

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์
โดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน

TREATMENT OF CHROME BATH TANNERY WASTEWATER BY
ELECTROCOAGULATION AT CURRENT OF 2 AND 3 AMPERES



T117316



นางสาววลัญชา

พรายมุด

นางสาวสมฤทัย

ทองดี

นางสาวอลิสตา

ศิริสุข

สาขา.....
เลขทะเบียน..... 117316
วันเดือนปี..... 20 ก.ค. 2554

๖..... 12338515
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TREATMENT OF CHROME BATH TANNERY WASTEWATER BY
ELECTROCOAGULATION AT CURRENTS OF 2 AND 3 AMPERES**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENT RESOURCE CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2010**


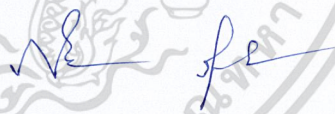

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ โดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน
 Treatment of chrome bath tannery wastewater by electrocoagulation at current 2 and 3 ampere

ชื่อนักศึกษา นางสาวลัญญา พรายมูล 50050498
 นางสาวสมฤทัย ทองดี 50050508
 นางสาวอลิสสา ศิริสุข 50050522

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
 อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.พรชัยวรรณ ศรีนาค

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2553

| คณะกรรมการสอบ | ลายมือชื่อ |
|--------------------------|--|
| ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ |  |
| ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร |  |
| ผศ.พรชัยวรรณ ศรีนาค |  |

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--------------------|---|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ โดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาววลัญชา พรายมูล นางสาวสมฤทัย ทองดี นางสาวอลิสสา ศิริสุข |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต |
| สาขาวิชา | เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | ผศ.พรพรพรรณ ศรีนิภา |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดโครเมียมและสารอินทรีย์คาร์บอนออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมโดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน โดยใช้ลูมิเนียม 4 แผ่นเป็นอิเล็กโทรดในระบบถังปั่นกวนแบบแบทช์ ขนาดของอิเล็กโทรดแต่ละแผ่นมีขนาด 145 มม. × 87 มม. × 2 มม. โดยระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากับ 10 มม. ทำการต่อแบบขนานกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง จะทำการศึกษาผลของค่าพีเอชต่างๆ คือ 4, 5, 6, 7 และ 8 ที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ โดยมีระยะเวลาการบำบัด 0 ถึง 90 นาที จากการศึกษาพบว่า ที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ให้ผลการบำบัดดีที่สุดในการบำบัดโครเมียมและสารอินทรีย์คาร์บอน ที่ค่าพีเอชดังกล่าว ณ เวลาการบำบัด 90 นาทีนั้น สำหรับกระแส 2 แอมแปร์นั้นสามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมจาก 2781.83 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 491.83 มิลลิกรัมต่อลิตรหรือคิดเป็น 82.32% การกำจัด และที่กระแส 3 แอมแปร์ลดความเข้มข้นของโครเมียมจาก 2397.43 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 338.00 mg/L หรือคิดเป็น 85.90% การกำจัด ในการลดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียคิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 20.99% และ 0.69% ที่กระแส 2 และ 3 แอมแปร์ตามลำดับ

คำสำคัญ : อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน น้ำเสียจากอ่างฟอกโครม โครเมียม (III) สารอินทรีย์คาร์บอน

| | |
|----------------------|--|
| Title | Treatment of chrome bath tannery wastewater by electrocoagulation at currents of 2 and 3 amperes |
| Student | Miss Waluncha Prymoon Miss Somrutai Thongdee Miss Alisa Sirisuk |
| Degree | Bachelor of Science |
| Academic Year | 2010 |
| Advisor | Asst. Prof. Passawan Srinak |

ABSTRACT

This special project studied treatment of Chromium and Total Organic Carbon from chrome bath tannery wastewater by electrocoagulation with four aluminum plate electrode in a batch stirred reactor. Each plate size is 145 mm. × 87 mm. × 2 mm., distance between plate is 10 mm. and connect electrode parallel to DC power supply. Effect of various initial pH (4, 5, 6, 7 and 8), current (2 and 3 amperes) and treatment time (0 – 90 minute) were studied. At initial pH 6 gave the best result for treating chromium and total organic carbon. This pH and treatment time of 90 minute could reduce chromium from 2781.83 mg/L to 491.83 mg/L or 82.32% removed at current 2 ampere and from 2397.43 mg/L to 338.00 mg/L or 85.90% removal at current 3 ampere; and reduce total organic carbon 20.99% and 0.70% removal at current 2 and 3 ampere, respectively

Keyword: Electrocoagulation, Chrome bath Tannery wastewater, Chromium (III), Total Organic Carbon

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้จะสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีไม่ได้เลย หากขาดความช่วยเหลือและคำแนะนำจากบุคคลหลายๆท่าน คณะผู้จัดทำโครงการจึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.พรชวรรณ ศรีนาค ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการดำเนินโครงการพิเศษนี้อย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ ดร.ภิเชก รุ่งโรจน์ชัยพร ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติมโครงการนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ นักวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่สาขาวิชาเคมีทุกๆฝ่ายที่เอื้อเฟื้อความสะดวกในเรื่องอุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนเครื่องมือต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือให้การดำเนินโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วง ซึ่งมีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

วัลัญชา พรายมูล
สมฤทัย ทองดี
อลิสรา ศิริสุข

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VII |
| สารบัญรูป | VIII |
| คำย่อและสัญลักษณ์ | IX |

| | |
|---|----|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | |
| 2.1 อุตสาหกรรมฟอกหนัง | 3 |
| 2.1.1 กระบวนการผลิตหนังฟอก | 3 |
| 2.1.2 เบสิกโครเมียม(III)ซัลเฟต กับการฟอกโครม | 6 |
| 2.1.3 องค์ประกอบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง | 6 |
| 2.1.4 สรุปลักษณะสมบัติน้ำเสียรวมจากอุตสาหกรรมฟอกหนังไทย | 6 |
| 2.2 กระบวนการรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation) | 7 |
| 2.2.1 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์ | 7 |
| 2.2.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี | 7 |
| 2.3 เทคนิคไฟฟ้าเคมีและการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 9 |
| 2.3.1 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) | 9 |
| 2.3.2 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation Process) | 10 |
| 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดโครเมียมไตรวาเลนซ์ | 13 |
| 2.4 อลูมิเนียม | 16 |
| 2.4.1 คุณสมบัติทางเคมีของอลูมิเนียม | 16 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.4.2 สมบัติการละลายของอลูมิเนียม | 16 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 18 |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย | |
| 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี | 21 |
| 3.1.1 อุปกรณ์ | 21 |
| 3.1.2 สารเคมี | 21 |
| 3.2 การเตรียมการทดลอง | 21 |
| 3.2.1 การเตรียมชุดการทดลอง | 21 |
| 3.2.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง | 22 |
| 3.3 การดำเนินการทดลอง | 22 |
| 3.3.1 การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียม ในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม | 22 |
| 3.3.2 การศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัด โครเมียมออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม | 23 |
| 3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ออกจาก น้ำเสียจากอ่างฟอกโครม | 23 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัย และอภิปรายผล | 24 |
| 4.1 การศึกษาผลการบำบัดโครเมียมออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม | |
| 4.1.1 การศึกษาผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียม ที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ | 24 |
| 4.1.2 การศึกษาผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช | 26 |
| 4.1.3 การศึกษาผลของพีเอชต่อการบำบัดโครเมียม | 27 |
| 4.2 การศึกษาผลของการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม | 28 |
| 4.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม | 30 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ | 32 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย | 32 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ | 33 |
| เอกสารอ้างอิง | 34 |
| ภาคผนวก ก เครื่องมือและการวิเคราะห์ | 36 |
| ภาคผนวก ข กราฟมาตรฐานโครเมียม และผลการวิเคราะห์ | 39 |
| ภาคผนวก ค การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม | 53 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **VI** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า | |
|----------|---|----|
| 2.1 | ลักษณะสมบัติน้ำเสี้ยวรวมจากอุตสาหกรรมฟอกหนังไทย | 6 |
| 2.2 | ผลของความเข้มข้นของ Cl^- ต่อความเข้มข้นของ Cr^{3+} ณ เวลาต่างกัน | 15 |
| 4.3 | ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ | 30 |
| 4.4 | ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ | 30 |
| ข-1 | ข้อมูลของสารละลายมาตรฐาน โครเมียม | 40 |
| ข-2 – 6 | การกำจัดโครเมียมในน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณ กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ | 41 |
| ข-7 – 12 | การกำจัดโครเมียมในน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณ กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ | 46 |
| ข – 12 | ผลการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (TOC) ออกจากน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ | 51 |
| ข – 13 | ผลการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (TOC) ออกจากน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ | 52 |
| ค-1 | ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ | 55 |
| ค-2 | ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ | 55 |
| ค-3 | ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ | 56 |
| ค-4 | ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสี้ยวจากอ่างฟอกโครม ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ | 56 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|--|------|
| 2.1 | กระบวนการฟอกหนัง | 5 |
| 2.2 | การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี | 8 |
| 2.3 | ลักษณะของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส | 9 |
| 2.4 | กลไกการเกิดตะกอน | 11 |
| 2.5 | ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด Cr^{3+} และเวลาในการบำบัด ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน | 14 |
| 2.6 | กราฟแสดงค่าการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ | 14 |
| 2.7 | กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด Cr^{3+} และเวลาในการบำบัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{3+} แตกต่างกัน | 15 |
| 2.8 | ความสามารถในการละลายของอลูมิเนียมที่ค่าพีเอชต่างๆ | 17 |
| 3.1 | การต่อวงจรแบบขนาน | 22 |
| 4.1 | ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโครเมียมกับเวลาเมื่อจ่ายกระแส 2 แอมแปร์ | 24 |
| 4.2 | ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโครเมียมกับเวลาเมื่อจ่ายกระแส 3 แอมแปร์ | 25 |
| 4.3 | ผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลง pH ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ | 26 |
| 4.4 | ผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลง pH ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ | 27 |
| 4.5 | ผลของ pH ต่อการบำบัดโครเมียม ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ | 27 |
| 4.6 | ผลของ pH ต่อการบำบัดโครเมียม ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ | 28 |
| 4.7 | ผลของค่า TOC ก่อนและหลังการบำบัดด้วย EC ที่กระแส 2 แอมแปร์ | 28 |
| 4.8 | ผลของค่า TOC ก่อนและหลังการบำบัดด้วย EC ที่กระแส 3 แอมแปร์ | 29 |
| 4.9 | ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ | 31 |
| 4.10 | ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ | 30 |
| ข-1 | กราฟมาตรฐานโครเมียม | 40 |

คำย่อและสัญลักษณ์

| คำย่อ | ความหมาย |
|------------------|-------------------------------------|
| A | แอมแปร์ |
| AAS | Atomic Absorption Spectrophotometer |
| Al ³⁺ | อลูมิเนียมไอออน |
| Cl ⁻ | คลอไรด์ไอออน |
| Cr ³⁺ | โครเมียมไตรวาเลนซ์ |
| EC | Electrocoagulation |
| mg/L | มิลลิกรัมต่อลิตร |
| mm | มิลลิเมตร |
| TOC | Total organic carbon |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

อุตสาหกรรมฟอกหนัง เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้สารเคมี และมีการนำโลหะหนักมาใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยในกระบวนการฟอกหนังจะประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญอยู่ 4 ขั้นตอน ได้แก่ การเตรียมหนังก่อนฟอก, ขั้นตอนการฟอก, ขั้นตอน wet finishing และขั้นตอน dry finishing ตามลำดับ โดยในขั้นตอนการฟอก จะใช้สารเบสโครมซัลเฟต (BCS) เป็นสารฟอก ซึ่งในการฟอกแต่ละครั้ง โครเมียมจะถูกตรึงโดยหนังประมาณ 70% ส่วนอีก 30% จะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับน้ำเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549) ทำให้น้ำเสียนี้อาจมีปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมสูงเกินมาตรฐานน้ำทิ้ง จึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง ที่นิยมนำมาใช้กันในปัจจุบัน เช่น การตกตะกอนด้วยสารละลายต่าง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549) วิธีโคแอกกูเลชันและฟลอคกูเลชัน แต่ในวิธีนี้จะก่อให้เกิดกากตะกอนที่มีความเข้มข้นของโครเมียมสูง ซึ่งจะมากกว่ามาตรฐานที่ยอมให้เอาไปทิ้งถมที่ หรือใช้ในการเกษตร จึงถือเป็นกากสารพิษ และต้องส่งไปกำจัดที่ศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรม ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดอีก จึงได้มีการศึกษาวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการลดสารมลพิษที่มีความเข้มข้นสูง เนื่องจากไม่มีการปนเปื้อนของสารเคมีในน้ำที่ผ่านกระบวนการ มีต้นทุนต่ำ และมีความเป็นไปได้ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ได้จริงในอุตสาหกรรม (สังกรม์และคณะ, 2548)

ค่าพีเอช มีผลต่อการเกิดตะกอน โครเมียมไฮดรอกไซด์ และการรวมตะกอนของโครเมียม ไตรวาเลนซ์กับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาการกำจัดโครเมียมจากน้ำเสียฟอกหนังโดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน (นวลพรรณและคณะ, 2551) และการศึกษากระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันสำหรับการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีกระแสสูง 12 และ 19 แอมแปร์ (วิชุดาและคณะ, 2552) พบว่าในกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันในระบบแบบท่อนั้น ค่าพีเอชของน้ำ มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่างเดินระบบ ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของโครเมียมไตรวาเลนซ์ (Cr^{3+}) ค่ากระแสไฟฟ้า ซึ่งอาจมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

โครงการพิเศษนี้จึงสนใจศึกษาผลของค่าพีเอชและผลของสารอินทรีย์ในน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดโดยใช้กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการเดินระบบแบบต่อเนื่อง (continuous) ซึ่งสามารถออกแบบให้ค่าพีเอชมีการเปลี่ยนแปลงเกือบคงที่หรือผันแปรในช่วงแคบได้ โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดและทำการต่อวงจรแบบขนาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอช และปริมาณกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมโดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน
2. เพื่อศึกษาผลของประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป Total organic carbon ออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการเตรียมชุดทดลองโดยใช้แผ่นอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ทำการต่อแบบขนานกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
2. น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนั้นคือน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง
3. ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพในการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม โดยพีเอชที่ทำการศึกษาได้แก่ 4, 5, 6, 7 และ 8
4. ทำการศึกษาผลของปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 และ 3 แอมแปร์
5. ทำการศึกษาผลการบำบัดสารอินทรีย์ในรูป Total organic carbon ในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังได้
2. สามารถลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังได้
3. สามารถนำวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน ไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังในระบบต่อเนื่องได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 อุตสาหกรรมฟอกหนัง

การฟอกหนัง คือ การเปลี่ยนสภาพหนังสัตว์ดิบซึ่งเน่าเปื่อยได้ ไปเป็นหนังสำเร็จ ซึ่งคงตัวกว่า ไม่เน่าเปื่อย มีความทนทานต่อสภาพอากาศและน้ำร้อน โดยปกติหนังสัตว์ดิบจะประกอบด้วยขน หนังกำพร้า หนังแท้ และพังศืด เฉพาะส่วนหนังแท้จะประกอบด้วยคอลลาเจน โปรตีนเป็นส่วนใหญ่ การรักษาสภาพหนังแท้ไม่ให้เน่าเปื่อยจะอาศัยสารเคมี ได้แก่ โครเมียม ฝาด หรือสารเคมีอื่น เข้าไปทำปฏิกิริยากับคอลลาเจน โปรตีนในหนัง โดยอาศัยน้ำ สารเคมี และกระบวนการทางกล ดังนั้น น้ำเสียจากการฟอกหนังจึงมีสารมลพิษปะปนอยู่สูง นอกจากนี้ยังมีกากของแข็งที่ออกมาด้วย ทั้งนี้ลักษณะของน้ำเสีย ปริมาณสารพิษต่างๆ รวมทั้งกากของเสีย จะแปรเปลี่ยนไปตามกระบวนการผลิตและแหล่งที่ทำการฟอกหนัง(กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2549)

2.1.1 กระบวนการผลิตหนังฟอก

กระบวนการผลิตหนังฟอกสำเร็จ (Finished Leather) ในอุตสาหกรรมฟอกหนังสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนใหญ่ๆ คือ การเตรียมหนังก่อนฟอก การฟอก และการตกแต่ง ดังรูปที่ 2.1 (สุรชัย, 2539 และ TDRI, 2540)

2.1.1.1 การเตรียมหนังก่อนฟอก (Beamhouse process)

เริ่มจากการล้าง (Washing) การคัดแยกและตัดแต่งหนังเค็ม (Sorting and Trimming) หรือเป็นการกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการ เช่น กีบเท้า ขน เศษหนัง จากนั้นจะนำหนังที่ได้มาล้างและแช่น้ำให้คืนตัว (Washing and Soaking) และทำการแช่น้ำปูน (Liming) กำจัดขนออกด้วยซัลไฟด์ ถากหนัง (Fleshing) ผ่าหนัง (Splitting) หนังเมื่อผ่าแยกชั้นแล้ว จะมี 2 ส่วน คือ ส่วนบน เรียกว่า หนัง Upper หรือ Grain ส่วนนี้จะนำไปผลิตเป็นหนังฟอก และส่วนล่าง เรียกว่าหนังส่วนล่าง หรือ Splits ส่วนนี้จะนำไปผลิตเป็นสินค้าทะเล่่นของสัตว์เลี้ยง (Dogchew) และหนังฟอกคุณภาพรอง ต่อจากนั้นจะนำหนังมาล้างน้ำปูน (Deliming) และบ่มหนัง (Bating) เพื่อให้หนังนุ่มและหดตัว

2.1.1.2 การฟอก (Tanning process)

การฟอกหนังเป็นการเปลี่ยนสภาพหนังดิบให้มีความทนทานต่อสภาพอากาศและน้ำร้อน ซึ่งการรักษาสภาพหนังดิบไม่ให้เน่าเปื่อยจะต้องใช้สารเคมีบางชนิด เช่น ฝาด โครเมียม หรือสารเคมีอื่นๆไปทำปฏิกิริยากับโปรตีนในหนัง กรรมวิธีการฟอกหนังที่ใช้กันอยู่มี 2 วิธี คือ

การฟอกโครม (Chrome Tanning) การฟอกประเภทนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นที่ต้องการของตลาด ใช้เวลาสั้น สารเคมีราคาถูก หนังที่ฟอกแล้วทนต่อความร้อนและความชื้นได้ดีกว่า

การฟอกโครมเป็นการฟอกที่ทำในถังหมุน ซึ่งจะใส่สารเคมีจำพวกโครม (Chrome) ลงไป สารนี้เป็นพวกเกลือของโครเมียม เช่น โครมิก (Chromic) เป็นตัวฟอก ซึ่งจะทำให้หนังมีสภาพเป็นไฟเบอร์ (Fiber) เมื่อนำไปตากแห้งแล้วจะแข็งมีสีเขียวการตรึงโครมให้อยู่กับหนังสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ดังนั้นระหว่างการฟอกโครมจึงต้องมีการเติมแมกนีเซียมออกไซด์ ลงไปที่ละน้อยอย่างช้าๆ เพื่อได้ค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 4.5 หนังที่ผ่านการฟอกโครมแล้วเรียกว่า หนังเขียว (Wet Blue)

การฟอกฝาด (Vegetable Tanning) การฟอกประเภทนี้จะนำสารสกัดประเภทแทนนินซึ่งสกัดได้จากเปลือกไม้พวกยูคาลิปตัส คว้าราโค และอื่นๆ มาเป็นตัวฟอก ทำได้ในถังไม้ป่นหรือบ่อคอนกรีตที่ต่อแบบอนุกรม (เรียงๆกันไป) ทั้งนี้ น้ำที่ใช้ฟอกแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก เพราะสารที่ใช้ฟอกนั้นเป็นสารธรรมชาติ ขั้นตอนต่อมาคือ การล้างหนัง (Rinsing) โดยการใช้กรดออกซาลิกล้างฝาดออกจากหนัง เพื่อล้างฝาดส่วนเกิน ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพหนังอย่างมาก จากนั้นหนังที่ได้จากทั้ง 2 วิธีการฟอก จะถูกนำไปรีดน้ำ เพื่อทำให้แห้ง และมีการเขียนผิวด้วยเครื่องตัดแต่งและคัดเลือกเพื่อเก็บไว้รอจำหน่ายหรือแปรรูปตามความต้องการของตลาดต่อไป

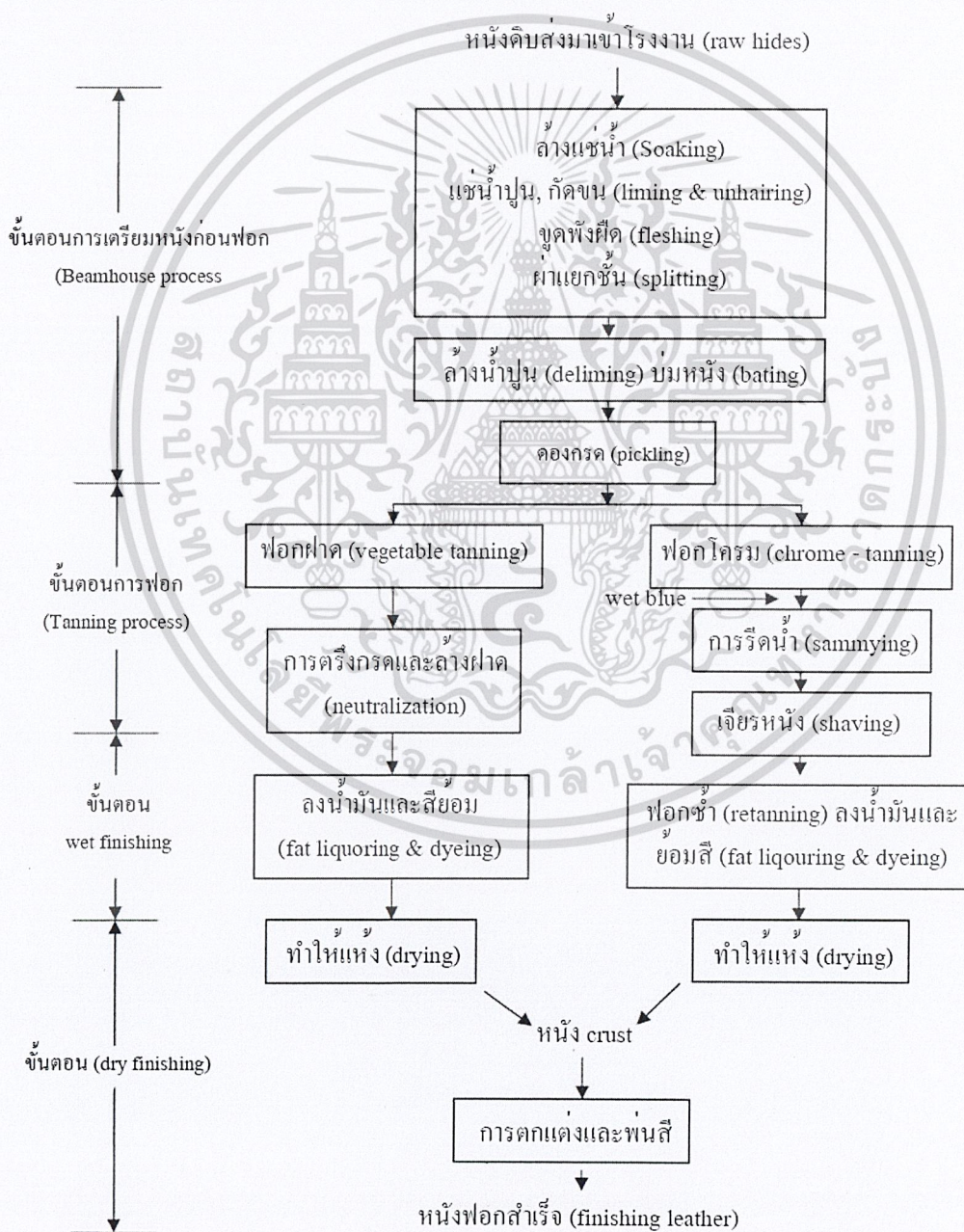
การฟอกโครมเป็นที่นิยมมากกว่าเพราะใช้เวลาน้อยกว่า สารเคมีมีราคาถูกกว่า และหนังที่ฟอกแล้วทนต่อความร้อนและความชื้นดีกว่า ซึ่งการดองกรดเป็นขั้นตอนที่จำเป็นต่อการฟอกทั้งสองวิธี เพราะมีความจำเป็นเพื่อปรับความเป็นกรดด่างให้เหมาะสมกับปฏิกิริยาการฟอกหนัง โดยสารเคมีที่ใช้คือ เกลือแกง กรดกำมะถัน และกรดฟอร์มิค ทั้งนี้ ระหว่างการฟอกอาจมีการเติมสารเคมีช่วยฟอกหรือสารช่วยฟอก ลงไประหว่างดองกรด เพื่อให้หนังจับโครเมียมได้ดีขึ้นและเพื่อลดปริมาณโครเมียมในน้ำลง

2.1.1.3 การตกแต่ง (Finishing process)

การตกแต่งนี้ แบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ การฟอกทับ (Retannage) การย้อมสี (Dyeing) และการใส่น้ำมัน (Fat Liquoring) การฟอกทับ (Retannage) เป็นการนำหนังเขียว (Wet Blue) ที่ได้จากการฟอกโครม (Chrome Tanning) มาฟอกทับเพื่อปรับปรุงคุณภาพหนังให้เหมาะสมกับความต้องการของตลาด สารที่ใช้ในการฟอกทับมีทั้งที่เป็นสารเคมีเช่น โครเมียม สารสกัดจากธรรมชาติ เช่น แทนนิน และสารสังเคราะห์ เช่น ซินแทน หลังจากนั้นจะนำหนังที่ได้จากการฟอกทับนี้ไปทำการย้อมสี (Dyeing) สำหรับการฟอกฝาด (Vegetable Tanning) จะไม่มีการฟอกทับ แต่จะใช้กรดฟอร์มิคปรับสภาพหนังก่อน แล้วจึงนำไปทำการย้อมสี (Dyeing) และตรึงสีให้ติดหนัง โดยมากมักใช้ไอน้ำและน้ำย้อมสีร้อน

การใส่น้ำมัน (Fat Liquoring) ให้แก่หนังที่ได้จากการฟอกทั้ง 2 วิธี จะเป็นการทำให้หนังมีความอ่อนนุ่ม อยู่ตัวโดยอาจทำพร้อมกับการฟอกทับ หรือการย้อมสี หรืออาจแยกทำต่างหากก็ได้ หนังที่ได้จะเรียกว่า หนังพื้น (Crust) ที่ได้จากการฟอกทั้ง 2 กรรมวิธี เมื่อเสร็จจากขั้นตอนการย้อมสีและใส่น้ำมันแล้ว จะต้องนำมาทำให้แห้ง โดยวิธีที่แตกต่างกันตามกรรมวิธีการฟอก คือ หนังที่ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการฟอกฝาดนั้นจะทำการรีดน้ำ (Sammying) รีดหนังหมาด (Setting Out) ตากแห้ง (Drying) รีดหนัง (Rolling) และขัดมัน (Grazing) ส่วนหนังที่ได้จากการฟอกโครมจะมีขั้นตอนมากกว่า ทั้งที่เหมือนและไม่เหมือนกับการฟอกฝาด ได้แก่ การรีดน้ำ(Sammying) รีดหนังหมาด(Settting Out) อบแห้ง (Vacuum or Paste Drying) ทำให้ชื้น (Reconditioning) ทำให้นึ่ม (Staking) ฝั่งให้แห้ง (Toggle Dry) ขัดผิว(Buffing) จากรายละเอียดของการฟอกทั้ง 2 วิธี จะนำหนังพื้น (Crust) ที่ได้มาทำการวัดขนาดหนัง (Measuring) ก่อนจะนำออกสู่ตลาดหรือผลิตเป็นหนังฟอกสำเร็จ (Finished Leather) โดยการตกแต่งพ่นสี (Spray coats) พิมพ์ลาย (Pad coats) และอื่นๆ เพื่อให้ตรงกับความต้องการของตลาด



รูป 2.1 กระบวนการฟอกหนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 เบสิกโครเมียม(III)ซัลเฟต กับการฟอกโครม (Westbrook และคณะ, 1964)

เบสิกโครเมียม(III)ซัลเฟต มีชื่อย่อ BSC มีสูตรทั่วไปคือ $\text{Cr(OH)SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน โดยมีโครเมียม(III)เป็นอะตอมกลาง และมีน้ำและหมู่ไฮดรอกซิลเป็นลิแกนด์ ส่วนหมู่ซัลเฟตอาจเป็นทั้งลิแกนด์และแคตไอออน (counter ion) สารฟอกโครม BSC แต่ละชนิด จะมีปริมาณขององค์ประกอบแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการผลิต และการเติมสารอื่นลงไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการฟอก สาร BCS นี้เป็นสารที่สำคัญมากในอุตสาหกรรมฟอกหนัง มีลักษณะเป็นผงหรือเกล็ด สีเขียวเข้ม ประกอบด้วย Cr_2O_3 ประมาณ 25% ละลายในน้ำได้ง่ายมาก นอกจากปริมาณขององค์ประกอบแล้ว สิ่งหนึ่งซึ่งสำคัญที่ผู้ผลิตต้องบอกคือ เปอร์เซ็นต์เบสิกซิติที่เป็นอัตราส่วนระหว่างจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่จับกับ 1 อะตอมของโครเมียมในสาร และจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล ในโครเมียมไฮดรอกไซด์ (Cr(OH)_3) ค่าเบสิกซิติมีผลต่อการจับกันระหว่างโลหะไอออน (Cr^{3+}) กับคอลลาเจนไฟเบอร์ที่อยู่ในหนัง โดยสารฟอกโครมที่มีเปอร์เซ็นต์เบสิกซิติสูง จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาระหว่างโลหะไอออนกับคอลลาเจนในหนังเกิดได้มากขึ้น

2.1.3 องค์ประกอบของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง

จากขั้นตอนต่างๆ ของอุตสาหกรรมฟอกหนัง ทำให้เกิดน้ำเสียซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะในขั้นตอนการฟอก (Tanning Process) เพราะทำให้มีโครเมียมเหลือในน้ำฟอกโครม ซึ่งโครเมียมที่เหลือในน้ำฟอกโครมและถูกทิ้งปนไปกับน้ำเสียและของเสียมียู่ประมาณ 30-35% ซึ่งแจกแจงได้ดังนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

- 20% เหลือในน้ำทิ้งจากการฟอกโครม ส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้
- 2% อยู่ในน้ำที่ค้างในชั้นหนังที่ฟอกแล้ว
- 8% อยู่ในน้ำทิ้งจากการรีดน้ำ (sammying float)
- 3-5% อยู่ในหนังเจียร เส้นใยหนังและเศษหนัง
- 2-7% อยู่ในน้ำฟอกซ้ำ

2.1.4 สรุปลักษณะสมบัติน้ำเสีรรวมจากอุตสาหกรรมฟอกหนังไทย

ลักษณะของน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง แสดงได้ดังตาราง 2.1 (หน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลิตร ยกเว้นค่า pH)

| พารามิเตอร์ | ค่าเฉลี่ย | ค่าต่ำสุด-สูงสุด |
|-------------|-----------|------------------|
| pH | 8.15 | 6.67 – 8.64 |
| BOD | 1,535 | 958 – 4,200 |
| COD | 4,150 | 2,433 – 8,100 |
| TKN | 394 | 215 – 644 |
| SS | 2,097 | 1,027 – 4,361 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | | |
|----|--------|----------------|
| TS | 13,857 | 9,118 – 21.881 |
| Cr | 77.68 | 18 – 204.4 |

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังไทย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม,2549)

2.2 กระบวนการรวมตะกอนทางเคมี (Coagulation)

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี เป็นการทำให้สารเกิดการจับเป็นก้อนโดยอาศัยสารเคมีบางชนิด (Chemical coagulation) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียจะเกิดสารที่มีลักษณะเหนียวหยุ่นเรียกว่า ฟล็อก (floc) ที่มีสมบัติพิเศษคือเมื่อฟล็อกถูกพัดพาไปสัมผัสกับตะกอนแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเสีย ตะกอนแขวนลอยเหล่านั้นจะถูกดูดติดผิวของฟล็อก เมื่อตะกอนเข้ามารวมตัวกับฟล็อกมากขึ้น ก็จะทำให้ฟล็อกมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเกิดการจมตัวลงสู่ก้นถังแยกตะกอน

ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่า โคแอกกูเลชันหรือการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆรวมตัวและจับกันเป็นฟล็อก มี 2 ขั้นตอนดังนี้

ก) การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง เป็นต้น

ข) ต้องทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่างๆ เคลื่อนที่มากระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of Colloidal Particles) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสกันระหว่างอนุภาค ย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม สิ่งที่เป็นความต้องการอีกอย่างหนึ่งคือ เมื่ออนุภาคต่างๆ สัมผัสกันแล้ว ควรเกาะติดกันแน่นและหลุดจากกันได้น้อยที่สุด (มันสิน, 2538)

2.2.1 การทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์(มันสิน, 2538)

สามารถทำได้โดยอาศัยกลไก 4 แบบคือ

1. การลดความหนาของชั้นกระจาย (Diffuse Layer)
2. การดูดติดและทำลายประจุไฟฟ้าของอนุภาคคอลลอยด์ (Adsorption/Charge Neutralization)
3. การใช้ผลึกสารอินทรีย์เพิ่มน้ำหนักและขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ (ห่อหุ้มอนุภาค)
4. การใช้สารโพลีเมอร์เป็นสะพานเชื่อม (Polymer Bridging)

2.2.2 การบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

การบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม เช่น ส่วนจากการฟอกโครม การรีดน้ำจากหนัง wet-blue การฟอกซ้่า-ย้อมสี จะใช้วิธีทำให้โครเมียมตกตะกอนด้วยสารละลายต่าง เช่น ปูนขาว แล้วปล่อยน้ำใสออกทิ้ง ดังรูป 2.2

ตัวอย่างการตกตะกอนโครเมียมโดยปรับพีเอชของน้ำเสียให้ได้ประมาณ 8.5 โดยใช้สารละลายปูนขาว (5-10%) อาจมีการเติม anionic polyelectrolyte อย่างเดียว หรือเติมเกลือเฟอร์ริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลอไรด์ รวมด้วยจะช่วยให้เกิดตะกอน โครเมียมไฮดรอกไซด์และจมตัวได้เร็วขึ้น โดยจะมีประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมได้มากกว่าร้อยละ 98 ปริมาณเกลือเฟอริกคลอไรด์และสารช่วยรวมตะกอน (polyelectrolyte) ที่ใช้อาจหาได้ด้วยวิธีการทดสอบ Jar test

เมื่อใช้ต่างทำปฏิกิริยาแล้ว ทำการเปิดวาล์วด้านล่างระบายเฉพาะตะกอนออกไปเข้าเครื่องอัดตะกอนหรือส่งไปลานตาก เพื่อให้ได้กากตะกอนแห้งและเป็นการลดปริมาณเพื่อเตรียมส่งไปกำจัดต่อที่ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

แต่ข้อเสียของการบำบัดด้วยวิธีนี้คือ กากของเสียหรือตะกอนแห้งจากการตกตะกอนโครเมียมนี้ จะมีความเข้มข้นของโครเมียมมาก ซึ่งจะมากกว่ามาตรฐานที่ยอมให้เอาไปทิ้งถมที่หรือใช้ในการเกษตร จึงถือเป็นกากสารพิษ จึงต้องส่งไปกำจัดที่ศูนย์กำจัดกากอุตสาหกรรม และยังเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มในเรื่องค่าขนส่งอีกด้วย



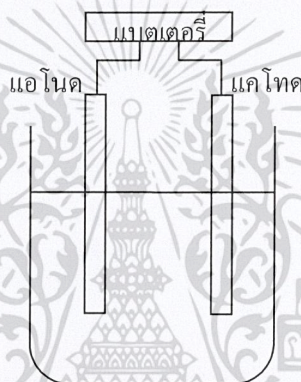
รูป 2.2 การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เทคนิคไฟฟ้าเคมีและการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

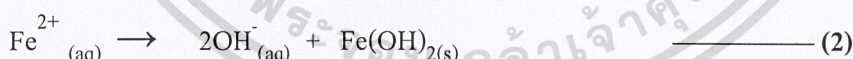
2.3.1 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) (วาสนา,2548)

กระบวนการไฟฟ้าเคมีหรือกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก ส่วนประกอบที่สำคัญของกระบวนการนี้ ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งต่ออยู่กับขั้วไฟฟ้าคือแอโนด (ขั้วบวก) และแคโทด (ขั้วลบ) และมีสารละลายที่นำไฟฟ้า เมื่อแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งควบคุมปริมาณของกระแสไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้าระบบตามที่กำหนด ส่วนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าโดยผ่านทางไอออนต่างๆ ที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเดินทางของกระแสผ่านไปยังขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ขั้ว ตัวอย่างของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส แสดงดังรูป 2.3

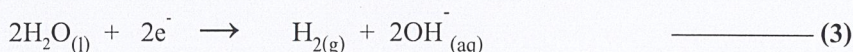


รูป 2.3 ลักษณะของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

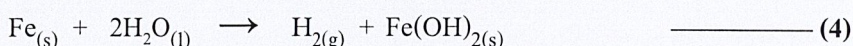
ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของขั้วไฟฟ้าเหล็ก
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด



การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด



การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์



เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่ขั้วแอโนด ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำ ดังสมการ (1) และ (2) ในขณะที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) ดังสมการ (3) เมื่อเวลาผ่านไป น้ำจะมีสภาพ

เป็นด่างและทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในรูปของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_2(s)$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3(s)$)

2.3.2 กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation Process)

กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation หรือ EC) เป็นเทคนิคไฟฟ้าเคมี ชนิดอิเล็กโทรลิซิส หรือการแยกสลายด้วยไฟฟ้า มีการผ่านไฟฟ้าเข้าไปที่ขั้วไฟฟ้าสองขั้วที่จัดไว้ขนานกันคือ ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ซึ่งขั้วไฟฟ้าทั้งสองจมอยู่ในสารละลาย ซึ่งสารก่อนการจับก้อนจะถูกสร้างที่ขั้วแอโนดโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งในขั้นตอนนี้ประจุที่เกิดขึ้น (อาจจะเป็นโลหะไอออนหรือไอออนอื่น) จะถูกแยกออกจากสารละลายโดย

1. เกิดปฏิกิริยากับไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม
2. เกิดปฏิกิริยากับโลหะไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น

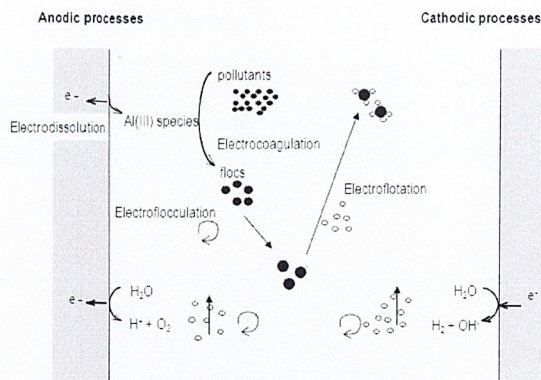
2.3.2.1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

กลไกของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น พีเอช ขนาดของอนุภาค หมูฟุ้งกั้น และขนาดของโมเลกุลของสาร เป็นต้น สำหรับประสิทธิภาพของการจับก้อนด้วยไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้เป็นอิเล็กโทรด โดยมากนิยมใช้อลูมิเนียมและเหล็ก นอกจากนี้ยังต้องใช้อิเล็กโทรไลต์เสริม เพื่อให้การจับก้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น [Koby, 2004] ในระหว่างกระบวนการอิเล็กโทรไลต์เสริมจะเกิด 3 กระบวนการหลักๆ คือ

1. ปฏิกริยาอิเล็กโทรไลติกที่ขั้วอิเล็กโทรด
2. การฟอร์มตัวของตะกอนในสถานะของเหลว
3. เกิดการดูดซับสารมลพิษที่เป็นคอลลอยด์หรือของเหลวที่ละลายน้ำได้ ซึ่งสามารถกำจัดได้โดยการตกตะกอนหรือการลอยตะกอน

2.3.2.2 กลไกการเกิดตะกอน

เมื่อให้กระแสไฟฟ้ากับระบบ ที่ขั้วบวกและขั้วลบจะเกิดปฏิกิริยาได้เป็น โลหะไฮดรอกไซด์ ขึ้นอยู่กับขั้วที่ใช้ หากใช้ขั้ว อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดจะเกิดเป็น $Al(OH)_3$ และถ้าใช้ขั้วเหล็กเป็นอิเล็กโทรดจะเกิดเป็น $Fe(OH)_3$ ซึ่ง $Al(OH)_3$ และ $Fe(OH)_3$ ที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเจลคล้ายกับสารส้ม ซึ่งเป็นสารรวมตะกอนไปจับกับสารแขวนลอย คอลลอยด์ น้ำมัน ไขมัน ตะกอนต่างๆที่อยู่ในน้ำให้เกิดเป็นตะกอนใหญ่ขึ้น ส่วนฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ขั้วลบจะไปเกาะที่ผิวหน้าของตะกอนทำให้ตะกอนที่เบาลอยตัวขึ้นสู่วิวัฒนาการและสามารถกำจัดได้โดยการกวาดตะกอนออก ตะกอนส่วนที่หนักจะจมลงสู่ก้นถัง ดังรูปที่ 2.4



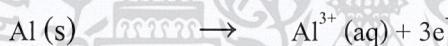
รูป 2.4 กลไกการเกิดตะกอน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด (ประไฟ, 2550)

เกิดการออกซิเดชันของอลูมิเนียมที่ขั้วแอโนด ที่พีเอชต่างๆจะให้ Al^{3+} และ $\text{Al}(\text{OH})^{3+}$ และที่พีเอชที่เหมาะสมจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูป $\text{Al}(\text{OH})_3$ และสุดท้ายจะเกิดpolymeric เป็น $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$ ดังสมการ (4)

(1) ปฏิกิริยาที่ใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด

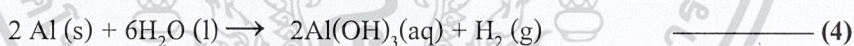
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารีดักชัน ที่ขั้วแคโทด

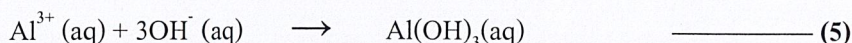


ปฏิกิริยารวม



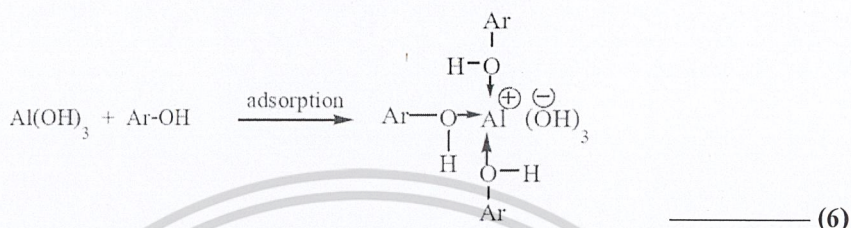
อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นเจล สามารถดูดซับโมเลกุลต่างๆ ให้แยกตัวออกมาจากสารละลายโดยการตกตะกอนออกมาพร้อมกัน บางครั้งอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ที่เกิดขึ้นจากขั้วแอโนดอาจเกิดจากขั้วแอโนดอาจเข้าจับกับไอออนลบ เช่น สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds, Ar-OH) ทำให้ตกตะกอนออกจากสารละลายในรูปของเกลือที่ไม่ละลายน้ำ เช่น อะลูมิเนียมไตรฟีนอลเต [aluminium triphenolate, $\text{Al}(\text{OAr})_3$] ซึ่งมีกลไกการเกิดดังนี้ (วาสนา, 2548)

1) อะลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จากขั้วแอโนด (ขั้วบวก) จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่ได้จากขั้วแคโทด (ขั้วลบ) เกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ดังสมการ (5)

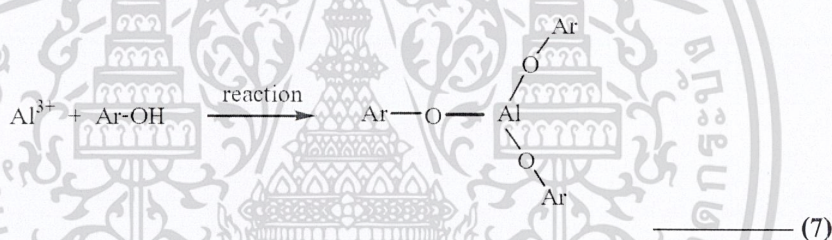


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) หรือเป็นตัวช่วยในการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) มีลักษณะเป็นเจล (gelatin) ที่สามารถดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่ๆ เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไฮโดรคาร์บอนสายยาวๆ สารประกอบฟีนอลิก เช่น แทนนิน (tannin) แซนโทน (xanthone) ฟลาโวนอยด์ (flavonoide) แอนทราควิโนน (anthraquinone) เป็นต้น แต่จะไม่ได้ดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กๆ เช่น น้ำตาล แอลกอฮอล์ เป็นต้น เกิดเป็นก้อนตะกอน (coagulum) ดังสมการ (6)



2) อะลูมิเนียมไอออน สามารถที่จะทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารประกอบฟีนอลิกเกิดเป็นอะลูมิเนียมไตรฟีนอลेट เป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble salt) ซึ่งสามารถเกิดได้เร็วและดีกว่าการดูดซับด้วยเจลของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ (7)

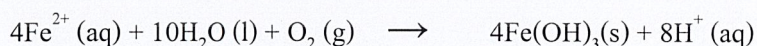
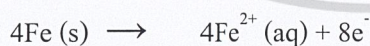


(2) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรด (ประจุไฟ, 2550)

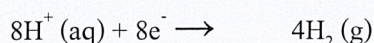
ในกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสเมื่อใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรด เหล็กจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันให้เหล็กไฮดรอกไซด์ และ Fe(OH)_n เมื่อ $n = 2$ หรือ 3 ซึ่งมีกลไกในการเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ คือ

กลไกที่ 1

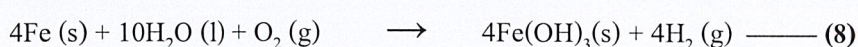
แอโนด :



แคโทด :



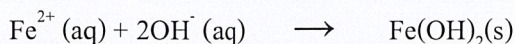
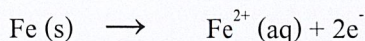
ปฏิกิริยารวม :



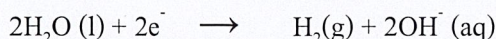
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกที่ 2

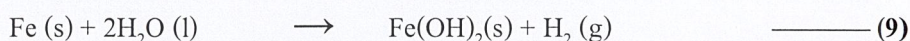
แอโนด :



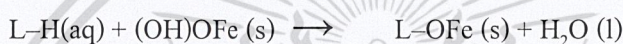
แคโทด :



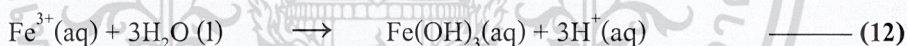
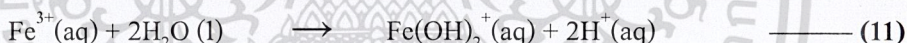
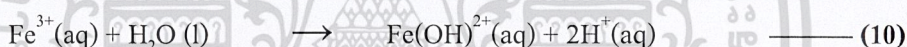
ปฏิกิริยารวม :



Fe(OH)_n จะอยู่ในรูปสารแขวนลอยที่เป็นเจล ซึ่งสามารถกำจัดสิ่งสกปรกจากน้ำเสีย โดยเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน หรืออาจเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าแล้วจึงเกิดการตกตะกอนบนพื้นผิวของสารประกอบเชิงซ้อน สิ่งสกปรกจะเปรียบเสมือนลิแกนด์ (L) ที่จับกับ hydrous iron ในเชิงเคมีดังนี้



H_2 (g) ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ อาจทำให้สารอินทรีย์หรือวัสดุแขวนลอยต่างๆ ถูกแยกออกไป แต่อย่างไรก็ตาม ไอออนของ Fe^{3+} อาจเกิด hydration และในสถานะที่เป็นกรดอาจจะมี Fe(OH)^{2+} , Fe(OH)_2^+ และ Fe(OH)_3 เกิดขึ้นได้ดังสมการ (10), (11), (12)

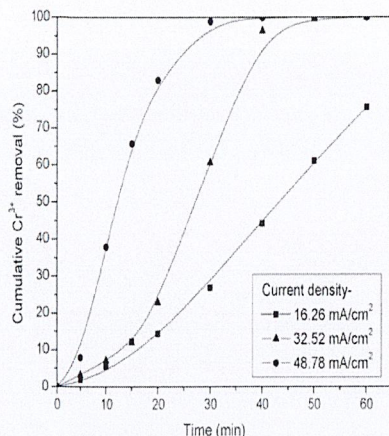


แต่ในสถานะที่เป็นเบส อาจจะมี Fe(OH)^{6-} และ Fe(OH)^{4-} เกิดขึ้น ซึ่งเมื่อใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า จะมีไอออนที่เป็นทั้งประจุบวกและประจุลบเกิดขึ้น ดังนั้นถ้าพิจารณาจากปฏิกิริยาแล้ว จะเห็นว่าการใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรดในการบำบัดน้ำเสียจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้อะลูมิเนียม แต่สาเหตุที่ไม่นิยมใช้เหล็กเป็นอิเล็กโทรด เนื่องจากเหล็กจะแสดงสมบัติความเป็นพิษมากกว่าอะลูมิเนียมนั่นเอง

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการบำบัดโครเมียมไตรวาเลนต์ (Golder และคณะ, 2006)

2.3.3.1 ผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และเวลาในการบำบัด

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมไตรวาเลนต์ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าและเวลาที่แตกต่างกัน ให้ผลดังรูป 2.5

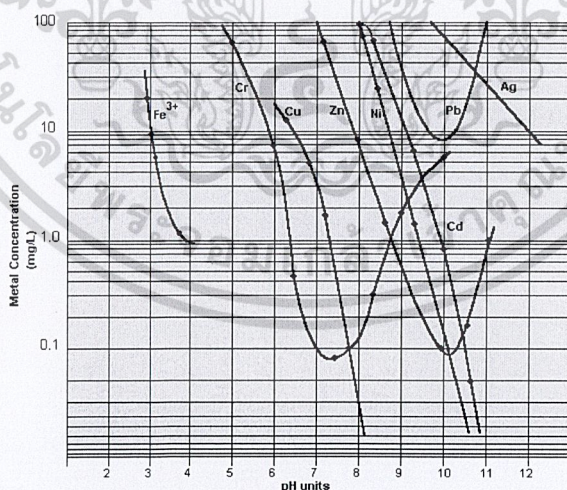


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด Cr^{3+} และเวลาในการบำบัด ที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่า หากให้กระแสไฟฟ้ามาก การละลายของขั้วจะสูง ทำให้เกิดการรวมตัวเป็นตะกอน $\text{Cr}(\text{OH})_3$ มาก เกิดฟองอากาศที่ขั้ว cathode มาก ทำให้เกิดตะกอนลอยมาก และใช้ระยะเวลาในการบำบัดน้อย แต่ถ้าให้กระแสมากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อนแก่น้ำ

2.3.3.2 ผลของค่าพีเอช

การกำจัด Cr^{3+} ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชเริ่มต้นและระดับของค่าพีเอช ระหว่างการเกิดปฏิกิริยา $\text{Cr}(\text{OH})_3$ จะละลายได้ที่พีเอชระหว่าง 7.5-8.5 ดังรูป 2.6

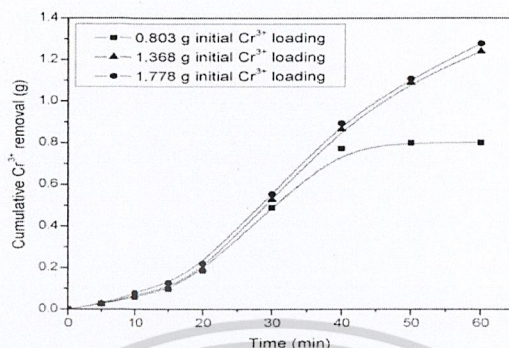


รูป 2.6 กราฟแสดงค่าการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ (Golder และคณะ, 2006)

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าหากที่พีเอชต่ำกว่า 7.5 หรือสูงกว่า 8.5 จะทำให้ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ มีความสามารถในการละลายดีขึ้นจึงทำให้ปริมาณ Cr^{3+} ในน้ำเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นหลังการบำบัดจึงควรระวังไม่ให้ค่าพีเอชเกินกว่า 8.5

2.1.1.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{3+}

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการบำบัด Cr^{3+} และเวลาในการบำบัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{3+} แตกต่างกันได้ผลดังรูปที่ 2.7



รูป 2.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด Cr^{3+} และเวลาในการบำบัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{3+} แตกต่างกัน

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของ Cr^{3+} ต่ำจะทำให้เวลาในการกำจัดน้อยลง เนื่องจาก Cr^{3+} ถูกจับกับ OH^- และถูกกำจัดออกจนหมด หากความเข้มข้นของ Cr^{3+} สูงจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าเนื่องจากมีไอออนของ Cr^{3+} สูงโอกาสที่ไอออนจะถูกจับโดย OH^- ก็มีมาก แต่จะทำให้เวลาในการบำบัดมากขึ้น

2.1.1.2 ผลของคลอไรด์ไอออน

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของคลอไรด์ไอออน (Cl^-) ต่อความเข้มข้นของ Cr^{3+} ณ เวลาต่างกัน พบว่าความเข้มข้นของ Cl^- มาก จะทำให้ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ ละลายมากขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดลง แสดงดังตารางที่ 2.2

Fall in Cr^{3+} concentration in solution with different dosing of NaCl (16.26 mA/cm² current density, initial pH 3.4, 30.74 cm² electrode area)

| Time of EC (min) | Without NaCl | 1000 mg/l NaCl | 2000 mg/l NaCl |
|------------------|--------------|----------------|----------------|
| 0 | 999.5 | 1000 | 1003 |
| 5 | 974.2 | 980.0 | 981.6 |
| 10 | 907.7 | 944.8 | 939.4 |
| 15 | 870.1 | 888.2 | 899.7 |
| 20 | 828.5 | 855.8 | 856.8 |
| 30 | 697.5 | 731.6 | 737.2 |
| 40 | 531.6 | 557.5 | 590.7 |
| 50 | 353.4 | 388.8 | 413.7 |
| 60 | 232.3 | 244.6 | 261.3 |

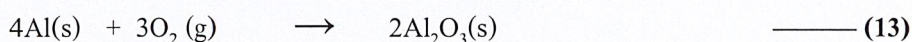
ตารางที่ 2.2 แสดงผลของความเข้มข้นของ Cl^- ต่อความเข้มข้นของ Cr^{3+} ณ เวลาต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

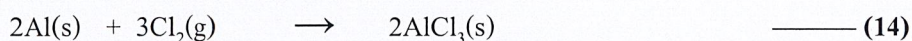
2.4 อลูมิเนียม

2.4.1 คุณสมบัติทางเคมีของอลูมิเนียม (Geoff, 2000)

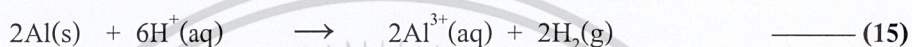
ผงอลูมิเนียมจะเผาไหม้แล้วให้ฝุ่นควันออกมาในรูปของอลูมิเนียมออกไซด์ ดังสมการ (13)



และอลูมิเนียมจะเผาไหม้และให้ความร้อนออกมาอย่างมากเมื่อทำปฏิกิริยากับฮาโลเจน เช่น ไดคลอไรด์ (dichloride) ดังสมการ (14)

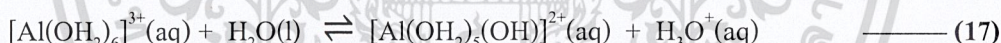


อลูมิเนียมเป็นโลหะที่สามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งกรดและด่าง (Amphoteric metal) ดังสมการ (15), (16)

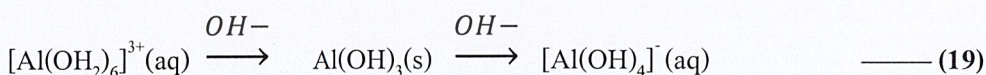


2.4.2 สมบัติการละลายของอลูมิเนียม (Geoff, 2000)

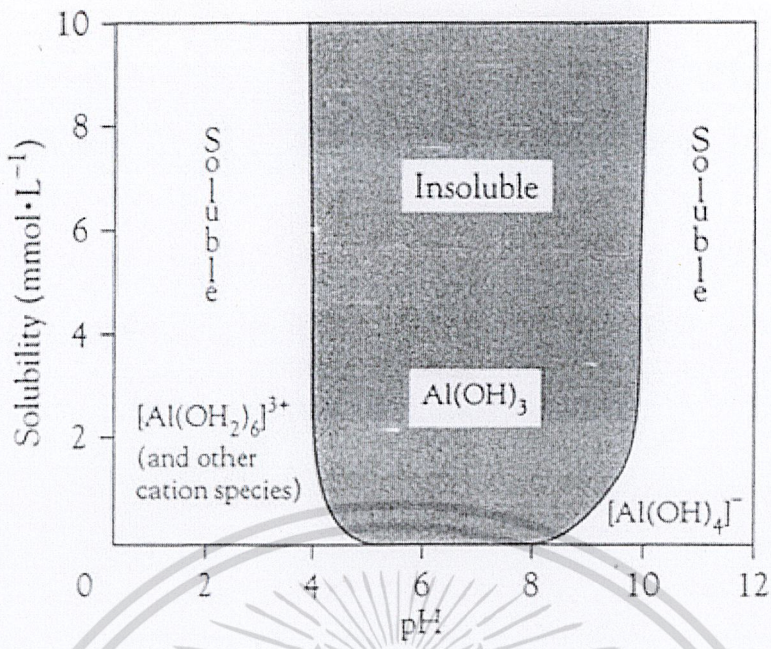
ในสารละลายน้ำ อลูมิเนียมจะแสดงตัวเป็น เฮกซะอะควาอลูมิเนียมไอออน (Hexaaquaaluminum-ion), $[\text{Al(OH}_2)_6]^{3+}$ แต่ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะกลายเป็นเพนตะอะควาไฮดรอกโซอลูมิเนียมไอออน (Pentaaquahydroxoaluminum ion), $[\text{Al(OH}_2)_5(\text{OH})]^{2+}$ กับไฮดรอกไซด์ไอออนและหลังจากนั้นก็จะเป็นเตตระอะควาไดไฮดรอกโซอลูมิเนียมไอออน (Tetraaquadihydroxoaluminum) ดังสมการ (17) และ (18)



การเติมไฮดรอกไซด์ไอออนให้แก่อลูมิเนียมไอออน ในตอนแรกจะทำให้เป็นตะกอนวุ้นของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ แต่ผลิตภัณฑ์นี้จะละลายกลับไปเป็นไฮดรอกไซด์ไอออนและให้อลูมิเนียมไอออน(หรือที่เรียกว่า เตตระไฮดรอกโซอลูมิเนียมไอออน (Tetrahydroxoaluminate ion)) ดังสมการ (19)



อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์นั้นจะสามารถละลายได้ที่ค่าพีเอชต่ำๆและสูงๆ แต่จะไม่ละลายภายใต้สภาวะเป็นกลาง ดังรูปที่ 2.8



รูป 2.8 ความสามารถในการละลายของอลูมิเนียมที่ค่าพีเอชต่างๆ (Geoff, 2000)



2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นวลพรรณและคณะ (2551)

การศึกษาการกำจัดโครเมียม (Cr) ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังโดยใช้วิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน ทดลองด้วยการใช้อิเล็กโทรดที่ทำจากอลูมิเนียมจำนวน 4 แผ่นและต่อแบบขนาน โดยการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระบบอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นโครเมียม 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการศึกษาจะแปรค่าพีเอช เป็น 4, 6, 8 และ 10 ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ 0.6, 0.8, 1.0 และ 1.2 แอมแปร์ ระยะเวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที วัดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้า และวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS) ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ คือที่ค่าพีเอช 6 ปริมาณกระแสไฟฟ้า 1.0 แอมแปร์ และที่ระยะเวลา 40 นาที จากนั้นทำการทดลองโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมกับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังที่มีความเข้มข้นของโครเมียม 1,887.067 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดโครเมียมได้ 596.811 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีความเข้มข้นของโครเมียมเหลืออยู่ในน้ำเสีย 1,290.256 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำการทดลองบำบัดต่อรวมทั้งหมด 8 ครั้ง สามารถกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจนเหลือความเข้มข้นของโครเมียม 0.653 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดทั้งหมด 99.96 เปอร์เซ็นต์

วิชุดาและคณะ (2552)

การศึกษาการบำบัดโครเมียม (III) ในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่มีกระแสสูง 12 และ 19 แอมแปร์ น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีความเข้มข้นของโครเมียม 5,920 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าพีเอช 3.12 ปริมาตร 900 มิลลิลิตร ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม โดยใช้แผ่นอลูมิเนียมขนาด 145 มิลลิเมตร \times 87 มิลลิเมตร \times 2 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่นเป็นอิเล็กโทรด นำแผ่นมาจัดเรียงกันในภาชนะรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ทำจากอะคริลิก โดยให้มีระยะห่างระหว่างแผ่น 10 มิลลิเมตรและต่ออิเล็กโทรดแบบขนานกับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 20 แอมแปร์ แปรค่าปริมาณกระแสไฟฟ้า 1,2,3,12 และ 19 แอมแปร์ เก็บตัวอย่างที่เวลา 10,20,30,60 และ 90 นาที นำไปวัดค่าพีเอช และวิเคราะห์ความเข้มข้นของโครเมียมด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบ ช่วง 10 นาทีแรก ค่าพีเอชของน้ำเสียในระบบจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับอัตราการกำจัดโครเมียมเนื่องจากเกิดกลไกการตกตะกอนของโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($Cr(OH)_3$) และการตกตะกอนร่วมระหว่างอลูมิเนียมและโครเมียมไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นอัตราการกำจัดโครเมียม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะเพิ่มขึ้นด้วย ในการทดลอง ชุดทดลองที่มีค่าปริมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้า 19 แอมแปร์ สามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมจนเหลือ 3 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 99.95% ค่า พีเอช เท่ากับ 6.27

Golder และคณะ (2006)

การศึกษานี้เป็นการศึกษาการกำจัดโครวาเลนท์โครเมียม (Cr^{3+}) จากน้ำในระบบเบตซ์ที่มี การปั่นกววนด้วยอิเล็กโทรดคู่ที่ทำจาก mild steel โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ได้แก่ระยะเวลา รอบของการปั่นกววน ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมโครวาเลนท์ และความเข้มข้นของสารอิเล็กโทรไลต์ (NaCl) การกำจัดโครเมียมโครวาเลนท์ระหว่างกระบวนการ EC เกิดจากผลของการทำงานร่วมกันกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี การตกตะกอนร่วม การกวาด และการดูดซับตะกอน ที่ความหนาแน่นกระแสสูงสุดและค่าพีเอชของสารละลายจะเป็นจุดที่ทำให้การ สังเกตการกำจัดโครเมียมโครวาเลนท์ สภาวะแรกของอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันนั้นสามารถลดความเข้มข้นของโครเมียมโครวาเลนท์จาก 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็น 2 มิลลิกรัมต่อลิตร สามระยะที่แตกต่างกันของอัตราการกำจัดโครเมียมโครวาเลนท์ ($\text{g/m}^2 \text{min}$) ได้แก่ ระยะแรกจะเกิดอย่างช้าๆ ระยะที่สองเกิดอย่างรวดเร็ว และระยะที่สามจะค่อยๆ ลดลง จะนำมาศึกษาในครั้งนี้ด้วย โซเดียมคลอไรด์นั้นไม่เพียงจะเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเท่านั้นแต่ยังมีผลต่อผิวหน้าอิเล็กโทรดในการ ทำปฏิกิริยากับสารเคมีน้อยลง และการกำจัดโครเมียมโครวาเลนท์อีกด้วย ลักษณะของตะกอนนั้น จะใช้ High resolution XRD ในการศึกษา และพบว่า ตะกอนจากการทำอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันนั้นมีปริมาณของโครเมียมโครวาเลนท์อยู่มาก และค่าอัตราส่วนมวลโครเมียมโครวาเลนท์ต่อเหล็ก สูงสุดนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 3.5 – 4.0 การกำจัดโครเมียมโครวาเลนท์เพิ่มขึ้นประมาณ 4% อย่างสังเกตได้ หลังจาก 60 นาทีในระยะเวลาเดียวกันของก่อนการสัมผัสอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน นั้นเป็นผลมา จากการตกตะกอนทางเคมีและการตกตะกอนร่วม

Jing-wei และคณะ (2007)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันที่เซลล์ไฟฟ้ากระแสต่ำ และใช้อิเล็กโทรดที่ละลายน้ำได้ (อิเล็กโทรดที่เป็น mild steel และอลูมิเนียมอิเล็กโทรด) ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองชนิดในแง่ของ ประสิทธิภาพการกำจัดซัลไฟด์ พบว่าอิเล็กโทรดที่ทำจากเหล็กอ่อนนั้นให้ประสิทธิภาพการกำจัด มากกว่า 90% แต่ในระหว่างกระบวนการบำบัดนั้น มีสีดําของไฮดรอกไซด์ (II) ซัลไฟด์เกิดขึ้นด้วย ในขณะที่อลูมิเนียมอิเล็กโทรดนั้นสามารถขจัดสีของน้ำทิ้งได้ ประสิทธิภาพการกำจัดซัลไฟด์นั้น มีค่าน้อยกว่า 12% กลไกการกำจัดซัลไฟด์ แอมโมเนีย TOC ซัลไฟด์และสี มีค่าเท่ากับ 68.0%, 43.1%, 55.1%, 96.7% และ 84.3% ตามลำดับ และถือว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองในการ ลดค่า COD_{Cr} ที่สภาวะเดียวกันคือ ความเข้มข้นเริ่มต้น 2413.1 มก.ต่อลิตร 223.4 มก.ต่อลิตร, 1000.4 มก.ต่อลิตร, 112.3 มก.ต่อลิตร และเจือจาง 256 ครั้ง ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Golder และคณะ (2007)

การกำจัดโครเมียมไตรวาเลนต์โดยวิธีอิเล็กโทรโคแอกูเลชัน โดยศึกษาการใช้อิเล็กโทรดขั้วเดียว อิเล็กโทรดสองขั้ว อิทธิพลของคลอไรด์ไอออน ค่าพีเอช ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้น และกระแสของเซลล์ต่อประสิทธิภาพการกำจัด ซึ่งศึกษาในเครื่องกวนแบบเบตซ์ ความสามารถในการละลายของ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ และการตกตะกอนร่วมของ $[\text{Cr}\cdot\text{Fe}](\text{OH})_3$ แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีคลอไรด์ไอออน พบว่าทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมลดลง ในการกำจัดโครเมียมนั้นจะมีค่ามากขึ้นที่ค่าพีเอชสูง เนื่องจากผลของการรวมตัวกันของสารที่ตกตะกอน และตกตะกอนร่วมเช่น สารละลายของแข็งเช่นอนุพันธ์ต่างๆ กลไกการดูดซับ แคโทดรีดักชัน การรวมตะกอนอย่างรวดเร็ว การเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมนั้นทำให้ Charge loading เพิ่มขึ้นด้วย ในการศึกษาผลของกระแสนั้นน้อยกว่าที่ทำกรทำนายจากกฎของฟาราเดย์ในการทำอิเล็กโทรไลซิสทั้งสองการทดลอง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการนั้นประเมินราคาจากค่าไฟฟ้าและค่าวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด เมื่อเปรียบเทียบอิเล็กโทรดแบบสองขั้วกับขั้วเดียวนั้นก่อนบำบัดได้ 40% และหลังบำบัดได้ 43%



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น AA-680 ยี่ห้อ Shimadzu
2. TOC Analyzer ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น TOC-VCSH
3. พีเอชมิเตอร์ ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827
4. เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง(DC Power Supply) รุ่น PS – 204FX ยี่ห้อ Hammax
5. Conductivity meter รุ่น LF 320
6. แผ่นอลูมิเนียมอิเล็กโทรด (ขนาด 145 มม. × 87 มม. × 2 มม.)
7. Reactor ทำจากกล่องอะคริลิก (ขนาด 90 มม. × 110 มม. × 150 มม.)
8. เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
9. แท่งกวนแม่เหล็ก
10. สายไฟ
11. นาฬิกาจับเวลา
12. ปากคืบ
13. กระดาษกรอง
14. ขวดพลาสติก ขนาด 60 มล.
15. เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 สารเคมี

1. สารละลายกรดไนตริก เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co.,Ltd
2. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co.,Ltd
3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เกรดวิเคราะห์ Carlo Erba Co.,Ltd
4. สารละลายสต็อกโครเมียม
5. น้ำกลั่น

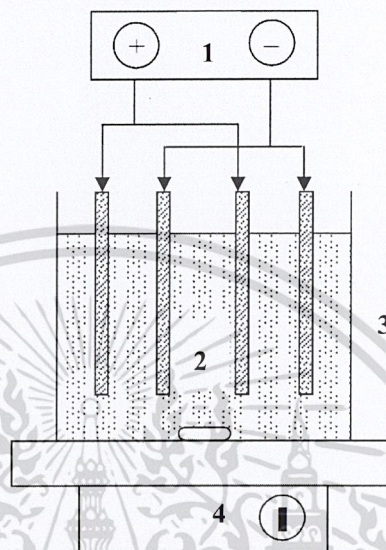
3.2 การเตรียมการทดลอง

3.2.1 การเตรียมชุดการทดลอง

1. ตัดแผ่นอลูมิเนียมให้มีขนาด 145 มม. × 87 มม. × 2 มม. เพื่อใช้ทำเป็นอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำแผ่นอลูมิเนียมอิเล็กโทรดดังกล่าว 4 แผ่น มาจัดเรียงใน reactor ที่ทำจากกล่องอะคริลิกขนาด 90 มม. × 110 มม. × 150 มม. โดยให้มีระยะห่างของแผ่นอิเล็กโทรดเท่ากับ 10 มม.
- ต่อแผ่นอิเล็กโทรดเข้ากับเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยต่อแบบขนาน ดังรูป 3.1



รูป 3.1 การต่อวงจรแบบขนาน

โดยหมายเลข 1-4 คือ DC Power supply แผ่นอลูมิเนียม กล่องรีแอกเตอร์ และเครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก ตามลำดับ

3.2.2 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

1. ตัวอย่างน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง

นำน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมซึ่งมีความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 5,745 และ 3,980 มิลลิกรัมต่อลิตร มาวัดค่าพีเอชด้วย pH-Meter ค่าการนำไฟฟ้าวัดด้วย Conductivity Meter และวัดค่า TOC ด้วย TOC Analyzer

3.3 การดำเนินการทดลอง

3.3.1 การศึกษาผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม

- ใช้ตัวอย่างน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม ปริมาตร 900 มิลลิลิตร ให้กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ค่าพีเอชเริ่มต้น 4
- ทำการเดินระบบ วัดค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าการนำไฟฟ้า และเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ปริมาณโครเมียม (Cr^{3+}) ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ตามวิธีมาตรฐาน (APHA, AWWA and WEF,1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลา 10, 20, 30, 60 และ 90 นาทีตามลำดับ ทำการรักษาสภาพด้วยกรดไนตริกเข้มข้น

3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-2 แต่แปรค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ

3.3.2 การศึกษาผลของค่ากระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 ในหัวข้อ 3.3.1 แต่แปรค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 3 แอมแปร์

3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม

1. ใช้น้ำเสียจากอ่างฟอกโครม ปริมาตร 900 มิลลิลิตร ให้กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ค่าพีเอชเริ่มต้น 4
2. ทำการเดินระบบ และเก็บตัวอย่างน้ำมา 25 มิลลิลิตร เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ ตามวิธีมาตรฐาน (APHA, AWWA and WEF, 1995) ที่เวลา 0 และ 90 นาทีตามลำดับ
3. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-2 แต่แปรค่าพีเอชเริ่มต้นเป็น 5, 6, 7 และ 8 ตามลำดับ
4. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-3 แต่ทำการแปรค่ากระแสไฟฟ้าเป็น 3 แอมแปร์

บทที่ 4

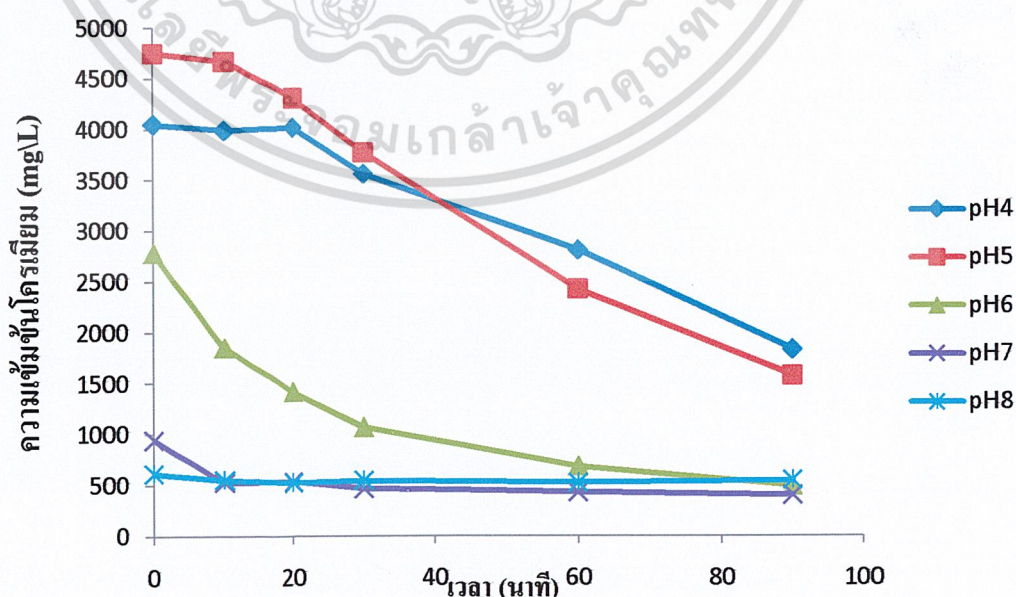
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาถึงความสามารถในการใช้ระบบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า หรือ อิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน เพื่อใช้บำบัดโครเมียม โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัดโครเมียม โดยศึกษาผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ และทำการเก็บตัวอย่าง ณ เวลา 0, 10, 20, 30, 60, 90 นาที เพื่อนำไปวัดค่าพีเอชเพื่อหาความเข้มข้นของโครเมียม ศึกษาผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช และศึกษาผลของพีเอชต่อการบำบัดโครเมียม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของผลการบำบัดต่อค่า TOC และทำการศึกษาค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่แสดงผลออกมา เพื่อนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบเพื่อดูประสิทธิภาพของการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากโรงฟอกหนัง ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน

4.1 การศึกษาผลการบำบัดโครเมียมออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม

4.1.1 การศึกษาผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์

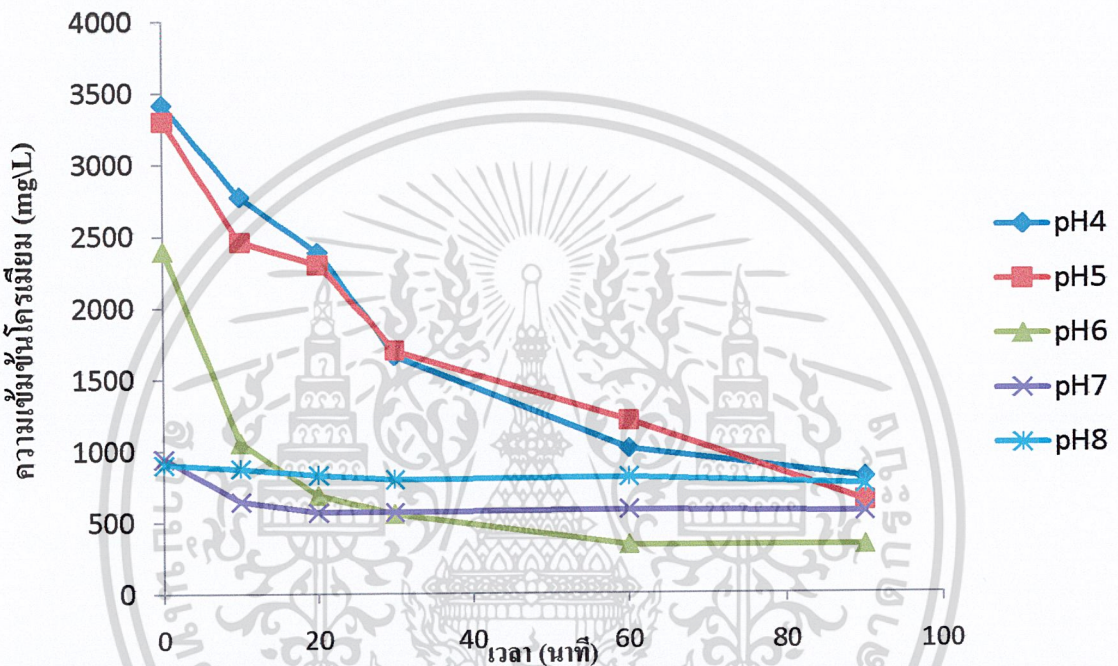
จากการศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์โดยวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ มีความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นเท่ากับ 5,745 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์มีค่าเท่ากับ 3,980 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองโดยจ่ายปริมาณกระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ เก็บตัวอย่างที่เวลา 0, 10, 20, 30, 60, 90 นาที นำไปวัดค่าพีเอชและวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโครเมียมได้ผลดังรูป 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโครเมียมกับเวลาเมื่อจ่ายกระแส 2 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าพีเอช 4, 5 และ 6 ความเข้มข้นของโครเมียมมีแนวโน้มลดลงโดยเมื่อถึงเวลาที่ 90 นาที ความเข้มข้นของโครเมียมจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาที่ 0 นาที เนื่องจากโครเมียมจะอยู่ในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) ทำให้ปริมาณความเข้มข้นโครเมียมที่อยู่ในน้ำเสียลดลงและที่พีเอช 7 และ 8 ความเข้มข้นของโครเมียมมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยและเริ่มคงที่ซึ่งจากรูปที่ 4.1 ค่าพีเอชที่สามารถบำบัดโครเมียมได้ดีที่สุดคือพีเอช 6 เนื่องจากที่ค่าพีเอช 6 มีแนวโน้มในการลดลงของปริมาณโครเมียมมากกว่าที่ค่าพีเอชอื่นๆ



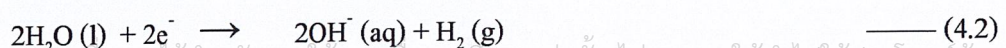
รูปที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบความเข้มข้นของโครเมียมกับเวลาเมื่อจ่ายกระแส 3 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าที่พีเอช 4, 5 และ 6 ปริมาณความเข้มข้นโครเมียมมีแนวโน้มลดลงจากที่เวลา 0 นาที โดยที่เวลา 90 นาที จะสามารถบำบัดโครเมียมได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับเวลา 0 นาทีเนื่องจากโครเมียมจะอยู่ในรูปโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) ทำให้ความเข้มข้นโครเมียมที่อยู่ในน้ำเสียลดลงและที่พีเอช 7 และ 8 ความเข้มข้นโครเมียมมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับที่พีเอช 4, 5 และ 6 เมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบที่ขั้วแอโนด จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) ดังสมการ (4.1) ที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันได้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการ (4.2)

ขั้วแอโนด (ขั้วบวก)



ขั้วแคโทด (ขั้วลบ)



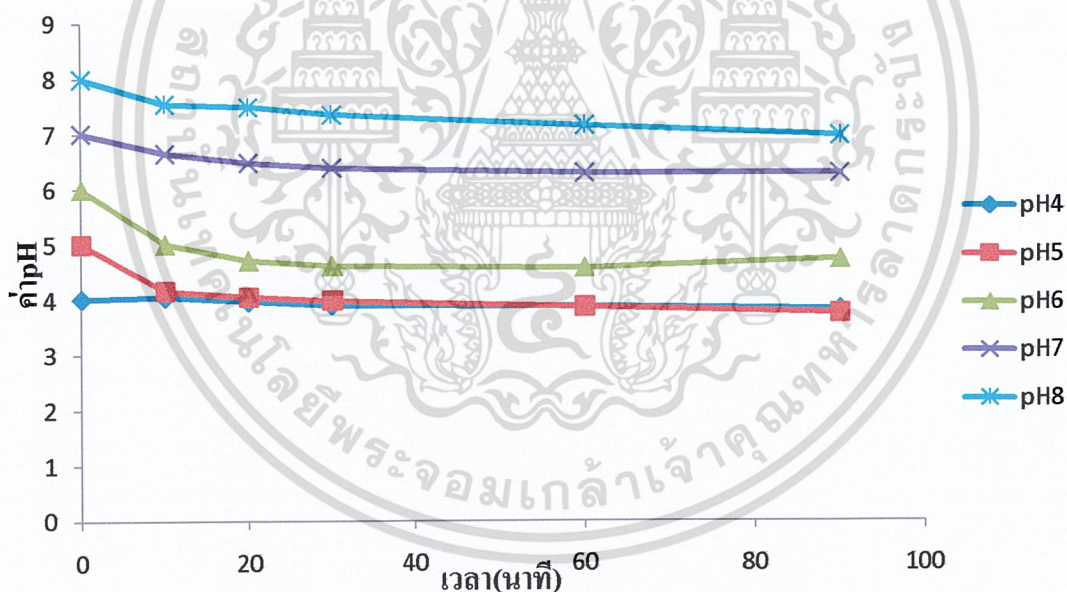
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

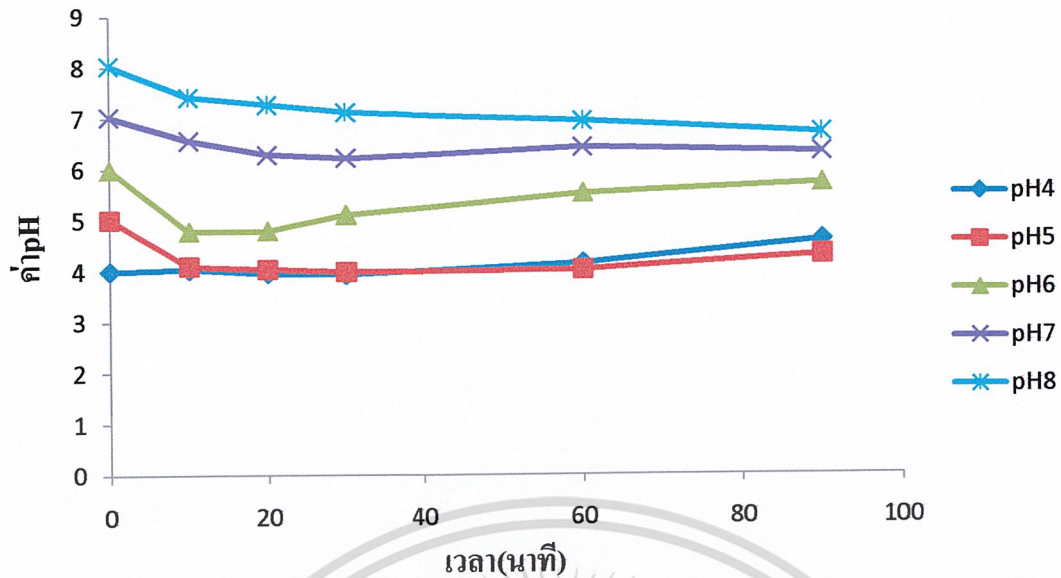
ไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดขึ้นจะรวมกับโครเมียมในน้ำเสีย เกิดเป็นคอลลอยด์ของโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) ซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นจะถูกกำจัดไฮโดรเจนที่ได้จากการแตกตัวของน้ำที่ขั้วแคโทดพอลอยขึ้นสู่ผิวน้ำซึ่งสามารถกวาดออกหรือตักออกได้ และเมื่อระยะเวลาผ่านไปทำให้เกิดตะกอนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ซึ่งมีลักษณะเป็นฟุ้งจะหนักกว่าจึงจมตัวลงพร้อมกับการนำเอาตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ติดไปด้วยกลไกนี้เรียกว่าการดักจับโดยอนุภาคที่ตกตัว เมื่อทำการบำบัดเป็นเวลา 90 นาที ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ พีเอช 4, 5, 6, 7 และ 8 มีความเข้มข้นของโครเมียมเหลือ 1828.67, 1569.67, 491.83, 399.00 และ 544.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ค่าพีเอช 4, 5, 6, 7 และ 8 จะมีความเข้มข้นของโครเมียมเหลืออยู่ 810.77, 643.43, 338.00, 568.67, 757.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยที่พีเอช 6 เป็นค่าพีเอชที่สามารถบำบัดโครเมียมได้ดีที่สุด

4.1.2 การศึกษาผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช

จากการศึกษาผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชโดยปรับพีเอชเริ่มต้นเป็น 4, 5, 6, 7 และ 8 แล้วให้กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ซึ่งจะแสดงรายละเอียดที่ได้จะแสดงดังรูป 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลง pH ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

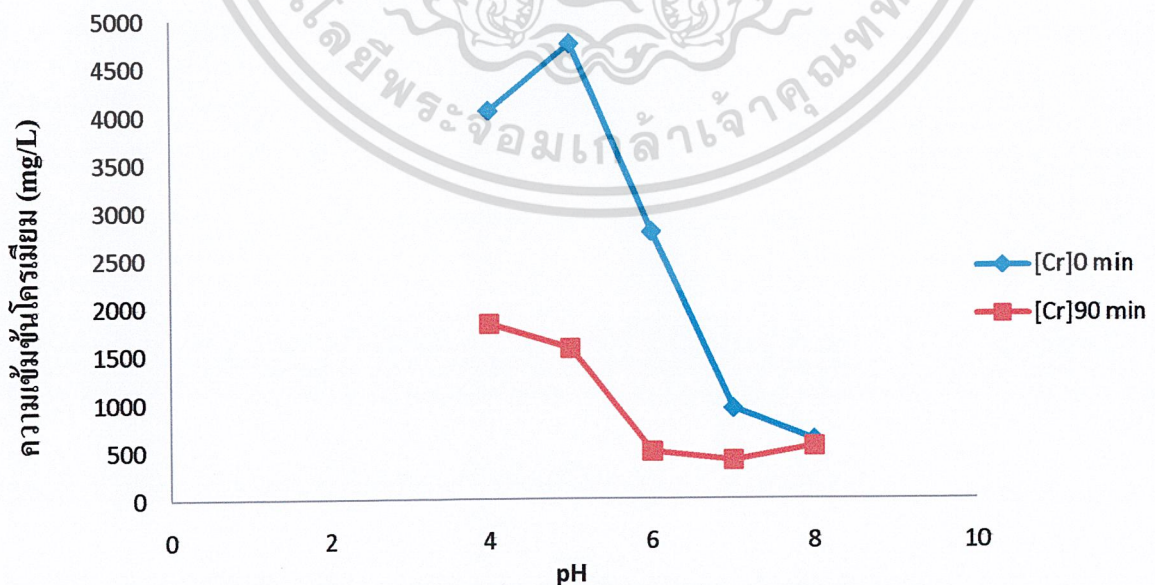


รูปที่ 4.4 ผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลง pH ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะแสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงจากค่าพีเอชเริ่มต้นเนื่องจากไฮดรอกไซด์ (OH^-) ที่เกิดขึ้นจากขั้วแคโทดจะรวมตัวกับโครเมียมในน้ำเสียเกิดการตกตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$) ทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ลดลงส่งผลให้ค่า pH มีแนวโน้มลดลงจาก pH เริ่มต้น

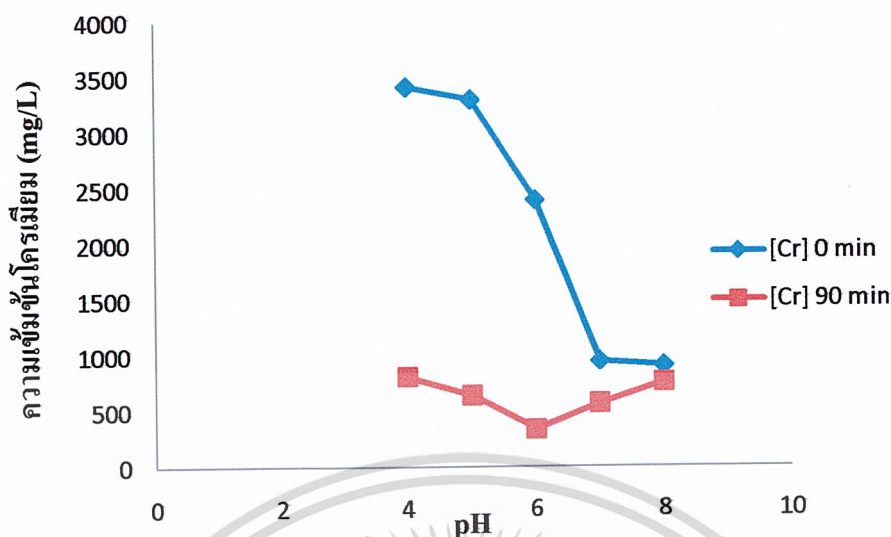
4.1.3 การศึกษาผลของพีเอชต่อการบำบัดโครเมียม

จากการศึกษาผลของพีเอชต่อการบำบัดโครเมียมที่พีเอช 4, 5, 6, 7, 8 โดยให้กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ซึ่งจะแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.5 ผลของ pH ต่อการบำบัดโครเมียม ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

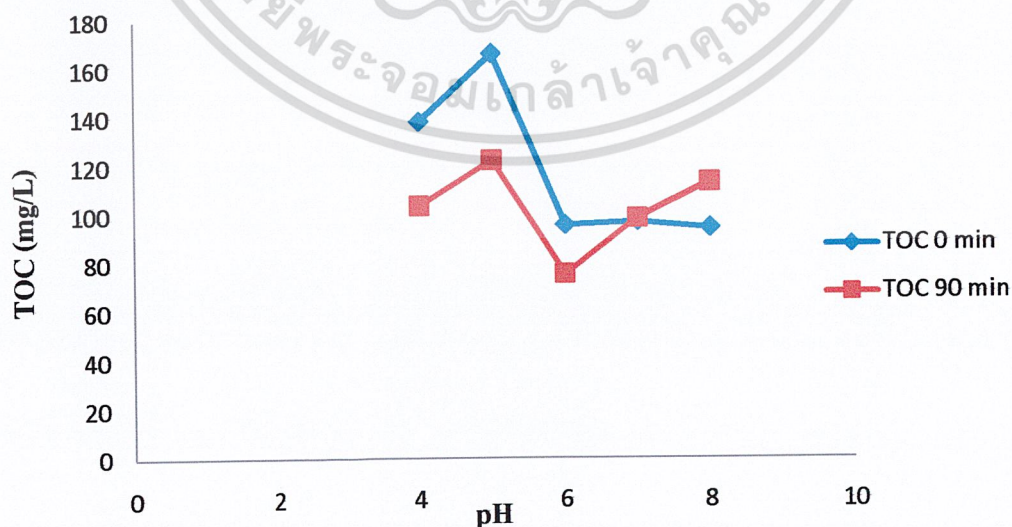


รูปที่ 4.6 ผลของ pH ต่อการบำบัดโครเมียม ที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมจะลดลง เนื่องจากค่าพีเอชที่สูงขึ้นจะมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ (OH^-) มาก โอกาสที่โครเมียมจะจับกับไฮดรอกไซด์จะมีมากกว่าที่ค่าพีเอชต่ำกว่า ดังนั้นในการปรับสภาพพีเอชสำหรับบำบัดให้เหมาะสม จะช่วยให้สามารถบำบัดโครเมียมได้ดีขึ้น ซึ่งจากกราฟ ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอชเท่ากับ 6

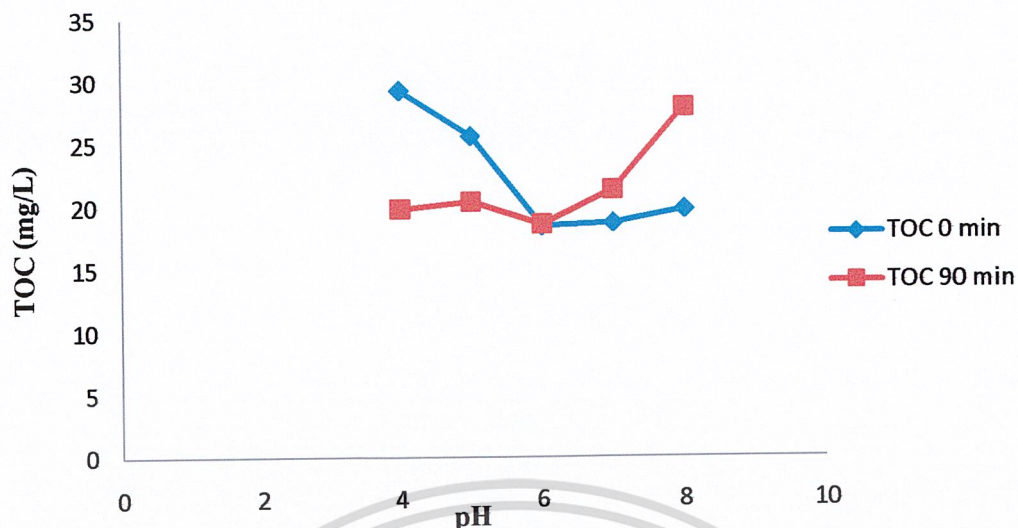
4.2 การศึกษาผลของการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม

จากการศึกษาผลของการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่พีเอช 4, 5, 6, 7 และ 8 ให้กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ โดยทำวัดปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนที่อยู่ในน้ำเสียก่อนและหลังผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดดังรูป 4.7 และ 4.8



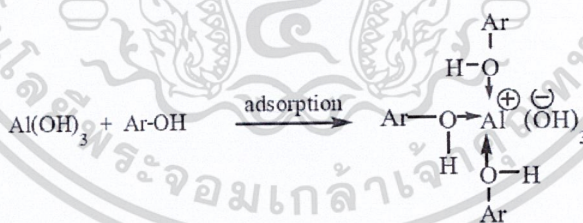
รูปที่ 4.7 ผลของค่า TOC ก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันที่กระแส 2 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลของค่า TOC ก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันที่กระแส 3 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันค่า TOC มีแนวโน้มลดลงเนื่องจากอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับ (adsorbent) หรือเป็นตัวช่วยในการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) มีลักษณะเป็นเจล (gelatin) ที่สามารถดูดซับโมเลกุลขนาดใหญ่เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไฮโดรคาร์บอนสายยาวๆ สารประกอบฟีนอลิก เช่น แทนนิน (tannin) แซนโทน (xanthone) ฟลาโวนอยด์ (flavonoide) แอนทราควิโนน (antraquinone) เป็นต้น แต่จะไม่ดูดซับโมเลกุลขนาดเล็กๆ เช่น น้ำตาล แอลกอฮอล์ เป็นต้น เกิดเป็นก้อนตะกอน (coagulum) ดังสมการ



ในน้ำเสียที่นำมาบำบัดเป็นน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนังซึ่งมีโปรตีนจากหนังสัตว์ปนอยู่ในน้ำทำให้ค่า TOC ที่วัดได้เมื่อผ่านระบบ EC แล้วมีค่าลดลงเนื่องมาจากเกิดการดูดซับโปรตีนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) จากกราฟทั้งสองกราฟที่พีเอช 7 และ 8 ค่า TOC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากโปรตีนและไฮดรอกไซด์ (OH^-) ต่างก็มีประจุเป็นลบจึงเกิดการผลักกันทำให้คอลลอยด์กลับมามีเสถียรภาพ (Stabilization) อีกครั้ง ค่า TOC จึงเพิ่มขึ้น

4.3 ผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม

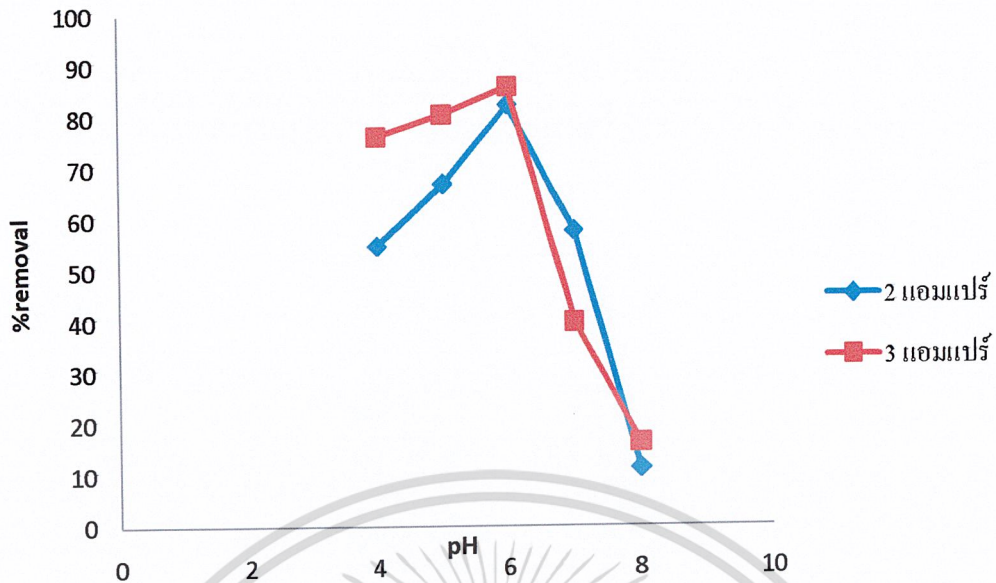
จากผลการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมโดยให้กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียมที่กระแส 2 และ 3 แอมแปร์คือ ที่ pH 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าสามารถกำจัดโครเมียมได้ถึง 82.32% และ 85.90% ที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่ pH อื่นๆจะแสดงรายละเอียด ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

| pH | ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L) | | ความเข้มข้นโครเมียมที่บำบัด ได้ (mg/L) | %removal |
|----|----------------------------|----------|--|----------|
| | เริ่มต้น | สิ้นสุด | | |
| 4 | 4051.000 | 1828.667 | 2222.333 | 54.86 |
| 5 | 4747.500 | 1569.667 | 3177.833 | 66.94 |
| 6 | 2781.833 | 491.833 | 2289.999 | 82.32 |
| 7 | 943.833 | 399.000 | 544.833 | 57.73 |
| 8 | 613.500 | 544.000 | 69.500 | 11.33 |

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

| pH | ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L) | | ความเข้มข้นโครเมียมที่บำบัด ได้ (mg/L) | %removal |
|----|----------------------------|---------|--|----------|
| | เริ่มต้น | สิ้นสุด | | |
| 4 | 3417.167 | 810.767 | 2606.400 | 76.27 |
| 5 | 3302.333 | 643.433 | 2658.899 | 80.52 |
| 6 | 2397.433 | 338.000 | 2059.433 | 85.90 |
| 7 | 946.000 | 568.667 | 377.333 | 39.89 |
| 8 | 905.167 | 757.667 | 147.500 | 16.30 |



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์

จากรูปที่ 4.9 พบว่าที่พีเอช 6 ทั้ง 2 กระแส จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมากที่สุดคือ 82.32% และ 85.90% ที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ตามลำดับซึ่งจากกราฟจะสังเกตเห็นว่าที่พีเอช 7 และ 8 ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมจะน้อยลงเนื่องจากที่พีเอช 7 และ 8 ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมมีค่าต่ำเมื่อเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมที่พีเอช 4, 5 และ 6 ที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงกว่าเนื่องจากมีไอออนของ Cr^{3+} สูงโอกาสที่ไอออนจะถูกจับโดย OH^- ก็มีมากจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่พีเอช 7 และ 8 ต่ำกว่าที่พีเอช 4, 5 และ 6

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการใช้วิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันเพื่อใช้บำบัดโครเมียม โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการบำบัดโครเมียมด้วยการศึกษาผลของเวลาต่อการกำจัดโครเมียมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ ผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช และผลของพีเอชต่อการบำบัดโครเมียม นอกจากนี้ยังทำการศึกษาผลของการบำบัดต่อค่า TOC และทำการศึกษาค่าความเข้มข้นของโครเมียมที่แสดงผลออกมา เพื่อนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบเพื่อดูประสิทธิภาพของการบำบัดโครเมียมออกจากน้ำเสียจากโรงฟอกหนัง ด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ พบว่าค่าความเข้มข้นของโครเมียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้นจะเกิดตะกอนของออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ซึ่งมีลักษณะเป็นฟุ้ง และหนักกว่าน้ำจึงจมตัวลงพร้อมกับการนำเอาตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ติดไปด้วย กลไกนี้เรียกว่าการดักจับโดยอนุภาคที่ตกตัว เมื่อทำการบำบัดเป็นเวลา 90 นาที ที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ ค่าพีเอช 4, 5, 6, 7, 8 จะมีความเข้มข้นของโครเมียมเหลือ 1,828.67, 1,569.67, 491.83, 399.00 และ 544.00 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์ ที่ค่าพีเอช 4, 5, 6, 7 และ 8 จะมีความเข้มข้นของโครเมียมเหลือ 810.77, 643.43, 338.00, 568.67 และ 757.667 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมที่พีเอช 6 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงที่สุดคือ 82.32% และ 85.90% ที่กระแสไฟฟ้า 2 และ 3 แอมแปร์ ตามลำดับ

2. จากการศึกษาผลของเวลาต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชพบว่าเมื่อเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงจากค่าเริ่มต้น เนื่องจากไฮดรอกไซด์ (OH^-) ที่เกิดขึ้นจากขั้วแคโทดจะรวมตัวกับโครเมียมในน้ำเสียเกิดการตกตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์ ($Cr(OH)_3$) ทำให้ปริมาณไฮดรอกไซด์ลดลงส่งผลให้ค่าพีเอชมีแนวโน้มลดลงจากพีเอชเริ่มต้น

3. จากการศึกษาผลของพีเอชต่อการบำบัดโครเมียม พบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นปริมาณความเข้มข้นของโครเมียมจะลดลง เนื่องมาจากค่าพีเอชที่สูงขึ้นจะมีปริมาณของไฮดรอกไซด์ (OH^-) มาก โอกาสที่โครเมียมจะจับกับไฮดรอกไซด์จะมีมากกว่าที่พีเอชต่ำกว่า ดังนั้นในการปรับสภาพพีเอชให้เหมาะสมจะช่วยให้สามารถบำบัดโครเมียมได้ดีขึ้นซึ่งจากกราฟพีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอชเท่ากับ 6

4. จากการศึกษาผลของการบำบัดต่อค่า TOC ก่อนและหลังการบำบัดด้วยวิธีอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันที่กระแส 2 และ 3 แอมแปร์ พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน ค่า TOC มีแนวโน้มลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเกิดการดูดซับโปรตีนของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$) ในโมเลกุลขนาดใหญ่ได้ดี จึงทำให้เกิดการตกตะกอนร่วมได้อย่างมีประสิทธิภาพที่พีเอช 6 และที่ค่าพีเอช 7 และ 8 พบว่าค่า TOC มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากโปรตีนและไฮดรอกไซด์ (OH^-) ต่างก็มีประจุเป็นลบจึงเกิดการผลักกันทำให้คอลลอยด์กลับมามีเสถียรภาพ (Stabilization) อีกครั้ง จึงทำให้ค่า TOC เพิ่มขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองด้วยวิธีระบบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า Electrocoagulation หรือ EC กับโรงงานฟอกหนัง โรงงานอื่นๆ ในประเภทอุตสาหกรรมเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้
2. ศึกษาด้วยวิธีระบบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า Electrocoagulation หรือ EC กับโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ เช่น งานบำบัดน้ำเสียชุมชน งานบำบัดน้ำเสียจากสถานีบริการน้ำมันเชื้อเพลิง งานบำบัดน้ำเสียจากศูนย์บริการรถยนต์ งานบำบัดน้ำเสียจากใต้ท้องเรือ เป็นต้น
3. ศึกษาด้วยวิธีระบบรวมอนุภาคด้วยไฟฟ้า Electrocoagulation กับโลหะหนักประเภทอื่นๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม.2549.คู่มือมาตรฐานการตรวจสอบ โรงงานฟอกหนัง.กรุงเทพฯ:สำนัก
 โรงงานอุตสาหกรรมรายสาขา2
- นवलพรรณ เอี่ยมจันทร์ และพรศิริ นิลศิริ.2551.การกำจัด โครเมียมจากน้ำเสียฟอกหนังโดยวิธีอิเล็ก
 โทรโคแอกกูเลชัน.สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยี
 พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
- ประไพ ประดับคำ.2550.การเตรียมสารสีเลคโดยการจับก้อนด้วยไฟฟ้า.สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่
- มันสิน ตันฑุลเวศม์.2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1.สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 ตังกรม์ คงเจาะ และคณะ.2548.การลดสารมลพิษในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังด้วยการตกตะกอน
 ร่วมด้วยกระแสไฟฟ้า.ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 กรุงเทพฯ
- สุรัชย์ ลิขนะไพบุลย์.2539.การส่งออกหนังฟอกสำเร็จรูปของประเทศไทย.วิทยานิพนธ์ คณะ
 บริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต กรุงเทพฯ
- สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ.2551.กระบวนการโคแอกกูเลชันด้วยไฟฟ้า.วารสารเทคนิค.ฉบับที่ 283:
 1-13 สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย (TDRI) .2540. คู่ทางและโอกาสการส่งออก
 และผลกระทบจากการมีเขตการค้าเสรีอาเซียน (สำหรับอุตสาหกรรมฟอกหนังและ
 อุตสาหกรรมผลิตเครื่องหนัง). สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย
- วาสนา ประภาเลิศ.2548 .การจับก้อนด้วยไฟฟ้าของส่วนประกอบที่มีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันจากต้น
 รกฟ้า.สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่
- วิชุดา กัลยาศิริ, ศศิสุภา บุญประเสริฐ และ นายชัยรัตน์ ภูมิรินทร์.2552.กระบวนการอิเล็กโทร
 โครแอกกูเลชันสำหรับการบำบัด โครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมโดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่
 มีกระแสสูง 12 และ 19 แอมแปร์.สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ
- APHA, AWWA and WEF. 1995. Standard Method for the Examination of Water and
 Wastewater. 19th Edition. USA : American Public Health Association.
- Geoff Rayner-Canham.2000. Descriptive inorganic chemistry. 2nd Edition.
- Golder A.K., Samanta A.N., Ray S..2006. **Removal of trivalent chromium by electrocoagulation.**
 Journal of Separation Purification Technology 53: 33-41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Golder A.K., Samanta A.N., Ray S..2007. **Removal of Cr³⁺ by electrocoagulation with multiple electrodes:Bipolar and monopolar configurations.** Journal of Hazardous Materials 141: 653-661

J.H. Westbrook, et al., **“Encyclopedia of Chemical Technology: Kird –Othmer”** Vol.5, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1964, pp.473-516

Jing-wei Ya-bing, Zheng, Ji-biao, Shu and Yuan-chun.2007. **Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation.** Journal of Environmental science 19: 1409-1415

M. Kobya, H. Hiz, E. Senturk, C. Aydiner, E. Demirbas.2006. **Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation.** Journal of Desalination 190: 201 - 211

Rayner-Canham, Geoff. 2000. **Descriptive inorganic chemistry.** 2nd edition: P. 233 - 235



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
เครื่องมือ และวิธีการวิเคราะห์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียทางเคมี

1. พีเอช (pH)

หลักการหาค่าพีเอชด้วยมาตรพีเอช โดยทั่วไป

- 1.1 ใช้น้ำกลั่นชนิดล้างแท่งอิเล็กโทรดให้สะอาด ใช้กระดาษเนื้อละเอียดซับน้ำให้แห้ง
- 1.2 ปรับเครื่องมือให้ได้ค่ามาตรฐานตามคำแนะนำในคู่มือของเครื่องมือชิ้นๆ โดยจุ่มอิเล็กโทรดลงในสารละลายมาตรฐานที่มีค่าพีเอชใกล้เคียงกับค่าของน้ำเสียตัวอย่าง
- 1.3 ใช้น้ำกลั่นล้างอิเล็กโทรดอีกครั้ง ซับน้ำให้แห้ง
- 1.4 วัดค่าพีเอชของตัวอย่างน้ำ (ตัวอย่างน้ำที่นำมาหาค่าจะต้องมีอุณหภูมิใกล้เคียงหรือเท่ากับอุณหภูมิของสารละลายมาตรฐานในข้อที่ 1.2)

หมายเหตุ: รายละเอียดนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้วนี้จะอ่านได้ในคู่มือประจำเครื่อง

2. สภาพนำไฟฟ้าจำเพาะ (Conductivity)

2.1 วิธี Conductivity Meter

อิเล็กโทรดหรือ Conductivity cell ที่ใช้ในการตรวจวัดนั้นก็มีหลายชนิดและมีจำนวนที่แตกต่างกัน ซึ่งเครื่องวัดโดยทั่วไปจะใช้ Conductivity cell ชนิด 2-pole cell

3. โครเมียม (Chromium)

วิธี Atomic Absorption Spectrophotometry

ก. หลักการ

การวิเคราะห์โครเมียมนี้ เปลวไฟที่เกิดจากก๊าซผสมระหว่างอากาศและอะเซทิลีนจะให้พลังงานที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรี เพื่อให้ดูดกลืนแสงที่ 357 นาโนเมตร

ข. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer
2. เครื่องแก้วอื่นๆ

ค. สารเคมี

1. น้ำกลั่นที่ปราศจากโครเมียม
2. กรดไนตริกเข้มข้น
3. สารละลายสต็อกโครเมียมเข้มข้น
4. สารละลายโครเมียมเข้มข้นปานกลางดูดสารละลายโครเมียมเข้มข้นจากข้อ 3 จำนวน 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ 100 มิลลิลิตร ในขวดวัดปริมาตร
(สารละลายโครเมียมนี้ 1 มิลลิลิตร = โครเมียม 10 ไมโครกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง. วิธีวิเคราะห์

1. การเตรียมตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับต้องการวัดในรูปโครเมียมทั้งหมด รูปละลายน้ำหรือแขวนลอย ถ้าต้องการวัดในรูปละลายน้ำต้องกรองตัวอย่างก่อน แล้วจึงนำตัวอย่างไปย่อยด้วยกรดไนตริกอย่างเดี่ยวหรือไนตริกซัลฟิวริก ตัวอย่างควรเติม H_2O_2 30% จำนวน 10 มิลลิลิตรต่อตัวอย่าง 100 มิลลิลิตร
2. การเตรียมกราฟมาตรฐาน เตรียมสารละลายมาตรฐานตามช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมอย่างน้อย 4 ความเข้มข้น เช่น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 สำหรับแบลนค์ใช้น้ำกลั่น ที่ปราศจากโครเมียมที่เติมกรดไนตริกเข้มข้น 1.5 มิลลิลิตรต่อ 1,000 มิลลิลิตร
3. เตรียมเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer ทำกราฟมาตรฐานแล้วนำตัวอย่างไปวัด

4. Total organic carbon (TOC)

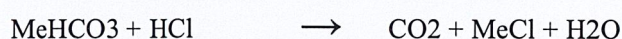
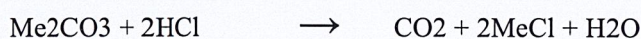
วิธี Combustion – Infrared

ก. หลักการ

วิธี Combustion – Infrared นั้นเป็นวิธีที่ใช้สำหรับตัวอย่างที่มีความหลากหลาย แต่ความแม่นยำนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่ลดลงด้วย เพราะวิธีนี้จะใช้เข็มดูดตัวอย่างที่มีขนาดเล็ก

ในการวิเคราะห์ตัวอย่างของวิธีนี้คือ ทำการดูดสารเข้าไปใน chamber ที่มีตัวเร่งการออกซิเดชัน เช่น โคบอลต์ออกไซด์ น้ำในตัวอย่างจะถูกเผาออก และสารอินทรีย์คาร์บอนนั้นก็ จะออกซิไดส์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการออกซิเดชันนั้น ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จะถูกพาโดยไอน้ำที่เป็น Carrier Gas และทำการวัดโดย เครื่องวิเคราะห์แบบ Non – dispersive Infrared

Total carbon มีหลักการ คือ Carrier gas จะไหลเข้าไปยัง Combustion tube ซึ่งถูกเติมด้วย Oxidation catalyst และให้ความร้อน $680^{\circ}C$ ตัวอย่างจะถูกเผากลายเป็น CO_2 จากนั้นจะเข้าสู่การกำจัดน้ำ และส่งไปยัง cell ของ NIDR gas analyzer ที่ทำหน้าที่ตรวจจับ CO_2 สัญญาณที่ได้ จะปรากฏในรูปของค่า peak และ peak จะเป็นสัดส่วนโดยกับความเข้มข้นของ TC ในน้ำตัวอย่าง ส่วนค่า Inorganic Carbon ในการวิเคราะห์ TOC คือ คาร์บอนที่มีใน CO_2 ที่ละลายในน้ำและพบในรูปของ carbonate การเติมกรดแก่ลงน้ำตัวอย่าง สารคาร์บอเนตทั้งหมดจะกลายเป็น CO_2 ดังสมการ



ก๊าซ CO_2 และ CO_2 ที่ละลายในน้ำตัวอย่างสามารถระเหยได้ด้วยการ Sparging ด้วยอากาศ หรือก๊าซที่ไม่มี CO_2 ผ่านเข้าไปในน้ำตัวอย่าง ซึ่ง $TOC = TC - IC$

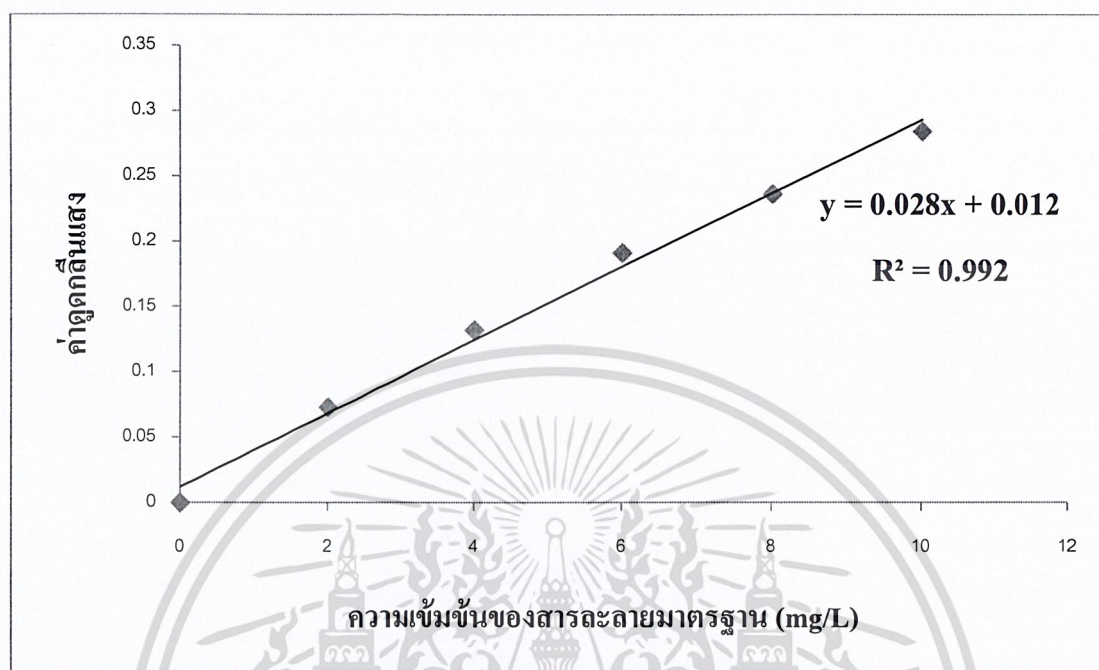
ภาคผนวก ข

กราฟมาตรฐานของโครเมียมและผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟมาตรฐานของโครเมียม



รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐาน โครเมียม

ตาราง ข-1 ข้อมูลของสารละลายมาตรฐาน โครเมียม

| ความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐาน(mg/L) | ค่าดูดกลืนแสง |
|---|---------------|
| 0 | 0 |
| 2 | 0.073 |
| 4 | 0.132 |
| 6 | 0.191 |
| 8 | 0.236 |
| 10 | 0.284 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลอง

ตารางที่ ข -2 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 แอมแปร์ ที่ค่า pH 4

| เวลา (นาที) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|----------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.47 | 4.00 | 3,766.00 |
| | 2 | 3.43 | 4.02 | 4,110.50 |
| | 3 | 3.39 | 4.04 | 4,276.50 |
| | เฉลี่ย | 3.43 | 4.02 | 4,051.00 |
| 10 | 1 | 4.00 | 4.11 | 2,903.50 |
| | 2 | 4.02 | 4.05 | 4,307.00 |
| | 3 | 4.04 | 4.00 | 4,760.00 |
| | เฉลี่ย | 4.02 | 4.05 | 3990.17 |
| 20 | 1 | 4.11 | 4.04 | 3,088.00 |
| | 2 | 4.05 | 3.94 | 4,132.00 |
| | 3 | 4.00 | 3.93 | 4,832.50 |
| | เฉลี่ย | 4.05 | 3.97 | 4017.50 |
| 30 | 1 | 4.04 | 3.97 | 2,939.00 |
| | 2 | 3.94 | 3.90 | 3,788.50 |
| | 3 | 3.93 | 3.88 | 3,957.50 |
| | เฉลี่ย | 3.97 | 3.91 | 3561.67 |
| 60 | 1 | 3.97 | 3.97 | 1,805.50 |
| | 2 | 3.90 | 3.82 | 2,522.50 |
| | 3 | 3.88 | 3.86 | 4,093.00 |
| | เฉลี่ย | 3.91 | 3.88 | 2807.00 |
| 90 | 1 | 3.97 | 3.89 | 1,201.00 |
| | 2 | 3.82 | 3.71 | 1,602.50 |
| | 3 | 3.86 | 3.87 | 2,682.50 |
| | เฉลี่ย | 3.88 | 3.82 | 1828.667 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข -3 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 แอมแปร์ ที่ค่า pH 5

| เวลา (นาท) | ชุดทดลอง ที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|---------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.48 | 5.01 | 3,297.50 |
| | 2 | 3.51 | 5.01 | 5,200.00 |
| | 3 | 3.40 | 5.01 | 5,745.00 |
| | เฉลี่ย | 3.46 | 5.01 | 4747.5 |
| 10 | 1 | 5.01 | 4.16 | 3,593.50 |
| | 2 | 5.01 | 4.21 | 5,345.00 |
| | 3 | 5.01 | 4.12 | 5,065.00 |
| | เฉลี่ย | 5.01 | 4.16 | 4667.833 |
| 20 | 1 | 4.16 | 4.09 | 2,996.50 |
| | 2 | 4.21 | 4.08 | 5,345.00 |
| | 3 | 4.12 | 4.00 | 4,574.00 |
| | เฉลี่ย | 4.16 | 4.05 | 4305.167 |
| 30 | 1 | 4.09 | 4.01 | 2,781.50 |
| | 2 | 4.08 | 4.04 | 4,406.50 |
| | 3 | 4.00 | 3.93 | 4,124.00 |
| | เฉลี่ย | 4.05 | 3.99 | 3770.667 |
| 60 | 1 | 4.01 | 3.92 | 1,716.50 |
| | 2 | 4.04 | 3.83 | 3,124.50 |
| | 3 | 3.93 | 3.86 | 2,416.50 |
| | เฉลี่ย | 3.99 | 3.87 | 2419.167 |
| 90 | 1 | 3.92 | 3.83 | 1,377.50 |
| | 2 | 3.83 | 3.65 | 1,853.50 |
| | 3 | 3.86 | 3.78 | 1,478.00 |
| | เฉลี่ย | 3.87 | 3.75 | 1,569.667 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข -4 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 แอมแปร์ ที่ค่า pH 6

| เวลา (นาท) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|---------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.47 | 6.00 | 2,490.00 |
| | 2 | 3.34 | 6.02 | 3,466.50 |
| | 3 | 3.34 | 6.00 | 2,389.00 |
| | เฉลี่ย | 3.38 | 6.01 | 2781.833 |
| 10 | 1 | 6.00 | 4.64 | 1,965.50 |
| | 2 | 6.02 | 4.88 | 2,107.00 |
| | 3 | 6.00 | 5.52 | 1,476.50 |
| | เฉลี่ย | 6.01 | 5.01 | 1849.67 |
| 20 | 1 | 4.64 | 4.39 | 1,651.00 |
| | 2 | 4.88 | 4.56 | 1,634.00 |
| | 3 | 5.52 | 5.20 | 963.00 |
| | เฉลี่ย | 5.01 | 4.71 | 1416.00 |
| 30 | 1 | 4.39 | 4.31 | 1,358.50 |
| | 2 | 4.56 | 4.48 | 1,092.00 |
| | 3 | 5.20 | 5.07 | 755.50 |
| | เฉลี่ย | 4.71 | 4.62 | 1068.67 |
| 60 | 1 | 4.31 | 4.20 | 1,063.50 |
| | 2 | 4.48 | 4.33 | 475.50 |
| | 3 | 5.07 | 5.21 | 512.00 |
| | เฉลี่ย | 4.62 | 4.58 | 683.67 |
| 90 | 1 | 4.20 | 4.18 | 805.00 |
| | 2 | 4.33 | 4.61 | 290.50 |
| | 3 | 5.21 | 5.40 | 380.00 |
| | เฉลี่ย | 4.58 | 4.73 | 491.83 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข -5 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 แอมแปร์ ที่ค่า pH 7

| เวลา (นาที) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|----------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.46 | 7.01 | 975.50 |
| | 2 | 3.31 | 7.02 | 926.00 |
| | 3 | 3.39 | 7.01 | 930.00 |
| | เฉลี่ย | 3.39 | 7.01 | 943.83 |
| 10 | 1 | 7.01 | 6.37 | 682.00 |
| | 2 | 7.02 | 6.65 | 266.50 |
| | 3 | 7.01 | 6.92 | 630.50 |
| | เฉลี่ย | 7.01 | 6.65 | 526.33 |
| 20 | 1 | 6.37 | 6.20 | 643.00 |
| | 2 | 6.65 | 6.48 | 405.50 |
| | 3 | 6.92 | 6.77 | 555.00 |
| | เฉลี่ย | 6.65 | 6.48 | 534.50 |
| 30 | 1 | 6.20 | 6.19 | 601.00 |
| | 2 | 6.48 | 6.37 | 189.50 |
| | 3 | 6.77 | 6.63 | 610.00 |
| | เฉลี่ย | 6.48 | 6.39 | 466.83 |
| 60 | 1 | 6.19 | 6.04 | 603.00 |
| | 2 | 6.37 | 6.30 | 156.00 |
| | 3 | 6.63 | 6.53 | 527.50 |
| | เฉลี่ย | 6.39 | 6.29 | 428.83 |
| 90 | 1 | 6.04 | 6.15 | 589.50 |
| | 2 | 6.30 | 6.22 | 103.50 |
| | 3 | 6.53 | 6.46 | 504.00 |
| | เฉลี่ย | 6.29 | 6.28 | 399.00 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข -6 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2 แอมแปร์ ที่ค่า pH 8

| เวลา (นาที) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|----------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.46 | 8.00 | 741.50 |
| | 2 | 3.39 | 8.01 | 503.00 |
| | 3 | 3.30 | 8.00 | 596.00 |
| | เฉลี่ย | 3.38 | 8.00 | 613.50 |
| 10 | 1 | 8.00 | 7.32 | 625.50 |
| | 2 | 8.01 | 7.52 | 447.00 |
| | 3 | 8.00 | 7.79 | 582.00 |
| | เฉลี่ย | 8.00 | 7.54 | 551.50 |
| 20 | 1 | 7.32 | 7.47 | 620.50 |
| | 2 | 7.52 | 7.38 | 385.00 |
| | 3 | 7.79 | 7.64 | 565.00 |
| | เฉลี่ย | 7.54 | 7.49 | 523.50 |
| 30 | 1 | 7.47 | 7.30 | 649.50 |
| | 2 | 7.38 | 7.26 | 385.00 |
| | 3 | 7.64 | 7.50 | 597.50 |
| | เฉลี่ย | 7.49 | 7.35 | 544.00 |
| 60 | 1 | 7.30 | 7.10 | 613.00 |
| | 2 | 7.26 | 7.02 | 371.50 |
| | 3 | 7.50 | 7.34 | 582.50 |
| | เฉลี่ย | 7.35 | 7.15 | 522.33 |
| 90 | 1 | 7.10 | 6.69 | 696.50 |
| | 2 | 7.02 | 6.98 | 366.00 |
| | 3 | 7.34 | 7.21 | 569.50 |
| | เฉลี่ย | 7.15 | 6.96 | 544.00 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข -7 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 แอมแปร์ ที่ค่า pH 4

| เวลา (นาท) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|---------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.48 | 4.00 | 2,623.50 |
| | 2 | 3.48 | 4.00 | 3,648.00 |
| | 3 | 3.46 | 4.00 | 3,980.00 |
| | เฉลี่ย | 3.47 | 4.00 | 3417.167 |
| 10 | 1 | 4.00 | 4.07 | 2,366.00 |
| | 2 | 4.00 | 4.02 | 3,222.50 |
| | 3 | 4.00 | 4.00 | 2,737.50 |
| | เฉลี่ย | 4.00 | 4.03 | 2775.333 |
| 20 | 1 | 4.07 | 3.96 | 2,070.00 |
| | 2 | 4.02 | 3.96 | 2,424.50 |
| | 3 | 4.00 | 3.93 | 2,665.00 |
| | เฉลี่ย | 4.03 | 3.95 | 2386.50 |
| 30 | 1 | 3.96 | 3.93 | 1,755.00 |
| | 2 | 3.96 | 3.97 | 1,710.50 |
| | 3 | 3.93 | 3.88 | 1,526.30 |
| | เฉลี่ย | 3.95 | 3.93 | 1663.93 |
| 60 | 1 | 3.93 | 3.93 | 1,118.50 |
| | 2 | 3.97 | 4.59 | 997.50 |
| | 3 | 3.88 | 3.92 | 925.00 |
| | เฉลี่ย | 3.93 | 4.15 | 1013.667 |
| 90 | 1 | 3.93 | 4.19 | 755.50 |
| | 2 | 4.59 | 5.39 | 885.00 |
| | 3 | 3.92 | 4.20 | 791.80 |
| | เฉลี่ย | 4.15 | 4.59 | 810.77 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข -8 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 แอมแปร์ ที่ค่า pH 5

| เวลา (นาทีก) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|-----------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.48 | 5.01 | 2,652.00 |
| | 2 | 3.46 | 5.00 | 3,305.00 |
| | 3 | 3.48 | 5.02 | 3950.00 |
| | เฉลี่ย | 3.47 | 5.01 | 3302.33 |
| 10 | 1 | 5.01 | 4.10 | 2,380.50 |
| | 2 | 5.00 | 4.09 | 2,584.00 |
| | 3 | 5.02 | 4.09 | 2,421.00 |
| | เฉลี่ย | 5.01 | 4.09 | 2461.833 |
| 20 | 1 | 4.10 | 4.03 | 1,957.50 |
| | 2 | 4.09 | 4.06 | 2,636.50 |
| | 3 | 4.09 | 4.00 | 2,306.00 |
| | เฉลี่ย | 4.09 | 4.03 | 2300.00 |
| 30 | 1 | 4.03 | 4.02 | 1,552.00 |
| | 2 | 4.06 | 3.93 | 2,149.00 |
| | 3 | 4.00 | 4.00 | 1,402.30 |
| | เฉลี่ย | 4.03 | 3.98 | 1701.10 |
| 60 | 1 | 4.02 | 4.00 | 982.50 |
| | 2 | 3.93 | 4.02 | 1,910.00 |
| | 3 | 4.00 | 4.04 | 732.00 |
| | เฉลี่ย | 3.98 | 4.02 | 1208.17 |
| 90 | 1 | 4.00 | 4.26 | 854.50 |
| | 2 | 4.02 | 4.26 | 510.50 |
| | 3 | 4.04 | 4.37 | 565.30 |
| | เฉลี่ย | 4.02 | 4.30 | 643.43 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข - 9 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณ
กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 แอมแปร์ ที่ค่า pH 6

| เวลา (นาที) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|----------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.50 | 6.01 | 1,828.00 |
| | 2 | 3.45 | 6.00 | 3,665.50 |
| | 3 | 3.48 | 6.00 | 1,698.80 |
| | เฉลี่ย | 3.48 | 6.00 | 2397.43 |
| 10 | 1 | 6.01 | 4.84 | 1,122.50 |
| | 2 | 6.00 | 4.79 | 1,186.00 |
| | 3 | 6.00 | 4.70 | 863.30 |
| | เฉลี่ย | 6.00 | 4.78 | 1057.27 |
| 20 | 1 | 4.84 | 4.87 | 912.50 |
| | 2 | 4.79 | 4.75 | 700.50 |
| | 3 | 4.70 | 4.75 | 456.30 |
| | เฉลี่ย | 4.78 | 4.79 | 689.77 |
| 30 | 1 | 4.87 | 5.29 | 881.00 |
| | 2 | 4.75 | 4.93 | 500.50 |
| | 3 | 4.75 | 5.09 | 297.30 |
| | เฉลี่ย | 4.79 | 5.10 | 559.60 |
| 60 | 1 | 5.29 | 5.47 | 728.00 |
| | 2 | 4.93 | 5.35 | 132.50 |
| | 3 | 5.09 | 5.73 | 167.30 |
| | เฉลี่ย | 5.10 | 5.52 | 342.60 |
| 90 | 1 | 5.47 | 5.70 | 738.00 |
| | 2 | 5.35 | 5.67 | 127.00 |
| | 3 | 5.73 | 5.75 | 149.00 |
| | เฉลี่ย | 5.52 | 5.71 | 338.00 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข - 10 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 แอมแปร์ ที่ค่า pH 7

| เวลา (นาท) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของ โครเมียม(mg/L) |
|---------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.46 | 7.01 | 1,039.00 |
| | 2 | 3.46 | 7.03 | 1,005.00 |
| | 3 | 3.53 | 7.06 | 794.00 |
| | เฉลี่ย | 3.48 | 7.03 | 946.00 |
| 10 | 1 | 7.01 | 6.22 | 877.50 |
| | 2 | 7.03 | 6.56 | 697.00 |
| | 3 | 7.06 | 6.91 | 366.50 |
| | เฉลี่ย | 7.03 | 6.56 | 647.00 |
| 20 | 1 | 6.22 | 6.03 | 771.50 |
| | 2 | 6.56 | 6.52 | 623.50 |
| | 3 | 6.91 | 6.29 | 317.50 |
| | เฉลี่ย | 6.56 | 6.28 | 570.83 |
| 30 | 1 | 6.03 | 5.62 | 790.00 |
| | 2 | 6.52 | 6.54 | 605.50 |
| | 3 | 6.29 | 6.47 | 315.00 |
| | เฉลี่ย | 6.28 | 6.21 | 570.17 |
| 60 | 1 | 5.62 | 6.23 | 781.50 |
| | 2 | 6.54 | 6.51 | 670.50 |
| | 3 | 6.47 | 6.52 | 306.50 |
| | เฉลี่ย | 6.21 | 6.42 | 586.17 |
| 90 | 1 | 6.23 | 6.17 | 685.50 |
| | 2 | 6.51 | 6.36 | 686.50 |
| | 3 | 6.52 | 6.40 | 334.00 |
| | เฉลี่ย | 6.42 | 6.31 | 568.67 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข - 11 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม เมื่อปริมาณ
กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 3 แอมแปร์ ที่ค่า pH 8

| เวลา (นาที) | ชุด ทดลองที่ | pH | | ความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L) |
|----------------|-----------------|----------|---------|----------------------------------|
| | | เริ่มต้น | สิ้นสุด | |
| 0 | 1 | 3.50 | 8.06 | 767.50 |
| | 2 | 3.47 | 7.98 | 1,080.00 |
| | 3 | 3.50 | 8.04 | 868.00 |
| | เฉลี่ย | 3.49 | 8.03 | 905.17 |
| 10 | 1 | 8.06 | 7.09 | 787.00 |
| | 2 | 7.98 | 7.52 | 990.00 |
| | 3 | 8.04 | 7.61 | 854.00 |
| | เฉลี่ย | 8.03 | 7.41 | 877.00 |
| 20 | 1 | 7.09 | 7.13 | 798.00 |
| | 2 | 7.52 | 7.31 | 897.50 |
| | 3 | 7.61 | 7.33 | 797.50 |
| | เฉลี่ย | 7.41 | 7.26 | 831.00 |
| 30 | 1 | 7.13 | 7.10 | 812.50 |
| | 2 | 7.31 | 7.22 | 749.00 |
| | 3 | 7.33 | 7.01 | 836.50 |
| | เฉลี่ย | 7.26 | 7.11 | 799.33 |
| 60 | 1 | 7.10 | 6.95 | 866.50 |
| | 2 | 7.22 | 7.04 | 786.50 |
| | 3 | 7.01 | 6.81 | 788.50 |
| | เฉลี่ย | 7.11 | 6.93 | 813.83 |
| 90 | 1 | 6.95 | - | 800.50 |
| | 2 | 7.04 | 6.78 | 685.00 |
| | 3 | 6.81 | 6.60 | 787.50 |
| | เฉลี่ย | 6.93 | 6.69 | 757.67 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข – 12 ผลการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (TOC) ออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม ที่ กระแส 2 แอมแปร์

| pH | ครั้งที่ | ที่ 0 นาที | ที่ 90 นาที |
|----|----------|------------|-------------|
| 4 | 1 | 44.92 | 52.48 |
| | 2 | 191.70 | 135.10 |
| | 3 | 178.80 | 123.90 |
| | เฉลี่ย | 138.47 | 103.82 |
| 5 | 1 | 137.00 | 103.10 |
| | 2 | 175.70 | 135.20 |
| | 3 | 186.30 | 129.00 |
| | เฉลี่ย | 166.33 | 122.43 |
| 6 | 1 | 29.05 | 51.18 |
| | 2 | 137.50 | 93.37 |
| | 3 | 120.50 | 82.26 |
| | เฉลี่ย | 95.68 | 75.60 |
| 7 | 1 | - | - |
| | 2 | 94.91 | 90.91 |
| | 3 | 99.03 | 106.00 |
| | เฉลี่ย | 96.97 | 98.45 |
| 8 | 1 | 104.00 | 116.10 |
| | 2 | 83.79 | 109.00 |
| | 3 | 95.56 | 114.70 |
| | เฉลี่ย | 94.45 | 113.26 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข – 13 ผลการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอน (TOC) ออกจากน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม ที่ กระแส 3 แอมแปร์

| pH | ครั้งที่ | ที่ 0 นาที | ที่ 90 นาที |
|----|----------|------------|-------------|
| 4 | 1 | 18.77 | 15.85 |
| | 2 | 32.15 | 19.98 |
| | 3 | 36.92 | 23.64 |
| | เฉลี่ย | 29.28 | 19.82 |
| 5 | 1 | 16.92 | 19.94 |
| | 2 | 31.59 | 23.00 |
| | 3 | 28.43 | 18.27 |
| | เฉลี่ย | 25.64 | 20.40 |
| 6 | 1 | 13.17 | 18.06 |
| | 2 | 18.49 | 20.72 |
| | 3 | 23.73 | 17.00 |
| | เฉลี่ย | 18.59 | 18.46 |
| 7 | 1 | 16.72 | 18.90 |
| | 2 | 20.27 | 21.46 |
| | 3 | 19.04 | 23.68 |
| | เฉลี่ย | 18.67 | 21.34 |
| 8 | 1 | 18.10 | 22.55 |
| | 2 | 20.66 | 25.90 |
| | 3 | 20.47 | 35.20 |
| | เฉลี่ย | 19.74 | 27.88 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และการลดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัด

ประสิทธิภาพการบำบัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครม สามารถคำนวณ % Removal ได้ดังนี้

$$\%Removal = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \times 100$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของโครเมียมก่อนทำการบำบัด

C_1 คือ ความเข้มข้นของโครเมียมหลังทำการบำบัด

ตัวอย่างการคำนวณ

การหาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์ และค่า pH เท่ากับ 4

ความเข้มข้นของโครเมียมก่อนทำการบำบัด = 5,745 mg/L

ความเข้มข้นของโครเมียมหลังทำการบำบัด = 4,051 mg/L

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม} &= \left(\frac{5,745 - 4,051}{5,745} \right) \times 100 \\ &= 29.49\% \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-1 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมแปร์

| pH | ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L) | | ความเข้มข้นโครเมียมที่บำบัด ได้ (mg/L) | %removal |
|----|----------------------------|----------|--|----------|
| | เริ่มต้น | สิ้นสุด | | |
| 4 | 4051.000 | 1828.667 | 2222.333 | 54.86 |
| 5 | 4747.500 | 1569.667 | 3177.833 | 66.94 |
| 6 | 2781.833 | 491.833 | 2289.999 | 82.32 |
| 7 | 943.833 | 399.000 | 544.833 | 57.73 |
| 8 | 613.500 | 544.000 | 69.500 | 11.33 |

ตารางที่ ค-2 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า 3 แอมแปร์

| pH | ความเข้มข้นโครเมียม (mg/L) | | ความเข้มข้นโครเมียมที่บำบัดได้ (mg/L) | %removal |
|----|-------------------------------|---------|--|----------|
| | เริ่มต้น | สิ้นสุด | | |
| 4 | 3417.167 | 810.767 | 2606.400 | 76.27 |
| 5 | 3302.333 | 643.433 | 2658.899 | 80.52 |
| 6 | 2397.433 | 338.000 | 2059.433 | 85.90 |
| 7 | 946.000 | 568.667 | 377.333 | 39.89 |
| 8 | 905.167 | 757.667 | 147.500 | 16.30 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า
2 แอมแปร์

| pH | ค่า TOC (mg/L) | | ค่า TOC ที่บำบัดได้ (mg/L) | %removal |
|----|----------------------|----------------------|-------------------------------|----------|
| | เริ่มต้น (0 นาที) | สิ้นสุด (90 นาที) | | |
| 4 | 138.47 | 103.82 | 34.65 | 25.02 |
| 5 | 166.33 | 122.43 | 43.90 | 26.40 |
| 6 | 95.68 | 75.60 | 20.08 | 21.00 |
| 7 | 96.97 | 98.45 | -1.48 | -1.53 |
| 8 | 94.45 | 113.26 | -18.81 | -19.92 |

ตารางที่ ค-4 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสียจากอ่างฟอกโครมที่กระแสไฟฟ้า
3 แอมแปร์

| pH | ค่า TOC (mg/L) | | ค่า TOC ที่บำบัดได้ (mg/L) | %removal |
|----|----------------------|----------------------|-------------------------------|----------|
| | เริ่มต้น (0 นาที) | สิ้นสุด (90 นาที) | | |
| 4 | 29.28 | 19.82 | 9.46 | 32.31 |
| 5 | 25.64 | 20.40 | 5.24 | 20.44 |
| 6 | 18.59 | 18.46 | 0.13 | 0.70 |
| 7 | 18.67 | 21.34 | -2.67 | -14.30 |
| 8 | 19.74 | 27.88 | -8.14 | -41.24 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้