

การบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีเพื่อการกำจัดและกู้คืน
โครเมียมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน

TREATMENT OF WASTEWATER FROM COD ANALYSIS
FOR REMOVAL AND RECOVERY OF CHROMIUM BY
ELECTROCOAGULATION

กาญจนารัตน์ ศิริวัฒน์
วิภาดา แก้วพร
สโรชา เครือเพ็ง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

TREATMENT OF WASTEWATER FROM COD ANALYSIS
FOR REMOVAL AND RECOVERY OF CHROMIUM BY
ELECTROCOAGULATION

KANJANARAT SIRIWAT
WIPHADA KAEWPHORN
SAROCHA KRURPENG

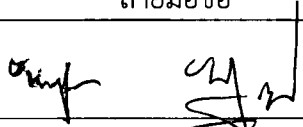


A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
(ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2018

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีเพื่อการกำจัดและกู้คืนโครเมียม
ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน
Treatment of Wastewater from COD Analysis for Removal and
Recovery of Chromium by Electrocoagulation

ชื่อนักศึกษา นางสาวกาญจนารัตน์ ศิริวัฒน์ รหัสนักศึกษา 58050589
นางสาววิภาดา แก้วพร รหัสนักศึกษา 58050680
นางสาวสุโรชา เครือเพ็ง รหัสนักศึกษา 58050688

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา เคมี
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
(สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.บรรจง บุญชม ประธานกรรมการ	
ดร.ชวาลย์ ศรีวิงษ์ กรรมการ	
รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีเพื่อการกำจัดและกู้คืน โครเมียมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกาญจนารัตน์ ศิริวัฒน์ รหัสนักศึกษา 58050589 นางสาววิภาดา แก้วพร รหัสนักศึกษา 58050680 นางสาวสโรชา เครือเพ็ง รหัสนักศึกษา 58050688
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันเพื่อการกำจัดและกู้คืนโครเมียมจากสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตและน้ำเสียที่เกิดมาจากการวิเคราะห์ซีโอดี โดยใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือได้แก่ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดเพื่อกู้คืนโครเมียมจากสารละลายโครเมียม (III) ในเทรต เข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตรคือ ระยะเวลา 120 นาทีที่พีเอช 6 และค่าความต่างศักย์ 5 โวลต์ จากสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตที่สภาวะดังกล่าวมีการกำจัดโครเมียมในสารละลายที่ทดสอบได้ 96.63 เปอร์เซ็นต์ ตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัดมีปริมาณโครเมียมเป็นส่วนประกอบในสัดส่วน 36.24 เปอร์เซ็นต์ การบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ซีโอดีโดยใช้สภาวะตามที่กล่าวมาแล้ว พบว่าสามารถกำจัดโครเมียมในน้ำได้ 77.51 เปอร์เซ็นต์ น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 73.98 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยตะกอนที่ได้มีโครเมียมเป็นส่วนประกอบในปริมาณ 32.22 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : การรวมตะกอนทางไฟฟ้า, การกู้คืนโครเมียม, ซีโอดี

Title	Treatment of Wastewater from COD Analysis for Removal and Recovery of Chromium by Electrocoagulation	
Students	Miss Kanjanarat Siriwat	Student ID 58050589
	Miss Wiphada Kaewphorn	Student ID 58050680
	Miss Sarocha Kruepeng	Student ID 58050688
Degree	Bachelor of Science (Environmental Chemistry)	
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2018	
Advisor	Assoc.Prof. Dr.Usarat Thawornchaisit	

Abstract

Application of electrocoagulation for chromium removal and recovery from an aqueous solution of (III) nitrate and wastewater chrom from COD analysis was investigated in this special project using an aluminium electrode. Factors being investigated were reaction time, initial pH of solution and electrical potential difference. Results showed that optimum conditions for removal and recovery of chromium from aqueous solution of chromium (III) nitrate with initial concentration of 400 mg/L were as follows : reaction time at 120 min, pH of 6.0 and electrical potential difference of 5 voltage. At the optimum conditions, the percentage of chromium removal from the tested solution was 96.63% Chromium contents in sludges being collected after treatment was completed were 36.24%. Removal of chromium in wastewater from COD analysis using the stated conditions showed that 77.51% of chromium was removed from the wastewater. Concentration of chromium in the effluent was 73.98 mg/L. Chromium contents in the sludge being generated were 32.22%.

Keywords : Electrocoagulation, Chromium recovery, COD

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องด้วยความร่วมมือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ทางคณะผู้ทำโครงการพิเศษ จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ เนื่องด้วยความกรุณาอย่างสูงในการให้คำปรึกษา การแนะนำ การแก้ไขตรวจสอบข้อบกพร่อง ตลอดจนข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการพิเศษครั้งนี้เป็นอย่างนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.บรรจง บุญชม และ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติมให้โครงการพิเศษมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณผู้ปฏิบัติงานวิทยาศาสตร์ และนักวิทยาศาสตร์ภาควิชาเคมีทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกด้านการใช้เครื่องมือ สารเคมี รวมไปถึงอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ และให้คำแนะนำช่วยเหลือในการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาผู้เป็นที่รัก เพื่อนๆนักศึกษา รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเป็นแรงผลักดันแก่ผู้จัดทำโครงการพิเศษเสมอมา จนสามารถทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

กาญจนารัตน์ ศิริวัฒน์

วิภาดา แก้วพร

สโรชา เครือเพ็ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ลักษณะน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดี.....	3
2.2 โครเมียม.....	3
2.2.1 โครเมียมเฮกซะวาเลนต์.....	4
2.2.2 โครเมียมไตรวาเลนต์.....	4
2.2.3 ความเป็นอันตรายของโครเมียม.....	4
2.2.3.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน.....	4
2.2.3.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง.....	4
2.2.4 ประโยชน์ของโครเมียม.....	5
2.3 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	5
2.3.1 ส่วนประกอบของระบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน.....	5
2.3.1.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า DC Power Supply.....	5
2.3.1.2 อิเล็กโทรด.....	6
2.3.1.3 สารละลายอิเล็กโทรไลต์.....	6
2.3.2 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน.....	6
2.3.2.1 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด.....	6
2.3.2.2 ผลของพีเอชที่ใช้ในการบำบัด.....	7
2.3.2.3 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	8
2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน.....	9
2.4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	12
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	12
3.1.1 อุปกรณ์.....	12
3.1.2 สารเคมี.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 ตัวอย่างนำที่ใช้ในการศึกษา.....	13
3.3 ชุดทดลอง.....	13
3.4 การศึกษาผลของระยะเวลาบำบัดต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกักคืนโครเมียม...	13
3.5 การศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกักคืนโครเมียม.....	14
3.6 การศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกักคืนโครเมียม.....	15
3.7 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและการกักคืนโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ COD.....	15
3.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำและตะกอน.....	16
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	17
4.1 ผลของระยะเวลาบำบัดต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักคืนโครเมียม.....	17
4.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักคืนโครเมียม.....	20
4.3 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักคืนโครเมียม.....	22
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดี.....	25
4.4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา.....	25
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	29
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	28
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	30
เอกสารอ้างอิง.....	31
ภาคผนวก ก. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ.....	33
ก.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด.....	34
ก.2 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (Cr(VI)).....	36
ก.3 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเหล็กโดยใช้ AAS.....	38
ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณตะกอน.....	40
ก.4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งจมน้ำหรือตะกอนหนัก.....	40
ก.4.2 ดัชนีปริมาตรตะกอน (Sludge volume index, SVI).....	41
ก.5 การวิเคราะห์หาร้อยละโครเมียมในตะกอนด้วยวิธีการย่อยตะกอนด้วยกรด (Acid Digestion).....	42
ก.6 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและองค์ประกอบในตะกอน.....	43
ภาคผนวก ข. ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง.....	44

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 วิธีการวิเคราะห์สมบัติตัวอย่างน้ำก่อน-หลังบำบัด.....	16
4.1 พีเอชเริ่มต้นและพีเอชสุดท้ายของสารละลายโครเมียม (III) ในเทรต.....	21
4.2 คุณลักษณะของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีที่ใช้ศึกษา.....	25
4.3 ข้อมูลร้อยละโครเมียมและเหล็กในตะกอน.....	28
4.4 ข้อมูลปริมาณธาตุองค์ประกอบในตะกอน.....	28
ก.1 ข้อมูลของกราฟมาตรฐานโครเมียมทั้งหมด.....	35
ก.2 ข้อมูลของกราฟมาตรฐานของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์.....	37
ก.3 ข้อมูลของกราฟมาตรฐานเหล็ก.....	39
ข.1 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาระยะเวลาเดินระบบต่างกันในช่วงควบคุม.....	45
ข.2 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของระยะเวลาเดินระบบในช่วงทดลอง (ส่วนของสารละลาย).....	47
ข.3 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของระยะเวลาในช่วงทดลอง (ส่วนของแข็ง).....	49
ข.4 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วงควบคุม.....	51
ข.5 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นในช่วงทดลอง (ส่วนของสารละลาย).....	53
ข.6 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นในช่วงทดลอง (ส่วนของแข็ง).....	55
ข.7 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงควบคุม.....	57
ข.8 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงทดลอง (ส่วนของสารละลาย).....	58
ข.9 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วงทดลอง (ส่วนของแข็ง).....	59
ข.10 คุณลักษณะของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีในช่วงควบคุม.....	60
ข.11 คุณลักษณะของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ EC.....	61
ข.12 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่ได้หลังการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีระบบ EC.....	62

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น (Saad, 2009).....	7
2.2 แผนภาพของเศษส่วนโมลต่อค่าพีเอช (Zongo et al., 2009).....	8
2.3 ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดักชันที่ 298 K หรือ 25 °C	9
3.1 ภาพอย่างง่ายแสดงส่วนประกอบของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า.....	13
4.1 ผลของระยะเวลาการเดินระบบ EC ต่อความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด.....	17
4.2 ผลของระยะเวลาการเดินระบบ EC ต่อร้อยละการกำจัดโครเมียม.....	18
4.3 ผลของระยะเวลาการเดินระบบ EC ต่อน้ำหนักขั้วอลูมิเนียมที่สูญเสีย.....	19
4.4 ผลของระยะเวลาการเดินระบบ EC ต่อร้อยละโครเมียมในตะกอนที่ได้หลังบำบัด.....	19
4.5 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด.....	20
4.6 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละการกำจัดโครเมียม.....	20
4.7 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละโครเมียมในตะกอนที่ได้หลังจากการบำบัด.....	22
4.8 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อความเข้มข้นโครเมียม.....	22
4.9 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อร้อยละการกำจัดโครเมียม.....	23
4.10 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลาย.....	24
4.11 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อน้ำหนักขั้วอลูมิเนียมที่สูญเสีย.....	24
4.12 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อร้อยละโครเมียมในตะกอนที่ได้หลังบำบัด.....	25
4.13 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดี.....	26
4.14 ผลของการปรับพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละการกำจัดด้วยกระบวนการตกตะกอน.....	27
4.15 ร้อยละการกำจัดด้วยกระบวนการ EC ของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดี.....	27
ก.1 กราฟมาตรฐานของโครเมียมทั้งหมด.....	35
ก.2 กราฟมาตรฐานของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์.....	37
ก.3 กราฟมาตรฐานเหล็ก.....	39

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวิเคราะห์ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีที่หรือเรียกสั้นๆว่าซีโอดี เป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย ให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิไดส์คือ โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ปริมาณตัวออกซิไดส์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะนำมาไทเทรตย้อนกลับกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) เพื่อใช้คำนวณหาค่าซีโอดีของน้ำตัวอย่าง เมื่อกระบวนการวิเคราะห์ซีโอดีสิ้นสุด จะพบว่าในการทำปฏิบัติการวิเคราะห์ดังกล่าวจะเกิดน้ำเสียที่มีค่าความเป็นกรดสูงและมีส่วนประกอบของโครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) เงิน (Ag) และปรอท (Hg) เป็นส่วนประกอบจากการทำปฏิบัติการวิเคราะห์ดังกล่าว เนื่องจากโลหะเหล่านี้เป็นส่วนประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครเมียมซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง ทำให้น้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีจัดเป็นของเสียอันตราย ที่จำเป็นต้องได้รับการบำบัดให้มีปริมาณโครเมียมหรือโลหะหนักอื่นๆ ในปริมาณที่เหมาะสมก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม ในอดีตที่ผ่านมา วัตถุประสงค์ของการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน มักจะมุ่งเน้นไปที่การกำจัดเพื่อให้ปริมาณโลหะในน้ำทิ้งมีค่าเป็นไปตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งที่กำหนด ทำให้การบำบัดน้ำเสียเพื่อกู้คืนโลหะกลับมาใช้ใหม่ เป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจน้อยมาก แต่เนื่องจากปัจจุบันแนวทางการจัดการทางสิ่งแวดล้อมให้ความสำคัญกับวิธีการที่จะช่วยลดมลพิษก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่ทำได้ ทำให้การบำบัดเพื่อกู้คืนโลหะที่มีค่า (Metal recovery) จึงเป็นแนวทางการจัดการวัสดุเหลือทิ้งที่ได้รับความสนใจมากขึ้น

กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation, EC) หรือกระบวนการการรวมตะกอนทางไฟฟ้าเป็นเทคนิคทางไฟฟ้าเคมีที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมาก มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการต่างๆ ที่สามารถทำได้สะดวกรวดเร็วและเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่าย (ศุภมาส, 2557) ลักษณะของน้ำเสียที่จะนำมาบำบัดโดยกระบวนการ EC ได้นั้น น้ำเสียต้องมีคุณสมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปนี้ คือต้องมีค่าความเป็นกรดที่ต่ำมากหรือความเป็นด่างที่สูงเกินไป (มีพีเอชที่ต่ำหรือสูงมากจนเกินไป) มีโลหะหนักที่เป็นพิษปนเปื้อนอยู่ด้วย มีสารแขวนลอยขนาดเล็กที่ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ยาก มีสารประกอบอินทรีย์ละลายน้ำและมีความเป็นพิษ มีไขมันหรือน้ำมันละลายน้ำปนเปื้อนอยู่ ด้วยเหตุที่ลักษณะของน้ำเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ซีโอดีนั้นมีคุณสมบัติตรงตามที่กล่าวมาข้างต้น นั่นคือ มีค่าพีเอชที่ต่ำมาก มีโลหะหนักที่เป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม เหล็ก ซิลเวอร์ และปรอท ในปริมาณสูง ตลอดจนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี ทำให้ EC จัดเป็นวิธีการที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาประยุกต์ใช้ ประกอบกับงานวิจัยของกชพรรณและคณะ(2555) ได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันเพื่อบำบัดโครเมียมให้มีค่าเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดได้ ในขณะที่การบำบัดน้ำเสียเพื่อการกู้คืนโครเมียมไม่จัดอยู่ในวัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษดังกล่าว โครงการพิเศษนี้จึงได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้ระบบ EC เพื่อบำบัดและกู้คืนโครเมียมจากน้ำเสียที่รวบรวมมาจากการวิเคราะห์ซีโอดี พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ EC ในการกำจัดและกู้คืนโครเมียมจากน้ำเสียตัวอย่าง

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและความสามารถของกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันในการบำบัดและกู้คืนโครเมียมในน้ำเสียที่เกิดจากการวิเคราะห์ซีโอดี

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

- สารละลายโครเมียม (III) ในเทรต ความเข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

- ตัวอย่างน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี ซึ่งเก็บรวบรวมจากการฝึกปฏิบัติวิเคราะห์หาค่าซีโอดีในรายวิชาปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อมและคุณภาพน้ำ ห้องปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม อาคารพระจอมเกล้าชั้น 5 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2. การเตรียมระบบบออิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (EC) โดยใช้ถังปฏิกริยาที่ทำจากอะคริลิก ขนาด 90 มิลลิเมตร x 100 มิลลิเมตร x 125 มิลลิเมตร และแผ่นอลูมิเนียม ขนาด 130 มิลลิเมตร x 87 มิลลิเมตร x 2 มิลลิเมตร เป็นขั้วไฟฟ้า ต้องจรรยาบรรณขนานกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

3. การศึกษาสมบัติทางเคมีของน้ำเสียที่ก่อน-หลังการบำบัดและคุณลักษณะของตะกอนที่ได้จากการบำบัด โดยพารามิเตอร์ที่ต้องการวิเคราะห์ ได้แก่ การวัดค่าพีเอชด้วยเครื่องมือวัดค่าพีเอช วิเคราะห์ความเข้มข้นของโลหะทั้งหมด (โครเมียมและเหล็ก) ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS) วิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์ด้วยวิธีการเทียบสีโดยใช้ UV-Visible Spectrophotometer และวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมไตรวาเลนต์ (Cr^{3+}) ในตะกอนด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF)

4. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกู้คืนโครเมียมในสารละลายโครเมียม (III) ในเทรต ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน

- ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ระยะเวลาบำบัด (30 , 60 , 90 , 120 และ 150 นาที) ค่าพีเอชเริ่มต้น (3, 4, 5, และ 6) และความต่างศักย์ไฟฟ้า (5, 10 และ 15 โวลต์)

- ตัวแปรตาม ได้แก่ วิเคราะห์ปริมาณโครเมียมที่เหลือในสารละลายด้วยเทคนิค AAS และปริมาณโครเมียมในตะกอนด้วยเทคนิคการย่อยด้วยกรดร่วมกับเทคนิค AAS และปริมาณโครเมียมไตรวาเลนต์ในตะกอนด้วยเทคนิค XRF

5. การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีและการกู้คืนโครเมียมในตะกอน

- ตัวแปรตาม ได้แก่ ดังระบุในข้อ 4

1.4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

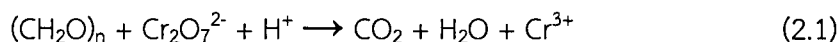
1. ทราบคุณลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนที่ได้จากการบำบัดด้วย EC
2. ได้แนวทางในการกำจัดและกู้คืนโครเมียมในน้ำเสีย
3. สามารถลดระดับความเป็นอันตราย ความเป็นพิษของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี

บทที่ 2

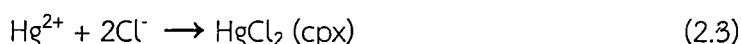
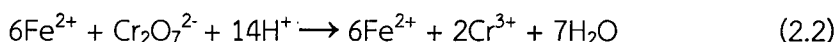
ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี

ซีโอดี คือปริมาณออกซิเจนเทียบเท่าที่ใช้ในการออกซิไดส์สารประกอบอินทรีย์ในน้ำตัวอย่างด้วยตัวออกซิไดส์อย่างแรง ภายใต้หลักการที่ว่าสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกออกซิไดส์อย่างสมบูรณ์ด้วยตัวออกซิไดส์อย่างแรง และได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับตัวออกซิไดส์ที่มักนิยมใช้กัน คือ โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เนื่องจากมีอำนาจในการออกซิไดส์สูงและทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย (ศุภจิตร์, 2561) เมื่อนำสารอินทรีย์มาต้มกับโพแทสเซียมไดโครเมตที่ทราบปริมาณแน่นอนในสภาวะที่เป็นกรดและมีซิลเวอร์ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา $K_2Cr_2O_7$ จะถูกนำไปใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ ดังสมการ (2.1) เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะมีสารประกอบโพแทสเซียมไดโครเมตเหลืออยู่ในปฏิกิริยา ซึ่งปริมาณของโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่นี้สามารถหาได้โดยการไทเทรตกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) โดยสารที่ใช้เป็นอินดิเคเตอร์ คือ เฟอโรอิน ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง 1,10-(ortho) Phenanthroline กับ Ferrous Sulfate ในอัตราส่วน 3 : 1 โมล



ผลจากการต้มโพแทสเซียมไดโครเมตที่เป็นตัวออกซิไดส์ในปริมาณมากเกินไป ทำให้เมื่อการย่อยสลายลง สารละลายที่ย่อยได้จึงมี $K_2Cr_2O_7$ เหลืออยู่และเมื่อนำสารละลายดังกล่าวไปไทเทรตย้อนกลับเพื่อหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตส่วนที่เหลือกับ FAS ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่าง $K_2Cr_2O_7$ กับ FAS เป็นดังสมการที่ (2.2) ทำให้น้ำเสียจากการวิเคราะห์ COD จึงพบไตรวาเลนต์โครเมียม (Cr^{3+}) และเหล็กจำพวกเฟอร์ริก (Fe^{3+}) เป็นส่วนประกอบเหลือ ประกอบกับในการวิเคราะห์ซีโอดีมีการเติมซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) เป็นตัว catalyst เพื่อเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดส์สารอินทรีย์ โดยเฉพาะกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ รวมถึงความพยายามในการกำจัดสารบวกรบกวนที่สำคัญคือ คลอไรด์ไอออนด้วย $HgSO_4$ เพื่อไปจับกับ Cl^- ให้อยู่ในรูปของ mercuric chloride complex ดังสมการที่ (2.3) สาเหตุดังกล่าวทำให้น้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี มีโอกาสพบโลหะจำพวกเงินและปรอทเป็นส่วนประกอบ



2.2 โครเมียม

โครเมียม (Cr) เป็นธาตุโลหะทรานสิชัน ในหมู่ VIB มีเลขอะตอมเป็น 24 มีมวลอะตอม 51.996 มีจุดเดือด 2,642 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1,900 องศาเซลเซียส ความหนาแน่น 7.19 กิโลกรัมต่อลิตรที่ 20 องศาเซลเซียส คุณสมบัติของอะตอมมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ Body-centred cubic (BCC) มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี มีความมันวาว มีเลขออกซิเดชันตั้งแต่ +2 จนถึง +6 (พินิต, 2553) โดยรูปฟอร์มโครเมียมที่พบมากที่สุดคือ โครเมียมไตรวาเลนต์ (Cr^{3+}) และ โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ (Cr^{6+}) เนื่องจากมีความคงตัวภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน ทั้งนี้โครเมียมเฮกซะวาเลนต์มักพบในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนประจุลบของ CrO_4^{2-} หรือ $HCrO_4^-$ (Siamchemi, 2018)

2.2.1 โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์

โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์จัดเป็นสารที่อันตรายและเป็นสารก่อมะเร็ง เมื่อได้รับเป็นเวลานาน โครงสร้างดีเอ็นเอจะถูกทำลายได้มากขึ้น มีโอกาสเป็นมะเร็งปอด จึงทำให้มีการจำกัดปริมาณการใช้สารชนิดนี้ แต่ในอุตสาหกรรมยังคงใช้โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์อยู่มาก จึงมีโอกาสสูงที่โครเมียมชนิดนี้ จะเกิดการปนเปื้อนในน้ำ

2.2.2 โครเมียมไตรวาเลนซ์

โครเมียมไตรวาเลนซ์เป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อร่างกาย พบได้ในอาหาร น้ำดื่ม และสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ช่วยในกระบวนการสังเคราะห์กรดไขมัน และคอเลสเตอรอล ช่วยรักษาสมดุลของสารอินซูลินในเลือด และควบคุมปริมาณคอเลสเตอรอลในร่างกาย เปลี่ยนไขมันในร่างกายให้เป็นไขมันดี (HDL) จึงมีการสังเคราะห์โครเมียมไตรวาเลนซ์และวางจำหน่ายเป็นอาหารเสริมสำหรับผู้ที่ต้องการลดความอ้วน

2.2.3 ความเป็นอันตรายของโครเมียม

โครเมียมที่ก่อให้เกิดอันตรายและมีความเป็นพิษต่อร่างกายนั้น ส่วนมากมักเกิดจากโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (+6) ผู้ได้รับสารโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์จะมีอาการระคายเคืองที่ผิวหนัง เป็นโรคหอบหืด โรคระบบทางเดินหายใจ ทำให้ปอด ตับ ไต และลำไส้ถูกทำลาย มีอาการบวม น้ำ และเจ็บบริเวณกระบังลมหรือลิ้นปี

โครเมียมและสารประกอบโครเมียมสามารถเข้าสู่ร่างกายได้จาก

- การหายใจ พบมากในคนงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารโครเมียมและสารประกอบโครเมียมโครเมียมในรูปแบบโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ดีกว่าโครเมียมไตรวาเลนซ์
- การบริโภคอาหารและน้ำดื่ม โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ จะถูกดูดซึมจากระบบทางเดินอาหารได้ดีกว่า โครเมียมไตรวาเลนซ์ 3-5 เท่า ซึ่งเป็นผลจากการที่โครเมียมเฮกซะวาเลนซ์สามารถซึมผ่านเซลล์เมมเบรนได้ดี
- ทางผิวหนัง ทั้งโครเมียมไตรวาเลนซ์และโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ สามารถซึมผ่านผิวหนังได้น้อยมากยกเว้นกรณีผิวหนังเป็นแผลจากการเผาไหม้ ทำให้สารประกอบโครเมียมบางชนิด เข้าสู่ร่างกายได้ เช่น potassium dichromate และ chromium chloride

2.2.3.1 ความเป็นพิษแบบเฉียบพลัน

ส่วนมากจะพบอาการเฉียบพลันได้ในผู้ป่วยรายที่ได้รับโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ เช่น โฟแทสเซียมไดโครเมต กรดโครมิก เป็นต้น เมื่อพิษเข้าสู่ร่างกายจะมีอาการปวดท้องอย่างรุนแรง อาเจียน ท้องเสีย มีเลือดออกในกระเพาะอาหาร ถ้าหากได้รับในปริมาณมากอาจทำให้เกิดอาการช็อคและเสียชีวิตลงได้ ปริมาณที่ได้รับ 1-3 กรัม จะทำให้เสียชีวิตได้

2.2.3.2 ความเป็นพิษแบบเรื้อรัง

การพบพิษแบบเรื้อรังนี้ จะพบในผู้ป่วยที่ได้รับโครเมียมในปริมาณที่น้อยจนถึงปานกลางแต่ได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน อาการจะค่อยๆปรากฏขึ้นที่อวัยวะต่างๆ ของร่างกาย เช่น มีอาการระคายเคืองผิวหนัง มีแผลที่หายช้า เป็นแผลเรื้อรัง และเกิดมะเร็งที่อวัยวะต่างๆ

หากได้รับโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์เข้าสู่ร่างกายจะทำให้เกิดการสะสมทำให้เป็นพิษเรื้อรัง และเกิดมะเร็งบริเวณอวัยวะต่างๆ ในร่างกาย หากได้รับสารชนิดนี้ในปริมาณที่มีความ

เข้มข้นมากจะทำให้เกิดการกัดกร่อนผิวหนัง และอวัยวะบริเวณระบบทางเดินหายใจเสียหายอย่างฉับพลัน

โครเมียมไตรวาเลนท์มีความเป็นพิษรุนแรงน้อยกว่าโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ เป็นธาตุชนิดหนึ่งที่พบในร่างกายของมนุษย์ และหากร่างกายขาดสารชนิดนี้จะทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับน้ำตาล เช่น โรคกลูโคสซูเรีย ทำให้มีการเพิ่มปริมาณของอินซูลิน ไตรกลูเซอไรด์และคลอเลสเตอรอลในร่างกาย รวมไปถึงยับยั้งการเจริญเติบโตการทำงานของเส้นโลหิตและแก้วตาอักเสบ

2.2.4 ประโยชน์ของโครเมียม

อุตสาหกรรมหลายๆด้านทั่วโลกนิยมนำโครเมียมมาใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิต ไม่ว่าจะเป็นใช้ในการผลิตเหล็กกล้าไร้สนิม การนำโครเมียมไปผสมกับโลหะชนิดอื่นๆ เช่น เหล็ก นิกเกิล เพื่อผลิตเหล็กอัลลอยด์ที่มีความแข็งแรงทนทานต่อการกัดกร่อนและทนความร้อนสูงได้ ใช้ในกระบวนการผลิตอิฐทนความร้อน ใช้เป็นสารเคลือบโลหะ ชุบโลหะ รวมถึงเคลือบพลาสติกเพื่อให้เกิดความมันเงาและป้องกันการกัดกร่อน ใช้เป็นส่วนประกอบในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ย้อมสี ผลิตเม็ดสีและสีย้อม ใช้ในอุตสาหกรรมพอกหนัง เป็นสารยับยั้งการเกิดสนิม ยับยั้งฝุ่นและป้องกันการกัดกร่อนของเครื่องยนต์ ดีเซล ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีและใช้ในทางการแพทย์อีกด้วย

2.3 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าหรือกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (Electrocoagulation, EC) เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าสร้างปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ถูกนำมาใช้ในงานปรับปรุงคุณภาพน้ำและบำบัดน้ำเสียที่มีสารปนเปื้อนทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย คอลลอยด์ขนาดเล็ก น้ำมันและไขมัน ไอออนของโลหะหนักต่างๆ เช่น โครเมียม สังกะสี ตะกั่ว เป็นต้น ซึ่งการกำจัดโลหะหนักนั้นเป็นจุดเด่นของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า เนื่องจาก โลหะหนักหลายชนิดมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ในงานวิจัยของ Balasubramanian and Madhavan (2001) ระบุว่า อัตราการกำจัดโลหะหนักขึ้นกับสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า รวมถึงความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่ปนเปื้อน กระแสที่จ่าย ค่าพีเอช และเวลาที่ใช้ในการบำบัด

2.3.1. ส่วนประกอบของระบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน

ชุดทดลองประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไฟฟ้า ดังปฏิกิริยา แผ่นขั้วอิเล็กโทรด แท่งแม่เหล็กและเครื่องปั่นกววน เพื่อให้สารละลายมีการปั่นกววนอยู่ตลอดเวลา

2.3.1.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า DC Power Supply

แหล่งกำเนิดไฟฟ้า หรือแหล่งจ่ายไฟ (DC Power Supply) ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ EC โดยผ่านตัววัดจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วอิเล็กโทรด กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกไปจะไปทำให้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเกิดในระบบโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะเกิดขึ้นที่ขั้วบวกหรือขั้วแอโนด ทำให้เกิดการสึกกร่อนของอิเล็กโทรด ขณะที่ขั้วลบหรือขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ เกิดเป็นฟองก๊าซของไฮโดรเจนทำให้ไม่เกิดการสึกกร่อนของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้ สำหรับกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันต้องใช้ปริมาณไอออนที่ละลายออกมาจากอิเล็กโทรดมากพอต่อปริมาณมลสารที่ต้องการกำจัด ต้องใช้อิเล็กโทรดที่มีพื้นผิวจำนวนมากพอมลสารที่ต้องการกำจัด

2.3.1.2 อีเล็กโทรด

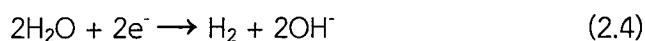
เหล็กและอลูมิเนียมจัดเป็นโลหะ 2 ชนิดที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วอีเล็กโทรด และควรใช้วัสดุที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าเป็นตัวยึดจับอีเล็กโทรดที่ทำจากโลหะดังกล่าว ในการใช้งานควรต้องระมัดระวังในเรื่องการเกิดสัลดัจ้สะสมระหว่างอีเล็กโทรดและควรทำความสะอาดของผิวหน้าอีเล็กโทรดเป็นประจำ เมื่อโลหะถูกออกซิไดซ์จะเกิดการกร่อนขึ้น อัตราการสึกกร่อนของอีเล็กโทรดสังเวจจะขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสีย โดยเฉพาะกรณีที่มีน้ำเสียมลสารมาก จึงต้องใช้ไอออนโลหะจำนวนมากในการตกตะกอนด้วย (Xueming et al., 2000)

กลไกการบำบัดน้ำเสียโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ทดลองในถังปฏิกิริยา โดยปล่อยกระแสไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดต่อเข้ากับขั้วอีเล็กโทรด ทางด้านขั้วแอโนดจะถูกออกซิไดซ์เกิดปฏิกิริยาแอโนดิกและเกิดไอออนของโลหะอลูมิเนียม (Al^{3+}) ดังสมการที่ (2.3) ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยาแคโทดิกเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการที่ (2.4) ไอออนที่ถูกปล่อยออกมาจะทำให้อนุภาครวมตัวกัน ไอออนที่ถูกปล่อยออกมาบางส่วนจะกำจัดสารปนเปื้อนโดยทำปฏิกิริยาทางเคมีและเกิดการตกตะกอน โดยมีปฏิกิริยาดังนี้

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วบวก หรือขั้วแอโนด



ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบ หรือขั้วแคโทด



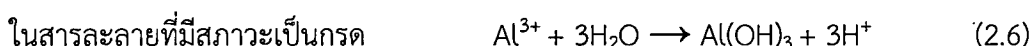
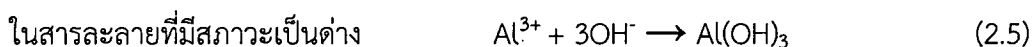
2.3.1.3 สารละลายอีเล็กโทรไลต์

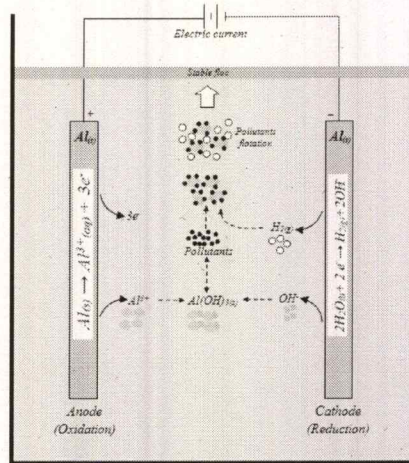
สารที่สามารถแตกตัวเป็นไอออนอิสระเมื่อละลายน้ำ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปสารละลายอีเล็กโทรไลต์จะประกอบไปด้วยไอออนบวกหรือไอออนลบเคลื่อนที่อยู่ในสารละลาย สารละลายอีเล็กโทรไลต์จะอยู่ในรูปของกรด เบส หรือเกลือก็ได้ การนำไฟฟ้าของสารละลายอีเล็กโทรไลต์ต่างๆ ไม่เท่ากัน เนื่องมาจากการแตกตัวเป็นไอออนของอีเล็กโทรไลต์นั้นไม่เท่ากัน ความสามารถในการนำไฟฟ้าของอีเล็กโทรไลต์ขึ้นอยู่กับการแตกตัวเป็นไอออน อีเล็กโทรไลต์ที่แตกตัวเป็นไอออนได้มากกว่าจะนำไฟฟ้าได้ดีกว่า

2.3.2 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการอีเล็กโทรโคแอกกูเลชัน

2.3.2.1 ผลของระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด (กชพรรณและคณะ, 2555)

ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมไตรวาเลนท์เมื่อเทียบกับเวลาที่แตกต่างกันพบว่า ความสามารถในการบำบัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาที่ใช้เพิ่มมากขึ้น ทำให้ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดการสึกกร่อนมากขึ้น และเกิดไอออนของอลูมิเนียม (Al^{3+}) ในน้ำเสีย ขั้วแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชันเกิดขึ้น ทำให้มีไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้นในน้ำเสีย ในสภาวะที่เป็นด่าง Al^{3+} ทำปฏิกิริยากับ OH^- เกิดเป็นตะกอนอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ดังสมการที่ (2.5) ในสภาวะที่เป็นกรด $Al(OH)_3$ สามารถเกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (2.6) ไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับโครเมียมไตรวาเลนท์ในน้ำเสีย ทำให้เกิดตะกอน $Cr(OH)_3$ ขึ้น จึงทำให้โลหะโครเมียมในน้ำลดลงและเกิดเป็นตะกอนที่มีโครเมียมเป็นองค์ประกอบ





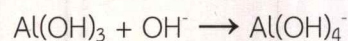
รูปที่ 2.1 ภาพปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น (Saad, 2009)

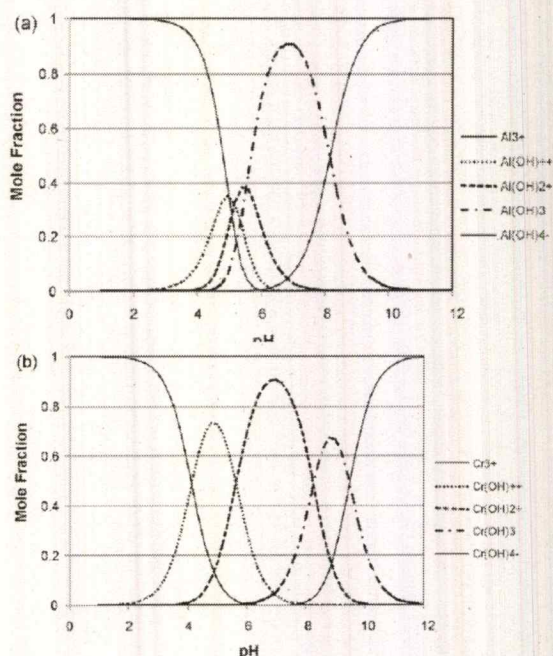
(ตะกอนของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ สามารถทำหน้าที่ดักจับอนุภาคของคอลลอยด์รวมทั้งสารแขวนลอยในน้ำ) นอกจากนี้ยังพบว่า $\text{Al}(\text{OH})_3$ สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโครเมียมไอออน (Espinoza-Quines et al., 2009) ทำให้การกำจัดเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มของระยะเวลาที่มากขึ้นทำให้มีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังอาจนำไปสู่การลดลงของประสิทธิภาพของระบบ ในทางกลับกันหากใช้ระยะเวลาที่น้อยไปจะแสดงให้เห็นถึงการกำจัดที่ไม่ดี เนื่องจากยังไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเพื่อให้ได้ไอออนของอลูมิเนียมและไฮดรอกไซด์ได้อย่างเพียงพอ

2.3.2.2 ผลของพีเอชที่ใช้ในการบำบัด

น้ำเสียที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นกรด ค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น และน้ำเสียที่มีค่าเริ่มต้นเป็นด่าง ค่าพีเอชของน้ำที่ผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันจะมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการเกิด $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่ขั้วบวกซึ่งปล่อย H^+ ทำให้ค่าพีเอชลดลง รวมทั้งการเกิดออกซิเจนที่ขั้วบวกทำให้ค่าพีเอชลดลง

สำหรับการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดหลังผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันอาจเกิดจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอยู่ในสภาพอิ่มตัวในน้ำที่เป็นกรด ระบายออกจากน้ำไปพร้อมกับก๊าซไฮโดรเจน และจากปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไฮโดรเจน สำหรับการลดลงของค่าพีเอชของน้ำเสียที่มีสภาพเป็นด่างน่าจะเกิดจากการเกิดผลึกไฮดรอกไซด์ของไอออนประจุบวก และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ดังปฏิกิริยา





รูปที่ 2.2 แผนภาพของเศษส่วนโมลต่อค่าพีเอช (Zongo et al., 2009)

Shahriari et al. (2014) รายงานไว้ว่าที่ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมได้ เนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่ผลิตได้จะละลายในสภาวะที่เป็นกรดในตอนแรก จากนั้นความเป็นกรดจะลดลงจากกระบวนการ EC ที่ขั้วแคโทดจะมีการสร้างเหล็กไฮดรอกไซด์ที่จะดักจับไอออนโครเมียม เกิดเป็นตะกอนของเหล็กและโครเมียม นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มขึ้นของพีเอชสุดท้าย ดังนั้นโครเมียมจึงถูกกำจัดได้ดีเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น ในการศึกษาที่ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 6 เป็นค่าพีเอชที่ทำให้เกิดตะกอนที่เป็นวัณของไฮดรอกไซด์ แต่ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 8 ไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในระบบปริมาณมากอยู่แล้ว จะนำไปสู่การก่อตัวของตะกอนโลหะที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการลดลงของการไหลเวียนของไอออนและการดักจับโครเมียมในระบบ ปริมาณโครเมียมที่เหลืออยู่ในน้ำเสียจึงมีค่ามากกว่าที่พีเอช 6

2.3.2.3 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความเกี่ยวเนื่องกับกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน หากมีการเพิ่มค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรดก็เพิ่มขึ้นหรือเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ซึ่งในกระบวนการทางเคมีไฟฟ้านั้น ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าถือว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญที่จะควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด หากใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงเกินไปอาจทำให้ขั้วอิเล็กโทรดเกิดการสึกกร่อนมากขึ้นและเกิดฟลอคเกาะบริเวณผิวของขั้ว และอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานอีกด้วย

Golder et al. (2007) กล่าวว่าที่ความหนาแน่นกระแสสูงจะเกิดการกร่อนของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดตะกอนจากโลหะของขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ยังช่วยเพิ่มการกำจัด Cr^{3+} เนื่องจากกลไกการกวาด (sweep coagulation) ที่ทำให้ของแข็งตกตัวลงมาเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการผสมและการกำจัดโครเมียมด้วยตะกอนลอยอีกด้วย

ปฏิกิริยาคึ่งเซลล์รีดักชัน		E' (V)
$F_2(g) + 2e^- \rightarrow 2F^-(aq)$		+2.89
$S_2O_8^{2-}(aq) + 2e^- \rightarrow 2SO_4^{2-}(aq)$		+2.01
$PbO_2(s) + 4H^+(aq) + SO_4^{2-}(aq) + 2e^- \rightarrow PbSO_4(s) + 2H_2O(l)$		+1.69
$MnO_2(s) + 8H^+(aq) + 5e^- \rightarrow Mn^{2+}(aq) + 4H_2O(l)$		+1.51
$PbO_2(s) + 4H^+(aq) + 2e^- \rightarrow Pb^{2+}(aq) + 2H_2O(l)$		+1.46
$Au^3+(aq) + 3e^- \rightarrow Au(s)$		+1.38
$Cl_2(g) + 2e^- \rightarrow 2Cl^-(aq)$		+1.36
$Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14H^+(aq) + 6e^- \rightarrow 2Cr^{3+}(aq) + 7H_2O(l)$		+1.36
$MnO_2(s) + 4H^+(aq) + 2e^- \rightarrow Mn^{2+}(aq) + 2H_2O(l)$		+1.28
$O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^- \rightarrow 2H_2O(l)$		+1.23
$Br_2(l) + 2e^- \rightarrow 2Br^-(aq)$		+1.08
$NO_3^-(aq) + 4H^+(aq) + 3e^- \rightarrow NO(g) + 2H_2O(l)$		+0.96
$2Hg^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Hg_2^{2+}(aq)$		+0.91
$Hg_2^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow 2Hg(l)$		+0.85
$Ag^+(aq) + e^- \rightarrow Ag(s)$		+0.80
$Hg_2^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow 2Hg(l)$		+0.80
$Fe^{3+}(aq) + e^- \rightarrow Fe^{2+}(aq)$		+0.77
$I_2(s) + 2e^- \rightarrow 2I^-(aq)$		+0.54
$Cu^+(aq) + e^- \rightarrow Cu(s)$		+0.52
$O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq)$		+0.40
$Cu^2+(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$		+0.34
$Hg_2Cl_2(s) + 2e^- \rightarrow 2Hg(l) + 2Cl^-(aq)$		+0.27
$AgCl(s) + e^- \rightarrow Ag(s) + Cl^-(aq)$		+0.22
$SO_4^{2-}(aq) + 4H^+(aq) + 2e^- \rightarrow SO_2(g) + 2H_2O(l)$		+0.20
$Sn^{4+}(aq) + 2e^- \rightarrow Sn^{2+}(aq)$		+0.15
$2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow H_2(g)$		0.00
$Fe^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Fe(s)$		-0.04
$Pb^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Pb(s)$		-0.13
$Sn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Sn(s)$		-0.14
$Ni^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ni(s)$		-0.24
$Co^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Co(s)$		-0.28
$PbSO_4(s) + 2e^- \rightarrow Pb(s) + SO_4^{2-}(aq)$		-0.36
$Cr^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Cr(s)$		-0.74
$Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$		-0.76
$Mn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Mn(s)$		-1.18
$Al^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Al(s)$		-1.68
$Mg^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Mg(s)$		-2.36
$Na^+(aq) + e^- \rightarrow Na(s)$		-2.71
$Ca^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ca(s)$		-2.87
$Ba^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Ba(s)$		-2.91
$K^+(aq) + e^- \rightarrow K(s)$		-2.92
$Li^+(aq) + e^- \rightarrow Li(s)$		-3.04

รูปที่ 2.3 ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของครึ่งเซลล์รีดักชันที่ 298 K หรือ 25°C (ณฐวัฒน์, 2560)

Golder et al. (2007) กล่าวว่าที่ความหนาแน่นกระแสสูงจะเกิดการกร่อนของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดตะกอนจากโลหะของขั้วอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้เมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ยังช่วยเพิ่มการกำจัด Cr^{3+} เนื่องจากกลไกการกวาด (sweep coagulation) ที่ทำให้ของแข็งตกตัวลงมาเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการผสมและการกำจัดโครเมียมด้วยตะกอนลอยอีกด้วย

2.3.3 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (ศุภมาส, 2561)

ข้อดีของกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อิเล็กโทรโคแอกกูเลชันเป็นกระบวนการที่สามารถเดินระบบได้อย่างง่าย
2. ลักษณะของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน มีลักษณะใส ไม่มีสีและไม่มีกลิ่น
3. ระบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันสามารถตกตะกอนได้เร็วและรีตน้ำออกจากตะกอนได้ง่าย
4. ตะกอนที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันมีลักษณะเดียวกันกับตะกอนที่ได้จากวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี แต่มีขนาดใหญ่กว่าและมีความคงตัวมากกว่า
5. กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันมีค่าของแข็งละลายน้ำในน้ำทิ้งน้อยกว่าวิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี
6. กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันสามารถกำจัดคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กได้ดีกว่า
7. ไม่มีปัญหาเรื่องการเติมสารเคมีที่มากเกินไป

8. สามารถกำจัดฟองอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นได้ง่าย

9. ง่ายต่อการบำรุงรักษาเครื่องมือ

ข้อเสียของกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน สามารถสรุปได้ดังนี้

1. โลหะจากขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดการสึกกร่อนจากปฏิกิริยาละลายลงสู่น้ำเสีย ต้องทำการเปลี่ยนอิเล็กโทรดเป็นระยะตามการใช้งาน

2. ต้องล้างขั้วอิเล็กโทรดเป็นครั้งคราว เนื่องจากมีสารบางชนิดเกาะบนผิวของขั้วอิเล็กโทรด ทำให้ประสิทธิภาพของการบำบัดลดลง

3. ต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการใช้ไฟฟ้า

4. น้ำเสียที่นำมาบำบัดโดยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันต้องมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงเพียงพอ

5. แก๊สออกไซด์ที่ได้จากการบำบัดสามารถละลายน้ำได้ในบางกรณี

2.4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรัตน์ (2541) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีโดยการตกตะกอนด้วยสารเคมี พบว่าในการกำจัดน้ำเสีย 1 ลิตร จะต้องใช้โซเดียมคลอไรด์ 4 กรัม เพื่อตกตะกอนเงิน ใช้เฟอร์รัสซัลไฟด์ 3 กรัมที่พีเอช 0.5 เพื่อตกตะกอนปรอท และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ปรับพีเอชให้เป็น 9 เพื่อตกตะกอนโครเมียมและเหล็ก น้ำที่ผ่านการบำบัดมีพีเอช 9 มีปริมาณของแข็งรวม 349,067 มิลลิกรัมต่อลิตร สารแขวนลอย 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ของแข็งที่ละลายได้ 349,042 มิลลิกรัมต่อลิตร เงิน 0.13 มก.ต่อลิตร ปรอท 0.001 มก.ต่อลิตร โครเมียม <0.1 มก.ต่อลิตร เหล็ก 40.5 มก.ต่อลิตร ซึ่งคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดเงิน ปรอท โครเมียม และเหล็ก เท่ากับ 99.989, >99.999, >99.967 และ 94.41 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

กษพรธณและคณะ (2555) ได้ศึกษาการบำบัดโครเมียม(+3) ในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ COD ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน พร้อมกับศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมของขั้วสแตนเลสและอลูมิเนียมที่พีเอช 1, 3, 5, และ 7 โดยให้กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ในเวลา 60 นาที และนำน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันมาปรับพีเอชเท่ากับ 9 พบว่าขั้วอลูมิเนียมมีความเหมาะสมในการบำบัดโครเมียมมากกว่าขั้วสแตนเลส ประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมที่พีเอชเริ่มต้น 1, 3, 5 และ 7 มีเท่ากับ 33.74%, 74.15%, 83.57% และ 83.75% ตามลำดับ และการนำน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันมาปรับพีเอชเท่ากับ 9 ทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดมากขึ้น

Golder et al. (2007) ได้ศึกษาการกำจัดโครเมียมไตรวาเลนต์ออกจากสารละลายโดยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน โดยใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรด ทำการศึกษาผลของเวลาในการดำเนินงาน ความหนาแน่นของกระแส พีเอชเริ่มต้น ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมไตรวาเลนต์และอิทธิพลของคลอไรด์ไอออน พบว่าการกำจัดโครเมียมไตรวาเลนต์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอชเริ่มต้น 3.4 ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 48.78 mA/cm² ระยะเวลา 40 นาที ความเข้มข้นของโครเมียมไตรวาเลนต์ลดลงมาถึง 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นยังช่วยเพิ่มการกำจัด Cr³⁺ เนื่องจากกลไกการกวาด (sweep coagulation) ที่ทำให้ของแข็งตกตัวลงมาเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังทำให้เกิดฟองก๊าซที่ช่วยในการผสมและการกำจัดโครเมียมด้วยตะกอนลอยอีกด้วย

Zaroual et al. (2009) ศึกษาการกำจัดโครเมียม (3+) ออกจากสารละลายโดยใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ พีเอช ความต่างศักย์ไฟฟ้า เวลา และอุณหภูมิ การทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือที่พีเอช 4.23 ความต่างศักย์ไฟฟ้า 9.14 โวลต์ เวลา 10 นาที และอุณหภูมิ 27.5 องศาเซลเซียส คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 91 เปอร์เซ็นต์

Shahriari et al. (2014) ศึกษาการกำจัดโครเมียมไตรวาเลนทีในน้ำเสียด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน พบว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปนเปื้อนด้วยโครเมียมซัลเฟตได้สูงถึง 99.96% ถึงปฏิกรณ์ทำจาก Plexiglas ที่มีปริมาตร 2.5 ลิตร ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้า มีแผ่นโลหะจำนวน 10 แผ่น ที่ทำด้วยเหล็กขนาด 11 x 7 ซม. และหนา 2 มม. วางอยู่ภายในถัง นอกจากนี้ยังใช้อิเลคตรอนของอาร์เรย์สองขั้วและ monopolar ในเครื่องปฏิกรณ์ด้วย ค่า pH ที่เหมาะสมคือ 6 กลไกการกำจัดโครเมียมถูกตรวจสอบด้วยและผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาในกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน

Koby et al. (2014) ทำการศึกษาการกำจัดสารหนูจากน้ำดื่มด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน โดยใช้อิเล็กโทรดคือ Al-Al และ Fe-Fe เป็นอิเล็กโทรด ในสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสารหนูในน้ำคือที่พีเอชเท่ากับ 7 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2.50 A/m² ความเข้มข้นสารหนู 150 ไมโครกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่า Fe-Al-Al-Fe (anode-cathode-anode-cathode) เป็นคู่อิเล็กโทรดที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสารหนูได้ดีที่สุด (96%, 6.30 มิลลิกรัมต่อลิตร) ในเวลาน้อยที่สุด (1 นาที)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) รุ่น AAnalyst 200 บริษัท PerkinElmer
2. เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV – Visible Spectrophotometer) รุ่น BlueStarB บริษัท LabTech
3. เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrophotometer, XRF) รุ่น SRS3400 บริษัท BRUKER
4. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น 827 pH lab บริษัท Metrohm
5. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) รุ่น ODE30 บริษัท HAMMAX
6. ตู้อบ (Oven) รุ่น ISOTEMP บริษัท Fisher Scientific
7. เตาให้ความร้อน (Hot plate) รุ่น HTS-1003 บริษัท LMS
8. เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (Stirrer) รุ่น HTS-1003 บริษัท LMS
9. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Balance) รุ่น MS204TS บริษัท METTLER TOLEDO
10. เครื่องกรองแบบลดความดัน (Pressure Filter)
11. กระดาษกรอง (Filter Paper) Whatman No.42
12. โถอบแห้ง (Desiccator)
13. ถังปฏิกิริยา (Reactor) ทำจากกล่องอะคริลิก ขนาด 90 มิลลิเมตร × 100 มิลลิเมตร × 125 มิลลิเมตร
14. อิเล็กโทรด (Electrode) ทำจากแผ่นอลูมิเนียม ขนาด 130 มิลลิเมตร × 87 มิลลิเมตร × 2 มิลลิเมตร
15. สายไฟปากจระเข้ (Alligator Clip Lead Wire)
16. บริษัทเครื่องแก้วและพลาสติก

3.1.2 สารเคมี

1. โครเมียม(III) ไนเตรต โนนานไฮเดรต ($\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, ACROS ORGANICS
2. สารละลายสต็อกโครเมียม 1,000 ppm
3. สารละลายสต็อกเหล็ก 1,000 ppm
4. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (H_2O_2) AR Grade, CARLO ERBA
5. กรดไฮโดรคลอริก 37% (HCl) AR Grade, Merck
6. กรดไนตริก 65% (HNO_3) AR Grade, CARLO ERBA
7. กรดเปอร์คลอริก (HClO_4) AR Grade, Mallinckrodt CHEMICALS
8. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade, CARLO ERBA

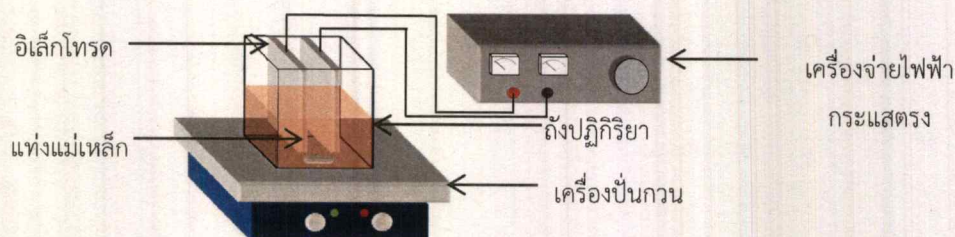
9. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) AR Grade, LOBA chemie
10. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) AR Grade, Honeywell
11. โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) AR Grade, CARLO ERBA
12. โพแทสเซียมไทโอไซยาเนต (KSCN) AR Grade, CARLO ERBA
13. แอมโมเนียมซัลเฟต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) AR Grade, CARLO ERBA
14. แอมโมเนียมเฟอรัสซัลเฟต ($\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) AR Grade, CARLO ERBA
15. อะซีโตน ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$) AR Grade, CARLO ERBA
16. ซิลเวอร์ไนเตรต (AgNO_3) AR Grade, CARLO ERBA
17. 1,5-ไดฟิซิลคาร์บาไซด์ ($\text{C}_{13}\text{H}_{14}\text{N}_4\text{O}$) AR Grade, ACROS ORGANICS
18. น้ำกลั่น

3.2 ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมด้วยระบบการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) จะใช้สารละลายโครเมียมไตรวาเลนต์ เข้มข้น 400 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นน้ำตัวอย่างในการทดสอบ ซึ่งสารละลายดังกล่าวเตรียมมาจากการเจือจางสารละลายสโตคโครเมียม (III) ไนเตรต เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (รายละเอียดวิธีการเตรียมดังแสดงในภาคผนวก ก.1)

3.3 ชุดทดลอง

ชุดทดลองที่ใช้ในการบำบัดน้ำตัวอย่างจะประกอบด้วยถังปฏิกิริยาที่ทำจากอะคริลิก ขนาด 90 มิลลิเมตร \times 100 มิลลิเมตร \times 125 มิลลิเมตร และนำมาประกอบกับขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียม ขนาด 130 มิลลิเมตร \times 87 มิลลิเมตร \times 2 มิลลิเมตร วางบนเครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก จากนั้นต่อเข้ากับวงจรแบบขนานกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพอย่างง่ายแสดงส่วนประกอบของระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

3.4 การศึกษาผลของระยะเวลาบำบัดต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกู้คืนโครเมียม

1. ชั่งน้ำหนักของขั้วอลูมิเนียมที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด จากนั้นประกอบเข้ากับชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1
2. บรรจุน้ำตัวอย่างซึ่งปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 4 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงในถังปฏิกิริยา ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้ทดลองคือ 250 มิลลิลิตร
3. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นทำการเดินระบบด้วยการจ่ายไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ เป็นระยะเวลา 30 นาที
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการวัดค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัด

5. ถอดและล้างขั้วอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่น เช็ดให้แห้ง พร้อมชั่งน้ำหนักขั้วที่เหลือ
6. เหน้าที่ผ่านการบำบัดลงในกรวยอิมฮอฟฟ์ ตั้งทิ้งไว้ 45 นาที จากนั้นอ่านปริมาตรของตะกอนที่จมตัวอยู่ด้านล่าง พร้อมกับคำนวณค่า Sludge Volume Index (SVI)
7. กรองตัวอย่างส่วนใสด้านบนด้วยเยื่อกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน เก็บสารละลายที่กรองได้ในขวดพลาสติก พร้อมกับปรับพีเอชให้มีค่าน้อยกว่า 2 เพื่อรักษาสภาพ ก่อนนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดด้วย Flame AAS
8. นำสารละลายส่วนที่เหลือในกรวยอิมฮอฟฟ์มากรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำตะกอนที่ได้จากการกรองไปอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปย่อยด้วยสารละลายกรดผสมเปอร์คลอริกและไนตริกในอัตราส่วน 2:1 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการย่อยไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมด้วย Flame AAS
9. ทำการทดลองข้อ 1-8 ซ้ำ แต่เปลี่ยนระยะเวลาการเดินระบบเป็น 60, 90, 120 และ 150 นาที ตามลำดับ
10. ทำชุดควบคุมการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-9 โดยใช้สารละลายโครเมียมไตรวาเลนท์ที่เตรียมและปรับพีเอชจากตัวอย่างชุดเดียวกัน เดินระบบโดยการปั่นกวน แต่ไม่มีการใช้ขั้วอิเล็กโทรดและให้กระแสไฟฟ้า

3.5 การศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกู้คืนโครเมียม

1. ชั่งน้ำหนักของขั้วลุ่มิเนียมที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด จากนั้นประกอบเข้ากับชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1
2. บรรจุน้ำตัวอย่างซึ่งปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงในถังปฏิกริยา ปริมาตรน้ำตัวอย่างที่ใช้ทดลองคือ 250 มิลลิลิตร
3. ปั่นกวนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นทำการเดินระบบด้วยการจ่ายไฟที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ ใช้ระยะเวลาการบำบัดที่เหมาะสมตามผลการทดลองในหัวข้อ 3.4
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการวัดค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัด
5. ถอดและล้างขั้วอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่น เช็ดให้แห้ง พร้อมชั่งน้ำหนักขั้วที่เหลือ
6. เหน้าที่ผ่านการบำบัดลงในกรวยอิมฮอฟฟ์ ตั้งทิ้งไว้ 45 นาที จากนั้นอ่านปริมาตรของตะกอนที่จมตัวอยู่ด้านล่าง พร้อมกับคำนวณค่า Sludge Volume Index (SVI)
7. กรองตัวอย่างส่วนใสด้านบนด้วยเยื่อกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน เก็บสารละลายที่กรองได้ในขวดพลาสติก พร้อมกับปรับพีเอชให้มีค่าน้อยกว่า 2 เพื่อรักษาสภาพ ก่อนนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดด้วย Flame AAS
8. นำสารละลายส่วนที่เหลือในกรวยอิมฮอฟฟ์มากรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำตะกอนที่ได้จากการกรองไปอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปย่อยด้วยสารละลายกรดผสมเปอร์คลอริกและไนตริกในอัตราส่วน 2:1 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการย่อยไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมด้วย Flame AAS
9. ทำการทดลองข้อ 1-8 ซ้ำ แต่เปลี่ยนพีเอชของน้ำตัวอย่างเป็น 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

10. ทำชุดควบคุมการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-9 โดยใช้สารละลายโครเมียมไตรวาเลนท์ที่เตรียมและปรับพีเอชจากตัวอย่างชุดเดียวกัน เดินระบบโดยการปั่นกววน แต่ไม่มีการใช้ขั้วอิเล็กโทรดและให้กระแสไฟฟ้า

3.6 การศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดและการกู้คืนโครเมียม

1. ชั่งน้ำหนักของซัลฟูมเนียมที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด จากนั้นประกอบเข้ากับชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1
2. บรรจุน้ำตัวอย่างซึ่งปรับพีเอชให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมตามผลการทดลองในหัวข้อ 3.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40% ลงในถังปฏิกิริยา ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ทดลองคือ 250 มิลลิลิตร
3. ปั่นกววนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นทำการเดินระบบด้วยการจ่ายไฟที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ ใช้ระยะเวลาการบำบัดที่เหมาะสมตามผลการทดลองในหัวข้อ 3.4
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการวัดค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัด
5. ถอดและล้างขั้วอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่น เช็ดให้แห้ง พร้อมชั่งน้ำหนักขั้วที่เหลือ
6. เหน้ำที่ผ่านการบำบัดลงในกรวยอิมฮอฟฟ์ ตั้งทิ้งไว้ 45 นาที จากนั้นอ่านปริมาตรของตะกอนที่จมตัวอยู่ด้านล่าง พร้อมกับคำนวณค่า Sludge Volume Index (SVI)
7. กรองตัวอย่างส่วนใสด้านบนด้วยเยื่อกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน เก็บสารละลายที่กรองได้ในขวดพลาสติก พร้อมกับปรับพีเอชให้มีค่าน้อยกว่า 2 เพื่อรักษาสภาพ ก่อนนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดด้วย Flame AAS
8. นำสารละลายส่วนที่เหลือในกรวยอิมฮอฟฟ์มากรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำตะกอนที่ได้จากการกรองไปอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปย่อยด้วยสารละลายกรดผสมเปอร์คลอริกและไนตริกในอัตราส่วน 2:1 (กรัมพัฒนาที่ดิน, 2547) จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการย่อยไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมด้วย Flame AAS
9. ทำการทดลองข้อ 1-8 ซ้ำ แต่เปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 10 และ 15 โวลต์ ตามลำดับ
10. ทำชุดควบคุมการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-9 โดยใช้สารละลายโครเมียมไตรวาเลนท์ที่เตรียมและปรับพีเอชจากตัวอย่างชุดเดียวกัน เดินระบบโดยการปั่นกววน แต่ไม่มีการใช้ขั้วอิเล็กโทรดและให้กระแสไฟฟ้า

3.7 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดและการกู้คืนโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ COD

1. ชั่งน้ำหนักของซัลฟูมเนียมที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด จากนั้นประกอบเข้ากับชุดทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.1
2. บรรจุน้ำตัวอย่างซึ่งปรับพีเอชให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมตามผลการทดลองในหัวข้อ 3.5 ลงในถังปฏิกิริยา ปริมาณน้ำตัวอย่างที่ใช้ทดลองคือ 250 มิลลิลิตร

3. บั่นกวนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นทำการเดินระบบด้วยการจ่ายไฟโดยใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมตามผลการทดลองในหัวข้อ 3.6 ใช้ระยะเวลาการบำบัดที่เหมาะสมตามผลการทดลองในหัวข้อ 3.4
4. เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด ทำการวัดค่าพีเอชและอุณหภูมิของน้ำที่ผ่านการบำบัด
5. ถอดและล้างขั้วอิเล็กโทรดด้วยน้ำกลั่น เช็ดให้แห้ง พร้อมชั่งน้ำหนักขั้วที่เหลือ
6. เหน้าที่ผ่านการบำบัดลงในกรวยอิมฮอฟฟ์ ตั้งทิ้งไว้ 45 นาที จากนั้นอ่านปริมาตรของตะกอนที่จมตัวอยู่ด้านล่าง พร้อมกับคำนวณค่า Sludge Volume Index (SVI)
7. กรองตัวอย่างส่วนใสด้านบนด้วยเยื่อกรองเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน เก็บสารละลายที่กรองได้ในขวดพลาสติก พร้อมกับปรับพีเอชให้มีค่าน้อยกว่า 2 เพื่อรักษาสภาพ ก่อนนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดด้วย Flame AAS
8. นำสารละลายส่วนที่เหลือในกรวยอิมฮอฟฟ์มากรองแบบลดความดันด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 นำตะกอนที่ได้จากการกรองไปอบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปย่อยด้วยสารละลายกรดผสมเปอร์คลอริกและไนตริกในอัตราส่วน 2:1 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากการย่อยไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมด้วย Flame AAS
9. ทำชุดควบคุมการทดลองเช่นเดียวกันกับข้อ 1-8 โดยใช้น้ำเสียจากการวิเคราะห์ COD ที่เตรียมและปรับพีเอชจากตัวอย่างชุดเดียวกัน เดินระบบโดยการบั่นกวน แต่ไม่มีการใช้ขั้วอิเล็กโทรดและให้กระแสไฟฟ้า

3.8 การวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำและตะกอน

ทำการวิเคราะห์สมบัติตัวอย่างน้ำที่ทำการศึกษาก่อน-หลังการบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ตารางที่ 3.1 วิธีวิเคราะห์สมบัติตัวอย่างน้ำก่อน-หลังการบำบัด

พารามิเตอร์	เครื่องมือและวิธีวิเคราะห์
อุณหภูมิ	Thermometer
ค่าพีเอช	pH meter
โครเมียมทั้งหมด	Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (ธงชัยและคณะ, 2547)
เหล็กทั้งหมด	Flame Atomic Absorption Spectrophotometer (ธงชัยและคณะ, 2547)
โครเมียมเฮกซะวาเลนต์	วิธีการทำให้เกิดสี (Colorimetric) (APHA, AWWA and WEF. 2012)

ปริมาณโครเมียมทั้งหมดในตะกอน ทำการวิเคราะห์ด้วยการย่อยด้วยสารละลายกรดผสมเปอร์คลอริกและไนตริกในอัตราส่วน 2:1 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547) สารละลายที่ได้จากการย่อยนำไปวัดความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมด

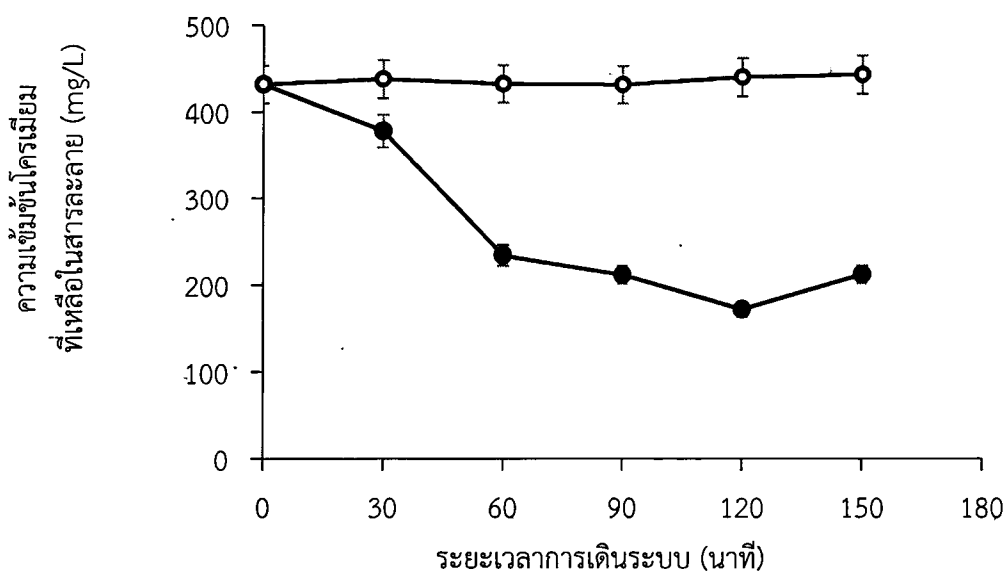
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ได้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและกักคืนโครเมียมด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน หรือกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation, EC) โดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด ตัวอย่างน้ำที่ใช้ทดสอบคือสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตและน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอเอส ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ ระยะเวลาบำบัด พีเอชเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมในเทรต และความต่างศักย์ไฟฟ้า ผลการศึกษาที่ได้เป็นดังนี้

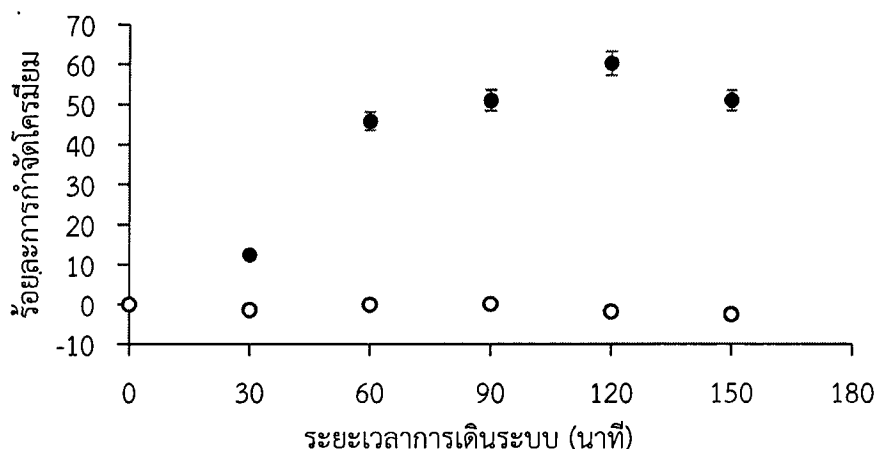
4.1 ผลของระยะเวลาบำบัดต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักคืนโครเมียม

จากการศึกษาผลของระยะเวลาบำบัดต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักคืนโครเมียมในสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 4 ทำการเดินระบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นขั้วอิเล็กโทรด เดินระบบเป็นระยะเวลา 30 , 60 , 90 , 120 และ 150 นาที พบว่าระยะเวลาในการเดินระบบมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลของระยะเวลาการเดินระบบ EC ต่อความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด

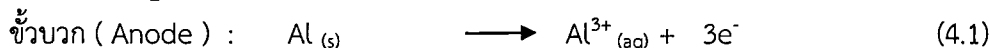
เมื่อ ● จุดทดลอง และ ○ จุดควบคุม



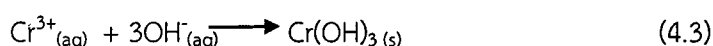
รูปที่ 4.2 ผลของระยะเวลาการเดินระบบ EC ต่อร้อยละการกำจัดโครเมียม
เมื่อ ● ชุดทดลอง และ ○ ชุดควบคุม

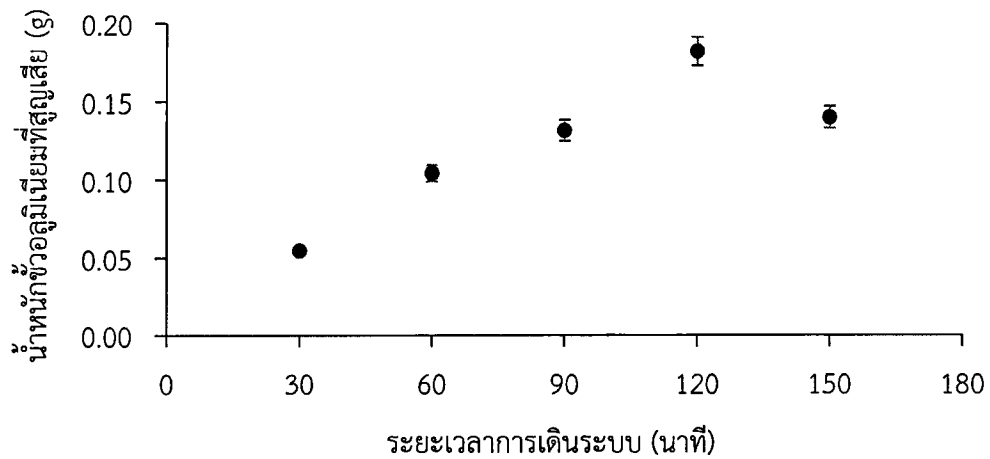
จากรูปที่ 4.1 พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันมีความสามารถในการกำจัดโครเมียมได้ดีในระดับหนึ่ง เห็นได้จากเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเดินระบบ EC จาก 30 นาที เป็น 60 นาที จะทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว จาก 377.83 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 234.00 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละของการกำจัดโครเมียมในสารละลายเท่ากับ 38.36 และ 46.80 ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มระยะเวลาเดินระบบจาก 60 นาที เป็น 90 และ 120 นาที ความเข้มข้นโครเมียมในสารละลายมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเป็น 211.67 และ 171.87 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดเท่ากับ 52.65 และ 59.85 ตามลำดับ (รูปที่ 4.2) และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มระยะเวลาเดินระบบจาก 120 นาที เป็น 150 นาที ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจึงเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อเดินระบบเป็นระยะเวลา 120 นาที

ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในสารละลายที่เพิ่มขึ้น อาจเป็นผลมาจากระยะเวลาการเดินระบบที่นานขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด และมีการสึกกร่อนของขั้วอลูมิเนียม เกิดเป็นอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al^{3+}) มากขึ้นในสารละลาย ดังสมการที่ (4.1) สอดรับกับน้ำหนักขั้วอลูมิเนียมที่สูญเสียไปที่เวลาต่างกัน (รูปที่ 4.3) ในขณะที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เกิดขึ้นในระบบมากขึ้น ดังแสดงในสมการที่ (4.2)



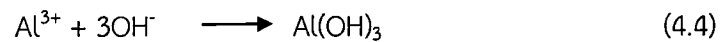
ไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้น สามารถทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} เกิดเป็นตะกอนโครเมียม (III) ไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ($Cr(OH)_3$) ดังสมการที่ (4.3)





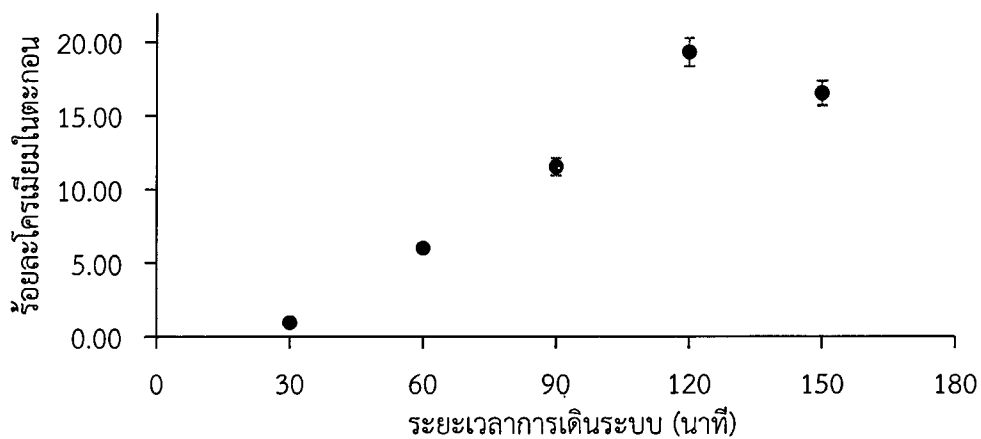
รูปที่ 4.3 ผลของระยะเวลาการเดินระบบ EC ต่อน้ำหนักขั้วอลูมิเนียมที่สูญเสีย

นอกจากนี้อลูมิเนียมไอออนที่เกิดขึ้น สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำหรือไฮดรอกไซด์ในสารละลาย เกิดเป็นตะกอนเบาของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)_3)



ฟลอคตะกอนเบาของ Al(OH)_3 (s) ร่วมกับ Cr(OH)_3 (s) ยังสามารถดักจับ Cr^{3+} ส่งผลให้เกิดการกำจัดโครเมียมไตรวาเลนต์ด้วยกลไกการกวาดตะกอน (sweep coagulation) ดังระบุไว้ในงานวิจัยของ Golder et al. (2007)

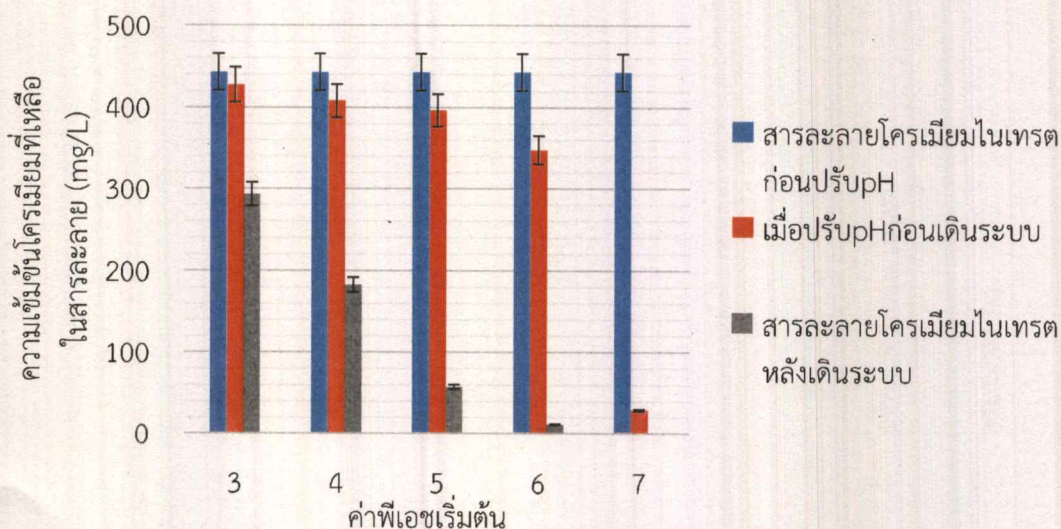
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ร้อยละโครเมียมในตะกอน พบว่าร้อยละโครเมียมในตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเดินระบบที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.4) ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของความเข้มข้นโครเมียมในสารละลายและร้อยละการกำจัดโครเมียมที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.1 และ 4.2) สะท้อนให้เห็นว่าระบบ EC สามารถกำจัดและกักเก็บโครเมียมจากน้ำตัวอย่างที่บำบัดได้ จากผลดังกล่าวข้างต้นจึงเลือกระยะเวลาบำบัดที่ 120 นาทีเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป



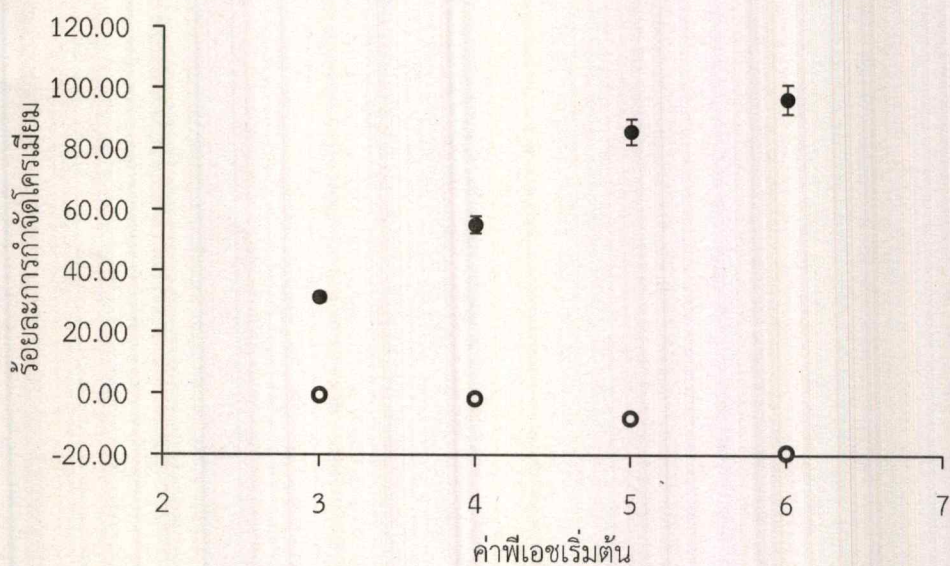
รูปที่ 4.4 ผลของระยะเวลาการเดินระบบ EC ต่อร้อยละโครเมียมในตะกอนที่ได้หลังการบำบัด

4.2 ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักเก็บโครเมียม

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักเก็บโครเมียมในสารละลายโครเมียม (III) ในเทอร์ตที่มีความเข้มข้นประมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปรับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายให้มีค่าเป็น 3, 4, 5 และ 6 พร้อมกับเดินระบบเป็นระยะเวลา 120 นาที โดยจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมด้วยระบบ EC ขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลาย ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด



รูปที่ 4.6 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละการกำจัดโครเมียม

เมื่อ ● ชุดทดลอง และ ○ ชุดควบคุม

จากรูปที่ 4.5 พบว่าการปรับพีเอชเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตให้มีค่าเป็นไปตามที่ต้องการศึกษา ก่อนนำไปบำบัดด้วย EC สามารถทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายมีแนวโน้มลดลง โดยการลดลงเกิดขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อพีเอชของสารละลายมีค่าเท่ากับ 7 สะท้อนถึงการเกิดกระบวนการตกตะกอน (Precipitation) ของ Cr^{3+} ที่ทำปฏิกิริยากับ OH^- ได้เป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ดังแสดงในสมการ (4.3) และเมื่อนำสารละลายซึ่งปรับให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นตามที่กำหนดมาบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (EC) พบว่าความเข้มข้นของโครเมียม (III) ที่เหลือในสารละลายมีแนวโน้มลดลง เมื่อพีเอชที่ใช้ในการบำบัดมีค่าเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.5) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมด้วยกระบวนการ EC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายที่ 3 เป็น 4 , 5 และ 6 คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียม เท่ากับ 31.22 , 55.16 , 88.53 และ 96.28 ตามลำดับ (รูปที่ 4.6) ในขณะที่ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือของชุดควบคุมมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าระบบ EC สามารถกำจัดโครเมียมในน้ำได้และประสิทธิภาพการทำงานของระบบ EC ขึ้นกับค่าพีเอชของสารละลาย

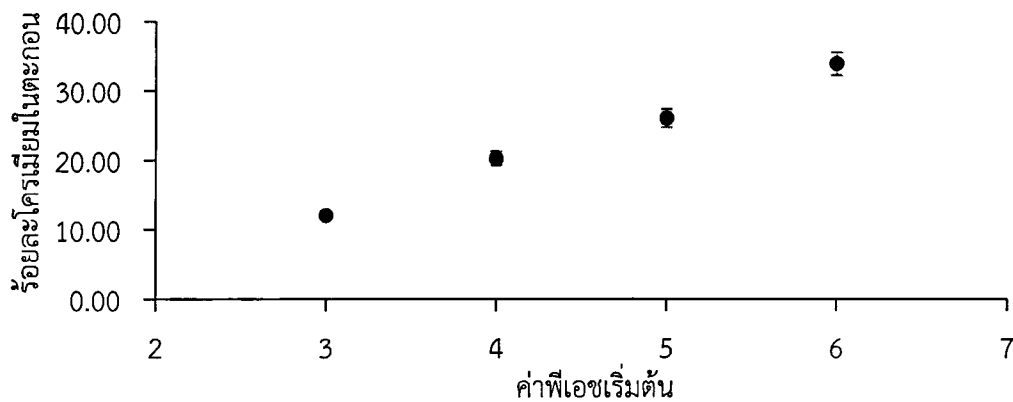
ผลของการวิเคราะห์ค่าพีเอชของสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตหลังการบำบัดด้วยระบบ EC พบว่าค่าพีเอชของสารละลายที่ผ่านการบำบัดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพีเอชของสารละลายก่อนบำบัด (ตารางที่ 4.1) แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของ OH^- ในระบบ ที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} ประกอบกับที่พีเอชเป็นด่าง จะเกิดการเข้าสู่สภาวะที่มีสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมที่เป็นประจุลบ คือ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ภายในระบบมากขึ้น ซึ่งอลูมิเนียมประจุลบดังกล่าวจะเข้าจับกับโครเมียม Cr^{3+} และสารประกอบเชิงซ้อนโครเมียมที่เป็นประจุบวก คือ $\text{Cr}(\text{OH})_2^{2+}$, $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$ (Zongo et al., 2009) ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดโครเมียมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นจาก 3 เป็น 6

ตารางที่ 4.1 พีเอชเริ่มต้นและพีเอชสุดท้ายของสารละลายโครเมียม (III) ในเทรต

ค่าพีเอชเริ่มต้น	ค่าพีเอชสุดท้าย	ร้อยละการกำจัดโครเมียม
3.24	3.87	31.22
4.16	5.86	55.16
5.23	7.82	85.53
6.07	11.27	96.28

ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมดังกล่าว มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shahriri et al. (2013) ซึ่งทำการศึกษาการกำจัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียด้วยหลักการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน โดยใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าพบว่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียเท่ากับ 6 และงานวิจัยของ Golder et al. (2007) ที่พบว่าการเพิ่มของค่าพีเอชจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะ แสดงให้เห็นว่าระบบ EC ที่ใช้เซลล์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดแบบสองขั้วและขั้วเดียว สามารถกำจัดโครเมียมในน้ำได้ดี

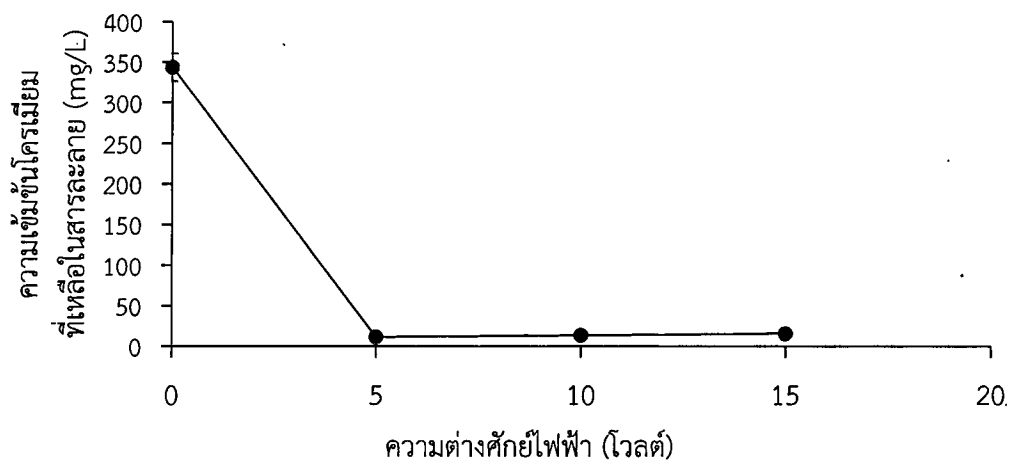
ค่าร้อยละโครเมียมในตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย (รูปที่ 4.7) สะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการกักเก็บโครเมียมจากสารละลายด้วยกระบวนการ EC โดยที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 มีความเหมาะสมในการบำบัดเพื่อกักเก็บโครเมียมในสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตด้วยระบบ EC ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายเท่ากับ 6 ในการนำไปใช้ในการศึกษาต่อไป



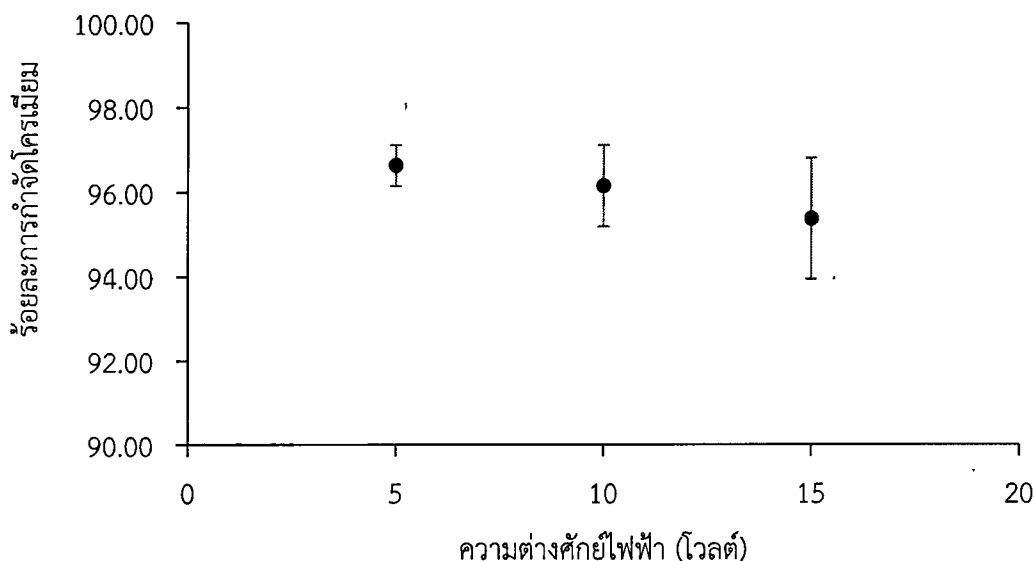
รูปที่ 4.7 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละโครเมียมในตะกอนที่ได้หลังจากการบำบัด

4.3 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักเก็บโครเมียม

เมื่อทำการศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกักเก็บโครเมียมในสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตที่ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะถูกนำมาปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 6 ทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 120 นาที โดยจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 , 10 และ 15 โวลต์ พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ EC ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9

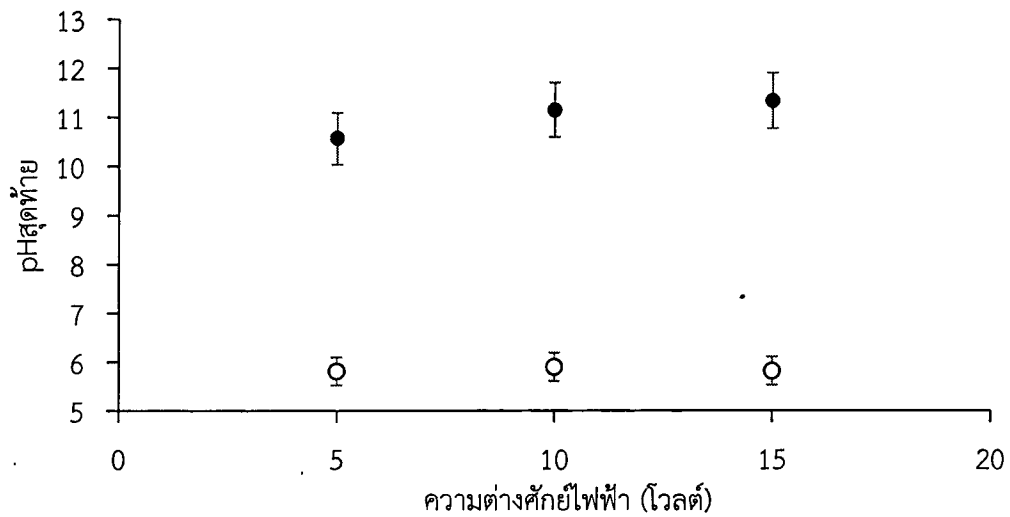


รูปที่ 4.8 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดในน้ำ



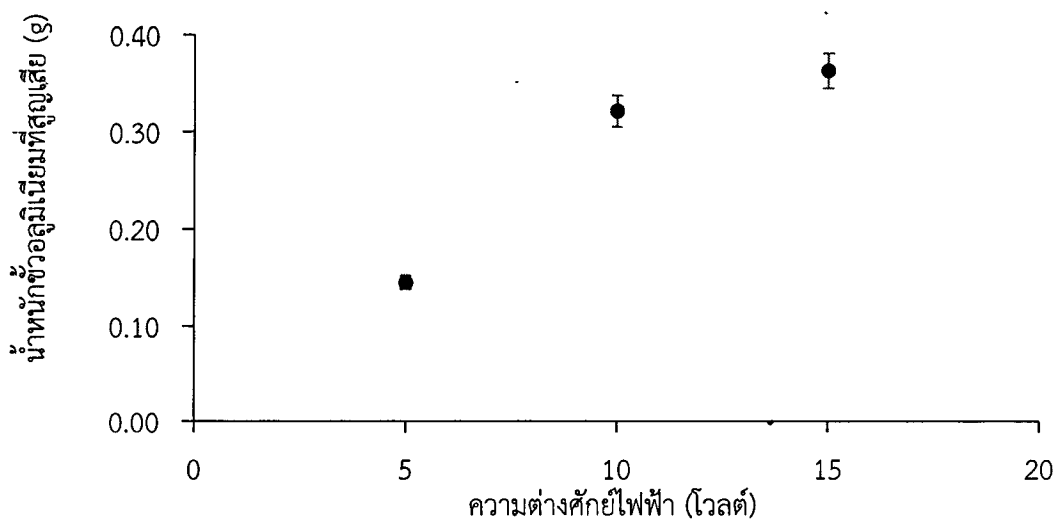
รูปที่ 4.9 ผลของความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อร้อยละการกำจัดโครเมียม

เมื่อทำการเดินระบบ EC โดยจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายมีค่าลดลงจาก 344.65 มิลลิกรัมต่อลิตรเหลือ 11.62 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.8) แสดงให้เห็นว่าระบบ EC สามารถกำจัดโครเมียมในน้ำตัวอย่างได้ คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 96.63 (รูปที่ 4.9) โดยการกำจัดส่วนหนึ่งอาจเกิดจาก OH^- ที่เพิ่มขึ้นในระบบ ดังจะเห็นได้จากค่าพีเอชของสารละลายที่ผ่านการบำบัดด้วย EC มีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับชุดควบคุม (รูปที่ 4.10) ส่งผลให้ OH^- เข้าทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} เกิดการตกตะกอน Cr^{3+} เป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$ นอกจากนี้ยังเกิดการกำจัด Cr^{3+} ได้โดยกลไกแบบกวาด (sweep coagulation) ทั้งนี้การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นการเพิ่มปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่อิเล็กโทรดหรือที่รู้จักกันคือ ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) ซึ่งในกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันที่ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ทำให้เกิดการผลิตรายววมตะกอน เช่น $\text{Al}(\text{OH})_3$ (s) ในปริมาณมากขึ้น อีกทั้งยังสามารถเข้าสู่สภาวะที่เกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมเป็นประจุลบ เข้าจับกับโครเมียมที่เป็นประจุบวกได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 10 โวลต์และ 15 โวลต์ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือในสารละลายมีค่าเท่ากับ 13.37 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 15.72 มิลลิกรัมต่อลิตร (รูปที่ 4.8) คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียมในสารละลายเท่ากับ 96.15 เปอร์เซ็นต์และ 95.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (รูปที่ 4.9) แสดงให้เห็นว่า การเดินระบบอิเล็กโทรไลต์แอโนดที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม สามารถกำจัดโครเมียมในน้ำได้ ทั้งนี้การใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากเกินไป นอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานแล้ว ยังทำให้เกิดการกัดกร่อนของขั้วอลูมิเนียมมากขึ้น และเกิดเป็นฟล็อกของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ (s) เกาะอยู่บนพื้นผิวขั้วอิเล็กโทรด แทนที่การเข้าทำปฏิกิริยากับ Cr^{3+} ประกอบกับการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าจะทำให้เกิดฟองก๊าซขนาดเล็กและเพิ่มจำนวนขึ้นจนอาจรบกวนหรือกีดขวางการทำปฏิกิริยาของ Cr^{3+} กับ OH^- หรือกีดขวางการกำจัดโครเมียมด้วยกลไกแบบกวาด (sweep coagulation) (Golder et al., 2007)



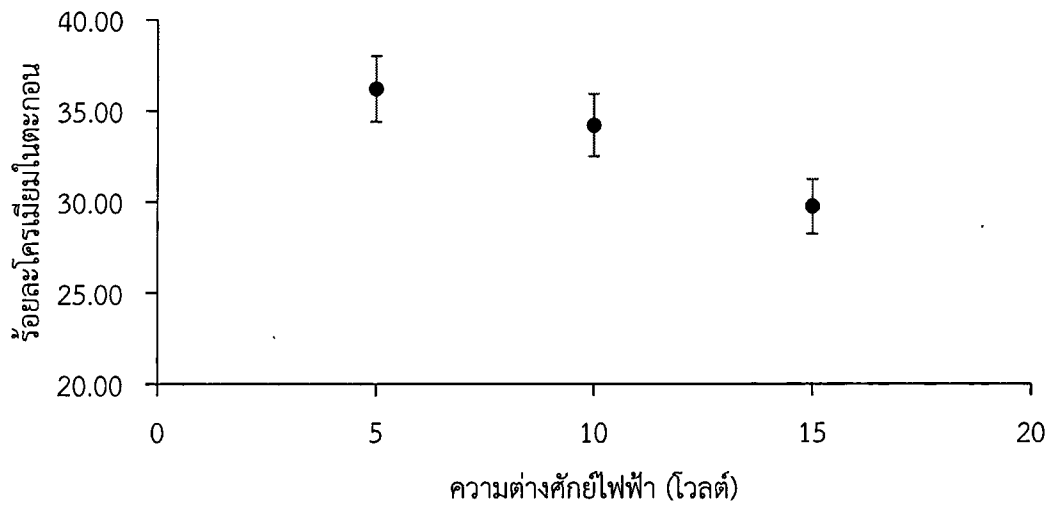
รูปที่ 4.10 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าพีเอชสุดท้ายของสารละลาย
เมื่อ ● ชุดทดลอง และ ○ ชุดควบคุม

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักรีดขั้วอลูมิเนียม (ขั้วอิเล็กโทรด) ภายหลังจากเดินระบบบำบัดด้วย EC พบว่าเมื่อใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้นจาก 5 โวลต์ เป็น 10 โวลต์ และ 15 โวลต์ มีการสูญเสียน้ำหนักของขั้วอลูมิเนียมให้ระบบเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.11) เป็นการยืนยันให้เห็นว่าเกิดการกัดกร่อนของขั้วอลูมิเนียมสูงขึ้นตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การกัดกร่อนของขั้วอลูมิเนียมที่มากขึ้นในสภาวะที่เป็นด่าง จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มของออกไซด์และฟลิวอไซด์ของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกาะอยู่บริเวณหน้าผิวขั้วอิเล็กโทรดอย่างหนาแน่น การถ่ายโอนไอออนและอิเล็กตรอนจะลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการอิเล็กโทรโคอากูเลชันลดลง (Kobya et al., 2013) ทำให้การเดินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ และ 15 โวลต์ ทำให้สารละลายกลับมามีความเข้มข้นของโครเมียมเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในสารละลายมีค่าลดลง (รูปที่ 4.8 และ 4.9)



รูปที่ 4.11 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อน้ำหนักขั้วอลูมิเนียมที่สูญเสีย

ผลการวิเคราะห์ร้อยละโครเมียมในตะกอน พบว่าการเดินระบบอิเล็กทรอนิกส์โคแอกกูเลชันโดยจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าร้อยละโครเมียมในตะกอนมีแนวโน้มลดลง (รูปที่ 4.12) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของโครเมียมที่เพิ่มสูงขึ้นและร้อยละการกำจัดโครเมียมที่ลดลงในสารละลาย แสดงให้เห็นว่าระบบ EC มีความสามารถในการกำจัดและกักเก็บโครเมียมได้ดีที่สุด โดยการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ให้กับระบบ ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงเลือกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 5 โวลต์ ไปใช้ในการศึกษาต่อไป



รูปที่ 4.12 ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อร้อยละโครเมียมในตะกอนที่ได้หลังการบำบัด

4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดี

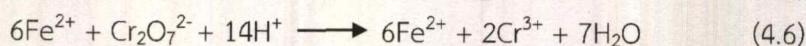
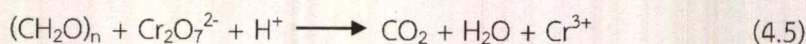
4.4.1 คุณลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการศึกษา

ลักษณะของน้ำเสียที่เก็บรวบรวมมาจากการวิเคราะห์หาค่าซีไอดีของรายวิชาปฏิบัติเคมี สิ่งแวดล้อมและคุณภาพน้ำ ซึ่งเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยกระบวนการรีฟลักซ์แบบปิด เป็นดังตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำเสียดังกล่าวมีค่าพีเอชเป็นกรดอย่างมาก มีสีเหลืองเข้ม ไม่มีตะกอน ตัวอย่างน้ำมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 397 มิลลิกรัมต่อลิตร จะพบโครเมียมอยู่ในสองรูปฟอร์มได้แก่ โครเมียมไตรวาเลนท์ (Cr^{3+}) เข้มข้น 333 มิลลิกรัมต่อลิตร และโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (Cr^{6+}) เข้มข้นเท่ากับ 64 มิลลิกรัมต่อลิตร

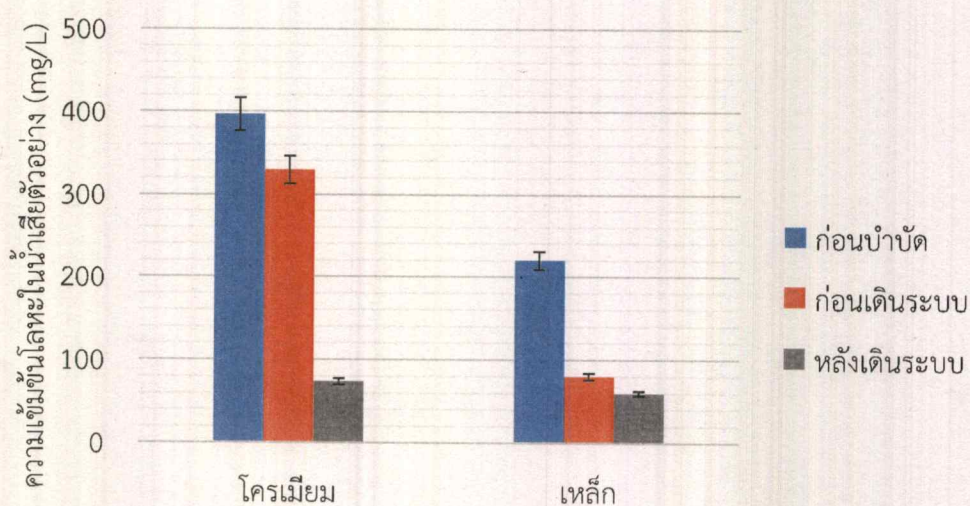
ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดีที่ใช้ศึกษา

คุณลักษณะ	ก่อนบำบัด
ค่าพีเอช	1.37
ความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด (mg/L)	397±0.32
ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (mg/L)	64±0.33
ความเข้มข้นโครเมียมไตรวาเลนท์ (mg/L)	333±0.01
ความเข้มข้นเหล็กทั้งหมด (mg/L)	220±0.03

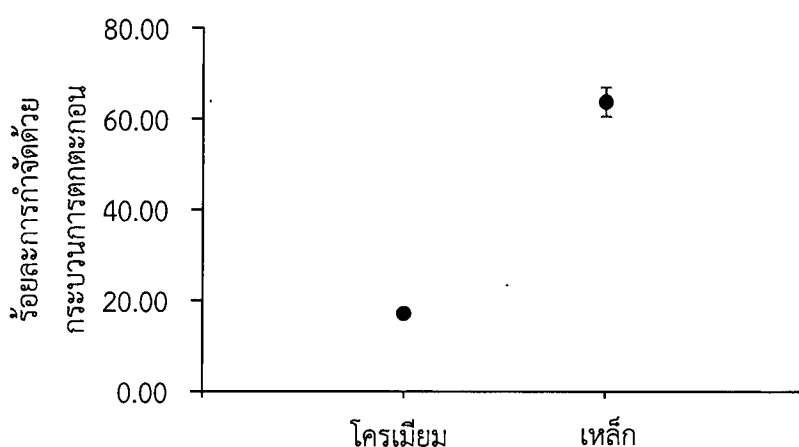
เนื่องจากสารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิไดส์คือโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ทำให้น้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดีจึงมีโครเมียมอยู่ในรูปของ Cr^{6+} เป็นส่วนประกอบ Cr^{6+} จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์สารอินทรีย์ด้วยการต่อกับกรดซัลฟิวริก เกิดการออกซิเดชันได้เป็นโครเมียมที่อยู่ในรูป Cr^{3+} ดังสมการ (4.5) และ (4.6) ทำให้น้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี มีโครเมียมไตรวาเลนต์เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังพบเหล็กในปริมาณ 219.97 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณเหล็กที่วิเคราะห์ได้ในน้ำเสียเป็นผลมาจากการใช้ FAS ไทเทรตย้อนกลับเพื่อหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตส่วนที่เหลือจากการออกซิไดส์ ดังสมการ (4.6)



เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดและกักเก็บโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี ด้วยระบบอิเล็กโทรโครแอกกูเลชันโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการศึกษา ในหัวข้อที่ผ่านมา คือปรับพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเป็น 6 เตินระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ เป็นระยะเวลา 120 นาที พบว่าการปรับพีเอชของตัวอย่างน้ำเสียก่อนเตินระบบ EC ทำให้ความเข้มข้นโครเมียมมีค่าลดลงจาก 397 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 328.93 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละกำจัดโครเมียมด้วยกระบวนการตกตะกอนเท่ากับ 17.08 ดังรูปที่ 4.13 นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นเหล็กลดลงจาก 219.97 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 80.04 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดเหล็กด้วยกระบวนการตกตะกอนเท่ากับ 63.60 (รูปที่ 4.14)

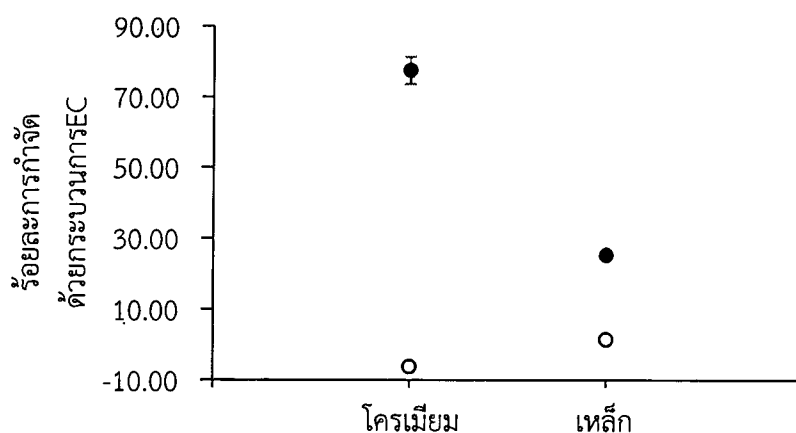


รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี



รูปที่ 4.14 ผลของการปรับพีเอชเริ่มต้นต่อร้อยละการกำจัดด้วยกระบวนการตกตะกอน

เมื่อนำน้ำเสียมาปรับพีเอชให้มีค่าเริ่มต้นเป็น 6 แล้วบำบัดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันพบว่าระบบ EC มีความสามารถในการกำจัดโครเมียมได้เป็นอย่างดี ดังเห็นได้จากความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือในสารละลายมีค่าลดลงจาก 328.93 มิลลิกรัม เป็น 73.98 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 77.51 (รูปที่ 4.15) ในขณะที่เดียวกันระบบ EC กลับมีความสามารถในการกำจัดเหล็กได้น้อยกว่ามาก ดังจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของเหล็กลดลงเล็กน้อยจาก 80.04 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 59.89 มิลลิกรัมต่อลิตร. คิดเป็นร้อยละการกำจัดเหล็กเท่ากับ 25.17



รูปที่ 4.15 ร้อยละการกำจัดด้วยกระบวนการECของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดี
เมื่อ ● ชุดทดลอง และ ○ ชุดควบคุม

ผลจากการวิเคราะห์ร้อยละโครเมียมและเหล็กในตะกอนที่ได้จากการบำบัดพบว่าตะกอนที่เกิดขึ้นมีโครเมียมเป็นส่วนประกอบเท่ากับ 32.22 เปอร์เซ็นต์ และเหล็กเท่ากับ 10.11 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.3) ซึ่งมีความสอดคล้องกับการลดลงความเข้มข้นของโครเมียมและเหล็กในน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและร้อยละการกำจัดโลหะในน้ำที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าในสภาวะที่เหมาะสมของระยะเวลา ค่าพีเอชและความต่างศักย์ไฟฟ้า ระบบ EC สามารถกำจัดและกักเก็บโครเมียมและเหล็กจาก

น้ำเสียที่บำบัดได้ ดังนั้นกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันจึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดและกู้คืนโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดี

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลร้อยละโครเมียมและเหล็กในตะกอน

คุณลักษณะของตะกอน	ผลการวิเคราะห์
ร้อยละโครเมียมในตะกอน	32.22
ร้อยละเหล็กในตะกอน	10.11

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบในตะกอนพบว่า มีโครเมียมไตรวาเลนต์เท่ากับ 21.5 เปอร์เซ็นต์ เหล็กเท่ากับ 29.4 เปอร์เซ็นต์ และอลูมิเนียมเท่ากับ 2.11 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลปริมาณธาตุองค์ประกอบในตะกอน

ธาตุองค์ประกอบ	ผลการวิเคราะห์
Cr ³⁺	21.5 %
Fe	29.4 %
Al	2.11 %

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน ในการบำบัดและกู้คืนโครเมียมในน้ำ โดยใช้สารละลายโครเมียม (III) ในเทรตความเข้มข้นประมาณ 400 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดและกู้คืนโครเมียม ได้แก่ ระยะเวลาบำบัด ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย และความต่างศักย์ไฟฟ้า สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ระยะเวลาการเดินระบบ EC ที่นานขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดและกู้คืนโครเมียมในน้ำ โดยการบำบัดสารละลายโครเมียม (III) ในเทรต (พีเอชเท่ากับ 4) ด้วยระบบ EC ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ เกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อใช้ระยะเวลา 120 นาที ที่สภาวะดังกล่าว ทำให้ความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายที่ผ่านการบำบัดด้วย EC มีค่าลดลงเหลือ 171.87 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในสารละลายเท่ากับ 59.85 เปอร์เซ็นต์และมีปริมาณโครเมียมในตะกอนเท่ากับ 19.28 เปอร์เซ็นต์

2. ผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม ซึ่งทำการศึกษาดำเนินการเดินระบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันเป็นระยะเวลา 120 นาที จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ 10 โวลต์ พบว่าที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 มีความสามารถกำจัดและกู้คืนโครเมียมได้ดีที่สุด คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในสารละลายเท่ากับ 96.28 เปอร์เซ็นต์ โดยความเข้มข้นโครเมียมของสารละลายที่ผ่านการบำบัดด้วย EC มีค่าลดลงเหลือ 12.93 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีปริมาณโครเมียมในตะกอนเท่ากับ 33.81 เปอร์เซ็นต์

3. ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพในการกำจัดและกู้คืนโครเมียม ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม (III) ในเทรตเท่ากับ 6 เดินระบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันเป็นระยะเวลา 120 นาที พบว่าการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ มีความเหมาะสมในการบำบัดมากที่สุด โดยสามารถลดความเข้มข้นโครเมียมในสารละลายเป็น 11.62 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละการกำจัดโครเมียมเท่ากับ 96.63 และมีปริมาณร้อยละโครเมียมในตะกอนเท่ากับ 36.24 เปอร์เซ็นต์เป็นส่วนประกอบ

4. การบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอดี ซึ่งมีความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดเท่ากับ 328.93 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยการปรับพีเอชเริ่มต้นของน้ำให้มีค่าเท่ากับ 6 จากนั้นนำไปบำบัดด้วยระบบ EC ด้วยการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 โวลต์ นานเป็นเวลา 120 นาที สามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมในสารละลายให้เหลือ 73.98 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในสารละลายเท่ากับ 77.51 เปอร์เซ็นต์ และตะกอนที่กู้คืนมาได้มีโครเมียมเป็นส่วนประกอบเท่ากับ 32.22 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขั้วอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้มาจากร้านจัดจำหน่าย ควรมีการขัดหน้าขั้วก่อนนำไปใช้ เพื่อให้สารซุบโลหะที่เคลือบมาหลุดออกจนหมด ไอออนโลหะจะได้สามารถละลายออกมาทำการบำบัดได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ
2. ควรทำความสะอาดขั้วอิเล็กทรอนิกส์ให้สะอาดทุกครั้งก่อนทำการเดินระบบทุกครั้ง เพื่อป้องกันการตกค้างของฟลักโครเมียมที่ติดอยู่บนขั้ว
3. หากต้องการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดีให้เป็นไปตามกฎหมายกำหนด อาจต้องเลือกใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากมีความสามารถในการรีดิวส์โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ที่ยังเหลืออยู่ในน้ำเสียได้
4. เนื่องจากตะกอนที่ได้จากกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันจากการเดินระบบด้วยน้ำตัวอย่างปริมาตร 250 มิลลิลิตร เมื่อทำการกรองและอบแล้ว จะได้ปริมาณตะกอนที่ค่อนข้างน้อย หากต้องการกู้คืนโครเมียมด้วยการใช้ตะกอนโครเมียมที่ได้ ควรมีการเพิ่มปริมาตรน้ำตัวอย่างในการเดินระบบให้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กชพรรณ ปานดี, จตุพร เพชรจำนงค์, และพุทธรณ จันทน์เทศ. 2555. “การบำบัดโครเมียม(3+) ใน น้ำเสียจากการวิเคราะห์ COD ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- กรมพัฒนาที่ดิน. 2547. คู่มือวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย พืช วัสดุปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อ ตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. กรุงเทพมหานคร : สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.
- กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ และ พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย. 2559. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร. อ.ณัฐวัฒน์ ธนสารโชคพิบูลย์. 2560. เซลล์กัลวานิก. [Online]. Available : http://www.digitalschool.club/digitalschool/chemical2_2_1/chemical9_3.pdf
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์, วิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธีศักดิ์. 2547. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่4. กรุงเทพมหานคร
- พินิต รตชนานุกุล. 2553. เคมี2. กรุงเทพมหานคร : ด้านสุทธาการพิมพ์.
- ศุภจิตร์ ขุนจร. 2561. Chemical Oxygen Demand (COD). [Online]. Available : <http://www.reo3.go.th/newversion/images/stories/article55/4003.pdf>.
- ศุภมาส ด้านวิทยากุล. 2561. การตกตะกอนด้วยไฟฟ้ากับการบำบัดน้ำเสีย. [Online]. Available : https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/290_35-41.pdf.
- สยามเคมี. 2561. โครเมียม ประโยชน์และพิษโครเมียม. [Online]. Available : <https://www.siamchemi.com/โครเมียม/>.
- สุรัตน์ เพชรเกษม. 2541. “การศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอที โดย วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยมหิดล.
- APHA, AWWA and WEF. 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.
- Balasubramanian, N. and Madhavan, K. 2001. “Arsenic removal from industrial effluent through electrocoagulation.” *Chemical Engineering Technology*. 24 : 519-521.
- Espinoza-Quinones, F.R., Fornari, M.M.T., Modenes, A.N., Palacio, S.M., Triqueros, D.E.G., Borba, F.H. and Krounov, A.D. 2009. Electrocoagulation efficiency of the tannery effluent treatment using aluminium electrodes. *Water Science and Technology*. 60 : 2173-2185.

- Golder, A.K., Samanta, A.N. and Ray, S. 2007. Removal of trivalent chromium by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*. 53 : 33-41.
- Kobyas, M., Akyol, A., Demirbas, E. & Oncel M.S. 2014. Removal of arsenic from drinking water by batch and continuous electrocoagulation processes using hybrid Al-Fe plate electrodes. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. 33 : 131-140.
- Saad, H.A. 2009. "Zn(II) Removal from Wastewater by Electrocoagulation/Flotation Method using New Configuration of a Split-Plate Airlift Electrochemical Reactor." *Journal of Engineering*. 48 : 97-110.
- Shahriari, T., Gholamreza, N.B., Naser, M. and Ali, T. 2013. Removal of chromium(III) from wastewater by electrocoagulation method. *Journal of Civil Engineering* 18 : 949-955.
- Xueming, C., Guohua C. and Po, L.Y. 2000. "Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation." *Separation and Purification Technology*. 19 : 65-76.
- Zaroual, Z., Chaair, H., Essadki, A.H., El-Ass, K. and Azzi, M. 2009. Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design. *Chemical engineering journal* 148 : 488-495.
- Zongo, I., Leclerc, J.B., Maiga, H.A., Wethe, J., Lopicue, F. 2009. Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation : A comprehensive comparison of aluminium and iron electrodes. *Separation and Purification Technology*. 66 : 159-166.

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ก.1 การวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมทั้งหมด

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometry, AAS) ซึ่งจะต้องมีการสร้างกราฟมาตรฐาน โดยการอ่านค่าแอบซอร์พแบนซ์ (A) แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับความเข้มข้น และความเข้มข้นดังกล่าว จะถูกนำมาคิดเป็นค่าร้อยละการกำจัดของตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัด เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ EC (ธงชัยและคณะ, 2547)

สารเคมี

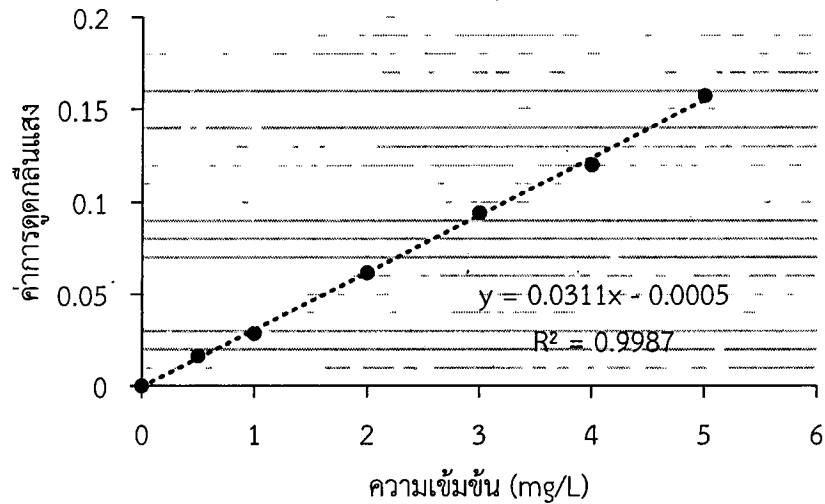
1. น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน ใช้สำหรับเตรียมสารละลายแปลงค์ สารละลายมาตรฐาน และใช้ในการเจือจางตัวอย่าง
2. สารละลายสต็อกโครเมียม ความเข้มข้น 1000 mg/L
3. สารละลายมาตรฐานโครเมียม ความเข้มข้น 100 mg/L เจือจางสต็อกโครเมียม โดยปิเปตมา 10 mL ลงในน้ำกลั่น 100 mL ในขวดวัดปริมาตร, สารละลายนี้ 1.00 mL = 1 mgCr
4. สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 %
5. สารละลายโครเมียม (III) ไนเตรตความเข้มข้น 400 mg/L

เตรียมจากสารละลายสต็อกโครเมียม 1000 mg/L ชั่ง $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 7.6957 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น เติงขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้สารละลายผสมกัน แล้วปิเปตสารละลายที่ได้มา 400 mL ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 mL และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้สารละลายผสมกัน

วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน
 - ปิเปตสารละลายมาตรฐานโครเมียม จำนวน 0.5 , 1 , 2 , 3 , 4 และ 5 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เติมน้ำกลั่นจนถึงขีด จะได้ช่วงความเข้มข้น 0.5 , 1 , 2 , 3 , 4 และ 5 mg/L
2. การเตรียมสารตัวอย่าง
 - นำตัวอย่างมากรองด้วยเยื่อเมมเบรนขนาด 0.45 μm
 - เจือจางน้ำตัวอย่าง 100 เท่า เพื่อให้ความเข้มข้นอยู่ในช่วงของกราฟมาตรฐาน โดยปิเปตตัวอย่างมา 1 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เติมน้ำกลั่นจนถึงขีด
3. การตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง
 - ก่อนทำการวิเคราะห์กราฟมาตรฐานโครเมียมและละลายตัวอย่าง ให้ผสมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (30%) 1 mL ลงในสารละลาย 100 mL โดยกราฟมาตรฐานจะคิดจากความเข้มข้นเดิม
 - วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานโครเมียมและสารละลายตัวอย่าง ที่ความยาวคลื่น 357.9 nm

- ตรวจสอบกราฟมาตรฐาน โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานโครเมียม 2.5 mL (ความเข้มข้น 2.5 mg/L) ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เติมน้ำกลั่นจนถึงขีด



รูปที่ ก.1 กราฟมาตรฐานของโครเมียมทั้งหมด

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลของกราฟมาตรฐานโครเมียมทั้งหมด

ความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมด (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.0000
0.5	0.0164
1	0.0286
2	0.0617
3	0.0941
4	0.1203
5	0.1574

การคำนวณ

$$\text{ร้อยละการกำจัด} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100$$

C_0 = ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)

C = ความเข้มข้นสุดท้าย (mg/L)

ก.2 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (Cr(VI))

การวิเคราะห์ปริมาณ Cr(VI) โดยวิธีการเทียบสี (Colorimetric Method) Cr(VI) จะทำปฏิกิริยากับไดฟีนิลคาร์บาไซด์ในสถานะที่เป็นกรด เกิดเป็นสารประกอบสีแดงม่วง วิธีนี้มักจะไม่มีการรบกวนจากการวิเคราะห์เนื่องจากไดฟีนิลคาร์บาไซด์จะทำปฏิกิริยากับโครเมียมเท่านั้น (APHA et al., 2012)

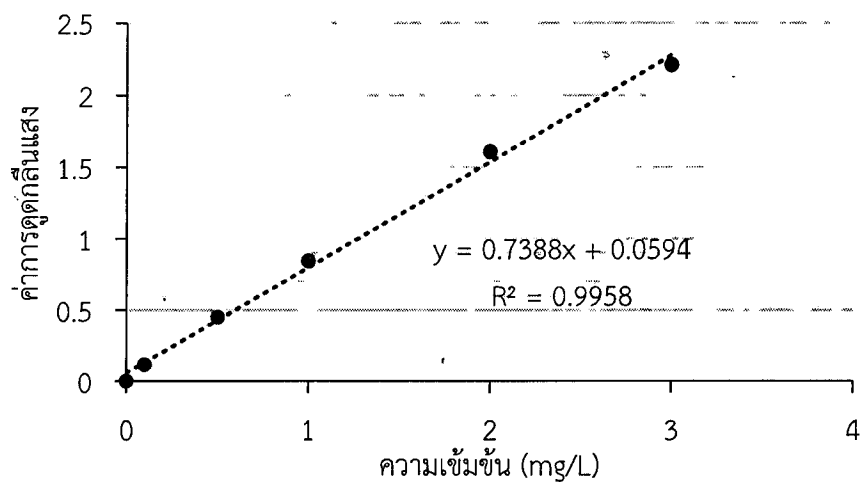
สารเคมี

1. สารละลายสต็อกโครเมียม ความเข้มข้น 500 mg/L
ละลาย $K_2Cr_2O_7$ 141.4 mg ในน้ำกลั่น 100 mL
2. สารละลายมาตรฐานโครเมียม ความเข้มข้น 50 mg/L
ปิเปตสารละลายสต็อกโครเมียม 10 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด
3. กรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.2 N
ปิเปตสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 96.5% มา 0.561 mL ปล่อยลงในน้ำกลั่น 25 mL อย่างช้าๆ แล้วปรับปริมาตรให้เป็น 100 mL
4. สารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (Diphenylcarbazide)
ละลาย 250 mg ของ 1,5-diphenylcarbazide ในอะซิโตน 50 mL เก็บไว้ในขวดสุญญากาศ
5. สารละลายบัฟเฟอร์
ละลาย 33 g ของ Ammonium sulfate ในน้ำ 75 mL แล้วเติม Ammonium hydroxide 6.5 mL และปรับปริมาตรเป็น 100 mL ด้วยน้ำกลั่น

วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน
 - ปิเปตสารละลายมาตรฐานโครเมียมมา 0.1 , 0.5 , 1 , 2 และ 3 mL ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 47 mL
 - นำไปปรับ pH ให้เป็น 2.0 ± 0.5 ด้วย 0.2 N H_2SO_4 แล้วเติมน้ำกลั่นจนถึงขีดของขวดวัดปริมาตร
 - เติม Diphenylcarbazide 1 mL เขย่าสารละลายให้ผสมกัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 5 - 10 นาทีเพื่อให้เกิดสีสมบูรณ์ (ปริมาตรสุดท้ายที่ได้คือ 51 mL)
 - จะได้สารละลายโครเมียมที่มีความเข้มข้น 0.1 , 0.5 , 1 , 2 และ 3 mg/L นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 nm ด้วยเครื่อง UV - Vis Spectrophotometer โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นแบลนด์
2. การเตรียมสารตัวอย่าง
 - ปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 0.5 mL ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 47 mL
 - เติมสารละลายบัฟเฟอร์ 1 mL แล้วปรับ pH ให้เป็น 2.0 ± 0.5 ด้วย 5N NaOH
 - เติมน้ำกลั่นจนถึงขีดของขวดวัดปริมาตร

- เติม Diphenylcarbazide 1 mL เขย่าสารละลายให้ผสมกัน แล้วตั้งทิ้งไว้ 5 - 10 นาที เพื่อให้เกิดสีสมบูรณ์ (ปริมาตรสุดท้ายที่ได้คือ 51 mL)
- วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm



รูปที่ ก.2 กราฟมาตรฐานของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลของกราฟมาตรฐานของโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์

ความเข้มข้นโครเมียมเฮกซะวาเลนซ์ (mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.0000
0.1	0.11717
0.5	0.4516
1	0.84693
2	1.60799
3	2.20919

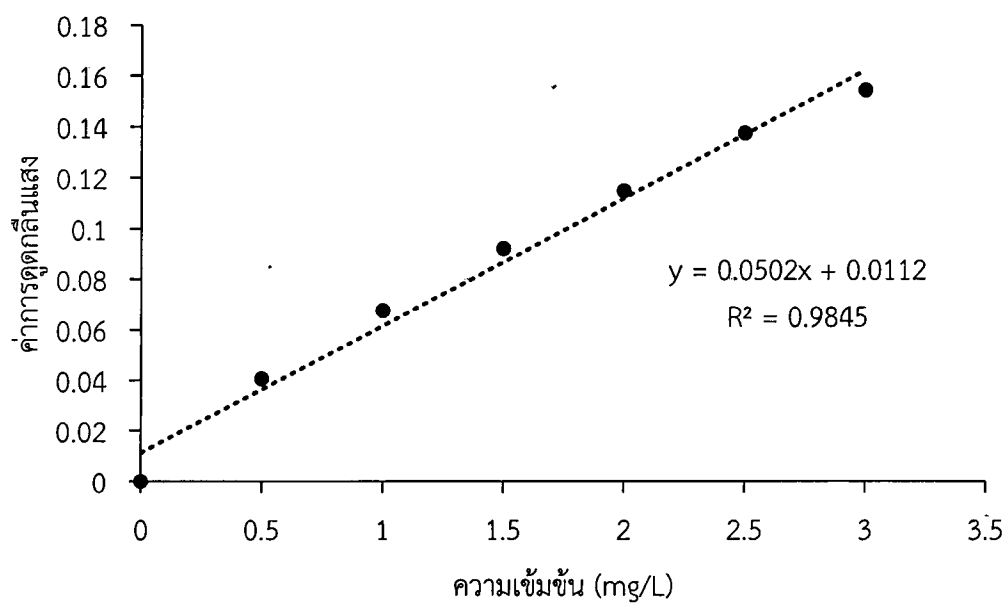
ก.3 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเหล็กโดยใช้ AAS

สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน ใช้สำหรับเตรียมสารละลายบัลลงค์ สารละลายมาตรฐาน และใช้ในการเจือจางตัวอย่าง
2. สารละลายสต็อกเหล็ก ความเข้มข้น 1000 mg/L
3. สารละลายมาตรฐานเหล็ก ความเข้มข้น 100 mg/L
เจือจางสต็อกเหล็ก โดยปิเปตมา 10 mL ลงในขวดน้ำกลั่น 100 mL ในขวดวัดปริมาตร สารละลายนี้ 1.00 mL = 1 mgFe
4. สารละลายแคลเซียม
ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 0.063 mg ละลายในกรดไฮโดรคลอริก (1+5) 10 mL คนจนสารละลายใสแล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 100 mL

วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมกราฟมาตรฐาน
 - ปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็กมา 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 2.5 และ 3 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เติมน้ำกลั่นจนถึงขีด จะได้ช่วงความเข้มข้นเป็น 0.5 , 1 , 1.5 , 2 , 2.5 และ 3 mg/L
2. การเตรียมสารตัวอย่าง
 - นำตัวอย่างมากรองด้วยเยื่อกรองเมมเบรนขนาด 0.45 μm
 - เจือจางตัวอย่างน้ำ 200 เท่า เพื่อให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงกราฟมาตรฐาน โดยปิเปตตัวอย่างน้ำมา 0.5 mL ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เติมน้ำกลั่นจนถึงขีด
3. การตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสง
 - ก่อนทำการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานเหล็กและสารละลายตัวอย่าง ให้เติมสารละลายแคลเซียม 25 mL ลงในสารละลาย 100 mL โดยกราฟมาตรฐานจะคิดจากความเข้มข้นเดิม
 - วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานเหล็กและสารละลายตัวอย่าง ที่ความยาวคลื่น 248.3 nm
 - ตรวจสอบกราฟมาตรฐาน โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเหล็ก 1.2 mL (ความเข้มข้น 1.2 mg/L) ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL เติมน้ำกลั่นจนถึงขีด



รูปที่ ก.3 กราฟมาตรฐานเหล็ก

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของกราฟมาตรฐานเหล็ก

ความเข้มข้นเหล็ก(mg/L)	ค่าการดูดกลืนแสง
0	0.0000
0.5	0.0406
1	0.0674
1.5	0.092
2	0.1146
2.5	0.1373
3	0.1542

ก.4 การวิเคราะห์ปริมาณตะกอน

ก.4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งจมตัวหรือตะกอนหนัก

ของแข็งจมตัวหรือตะกอนหนัก หมายถึง ของแข็งที่จมได้ดีเมื่อตั้งทิ้งไว้ในภาชนะและในเวลาที่กำหนด (กรองแก้วและพิสมัย, 2559)

ปริมาตรของแข็งจมตัว (SV₄₅)

วิธีการวิเคราะห์

- เขย่าตัวอย่างน้ำให้เข้ากันลงในกรวยอิมซอพฟ์จนถึงขีด 1L ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 45 นาที ใช้แท่งแก้วคนข้างๆรอบกรวยเพื่อให้ของแข็งที่เกาะอยู่ข้างกรวยตกลงมาที่ก้นแล้วตั้งทิ้งไว้อีก 15 นาที จดปริมาตรของแข็งที่จมตัวในกรวย รายงานผลในหน่วย mL/L

ปริมาณตะกอนหนัก (รายงานผลในหน่วย mg/L)

วิธีการวิเคราะห์

- เตรียมตัวอย่างน้ำโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน
- ส่วนที่ 1 (A) : นำน้ำส่วนที่มีตะกอน 50 mL ไปหาปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) รายงานผลในหน่วย mg/L
- ส่วนที่ 2 (B) : ตั้งน้ำทิ้งไว้โดยไม่การรบกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงค่อยๆตุน้ำจากบริเวณศูนย์กลางของชั้นน้ำใสตอนบน จำนวน 50 mL ไปหาค่าของแข็งแขวนลอยไม่ตกตะกอน (SS)
- นำกระดาษกรองไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- วางกระดาษลงในกรวยบุชเนอร์ซึ่งต่อเข้ากับเครื่องกรองลดความดันด้วยแรงน้ำ
- นำตัวอย่างน้ำที่เตรียมไว้ เทลงในกรวยบุชเนอร์และเปิดเครื่องกรองแบบลดความดันด้วยแรงน้ำ จนน้ำแห้ง ล้างด้วยน้ำกลั่น 10 mL เปิดเครื่องทิ้งไว้ 3 นาที
- นำกระดาษกรองไปอบแห้งที่ 103 – 105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่

การคำนวณ

$$\frac{\text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS) หรือ}}{\text{ของแข็งแขวนลอยไม่ตกตะกอน (SS) (mg/L)}} = \frac{(A-B) \times 1000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (mL)}}$$

$$A = \text{น้ำหนักของกระดาษกรองและสารแขวนลอย (mg)}$$

$$B = \text{น้ำหนักของกระดาษกรอง (mg)}$$

$$\begin{aligned} \text{ตะกอนหนัก} &= \text{ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด(TSS)} - \text{ของแข็งแขวนลอยไม่ตกตะกอน(SS)} \\ &= A - B \end{aligned}$$

ก.4.2 ดัชนีปริมาตรตะกอน (Sludge volume index, SVI)

SVI 45 หมายถึง ปริมาตรสารแขวนลอยหนัก 1 กรัมที่ตกตะกอนเพื่อตั้งทิ้งไว้ 30 นาที มีหน่วยเป็น mg/L ใช้ในการติดตามตรวจสอบลักษณะการตกตะกอนทั้งในระบบบำบัดน้ำใช้และระบบบำบัดน้ำเสีย รวมไปถึงสิ่งมีชีวิตที่แขวนลอยในน้ำ

วิธีการวิเคราะห์

- เก็บน้ำตัวอย่างเทลงในกรวยอิมฮอฟฟ์ขนาด 1 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ 45 นาที (SV_{45}) อ่านค่าสเกลในหน่วย mL
- นำน้ำตัวอย่าง 50 mL กรองผ่านกระดาษกรองเพื่อหาค่า MLSS หรือตะกอนแขวนลอยทั้งหมด

คำนวณ

$$\text{ดัชนีปริมาตรตะกอน (mL/g)} = \frac{SV_{45} \text{ (mL/L)} \times 1000}{\text{MLSS (mg/L)}}$$

(SVI 45)

ก.5 การวิเคราะห์หาร้อยละโครเมียมในตะกอนด้วยวิธีการย่อยตะกอนด้วยกรด (Acid Digestion)

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่เป็นองค์ประกอบและมีปริมาณน้อยในตะกอน ด้วยการย่อยสลายโดยทำปฏิกิริยากับกรดและให้ความร้อน เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ในตัวอย่าง ซึ่งจะต้องมีวิธีการเตรียมสารละลายตัวอย่างที่เหมาะสมก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วย AAS (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)

สารเคมี

1. สารละลายกรดผสม HNO_3 : HClO_4 (อัตรา 1 : 2)
ผสม 68 % HNO_3 กับ 70 % HClO_4 ในอัตราส่วน 1 : 2 โดยปริมาตร

วิธีการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างตะกอนโครเมียมที่อบแห้งแล้วประมาณ 0.1 g ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม
- 4 ตำแหน่ง นำใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 mL
2. เติมสารละลายกรดผสม HNO_3 : HClO_4 (อัตรา 1 : 2) 20 mL
3. นำกรวยกรองมาวางบนขวดรูปชมพู่
4. ให้ความร้อนบนเตาให้ความร้อน

หมายเหตุ : สังเกตควันที่อยู่ในขวดรูปชมพู่ เมื่อเริ่มการย่อยจะมีควันสีน้ำตาลลอยอยู่ภายในขวด และเมื่อการย่อยเสร็จสิ้น จะเกิดควันสีขาวลอยอยู่ภายในขวดเหนือสารละลาย

5. ใช้น้ำกลั่นล้างล้างคอขวดรูปชมพู่และรอบกรวยกรอง
6. รอนสารละลายเย็น กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 กับชุดกรองลดความดัน นำสารละลายที่ได้จากการกรองใส่ขวดปรับปริมาตรขนาด 100 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
7. นำสารละลายไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครเมียมทั้งหมดด้วยเครื่อง AAS

คำนวณ

$$\text{ร้อยละโครเมียมในตะกอน} = \frac{[\text{Cr}] \times V}{w \times 10^6} \times 100$$

[Cr] = ความเข้มข้นโครเมียมทั้งหมดของตะกอน (mg/L)

V = ปริมาตรสุดท้ายหลังการย่อย (mL)

w = น้ำหนักของตัวอย่างตะกอนที่ใช้อย่าง (g)

ก.6 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุและองค์ประกอบในตะกอน

การวิเคราะห์การปริมาณธาตุและองค์ประกอบในตะกอนที่ได้จากการเดินระบบ EC โดยการ
ใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF)

สารเคมี

1. Boric Acid (H_3BO_3)

วิธีการเตรียมสารตัวอย่าง

1. ชั่งตะกอนให้มีน้ำหนัก 0.5XXX g และกรดบอริก 4.5XXX g
2. เทสารลงในพิมพ์บด ใช้ลูกเหล็กเกลี่ยสารให้เข้ากัน แล้วนำพิมพ์บดเข้าเครื่องบด
3. เทสารที่บดจนมีลักษณะเป็นผงละเอียด ลงในเบ้าสำหรับอัดสารตัวอย่าง
4. นำเข้าเครื่องอัดไฮดรอลิก จะได้เม็ดสารสำหรับการนำส่งไปวิเคราะห์ XRF

ภาคผนวก ข
ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาระยะเวลาเดินระบบต่างกันในช่วงควบคุม

การทดลองครั้งที่	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)	
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
1	30	422.50	438.20	4.28	3.90	27.7	27.2
2	30	428.20	434.60	4.39	3.96	29.9	29.5
3	30	434.50	440.30	4.02	4.02	30.5	30.7
เฉลี่ย		428.40	437.70	4.23	3.96	29.4	29.1
SD		6.00	2.88	0.19	0.06	1.47	1.78
1	60	434.17	431.70	4.41	4.00	28.1	27.6
2	60	441.20	429.20	4.30	4.19	29.2	29.0
3	60	444.10	435.10	4.07	3.77	30.2	30.6
เฉลี่ย		439.82	432.00	4.26	3.99	29.2	29.1
SD		5.11	2.96	0.17	0.21	1.05	1.50

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

การทดลองครั้งที่	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)	
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
1	90	441.20	426.70	4.04	3.61	28.9	28.4
2	90	445.70	435.90	4.23	3.99	28.0	28.3
3	90	454.30	430.20	4.39	3.74	28.2	28.5
เฉลี่ย		447.07	430.93	4.22	3.78	28.4	28.4
SD		6.66	4.64	0.18	0.19	0.47	0.10
1	120	427.20	442.60	4.18	3.59	29.0	28.6
2	120	426.90	439.00	4.50	3.66	29.2	29.0
3	120	430.10	436.49	4.36	3.57	30.6	29.8
เฉลี่ย		428.07	439.36	4.35	3.61	29.6	29.1
SD		1.77	3.07	0.16	0.05	0.87	0.61
1	150	434.40	449.70	4.05	4.05	28.1	26.9
2	150	426.90	439.40	4.21	4.02	29.0	28.7
3	150	428.30	437.90	4.17	3.99	30.4	30.0
เฉลี่ย		429.87	442.33	4.14	4.02	29.2	28.5
SD		3.99	6.42	0.08	0.03	1.16	1.56

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของระยะเวลาเดินระบบเป็นชุดทดลอง (ส่วนของสารละลาย)

การทดลอง ครั้งที่	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)		ร้อยละการกำจัดโครเมียม
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	
1	30	422.50	372.30	4.05	3.6	28.9	29.6	11.88
2	30	428.20	376.60	4.58	3.72	30.1	30.9	12.05
3	30	434.50	384.60	4.07	3.67	28.7	29.8	11.48
เฉลี่ย		428.40	377.83	4.23	3.66	29.2	30.1	11.80
SD		6.00	6.24	0.30	0.06	0.76	0.70	0.29
1	60	434.17	230.3	4.39	4.23	29.0	30.2	46.96
2	60	441.20	234.00	4.58	4.71	28.9	30.0	46.96
3	60	444.10	237.70	4.36	4.49	27.0	27.1	46.48
เฉลี่ย		439.82	234.00	4.44	4.48	28.3	29.1	46.80
SD		5.11	3.70	0.12	0.24	1.13	1.73	0.28
1	90	441.20	207.10	4.40	4.93	29.6	31.6	53.06
2	90	445.70	212.20	4.39	4.83	28.0	30.2	52.39
3	90	454.30	215.70	4.48	4.72	28.0	28.6	52.52
เฉลี่ย		447.07	211.67	4.42	4.83	28.5	30.1	52.65
SD		6.66	4.32	0.05	0.11	0.92	1.50	0.36

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

การทดลอง ครั้งที่	เวลา (นาที)	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH.		อุณหภูมิ (°C)		ร้อยละการกำจัดโครเมียม
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	
1	120	427.20	173.30	4.2	5.39	28.8	30.6	59.43
2	120	426.90	162.70	4.2	5.58	28.9	30.8	61.89
3	120	430.10	179.60	4.5	5.84	29.2	30.7	58.24
เฉลี่ย		428.07	171.87	4.30	5.60	29.0	30.7	59.85
SD		1.77	8.54	0.17	0.23	0.21	0.10	1.86
1	150	434.40	216.70	4.05	4.99	28.1	28.2	50.12
2	150	426.90	207.40	4.21	5.03	30.4	30.8	51.42
3	150	428.30	211.30	4.17	5.00	29.2	31.0	50.67
เฉลี่ย		429.87	211.80	4.14	5.01	29.2	30.0	50.73
SD		3.99	4.67	0.08	0.02	1.15	1.56	0.65

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของระยะเวลาในชุดทดลอง (ส่วนของแข็ง)

ครั้งที่	เวลา (นาที)	ปริมาตร ตะกอน (mL/250mL)	SV ₄₅ (mL/L)	SVI ₄₅ (mL/g)	ปริมาณของแข็ง (mg/L)			ผลการวิเคราะห์ตะกอน			น้ำหนัก อลูมิเนียมที่ สูญเสีย (g)
					TSS	SS	ตะกอนหนัก	น้ำหนัก ตะกอนที่ ย่อย(g)	เข้มข้น โครเมียม (mg/L)	ร้อยละ โครเมียม	
1	30	0.6	2.4	25.0	96	76	20	0.1006	10.23	1.02	0.0567
2	30	0.2	0.8	8.1	99	84	15	0.1001	8.8	0.88	0.0535
3	30	0.4	1.6	17.6	91	74	16	0.1012	9.97	0.99	0.0539
เฉลี่ย		0.4	1.6	16.8	95.33	78	17	0.1006	9.67	0.96	0.0547
SD		0.20	0.80	8.48	4.04	5.29	2.65	0.0006	0.76	0.07	0.0017
1	60	0.85	3.4	10.2	332	48	284	0.1038	60.46	5.82	0.1036
2	60	0.9	3.6	10.3	350	52	298	0.1005	63.42	6.31	0.1052
3	60	0.65	2.6	7.5	347	71	276	0.1017	60.17	5.92	0.1040
เฉลี่ย		0.8	3.2	9.3	343	57	286	0.1020	61.35	6.01	0.1043
SD		0.13	0.53	1.60	9.64	12.29	11.14	0.0017	1.80	0.26	0.0008

ครั้งที่	เวลา (นาที)	ปริมาตรตะกอน (mL/250mL)	SV ₄₅ (mL/L)	SVI 45 (mL/g)	ปริมาณของแข็ง (mg/L)			ผลการวิเคราะห์ตะกอน			น้ำหนัก อลูมิเนียมที่ สูญเสีย (g)
					TSS	SS	ตะกอนหนัก	น้ำหนัก ตะกอนที่ ย่อย (g)	ความเข้มข้น โครเมียม (mg/L)	ร้อยละ โครเมียม	
1	90	1	4.0	4.1	978	216	762	0.1075	124.25	11.56	0.1339
2	90	0.9	3.6	3.7	984	236	748	0.1081	121.96	11.28	0.1306
3	90	0.8	3.2	3.3	976	242	734	0.1011	117.82	11.65	0.1299
เฉลี่ย		0.9	3.6	3.7	979	231.33	748	0.1056	121.34	11.49	0.1315
SD		0.10	0.40	0.41	4.16	13.61	14.00	0.0039	3.26	0.19	0.0021
1	120	2.5	10.0	9.2	1086	46	1040	0.1096	200.54	18.30	0.1866
2	120	2.6	10.4	8.8	1176	38	1138	0.1095	203.12	18.55	0.1874
3	120	2.8	11.2	8.4	1335	43	1292	0.1007	212.95	21.15	0.1710
เฉลี่ย		2.63	10.53	8.8	1199	42.33	1156.67	0.1066	205.54	19.28	0.1817
SD		0.15	0.61	0.41	126.08	4.04	127.03	0.0051	6.55	1.58	0.0092
1	150	1	4.0	4.8	832	92	740	0.1017	171.92	16.90	0.1392
2	150	1.5	6.0	6.8	886	88	798	0.1109	177.05	15.96	0.1409
3	150	0.9	3.6	4.3	830	93	737	0.1004	167.58	16.69	0.1387
เฉลี่ย		1.13	4.53	5.3	849	91	758.33	0.1043	172.18	16.50	0.1396
SD		0.32	1.29	1.29	31.77	2.65	34.39	0.0057	4.74	0.49	0.0012

ตารางที่ ๒.4 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นในชุดควบคุม

การทดลองที่	pH เริ่มต้น	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)	
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
1	ไม่มีการปรับpH	440.20	451.70	2.66	2.69	28.1	29.2
2	ไม่มีการปรับpH	442.80	443.07	2.84	2.86	29.8	30.1
3	ไม่มีการปรับpH	444.97	446.64	2.95	2.97	28.2	29
เฉลี่ย		442.66	447.14	2.82	2.84	28.7	29.43
SD		2.39	4.34	0.15	0.14	0.95	0.59
1	3	425.60	433.8	3.3	3.31	29.3	27.9
2	3	428.80	428.2	3.24	3.26	29.8	28.1
3	3	427.60	428.8	3.19	3.26	30.3	28.1
เฉลี่ย		427.33	430.27	3.24	3.28	29.80	28.03
SD ₃		1.62	3.07	0.06	0.03	0.50	0.12
1	4	407.20	414.80	4.18	3.6	29.0	28.6
2	4	410.10	420.60	4.11	4.11	27.9	26.5
3	4	406.50	409.80	4.18	3.59	29.0	29.5
เฉลี่ย		407.93	415.07	4.16	3.77	28.6	28.2
SD		1.91	5.40	0.04	0.30	0.64	1.54

ตารางที่ ข.4 (ต่อ)

การทดลองที่	pH เริ่มต้น	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)	
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
1	5	400.60	428.20	5.28	4.94	30.1	30.5
2	5	391.10	432.80	5.31	4.58	29.3	29.3
3	5	396.70	425.10	5.11	5.34	30.7	28.3
เฉลี่ย		396.13	428.70	5.23	4.95	30.0	29.4
SD		4.78	3.87	0.11	0.38	0.70	1.10
1	6	352.70	415.92	6.00	6.01	28.9	28.1
2	6	347.30	417.31	6.13	5.62	30.0	29.8
3	6	343.70	411.22	6.08	5.79	30.7	31.1
เฉลี่ย		347.90	414.82	6.07	5.81	29.9	29.7
SD		4.53	3.19	0.07	0.20	0.91	1.50
1	7	25.80	28.40	7.08	6.66	29.8	29.1
2	7	29.30	31.00	7.11	6.46	28.9	31.9
3	7	31.30	32.29	7.09	6.43	28.1	29.7
เฉลี่ย		28.80	30.56	7.09	6.52	28.9	30.2
SD		2.78	1.98	0.02	0.13	0.85	1.47

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นในชุดทดลอง (ส่วนของสารละลาย)

การทดลองที่	pH เริ่มต้น	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)		ร้อยละการกำจัดโครเมียม
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	
1	3	425.60	285.20	3.3	3.96	29.3	29.5	32.99
2	3	428.80	304.10	3.24	3.72	29.8	29.9	29.08
3	3	427.60	292.50	3.19	3.93	30.3	30.4	31.59
เฉลี่ย		427.33	293.93	3.24	3.87	29.8	29.9	31.22
SD		1.62	9.53	0.06	0.13	0.50	0.45	1.98
1	4	407.20	181.40	4.18	5.98	29.0	30.9	55.45
2	4	410.10	186.60	4.11	5.76	27.9	29.2	54.50
3	4	406.50	180.80	4.18	5.84	29.0	31.1	55.52
เฉลี่ย		407.93	182.93	4.16	5.86	28.6	30.4	55.16
SD		1.91	3.19	0.04	0.11	0.64	1.04	0.57

ตารางที่ ข.5 (ต่อ)

การทดลองครั้งที่	pH เริ่มต้น	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)		ร้อยละการกำจัดโครเมียม
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	
1	5	400.60	60.30	5.28	7.89	30.1	30.5	84.95
2	5	391.10	52.50	5.31	7.97	29.3	29.9	86.58
3	5	396.70	59.20	5.11	7.59	30.7	30.9	85.08
เฉลี่ย		396.13	57.33	5.23	7.82	30.0	30.4	85.53
SD		4.78	4.22	0.11	0.20	0.70	0.50	0.91
1	6	352.70	17.60	6.00	11.29	28.9	29.9	95.01
2	6	347.30	10.80	6.13	11.30	30.0	30.1	96.89
3	6	343.70	10.40	6.08	11.21	30.7	30.5	96.97
เฉลี่ย		347.90	12.93	6.07	11.27	29.9	30.2	96.28
SD		4.53	4.05	0.07	0.05	0.91	0.31	1.11

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของพีเอชเริ่มต้นในเขตทดลอง (ส่วนของแข็ง)

ครั้งที่	pH	ปริมาตรตะกอน (mL/250mL)	SV ₄₅ (mL/L)	SVI 45 (mL/g)	ปริมาณของแข็ง (mg/L)			ผลการวิเคราะห์ตะกอน			น้ำหนัก อลูมิเนียมที่ สูญเสีย (g)
					TSS	SS	ตะกอนหนัก	น้ำหนัก ตะกอนที่ ย่อย (g)	ความเข้มข้น โครเมียม (mg/L)	ร้อยละ โครเมียม	
1	3	0.3	1.20	4.00	300	188	112.00	0.1006	131.75	13.10	0.0577
2	3	0.1	0.40	1.30	307	205	102.00	0.1105	121.42	10.99	0.0541
3	3	0.2	0.80	2.68	298	192	106.00	0.1019	124.25	12.19	0.0559
เฉลี่ย		0.20	0.80	2.65	301.67	195	106.67	0.1043	125.81	12.06	0.0559
SD		0.10	0.40	1.35	4.73	8.89	5.03	0.0054	5.34	1.06	0.0018
1	4	2.5	10.00	8.50	1176	38	1138.00	0.1059	205.18	19.37	0.1711
2	4	2.7	10.80	8.07	1338	40	1298.00	0.1020	218.27	21.40	0.1896
3	4	2.4	9.60	8.61	1115	45	1070.00	0.1016	203.07	19.99	0.1703
เฉลี่ย		2.53	10.13	8.38	1209.67	41	1168.67	0.1032	208.84	20.24	0.1770
SD		0.15	0.61	0.28	115.25	3.61	117.05	0.0024	8.23	1.04	0.0109

ตารางที่ ข.6 (ต่อ)

ครั้งที่	pH	ปริมาตรตะกอน (mL/250mL)	SV ₄₅ (mL/L)	SVI 45 (mL/g)	ปริมาณของแข็ง (mg/L)			ผลการวิเคราะห์ตะกอน			น้ำหนัก อดุมเนียมที่ สูญเสีย (g)
					TSS	SS	ตะกอนหนัก	น้ำหนัก ตะกอนที่ ย่อย(g)	ความเข้มข้น โครเมียม (mg/L)	ร้อยละ โครเมียม	
1	5	12	48.00	22.58	2126	24	2102.00	0.1062	258.95	24.38	0.3236
2	5	15	60.00	22.79	2633	31	2602.00	0.1005	273.75	27.24	0.3287
3	5	13	52.00	23.65	2199	29	2170.00	0.1059	279.32	26.38	0.3227
เฉลี่ย		13.33	53.33	23.00	2319.33	28	2291.33	0.1042	270.67	25.98	0.3250
SD		1.53	6.11	0.57	274.08	3.61	271.19	0.0032	10.53	1.46	0.0032
1	6	44	176.00	44.07	3994	13	6981.00	0.1087	367.19	33.78	0.3509
2	6	48	192.00	47.57	4036	4	7032.00	0.1103	368.51	33.41	0.3530
3	6	42	168.00	41.62	4037	9	7028.00	0.1034	354.32	34.27	0.3525
เฉลี่ย		44.67	178.67	44.42	4022.33	8.67	7013.67	0.1075	363.34	33.81	0.3521
SD		3.06	12.22	2.99	24.54	4.51	28.36	0.0036	7.84	0.43	0.0011

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในชุดควบคุม

การทดลองครั้งที่	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)	
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
1	5	341.63	412.94	6.00	6.01	28.9	28.1
2	5	347.42	392.82	6.13	5.62	30.0	29.8
3	5	344.89	402.59	6.08	5.79	31.1	30.5
เฉลี่ย		344.65	402.78	6.07	5.81	30.0	29.5
SD		2.90	10.06	0.07	0.02	1.10	1.23
1	10	347.05	425.49	6.00	6.10	28.9	28.1
2	10	342.56	409.90	6.10	5.91	28.7	28.2
3	10	352.07	432.64	6.12	5.68	30.2	30.5
เฉลี่ย		347.23	422.68	6.07	5.90	29.3	28.9
SD		4.76	11.63	0.06	0.21	0.81	1.36
1	15	335.71	418.76	6.00	5.87	28.5	28.6
2	15	339.43	402.40	6.00	5.78	29.9	31.9
3	15	343.68	423.96	6.04	5.80	29.5	29.7
เฉลี่ย		339.61	415.04	6.01	5.82	29.3	30.1
SD		3.99	11.25	0.02	0.05	0.72	1.68

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในชุดทดลอง (ส่วนของสารละลาย)

การทดลองครั้งที่	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	ความเข้มข้น (mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)		ร้อยละการกำจัดโครเมียม
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	
1	5	341.63	12.37	6.13	10.60	30.0	30.2	96.38
2	5	347.42	11.62	6.08	10.52	30.7	30.9	96.66
3	5	344.89	10.87	6.01	10.57	30.8	31.0	96.85
เฉลี่ย		344.65	11.62	6.07	10.56	30.5	30.7	96.63
SD		2.90	0.75	0.06	0.04	0.44	0.44	0.24
1	10	347.05	11.30	6.00	11.28	28.9	29.9	96.74
2	10	342.56	14.13	6.10	11.10	28.7	29.8	95.88
3	10	352.07	14.68	6.06	11.04	29.2	31.2	95.83
เฉลี่ย		347.23	13.37	6.05	11.14	28.9	30.3	96.15
SD		4.76	1.81	0.05	0.12	0.25	0.78	0.52
1	15	335.71	14.37	6.00	11.31	28.5	31.2	95.72
2	15	339.43	15.62	6.00	11.37	29.9	31.4	95.40
3	15	343.68	17.18	6.03	11.29	30.1	31.9	95.00
เฉลี่ย		339.61	15.72	6.01	11.32	29.5	31.5	95.37
SD		3.99	1.41	0.02	0.04	0.87	0.36	0.36

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในชุดทดลอง (ส่วนของแข็ง)

ครั้งที่	ความต่างศักย์ (V)	ปริมาตรตะกอน mL/250mL	SV ₄₅ (mL/L)	SVI ₄₅ (mL/g)	ปริมาณของแข็ง (mg/L)			ผลการวิเคราะห์ตะกอน			น้ำหนักอคูมิเนียมที่สูญเสีย (g)
					TSS	SS	ตะกอนหนัก	น้ำหนักตะกอนที่ลอย	ความเข้มข้นโครเมียม	ร้อยละโครเมียม	
1	5	31	124.00	28.08	4416	34	4382.00	0.1129	386.31	34.22	0.1280
2	5	35	140.00	30.19	4638	42	4596.00	0.1023	385.35	37.67	0.1526
3	5	39	156.00	29.16	5350	27	5323.00	0.1072	396.57	36.99	0.1549
เฉลี่ย		35	140.00	29.16	4801.33	34.33	4767.00	0.1075	389.41	36.24	0.1452
SD		4.00	16.00	1.05	487.95	7.51	493.26	0.0053	6.22	1.83	0.0149
1	10	44	176.00	24.29	7245	213	7032.00	0.1003	373.67	37.26	0.3590
2	10	41	164.00	21.56	7606	218	7388.00	0.1104	356.12	32.26	0.3027
3	10	48	192.00	26.09	7360	202	7158.00	0.1035	344.62	33.30	0.3009
เฉลี่ย		44.33	177.33	23.95	7403.67	211	7192.67	0.1047	358.14	34.20	0.3209
SD		3.51	14.05	2.28	184.42	8.19	180.51	0.0052	14.63	2.64	0.0330
1	15	37	148.00	23.96	6178	388	5790.00	0.1058	325.67	30.78	0.3261
2	15	50	200.00	27.15	7366	302	7064.00	0.1012	316.93	31.32	0.4020
3	15	40	160.00	21.85	7321	309	7012.00	0.1169	320.82	27.44	0.3591
เฉลี่ย		42.3	169.33	24.35	6955	333	6622.00	0.1080	321.14	29.74	0.3624
SD		6.81	27.23	2.67	673.28	47.76	721.00	0.0081	4.38	2.10	0.0381

ตารางที่ ข.10 คุณลักษณะของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ไอดีในชุดควบคุม

การทดลอง ครั้งที่	ความเข้มข้นโครเมียม ทั้งหมด (mg/L)		ความเข้มข้นเหล็ก ทั้งหมด (mg/L)		ความเข้มข้นโครเมียม เฮกซะวาเลนท์ (mg/L)	pH		อุณหภูมิ (°C)		ร้อยละการกำจัด ตัวกระบวนกร ตกตะกอน	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	โครเมียม	เหล็ก
1	332.97	357.93	77.54	76.39	60.81	6.04	4.71	30.1	29.3	16.06	64.74
2	327.32	342.72	75.65	74.61	66.46	6.06	5.66	29.7	28.0	17.49	65.60
3	326.49	347.29	86.93	85.61	53.91	6.02	5.69	27.3	28.1	17.69	60.47
เฉลี่ย	328.93	349.31	80.04	78.87	60.39	6.04	5.35	29.0	28.5	17.08	63.60
SD	3.53	7.80	6.04	5.90	6.29	0.02	0.56	1.51	0.72	0.89	2.75

ตารางที่ ข.11 คุณลักษณะของน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีโอไลท์ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ EC

การทดลอง ครั้งที่	ความเข้มข้นโครเมียม ทั้งหมด (mg/L)		ความเข้มข้นเหล็ก ทั้งหมด (mg/L)		ความเข้มข้นโครเมียม เฮกซะวาเลนท์(mg/L)		pH		อุณหภูมิ (°C)		ร้อยละการกำจัด ด้วยกระบวนการEC	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	โครเมียม	เหล็ก
1	332.97	76.35	77.54	58.65	60.81	72.37	6.04	6.19	30.1	29.7	77.07	24.36
2	327.32	75.83	75.65	55.83	66.46	72.43	6.06	6.16	29.7	29.1	76.83	26.20
3	326.49	69.77	86.93	65.2	53.91	63.72	6.02	6.17	27.3	28.0	78.63	25.00
เฉลี่ย	328.93	73.98	80.04	59.89	60.39	68.07	6.04	6.17	29.0	28.9	77.51	25.17
SD	3.53	3.66	6.04	4.81	6.29	5.01	0.02	0.02	1.51	0.86	0.98	0.93

ตารางที่ ข.12 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่ได้หลังการบำบัดน้ำเสียจากการวิเคราะห์ซีไอดีระบบ EC

ครั้งที่	ปริมาตร ตะกอน (mL/250mL)	SV ₄₅ (mL/L)	SVI 45 (mL/g)	ปริมาณของแข็ง (mg/L)			ผลการวิเคราะห์ตะกอน				น้ำหนัก อดุมเนียม ที่สูญเสีย (g)	
				TSS	SS	ตะกอน หนัก	น้ำหนัก ตะกอนที่ ย่อย(g)	ความเข้มข้น(mg/L)	ร้อยละในตะกอน			
								โครเมียม	เหล็ก	โครเมียม	เหล็ก	
1	78	312.00	145.52	2144.00	32.00	2112.00	0.1073	322.50	101.58	30.06	9.47	0.0068
2	80	320.00	116.36	2750.00	568.00	2182.00	0.1035	338.88	102.88	32.74	9.94	0.0054
3	90	360.00	112.01	3214.00	300.00	2914.00	0.1062	360.00	116.14	33.90	10.94	0.0095
เฉลี่ย	82.67	330.67	125.32	2692.67	300.00	2402.67	0.1057	340.46	106.87	32.22	10.11	0.0072
SD	6.43	25.72	19.41	536.57	268.00	444.21	0.0020	18.80	8.06	1.97	0.75	0.0021