping solution in the manufacture of circuit board. Conservation and recycling. Conservation and Recyclin. 20: 43-55.
- Zaroual, Z., Chair, H., Essadki, A. H., El Ass, k. and Azzi, M. 2009. Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design. Chemical Engineering journal. 148: 488-495.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองส่วนที่ 1 ค่าพีเอชของถังปฏิกิริยาแบบกึ่งน้ำชาย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาท)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.47	3.44	3.54	3.48	0.05
5	4.72	4.74	4.75	4.74	0.02
10	4.90	4.89	4.89	4.89	0.01
15	5.49	5.52	5.53	5.51	0.02
20	10.08	10.10	10.04	10.07	0.03
25	10.61	10.58	10.57	10.59	0.02
30	11.33	11.29	11.31	11.31	0.02
35	11.42	11.40	11.40	11.41	0.01
40	11.70	11.68	11.69	11.69	0.01
45	11.76	11.72	11.73	11.74	0.02

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองส่วนที่ 1 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	205.98	205.90	205.51	205.80	0.25	0.00
5	37.54	33.76	37.93	36.41	2.30	82.31
10	17.03	15.85	17.71	16.86	0.94	91.81
15	2.51	2.38	2.42	2.44	0.07	98.82
20	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	99.99
25	0.78	0.83	0.82	0.81	0.03	99.61
30	0.09	0.08	0.12	0.10	0.02	99.95
35	0.14	0.19	0.17	0.17	0.03	99.92
40	0.21	0.18	0.19	0.19	0.02	99.91
45	0.35	0.38	0.43	0.39	0.04	99.81

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองส่วนที่ 1 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	266.37	265.03	266.61	266.00	0.85	0.00
5	183.92	189.35	187.49	186.92	2.76	84.48
10	20.01	22.10	17.18	19.76	2.47	85.43
15	9.59	9.48	9.38	9.48	0.11	92.67
20	0.41	0.36	0.31	0.36	0.05	99.82
25	0.31	0.29	0.26	0.29	0.03	99.72
30	0.09	0.13	0.08	0.10	0.03	99.55
35	0.13	0.15	0.12	0.13	0.02	99.81
40	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	99.9
45	0.17	0.18	0.21	0.19	0.02	99.83

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองส่วนที่ 1 ค่าพีเอชของถังปฏิกริยาแบบกึ่งบน-ล่าง เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาท)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.47	3.44	3.54	3.48	0.05
5	4.44	4.43	4.41	4.43	0.02
10	4.51	4.53	4.53	4.52	0.01
15	4.72	4.76	4.69	4.72	0.04
20	4.89	4.85	4.86	4.87	0.02
25	5.02	5.01	4.98	5.00	0.02
30	8.41	8.39	8.38	8.39	0.02
35	11.29	11.33	11.30	11.31	0.02
40	11.98	11.96	11.98	11.97	0.01
45	11.96	11.97	11.96	11.96	0.01

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองส่วนที่ 1 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกริยาแบบกั้นบน-ล่าง เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	205.80	207.21	204.40	205.80	1.41	0.00
5	37.12	30.75	27.98	31.95	4.69	84.48
10	30.03	29.79	30.14	29.99	0.18	85.43
15	16.11	13.82	15.34	15.09	1.17	92.67
20	0.41	0.35	0.33	0.36	0.04	99.82
25	0.61	0.59	0.54	0.58	0.04	99.72
30	0.92	0.95	0.93	0.93	0.02	99.55
35	0.45	0.36	0.38	0.40	0.05	99.81
40	0.19	0.21	0.23	0.21	0.02	99.9
45	0.36	0.39	0.31	0.35	0.04	99.83

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองส่วนที่ 1 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบก้นบน-ล่าง เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	266.33	265.03	266.64	266.00	0.85	0.00
5	192.02	195.01	191.21	192.75	2.00	27.54
10	86.17	86.51	85.75	86.14	0.38	67.62
15	59.74	52.76	62.01	58.17	4.82	78.13
20	14.05	13.94	13.67	13.89	0.20	94.78
25	6.02	5.93	5.71	5.89	0.16	97.79
30	0.45	0.53	0.48	0.49	0.04	99.82
35	0.23	0.20	0.21	0.21	0.02	99.92
40	0.27	0.25	0.19	0.24	0.04	99.91
45	0.31	0.36	0.28	0.32	0.04	99.88

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองส่วนที่ 2 ค่าพีเอชของถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้ โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาท)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.47	3.44	3.54	3.48	0.05
5	4.72	4.74	4.75	4.74	0.02
10	4.90	4.89	4.89	4.89	0.01
15	5.49	5.52	5.53	5.51	0.02
20	10.08	10.10	10.04	10.07	0.03
25	10.61	10.58	10.57	10.59	0.02
30	11.33	11.29	11.31	11.31	0.02
35	11.42	11.40	11.40	11.41	0.01
40	11.70	11.68	11.69	11.69	0.01
45	11.76	11.72	11.73	11.74	0.02

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	205.98	205.90	205.51	205.80	0.25	0.00
5	37.54	33.76	37.93	36.41	2.30	82.31
10	17.03	15.85	17.71	16.86	0.94	91.81
15	2.51	2.38	2.42	2.44	0.07	98.82
20	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	99.99
25	0.78	0.83	0.82	0.81	0.03	99.61
30	0.09	0.08	0.12	0.10	0.02	99.95
35	0.14	0.19	0.17	0.17	0.03	99.92
40	0.21	0.18	0.19	0.19	0.02	99.91
45	0.35	0.38	0.43	0.39	0.04	99.81

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตร เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาท)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	266.37	265.03	266.61	266.00	0.85	0.00
5	183.92	189.35	187.49	186.92	2.76	29.73
10	20.01	22.10	17.18	19.76	2.47	92.57
15	9.59	9.48	9.38	9.48	0.11	96.43
20	0.41	0.36	0.31	0.36	0.05	99.86
25	0.31	0.29	0.26	0.29	0.03	99.89
30	0.09	0.13	0.08	0.10	0.03	99.96
35	0.13	0.15	0.12	0.13	0.02	99.95
40	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	99.99
45	0.17	0.18	0.21	0.19	0.02	99.93

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองส่วนที่ 2 ค่าพีเอชของถังปฏิกริยาแบบก้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้น้ำประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน
0	3.27	3.25	3.24	3.25	0.02
5	3.40	3.40	3.45	3.42	0.03
10	4.23	4.27	4.25	4.25	0.02
15	4.39	4.37	4.36	4.37	0.02
20	4.25	4.61	4.39	4.42	0.18
25	4.46	4.47	4.50	4.48	0.02
30	4.60	4.69	4.48	4.59	0.11
35	4.62	4.60	4.61	4.61	0.01
40	4.67	4.66	4.63	4.65	0.02
45	4.71	4.73	4.59	4.68	0.08

ตารางที่ ก.11 ผลการทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถึงปฏิกิริยาแบบกั้นขั้ว-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้น้ำประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที่)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	205.94	205.73	205.72	205.80	0.12	0.00
5	194.49	199.73	198.78	197.67	2.79	3.95
10	153.97	150.36	153.94	152.76	2.08	25.77
15	79.04	78.86	78.89	78.93	0.10	61.65
20	17.84	13.77	17.95	16.52	2.38	91.97
25	3.50	3.48	3.39	3.46	0.06	98.32
30	0.90	0.89	0.96	0.92	0.04	99.5
35	0.06	0.05	0.06	0.06	0.01	99.97
40	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01	99.99
45	0.07	0.06	0.07	0.07	0.01	99.97

ตารางที่ ก.12 ผลการทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้น้ำประปาเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	266.37	265.03	266.61	266.00	0.85	0.00
5	210.09	210.14	210.08	210.10	0.03	21.01
10	166.50	166.47	166.43	166.47	0.04	37.42
15	147.69	147.62	147.66	147.66	0.04	44.49
20	56.57	56.52	56.50	56.53	0.04	78.75
25	39.82	39.79	39.76	39.79	0.03	85.04
30	12.76	12.79	12.77	12.77	0.02	95.2
35	0.89	0.86	0.85	0.87	0.02	99.67
40	0.19	0.23	0.21	0.21	0.02	99.92
45	0.06	0.05	0.06	0.06	0.01	99.98

ตารางที่ ก.13 ผลการทดลองส่วนที่ 2 ค่าพีเอชของถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนพิมพ์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาท)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.45	3.44	3.46	3.45	0.01
5	3.53	3.56	3.54	3.54	0.02
10	3.60	3.62	3.60	3.61	0.01
15	3.89	3.91	3.92	3.91	0.02
20	4.56	4.53	4.55	4.55	0.02
25	4.64	4.62	4.67	4.64	0.03
30	4.88	4.82	4.84	4.85	0.03
35	5.03	5.01	5.02	5.02	0.01
40	5.36	5.40	5.32	5.36	0.04
45	5.82	5.86	5.82	5.83	0.02

ตารางที่ ก.14 ผลการทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนพิมพ์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาท)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	205.91	205.68	205.82	205.80	0.12	0.00
5	110.25	97.53	94.88	100.89	8.22	50.98
10	86.29	86.30	86.23	86.27	0.04	58.08
15	67.48	64.83	64.84	65.72	1.53	68.07
20	20.38	20.35	20.31	20.35	0.04	90.11
25	5.93	7.42	6.02	6.46	0.84	96.86
30	1.70	3.68	2.69	2.69	0.99	98.69
35	0.60	0.57	0.59	0.59	0.02	99.71
40	0.05	0.04	0.01	0.03	0.02	99.98
45	0.06	0.05	0.07	0.06	0.01	99.97

ตารางที่ ก.15 ผลการทดลองส่วนที่ 2 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถึงปฏิกิริยาแบบกั้นขั้ว-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและน้ำเสียจากโรงงานผลิตแทนพิมพ์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	266.05	266.01	265.95	266.00	0.05	0.00
5	192.44	179.55	195.01	189.00	8.28	28.95
10	140.70	140.75	140.71	140.72	0.03	47.1
15	67.10	67.09	67.13	67.11	0.02	74.77
20	29.89	35.08	37.02	34.00	3.69	87.22
25	7.79	7.74	7.75	7.76	0.03	97.08
30	3.29	3.25	3.30	3.28	0.03	98.77
35	0.27	0.23	0.24	0.25	0.02	99.91
40	0.20	0.19	0.18	0.19	0.01	99.93
45	0.18	0.17	0.16	0.17	0.01	99.94

ตารางที่ ก.16 ผลการทดลองส่วนที่ 3 ค่าพีเอชของถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทั้ง 3 ช่อง อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	205.98	205.90	205.51	205.80	0.25
5	37.54	33.76	37.93	36.41	2.30
10	17.03	15.85	17.71	16.86	0.94
15	2.51	2.38	2.42	2.44	0.07
20	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
25	0.78	0.83	0.82	0.81	0.03
30	0.09	0.08	0.12	0.10	0.02
35	0.14	0.19	0.17	0.17	0.03
40	0.21	0.18	0.19	0.19	0.02
45	0.35	0.38	0.43	0.39	0.04

ตารางที่ ก.17 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทั้ง 3 ช่อง อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	266.37	265.03	266.61	266.00	0.85	0.00
5	183.92	189.35	187.49	186.92	2.76	82.31
10	20.01	22.10	17.18	19.76	2.47	91.81
15	9.59	9.48	9.38	9.48	0.11	98.82
20	0.41	0.36	0.31	0.36	0.05	99.99
25	0.31	0.29	0.26	0.29	0.03	99.61
30	0.09	0.13	0.08	0.10	0.03	99.95
35	0.13	0.15	0.12	0.13	0.02	99.92
40	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	99.91
45	0.17	0.18	0.21	0.19	0.02	99.81

ตารางที่ ก.18 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ทั้ง 3 ช่อง อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	266.37	265.03	266.61	266.00	0.85	0.00
5	187.01	186.75	186.99	186.92	0.14	29.73
10	20.01	19.86	19.41	19.76	0.31	92.57
15	9.59	9.48	9.38	9.48	0.11	96.43
20	0.41	0.36	0.31	0.36	0.05	99.86
25	0.31	0.29	0.26	0.29	0.03	99.89
30	0.09	0.13	0.08	0.10	0.03	99.96
35	0.13	0.15	0.12	0.13	0.02	99.95
40	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	99.99
45	0.17	0.18	0.21	0.19	0.02	99.93

ตารางที่ ก.19 ผลการทดลองส่วนที่ 3 ค่าพีเอชของถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 5, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.46	3.47	3.45	3.46	0.01
5	4.13	4.16	4.14	4.14	0.02
10	4.32	4.33	4.32	4.32	0.01
15	4.55	4.54	4.56	4.55	0.01
20	4.72	4.70	4.71	4.71	0.01
25	4.82	4.83	4.83	4.83	0.01
30	5.08	5.09	5.08	5.08	0.01
35	5.16	5.15	5.15	5.15	0.01
40	6.54	6.55	6.55	6.55	0.01
45	7.42	7.41	7.42	7.42	0.01

ตารางที่ ก.20 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถึงปฏิกิริยาแบบกั้นขั้ว-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 5, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	239.79	237.88	238.97	238.88	0.96	0.00
5	149.48	149.53	149.49	149.50	0.03	37.42
10	50.82	43.94	50.31	48.36	3.83	79.76
15	39.08	39.07	39.06	39.07	0.01	83.64
20	13.78	13.76	13.79	13.78	0.02	94.23
25	10.75	9.78	10.41	10.31	0.49	95.68
30	8.41	8.40	8.38	8.40	0.02	96.48
35	5.61	5.65	5.63	5.63	0.02	97.64
40	3.60	3.59	3.57	3.59	0.02	98.5
45	1.32	1.35	1.31	1.33	0.02	99.44

ตารางที่ ก.21 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 5, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	253.09	253.10	253.11	253.10	0.01	0.00
5	153.19	153.23	153.18	153.20	0.03	39.47
10	95.85	90.69	94.99	93.84	2.76	62.92
15	44.63	44.65	44.60	44.63	0.03	82.37
20	24.48	24.49	24.50	24.49	0.01	90.98
25	17.96	15.99	19.39	17.78	1.71	92.98
30	4.21	4.26	4.23	4.23	0.03	98.33
35	2.89	2.83	2.84	2.85	0.03	98.87
40	1.59	1.54	1.58	1.57	0.03	99.38
45	0.06	0.07	0.04	0.06	0.02	99.98

ตารางที่ ก.22 ผลการทดลองส่วนที่ 3 ค่าพีเอชของถังปฏิกิริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 7, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.44	3.42	3.43	3.43	0.01
5	3.36	3.35	3.35	3.35	0.01
10	4.53	4.52	4.53	4.53	0.01
15	4.69	4.72	4.70	4.70	0.02
20	4.80	4.78	4.81	4.80	0.02
25	5.99	6.01	6.01	6.00	0.01
30	6.93	6.94	6.93	6.93	0.01
35	7.70	7.73	7.73	7.72	0.02
40	8.29	8.31	8.29	8.30	0.01
45	8.64	8.62	8.63	8.63	0.01

ตารางที่ ก.23 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 7, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	254.01	253.98	254.00	254.00	0.02	0.00
5	90.29	90.32	90.31	90.31	0.02	64.44
10	51.29	51.31	51.30	51.30	0.01	79.8
15	1.48	1.49	1.46	1.48	0.02	99.42
20	0.77	0.71	0.76	0.75	0.03	99.71
25	0.17	0.19	0.17	0.18	0.01	99.93
30	0.11	0.12	0.11	0.11	0.01	99.96
35	0.07	0.08	0.05	0.07	0.02	99.97
40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

ตารางที่ ก.24 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 7, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	260.78	260.82	260.81	260.80	0.02	0.00
5	154.72	142.99	151.72	149.81	6.09	42.56
10	59.45	59.64	71.01	63.37	6.62	75.70
15	1.98	2.70	2.83	2.50	0.46	99.04
20	0.87	0.85	0.86	0.86	0.01	99.67
25	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	99.99
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

ตารางที่ ก.25 ผลการทดลองส่วนที่ 3 ค่าพีเอชของถังปฏิบัติการแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 10, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.65	3.65	3.64	3.65	0.01
5	4.32	4.32	4.34	4.33	0.01
10	4.49	4.50	4.48	4.49	0.01
15	4.56	4.56	4.55	4.56	0.01
20	4.74	4.73	4.73	4.73	0.01
25	5.06	5.06	5.05	5.06	0.01
30	6.28	6.27	6.25	6.27	0.02
35	7.41	7.40	7.40	7.40	0.01
40	8.54	8.54	8.55	8.54	0.01
45	10.38	10.38	10.36	10.37	0.01

ตารางที่ ก.26 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกริยาแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 10, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	238.80	238.77	238.78	238.78	0.02	0.00
5	36.57	39.01	42.03	39.20	2.74	83.58
10	3.53	3.55	3.55	3.54	0.01	98.52
15	1.51	1.53	1.54	1.53	0.02	99.36
20	1.03	1.02	1.04	1.03	0.01	99.57
25	0.69	0.69	0.67	0.68	0.01	99.71
30	0.11	0.15	0.13	0.13	0.02	99.95
35	0.04	0.07	0.07	0.06	0.02	99.97
40	0.09	0.08	0.09	0.09	0.01	99.96
45	0.10	0.10	0.12	0.11	0.01	99.96

ตารางที่ ก.27 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 10, 5 และ 0 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	262.09	262.10	262.10	262.10	0.01	0.00
5	135.10	158.87	149.99	147.99	12.01	43.54
10	33.29	33.31	33.31	33.30	0.01	87.29
15	5.98	4.99	6.21	5.73	0.65	97.82
20	1.62	1.58	1.60	1.60	0.02	99.39
25	0.91	0.87	0.88	0.89	0.02	99.66
30	0.57	0.60	0.58	0.58	0.02	99.78
35	0.34	0.36	0.36	0.35	0.01	99.87
40	0.24	0.22	0.23	0.23	0.01	99.91
45	0.43	0.39	0.40	0.41	0.02	99.84

ตารางที่ ก.28 ผลการทดลองส่วนที่ 3 ค่าพีเอชของถังปฏิบัติการแบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 7, 5 และ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิเมตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.36	3.35	3.37	3.36	0.01
5	4.62	4.64	4.63	4.63	0.01
10	6.87	6.86	6.88	6.87	0.01
15	10.31	10.30	10.31	10.31	0.01
20	11.46	11.47	11.50	11.48	0.02
25	11.80	11.76	11.74	11.77	0.03
30	11.82	11.83	11.80	11.82	0.02
35	12.06	12.08	12.08	12.07	0.01
40	12.16	12.12	12.15	12.14	0.02
45	12.19	12.13	12.15	12.16	0.03

ตารางที่ ก.29 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 7, 5 และ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิเมตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	240.20	240.19	240.19	240.19	0.01	0.00
5	30.16	26.01	24.87	27.01	2.78	88.75
10	3.09	3.03	3.10	3.07	0.04	98.72
15	0.26	0.27	0.29	0.27	0.02	99.89
20	0.24	0.20	0.26	0.23	0.03	99.9
25	0.17	0.17	0.18	0.17	0.01	99.93
30	0.07	0.07	0.09	0.08	0.01	99.97
35	0.13	0.10	0.14	0.12	0.02	99.95
40	0.17	0.18	0.20	0.18	0.02	99.92
45	0.21	0.19	0.18	0.19	0.02	99.92

ตารางที่ ก.30 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถึงปฏิกิริยาแบบกั้นขั้ว-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 7, 5 และ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	260.69	260.68	260.72	260.70	0.02	0.00
5	182.33	189.23	193.07	188.21	5.44	27.8
10	14.64	15.68	19.03	16.45	2.29	93.69
15	0.45	0.42	0.41	0.43	0.02	99.84
20	0.07	0.02	0.05	0.05	0.03	99.98
25	0.19	0.19	0.22	0.20	0.02	99.92
30	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	100.00
35	0.05	0.03	0.04	0.04	0.01	99.98
40	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	99.99
45	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	99.99

ตารางที่ ก.31 ผลการทดลองส่วนที่ 3 ค่าพีเอชของถังปฏิกิริยาแบบก้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 10, 5 และ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน
0	3.65	3.65	3.65	3.65	0.00
5	4.32	4.33	4.33	4.33	0.01
10	4.49	4.49	4.49	4.49	0.00
15	4.54	4.57	4.57	4.56	0.02
20	4.73	4.73	4.74	4.73	0.01
25	5.07	5.07	5.04	5.06	0.02
30	6.27	6.25	6.28	6.27	0.02
35	7.40	7.40	7.41	7.40	0.01
40	8.55	8.54	8.54	8.54	0.01
45	10.36	10.38	10.37	10.37	0.01

ตารางที่ ก.32 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 10, 5 และ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	238.79	238.83	238.78	238.80	0.03	0.00
5	68.09	68.07	68.13	68.10	0.03	71.48
10	1.74	1.79	1.78	1.77	0.03	99.26
15	0.59	0.53	0.52	0.55	0.04	99.77
20	0.33	0.30	0.30	0.31	0.02	99.87
25	0.05	0.05	0.06	0.05	0.01	99.98
30	0.08	0.09	0.09	0.09	0.01	99.96
35	0.10	0.08	0.11	0.10	0.02	99.96
40	0.08	0.06	0.06	0.07	0.01	99.97
45	0.12	0.08	0.09	0.10	0.02	99.96

ตารางที่ ก.33 ผลการทดลองส่วนที่ 3 การกำจัดทองแดงจากน้ำเสียด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าของถังปฏิกรณ์แบบกั้นซ้าย-ขวา เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่องที่ 2, 3 และ 4 เป็น 10, 5 และ 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำเสีย 5.6 มิลลิลิตรต่อนาทีและใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เวลา (นาที)	ครั้ง 1	ครั้ง 2	ครั้ง 3	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน	ร้อยละการกำจัด
0	255.27	255.27	255.29	255.28	0.01	0.00
5	59.09	59.14	59.11	59.11	0.03	76.84
10	0.92	0.90	0.90	0.91	0.01	99.64
15	0.02	0.04	0.04	0.03	0.01	99.99
20	0.02	0.05	0.02	0.03	0.02	99.99
25	0.02	0.04	0.03	0.03	0.01	99.99
30	0.08	0.07	0.07	0.07	0.01	99.97
35	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	100.00
40	0.02	0.03	0.03	0.03	0.01	99.99
45	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	99.99



ข.1 การหาขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) และการหาขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

ตารางที่ ข.1 การหาขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD)

ครั้งที่	โครเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ทองแดง (มิลลิกรัมต่อลิตร)
1	0.001	0.002
2	0.001	0.001
3	0.002	0.002
4	0.001	0.002
5	0.001	0.001
6	0.002	0.001
7	0.001	0.001
8	0.001	0.002
9	0.003	0.002
10	0.001	0.001
ค่าเฉลี่ย	0.001	0.002
ส่วนเบี่ยงเบน	0.001	0.001

ข.1.1 โครเมียม

$$\begin{aligned} \text{LOD} &= \text{mean simple blank} + 3\text{SD} \\ &= 0.001 + (3 \times 0.001) \\ &= 0.004 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LOQ} &= \text{mean simple blank} + 10\text{SD} \\ &= 0.001 + (10 \times 0.001) \\ &= 0.011 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ข.1.2 ทองแดง

$$\begin{aligned} \text{LOD} &= \text{mean simple blank} + 3\text{SD} \\ &= 0.002 + (3 \times 0.001) \\ &= 0.005 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LOQ} &= \text{mean simple blank} + 10\text{SD} \\ &= 0.002 + (10 \times 0.001) \\ &= 0.012 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร} \end{aligned}$$

ข.2 วิธีการคำนวณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ข.2.1 การทดลองส่วนที่ 1

$$\begin{aligned} \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น} \\ &= 3 \text{ เซนติเมตร} \times 9 \text{ เซนติเมตร} \times 2 \text{ ด้าน} \times 9 \text{ แผ่น} \\ &= 486 \text{ ตารางเซนติเมตร} \\ &= 0.0486 \text{ ตารางเมตร} \end{aligned}$$

ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

$$\begin{aligned} \text{กระแสไฟฟ้า} &= \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} \times \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า} \\ &= 0.0486 \text{ ตารางเมตร} \times 5 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเมตร} \\ &= 0.24 \text{ แอมแปร์} \end{aligned}$$

ดังนั้น กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.24 แอมแปร์

ข.2.2 การทดลองส่วนที่ 2

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น} \\
 &= 3 \text{ เซนติเมตร} \times 9 \text{ เซนติเมตร} \times 2 \text{ ด้าน} \times 9 \text{ แผ่น} \\
 &= 486 \text{ ตารางเซนติเมตร} \\
 &= 0.0486 \text{ ตารางเมตร}
 \end{aligned}$$

ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

$$\begin{aligned}
 \text{กระแสไฟฟ้า} &= \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} \times \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า} \\
 &= 0.0486 \text{ ตารางเมตร} \times 5 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเมตร} \\
 &= 0.24 \text{ แอมแปร์}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.24 แอมแปร์

ข.2.3 การทดลองส่วนที่ 3

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} &= \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times 2 \text{ ด้าน} \times \text{จำนวนแผ่น} \\
 &= 3 \text{ เซนติเมตร} \times 9 \text{ เซนติเมตร} \times 2 \text{ ด้าน} \times 3 \text{ แผ่น} \\
 &= 162 \text{ ตารางเซนติเมตร} \\
 &= 0.0162 \text{ ตารางเมตร}
 \end{aligned}$$

ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

$$\begin{aligned}
 \text{กระแสไฟฟ้า} &= \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} \times \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า} \\
 &= 0.0162 \text{ ตารางเมตร} \times 5 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเมตร} \\
 &= 0.08 \text{ แอมแปร์}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.08 แอมแปร์

ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 7 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

$$\begin{aligned} \text{กระแสไฟฟ้า} &= \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} \times \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า} \\ &= 0.0162 \text{ ตารางเมตร} \times 7 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเมตร} \\ &= 0.11 \text{ แอมแปร์} \end{aligned}$$

ดังนั้น กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.11 แอมแปร์

ให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร

$$\begin{aligned} \text{กระแสไฟฟ้า} &= \text{พื้นที่ขั้วแคโทด} \times \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า} \\ &= 0.0162 \text{ ตารางเมตร} \times 10 \text{ แอมแปร์ต่อตารางเมตร} \\ &= 0.16 \text{ แอมแปร์} \end{aligned}$$

ดังนั้น กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0.16 แอมแปร์

ตารางที่ ข.2 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 3

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเมตร)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
5	0.08
7	0.11
10	0.16

ข.3 วิธีการคำนวณพื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย

$$\begin{aligned}
 \text{พื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลาย} &= \frac{\text{พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร)}}{\text{ปริมาตรสารละลาย (ลิตร)}} \\
 &= \frac{0.0486 \text{ m}^2}{1 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ L}}{10^{-3} \text{ m}^3} \\
 &= 48.6 \text{ ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดต่อปริมาตรสารละลายเท่ากับ 48.6 ตารางเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

ข.4 ร้อยละการกำจัด

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

W_i = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

W_t = ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

ตัวอย่างการคำนวณ

นำความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพ์ และความเข้มข้นทองแดงที่เวลา 5 นาที เมื่อใช้ถังปฏิกิริยาแบบก้นซ้าย-ขวา เตินระบบด้วยอัตราการไหล 5.6 มิลลิลิตรต่อนาที และให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 5 แอมแปร์ต่อตารางเมตร เท่ากันทั้ง 3 ช่อง มาเป็นตัวอย่างในการแสดงการคำนวณหาค่าร้อยละการกำจัดทองแดง โดย

ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้นในน้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพ์ มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้นโครเมียมที่เวลา 5 นาทีในน้ำเสียโรงงานผลิตแทนพิมพ์ มิลลิกรัมต่อลิตร

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

แทนค่า ที่เวลา 5 นาที

$$= \frac{(205.98 - 36.41) \times 100\%}{205.98}$$

$$= 82.31\%$$

ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ร้อยละการกำจัดโครเมียม คือ 82.31

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปรียา ปานทอง อายุ 26 ปี เกิดวันที่ 8 เมษายน พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา พ.ศ. 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2555

