



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชา

เรื่อง ประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการกำจัดโครเมียม (เฮกซะวาเลนต์) โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

Energy Efficiency of Hexavalent Chromium Removal by Electrocoagulation

นามผู้วิจัย นายศวรรรณ สุภวิทิตพัฒนา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.App. Sc.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มงคล ดำรงค์ศรี, Dr.Eng.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการกำจัดโครเมียม (เฮกซะวาเลนต์) โดยกระบวนการรวมตะกอน
ด้วยไฟฟ้า

Energy Efficiency of Hexavalent Chromium Removal by Electrocoagulation

โดย

นายศวรรรณ สุภวิทพัฒนา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยศวรธรณ์ สุภวิทพัฒนา 2553: ประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการกำจัด โครเมียม (เฮกซะวาเลนต์) โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ปรินูญวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา, M.App. Sc 92 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} เชิงพลังงาน โดยกระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation) ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นแผ่นเหล็กจำนวน 2 แผ่น มีพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำเสีย (A/V ratio) เท่ากับ 162 ตารางเซนติเมตรต่อลิตร น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ มีความเข้มข้นของ Cr^{6+} เท่ากับ 600 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 2.5 – 3.5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะห่างระหว่างขั้ว ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และ ปริมาตรน้ำเสีย โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นการศึกษาขั้นต้น (Pre Test) เพื่อหาช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ ในการกำจัด Cr^{6+} ของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า และ ส่วนที่สองศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงาน จากการทดลองขั้นต้นพบว่า การลดความต่างศักย์ไฟฟ้าและเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้ว ทำให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานเพิ่มขึ้น สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งในการศึกษาขั้นต้น คือ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ระยะเวลาในการบำบัด 70 นาที มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานดีที่สุดเท่ากับ 6.11 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม โครเมียม

จากการทดลองในส่วนที่สอง แปรผันระยะห่างระหว่างขั้ว (1 และ 2 เซนติเมตร) และ ปริมาตรน้ำเสีย (3 และ 5 ลิตร) พบว่า ทั้งสองตัวแปรไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงาน ซึ่งในการบำบัดนี้สามารถลดความเข้มข้นของ Cr^{6+} เริ่มต้น 350 มก./ล. ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานดีที่สุด คือ 10.35 และ 9.33 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม สำหรับน้ำเสียปริมาตร 3 และ 5 ลิตรตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการบำบัดอยู่ในช่วง 180-200 นาที

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Yotsawat Supavititpattana 2010: Energy Efficiency of Hexavalent Chromium Removal by Electrocoagulation. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Patcharaporn Suwanvitaya, M.App. Sc. 92 pages.

This study investigated the removal of hexavalent chromium [Cr(VI)] from electroplating wastewater by Electrocoagulation (EC) using two steel electrodes with surface area per volume (A/V ratio) of about 162 cm²/L. The wastewater contained 600 mg/L of Cr(VI), pH value of 2.5 – 3.5 . Parameters under study included distance between electrodes, electrodes voltages and volume of wastewater.

In the first phase of the study, Cr(VI) was removed by EC to find out the appropriate range of the parameters used. The appropriate condition was found to be at 6 volt supply and 2 cm. plate distance with the retention time of 70 minutes. Energy consumption in this condition was 6.11 kW – hr/kg Cr(VI) removal. The results indicated that the decrease in voltage and the increase in the distance between electrodes increased the energy efficiency.

The second phase investigated the effect of the parameters on the energy efficiency by EC. The results from the study indicated that the volume of wastewater and distance between electrodes did not significantly affect the energy efficiency. For the reduction of Cr(VI) from 350 mg/L to below 0.25 mg/L, the arrangement that consumed lowest energy was at 4 volt supply and 1 cm. plate distance, energy in the cases of 3 and 5 L treatment volume were 10.35 and 9.33 kW – hr/kg Cr(VI) removal. Retention time required was about 180 – 200 minutes.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้เขียนกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ภัชราภรณ์ สุวรรณวิทยา ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักเป็นอย่างสูงที่ให้ความกรุณาและความเมตตาในการให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ และแก้ไขความบกพร่องในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ประเสริฐ สุวรรณวิทยา ที่กรุณาให้คำปรึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI) ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณบริษัทสยามฮาร์ดโครม จำกัด ที่อนุเคราะห์น้ำเสียเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโทและปริญญาเอกทุกท่าน เพื่อนร่วมรุ่นปริญญาโท รุ่นน้องปริญญาโท และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ อุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ท้ายที่สุดนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสุรศักดิ์ คุณแม่โสภิตา และน้องชายศิววัฒน์ของผู้เขียนที่ได้ให้การอบรม เลี้ยงดูและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ยศวรธรณ์ สุภวิทิตพัฒนา

มิถุนายน 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	39
สรุปและข้อเสนอแนะ	62
สรุป	62
ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	64
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์	70
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	76
ภาคผนวก ค การคำนวณ	89
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	92

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ	4
2	ปฏิกิริยาเคมีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการกำจัดโครเมียม	12
3	ปริมาณตะกอน ค่าพีเอชที่เหมาะสม และค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยการใช้สารเคมีต่างๆ	14
4	วิธีการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ	34
5	คุณสมบัติน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ	39
6	ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ	40
7	พลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพเชิงพลังงานที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ	47
8	กระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ ระยะห่างระหว่างขั้วและพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วต่างๆ	48
9	สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะก่อนบำบัดและหลังบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร	59
10	พลังงานไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าต่ออิกโครกรัม Cr^{6+} ที่ถูกกำจัด ที่สภาวะต่างๆ	60
ตารางผนวกที่		
ข1	ผลการทดลองขั้นต้น (Pre test) ที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ ในน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร	77
ข2	ผลการทดลองที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ ในน้ำเสียปริมาตร 3 ลิตร	82
ข3	ผลการทดลองที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ ในน้ำเสียปริมาตร 5 ลิตร	86

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 สถานะของ Cr^{3+} ที่ค่าพีเอชต่างๆ	11
2 ส่วนประกอบสำคัญของอิเล็กโทรไลซิส	16
3 ถึงปฏิบัติการระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบที่ละเทสำหรับการศึกษาขั้นต้น	31
4 ถึงปฏิบัติการระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบที่ละเทสำหรับศึกษาการแปรผันปริมาณน้ำเสีย	32
5 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	36
6 ขั้นตอนการศึกษาขั้นต้น (Pre Test) การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	37
7 ขั้นตอนการศึกษาการแปรผันปริมาณน้ำเสียโดยให้ค่า A/V ratio คงที่	38
8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Cr^{6+} คงเหลือกับเวลาที่ความต่างศักย์ต่างๆ	41
9 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาในการกำจัดโครเมียมที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ	43
10 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาในการกำจัดโครเมียมที่ระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ	44
11 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาในการกำจัดโครเมียมที่ระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ	46
12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Cr^{6+} คงเหลือกับเวลาที่ระยะห่างระหว่างขั้วและปริมาณน้ำเสียต่างๆ	50
13 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาในการกำจัดโครเมียมที่ระยะห่างระหว่างขั้วและปริมาณน้ำเสียต่างๆ	51
14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Cr^{6+} คงเหลือกับเวลาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและปริมาณน้ำเสียต่างๆ	52
15 ร้อยละการกำจัด Cr^{6+} และเวลาที่ใช้ในการบำบัดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วและปริมาณน้ำเสียต่างๆ	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ	55
17	องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนวิเคราะห์โดยเทคนิค X – ray diffraction	56
18	ปริมาณของแข็งละลายน้ำที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ	57
19	อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า	58
20	ประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับปริมาณน้ำเสีย 3 และ 5 ลิตร ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ	61
21	เปรียบเทียบลักษณะน้ำเสียก่อนบำบัด หลังบำบัดและน้ำกลั่น	61

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	แอมแปร์
cm	=	เซนติเมตร
cm ²	=	ตารางเซนติเมตร
Cr ³⁺	=	ไตรวาเลนต์ โครเมียม
Cr ⁶⁺	=	เฮกซะวาเลนต์ โครเมียม
Cr ₂ O ₇ ²⁻	=	ไดโครเมต
CrO ₄ ²⁻	=	โครเมต
Cr(OH) ₃	=	โครเมียมไฮดรอกไซด์
EC	=	กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)
$E_{\text{red(Anode)}}^0$	=	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันที่ขั้วแอโนด
$E_{\text{red(Cathode)}}^0$	=	ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันที่ขั้วแคโทด
$E_{\text{red(Anode)}}$	=	ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันที่ขั้วแอโนด
$E_{\text{red(Cathode)}}$	=	ค่าศักย์ไฟฟ้ารีดักชันที่ขั้วแคโทด
E^0	=	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า
E	=	ศักย์ไฟฟ้าของแต่ละครึ่งเซลล์
Fe	=	เหล็ก
F	=	ปริมาณไฟฟ้า (Faraday)
Fe ²⁺	=	เฟอร์รัสไอออน
Fe ³⁺	=	เฟอร์ริกไอออน
Fe(OH) ₂	=	เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์
Fe(OH) ₃	=	เฟอร์ริกไฮดรอกไซด์
FeCr ₂ O ₄	=	โครไมต์
H ⁺	=	ไฮโดรเจน ไอออน
H ₂	=	ก๊าซไฮโดรเจน
K ₂ Cr ₂ O ₇	=	โพแทสเซียมไดโครเมต
mA/cm ²	=	มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
n	=	จำนวนอิเล็กตรอน
OH ⁻	=	ไฮดรอกไซด์ไอออน

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

pH	=	ค่าความเป็นกรด
A/V ratio	=	พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำเสีย
°C	=	องศาเซลเซียส
e^-	=	อิเล็กตรอน
kW-hr/kg Cr ⁶⁺	=	ประสิทธิภาพในการกำจัด Cr ⁶⁺ เซิงพลังงาน (กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัมเฮกซะวาเลนต์โครเมียมที่ถูกกำจัด)

ประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการกำจัดโครเมียม (เฮกซะวาเลนต์) โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

Energy Efficiency of Hexavalent Chromium Removal by Electrocoagulation

คำนำ

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมมีการนำโครเมียมและสารประกอบโครเมียมมาใช้ประโยชน์ต่างๆ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมฟอกหนังและอุตสาหกรรมชุบโลหะ ซึ่งน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหล่านี้ทำให้เกิดการปนเปื้อนของโครเมียมในสิ่งแวดล้อม ความเป็นพิษของโครเมียมที่ปนเปื้อนในน้ำดื่ม ปริมาณและสถานะของโครเมียมที่เข้าสู่ร่างกาย โดยทั่วไปโครเมียมมักอยู่ในรูปของ Cr^{6+} และ Cr^{3+} ซึ่งสารประกอบ Cr^{6+} มีความเป็นพิษสูงและกระจายในแหล่งน้ำได้รวดเร็วกว่า Cr^{3+} เมื่อเกิดการสะสมในร่างกายแล้วจะทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายได้ทั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง นอกจากนี้ยังเป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์และเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดมลภาวะทางน้ำ จึงต้องทำการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดย Cr^{6+} ต้องมีความเข้มข้นไม่เกิน 0.25 มก./ล. และ Cr^{3+} ไม่เกิน 0.75 มก./ล. ตามประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)

กระบวนการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีทั้งกระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction) กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-Exchange) การดูดซับ (Adsorption) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จำเป็นต้องใช้สารเคมีทั้งสิ้น ส่งผลให้เกิดการเพิ่มปริมาณสารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อมและยังเสียค่าใช้จ่ายสูง

กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี หลักการพื้นฐานคือเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรงทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าลงสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า แผ่นเหล็กที่ขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ทำหน้าที่ปล่อยอิเล็กตรอนออกมา 2 ตัว พร้อมกับอนุภาคเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ขณะที่ขั้วแคโทด (ขั้วลบ) เกิดปฏิกิริยากับน้ำแตกตัวได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) กรณีที่น้ำเสียมิ

โลหะ เช่น Cr^{6+} ปนเปื้อนอยู่ผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากขั้วแอโนดและขั้วแคโทดทำให้ Cr^{6+} รับอิเล็กตรอน หรือถูกรีดิวซ์โดย Fe^{2+} ที่ละลายออกมาจากแผ่นเหล็กที่ขั้วแอโนด (Heidman และ Calmano, 2007) เพื่อรีดิวซ์กลายเป็น Cr^{3+} จากนั้น Cr^{3+} จะรวมตัวกับ Fe^{2+} เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน FeCr_2O_4 และสามารถรวมตัวกับ OH^- เกิดเป็นตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (Lakshmipathiraj *et al.*, 2007) ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้

งานศึกษาวิจัยนี้จึงนำกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) มาใช้ในการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{6+} เปรียบเทียบพลังงานเนื่องจากในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าต้องใช้พลังงานจากภายนอก จึงต้องคำนึงถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย โดยทำการทดลองในระบบที่ละเท (Batch) ในถังปฏิกิริยาที่มีการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโน โพลาร์ ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า แปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วและปริมาตรน้ำเสีย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{6+} ในเชิงพลังงาน
2. เพื่อหาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วที่มีต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงานในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation)
3. เพื่อเปรียบเทียบผลของการแปรผันปริมาตรของน้ำเสียโดยให้พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำเสีย (A/V ratio) มีค่าคงที่

ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในระบบที่ละเท (Batch) ในถังปฏิกริยาทำจากอะคริลิกใสขนาด 17 x 10 x 35 เซนติเมตรและ 10 x 10 x 15 เซนติเมตร ขั้วไฟฟ้าเป็นแผ่นเหล็กขนาด 15 x 27 เซนติเมตรและ 9.5 x 12 เซนติเมตร ตามลำดับ จัดเรียงขั้วแบบโมโนโพลาร์ (Monopolar)
2. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะโครเมียม มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} อยู่ในช่วง 600 มก./ล. และค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 2.5 – 3.5
3. ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ ระยะห่างระหว่างขั้ว ความต่างศักย์ไฟฟ้า และปริมาตรน้ำเสีย
4. ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (บางเขน)

การตรวจเอกสาร

1. คุณสมบัติของโครเมียม

โครเมียม (Cr) เป็นธาตุโลหะในหมู่ทรานซิชัน (Transition) มีเลขอะตอม 24 เลขมวล 51.996 จุดหลอมเหลว 1,900 °C จุดเดือด 2,672 °C ความหนาแน่น 7.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีเลขออกซิเดชันหลายค่าตั้งแต่ +2 จนถึง +6 แต่มีเพียง +3 (ไตรวาเลนต์, Cr³⁺) และ +6 (เฮกซะวาเลนต์, Cr⁶⁺) เท่านั้นที่เสถียร มี 4 ไอโซโทป คือ ⁵⁰Cr(4.345%), ⁵²Cr(83.789%), ⁵³Cr(9.501%) และ ⁵⁴Cr(2.365%) ในธรรมชาติจะไม่พบโครเมียมในรูปธาตุอิสระแต่จะพบในรูปสารประกอบ คือ แร่โครไมต์ (Chromite, FeCr₂O₄) เมื่อนำแร่นี้มาเผาโดยมีคาร์บอนเป็นตัวรีดิวซ์จะได้เฟอร์โรโครม (Ferrochrome) ซึ่งเป็นอัลลอยของเหล็กและโครเมียม

ตารางที่ 1 การใช้สารประกอบโครเมียมในอุตสาหกรรมต่างๆ

ประเภทของอุตสาหกรรม	สารประกอบโครเมียม	การนำไปใช้งาน
ก่อสร้าง	โครเมียมออกไซด์	สีทาอาคาร
เครื่องปั้นดินเผา	โครเมตของตะกั่ว สังกะสี และแบเรียม	ทำสีต่างๆ
อุตสาหกรรมการพิมพ์	ไดโครเมต, โครเมียม (VI) ออกไซด์	แผ่นพิมพ์
อุตสาหกรรมปิโตรเลียม	โครเมียม (VI)	ป้องกันสนิม
อุตสาหกรรมชุบโลหะ	โครเมียม (VI) ออกไซด์	สวยงาม, แข็งแรง
อุตสาหกรรมฟอกหนัง	โครเมียม (III) ซัลเฟต	ฟอกหนัง
อุตสาหกรรมสิ่งทอ	โครเมียม, โครเมียมอะซิเตต, โครเมียมฟลูออไรด์	สีย้อมผ้า

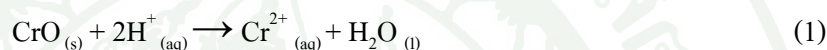
ที่มา: อนันต์ (2526)

เนื่องจากโครเมียมมีสีขาว ทนความร้อน และแข็งมาก สามารถต้านทานการกัดกร่อนและคงความสวยงามได้นานเมื่อทิ้งไว้ในอากาศ เพราะเกิดโครเมียมออกไซด์ (Cr₂O₃) เป็นชั้นบางๆบนผิวโลหะ จึงนิยมฉาบผิวเหล็กหรือโลหะอื่นด้วย นอกจากนี้โครเมียมยังสามารถนำไปทำอุปกรณ์รถยนต์และทำสแตนเลส (มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ 18% โดยมวล) สแตนเลสมีความแข็งแรง

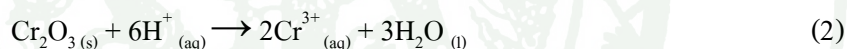
ทนทานต่อความร้อนและการกัดกร่อน นอกจากนี้ยังมีการนำโครเมียมมาใช้ประโยชน์ต่างๆ มากมายทั้งในด้านอุตสาหกรรมและในกระบวนการผลิตต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

สารประกอบออกไซด์ของโครเมียมมีสมบัติเป็นทั้งกรดและเบส โดยความเป็นกรดจะมากขึ้นเมื่อเลขออกซิเดชันของโครเมียมมีค่าสูงขึ้น ตัวอย่างสารประกอบออกไซด์ของโครเมียม ได้แก่

CrO (Chromium (II) oxide) มีสมบัติเป็นเบส เมื่ออยู่ในสารละลายเบสหรือสารละลายที่เป็นกลางจะเกิดตะกอนของโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Chromium (II) hydroxide, Cr(OH)₂) แต่ถ้าอยู่ในสารละลายกรดจะเกิดการละลายและให้ Cr²⁺ ดังสมการ



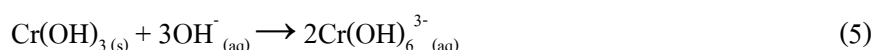
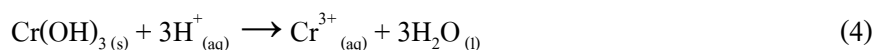
Cr₂O₃ (Chromium (III) oxide) มีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก (amphoteric) เมื่อละลายในสารละลายกรดให้สารละลายสีม่วงของ Cr³⁺ ดังสมการ



แต่เมื่อละลายในสารละลายเบสเกิดสารละลายสีเขียวของ Cr(OH)₄⁻ ดังสมการ

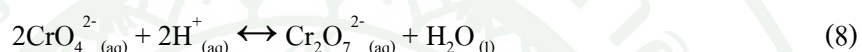
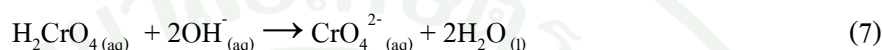


นอกจาก Cr₂O₃ มีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริกแล้ว สารประกอบโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Chromium (III) hydroxide, Cr(OH)₃) ก็มีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริกด้วย เมื่อ Cr(OH)₃ ทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดและเบสจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ

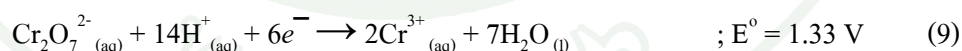


Cr(OH)₆³⁻ เป็นสารละลายสีเขียวเข้ม ถ้าเติมกรดลงไปจะเกิดตะกอนสีเขียวของ Cr(OH)₃

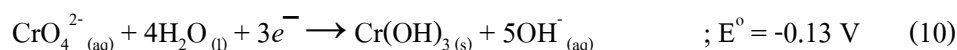
CrO_3 (Chromium (VI) oxide) มีสมบัติเป็นกรด มีสีแดงเข้มเมื่อละลายในน้ำได้สารละลายกรดโครมิก (H_2CrO_4) เมื่ออยู่ในสารละลายเบส กรดโครมิกจะปรากฏเป็นสีเหลืองของโครเมต (CrO_4^{2-}) แต่เมื่ออยู่ในสารละลายกรด โครเมต (CrO_4^{2-}) จะเปลี่ยนเป็นไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ดังสมการที่ 8 โดยสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของสารละลายจากสีเหลืองไปเป็นสีส้ม



จากสมการเห็นว่าความเข้มข้นของ H^+ มีบทบาทสำคัญในการควบคุมสมดุลของปฏิกิริยา ถ้าความเข้มข้นของ H^+ ต่ำ (ค่าพีเอชของสารละลายมีค่าสูงขึ้น) สมดุลจะเลื่อนมาทางซ้ายมือของสมการทำให้โครเมต (CrO_4^{2-}) มีปริมาณมากสารละลายจึงมีสีเหลือง ในทางกลับกันถ้ามีความเข้มข้นของ H^+ สูง (ค่าพีเอชของสารละลายมีค่าต่ำ) สมดุลจะเลื่อนไปทางขวามือของสมการทำให้ไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) มีปริมาณมากขึ้น สารละลายจึงเป็นสีส้ม (House, 2008) จากการที่สารประกอบของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) มีสีสว่างสดใสจึงนิยมนำไปใช้เป็นสารให้สี (pigment) สำหรับงานวาดภาพศิลปะและเครื่องเคลือบเซรามิกต่างๆ เช่น PbCrO_4 ใช้เป็นส่วนผสมของสีน้ำมัน นอกจากนี้ยังเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงในสถานะที่มีความเป็นกรด โดยที่ Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์ไปเป็น Cr^{3+} ดังสมการ



ปฏิกิริยานี้ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของเหล็กในตัวอย่างน้ำหรือดินโดย $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ถูกรีดิวซ์และเปลี่ยนเฟอร์รัส (Fe^{2+}) ให้กลายเป็นเฟอร์ริก (Fe^{3+}) ในสารละลายกรด สำหรับสารประกอบ CrO_4^{2-} ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อนกว่า $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ เกิดปฏิกิริยาเคมีดังสมการที่ 10 ได้เป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ



2. ความเป็นพิษของโครเมียม

ความเป็นพิษของโครเมียมนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณและสถานะของโครเมียมที่เข้าสู่ร่างกาย โดยทั่วไปโครเมียมมักอยู่ในรูปของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) และไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+}) ซึ่งสารประกอบ Cr^{6+} มีความเป็นพิษต่อร่างกายมากกว่า Cr^{3+} โดยทำให้เกิดผลกระทบต่อร่างกายได้หลายรูปแบบทั้งแบบเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง ซึ่งอันตรายที่เกิดจากโครเมียม อาจเกิดได้ดังต่อไปนี้ (อนันต์, 2526 และสุรภิ, 2526)

แผลจากโครเมียม (Chrome ulcers) เกิดจากการสะสมของฝุ่นละอองของโครเมียม ซึ่งโดยมากจะเริ่มที่รอยถลอกของผิวหนังและพบมากที่สุดบริเวณ โคนเล็บมือ ตามข้อนิ้วมือหรือที่หลังเท้า ลักษณะคล้ายถูกเจาะด้วยตะปู ถึงแม้ว่าแผลนี้จะไม่เจ็บปวด แต่จะคันอย่างมากในเวลากลางคืน หลังจากนั้นแผลอาจเกิดการติดเชื้อขึ้น และอาจลุกลามไปยังข้อต่อข้างเคียง อาจทำให้ต้องตัดนิ้วทิ้งได้

ผนังกั้นในจมูกถูกเจาะ (Perforation of the Nasal Septum) เกิดขึ้นกับผู้ที่สูดเอาโครเมียมเข้าสู่ร่างกายอยู่เป็นประจำและเป็นเวลานาน ทำให้ผนังกั้นในจมูกถูกทำลายจนเป็นรูทะลุ ซึ่งการทะลุนี้จะไม่รู้สึกเจ็บปวดแต่อย่างไรจะรู้สึกตัวก็ต่อเมื่อมีเสียงอู้อี้หรือดั่งจุมกแบนลง หากสูดดมเอาฝุ่นของโครเมียมเข้าสู่ร่างกายเป็นเวลานาน อาจทำให้เป็นมะเร็งปอดได้

ผิวหนังอักเสบ (Dermatitis) บริเวณที่เกิดการอักเสบได้แก่ มือ แขน ใบหน้าและหน้าอก อาจเกิดขึ้นเมื่อทำงานมาแล้วประมาณ 6 เดือน ในรายที่รุนแรง ใบหน้าอาจมีสีแดงเข้มและบวม ส่วนที่อักเสบจะเกิดอาการคันและเจ็บแสบมาก

อาชีพที่เสี่ยงต่อการเกิดโรคจากโครเมียม ได้แก่ อุตสาหกรรมชุบและเคลือบโลหะ การผลิตโลหะผสม (Alloy) การฟอกหนัง การผลิตสีและการผลิตซีเมนต์ เป็นต้น ผู้ที่ประกอบอาชีพเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเหล่านี้มีความเสี่ยงที่จะได้รับโครเมียมอยู่ตลอดเวลา โครเมียมหรือสารประกอบของโครเมียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของฝุ่นและควันซึ่งจะเข้าสู่ร่างกายได้โดย

2.1 ทางจมูก โดยการสูดหายใจเอาผงและควันของกรดโครมิกซึ่งส่วนใหญ่จะตกค้างบริเวณจมูกและทำอันตรายแก่กระดูกอ่อนที่กั้นระหว่างจมูกและอาจเข้าไปถึงปอด ซึ่งจะทำให้เกิดมะเร็งได้

2.2 ทางผิวหนัง ผู้ที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับโครเมียมจะได้รับฝุ่นละอองหรือควันของโครเมียม ซึ่งเมื่อโครเมียมถูกดูดซึมเข้าทางผิวหนังจะทำปฏิกิริยากับโปรตีนในร่างกายทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนังหรือแผลที่เกิดจากโครเมียมเนื่องจากเกิดการสะสมของฝุ่นละอองโครเมียมจะทำให้เกิดอาการคันตามจุดที่เกิดการสะสม นอกจากนี้ยังเป็นสารที่ก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ (Mutation) และเป็นสารก่อมะเร็งด้วยเพราะจะไปรบกวนกระบวนการสังเคราะห์ดีเอ็นเอ (DNA) ในเซลล์

เมื่อเปรียบเทียบโครเมียมใน 2 รูป พบว่า Cr^{6+} สามารถละลายน้ำได้ดีกว่า ทำให้เคลื่อนที่ได้ดีและมีความเป็นพิษสูง ทำให้ต้องมีการกำหนดปริมาณโครเมียมในน้ำที่มาจากโรงงาน โดยน้ำที่โรงงานต้องมีปริมาณ Cr^{6+} ไม่เกิน 0.25 มก./ล.และปริมาณ Cr^{3+} ไม่เกิน 0.75 มก./ล.เพื่อความปลอดภัยของประชาชน

3. อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับโครเมียม

ในภาคอุตสาหกรรมมีการใช้โลหะโครเมียมและสารประกอบของโครเมียมเป็นจำนวนมาก ซึ่งอุตสาหกรรมที่เป็นสาเหตุให้เกิดการปนเปื้อนของโครเมียมในแหล่งน้ำมากที่สุดคือ อุตสาหกรรมชุบโลหะและอุตสาหกรรมฟอกหนัง

3.1 การชุบโลหะโครเมียมด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electroplating) เป็นกระบวนการที่นำโลหะโครเมียมไปเคลือบติดบนโลหะอีกชนิดหนึ่ง โดยการใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีเพื่อให้เกิดความคงทน ป้องกันการกัดกร่อน โดยการจุ่มชิ้นงานที่ต้องการชุบลงในบ่อน้ำยาชุบแล้วต่อชิ้นงานเข้ากับขั้วลบ (Cathode) และมีตัวล่อต่อกับขั้วบวก (Anode) ของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าสลับเป็นกระแสตรง เมื่อไฟฟ้าครบวงจรไอออนของโลหะจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วลบซึ่งเป็นชิ้นงานแล้วรับอิเล็กตรอนที่ฝั่งของชิ้นงาน เกิดการเกาะจับของโลหะหรือกลายเป็นโลหะเคลือบติดบนผิวของชิ้นงาน ส่วนใหญ่นำมาใช้ในการเคลือบผิวของวัสดุที่ใช้ในการประกอบรถยนต์

3.2 การฟอกหนัง (Tanning) เป็นกระบวนการที่ใช้สารเคมีเช่น โครเมียมและสารเคมีอื่นๆ ไปทำปฏิกิริยากับโปรตีนในหนังให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพให้เป็นหนังที่ไม่เน่าเปื่อย กระบวนการฟอกหนังที่ใช้โครเมียมจะใส่สารประเภทโครม (Chrome) ลงไปเป็นตัวฟอกเช่น เกลือของโครเมียม จะไปทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงสภาพของหนังจากนั้นปริมาณของโครเมียมที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะถูกปล่อยทิ้งไปกับน้ำเสีย

4. น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโลหะ

ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้ามีหลายขั้นตอน เช่น เตรียมผิวของชิ้นงานก่อนชุบ การชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้าและการทำความสะอาดผิวหลังการชุบเป็นต้น ซึ่งในแต่ละขั้นตอนมีการใช้กรด ต่าง และสารเคมีต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของน้ำยาที่ใช้ชุบโลหะ แต่อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่เกิดจากการชุบชิ้นงานส่วนใหญ่มาจากขั้นตอนการชุบและการล้างชิ้นงานภายหลังการชุบ น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะมีโลหะหนักที่ใช้เป็นตัวชุบเคลือบปะปนอยู่

ขั้นตอนการชุบ โลหะ

1. ตรวจสอบผิวงานแล้วปิดด้วยผิวพลาสติกใสบริเวณตำแหน่งที่ใช้งาน นำไปล้างคราบน้ำมัน โดยใช้น้ำยาล้าง ทาทิ้งไว้ประมาณครึ่งชั่วโมงแล้วจึงใช้ปั้มน้ำแรงดันสูงฉีดล้างคราบน้ำมันให้สะอาด
2. นำชิ้นงานที่ล้างเสร็จเรียบร้อยแล้วไปแช่ในเบ้าคราบน้ำให้แห้ง เสร็จแล้วขัดผิวงานด้วย ลูกฟ้าลูกป้อและลูกฟ้าทรายละเอียด
3. หลังจากขัดงานเรียบร้อยแล้วทำการล้างด้วยทินเนอร์และผงเคลือบคาร์บอนเพื่อทำความสะอาดดูดซับฝุ่นและความชื้น หลังจากนั้นปิดด้วยพลาสติกใสเตรียมขั้วแอ โนดวางบนชิ้นงาน
4. ยกชิ้นงานลงบ่อชุบ ทำการติดตั้งขั้วแอ โนดเข้ากับชิ้นงานหลังจากนั้นจึงปล่อยน้ำยาชุบเข้ามาในบ่อให้ท่วมชิ้นงานตามสัดส่วนของชิ้นงานแต่ละชิ้น

5. ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าในบ่อชุบใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ทั้งนี้เวลาที่ใช้นั้นขึ้นอยู่กับความหนาของฟิวฮาร์ดโครม (Hard Chrome) ที่ต้องการ

6. หลังจากชุบครบ 3 ชั่วโมงทำการปิดกระแสไฟฟ้าทั้งหมด ปล่อน้ำยาลงบ่อเก็บ นิดน้ำล้างคราบน้ำยา

7. นำชิ้นงานออกจากบ่อชุบ ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำและทินเนอร์

8. เป่าด้วยลมให้แห้ง ตรวจสอบความหนาของผิว แล้วทำการตกแต่งผิวของชิ้นงาน

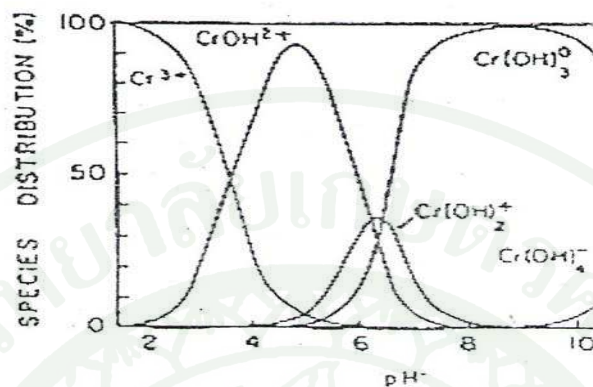
9. ตรวจสอบเช็คความเรียบร้อยของผิวงาน ทาน้ำมัน แล้วหุ้มด้วยพลาสติก เตรียมพร้อมส่งงาน
คุณลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

การปนเปื้อนของโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโครเมียมเกิดจากน้ำล้างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการชุบมาแล้ว น้ำเสียจากการล้างชิ้นงานในบริเวณที่ทำการชุบหรือจากน้ำยาชุบที่หกออกจากถังขณะปฏิบัติงาน ซึ่งปริมาณโครเมียมที่ปนอยู่ในน้ำเสียจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ใช้ล้าง ปริมาณน้ำยาที่ใช้ในกระบวนการชุบ การป้องกันการหยดหรือการรั่วของน้ำยาชุบและปริมาณของชิ้นงานที่นำมาชุบในแต่ละวันสารประกอบโครเมียมที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจะอยู่ในรูปของ Cr^{6+} ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและไม่ตกตะกอนจึงจำเป็นต้องบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

5. โครเมียมในน้ำเสีย

โครเมียมในน้ำเสียส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ Cr^{3+} และ Cr^{6+} ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดย Cr^{6+} มักอยู่ในรูปของโครเมต (CrO_4^{2-}) และไดโครเมต ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ส่วน Cr^{3+} ที่อยู่ในน้ำมักอยู่ในรูปต่างๆ เช่น Cr^{3+} , $\text{Cr}(\text{OH})_3$, $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$, $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$ และ $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ โดย Cr^{3+} จะพบในช่วงพีเอชต่ำกว่า 3.6 เท่านั้นและที่พีเอชประมาณ 8.5 จะอยู่ในรูปตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ดังภาพที่ 1 นอกจากนี้ Cr^{6+} มีความสามารถในการละลายในน้ำและมีความเป็นพิษมากกว่า Cr^{3+} (Weiner, 2007) จึงมีการกำหนดระดับ Cr^{6+} ในน้ำทิ้งจากโรงงานต้องมีปริมาณ Cr^{6+} ไม่เกิน 0.25 มก./ล.เพื่อ

ความปลอดภัยของประชาชน (ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3, 2539)



ภาพที่ 1 สถานะของ Cr^{3+} ที่พีเอชต่างๆ

ที่มา: Rai *et al* (1987)

6. กระบวนการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย

6.1 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation Process) เป็นการเติมสารที่เป็นด่างเช่น ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้เป็นอย่างมากเพราะมีราคาถูก ง่ายต่อการควบคุมและการทำงาน แต่มีข้อเสียคือต้องมีกระบวนการบำบัดตะกอนมารองรับและไม่สามารถนำโลหะเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ หรือหากจะนำกลับมาใช้ก็ต้องใช้กระบวนการที่ยุ่งยากและซับซ้อนมารองรับ โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมอยู่ในช่วง 8.0 – 11.0 (สารโรช, 2536)

6.2 กระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction Reaction) เป็นการเติมสารเคมีลงไปในการทำปฏิกิริยากับโลหะโครเมียมในน้ำเสียเปลี่ยนเป็นสารประกอบอื่นๆ ที่ไม่เป็นพิษ หลังจากนั้นเติมปูนขาวลงไปให้เกิดการตกตะกอนในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ในสถานะที่เป็นด่าง สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันได้แก่ เฟอร์รัสซัลเฟต, โซเดียมเมตาไบซัลไฟต์, ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งวิธีการนี้จะคล้ายกับวิธีการตกตะกอนทางเคมี แต่ข้อเสียของ

กระบวนการนี้คือปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณโครเมียมในน้ำเสีย ส่งผลให้เกิดตะกอนจำนวนมากจึงต้องทำให้เสียค่าใช้จ่ายในกระบวนการกำจัดตะกอนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 ปฏิกริยาเคมีต่างๆที่เกิดขึ้นในการกำจัดโครเมียม

Reducing agent	ปฏิกริยาเคมี
Ferrous sulfate	$2\text{H}_2\text{CrO}_4 + 6\text{FeSO}_4 + 6\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$
Sodium metabisulfite	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaHSO}_3$ $2\text{H}_2\text{CrO}_4 + 2\text{NaHSO}_3 + 3\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{NaHSO}_4 + 5\text{H}_2\text{O}$ $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$
Sulpherdioxide	$\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ $2\text{H}_2\text{CrO}_4 + 3\text{H}_2\text{SO}_3 \rightarrow \text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 + 3\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow 2\text{Cr}(\text{OH})_3 + 3\text{CaSO}_4$

ที่มา: มั่นสิน (2542)

สาโรช (2536) ได้เปรียบเทียบการใช้โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์กับเฟอร์รัสซัลเฟตในการรีดิวซ์โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ และเปรียบเทียบการใช้ปูนขาวกับโซดาไฟในการกำจัดโครเมียม พบว่า การใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเสียค่าใช้จ่ายมากกว่าโซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ เนื่องจากเกิดปริมาณของตะกอนมากกว่า และค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมของปูนขาวและโซดาไฟมีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 8 – 11 แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่าย การใช้ โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์ ร่วมกับโซดาไฟจะเสียค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 3

6.3 กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสียที่มีโครเมียมปนเปื้อนอยู่โดยอาศัยแรงดันออสโมซิสให้ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Semi Permeable Membrane) ซึ่งมีคุณสมบัติยอมให้เฉพาะ โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ผ่านไปได้เท่านั้น โดยโมเลกุลของน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นมาก (ในน้ำเสีย) ไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อยกว่า ซึ่งทำให้โลหะโครเมียมไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านไปได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่สะอาดและน้ำเสีย

ตารางที่ 3 ปริมาณตะกอน ค่าพีเอชที่เหมาะสมและค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยการใช้สารเคมีต่างๆ

สารเคมี	ปริมาณตะกอน (มล.ต่อ 500 มล.)	ค่าพีเอชที่เหมาะสม	ค่าใช้จ่าย (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{NaOH}$	170	9.0 – 11.0	248.4
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 + \text{Ca}(\text{OH})_2$	265	8.5 – 11.0	310.5
$\text{FeSO}_4 + \text{NaOH}$	360	8.0 – 11.0	1,020.4
$\text{FeSO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2$	280	8.0 – 11.0	755.6

มีความเข้มข้นสูง การบำบัดโดยวิธีนี้ต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อน โดยการปรับค่าพีเอชและกรองสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเยื่อเลือกผ่าน

6.4 กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) นิยมใช้เรซินเป็นตัวจับไอออน

โดยทั่วไปเรซินจะประกอบด้วย Strong acid cation exchange และ Strong base anion exchange ต่อกันแบบอนุกรมเพื่อจับไอออนบวกและไอออนลบในน้ำเสียทำให้น้ำเสียที่ผ่านระบบแลกเปลี่ยนไอออนแล้วปราศจากอนุผลของโลหะ ซึ่งสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำได้โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม วิธีนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะที่มีปริมาณน้อย แต่มีข้อจำกัดคือ ต้องมีการทำการฟื้นฟูสภาพ (Regenerate) เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของเรซินหลังจากการถูกใช้ไป นอกจากนี้ต้องทำการกำจัดสารเจือปนชนิดอื่นออกไปก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน ดังนั้นการติดตั้งระบบบำบัดเบื้องต้นจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับกระบวนการนี้

พุทธิสาร(2538) ใช้เรซินแบบ Strong base anion exchange (SBA) ในการแยกโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของโครเมียมและอัตราการไหลของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนจะลดลง โดยสภาวะที่เหมาะสม คือ น้ำเสียควรมีความเข้มข้นของโครเมียมไม่เกิน 1,000 มก.ต่อลิตร อัตราการไหลผ่านเรซินที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 10 – 40 BV/hr

คลเดช (2539) บำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะขนาดเล็กด้วยเรซินแบบ SBA พบว่า สามารถบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐาน โดยความเข้มข้นของโครเมียมไม่เกิน 650 มก.ต่อลิตร และเวลากักพักในชั้นเรซินต้องมากกว่า 3 นาที

6.5 วิธีการดูดซับ (Adsorption) เป็นการดึงดูดซับของโครเมียมในน้ำเสียมาเกาะติดบนผิวของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงทำให้โครเมียมสามารถดูดซับที่ผิวได้มาก นอกจากนี้ยังมีการใช้ไคโตซาน (chitosan) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์พอลิเมอร์ ที่ได้มาจากเปลือกของสัตว์ประเภทกุ้งและปูเป็นสารดูดซับโครเมียม ทำให้อัตราการดูดซับโครเมียมที่อยู่ในน้ำเสียลดลง (Elwakeel, 2010)

6.6 กระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าเคมี (Electrocoagulation) เป็นกระบวนการที่สารสร้างตะกอนถูกผลิตขึ้นในระบบที่ขั้วแอโนด (Anode) ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกและเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่ขั้วแคโทด (Cathode) ในกระบวนการนี้ Cr^{6+} ในน้ำเสียจะถูกรีดิวซ์ให้เป็น Cr^{3+} และรวมตัวกับ OH^- เกิดเป็นตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ทำให้ค่าพีเอชของระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสามารถตกตะกอนและแยกตะกอนออกจากน้ำเสียได้ ข้อดีของกระบวนการนี้คือไม่มีการเติมสารเคมีใดๆ เพื่อใช้ในการตกตะกอนจึงไม่มีปัญหามลพิษที่ตามมาจากการเติมสารเคมีและมีปริมาณตะกอนน้อยกว่ากระบวนการตกตะกอนทางเคมี และกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชัน (Mollah และคณะ, 2001 และ Chen, 2004)

7. ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า

เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) เป็นสาขาหนึ่งของวิชาเคมี ว่าด้วยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ซึ่งปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทุกปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอน นั่นคือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันจะถูกแยกออกจากกัน การศึกษากระบวนการทางเคมีไฟฟ้าจะศึกษาภายในเซลล์ (Cell) ซึ่งเซลล์เคมีไฟฟ้าสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) คือ เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชันเกิดขึ้นได้เองแล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ปฏิกิริยาทั้งสองถูกแยกออกจากกันโดยมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนผ่านวงจรภายนอก ตัวอย่างของเซลล์กัลวานิกที่รู้จักกันดี ได้แก่ ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่รถยนต์ ของเล่นและเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

- เซลล์อิเล็กโทรไลติก (Electrolytic cell) คือ เซลล์เคมีไฟฟ้าที่ต้องใช้พลังงานกระแสไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเองไม่ได้

7.1 ความรู้ทั่วไปของอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) คือ กระบวนการใช้พลังงานไฟฟ้าภายนอกซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสตรงไปยังขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี โดยที่ขั้วไฟฟ้าที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ลง ไปจะมีคุณสมบัติเป็นขั้วลบ (Negative electrode) เรียกขั้วนี้ว่า ขั้วแคโทด (Cathode) เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ส่วนขั้วไฟฟ้าตรงข้ามเกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน เนื่องจากถูกดูดอิเล็กตรอนจึงมีคุณสมบัติเป็นขั้วบวก (Positive electrode) เรียกขั้วนี้ว่า ขั้วแอโนด (Anode) อีออนลบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนดเพื่อให้อิเล็กตรอนทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเมื่อต่อครบวงจรแล้วทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันหรือที่เรียกกันว่าปฏิกิริยารีดอกซ์

ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการนี้คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก, สารละลายอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก เป็นส่วนที่ควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ โดยกระแสไฟฟ้าภายนอกจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าผลักดันให้อิเล็กตรอนในเส้นลวดเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า

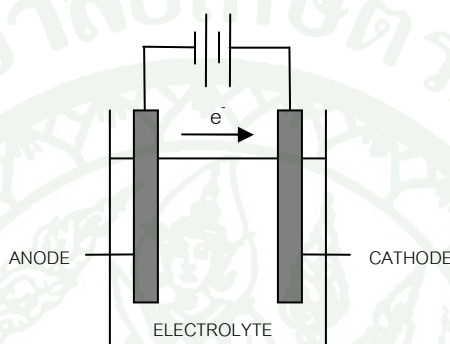
สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลายซึ่งไอออนเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ซึ่งคุณสมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น ความเข้มข้น, ความเป็นกรด-ด่าง, อุณหภูมิ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของปฏิกิริยาและกระบวนการ

ขั้วไฟฟ้า เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและเชื่อมต่อระหว่างแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยจะนำอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและสารละลายทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า เรียกขั้วไฟฟ้าแบบนี้ว่า ขั้วไฟฟ้าโลหะ (Metal electrode) ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

- ขั้วไฟฟ้าเฉื่อย (Inert electrode) ประกอบด้วยแท่งโลหะเฉื่อยซึ่งขั้วไฟฟ้าชนิดนี้จะให้อิเล็กตรอนและแตกตัวเป็นไอออนได้ยาก จึงนิยมใช้เป็นขั้วเพื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านและ

เกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าของขั้วเท่านั้นจึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นขั้วแอโนด ได้แก่ แพลทินัม (Pt), ทอง (Au), คาร์บอน (C) เป็นต้น

- ขั้วไฟฟ้าแอคทีฟ (Active electrode) ขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ให้อิเล็กตรอนและแตกตัวเป็นไอออนได้ง่าย ดังนั้นขั้วไฟฟ้าจึงอาจถูกออกซิไดซ์เพื่อให้ไอออนจากขั้วไฟฟ้าออกมาปะปนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบสำคัญของอิเล็กโทรไลซิส

7.2 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้า (E°)

การวัดศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าเดี่ยวๆ ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ แต่หากเลือกให้ขั้วไฟฟ้าชนิดใดชนิดหนึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์ จะทำให้สามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าสัมพันธ์กับขั้วไฟฟ้าอื่นๆ ได้ ขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจนถือเป็นขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน ถูกกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์โวลต์ (เมื่อมีการผ่านแก๊สไฮโดรเจนภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศ ลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่มีความเข้มข้น 1 M โดยมีแพลทินัมทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยารีดักชันของ H^+ ที่ $25^\circ C$ มีค่าเท่ากับศูนย์โวลต์พอดี) เรียกว่า ศักย์รีดักชันมาตรฐาน (Standard reduction potential)



7.3 สมการเนินสต์ (Nernst equation)

หากนำขั้วไฟฟ้าของแต่ละครึ่งเซลล์มาต่อกับขั้วไฟฟ้าไฮโดรเจน โดยที่สารละลายอิเล็กโทรไลต์มีความเข้มข้นต่างกัน พบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสามารถอธิบายได้ง่ายๆว่า เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น อีออนในสารละลายย่อมมีจำนวนมากการส่งผ่านอิเล็กตรอนข้ามผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าย่อมเกิดได้ดีขึ้น



เมื่อ A และ B เป็นสารตั้งต้น; C และ D เป็นผลิตภัณฑ์; a, b, c และ d เป็นเลขปรับสมดุลของปฏิกิริยา

คำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าของครึ่งเซลล์นั้นๆ ได้จากสมการเนินสต์ ดังสมการ

$$E = E^0 - \left(\frac{0.059}{n} \right) \log \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (13)$$

โดยที่ E คือ ศักย์ขั้วไฟฟ้าของแต่ละครึ่งเซลล์ (โวลต์)

E^0 คือ ศักย์ขั้วไฟฟ้ามาตรฐาน (โวลต์)

n คือ จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยา

จากสมการเนินสต์สามารถนำมาหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (E_{cell}) ได้

$$E_{\text{cell}} = E_{\text{red (cathode)}} - E_{\text{red (anode)}} \quad (14)$$

โดย $E_{\text{red (cathode)}}$ และ $E_{\text{red (anode)}}$ คือศักย์ขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนดที่อยู่ในรูปปฏิกิริยารีดักชัน

ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด

$$E_{\text{red}} = E_{\text{red}}^0 - \left(\frac{0.059}{n} \right) \log \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (15)$$

ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด

$$E_{oxi} = E_{oxi}^0 - \left(\frac{0.059}{n} \right) \log \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \quad (16)$$

การคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าตามสมการเนินสต์ ที่ขั้วแอโนดเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันต้องเปลี่ยน E_{oxi} ที่คำนวณเป็น E_{red} ก่อนจึงสามารถนำไปหาค่า E_{cell} ได้ จึงเขียนค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดที่ขั้วแอโนดในรูปปฏิกิริยารีดักชันได้เป็น $E_{red (anode)}$

ในการหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์อิเล็กโทรไลต์เป็นไปได้ในทางทฤษฎีเท่านั้น ยังไม่ใช่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่แท้จริงเนื่องจากยังมีปัจจัยที่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ เช่น Concentration polarization เกิดจากความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์รอบๆ ขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปขณะเกิดกระบวนการไฟฟ้าเคมี ทำให้เกิดความต่างศักย์สูงขึ้น (Over voltage) เนื่องจากผลของอัตราเร็ว เช่น การไหลของการถ่ายเทอิเล็กตรอนช้าลง ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกินตัวจะขึ้นกับชนิดของขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขั้วไฟฟ้า อุณหภูมิ แต่กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้สามารถลดลงได้ ถ้ากวนสารละลายให้คงที่อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นในปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้ต้องมีศักย์ไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้ปฏิกิริยานั้นดำเนินไปได้ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันจึงถูกนำมาใช้ในการพิจารณาดังสมการที่ 17

$$E_{cell}^0 = E_{red (cathode)}^0 - E_{red (anode)}^0 \quad (17)$$

โดย ค่า $E_{red (cathode)}^0$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันที่ขั้วแคโทด

ค่า $E_{red (anode)}^0$ คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานรีดักชันที่ขั้วแอโนด

หากค่า E_{cell}^0 มีค่าเป็นลบ นั้นหมายความว่าปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดขึ้นเองได้ ต้องมีการใช้พลังงานจากภายนอกเป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี

ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการไฟฟ้าเคมีของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 1 M เมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเฉื่อย พิจารณาความสามารถในการรีดิวซ์ของ Na^+ กับ H_2O ที่ขั้วแคโทด และความสามารถในการให้อิเล็กตรอนของ Cl^- กับ H_2O ตามสมการของแต่ละครึ่งปฏิกิริยา

ขั้วแคโทด :



ขั้วแอโนด :



เมื่อพิจารณาที่ขั้วแคโทดเลือกครึ่งปฏิกิริยาของการเกิดแก๊สไฮโดรเจนเพราะน้ำสามารถรับอิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าโซเดียม ขณะเดียวกันที่ขั้วแอโนดเลือกครึ่งปฏิกิริยาของการเกิดแก๊สคลอรีนเพราะสามารถให้อิเล็กตรอนได้ง่ายกว่า ดังนั้นจะได้ดังสมการที่ 22



ซึ่งสามารถหาค่าความต่างศักย์ในการเกิดปฏิกิริยาได้จาก

$$\begin{aligned} E_{\text{cell}}^{\circ} &= E_{\text{red (cathode)}}^{\circ} - E_{\text{red (anode)}}^{\circ} \\ &= -0.83 - 1.36 \\ &= -2.19 \text{ V} \end{aligned}$$

ดังนั้นต้องใช้ความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอกอย่างน้อยที่สุด 2.19 โวลต์ จึงเกิดปฏิกิริยาได้

7.4 กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law)

ไมเคิล ฟาราเดย์ (Michael Faraday) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมี

เกี่ยวข้องกับจำนวนอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์และระยะเวลา เช่น ปฏิกิริยารีดักชันของโลหะเงิน (Ag) และทองแดง (Cu) ดังสมการ



จากสมการจะเห็นว่า Ag^+ หนึ่งโมลไอออนจะได้รับอิเล็กตรอน 1 โมลแล้วได้โลหะเงินหนึ่งโมล มีน้ำหนัก 107.87 กรัม ส่วน Cu^{2+} หนึ่งโมลไอออนจะได้รับอิเล็กตรอน 2 โมลแล้วได้โลหะทองแดงหนึ่งโมล มีน้ำหนัก 64 กรัม เนื่องจากจำนวนอิเล็กตรอนมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฟฟ้าโดยตรง ดังนั้นในปฏิกิริยารีดักชันของทองแดง เพื่อให้ได้ทองแดงหนึ่งโมลต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าเป็น 2 เท่าของปริมาณไฟฟ้าที่ใช้กับปฏิกิริยารีดักชันของโลหะเงิน ปริมาณไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไปในเซลล์อิเล็กโทรไลซิสเพื่อให้ได้อิเล็กตรอน 1 โมลทำปฏิกิริยารีดอกซ์ เรียกว่า 1 ฟาราเดย์ (Faraday: F) ดังนั้นต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์เพื่อให้ไอออนของโลหะเงินหนัก 107.87 กรัมและต้องใช้ปริมาณไฟฟ้าถึง 2 เท่าฟาราเดย์เพื่อให้ได้ทองแดงหนัก 64 กรัม ปริมาณไฟฟ้ามีหน่วยเป็นคูลอมบ์ หาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = It \quad (25)$$

เมื่อ Q เป็นปริมาณไฟฟ้าในหน่วยคูลอมบ์ (C)

I เป็นกระแสไฟฟ้าในหน่วยแอมแปร์ (A)

t เป็นหน่วยเวลาในหน่วยวินาที (s)

ปริมาณไฟฟ้าหนึ่งฟาราเดย์เป็นผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งโมล เนื่องจากประจุของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.60210×10^{-19} คูลอมบ์ ดังนั้น

$$F = e N_A \quad (26)$$

$$= (1.60210 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02252 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \quad (27)$$

$$= 96,487 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} \quad (28)$$

เมื่อ F เป็นปริมาณไฟฟ้าในหน่วยฟาราเดย์

e^- เป็นประจุอิเล็กตรอนในหน่วยคูลอมบ์

N_A เป็นเลขอาโวกาโด

ดังนั้น 1 ฟาราเดย์มีค่าเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ ซึ่งปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันมีความสัมพันธ์กับปริมาณไฟฟ้าหรือจำนวนฟาราเดย์ สรุปเป็นกฎอิเล็กโทรไลซิสของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Electrolysis) ได้ดังนี้

- ปริมาณของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดหรือแคโทดที่เกิดจากกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่เข้าไปในเซลล์
- ปริมาณของสารที่ต่างกันที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้ปริมาณไฟฟ้าเท่ากันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าค่าหนึ่งและปริมาณของโลหะที่เกิดปฏิกิริยานั้นสามารถวัดได้โดยการใช้กฎของฟาราเดย์ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$m = \frac{I \times t \times M}{nF} \quad (29)$$

เมื่อ m เป็นปริมาณของโลหะที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี (g)

I เป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (A)

t เป็นเวลาที่ใช้ (s)

n เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยารีดอกซ์

F เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์

M เป็นมวลโมเลกุล

สมการดังกล่าวจะใช้ได้เมื่อเป็นกระบวนการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่ แต่ในกรณีที่กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองไม่คงที่ ต้องหาค่ากระแสไฟฟ้าโดยประมาณตลอดการทดลองดังนี้

$$Q = \int I dt \quad (30)$$

7.5 การเกิดได้เองของปฏิกิริยารีดอกซ์ (ΔG)

ในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เองคือพลังงานที่นำไปใช้ทำงานได้ ในความจริงแล้ว กระบวนการที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความดันคงที่อาจเขียนได้ว่า

$$\Delta G = w_{\max} \quad (31)$$

ซึ่งปริมาณงานนี้คือพลังงานที่ใช้ทำงานไฟฟ้า (w_{ele}) นั่นเอง ดังนั้นจะได้

$$w_{\max} = w_{\text{ele}} \quad (32)$$

$$= -nFE_{\text{cell}} \quad (33)$$

$$\Delta G = -nFE_{\text{cell}} \quad (34)$$

ค่าติดลบ หมายความว่า งานไฟฟ้านี้เป็นงานที่ระบบต้องทำงานให้สิ่งแวดล้อม สำหรับปฏิกิริยาที่สารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์อยู่ในสภาวะมาตรฐาน สมการเปลี่ยนเป็น

$$\Delta G^\circ = -nFE_{\text{cell}}^\circ \quad (35)$$

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน ΔG° ของปฏิกิริยาหนึ่งๆ มีความสัมพันธ์กับค่าคงที่สมดุลดังนี้

$$\Delta G^\circ = -RT \ln k \quad (36)$$

ดังนั้นได้ความสัมพันธ์คือ

$$-nFE_{\text{cell}}^\circ = -RT \ln k \quad (37)$$

$$E_{\text{cell}}^\circ = -\left(\frac{RT}{nF}\right) \ln k \quad (38)$$

7.6 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์

นอกจากต้องคำนึงถึงค่าความต่างศักย์และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องให้ระบบแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ดังนี้

7.6.1 การถ่ายโอนมวลสาร (Mass Transport) ประกอบด้วย 3 กลไกคือไมเกรชัน (Migration) การแพร่ (Diffusion) และการพา (Convection) สามารถอธิบายแต่ละกระบวนการดังนี้

- ไมเกรชัน (Migration) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสารละลายนั้น โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทดและไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด ความเร็วของการเคลื่อนที่ของไอออนอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความต่างศักย์ที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้านั้น ซึ่งมีผลให้การไหลของกระแสไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ถ้ามีไอออนที่ประจุเท่ากันจำนวนมากอยู่รวมกันจะเกิดการแย่งการเคลื่อนที่แบบไมเกรชัน ทำให้มีการสูญเสียกระแสไฟฟ้าส่วนหนึ่งไปในการเคลื่อนที่ของไอออนที่ไม่ต้องการในการเกิดปฏิกิริยา

- การแพร่ (Diffusion) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลในสารละลายจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากกว่าไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าจนกระทั่งไม่เกิดความแตกต่างของความเข้มข้นในสารละลาย

- การพา (Convection) เป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหาหรือออกจากขั้วไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการกวนหรือการไหลเกิดขึ้นในระบบ

7.6.2 ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ อาจทำให้เพิ่มความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากอาจเกิดสนิม ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงเมื่อใช้กระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์เท่าเดิม

7.6.3 ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เมื่อขั้วไฟฟ้ามีระยะห่างมากขึ้น ความต้านทานของระบบก็มากขึ้นด้วย

7.6.4 การกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การกวนสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ไอออนต่างๆ ในสารละลายเกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้นกว่าการไม่กวนสารละลาย

7.6.5 ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อสารละลายมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้น้อย จะทำให้ความต้านทานของเซลล์เพิ่มขึ้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์มากขึ้นด้วย ซึ่งความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R = \frac{D}{C \times A} \quad (39)$$

R เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (โอห์ม)

D เป็นระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (เซนติเมตร)

C เป็นค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ซีเมนต์)

A เป็นพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้าที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (ตารางเซนติเมตร)

การเติมสารอิเล็กโทรไลต์ เช่น โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) หรือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ลงไปในสารละลายเพียงเล็กน้อยจะทำให้กระแสไฟฟ้าไหลในระบบได้ดีขึ้น

7.6.6 ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ถ้าความเข้มข้นของสารละลายมากขึ้นศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับระบบก็ต้องมากขึ้นด้วยตามสมการเนินสท์

7.6.7 อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายสูงขึ้น ความหนืดของสารละลายจะน้อยลงทำให้ไอออนในสารละลายเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้น เป็นการลดการเกิดโพลาไรเซชันซึ่งเป็นสาเหตุของศักย์ไฟฟ้าเกิน ทำให้ใช้ความต่างศักย์กับระบบน้อยลง

7.7 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกำจัดโครเมียม

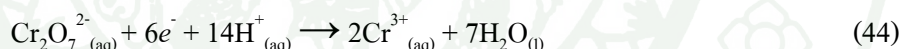
กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) มีความเกี่ยวข้องกับการตกตะกอนและทางกายภาพกล่าวคือ เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านแผ่นเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็น

ขั้วไฟฟ้า ที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันปล่อยอิเล็กตรอนออกมาพร้อมกับไอออนของเหล็ก (Fe^{2+} , Fe^{3+}) และที่ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันทำให้น้ำแตกตัวได้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งไอออนของเหล็กสามารถรวมตัวกับ OH^- เกิดเป็น $\text{Fe}(\text{OH})_2$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นตะกอน สามารถแยกออกจากน้ำเสียได้

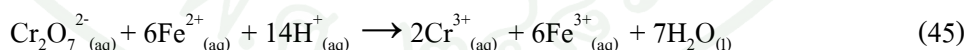
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ของแผ่นเหล็กและน้ำที่ขั้วแอโนดเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป



ปฏิกิริยารีดักชันของน้ำและโครเมียมที่ขั้วแคโทด

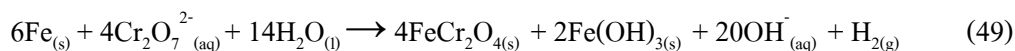


นอกจากนี้ Cr^{6+} อาจถูกรีดิวซ์เป็น Cr^{3+} ได้โดย Fe^{2+} ที่ละลายออกมาจากแผ่นเหล็กที่ขั้วแอโนด



หลังจากนั้นไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดสามารถรวมตัวกับ Cr^{3+} , Fe^{2+} และ Fe^{3+} เกิดเป็นตะกอนของ metal hydroxide หรือเกิดตะกอนร่วมของโครไมต์ (FeCr_2O_4) (Lakshmipathiraj *et al.*, 2007)





8. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทรงยศ (2547) ทำการทดลองกำจัด Cr^{6+} โดยแปรผันกระแสไฟฟ้า (1, 2 และ 4 แอมแปร์) ค่าพีเอชเริ่มต้น (4, 6.5 และ 9) และความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} (20, 100 และ 200 มก./ล.) พบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 4 ประสิทธิภาพการกำจัด Cr^{6+} ที่ 1 แอมแปร์ใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 6, 12 และ 24 วัตต์-ชั่วโมงสำหรับความเข้มข้นเริ่มต้น 20, 100 และ 200 มก./ล.ตามลำดับ

สังกรม (2548) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจำนวน 6 แผ่น โดยแต่ละแผ่นมีพื้นที่ผิวประมาณ 0.0161 ตารางเมตร ค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 7-9 ตัวแปรที่ศึกษา คือ ลักษณะการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการบำบัด จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมคือการจัดเรียงขั้วชนิดโมโนโพลาร์แบบขนาน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20.67 แอมแปร์ต่อตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย 3.67 ลิตรต่อนาที ซึ่งสามารถลดมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังได้มากกว่าร้อยละ 90 และความเข้มข้นของน้ำทิ้งมีค่าต่ำกว่าระดับเกณฑ์มาตรฐานของประเทศไทยที่กำหนดไว้ ต้นทุนในการบำบัดประมาณ 0.30 ดอลลาร์สหรัฐต่อลูกบาศก์เมตร

ขวัญชีวัน (2549) ทำการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะขนาดเล็กด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้า (Electro Precipitation) โดยแปรผัน ค่าความเป็นกรด – ด่างเริ่มต้น ในช่วง 2.5 – 6.5, ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 38.46 – 153.85 แอมแปร์ต่อตารางเมตร, สัดส่วนพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำเสีย 16.67 และ $50 \text{ m}^2/\text{m}^3$ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 และ 4 เซนติเมตร พบว่า การลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและการเพิ่มสัดส่วนพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าต่อปริมาตรน้ำเสียมีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเพิ่มขึ้น โดยจะเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในส่วนการรีดิวซ์ Cr^{6+} และตกตะกอน Cr^{3+} นอกจากนี้การเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 76.92, 115.38 และ 153.85

แอมแปร์ต่อตารางเมตรใช้เวลาในการกำจัดโครเมียมไม่แตกต่างจาก 38.46 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับอัตราการตกตะกอนโครเมียมรวม คือ $Y = 22.725X - 48.699$ ภายใต้สภาวะการทดลองที่เหมาะสม คือ ระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 2 เซนติเมตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.5

ศรายุทธ (2549) ทำการทดลองกำจัด Cr^{6+} ด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมีร่วมกับการแยกตะกอน โดยใช้น้ำเสียที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มก./ล. ค่าพีเอชเท่ากับ 4 และค่าความนำไฟฟ้า 1,300 – 1,400 ไมโครซีเมนต์ แปรผันกระแสไฟฟ้า(ในช่วง 1 – 7 แอมแปร์) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (1, 1.5 และ 2 เซนติเมตร) และอัตราการไหลของน้ำเสีย (21.11, 31.67 และ 63.33 มิลลิลิตรต่อนาที) พบว่า สภาวะที่กำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งได้โดยใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ ที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา 63.33 มิลลิลิตรต่อนาที (เวลาทำปฏิกิริยา 15 นาที) ใช้พลังงานไฟฟ้า 80.2 กิโลวัตต์- ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม สัดส่วนตะกอนลอยต่อตะกอนหนักมีค่าอยู่ระหว่าง 0.24 – 1.59 และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนมีค่าระหว่าง 16.9 – 74.9 มิลลิลิตรต่อนาที

ตติ (2550) หาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอน Cr^{6+} ด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีในระบบที่ละเทและต่อเนื่อง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 ทำการทดลองในถังปฏิกิริยาขนาด 1.2 ลิตรใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.5 เซนติเมตร แปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้น 20, 100 และ 200 มิลลิกรัม/ลิตรและกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.5 - 6.0 แอมแปร์ พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นทำให้ระบบต้องการเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ความเข้มข้นเท่ากับ 20, 100 และ 200 มก./ล. ระบบใช้เวลา 20, 120 และ 180 นาทีตามลำดับ ในขณะที่การเพิ่มกระแสไฟฟ้าทำให้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลงแต่เมื่อพิจารณาการใช้พลังงาน ที่ 0.5 แอมแปร์ ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยที่ความเข้มข้นเท่ากับ 20, 100 และ 200 มก./ล. ใช้พลังงานไฟฟ้า 0.35, 1.70 และ 3.38 วัตต์.ชั่วโมงตามลำดับ

Ge *et al.* (2004) ทำการทดลองบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการซักรีดด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีร่วมกับการแยกตะกอนลอย โดยใช้การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ซึ่งใช้ไทเทเนียมทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนดและแคโทดแล้วใช้แผ่นอะลูมิเนียม 3 แผ่นวางไว้ตรงกลางระหว่างไทเทเนียม โดยมีปัจจัยต่างๆ คือ ค่าพีเอช, ระยะเวลาพักเก็บและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (0.8-2.0 A) จากการทดลองสามารถกำจัด COD ได้มากกว่า 70% ค่าความขุ่น,

phosphate และ surfactant (MBAS) ถูกกำจัดได้ถึง 90% ในช่วง pH 5 - 9 ใช้เวลากักเก็บน้ำเสีย 5-10 นาที นอกจากนี้เมื่อเพิ่มปริมาณของกระแสไฟฟ้ายังมีผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความขุ่น, COD และ MBAS สูงขึ้นอีกด้วย

Koby et al. (2003) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้แผ่นเหล็กและอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการบำบัด พบว่า การใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีในช่วงที่เป็นกรด ในขณะที่ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าสามารถกำจัดความขุ่นได้ดีในช่วงที่เป็นด่าง นอกจากนี้แผ่นเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ดีกว่าอะลูมิเนียม โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นแผ่นเหล็กและอะลูมิเนียมเท่ากับ $80 - 100 \text{ A/m}^2$ และ 150 A/m^2 ตามลำดับ ซึ่งส่งผลถึงพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด COD มีค่าต่ำกว่าเมื่อใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการบำบัดเมื่อใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 10 นาทีและ 15 นาทีสำหรับอะลูมิเนียม

Gao et al. (2005) ศึกษาการกำจัดเฮกซะวาเลนซ์โครเมียมด้วยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีร่วมกับการแยกตะกอนลอย โดยในขั้นแรกทำการรีดิวซ์ Cr^{6+} ไปเป็น Cr^{3+} ในสถานะที่เป็นกรด และรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดเป็นตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ และ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ในขั้นที่สองได้ทำการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าเพื่อทำการแยกตะกอนออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยแก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่เกิดขึ้นเป็นตัวพาให้ตะกอนลอยขึ้นไป ทำให้กระบวนการบำบัดน้ำเสียนี้ไม่ต้องใช้แผ่นกรองในการดักตะกอนที่เกิดขึ้น สภาวะที่เหมาะสมคือ charge loading 2.5 ฟาราเดย์ต่อลูกบาศก์เมตร ค่าพีเอช 5 - 8 (ในระบบการเกิดตะกอน) ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 1.2 ชั่วโมง ปริมาณตะกอนที่ออกมามีค่าต่ำกว่า 3 มก./ล. และความเข้มข้นโครเมียมน้อยกว่า 0.5 มก./ล.

Golder et al. (2007) ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{3+} ระหว่างการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์และไบโพลาร์ในกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ปริมาณคลอไรด์ (Cl^-), ค่าพีเอช, ความเข้มข้น Cr^{3+} เริ่มต้นและกระแสไฟฟ้าโดยค่าพีเอชเริ่มต้นคือ 3.8 กระแสไฟฟ้าที่ใช้คือ 0.5-1.0A และทำการเติมเกลือ NaCl (Cl^- 1,820 mg/l) เพื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบไบโพลาร์จะสามารถกำจัด Cr^{3+} ได้ 99.9% ที่เวลา 50-60 นาที กระแสไฟฟ้า 1.0 A ในขณะที่การจัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์สามารถกำจัด Cr^{3+} ได้เพียง 81.5% เนื่องจากการจัดเรียงแบบไบโพลาร์มีปริมาณ OH^- มากกว่าจึงทำให้ Cr^{3+} เกิดเป็นตะกอนได้ดีกว่า นอกจากนี้การเติม Cl^- จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{3+} ลดลง 3.6% ในการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าทั้งสองแบบ

Babu *et al.* (2007) ศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากการฟอกย้อมด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) ในระบบต่อเนื่องโดยใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วแอโนดและอะลูมิเนียมเป็นขั้วแคโทด พบว่า การเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและอัตราการไหลทำให้ค่า COD, BOD, TDS และโครเมียมถูกกำจัดได้มากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มกำลังไฟฟ้าส่งผลให้ COD ถูกกำจัดได้มากขึ้น สภาวะที่เหมาะสมคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 20 mA/cm^2 และอัตราการไหลเท่ากับ 6 ลิตรต่อนาที

Heidman and Calmano (2007) ใช้กระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีในการกำจัด Cr^{6+} โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการศึกษาสภาวะดังต่อไปนี้ คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม 10-50 มก./ล. กระแสไฟฟ้า 0.05-3 แอมแปร์ โดยที่กระแสไฟฟ้า 0.05-0.1 แอมแปร์ สามารถกำจัดโครเมียมที่ความเข้มข้น 10 มก./ล. ได้ดีมาก เมื่อเวลาผ่านไป 45 นาที ในขณะที่อัตราเร็วของการกำจัดก็จะมากขึ้นเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งกลไกในการกำจัดโครเมียมมีอยู่ 2 แบบ คือที่กระแสสูง Cr^{6+} จะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็น Cr^{3+} ที่ขั้วแคโทดและเกิดเป็นตะกอนของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ และที่กระแสต่ำ Cr^{6+} จะถูกรีดิวซ์โดย Fe^{2+} ที่ละลายมาจากขั้วไฟฟ้า กระบวนการกำจัดโครเมียมที่กระแสต่ำจะมีประสิทธิภาพมากกว่าที่กระแสสูง

Lakshmipathiraj *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษานิคมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีผลต่อการกำจัดเฮกซะวาเลนต์โครเมียมด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้แท่งเหล็กทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ในกระบวนการนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้มีอยู่ 3 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl), โซเดียมไนเตรด (NaNO_3) และ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) พบว่า NaCl ทำหน้าที่ช่วยในการกำจัดโครเมียมได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีผลในเรื่องของความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดอีกด้วย ซึ่งอัตราในการกำจัดโครเมียมสูงขึ้นเมื่อใช้กระแสสูง โดยเปลี่ยนจากเฮกซะวาเลนต์โครเมียมไปเป็นตะกอนของโครไมต์ (FeCr_2O_4)

Almaguer – Busso *et al.* (2009) เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัด Cr^{6+} ระหว่างกระบวนการทางเคมีกับกระบวนการไฟฟ้าเคมี น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองมาจากโรงงานชุบโครเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม 180 มก./ล. ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ซึ่งในกระบวนการทางเคมีเติม $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ในสภาวะที่เป็นกรด (พีเอช 3) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Cr^{6+} ในขณะที่กระบวนการไฟฟ้าเคมีใช้ความต่างศักย์ 2 โวลต์ อัตราการไหลของน้ำเสีย 18.9 ลิตรต่อนาที ในสภาวะที่เป็นกรด (pH 1.5 และ 2) พบว่า ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 1.5 ใช้เวลาในการบำบัด 25 นาที มี

ค่าใช้จ่ายในการบำบัด Cr^{6+} ของกระบวนการไฟฟ้าเคมี (8.5 USD/ m^3) สูงกว่ากระบวนการทางเคมี (1.23 USD/ m^3) ถึง 7 เท่า แต่เมื่อ pH เริ่มต้นเท่ากับ 2 ใช้เวลาในการบำบัด 75 นาที ค่าใช้จ่ายในการบำบัดลดลง (1.57 USD/ m^3) และมีค่าใช้จ่ายใกล้เคียงกับกระบวนการทางเคมี

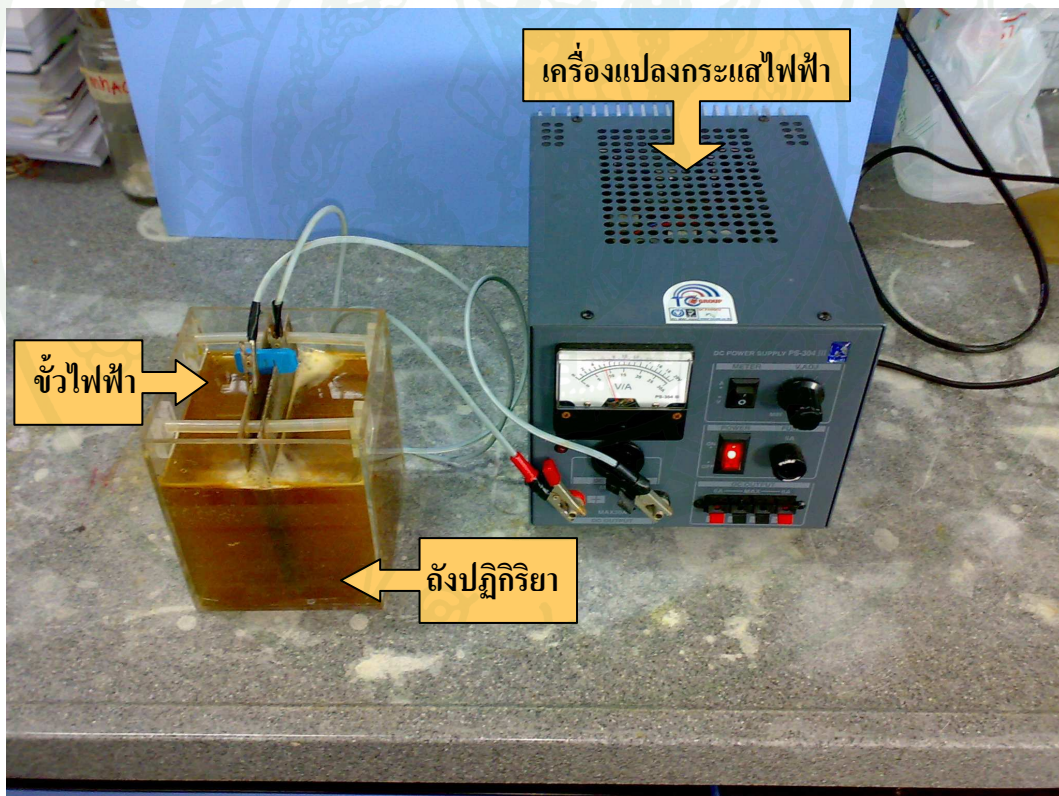


อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

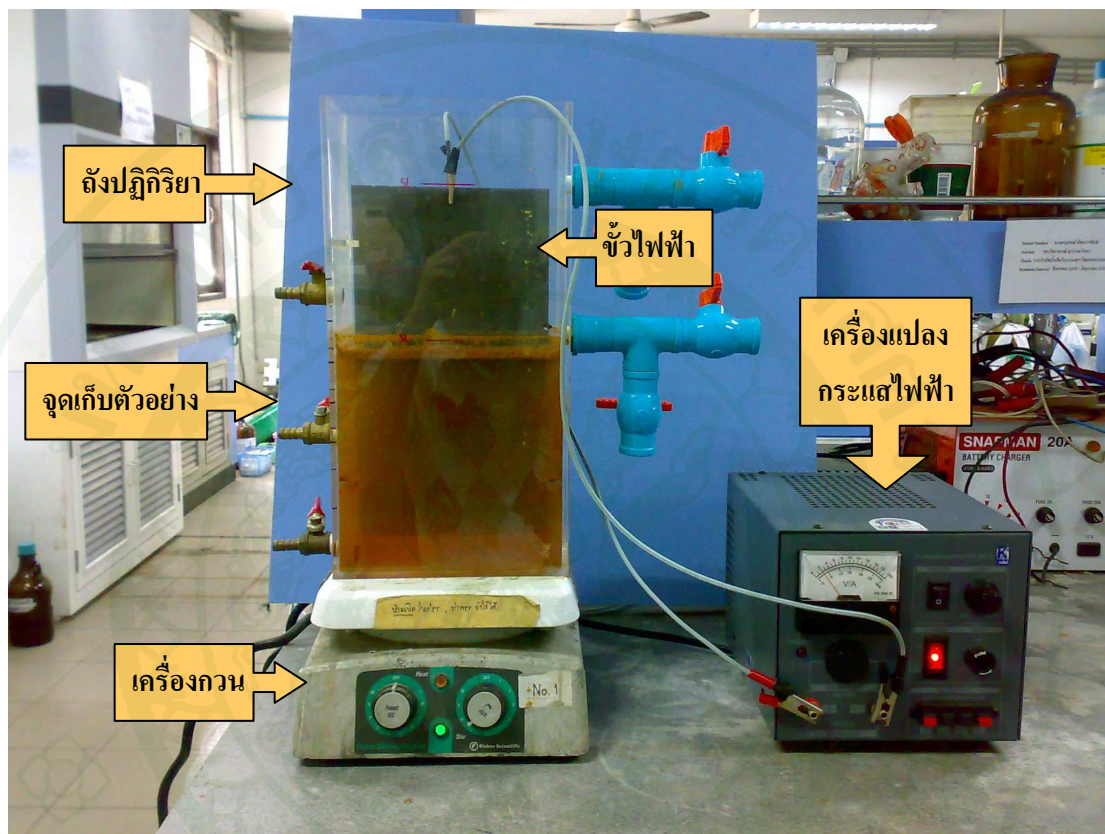
1. ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองมี 2 แบบ

1.1 ถังปฏิกริยาระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบที่ละเททำด้วยอะคริลิกใสขนาด 10 x 10 x 15 เซนติเมตร ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น แต่ละแผ่นมีขนาด 12 x 9.5 x 0.2 เซนติเมตร โดยที่ส่วนปลายของขั้วไฟฟ้าเชื่อมต่อกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 3 ถังปฏิกริยาระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบที่ละเทสำหรับการศึกษารุ่นต้น

1.2 ถึงปฏิกิริยาระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบที่ละเททำด้วยอะคริลิกใสขนาด 17 x 10 x 35 เซนติเมตร ใช้แผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น แต่ละแผ่นมีขนาด 15 x 27 x 0.2 เซนติเมตร โดยที่ส่วนปลายของขั้วไฟฟ้าเชื่อมต่อกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง



ภาพที่ 4 ถึงปฏิกิริยาระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบที่ละเทสำหรับศึกษาการแปรผันปริมาณน้ำ

2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 2.1 เครื่องวัด pH (Metrohm - 827 pH meter)
- 2.2 Spectrophotometer (HACH-DR/4000U)
- 2.3 เครื่องชั่งไฟฟ้า (Precisa-240 A)
- 2.4 Atomic absorption Spectrophotometry (Perkin Elmer-AAAnalyst 100)
- 2.5 ตู้อบความร้อน (Advantec-DRA430DA)
- 2.6 โถดูดความชื้น (Desiccator) สำหรับเก็บรักษา $K_2Cr_2O_7$ และแผ่นเหล็กที่อบแล้ว

2.7 เครื่องวัดความนำไฟฟ้า (Orion – model 160)

2.8 เครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสสลับเป็นกระแสตรง

3. สารเคมี

3.1 สารเคมีสำหรับการวิเคราะห์โครเมียม

- $K_2Cr_2O_7$, อบที่ $105^{\circ}C$ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงและเก็บไว้ในโถดูดความชื้น
- Acetone
- สารละลาย 1, 5-diphenylcarbazide
- HNO_3
- H_2SO_4
- H_3PO_4

3.2 สารเคมีสำหรับปรับค่า pH ในน้ำเสีย

- HCl และ NaOH 1N

3.3 สารเคมีสำหรับล้างเครื่องแก้วและแผ่นเหล็ก

- HNO_3 10% v/v

วิธีการ

การดำเนินการทดลองนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบปัจจัยของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย

วิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานก่อนเข้ากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าตามวิธีวิเคราะห์ใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st edition แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 วิธีการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์	เลขหมวดตาม Standard Methods
Cr – total	Atomic Absorption Spectrophotometry	3111 A
Cr ⁶⁺	Colorimetric method	3500 – Cr B
pH	pH meter	-
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	Total suspended Solids Dried at 103 – 105 °C	2540 – D
ปริมาณของแข็งละลายน้ำ	Conductivity	2510 – A
ปริมาณตะกอนหนัก	Settleable Solids	2540 – F
SVI	Sludge Volume Index	2710 – D

2. การศึกษาขั้นต้น (Pre test) เพื่อหาแนวโน้มในการทดลองขั้นต่อไป

ทำการศึกษาขั้นต้นในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 x 10 x 15 เซนติเมตร โดยแปรผันระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำการทดลองดังนี้

2.1 ต่อขั้วไฟฟ้ากับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยจัดระยะห่างระหว่างขั้วเป็น 0.5 เซนติเมตร

2.2 เติมน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตรลงในถังปฏิกิริยา

2.3 ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 6 โวลต์ อ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

2.4 เริ่มทำการทดลอง

2.5 เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 20 นาทีเพื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 4

2.6 ทำการทดลองตาม 2.1 – 2.5 ซ้ำ โดยแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 8 และ 10

โวลต์

2.7 แปรผันระยะห่างระหว่างขั้วเป็น 1 และ 2 เซนติเมตรและทำการทดลอง 2.2 – 2.6

ซ้ำ

3. ศึกษาผลของการแปรผันปริมาตรน้ำเสีย

ทำการศึกษาในถังปฏิกิริยาขนาด 17 x 10 x 35 เซนติเมตร โดยแปรผันระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ความต่างศักย์ไฟฟ้าและปริมาตรน้ำเสีย (ให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร (A/V ratio) คงที่เท่ากับ 162 ตารางเซนติเมตรต่อลิตร) ทำการทดลองดังนี้

3.1 ต่อขั้วไฟฟ้ากับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยจัดระยะห่างระหว่างขั้วเป็น 1 เซนติเมตร

3.2 เติมน้ำเสียปริมาตร 3 ลิตรลงในถังปฏิกิริยา

3.3 ปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 2 โวลต์ อ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องจ่าย

ไฟฟ้ากระแสตรง

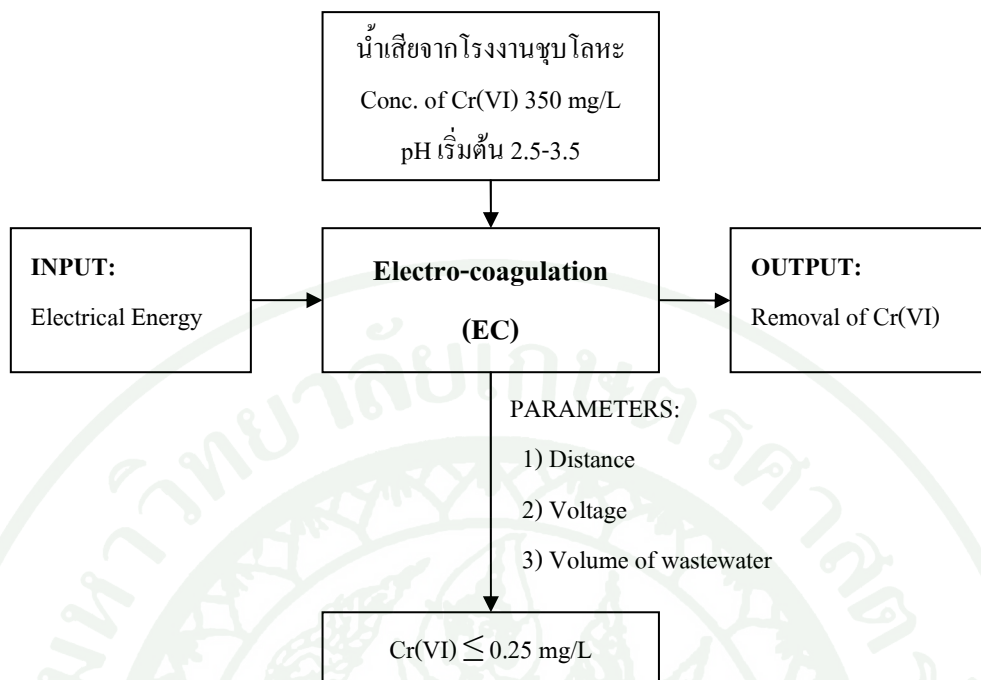
3.4 ในระหว่างการทดลองทำการกวนน้ำเสียด้วยเครื่องกวนและแท่งแม่เหล็กเพื่อให้เกิดการกวนแบบสมบูรณ์ (Complete mixed)

3.5 เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุก 20 นาทีเพื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 4

3.6 ทำการทดลองตาม 3.1 – 3.5 ซ้ำ โดยแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 4 และ 6 โวลต์

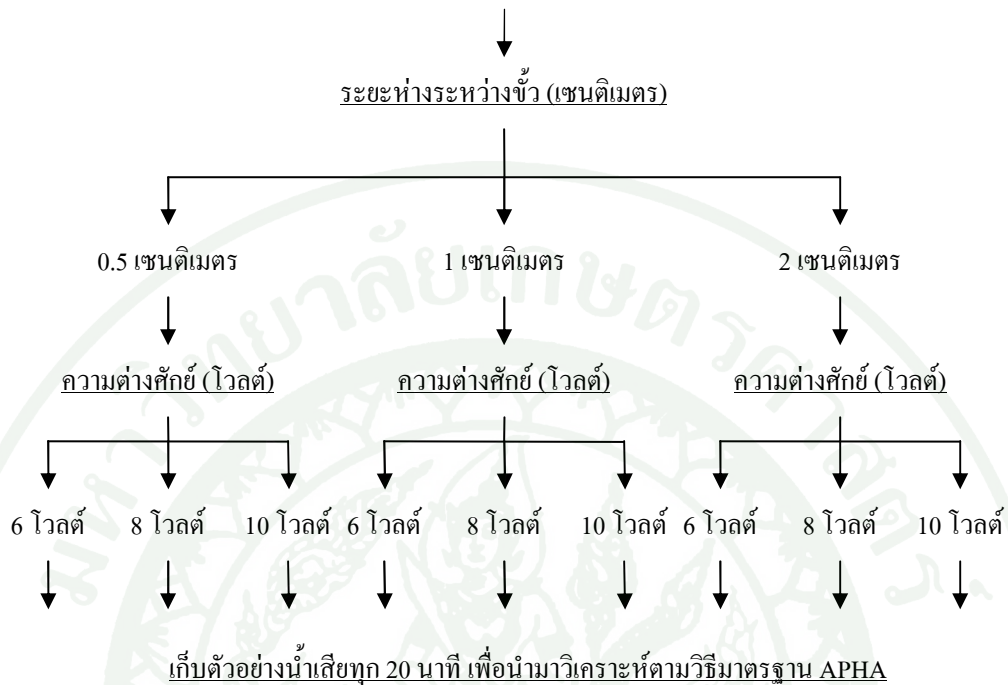
3.7 แปรผันระยะห่างระหว่างขั้วเป็น 2 เซนติเมตรและทำการทดลอง 3.2 – 3.6 ซ้ำ

3.8 แปรผันปริมาตรน้ำเสียเป็น 5 ลิตรและทำการทดลองตาม 3.1 – 3.7 ซ้ำ



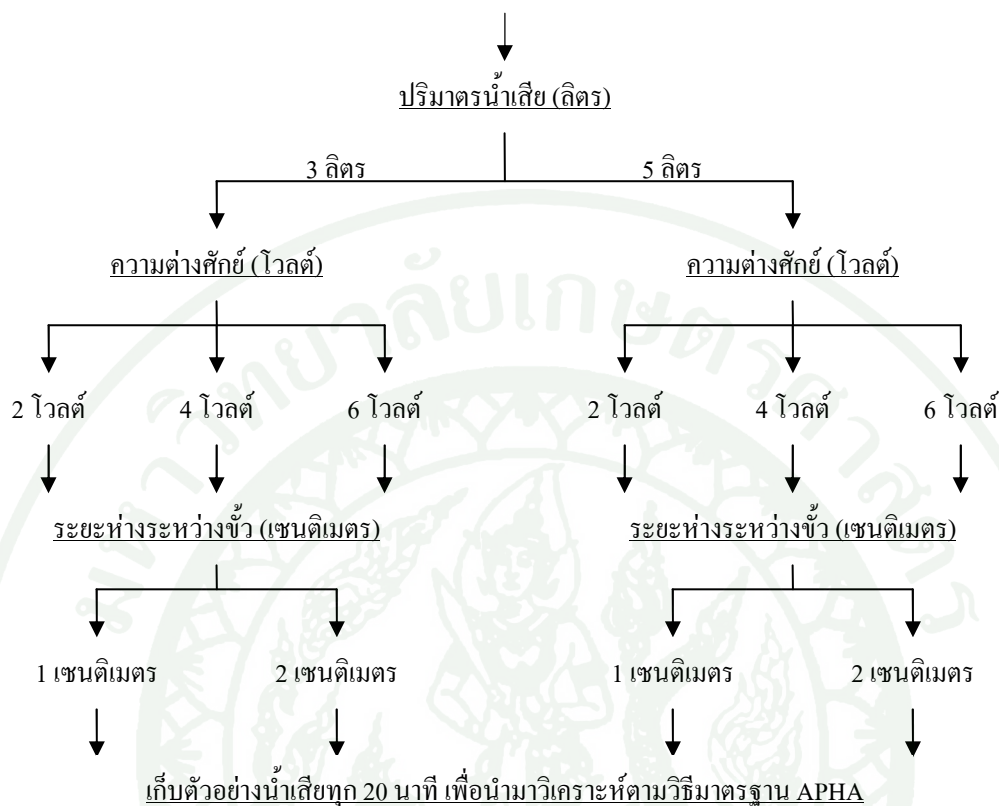
ภาพที่ 5 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ, ค่า pH เริ่มต้นประมาณ 3



ภาพที่ 6 ขั้นตอนการศึกษาขั้นต้น (Pre test) การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

น้ำเสียความเข้มข้น 350 มิลลิกรัมต่อลิตร, ค่า pH เริ่มต้นประมาณ 3



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการศึกษาการแปรผันปริมาณน้ำเสีย โดยให้ค่า A/V ratio คงที่

ผลและวิจารณ์

1. ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย

น้ำตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียจากการล้างชิ้นงานในโรงงานชุบโลหะ มีสีเหลือง ส้ม จากการวิเคราะห์หลักคุณของน้ำเสียเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทิ้งจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า มีปริมาณ Cr^{6+} และของแข็งแขวนลอยเกินค่ามาตรฐาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจึงต้องผ่านการบำบัดก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ

ตารางที่ 5 คุณสมบัติน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

รายการ	ปริมาณ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง*
pH	2.5-3.5	5.5-9
Cr^{6+} (มก./ล.)	600	≤ 0.25
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	273-1,957	≤ 50
ของแข็งละลายน้ำ (มก./ล.)	1,610-2,880	$\leq 3,000$

ที่มา: ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (2539)

2. การทดลองขั้นต้น (Pre test) เพื่อศึกษาแนวโน้มของกระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้า

ตั้งปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองขั้นต้นมีขนาด 10 x 10 x 15 เซนติเมตร แผ่นเหล็กที่ใช้มีขนาด 12 x 9.5 x 0.2 เซนติเมตร แปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้า (6, 8 และ 10 โวลต์) และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร) ซึ่งมีผลต่อกระแสไฟฟ้าในระบบ โดยกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือลดระยะห่างระหว่างขั้ว ดังแสดงในตารางที่ 6 ทั้งนี้กระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันในระบบด้วย ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์

ตารางที่ 6 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าต่างๆ

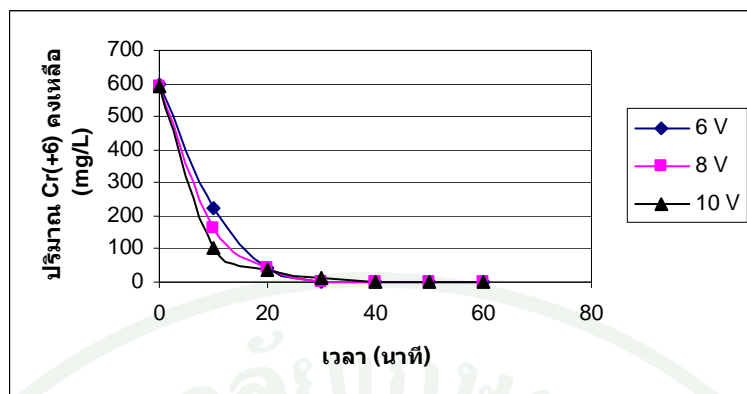
ความต่างศักย์ (โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)		
	0.5 ซม.	1 ซม.	2 ซม.
6	4	1.46	0.52
8	5.5	2.31	0.87
10	6.65	2.75	1.09

2.1 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า

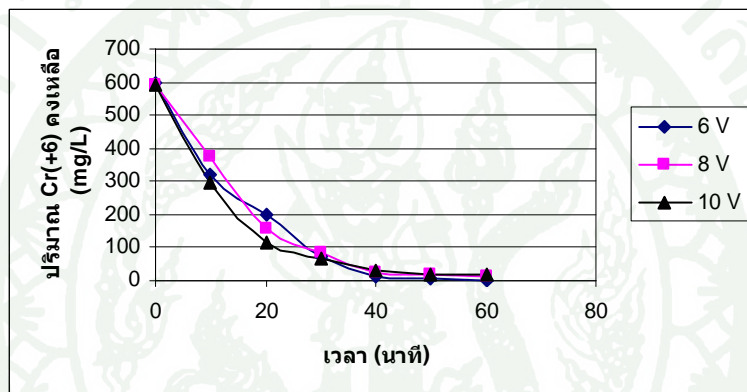
2.1.1 ผลของความต่างศักย์ต่อการกำจัด โครเมียม (Cr^{6+})

การศึกษาผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ส่งผลต่อการกำจัด Cr^{6+} โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองโดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน 3 ค่า คือ 6, 8 และ 10 โวลต์ จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 8

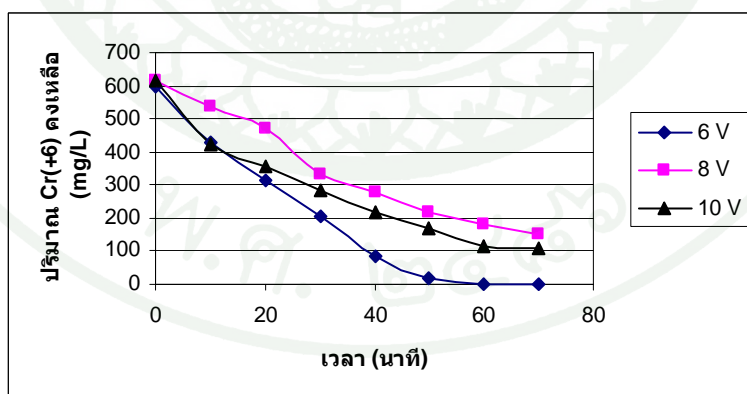
จากผลการทดลอง พบว่า ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.5 และ 1 เซนติเมตร รูปแบบการลดลงของ Cr^{6+} จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 20 นาทีแรก โดยการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งผลให้อัตราการกำจัด Cr^{6+} สูงขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากกระแสไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.5 และ 1 เซนติเมตร สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ ที่เวลา 30 และ 40 นาทีตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ความต่างศักย์ 6 โวลต์กลับมีอัตราการกำจัดสูงสุดซึ่งสามารถกำจัด Cr^{6+} ให้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.25 มก./ล. ได้ภายในเวลา 70 นาที ในขณะที่ความต่างศักย์ 8 และ 10 โวลต์มี Cr^{6+} คงเหลือเท่ากับ 152 และ 109 มก./ล.ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ระบบจะเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต Fe^{2+} ให้ออกมาจากขั้วไฟฟ้าในปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งก็จะสอดคล้องกับกฎของฟาราเดย์ที่ว่า ปริมาณของโลหะที่ละลายออกมาสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะแปรผันตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้ ซึ่งปริมาณของกระแสไฟฟ้าในระบบมีค่าสูงจะทำให้ Fe^{2+} บางส่วนไปรวมตัวกับ OH^- เกิดเป็นตะกอนในรูป $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ทำให้ปริมาณ Fe^{2+} ที่ใช้ในการรีดิวซ์ Cr^{6+} ลดลง (Heidman, I and W. Calmano.2007)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Cr^{6+} คงเหลือกับเวลาที่ความต่างศักย์ต่างๆ (ก) ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.5 เซนติเมตร (ข) ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.0 เซนติเมตร (ค) ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.0 เซนติเมตร

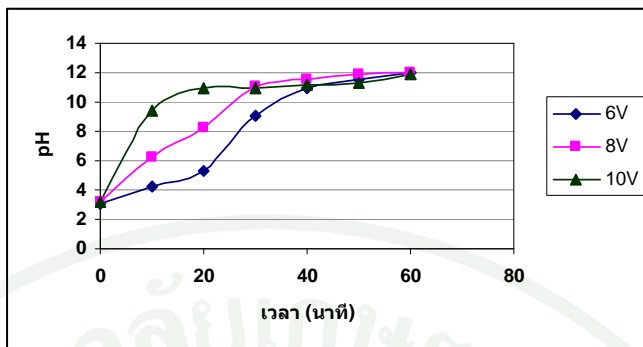
2.1.2 ผลของความต่างศักย์ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

จากการทดลอง พบว่า เมื่อปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดำเนินไปค่าพีเอชในระบบจะเพิ่มขึ้น โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วเดียวกัน ค่าพีเอชแปรผันโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 9 เนื่องจากการเพิ่มความต่างศักย์จะไปเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำที่ขั้วแคโทดมากขึ้น (เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าในระบบสูงขึ้น) ส่งผลให้ปริมาณ OH^- เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยในช่วงแรก OH^- จะถูกใช้ในการสะเทิน (neutralize) โพรตรอน (H^+) ในน้ำเสีย จากนั้นค่าพีเอชมีค่าสูงขึ้นตามเวลาในการเกิดปฏิกิริยาและเริ่มมีค่าคงที่ในช่วง 10 – 12 เนื่องจากระบบจะนำ OH^- ไปใช้ในการตกตะกอน Fe^{2+} , Fe^{3+} และ Cr^{3+} ดังแสดงในสมการที่ 46 – 48 แต่ยังคงเหลือปริมาณ OH^- ในระบบจึงทำให้ค่าพีเอชมีค่าสูง เช่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6, 8 และ 10 โวลต์ เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป 20 นาที ค่าพีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้นจากค่าพีเอชเริ่มต้น 3 เป็น 4.0, 7.35 และ 9.65 ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เป็นเบส คือ 10.95 – 12.0 ซึ่งมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน (5.5-9) ในทุกชุดการทดลอง

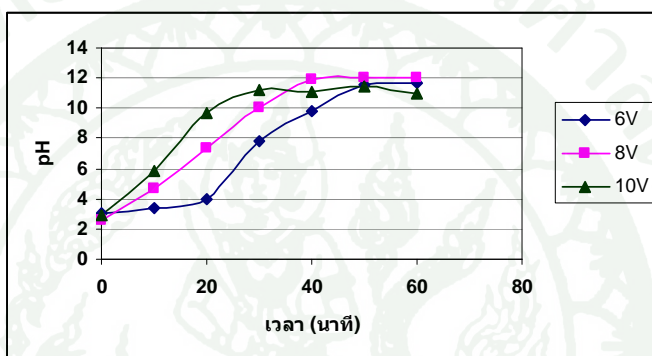
2.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

2.2.1 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วต่อการกำจัดโครเมียม (Cr^{6+})

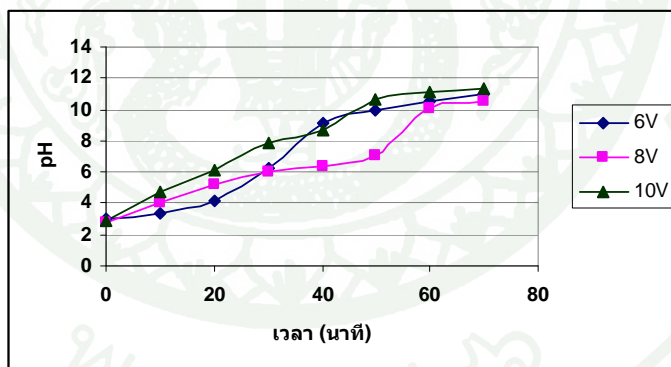
การแปรผันระยะห่างระหว่างขั้วให้ผลที่แตกต่างกันในการกำจัด Cr^{6+} ชัดเจนกว่าการแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้า ในชุดการทดลองที่มีความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากันการลดระยะห่างระหว่างขั้วมีผลให้ Cr^{6+} ถูกกำจัดได้มากขึ้น ผลดังแสดงในภาพที่ 10 เพราะการลดระยะห่างระหว่างขั้วทำให้ความต้านทานของระบบลดลง เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันได้ดีขึ้น เช่น ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.5 เซนติเมตรสามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ ภายในเวลา 30 นาที ในขณะที่ 1 และ 2 เซนติเมตร ยังมี Cr^{6+} เหลืออยู่มาก ทั้งนี้เวลาเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกำจัด Cr^{6+} การเพิ่มเวลาจะทำให้ Cr^{6+} ถูกกำจัดได้มากขึ้นในชุดการทดลองที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ภายในเวลา 60 นาที อย่างไรก็ตามในทุกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษานี้ ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ไม่สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ภายในเวลา 60 นาที โดยมี Cr^{6+} คงเหลือจากการกำจัดที่ความต่างศักย์ 6, 8 และ 10 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 9.53, 184 และ 117 มก./ล. ตามลำดับ



(ก)

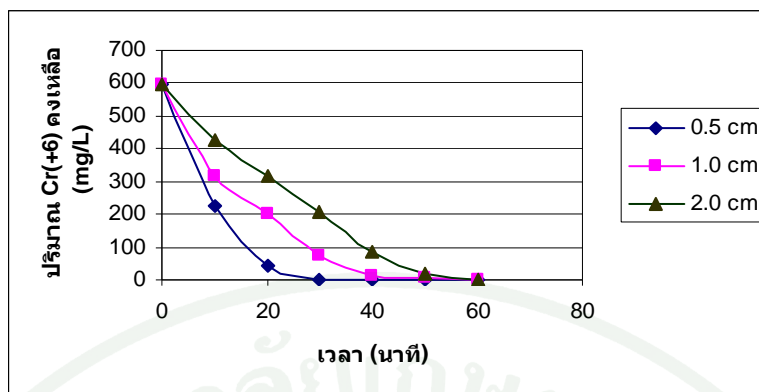


(ข)

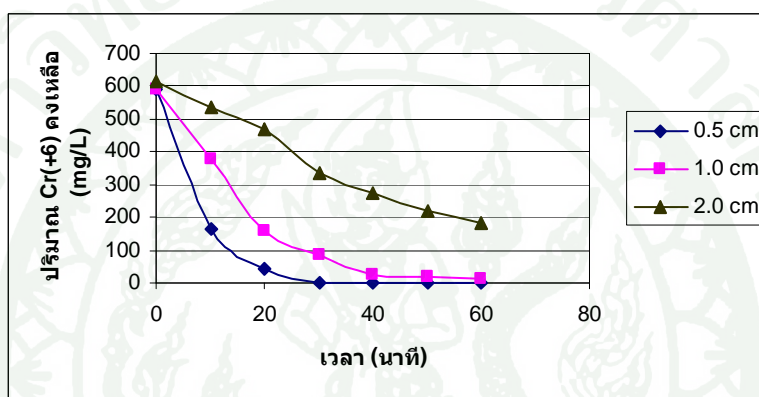


(ค)

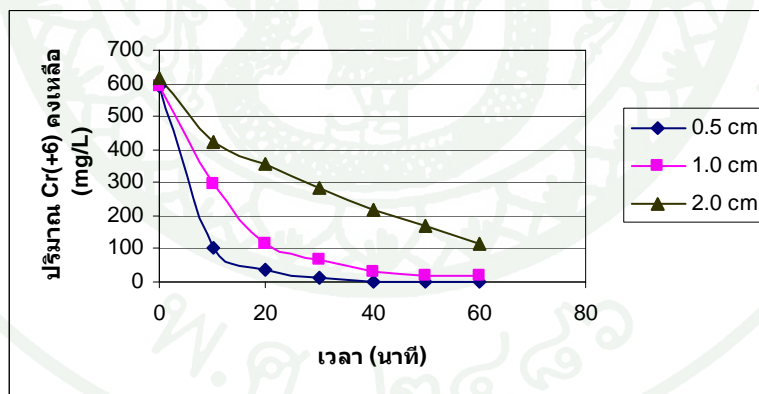
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาในการกำจัดโครเมียมที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างๆ
 (ก) ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.5 เซนติเมตร (ข) ระยะห่างระหว่างขั้ว 1.0 เซนติเมตร (ค)
 ระยะห่างระหว่างขั้ว 2.0 เซนติเมตร



(ก)



(ข)



(ค)

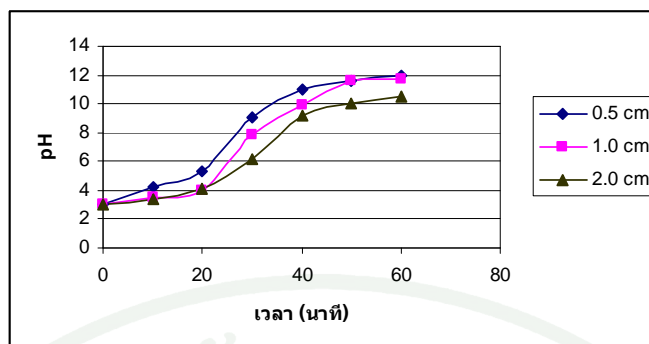
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Cr^{6+} คงเหลือกับเวลาที่ระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ ในน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร (ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 8 โวลต์ (ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์

2.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

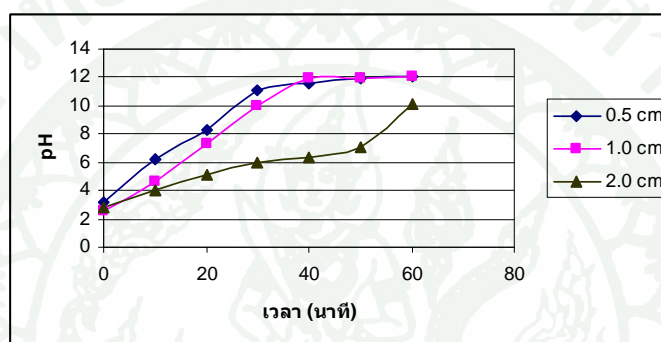
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบระหว่างทำการทดลอง พบว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน ค่าพีเอชของน้ำเสียในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยการลดระยะห่างระหว่างขั้วทำให้อัตราการเพิ่มของค่าพีเอชสูงขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าในระบบที่เพิ่มขึ้นไปเร่งปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำที่ขั้วแคโทด ส่งผลให้ปริมาณ OH^- เพิ่มขึ้น จากภาพที่ 11 (ก) จะเห็นได้ว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร เมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาผ่านไป 30 นาที ค่าพีเอชของระบบเพิ่มสูงขึ้นจากค่าเริ่มต้น 3 เป็น 9.11, 7.87 และ 6.21 ตามลำดับ ซึ่งการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าอยู่ในช่วงที่เป็นเบสในทุกสภาวะการทดลอง

2.3 ประสิทธิภาพเชิงพลังงานของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

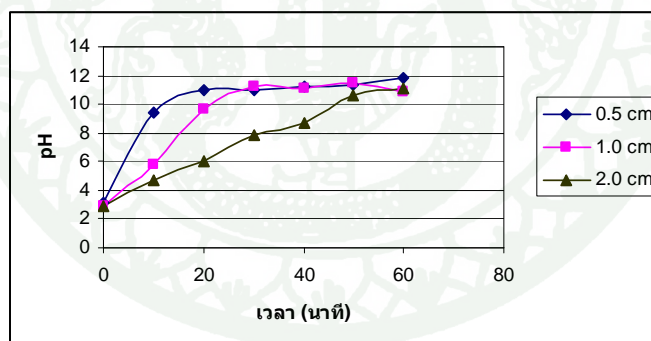
ในการบำบัดน้ำเสียนอกจากจะพิจารณาความสามารถในการบำบัดมลพิษแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาร่วม คือ มาตรฐานและต้นทุนที่ใช้ในการบำบัด ซึ่งตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในสภาวะที่ใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 6, 8 และ 10 โวลต์ และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร จะเห็นได้ว่าการลดความต่างศักย์และเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในระบบลดลง นั่นหมายถึงประสิทธิภาพเชิงพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าหรือต้นทุนที่ใช้ในการบำบัดลดลง เช่น ที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด Cr^{6+} คือ 14.07, 31.99 และ 48.07 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมโครเมียมที่ถูกกำจัด สำหรับความต่างศักย์ไฟฟ้า 6, 8 และ 10 โวลต์ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน การเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีแนวโน้มลดลงด้วย เช่น ที่ความต่างศักย์ 8 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.5, 1 และ 2 เซนติเมตร พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด Cr^{6+} เท่ากับ 37.29, 31.99 และ 17.50 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมโครเมียมที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ซึ่งที่ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร มีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด แต่ไม่สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ ดังนั้น การพิจารณาประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการกำจัด Cr^{6+} ต้องพิจารณาพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่น้อยที่สุด และเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งด้วย โดยที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงที่สุด คือ 6.11 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมโครเมียมที่ถูกกำจัด



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาในการกำจัดโครเมียมที่ระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ
 (ก) ความต่างศักย์ 6 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์ 8 โวลต์ (ค) ความต่างศักย์ 10 โวลต์

ตติ (2550) ได้เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด Cr^{6+} ที่สภาวะต่างๆ ในกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี พบว่า ที่ความเข้มข้นโครเมียมเดียวกัน การใช้กระแสไฟฟ้าต่ำแม้จะต้องใช้เวลาปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นแต่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าการใช้กระแสไฟฟ้าสูง โดยที่กระแสไฟฟ้า 0.5 แอมแปร์ ใช้พลังงานไฟฟ้าในการกำจัด Cr^{6+} เท่ากับ 17.5, 17.0 และ 16.9 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมโครเมียมที่ถูกกำจัด ในขณะที่การใช้กระแสไฟฟ้า 6 แอมแปร์ ใช้พลังงานไฟฟ้า 175, 203 และ 175 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมโครเมียมที่ถูกกำจัด ที่ความเข้มข้นโครเมียม 20, 100 และ 200 มก./ล.ตามลำดับ ซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามากกว่า

ตารางที่ 7 พลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{6+} เปรียบพลังงานที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ

ความต่างศักย์ (โวลต์)	ระยะห่างระหว่างขั้ว (เซนติเมตร)	พลังงานไฟฟ้า (วัตต์.ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน	
			(กิโลกรัมโครเมียมต่อกิโลวัตต์.ชั่วโมง)	(กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม)
6	0.5	12.00	0.0496	20.15
	1.0	8.76	0.0680	14.70
	2.0	3.64	0.1636	6.11
8	0.5	22.00	0.0268	37.29
	1.0	18.48	0.0312	31.99
	2.0	8.12	0.0571	17.50*
10	0.5	33.25	0.0174	57.38
	1.0	27.50	0.0208	48.07
	2.0	12.72	0.0398	25.09*

*ไม่สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า การลดความต่างศักย์ทำให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานสูงขึ้น ดังนั้นในการทดลองขั้นต่อไป จึงใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 2 - 6 โวลต์ เพื่อหาแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงพลังงาน และแปรผันระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็น 1 และ 2 เซนติเมตร ในการ

บำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้าโดยใช้ถังปฏิกริยาขนาด 17 x 10 x 35 เซนติเมตร แผ่นเหล็กที่ใช้มีขนาด 15 x 27 x 0.2 เซนติเมตร

3. ศึกษาผลของการแปรผันปริมาณน้ำเสีย

ในการทดลองนี้แปรผันปริมาณน้ำเสียเป็น 3 และ 5 ลิตร ทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วเป็น 480 และ 810 ตารางเซนติเมตร เพื่อเปรียบเทียบผลของค่าความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วที่ใช้ในการกำจัด Cr^{6+} เมื่อปริมาณน้ำเสียเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการแปรผันตัวแปรต่างๆ มีผลต่อกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในระบบ ดังแสดงในตารางที่ 8 นอกจากนี้ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานครั้งที่ 2 ความเข้มข้นของ Cr^{6+} ในน้ำเสียนี้น่าจะลดลงเนื่องจากมีจำนวนชิ้นงานลดลง การทดลองในขั้นตอนนี้จึงทำการเจือจางความเข้มข้นของน้ำเสียเท่ากับ 350 มก./ล.

ตารางที่ 8 กระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ ระยะห่างระหว่างขั้วและพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วต่างๆ

ความต่างศักย์ (V)	ระยะห่าง ระหว่างขั้ว (cm)	พื้นที่ผิวสัมผัส (cm^2)	กระแสไฟฟ้า (A)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า (mA/cm^2)
2	1	480	0.23	0.5
		810	-	-
	2	480	0.15	0.3
		810	-	-
4	1	480	0.85	1.8
		810	1.38	1.7
	2	480	0.50	1.0
		810	0.82	1.0
6	1	480	1.52	3.2
		810	2.26	2.8
	2	480	0.80	1.6
		810	1.25	1.5

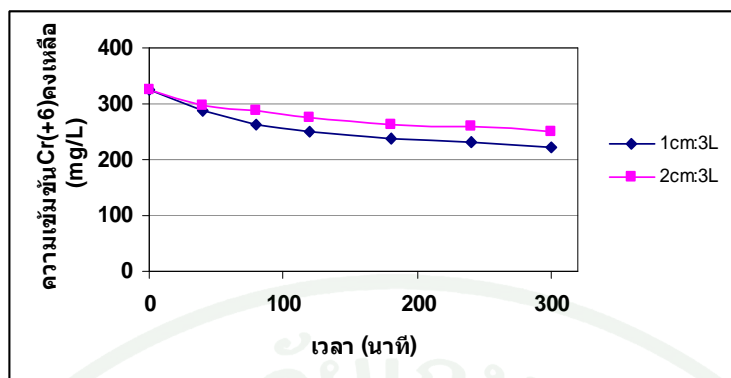
3.1 การเปรียบเทียบผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าในถังปฏิกิริยาขนาด 3 และ 5 ลิตร

3.1.1 ระยะห่างระหว่างขั้วต่อการกำจัดโครเมียม (Cr^{6+})

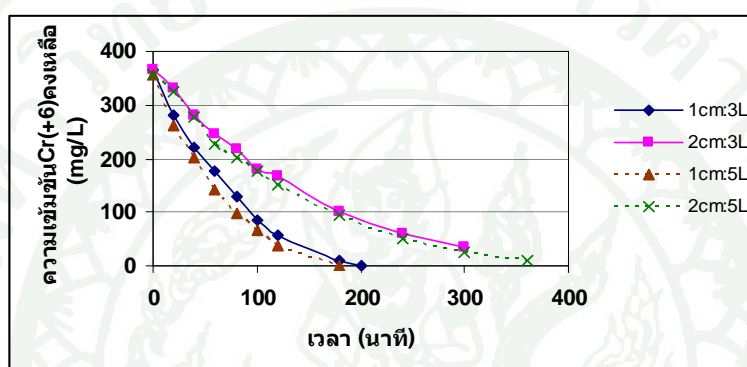
จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเดียวกัน การลดระยะห่างระหว่างขั้วทำให้อัตราการกำจัด Cr^{6+} สูงขึ้น สอดคล้องกับผลการทดลองในข้อ 2.2.1 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาตรน้ำเสีย โดยให้พื้นที่ผิวสัมผัสต่อปริมาตร (A/V ratio) คงที่ เท่ากับ 162 ตารางเซนติเมตรต่อลิตร พบว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วเดียวกัน จะมีแนวโน้มในการกำจัด Cr^{6+} และเวลาที่ใช้ในการกำจัดใกล้เคียงกัน ทั้งในปริมาตร 3 และ 5 ลิตร เช่น ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ภายในเวลา 120 นาทีทั้งในปริมาตร 3 และ 5 ลิตร ดังนั้นการแปรผันปริมาตรน้ำเสียโดยให้ค่า A/V ratio คงที่ ไม่ส่งผลกระทบต่อผลของระยะห่างระหว่างขั้วในการกำจัด Cr^{6+}

3.1.2 ระยะห่างระหว่างขั้วต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

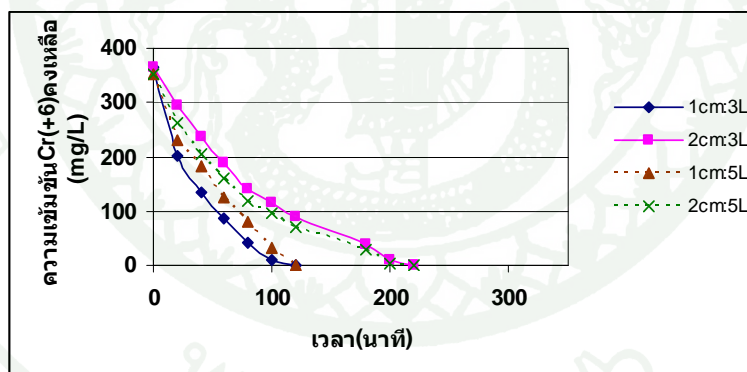
เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบระหว่างทำการทดลอง พบว่า การลดระยะห่างระหว่างขั้วทำให้ความต้านทานในระบบลดลง อัตราการเพิ่มของค่าพีเอชสูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 13 สอดคล้องกับผลการทดลองในการศึกษาขั้นต้น นอกจากนี้การแปรผันปริมาตรน้ำเสียโดยให้ค่า A/V ratio คงที่ ทำให้อัตราการเพิ่มของค่าพีเอชมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ซึ่งการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าทำให้ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดมีค่าอยู่ในช่วงที่เป็นเบสในทุกสภาวะการทดลอง ยกเว้นที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ ระยะเวลาในการทดลอง 300 นาที ค่าพีเอชของน้ำเสียหลังการบำบัดยังคงอยู่ในสภาวะที่เป็นกรด คือ 6.02 และ 3.68 สำหรับระยะห่างระหว่างขั้ว 1 และ 2 เซนติเมตรตามลำดับ



(ก)

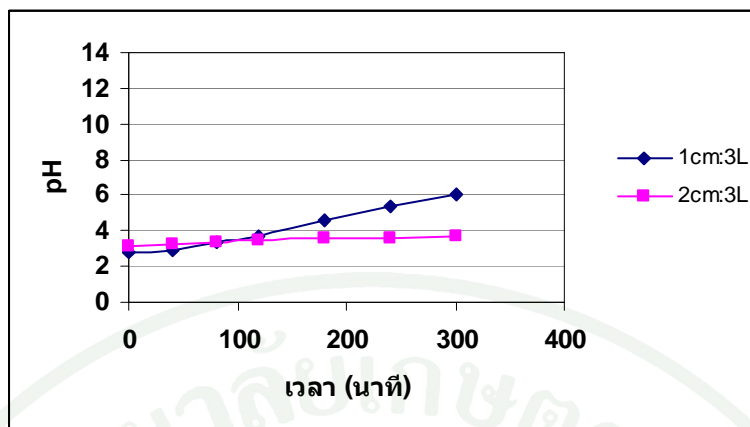


(ข)

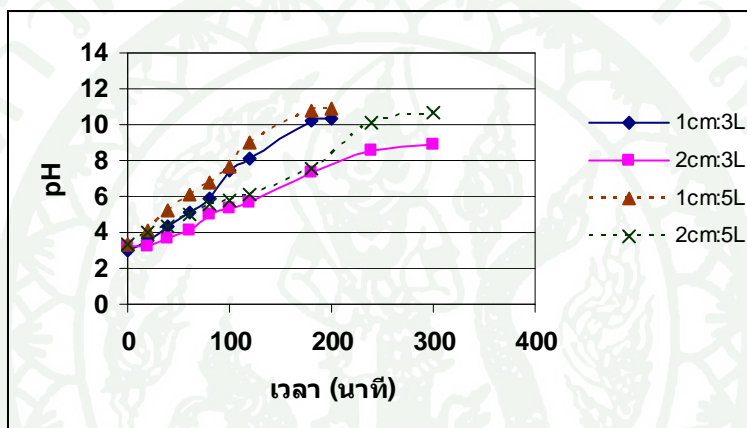


(ค)

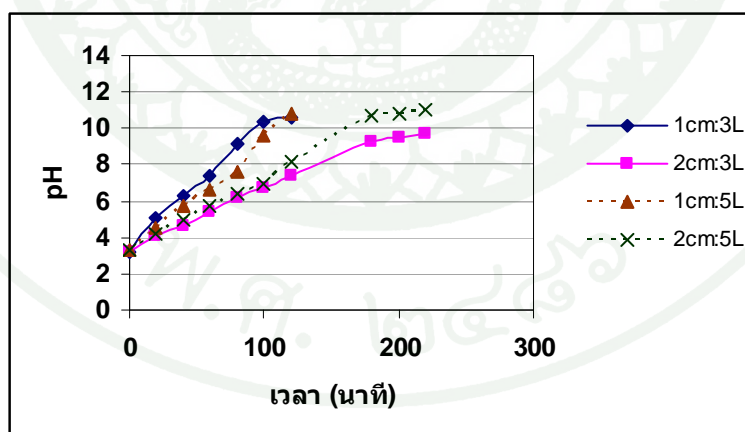
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Cr^{6+} คงเหลือกับเวลาที่ระยะห่างระหว่างขั้วและปริมาตรน้ำเสียต่างๆ (ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ (ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์



(ก)



(ข)



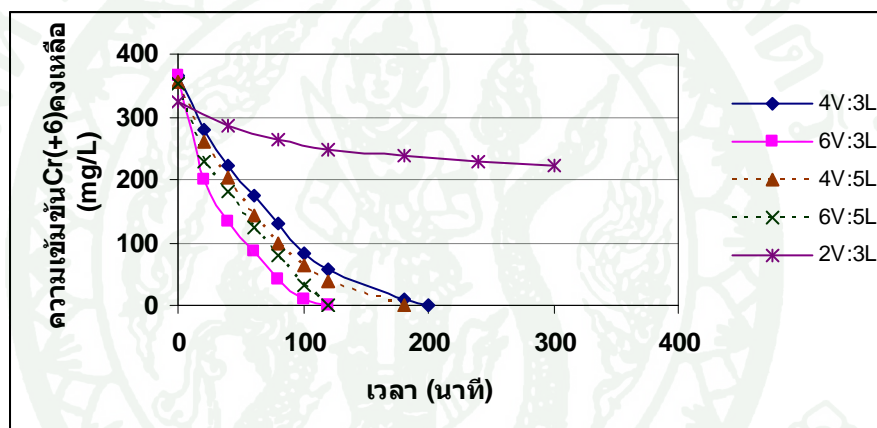
(ค)

ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชกับเวลาในการกำจัดโครเมียมที่ระยะห่างระหว่างขั้วและ ปริมาณน้ำเสียต่างๆ (ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ (ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ (ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์

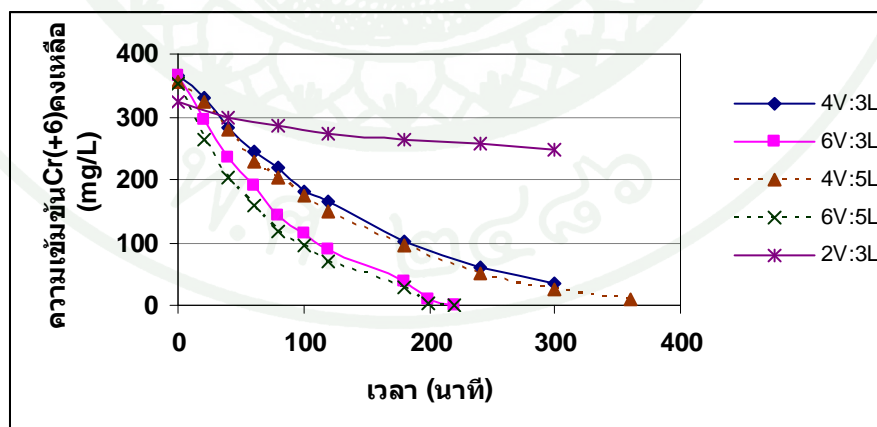
3.2 การเปรียบเทียบผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าในถังปฏิกริยาขนาด 3 และ 5 ลิตร

3.2.1 ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการกำจัดโครเมียม (Cr^{6+})

จากการทดลองดังแสดงในภาพที่ 14 พบว่า อัตราการกำจัด Cr^{6+} แปรผันโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ สอดคล้องกับผลการทดลองในข้อ 2.1.1 และมีแนวโน้มในการกำจัด Cr^{6+} ใกล้เคียงกันทั้งในปริมาตร 3 และ 5 ลิตร ซึ่งจะเห็นผลอย่างชัดเจน ที่ระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 2 เซนติเมตร นั่นคือ การแปรผันปริมาตรน้ำเสียโดยให้ค่า A/V ratio เท่ากัน จะไม่มีผลต่อแนวโน้มการกำจัด Cr^{6+} มากนัก



(ก)



(ข)

ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ Cr^{6+} คงเหลือกับเวลาที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและปริมาตรน้ำเสียต่างๆ (ก) ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร (ข) ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร

ในการทดลองแปรผันค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่า ที่ 4 และ 6 โวลต์สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ แต่ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์หรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 1.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ไม่สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ภายในเวลา 300 นาที เนื่องจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าลดลง ส่งผลให้มีปริมาณ Fe^{2+} ละลายจากขั้วไฟฟ้าลงสู่ น้ำเสียลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

Heidman and Calmano (2007) ได้อธิบายถึงกลไกในการกำจัด Cr^{6+} ไว้ 2 แบบ คือ ที่กระแสไฟฟ้าสูง (6.6 – 10.5 โวลต์) Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์โดยตรงที่ขั้วแคโทดและเกิดเป็นตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ และที่กระแสไฟฟ้าต่ำ (0.9 – 1.1 โวลต์) Cr^{6+} ถูกรีดิวซ์โดย Fe^{2+} ที่มาจากขั้วแอโนดเกิดเป็นตะกอนร่วมของโครไมต์ (FeCr_2O_4)

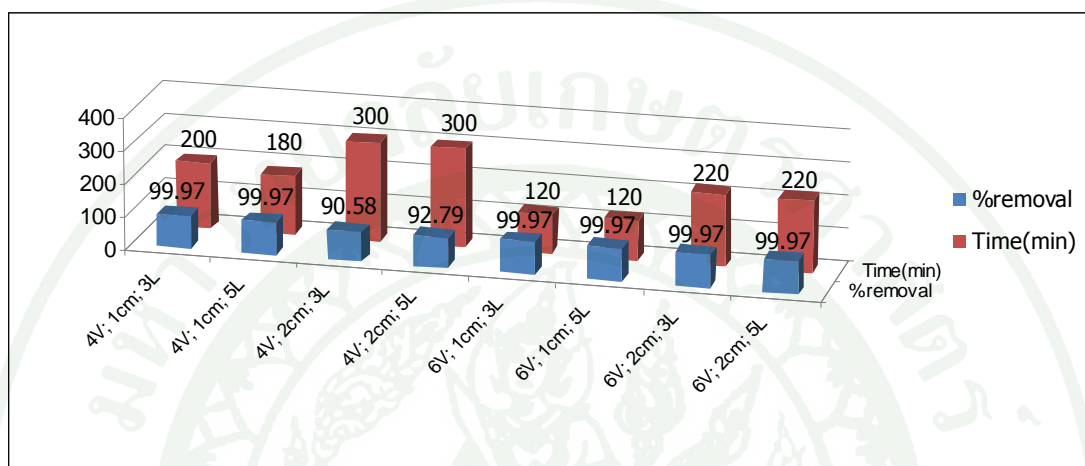
ดังนั้นการใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่ำจะทำให้มีปริมาณของ Fe^{2+} ไม่เพียงพอในการรีดิวซ์ Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (Lakshmiathiraj และคณะ, 2007) นั่นคือระบบต้องใช้เวลานานขึ้นเพื่อใช้ในการกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

3.2.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้ามีผลให้อัตราการเพิ่มของค่าพีเอชสูงขึ้น โดยมีแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งในปริมาตร 3 และ 5 ลิตร ดังแสดงในภาพที่ 13 ซึ่งสอดคล้องการกับผลการทดลองในการศึกษาขั้นต้น เพราะในระบบมีกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำที่ขั้วแคโทดได้ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น คือ H_2 และ OH^- โดยในช่วงแรกน้ำเสียก่อนการบำบัดมีสถานะเป็นกรด มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2.5 – 3.5 ระบบจะใช้เวลาในช่วงแรกเพื่อสะเทิน (neutralize) โปรตรอน (H^+) ในระบบ จากนั้นค่าพีเอชจะค่อยๆ สูงตามเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่ง OH^- บางส่วนจะถูกใช้ในการตกตะกอน Fe^{2+} , Fe^{3+} และ Cr^{6+} ตามสมการที่ 46 – 48 และบางส่วนยังคงเหลืออยู่ในระบบ ทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.85 – 11.05 ซึ่งมีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานเล็กน้อย

เมื่อพิจารณาในภาพรวมจะเห็นได้ว่าการแปรผันปริมาณน้ำเสียมี่ความแตกต่างกันน้อยมากทั้งในแง่ของเวลาและร้อยละการกำจัด Cr^{6+} ดังแสดงในภาพที่ 15 เช่น ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร สามารถกำจัด Cr^{6+} ดีที่สุด คือ 99.97 % ทั้งใน 3 ลิตร และ 5 ลิตร โดยใช้เวลา 120 นาที ในขณะที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว

2 เซนติเมตร สามารถกำจัด Cr^{6+} ได้ 99.97 % ทั้งใน 3 และ 5 ลิตรเหมือนกัน แต่ต้องเพิ่มเวลาในการบำบัดเป็น 220 นาที ดังนั้น ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วเดียวกัน การขยายขนาดของระบบโดยให้ A/V ratio คงที่ ไม่มีผลต่อร้อยละการกำจัด Cr^{6+} และเวลาที่ใช้ในการบำบัด เนื่องจากมีความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 15 ร้อยละการกำจัด Cr^{6+} และเวลาที่ใช้ในการบำบัดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วและปริมาตรต่างๆ

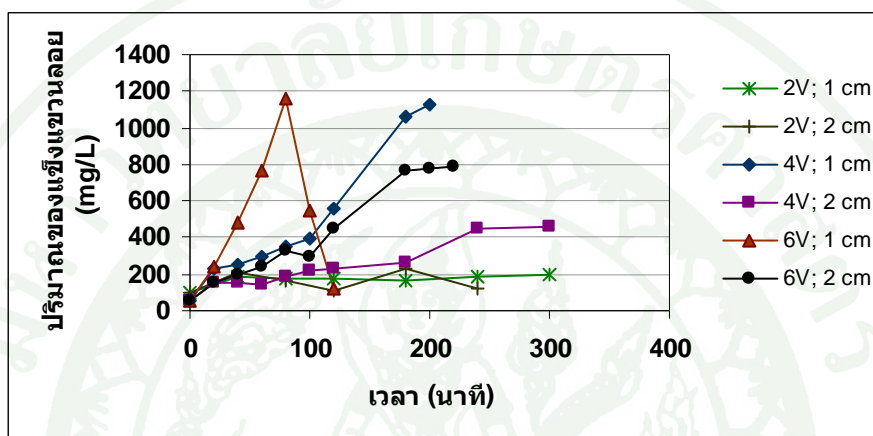
3.3 คุณภาพน้ำทิ้งหลังผ่านการบำบัด

ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า นอกจากต้องควบคุมปริมาณ Cr^{6+} ในน้ำทิ้งหลังการบำบัด ให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแล้วยังต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์อื่นๆ ให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานด้วย

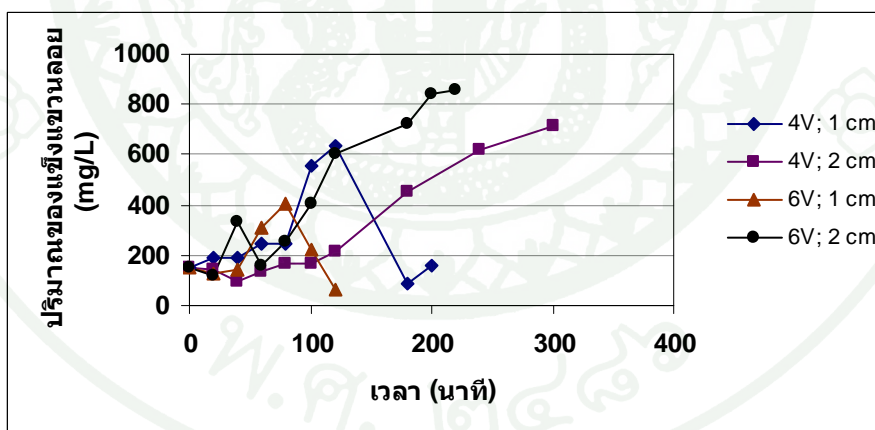
3.3.1 ปริมาณของแข็งแขวนลอย

จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 16 พบว่า ปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำทิ้งหลังการบำบัดมีค่าเกินมาตรฐานน้ำทิ้งในทุกสภาวะการทดลอง เนื่องจากการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าและลดระยะห่างระหว่างขั้วทำให้ในระบบมีกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เกิด H_2 ที่ขั้วแคโทดมากขึ้น ซึ่ง H_2 ที่เกิดขึ้นจะไปรบกวนการรวมตะกอนและดันให้ตะกอนลอยตัวขึ้นสู่ด้านบนของถัง

ปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสรายุทธ (2539) นอกจากนี้ระหว่างการทำทดลองได้ทำการกวน เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้นแต่การกวนจะไปรบกวนการรวมตัวของตะกอน ทำให้ตะกอนที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดเล็กและกระจายตัวในระบบ ส่งผลให้ตะกอนจมตัวได้ยาก จากการวิเคราะห์ตะกอนด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction (XRD) พบว่า ตะกอนมีลักษณะเป็นอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งมีแนวโน้มที่จะเป็นตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ และ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ดังแสดงในภาพที่ 17

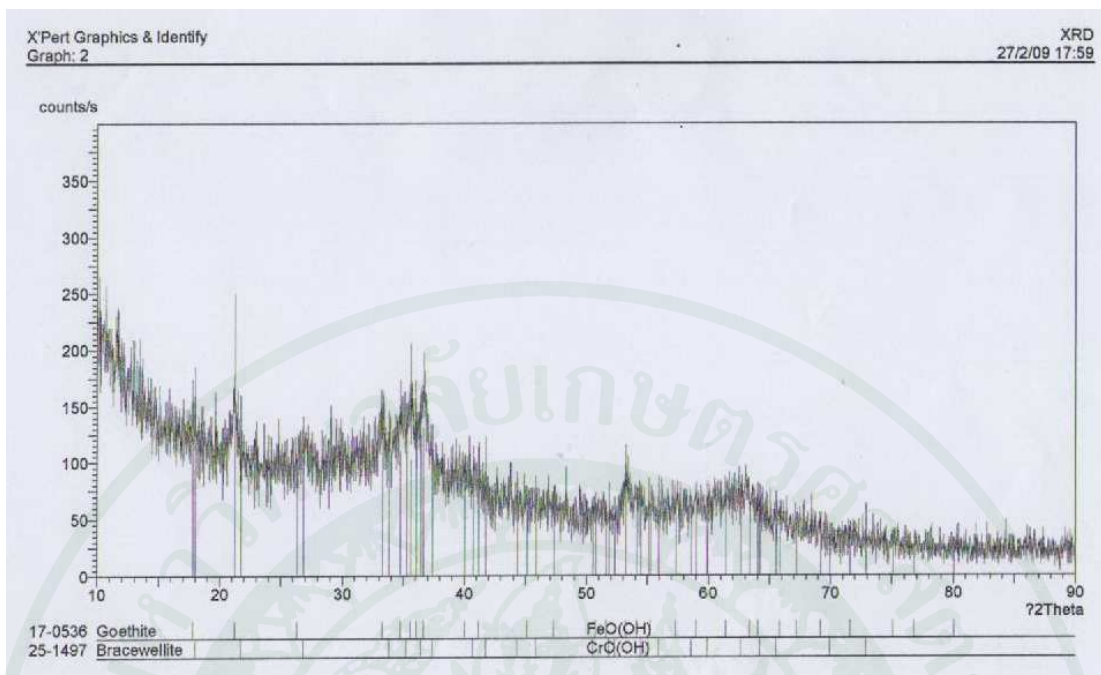


(ก)



(ข)

ภาพที่ 16 ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ
(ก) น้ำเสียปริมาตร 3 ลิตร (ข) น้ำเสียปริมาตร 5 ลิตร

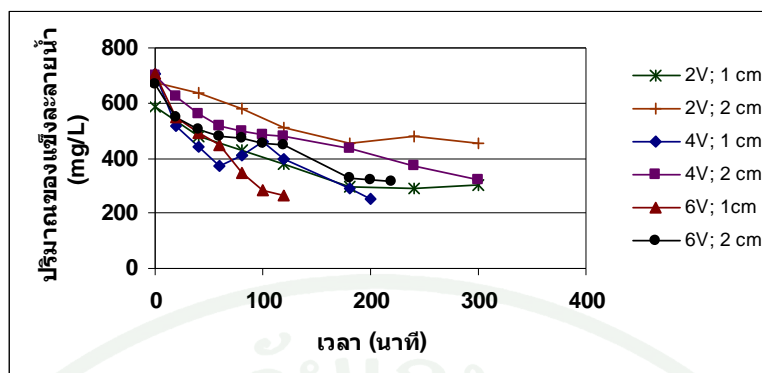


ภาพที่ 17 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนวิเคราะห์โดยเทคนิค X – ray diffraction

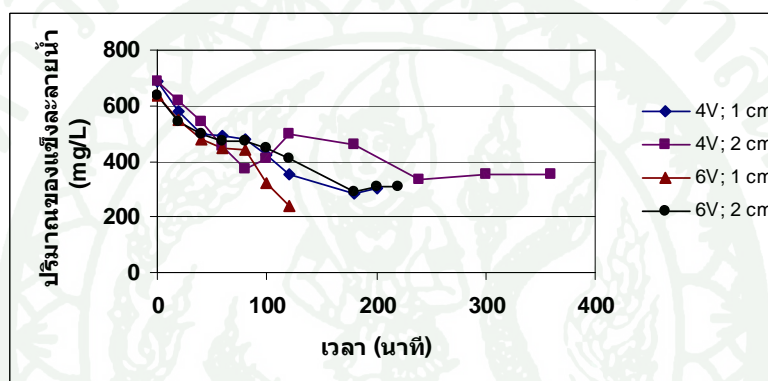
น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีปริมาณของแข็งแขวนลอยเกินค่ามาตรฐาน ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียโดยกระบวนการนี้ควรมีระบบกำจัดของแข็งแขวนลอยในขั้นตอนต่อไป เช่น ถังตกตะกอนหรือถังกรองทราย เพื่อลดปริมาณของแข็งแขวนลอยให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง

3.3.2 ปริมาณของแข็งละลายน้ำ

สำหรับปริมาณของแข็งละลายน้ำมีค่าลดลงเมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 18 เนื่องจากการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชันได้ดีขึ้น เกิด OH^- ที่ขั้วแคโทดมากขึ้น จากนั้น OH^- ที่เกิดขึ้นจะไปรวมตัวกับอออน (Cr^{3+} , Fe^{2+} และ Fe^{3+}) ในน้ำเสีย อออนเหล่านี้ถูกจับอยู่ในรูปของตะกอน ดังสมการที่ 46 – 49 ทำให้ปริมาณของแข็งละลายในน้ำมีค่าลดลง ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจะมีปริมาณของแข็งละลายน้ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทุกสภาวะ



(ก)



(ข)

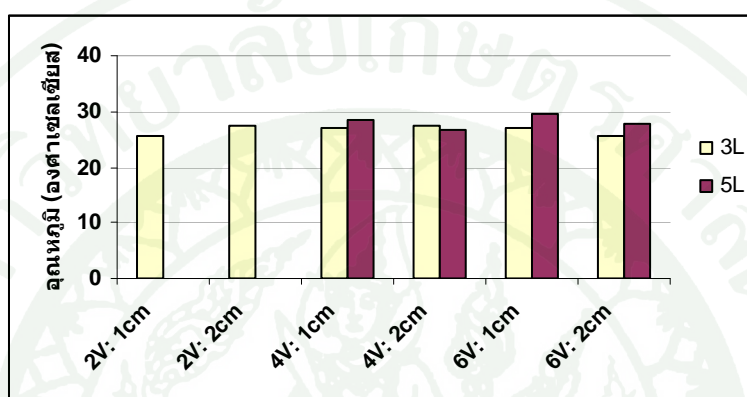
ภาพที่ 18 ปริมาณของแฉ่งละลายน้ำที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ
(ก) น้ำเสียปริมาตร 3 ลิตร (ข) น้ำเสียปริมาตร 5 ลิตร

3.3.3 ค่าพีเอช

เมื่อทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช จะเห็นได้ว่า ค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นตามเวลาในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด เกิด OH^- ขึ้น ทำให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 8.85 – 11.05 ซึ่งถือว่าไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงาน ต้องทำการสะเทินน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดให้ค่าพีเอชมีค่าเป็นกลางหรืออยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

3.3.4 อุณหภูมิ

การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าและลดระยะห่างระหว่างขั้วจะมีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้า นอกจากจะมีผลต่อการบำบัดสารมลพิษแล้ว ยังมีผลที่ตามมาอีกประการหนึ่งคือ การสูญเสียพลังงานความร้อนให้แก่ระบบ



ภาพที่ 19 อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเสียอยู่ในช่วง 26 – 28 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านการบำบัดแล้วระดับอุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส ในทุกสภาวะการทดลอง ดังแสดงในภาพที่ 19 เนื่องจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่ต่ำ (ในช่วง 0.23 – 2.26 แอมแปร์) มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบผลการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าของชุดการทดลองต่างๆ ได้ผลว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร สามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะได้เร็วที่สุด โดยใช้เวลาเพียง 120 นาที ดังแสดงในภาพที่ 14 ค่าความเข้มข้นของมลพิษหลังการบำบัดมีค่าความเข้มข้นต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ยกเว้นปริมาณของแข็งแขวนลอยและค่าพีเอช ทั้งในปริมาตร 3 และ 5 ลิตร ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะก่อนบำบัดและหลังบำบัดด้วยกระบวนการรวมตัวด้วยไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร

รายการ	มาตรฐานน้ำทิ้ง	ก่อนการบำบัด	หลังการบำบัด (120 นาที)	
			3 ลิตร	5 ลิตร
Cr ⁶⁺ (มก./ล.)	≤ 0.25	350	≤ 0.1	≤ 0.1
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	≤ 50	55 – 150	115	60
ของแข็งละลายน้ำ (มก./ล.)	≤ 3,000	705 – 635	267	241
ค่าพีเอช	5.5 – 9	3.18 – 3.29	10.58	10.79
อุณหภูมิ	≤ 40	26.8	27.2	29.4

4. เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัดโครเมียม

ในการบำบัดน้ำเสียนอกจากจะพิจารณาความสามารถในการกำจัดมลพิษแล้ว สิ่งที่ต้องพิจารณาร่วมคือ มาตรฐานและต้นทุนที่ใช้ในการบำบัด ซึ่งตารางที่ 10 แสดงค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการกำจัด Cr⁶⁺ ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในแต่ละสภาวะ โดยค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$W = VIt$$

W คือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (วัตต์.ชั่วโมง)

V คือค่าความต่างศักย์ (โวลต์)

I คือกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

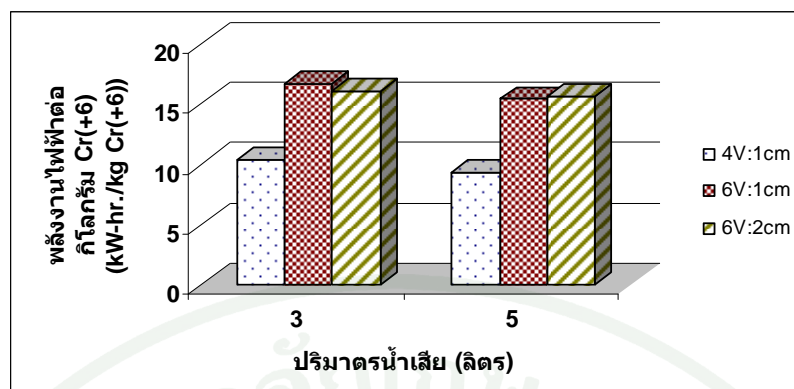
t คือเวลา (ชั่วโมง)

ตารางที่ 10 พลังงานไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าต่อกิโลกรัม Cr^{6+} ที่ถูกกำจัด ที่สภาวะต่างๆ

ความต่างศักย์ (Volt)	ระยะห่างระหว่างขั้ว (cm)	พลังงานไฟฟ้า (W-hr)		ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (kW-hr/kg Cr^{6+} removal)	
		3 ลิตร	5 ลิตร	3 ลิตร	5 ลิตร
2	1	2.30*	-	7.52*	-
	2	1.50*	-	6.67*	-
4	1	11.33	16.56	10.35	9.33
	2	10.00*	19.68*	10.08*	11.36*
6	1	18.24	27.12	16.66	15.41
	2	17.60	27.50	16.08	15.63

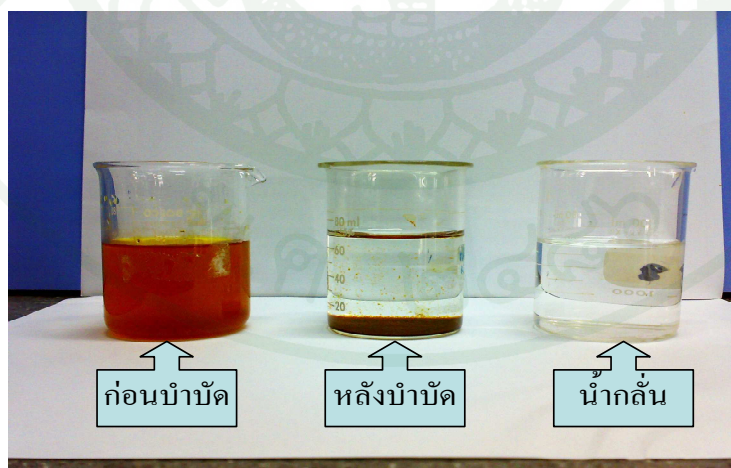
*ไม่สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ ภายในเวลา 300 นาที

เมื่อเปรียบเทียบการใช้พลังงานไฟฟ้าในตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่า พลังงานไฟฟ้าที่ใช้จะแปรผันตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าและปริมาณน้ำเสีย ซึ่งการบำบัดโดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร มีความเหมาะสมที่สุด คือใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 11.33 และ 16.56 วัตต์. ชั่วโมง หรือมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานไฟฟ้า เท่ากับ 10.35 และ 9.33 กิโลวัตต์. ชั่วโมงต่อกิโลกรัม โครเมียมที่ถูกกำจัด สำหรับน้ำเสียปริมาตร 3 และ 5 ลิตรตามลำดับ แม้ว่าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าแต่ที่สภาวะดังกล่าวไม่สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดให้ค่าความเข้มข้น Cr^{6+} มีค่าไม่เกิน 0.25 มก./ล. ได้ ในขณะที่เมื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับปริมาณน้ำเสีย จะเห็นได้ว่า ที่ปริมาตร 5 ลิตร จะมีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าที่ปริมาตร 3 ลิตรในทุกสภาวะ เนื่องจากที่ปริมาตร 5 ลิตร มีพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้ากับน้ำเสียมากกว่า (480 และ 810 ตารางเซนติเมตรสำหรับน้ำเสียปริมาตร 3 และ 5 ลิตรตามลำดับ) ทำให้ระบบมีความต้านทานน้อยลง ดังสมการที่ 39 เกิดการไหลของกระแสในระบบมากขึ้น แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{6+} เชิงพลังงานของชุดการทดลองที่ให้ผลการบำบัดจนผ่านเกณฑ์มาตรฐาน พบว่า การแปรผันระยะห่างระหว่างขั้วและปริมาณน้ำเสีย โดยให้ A/V ratio มีค่าคงที่ (162 ตารางเซนติเมตรต่อลิตร) จะมีประสิทธิภาพเชิงพลังงานใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับปริมาณน้ำเสีย 3 และ 5 ลิตร ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าและระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ โดยกระบวนการรวมตะกอนไฟฟ้า ในถึงปฏิกิริยาแบบทีละเท คือ ใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตร เป็นสภาวะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด Cr^{6+} เชิงพลังงานดีที่สุด โดยพลังงานที่ใช้ในการกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมีค่าเท่ากับ 10.35 และ 9.33 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม Cr^{6+} ที่ถูกกำจัด สำหรับน้ำเสียปริมาณ 3 และ 5 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยใช้สภาวะดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 เปรียบเทียบลักษณะน้ำเสียก่อนบำบัด หลังบำบัด และน้ำกลั่น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการทดลองศึกษาการกำจัดโครเมียม (เฮกซะวาเลนต์) จากน้ำเสียในกระบวนการชุบโลหะโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จัดเรียงขั้วไฟฟ้าแบบโมโนโพลาร์โดยมีแผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ในการทดลองขั้นต้น (Pre test) เพื่อศึกษาแนวโน้มในการกำจัด Cr^{6+} ในระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่า ปริมาณ Cr^{6+} ที่ถูกกำจัดแปรผันตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างขั้ว ซึ่งที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 0.5 เซนติเมตร สามารถกำจัด Cr^{6+} ได้เร็วที่สุด (40 นาที) แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพเชิงพลังงาน การลดความต่างศักย์ไฟฟ้าและเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้ว พลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีแนวโน้มลดลง โดยที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 6 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร มีการใช้พลังงานไฟฟ้าในการกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งน้อยที่สุด คือ สามารถกำจัด Cr^{6+} ได้ถึง 0.1636 กิโลกรัมโครเมียมต่อ กิโลวัตต์.ชั่วโมง หรือ 6.11 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัมโครเมียม ภายในเวลา 70 นาที

2. สภาวะที่เหมาะสมจะพิจารณาจากประสิทธิภาพเชิงพลังงาน คือ การใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดและสามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ในสภาวะที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ถึงปฏิกิริยาขนาด $17 \times 10 \times 35$ เซนติเมตร พบว่า ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 4 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 เซนติเมตรสามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ โดยใช้พลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 10.35 และ 9.33 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม Cr^{6+} ที่ถูกกำจัด สำหรับปริมาตร 3 และ 5 ลิตรตามลำดับ ทั้งนี้ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2 โวลต์ ระยะห่างระหว่างขั้ว 1 และ 2 เซนติเมตร ถึงแม้จะใช้พลังงานไฟฟ้าเพียง 7.52 และ 6.67 กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม Cr^{6+} ที่ถูกกำจัด แต่ไม่สามารถกำจัด Cr^{6+} ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ ดังนั้น

3. การแปรผันปริมาตรน้ำเสียโดยให้ค่า A/V ratio คงที่และระยะห่างระหว่างขั้ว ให้ประสิทธิภาพเชิงพลังงานใกล้เคียงกันทั้งในปริมาตร 3 และ 5 ลิตร เพราะมีค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ การแปรผันความต่างศักย์ไฟฟ้ามีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงาน

4. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบ โลหะด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าสามารถลดความเข้มข้นของมลพิษให้ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งได้ ยกเว้นปริมาณของแข็งแขวนลอยและค่าพีเอช จึงควรมีระบบในการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยและค่าพีเอชต่อจากระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ให้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเปรียบเทียบการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า โมโนโพลาร์แบบขนานและการจัดเรียงขั้วแบบไบโพลาร์ เพื่อศึกษาผลของการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพเชิงพลังงาน
2. ควรศึกษาการควบคุมค่าพีเอชของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
3. ควรมีถังตกตะกอนรองรับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เพื่อลดปริมาณของแข็งแขวนลอยให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกษตร ชัยมณีวงษ์. 2537. เคมีสภาวะแวดล้อมเชิงปฏิบัติการ. ภาควิชาเคมี สถาบันราชภัฏเลย, เลข.

ขวัญชีวัน วิริยะเจริญมงคล. 2549. การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะสำหรับอุตสาหกรรม SME โดยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

คลเดช ตั้งตระการพงษ์. 2539. การควบคุมมลพิษในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดเล็กโดยวิธีการลดปริมาณของเสียและการบำบัดด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

ตติ จิตรู. 2550. การศึกษาการเปรียบเทียบการกำจัดเฮกซะวาเลนที่โครเมียมโดยกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีในระบบที่ละเทและต่อเนื่อง. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 เรื่องกำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

สมศักดิ์ ศิริไชย, อัญชุลี สุกแสงปัญญา และนิสากร ทองก้อน. 2550. เคมี่ 2. เซนเกจ เลินนึ่ง (ประเทศไทย) จำกัด, กรุงเทพฯ.

เพ็ญศรี ทองนพเนื้อ. 2549. เคมี่วิเคราะห์เชิงไฟฟ้า. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

พุทธิสาร ชัยพันธุ์. 2538. การบำบัดน้ำเสียโครเมียมจากโรงงานชุบโลหะด้วยวิธีการแลกเปลี่ยนประจุไอออน. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตันฑกุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม เล่ม 1. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

มันสิน ตันทุลเวสม์. 2542. **วิศวกรรมประปา เล่ม 2.** โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

วิภา มุตติสานนท์. 2551. **กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากกระบวนการหลอมตะกั่วจากแบตเตอรี่เก่า.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วรรณรัตน์ วัฒนชัย. 2547. **กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสำหรับน้ำเสียปนเปื้อนโลหะหนักจากโรงงานประกอบรถยนต์.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศรายุทธ ลาภพูนผล. 2549. **การกำจัดโครเมียมโดยกระบวนการไฟฟ้าเคมีร่วมกับการแยกตะกอนลอย.** มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ศิริพร จันทศิริ. 2547. **เคมีวิเคราะห์การวิเคราะห์เชิงปริมาณ.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ, สงขลา.

สาโรช บุญยกิจสมบัติ. 2536. **การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีทางเคมีในโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดกลางและเล็ก.** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุรชาติพิศ ศิริไพศาลพัฒน์, อัจฉนา วงศ์ชัยสุวัฒน์และสายใจ ชาญเศรษฐิกุล. **เคมีทั่วไป 2.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุวรรณา เหลืองชลธาร. 2542. **เคมีอนินทรีย์ทางเภสัชศาสตร์ เล่ม 1.** สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

สุรภี โรจน์อารายนนท์. 2526. **สภาวะแวดล้อมของเรา ตอน มลพิษสภาวะแวดล้อม.** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

หทัยทัต ชื่อสุวรรณ. 2544. **การนำโลหะหนักกลับคืนจากสลัดจ์โดยวิธีไฟฟ้าเคมี.** จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

หิริหัตถา เพชรมั่ง. **เคมีอนินทรีย์ 2.** ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ., สงขลา.

อนันต์ ทองมอย. 2526. **หุบโครเมียม - หุบทอง**. โรงพิมพ์เรือนแก้วการพิมพ์, กรุงเทพฯ.

อินทิรา หาญพงษ์พันธ์. 2536. **เคมีทั่วไป (สำหรับวิศวกรรมศาสตร์)**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

Almaguer – Busso, G., G. Velasco – Martinez, G. Carreno – Aguilera, S. Gutierrez – Granados, E. Torres – Reyes and A. Alatorre - Ordaz. 2009. A comparative study of global hexavalent chromium removal by chemical and electrochemical processes. **Electrochemistry Communications** 11: 1097 – 1100

APHA, AWWA and AEF. 2005. **Standard methods of examination of water and wastewater**. 21st ed. American Public Health Association., Washinton, DC.

Babu, R.R., N.S. Bhadrinarayana, K.M. Meera Sheriffa Begum and N. Anantharaman. 2007. Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. **Journal of University of Chemical Technology and Metallurgy** 42(2): 201 – 206.

Chen, G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology** 38: 11 – 41.

Elwakeel, K.Z. 2010. Removal of Cr(VI) from alkaline aqueous solutions using chemically modified magnetic chitosan resins. **Desalination** 250: 105 – 112.

Gao, P., X. Chen, F. Shen and G. Chen. 2005. Removal of Chromium(VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter. **Separation and Purification Technology** 43: 117 – 123.

Ge, J., J. Qu, P. Lei and H. Liu. 2004. New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. **Separation and Purification Technology** 36: 33 – 39.

- Golder, A.K., A.N. Samanta and S. Ray. 2007. Removal of Cr^{3+} by electrocoagulation with multiple electrodes: Bipolar and monopolar configurations. **Journal of Hazardous Materials** 141: 653 – 661.
- Golder, A.K., A.N. Samanta and S. Ray. 2007. Removal of trivalent chromium by electrocoagulation. **Separation and Purification Technology** 53: 33 – 41.
- Heidman, I and W. Calmano. 2007. Removal of Cr(VI) from Model Wastewater by Electrocoagulation with Fe Electrode. **Separation and Purification Technology** 61: 15 – 21.
- House, J.E. 2008. **Inorganic Chemistry**. Elsevier Inc.
- Koby, M., O.T. Can and M. Bayramoglu. 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminium electrodes. **Journal of Hazardous Materials** B100: 163 – 178.
- Lakshmipathiraj P., G.B. Raju, M.R. Basariya, S. Parvathy and S. Prabhakar. 2008. Removal of Cr(VI) by electrochemical reduction. **Separation and Purification Technology** 60: 96 – 102.
- Mollah, M.Y.A., R. Schennach, J.R. Parga and D.L. Cocke. 2001. Electrocoagulation (EC) – science and applications. **Journal of Hazardous Materials** B84: 29 – 41.
- Rai, D., B.M. Sass and D.A. Moore. 1987. Chromium(III) hydrolysis constants and solubility of Chromium(III) hydroxide. **Inorganic**. Vol. 26, No. 3, pp. 345 – 349.
- Weiner E.R., 2008. **Applications of Environmental Aquatic Chemistry**. 2nd edition. CRC Press Taylor & Francis Group.

Young, K. and I.L. Jung. 2001, Photocatalytic reduction of Cr(VI) in aqueous solution by UV irradiation with the presence of titanium dioxide. **Water research**. Vol. 35, No.1, pp. 135 – 142.







ภาคผนวก ก
การวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์

ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์

ค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่สำคัญในงานวิจัยนี้ ได้แก่ ค่าพีเอช, ค่าการนำไฟฟ้า, ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งละลายน้ำ และเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+})

1.) ความเป็นกรด – เบส (pH)

วิธีวิเคราะห์ : วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่อง pH meter Metrohm - 827

หมายเหตุ : รายละเอียดการใช้เครื่อง pH meter ศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

2.) ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

วิธีวิเคราะห์ : วิเคราะห์โดยตรงด้วยเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า Orion – model 160

หมายเหตุ : รายละเอียดการใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าศึกษาได้จากคู่มือเฉพาะเครื่องนั้นๆ

3.) ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)

ของแข็งแขวนลอย หมายถึง ปริมาณสารที่เหลือค้างอยู่บนกระดาษกรองน้ำตัวอย่างผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) และทำการระเหยน้ำ (Evaporation) ออกจากกระดาษกรองใยแก้วโดยการอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งหาน้ำหนักของกระดาษกรองใยแก้วอีกครั้ง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือปริมาณของแข็งแขวนลอยต่อปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. โถดูดความชื้น (Desiccator)
2. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. กระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter: GF/C)
5. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
6. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีวิเคราะห์

1. นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง GF/C สมมุติมีน้ำหนัก A กรัม
3. ต่อชุดเครื่องมือสำหรับกรอง ใช้ปากคีบกระดาษกรอง GF/C วางบนกรวยบุคเนอร์ เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง โดยใช้ครั้งละ 20 มิลลิลิตร เปิดเครื่องดูดสุญญากาศต่อให้ดูน้ำจนแห้ง ทิ้งน้ำล้างไป
4. เลือกปริมาณน้ำตัวอย่างที่จะใช้ ควรเลือกให้มีค่าของแข็งแขวนลอยที่คิดบนกระดาษกรองไม่เกิน 200 มิลลิกรัม และไม่ควรมากกว่า 1 มิลลิกรัมเมื่อเลือกปริมาณแล้ว ทำการเขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันให้ดี เทน้ำตัวอย่างที่ทราบปริมาตรลงกรองโดยค่อยๆ เททีละน้อยอย่างต่อเนื่องจนหมด ใช้น้ำกลั่นฉีดล้างภาชนะที่ใช้ตวงตัวอย่าง และฉีดน้ำกลั่นที่ด้านข้างของกรวยบุคเนอร์รวมทั้งบนกระดาษแผ่นกรอง GF/C ปล่อยให้เครื่องดูดสุญญากาศดูดน้ำออกจนแห้ง ปิดเครื่อง
5. นำกระดาษกรอง GF/C ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักกระดาษกรอง สมมุติมีน้ำหนัก B กรัม
6. ทำข้อ 5 ซ้ำ จนได้น้ำหนักคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยกว่า 4% ของน้ำหนักครั้งก่อน

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)} = (B - A) \times 10^6 / C$$

เมื่อ A = น้ำหนักกระดาษกรอง GF/C (กรัม)

B = น้ำหนักกระดาษกรอง GF/C และของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาณน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

4.) ของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids: TDS)

ของแข็งละลายน้ำ หมายถึง ส่วนของน้ำตัวอย่างที่กรองผ่านกระดาษกรอง GF/C แล้วนำไปใส่ในถ้วยระเหยที่ทราบน้ำหนักแน่นอน และนำไประเหยด้วยไอน้ำจนแห้งแล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. โถดูดความชื้น (Desiccator)
2. ตู้อบ (Oven) ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 – 105 องศาเซลเซียส
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) สามารถชั่งได้ถึงทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. กระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter: GF/C)
5. เครื่องดูดสุญญากาศ (Suction pump) พร้อมขวดดูดสุญญากาศ
6. ถ้วยระเหย (Evaporating dishes)

วิธีวิเคราะห์

1. นำน้ำตัวอย่างมากรองเอาของแข็งแขวนลอยออกทั้งหมดก่อน โดยกรองผ่านกระดาษกรอง GF/C และเครื่องดูดสุญญากาศ
2. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการกรองใส่ถ้วยระเหยนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส ปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น ชั่งหาน้ำหนัก

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (มก./ล.)} = (B - A) \times 10^6 / C$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยระเหยอย่างเดียว (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยระเหยและของแข็ง (กรัม)

C = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

5.) เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+})

วิเคราะห์โครเมียมด้วยวิธี Diphenylcarbazide

เฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) จะทำปฏิกิริยากับไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (Diphenylcarbazide) ในสถานะเป็นกรดสร้างสีม่วงแดง ถ้าจะวิเคราะห์โครเมียมทั้งหมดต้องย่อยตัวอย่างด้วยกรดไนตริก-ซัลฟูริก แล้วออกซิไดซ์ด้วยโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) เพื่อเปลี่ยนเป็นไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+}) ให้อยู่ในรูปเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr^{6+}) ก่อน

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
2. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
3. เครื่อง pH meter Metrohm – 827
4. เตาให้ความร้อน (Hot Plate)

สารเคมี

1. Stock Chromium Solution โดยละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 141.1 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่นและเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร ซึ่งสารละลายที่เตรียมนี้ 1.00 มิลลิลิตร จะมี Cr เท่ากับ 500 ไมโครกรัม
2. Standard Chromium Solution ปิเปิดสารละลายโครเมียม 1.00 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนครบปริมาตร สารละลายที่เตรียมนี้ 1.00 มิลลิลิตร จะมี Cr เท่ากับ 5.00 ไมโครกรัม
3. กรดไนตริกเข้มข้น (Conc. HNO_3)
4. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4)
5. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 30%)
6. สารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์ โดยละลาย 1,5 – diphenylcarbazide 250 กรัมในอะซิโตน (Acetone) 50 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีชา ควรทิ้งเมื่อสารละลายเปลี่ยนสี

วิธีวิเคราะห์

ปรับค่าพีเอชสารละลายตัวอย่างด้วยกรดซัลฟูริก 0.2 N ให้มีค่าพีเอช 1.0 ± 0.3 โดยใช้เครื่องวัดพีเอชแล้วเจือจางเป็น 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายไดฟิโนลคาร์บาไซด์ 2.0 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 5 – 10 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาการสร้างสีเกิดสมบูรณ์ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็น Blank แล้วอ่านค่าจากกราฟมาตรฐาน

การเตรียมกราฟมาตรฐาน

เตรียมสารละลายมาตรฐาน โครเมียมให้มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ไมโครกรัม โดยเปิดสารละลายมาตรฐาน โครเมียม 1.00 มิลลิลิตร = 5.00 ไมโครกรัม มา 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบ 100 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นโครเมียมเป็นไมโครกรัมและค่าการดูดกลืนแสง

การคำนวณ

$$\text{โครเมียม (Cr}^{6+}\text{) (มก./ล.)} = \frac{\text{ค่าโครเมียมที่อ่านได้จากกราฟ}}{\text{ปริมาตรนำตัวอย่าง (มล.)}}$$



ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดลองขั้นต้น (Pre Test) ที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ ในน้ำเสียปริมาตร 1 ลิตร

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	TDS (mg/L)	Conductivity (μ c)	Cr(VI) remain (mg/L)	Cr-total remain (mg/L)	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
6	4	0.5	0	3.03	32.5	2880	5760	596	1152	0	0
			10	4.19	3033	2600	5190	224	339	4	10.75
			20	5.29	3398	2570	5140	42	51	8	14.44
			30	9.11	3446	2600	5200	0.2	0.57	12	20.15
			40	10.95	3501	2650	5270	0	0.25	16	26.85
			50	11.58	3346	2680	5370	0	0	20	33.56
			60	12	3259	2710	5420	0	0	24	40.27
6	1.46	1	0	3.05	32.5	1850	3705	596	1152	0	0
			10	3.44	1383	1600	3204	319	633	1.46	5.27
			20	4	3125	1620	3225	198	269	2.92	8.04
			30	7.87	2962	1610	3214	70.2	78.5	4.38	8.33
			40	9.84	1442	1470	2929	14.9	18.5	5.84	10.05
			50	11.58	425	1402	2805	3.48	4.26	7.3	12.32
			60	11.71	975	1500	3018	0	0.25	8.76	14.70

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	TDS (mg/L)	Conductivity (μ c)	Cr(VI) remain (mg/L)	Cr-total remain (mg/L)	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
6	0.52	2	0	3.03	32.5	1684	2880	596	1152	0	0
			10	3.36	315	1378	2760	426	811	0.52	3.06
			20	4.15	1352	1277	2695	316	542	1.04	3.71
			30	6.21	1107	1226	2654	207	410	1.56	4.01
			40	9.15	575	1169	2601	82.9	87.4	2.08	4.05
			50	10	502.5	1160	2587	20.4	24	2.6	4.52
			60	10.52	1190	1152	2601	0.5	1.5	3.12	5.32
			70	10.97	1050	1145	2290	0	0	3.64	6.11
8	5.5	0.5	0	3.19	1957	1684	3372	590	1562	0	0
			10	6.21	2420	1290	2580	163	298	7.33	17.17
			20	8.25	2016	1198	2401	45	182	14.67	24.86
			30	11.05	610	940	1880	1.5	87	22	37.29
			40	11.56	597	821	1640	0	0	29.33	49.71
			50	11.89	480	795	1590	0	0	36.67	62.15
			60	12	450	784	1569	0	0	44	74.58

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	TDS (mg/L)	Conductivity (μ c)	Cr(VI) remain (mg/L)	Cr-total remain (mg/L)	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
8	2.31	1	0	2.55	273	2520	5040	590	1562	0	0
			10	4.65	773	2190	4380	375	376	3.08	14.33
			20	7.35	417	1820	3780	159	170	6.16	14.29
			30	10	520	1940	3880	86	86.5	9.24	18.33
			40	11.93	453	1650	3291	22.2	23.9	12.32	21.70
			50	11.96	490	1600	3206	20	21.6	15.4	27.02
			60	12	543	1381	2761	12.3	13.4	18.48	31.99
8	0.87	2	0	2.8	273	1610	3225	616	768	0	0
			10	4.03	193	1341	2684	538	636	1.16	14.87
			20	5.16	297	1247	2494	470	510	2.32	15.89
			30	6.02	247	1162	2325	334	374	3.48	12.34
			40	6.37	377	1104	2209	276	302	4.64	13.65
			50	7.1	347	1037	2075	218	226	5.8	14.57
			60	10.1	143	1087	2174	184	194	6.96	16.11
			70	10.55	180	1097	2194	152	164	8.12	17.50

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	TDS (mg/L)	Conductivity (μ c)	Cr(VI) remain (mg/L)	Cr-total remain (mg/L)	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
10	6.65	0.5	0	3.17	273	1680	3360	590	1562	0	0
			10	9.42	470	1328	2656	105	122	11.08	22.85
			20	10.97	337	811	1622	38.1	41.1	22.17	40.17
			30	11	377	904	1808	10.5	11.6	33.25	57.38
			40	11.2	403	904	1808	0.99	1.02	44.33	75.26
			50	11.34	640	1061	2122	0	0	55.42	93.93
			60	11.85	701	1150	2300	0	0	66.5	112.71
10	2.75	1	0	2.87	273	2120	4230	590	1562	0	0
			10	5.82	533	1630	3260	295	347	4.58	15.53
			20	9.65	1827	1600	3207	117	121	9.17	19.39
			30	11.17	957	1700	3409	66.9	72.3	13.75	26.29
			40	11.07	643	1620	3238	30.1	31.4	18.33	32.74
			50	11.47	460	1670	3349	19.1	19.8	22.92	40.15
			60	10.92	837	1630	3258	17.9	19.1	27.5	48.07

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	TDS (mg/L)	Conductivity (μ c)	Cr(VI) remain (mg/L)	Cr-total remain (mg/L)	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
10	1.09	2	0	2.84	273	1710	3414	616	768	0	0
			10	4.72	197	1337	2676	420	561	1.82	9.29
			20	6.09	230	1219	2440	359	436	3.63	14.12
			30	7.85	490	1185	2370	282	301	5.45	16.32
			40	8.68	220	1148	2295	220	228	7.27	18.36
			50	10.65	260	1161	2322	170	174	9.08	20.36
			60	11.15	93	1174	2348	117	124	10.9	21.84
			70	11.33	220	1106	2214	109	109	12.72	25.09

ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดลองที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ ในน้ำเสียปริมาตร 3 ลิตร

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	Temp. (°C)	TDS (mg/L)	Conductivity (µc)	Cr(VI) (mg/L)	Cr-total (mg/L)	%Cr(VI) Removal	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
2	0.23	1	0	2.76	100	29.3	584	1168	324	364	0	0	0
			40	2.91	190	27.3	476	953	286	308	11.73	0.31	2.69
			80	3.32	180	26.8	430	860	264	278	18.52	0.61	3.41
			120	3.73	180	26.3	375	750	249	250	23.15	0.92	4.09
			180	4.61	160	25.8	297	595	238	240	26.54	1.38	5.35
			240	5.34	190	25.6	287	573	230	231	29.01	1.84	6.52
			300	6.02	200	25.6	301	601	222	222	31.48	2.30	7.52
2	0.15	2	0	3.15	100	29.5	675	1349	324	364	0	0	0
			40	3.23	205	28.2	637	1274	298	320	8.02	0.20	2.56
			80	3.32	160	26.7	577	1153	286	308	11.73	0.40	3.51
			120	3.46	110	25.8	512	1024	274	282	15.43	0.60	4.00
			180	3.56	235	26.2	456	912	262	278	19.14	0.90	4.84
			240	3.64	120	26.9	478	955	258	262	20.37	1.20	6.06
			300	3.68	135	27.3	456	912	249	250	23.15	1.50	6.67

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	Temp. (°C)	TDS (mg/L)	Conductivity (µc)	Cr(VI) (mg/L)	Cr-total (mg/L)	%Cr(VI) removal	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
4	0.85	1	0	3.05	55	25.9	706	1415	365	432	0	0	0
			20	3.59	235	25.4	519	1039	280	300	23.29	1.13	4.44
			40	4.38	250	25.5	440	880	222	230	39.18	2.27	5.28
			60	5.16	295	26.5	370	740	175	177	52.05	3.40	5.96
			80	5.88	355	27.1	407	814	130	131	64.38	4.53	6.43
			100	7.46	395	28.3	461	923	83.6	84	77.10	5.67	6.71
			120	8.15	555	27.9	394	788	56.4	56.9	84.55	6.80	7.34
			180	10.27	1060	27.4	288	577	9.91	9.98	97.28	10.20	9.58
200	10.35	1125	27.2	250	540	0.1	0.1	99.97	11.33	10.35			
4	0.5	2	0	3.18	55	25.9	700	1401	365	432	0	0	0
			20	3.25	155	25	625	1285	330	390	9.59	0.67	6.35
			40	3.67	150	26.7	563	1127	281	322	23.01	1.33	5.29
			60	4.1	145	26.5	515	1050	245	265	32.88	2.00	5.56
			80	5	190	26.4	498	995	218	225	40.27	2.67	6.05
			100	5.36	220	26	487	970	180	185	50.68	3.33	6.01

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	Temp. (°C)	TDS (mg/L)	Conductivity (µc)	Cr(VI) (mg/L)	Cr-total (mg/L)	%Cr(VI) removal	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
4	0.5	2	120	5.66	225	26.2	476	951	166	169	54.52	4.00	6.70
			180	7.28	265	26.4	437	874	101	101	72.33	6.00	7.58
			240	8.59	445	26.1	370	739	59.7	59.7	83.64	8.00	8.73
			300	8.85	460	27.4	320	644	34.4	34.4	90.58	10.00	10.08
6	1.52	1	0	3.18	55	26.8	705	1406	365	432	0	0	0
			20	5.08	245	25	550	1103	201	210	44.93	3.04	6.18
			40	6.31	480	25.9	489	978	133	133	63.56	6.08	8.74
			60	7.38	770	27	450	900	86.3	86.3	76.36	9.12	10.91
			80	9.2	1160	27.7	349	697	42.1	42.1	88.47	12.16	12.55
			100	10.32	550	28	285	570	10.3	10.3	97.18	15.20	14.28
			120	10.58	115	27.2	267	534	0.1	0.1	99.97	18.24	16.66

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	Temp. (°C)	TDS (mg/L)	Conductivity (µc)	Cr(VI) (mg/L)	Cr-total (mg/L)	%Cr(VI) removal	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
6	0.8	2	0	3.24	55	27.3	666	1333	365	432	0.00	0.00	0.00
			20	4.06	155	26.5	550	1124	295	305	19.18	1.60	7.62
			40	4.63	200	26.5	502	1004	236	236	35.34	3.20	8.27
			60	5.43	240	26.2	478	957	190	190	47.95	4.80	9.14
			80	6.13	330	26	470	941	142	142	61.10	6.40	9.57
			100	6.69	290	25.3	455	910	114	114	68.77	8.00	10.62
			120	7.37	450	25.3	445	890	89.6	89.6	75.45	9.60	11.62
			180	9.22	765	25.6	325	649	39.4	39.4	89.21	14.40	14.74
			200	9.5	780	25.6	320	642	9	9	97.53	16.00	14.98
			220	9.75	791	25.7	318	639	0.1	0.1	99.97	17.60	16.08

ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดลองที่ความต่างศักย์และระยะห่างระหว่างขั้วต่างๆ ในน้ำเสียปริมาตร 5 ลิตร

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	Temp. (°C)	TDS (mg/L)	Conductivity (µc)	Cr(VI) (mg/L)	Cr-total (mg/L)	%Cr(VI) removal	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
4	1.38	1	0	3.33	150	26.5	685	1370	355	408	0	0	0
			20	4.07	190	26	580	1095	260	274	26.76	1.84	3.87
			40	5.24	190	27	496	991	202	208	43.10	3.68	4.81
			60	6.06	250	27	489	979	143	146	59.72	5.52	5.21
			80	6.77	245	27.2	480	960	98	100	72.39	7.36	5.73
			100	7.62	555	26	425	850	65	65	81.69	9.20	6.34
			120	9.03	635	26	350	700	37.6	37.6	89.41	11.04	6.96
			180	10.82	90	28.4	284	569	0.1	0.1	99.97	16.56	9.33
4	0.82	2	0	3.33	150	27	685	1370	355	408	0	0	0
			20	4.02	140	27.2	620	1240	325	373	8.45	1.09	7.29
			40	4.29	95	27.7	540	1080	278	323	21.69	2.19	5.68
			60	5.05	135	27.5	451	902	228	239	35.77	3.28	5.17
			80	5.54	170	27.4	372	744	203	211	42.82	4.37	5.75
			100	5.74	170	27.4	409	818	175	178	50.70	5.47	6.07
			120	6.14	215	27.1	495	991	150	150	57.75	6.56	6.40

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	Temp. (°C)	TDS (mg/L)	Conductivity (µc)	Cr(VI) (mg/L)	Cr-total (mg/L)	%Cr(VI) removal	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
4	0.82	2	180	7.59	450	27.8	458	916	95	95	73.24	9.84	7.57
			240	10.08	620	27.4	333	666	51.1	51.1	85.61	13.12	8.63
			300	10.71	715	27.2	355	710	25.6	25.6	92.79	16.40	9.96
			360	10.91	880	26.8	350	701	8.49	8.49	97.61	19.68	11.36
6	2.26	1	0	3.29	150	26.9	635	1269	352	379	0	0	0
			20	4.47	125	27	545	1050	230	231	34.66	4.52	7.41
			40	5.76	145	27.7	481	961	182	182	48.30	9.04	10.64
			60	6.66	310	27.8	450	902	125	125	64.49	13.56	11.95
			80	7.59	405	27.8	438	876	79.5	79.5	77.41	18.08	13.27
			100	9.57	225	28.5	320	610	32.5	32.5	90.77	22.60	14.15
			120	10.79	60	29.4	241	481	0.1	0.1	99.97	27.12	15.41

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

Potential (Volt)	Current (A)	Distances (cm.)	Time (min)	pH	SS (mg/L)	Temp. (°C)	TDS (mg/L)	Conductivity (μ c)	Cr(VI) (mg/L)	Cr-total (mg/L)	%Cr(VI) removal	Energy (W-hr)	Energy Efficiency (kW-hr/kg Cr(VI))
6	1.25	2	0	3.29	150	26.9	635	1269	352	379	0	0	0
			20	4.17	120	27.9	540	1100	263	272	25.28	2.50	5.62
			40	4.98	335	28.3	498	996	204	209	42.05	5.00	6.76
			60	5.72	155	27.8	475	955	160	160	54.55	7.50	7.81
			80	6.41	255	27.9	471	942	118	118	66.48	10.00	8.55
			100	6.98	405	26	445	890	95	95	73.01	12.50	9.73
			120	8.19	605	27.2	410	821	70.6	70.6	79.94	15.00	10.66
			180	10.68	720	27.5	291	582	28	28	92.05	22.50	13.89
			200	10.82	840	27.5	306	613	1.73	1.73	99.51	25.00	14.27
			220	11.05	855	27.6	308	618	0.1	0.1	99.97	27.50	15.63



การคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณโครเมียม (Cr^{6+}) ที่ถูกกำจัด

พิจารณาในสถานะที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุดและสามารถกำจัดโครเมียม (Cr^{6+}) ให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงาน โดยพิจารณาที่

ปริมาณน้ำเสีย	= 3.0 ลิตร
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	= 4.0 โวลต์
ระยะห่างระหว่างขั้ว	= 1 เซนติเมตร
กระแสไฟฟ้า	= 0.85 แอมแปร์
เวลาที่ใช้ในการบำบัด	= 200 นาที

1. ตัวอย่างการคำนวณหาพลังงานไฟฟ้า

$$\begin{aligned} \text{Energy consumption} &= (V \times I \times t) \\ &= (4 \times 0.85 \times (200/60)) \\ &= 11.33 \text{ วัตต์. ชั่วโมง} \end{aligned}$$

2. ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณ Cr^{6+} ที่ถูกกำจัด ณ เวลาต่างๆ ในน้ำเสียปริมาตร 3 ลิตร

$$\begin{aligned} \text{เช่น } \text{Cr}^{6+} \text{ คงเหลือที่นาที่ 200} &= \text{Cr}^{6+}_{\text{Initial}} - \text{Cr}^{6+}_{200\text{min}} \\ &= 365 - 0.1 \text{ มก./ล.} \end{aligned}$$

$$= 364.9 \text{ มก./ล.}$$

$$= 364.9 \times 3 \text{ มิลลิกรัม}$$

$$= 1,094.7 \text{ มิลลิกรัม}$$

3. ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงพลังงานในการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำเสียปริมาตร 3 ลิตร

$$\text{Energy Efficiency} = \text{Energy consumption} / (\text{Cr}^{6+}_{\text{Initial}} - \text{Cr}^{6+}_{\text{time}})$$

$$= 11.33/1,094.7 \text{ วัตต์.ชั่วโมงต่อมิลลิกรัม}$$

$$= 0.01035 \text{ วัตต์.ชั่วโมงต่อมิลลิกรัม}$$

$$= 0.01035/1,000 \text{ กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อมิลลิกรัม}$$

$$= 1.035 \times 10^{-5} \text{ กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อมิลลิกรัม}$$

$$= 1.035 \times 10^{-5} \times 10^6 \text{ กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม}$$

$$= 10.35 \text{ กิโลวัตต์.ชั่วโมงต่อกิโลกรัม}$$

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายศวรรรณ สุภวิทพัฒนา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 25 ตุลาคม 2526
สถานที่เกิด	ลำปาง
ประวัติการศึกษา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (KURDI)