

การกำจัดสี่อมีร์แอกทีฟโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี



นางสาววรรษวรรณ เทียงวรรณกานต์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3620-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REACTIVE DYE REMOVAL BY USING
ELECTROCOAGULATION PROCESS AND CHEMICAL COAGULATION



Miss.Vassavan Teangvannakant

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3620-7

| | |
|-------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า และการตกตะกอนทางเคมี |
| โดย | นางสาววรรษวรรณ เทียงวรรณกานต์ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง ไฉ่ห้วงศ์วัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.พิชญ์ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เชมรัฐ โอสถาพันธุ์)

วรรณวรรณ เทียงวรรณกานต์ : การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้อิทธิพลของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี. (REACTIVE DYE REMOVAL BY USING ELECTROCOAGULATION PROCESS AND CHEMICAL COAGULATION)
 อ. ที่ปรึกษา : รศ.อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์, จำนวนหน้า 160 หน้า. ISBN 974-17-3620-7

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้อิทธิพลของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งแบ่งเป็น 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 จะทำเพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์สีสีแดง (CI Reactive Red 180) ความเข้มข้น 200 mg/l ซึ่งจะปรับเปลี่ยนชนิดของขั้วไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส ปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ 3 ค่า คือ 10 โวลต์, 20 โวลต์ และ 30 โวลต์ ปรับเปลี่ยนค่าเวลาเก็บกักตั้งแต่ 0.5 - 3 ชั่วโมง ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า 8 ค่า คือ 0.5 x 6.5, 3 x 6.5, 4 x 6.5, 5 x 6.5, 6.5 x 6.5, 8 x 6.5 และ 11 x 6.5 ตารางเซนติเมตร ค่าพีเอช 4 ค่า คือ พีเอช 3, พีเอช ปกติ, พีเอช 7 และ พีเอช10 และปรับค่าความนำไฟฟ้าให้เท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียรวมและน้ำเสียจากหม้อย้อม เป็น 7.2 ms/cm กับ 72 ms/cm พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้ขั้วเหล็กขนาด 3 x 6.5 cm ขึ้นไป ใช้ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ โดยใช้เวลา 1.5 ชม. ถ้าไม่ทำการปรับค่าความนำไฟฟ้า แต่ถ้ามีการปรับค่าความนำไฟฟ้าเป็น 7.2 ms/cm จะใช้ความต่างศักย์ที่ 6.4 โวลต์ และเวลาที่ใช้จะเหลือเพียง 30 นาที และการทดลองที่ 2 จะศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทางเคมีที่ไม่ผ่านและหลังผ่านการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่าการใช้วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็สามารถกำจัดสีได้มีประสิทธิภาพเป็นอย่างดี ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย โดยสามารถกำจัดสีได้สูงมากถึงร้อยละ 96 ขึ้นไป ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสีโอดีไม่สูงมากนักเพียงร้อยละ 55 ซึ่งยืนยันได้ว่ากำจัดสีไม่ได้เกิดจากการตกตะกอนของสีย้อมเพียงอย่างเดียวแต่สีมีการเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อมโดยเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน พีเอชของน้ำหลังการทดลองมีค่าสูงมากขึ้นเท่ากับ 9 อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นถึง 38 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 40 มล./ ลิตร. การทดลองที่ 3 คือการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียจริงจากโรงฟอกย้อม โดยใช้สีย้อมก่อนผ่านการบำบัดและน้ำเสียจากหม้อย้อมซึ่งมีความเข้มข้นสี 500 mg/l โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น แต่มีการเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ทดลองและค่าความต่างศักย์เป็น 2 นาที และ 6.4 โวลต์ สำหรับน้ำเสียรวม เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นน้อยลงและค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.7 บ./ม³ และสำหรับน้ำเสียจากหม้อย้อมจะใช้เวลาเท่ากับ 1.5 ชม.เพราะความเข้มข้นสีสูงขึ้นและความต่างศักย์เท่ากับ 2 โวลต์ เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นมากซึ่งมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ โดยค่าไฟฟ้าเท่ากับ 31.95 บ./ม³ จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะมากถึงร้อยละ 85 และ 98 ขึ้นไป ซึ่งถือว่าเป็นที่น่าพอใจ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2546

4470514221 : MAJOR Environmental Engineering

KEYWORD : Reactive dye / Dye removal / Electrocoagulation / Chemical coagulation

VASSAVAN TEANGVANNAKANT : REACTIVE DYE REMOVAL BY USING ELECTROCOAGULATION PROCESS AND CHEMICAL COAGULATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALAPARIT, 160 pp , ISBN 974-17-3620-7

The objective of this research was to study the feasibility of reactive dye removal in wastewater by using electrocoagulation and chemical coagulation processes. This study was divided into 3 part, The first part was the study of optimum removal efficiencies of reactive dye (Cl Reactive Red 180) at concentration of 200 mg/l by using electrocoagulation process. Variables such as type of anode using iron, aluminum and stainless were test in this study. Voltage was varied at 10 volt, 20 volt and 30 volt. Retention time was varied from 0.5 to 3 hour. Size of anode was varied from 0.5 x 6.5 to 11 x 6.5 cm². Values of pH were varied between 3 – 10. Conductivity of synthetic wastewater were varied at 7.2 and 72 ms/cm. The optimum condition for reactive dye removal at conductivity of 7.2 ms/cm was achieved by using iron anode size up to 3 x 6.5 cm , voltage of 30 volt , retention time of 1.5 hr. When conductivity was increased to 72 ms/cm voltage and retention time could be reduce to 6.4 volt and 30 minute, respectively. The second part of the study was the optimum removal efficiencies of dye using chemical coagulation after Electrocoagulation process. The result showed that the chemical coagulation process was not necessary because the electrocoagulation process alone could result in high removal efficiencies of color (higher than 96%) and COD removal of 55%. This result confirmed that the mechanism for dye removal by electrocoagulation process were oxidation together with coagulation by anode with iron from. The pH of water after treatment was 9. Heat energy was changed by electricity so that temperature up to 38 C^o and volume of sludge was 40 ml/l. The final part of the study was the removal efficiencies of 2 types of textile wastewater, namely combined wastewater and wastewater from dye pot. The result from by electrocoagulation process alone. Showed that combined wastewater was colorless shortly thus retention time and voltage could be reduced to 5 minute and 6.4 volt, electric resulting in cost of 2.7 bth/m³. The dye wastewater from dye pot used retention time of 1.5 hr. Voltage could be reduced to 2 volt because conductivity was higher. And electricity cost was 31.95 bth/m³. The removal efficiencies of color were achieved up to 85% and 98% for combined and dye pot wastewater and is satisfactory.

Department Environmental Engineering
 Field of Study Environmental Engineering
 Academic Year 2003

Student's signature *Vassavan Teangvannakant*
 Advisor' signature *Orathai Chavalaparit*

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของท่านทั้งหลายเหล่านี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งสละเวลาคอยให้ความรู้ คำแนะนำ ปรับปรุง แก้ไขวิทยานิพนธ์ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ รวมทั้งช่วยเหลือและสนับสนุนทุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. บุญยง โฉมวงศ์วัฒน์, อาจารย์ ดร.เชมรัฐ โสธาทินันท์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ ดร.พิชญ์ รัชฎาวงศ์ ผู้ซึ่งให้ความรู้และข้อมูลอันเป็นแนวทางทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณยิ่งจิต ศิขรินกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์นำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อมบริษัทอุตสาหกรรมรามาทেকซ์ไทล์ (1988 จำกัด)

ขอขอบคุณคุณคุณครูจันทวรรณ และพี่กลอยกาญจน์ที่ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ ในการทำวิจัยและวิเคราะห์ผลในห้องปฏิบัติการจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนร่วมจากโครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณ พี่เอก กัม พี่หน้อย พี่อ้อย พี่หมวย เมย์ พี่หนึ่ง พี่โอ พี่เต๋า พี่นุก พี่ต๋อย น้องนวล เพื่อน ๆ และน้อง ๆ โดยเฉพาะออร์เพื่อนรักและเพื่อนปาล์ม สำหรับร่างกายแรงใจและความช่วยเหลือต่าง ๆ มากมายในทุก ๆ ด้าน

ท้ายที่สุด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ คุณตา คุณยาย คุณปู่ คุณย่า น้องแอม พี่ป้อมและน้ำ ๆ ที่คอยสนับสนุนด้านการศึกษาและเป็นกำลังใจอันแสนอบอุ่นเสมอมา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฐ |
| สารบัญรูป..... | ฌ |
| สารบัญภาพ..... | ต |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 การย้อมสี..... | 4 |
| 2.1.1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม..... | 5 |
| 2.1.2 ปัญหาเนื่องจากมีสีย้อมในน้ำเสีย..... | 6 |
| 2.2 สีย้อม..... | 7 |
| 2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม..... | 7 |
| 2.2.2 การมองเห็น..... | 8 |
| 2.2.3 การจำแนกสีย้อม..... | 9 |
| 2.2.3.1 การจำแนกตามลักษณะทางกายภาพ..... | 9 |
| 2.2.3.2 การจำแนกตามวิธีใช้..... | 9 |
| 2.2.3.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี..... | 10 |
| 2.2.4 ข้อมูลสีย้อมรีแอกทีฟที่ใช้..... | 11 |
| 2.2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ..... | 17 |
| 2.2.4.2 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี..... | 17 |
| 2.2.4.3 กลุ่มรีแอกทีฟ..... | 18 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.3 การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม..... | 20 |
| 2.3.1 การกำจัดสีโดยวิธีทางกายภาพ..... | 20 |
| 2.3.2 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางเคมี..... | 20 |
| 2.3.3 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพ..... | 21 |
| 2.4 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี..... | 21 |
| 2.4.1 โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ หรือ PACL..... | 21 |
| 2.4.2 คุณสมบัติ PACLเมื่อเป็นโคแอกกูแลนต์..... | 22 |
| 2.4.3 กลไกการตกตะกอนด้วยPACL..... | 22 |
| 2.5 กระบวนการออกซิเดชัน..... | 23 |
| 2.5.1 ไฮโปคลอไรต์..... | 23 |
| 2.6 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี..... | 24 |
| 2.6.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้า..... | 25 |
| 2.6.1.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า..... | 25 |
| 2.6.1.2 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน..... | 27 |
| 2.6.1.3 ค่าการนำไฟฟ้า..... | 30 |
| 2.6.1.4 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ..... | 31 |
| 2.6.1.5 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี..... | 31 |
| 2.6.1.6 ขั้วไฟฟ้า (electrode)..... | 32 |
| 2.6.1.7 ปัจจัยที่ต้องควบคุมของเซลล์ไฟฟ้าเคมี..... | 34 |
| 2.6.1.8 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิบัติการไฟฟ้าเคมี..... | 34 |
| 2.6.2 ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการกำจัดสีโดยวิธี Electrocoagulation..... | 35 |
| 2.6.2.1 การกำจัดสีโดยกระบวนการออกซิเดชัน..... | 36 |
| 2.6.2.2 การกำจัดสีโดยการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์..... | 37 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 40 |
| 2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดสีย้อมโดยวิธีไฟฟ้าเคมี และการตกตะกอนทางเคมี..... | 40 |
| 2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดสีย้อมโดยวิธีอื่น..... | 45 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย..... | 50 |
| 3.1 แผนการทดลอง..... | 50 |
| 3.1.1 การทดลองที่ 1..... | 50 |
| 3.1.2 การทดลองที่ 2..... | 51 |
| 3.1.3 การทดลองที่ 3..... | 51 |
| 3.2 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์..... | 56 |
| 3.3 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง..... | 56 |
| 3.4 อุปกรณ์การทดลอง..... | 56 |
| 3.5 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ..... | 62 |
| 3.5.1 การวัดสี..... | 62 |
| 3.6 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตะกอน..... | 63 |
| 3.7 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์น้ำเสีย..... | 63 |
| 3.8 น้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง..... | 63 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์..... | 66 |
| 4.1 การทดลองที่ 1..... | 67 |
| 4.1.1 การทดลองหาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 67 |
| 4.1.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดี..... | 67 |
| 4.1.1.2 สีเอสยูและเอดีเอ็มไอ..... | 68 |
| 4.1.1.3 คุณภูมิ..... | 69 |
| 4.1.1.4 พีเอช..... | 69 |
| 4.1.1.5 ไออาร์พี..... | 70 |
| 4.1.1.6 ความนำไฟฟ้า..... | 70 |
| 4.1.1.7 กระแสไฟฟ้า..... | 71 |
| 4.1.1.8 ของแข็งแขวนลอย..... | 71 |
| 4.1.1.9 ปริมาณตะกอน..... | 71 |
| 4.1.1.10 น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สลายไปหลังการทดลอง..... | 72 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.1.1.11สรุปชนิดของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 73 |
| 4.1.2 การทดลองปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า..... | 73 |
| 4.1.2.1ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 74 |
| 4.1.2.2 สีเอสยูและเอดีเอ็มไอ..... | 75 |
| 4.1.2.3 คุณภูมิ..... | 76 |
| 4.1.2.4 พีเอช..... | 76 |
| 4.1.2.5 ไออาร์พี..... | 77 |
| 4.1.2.6 ความนำไฟฟ้า..... | 77 |
| 4.1.2.7 กระแสไฟฟ้า..... | 78 |
| 4.1.2.8 ของแข็งแขวนลอย..... | 78 |
| 4.1.2.9 ปริมาณตะกอน..... | 79 |
| 4.1.2.10น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สลายตัวไปหลังการทดลอง..... | 80 |
| 4.1.2.11สรุปค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม..... | 80 |
| 4.1.3 การทดลองเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม..... | 81 |
| 4.1.3.1ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 81 |
| 4.1.3.2 สีเอสยูและเอดีเอ็มไอ..... | 82 |
| 4.1.3.3 คุณภูมิ..... | 83 |
| 4.1.3.4 พีเอช..... | 84 |
| 4.1.3.5 ไออาร์พี..... | 84 |
| 4.1.3.6 ความนำไฟฟ้า..... | 85 |
| 4.1.3.7 กระแสไฟฟ้า..... | 85 |
| 4.1.3.8 ของแข็งแขวนลอย..... | 85 |
| 4.1.3.9 ปริมาณตะกอน..... | 85 |
| 4.1.3.10น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป..... | 86 |
| 4.1.3.11สรุปการหาเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม..... | 87 |
| 4.1.4 การทดลองขนาดพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 87 |
| 4.1.4.1 กระแสไฟฟ้า..... | 87 |
| 4.1.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี..... | 89 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.1.4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสี..... | 89 |
| 4.1.4.4 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน..... | 90 |
| 4.1.4.5 น้ำหนักขี้เหล็กที่สลายไปจากขี้แอมโมเนีย..... | 91 |
| 4.1.4.6 สรุปพื้นที่ผิวของขี้ไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 91 |
| 4.1.5 การทดลองค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม..... | 92 |
| 4.1.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 92 |
| 4.1.5.2 พีเอช..... | 94 |
| 4.1.5.3 กระแสไฟฟ้า..... | 95 |
| 4.1.5.4 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน..... | 95 |
| 4.1.5.5 น้ำหนักขี้ไฟฟ้าที่ใช้ไป..... | 96 |
| 4.1.5.6 สรุปค่าพีเอชของน้ำเสียที่เหมาะสม..... | 96 |
| 4.1.6 การทดลองค่าความนำไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 97 |
| 4.1.6.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 98 |
| 4.1.6.2 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน..... | 99 |
| 4.1.6.3 สรุปค่าความนำไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 100 |
| 4.1.7 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์..... | |
| โดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 101 |
| 4.1.8 กลไกการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน..... | 101 |
| 4.2 การทดลองที่ 2..... | 103 |
| 4.2.1 การหาปริมาณ PACLที่เหมาะสม..... | 103 |
| 4.2.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 103 |
| 4.2.1.2 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน..... | 104 |
| 4.2.2 การหาปริมาณ PACLที่เหมาะสมหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอน..... | |
| ด้วยไฟฟ้าโดยการตกตะกอนทางเคมี..... | 105 |
| 4.2.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 106 |
| 4.2.2.2 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน..... | 107 |
| 4.2.3 สรุปผลการตกตะกอนทางเคมี..... | 109 |

สารบัญ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.3 การทดลองที่ 3..... | 110 |
| 4.3.1 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำเสียรวมจากโรงงานฟอกย้อม..... | 110 |
| 4.3.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 110 |
| 4.3.1.2 สีเอชยูและเอดีเอ็มไอ..... | 110 |
| 4.3.1.3 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน..... | 113 |
| 4.3.1.4 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีน้ำเสียรวม..... | |
| จากโรงงานฟอกย้อม..... | 114 |
| 4.3.2 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำเสียจากหม้อย้อม..... | 115 |
| 4.3.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 115 |
| 4.3.2.2 สีเอชยูและเอดีเอ็มไอ..... | 115 |
| 4.3.2.3 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน..... | 117 |
| 4.3.2.4 ปริมาณขี้ไฟฟ้าที่ใช้ไป..... | 118 |
| 4.3.2.5 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีน้ำเสียจากหม้อย้อม..... | 119 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 120 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 120 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 122 |
| รายการอ้างอิง..... | 123 |
| ภาคผนวก..... | 128 |
| ภาคผนวก ก. ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง..... | 135 |
| ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง HPLC..... | 141 |
| ภาคผนวก ค. ผลการวัดสีด้วยเครื่องSpectrophotometer..... | 145 |
| ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์ตะกอนตัวอย่างด้วยเครื่อง FTIR..... | 150 |
| ภาคผนวก จ. ข้อมูลค่าพารามิเตอร์และกราฟของกระบวนการรวมตะกอนด้วย | |
| ไฟฟ้าที่เวลา 0 – 90 นาที..... | 152 |
| ภาคผนวก ฉ. รูปภาพการทดลอง..... | 154 |
| ภาคผนวก ช. วิธีการคำนวณ..... | 157 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 160 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม..... | 5 |
| ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี..... | 12 |
| ตารางที่ 2.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน..... | 15 |
| ตารางที่ 2.4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกระจายโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ ในสีรีแอกทีฟแบ่งตามโทนสีต่างๆ..... | 18 |
| ตารางที่ 2.5 ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE | 26 |
| ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส..... | 28 |
| ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์..... | 57 |
| ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์..... | 62 |
| ตารางที่ 3.3 ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัด..... | 65 |
| ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 67 |
| ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาความต่างศักย์ที่เหมาะสม..... | 74 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ..... | 81 |
| ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม..... | 82 |
| ตารางที่ 4.5 ค่าไฟฟ้าที่เวลาการเกิดปฏิกิริยา 1.5 – 3 ชม..... | 87 |
| ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยผลการหาขนาดพื้นที่หน้าตัดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 88 |
| ตารางที่ 4.7 อัตราการสลายของเหล็กจากขั้วแอโนด/พ.ท.ผิวหน้าตัดของขั้วไฟฟ้า..... | 92 |
| ตารางที่ 4.8 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดที่พื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ..... | 92 |
| ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม..... | 93 |
| ตารางที่ 4.10 ค่าไฟฟ้าเมื่อปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์..... | 97 |
| ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองหาค่าความนำไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 98 |
| ตารางที่ 4.12 พลังงานและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 100 |
| ตารางที่ 4.13 การตกตะกอนทางเคมีของน้ำเสียสีสังเคราะห์..... | 103 |
| ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองหาปริมาณ PACL ที่เหมาะสมหลังผ่าน การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 106 |
| ตารางที่ 4.15 ค่าใช้จ่ายโดยรวมเปรียบเทียบกับ การตกตะกอนทางเคมี..... | 109 |

สารบัญตาราง(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียรวม..... | 111 |
| ตารางที่ 4.17 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียรวม..... | 114 |
| ตารางที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสีย..... | |
| จากหม้อต้ม..... | 116 |
| ตารางที่ 4.19 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากหม้อต้ม..... | 119 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างสีรีแอคทีฟ โทนสีแดง (C.I. Reactive 180)..... | 3 |
| รูปที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในขั้นตอนของกระบวนการ..... | |
| ฟอกย้อมเส้นด้าย..... | 4 |
| รูปที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในขั้นตอนของกระบวนการ..... | |
| ฟอกย้อมผ้าทอ, ผ้าถัก..... | 5 |
| รูปที่ 2.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี..... | 13 |
| รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution..... | 19 |
| รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition..... | 19 |
| รูปที่ 2.6 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี..... | 24 |
| รูปที่ 2.7 ตัวอย่างเครื่องปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ..... | 35 |
| รูปที่ 2.8 ทฤษฎี Elctrical Double Layer | 39 |
| รูปที่ 2.9 การติดตั้งถังปฏิกิริยาแบบเท..... | 41 |
| รูปที่ 2.10 ไดอะแฟรมของถังปฏิกิริยาแบบ3เพลส3โดเมนชั้น..... | 42 |
| รูปที่ 2.11 การแตกโครงสร้างของสี C.I. Reactive Red 141..... | 46 |
| รูปที่ 3.1 แผนผังการศึกษาหาชนิดของขั้วไฟฟ้า..... | 51 |
| รูปที่ 3.2 แผนผังการศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 52 |
| รูปที่ 3.3 แผนผังการศึกษาเวลาเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม..... | 52 |
| รูปที่ 3.4 แผนผังการศึกษาขนาดพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม..... | 53 |
| รูปที่ 3.5 แผนผังการศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม..... | 53 |
| รูปที่ 3.6 แผนผังการศึกษาความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม..... | 54 |
| รูปที่ 3.7 แผนผังการทดลองตกตะกอนด้วย PACL..... | 55 |
| รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลองรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ากับน้ำเสียสีย้อมจริง..... | 55 |
| รูปที่ 3.9 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง..... | 61 |
| รูปที่ 3.10 อุปกรณ์การทดลองโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี..... | 61 |
| รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า3ชนิด..... | 68 |
| รูปที่ 4.2 คุณภูมิและพีเอชก่อนและหลังทดลอง..... | 70 |
| รูปที่ 4.3 สารแขวนลอยหลังการทดลอง..... | 72 |
| รูปที่ 4.4 ปริมาณตะกอนหลังการทดลอง..... | 72 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.5 ปริมาณชั่วไฟฟ้าที่ใช้ไป..... | 73 |
| รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพกำจัดสีและซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อแปรเปลี่ยน..... | |
| ความต่างศักย์ของชั่วไฟฟ้า..... | 75 |
| รูปที่ 4.7 ค่าพีเอชและอุณหภูมิหลังการทดลองปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า..... | 77 |
| รูปที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน..... | 78 |
| รูปที่ 4.9 ของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนความต่างศักย์..... | 79 |
| รูปที่ 4.10 ปริมาณตะกอนหลังทดลองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน..... | 79 |
| รูปที่ 4.11 ปริมาณชั่วเหล็กที่สลายไปหลังทดลองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 ค่า..... | 80 |
| รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีที่เวลาเกิดปฏิกิริยาต่างกัน..... | 83 |
| รูปที่ 4.13 อุณหภูมิและพีเอชก่อนและหลังทดลองที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น..... | 84 |
| รูปที่ 4.14 สารแขวนลอยและตะกอนหนักที่เวลาต่าง ๆ..... | 86 |
| รูปที่ 4.15 ปริมาณชั่วเหล็กที่ใช้หลังการทดลอง..... | 86 |
| รูปที่ 4.16 กระแสไฟฟ้าหลังการทดลอง..... | 88 |
| รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 89 |
| รูปที่ 4.18 สารแขวนลอยและปริมาณตะกอนหลังการทดลอง..... | 90 |
| รูปที่ 4.19 น้ำหนักชั่วเหล็กที่ใช้ไปที่พื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ..... | 91 |
| รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 93 |
| รูปที่ 4.21 พีเอชก่อนและหลังทดลอง..... | 94 |
| รูปที่ 4.22 ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการทดลอง..... | 95 |
| รูปที่ 4.23 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นหลังการทดลอง..... | 96 |
| รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 99 |
| รูปที่ 4.25 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอนหลังการทดลอง..... | |
| ที่ความนำไฟฟ้าต่าง ๆ..... | 100 |
| รูปที่ 4.26 การสลายพันธะของสีรีแอกทีฟสีแดง..... | 102 |
| รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีด้วยPACL..... | 104 |
| รูปที่ 4.28 สารแขวนลอยหลังการทดลอง..... | 105 |
| รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 107 |
| รูปที่ 4.30 สารแขวนลอยหลังการทดลอง..... | 108 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 4.31 ปริมาณตะกอนหลังการทดลอง..... | 108 |
| รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 112 |
| รูปที่ 4.33 อุณหภูมิและพีเอชก่อนและหลังการทดลอง..... | 113 |
| รูปที่ 4.34 เอสเอสและปริมาณตะกอนหลังการทดลอง..... | 113 |
| รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี..... | 116 |
| รูปที่ 4.36 อุณหภูมิและพีเอชก่อนและหลังการทดลอง..... | 117 |
| รูปที่ 4.37 เอสเอสและปริมาณตะกอนหลังการทดลอง..... | 118 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|---|------|
| ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์การทดลองโดยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 61 |
| ภาพที่ 3.2 ระบบบำบัดแบบASของโรงงาน..... | 64 |
| ภาพที่ 4.1 ผลการกำจัดสีด้วยขี้เถ้าไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด..... | 69 |
| ภาพที่ 4.2 การกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ทั้ง 3..... | 76 |
| ภาพที่ 4.3 ผลการกำจัดสีที่เวลาเกิดปฏิกิริยา 0.5 – 3 ชม. | 83 |
| ภาพที่ 4.4 ผลการกำจัดสีขนาดพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ..... | 90 |
| ภาพที่ 4.5 ผลการกำจัดสีที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ..... | 94 |
| ภาพที่ 4.6 ผลการกำจัดสีที่ค่าความนำไฟฟ้าต่าง ๆ..... | 99 |
| ภาพที่ 4.7 ผลการกำจัดสีโดยการตกตะกอนทางเคมีด้วย PACL..... | |
| ด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ..... | 104 |
| ภาพที่ 4.8 ปริมาณตะกอนหลังการทดลอง..... | 105 |
| ภาพที่ 4.9 ผลการกำจัดสีก่อนและหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า..... | 107 |
| ภาพที่ 4.10 ผลการกำจัดสีของน้ำเสียรวม..... | 112 |
| ภาพที่ 4.11 ผลการกำจัดสีน้ำเสียจากหม้อย้อม..... | 117 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ประเทศไทยมีการขยายตัวของอุตสาหกรรมอย่างมากมาและต่อเนื่อง ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยไม่ได้บำบัดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนด สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอนั้นในประเทศไทย จัดว่าเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญของประเทศ เนื่องจากสามารถทำรายได้เข้าสู่ประเทศได้เป็นจำนวนมากในแต่ละปี แต่ในขณะเดียวกันอุตสาหกรรมสิ่งทอก็เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ใช้ น้ำเป็นจำนวนมาก เนื่องจากต้องอาศัยน้ำเป็นตัวกลางในการผลิตเกือบทุกขั้นตอนและน้ำใช้ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยกลับออกมาเป็นน้ำทิ้งที่มีสีปนเปื้อน ซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาต่อสภาพแวดล้อมอย่างมาก เนื่องจากมีปริมาณค่อนข้างมากและเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสีสูง รวมทั้งสีย้อม(dye)ที่ใช้กันทั่วไป มักมีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่ซับซ้อน ก่อให้เกิดสารประเภทอะโรมาติกอามีน ซึ่งเป็นสารพิษได้ ทำให้ภาคอุตสาหกรรมต้องเลือกวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดมลพิษในน้ำเสีย

สำหรับน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟ เป็นที่ทราบดีว่าเป็นน้ำเสียที่ทำการบำบัดได้ยากกว่าน้ำเสียชนิดอื่น ๆ เนื่องจากสีย้อมรีแอกทีฟเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ทำให้ยากต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ และนอกจากนั้นยังสามารถละลายน้ำได้ดี ทำให้ยากแก่การตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมีซึ่งที่ผ่านมาก็ได้มีความพยายามในการแก้ปัญหาโดยใช้วิธีต่าง ๆ ในการบำบัดน้ำเสียชนิดนี้ เช่น การใช้กระบวนการทางชีวภาพ การใช้กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมีหรือใช้ทั้งสองกระบวนการร่วมกัน แต่อย่างไรก็ตามแต่ละระบบก็ยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ(วุฒิ วิพันธ์พงษ์, 2540)

การบำบัดน้ำเสียโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี จึงเป็นวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟ การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชันร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งสารในน้ำเสียจะเกิดปฏิกิริยากันโดยมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชัน โดยผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ในกรณีที่ใช้โลหะที่เหมาะสมเป็นขั้วไฟฟ้าจะเกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารรวมตะกอนช่วยให้สารแขวนลอยเล็ก ๆ รวมตัวกันสามารถตกตะกอนและแยกตัวออกได้ดี ทำให้สามารถกำจัดซีโอไซด์และสีในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สิทธิภาพ ส่วนการตกตะกอนทางเคมีก็ถือเป็นกระบวนการหนึ่งที่รู้จักและใช้งานกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีในน้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อม โดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 งานวิจัยนี้ใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี โดยเป็นการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบเท ซึ่งทำจากพลาสติกใสและใช้น้ำเสียในการทดลองครวละ 1.2 ลิตร ขั้วไฟฟ้าทำจากเหล็ก, อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม หน้า 2 มม. ชนิดละ 2 แผ่น วางห่างกัน 1.5 ซม.
- 1.3.2 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่
 - 1) น้ำเสียสังเคราะห์ที่เติมสีย้อมรีแอกทีฟ โทนสีแดง (C.I. Reactive 180) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นโมโนอะโซ ดังรูปที่ 1.1 โดยใช้ความเข้มข้นสีคงที่ 200 มก./ล. ตลอดการทดลอง ความเข้มสีที่วัดได้อยู่ในช่วง 380 - 450 SU
 - 2) น้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อม มี 2 ชนิด คือ น้ำเสียจริงจากหม้อย้อม และน้ำเสียรวมก่อนผ่านการบำบัด
- 1.3.3 งานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง

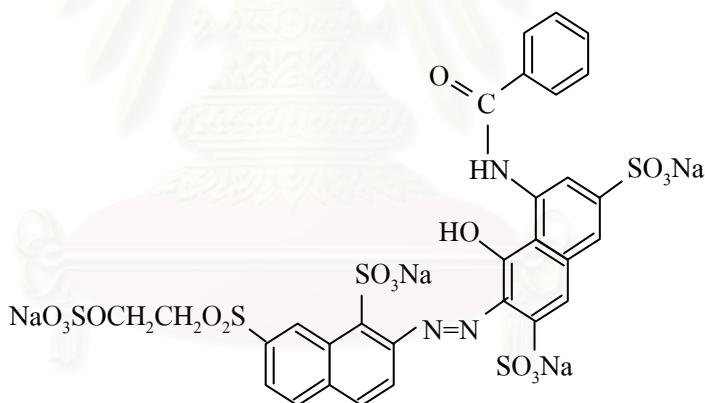
การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟชนิดอะโซโทนสีแดงของน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้เหล็ก, อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม มาเป็นขั้วอิเล็กโทรด ปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 10 ถึง 30 โวลต์ ปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการทดลองตั้งแต่ 0.5 ถึง 3 ชม.ปรับเปลี่ยนพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าเป็น 0.5 × 6.5 ซม., 3 × 6.5 ซม., 4 × 6.5 ซม., 5 × 6.5 ซม., 6.5 × 6.5 ซม., 8 × 6.5 ซม.และ 11 ×

6.5 ซ.ม. ปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้น คือ 3 7 พีเอชปกติ(ประมาณ 6) และ10 จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ 2 ค่า คือ 7.2 ms/cm และ 72 ms/cm เพื่อให้ได้เท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียรวมและน้ำเสียจากหม้อ ย้อม

การทดลองที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ ชนิดอะโซโทนสีแดงของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านและหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยปรับเปลี่ยนปริมาณ PACL 8 ค่า ตั้งแต่ 10 ถึง 400 มก./ลิตร

การทดลองที่ 3 ศึกษาหาประสิทธิภาพกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี เมื่อใช้น้ำเสียจริงจากจากโรงงานฟอกย้อม

- 1.3.4 ค่าตัวแปรที่วิเคราะห์ในน้ำเสียก่อนและหลังการทดลองได้แก่ สี พีเอช เอสเอส อุณหภูมิ ปริมาณของตะกอน ซีไอดี ไออาร์พี ความนำไฟฟ้าและปริมาณขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างสีย้อมรีแอกทีฟ โทนสีแดง (C.I.Reactive 180)

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

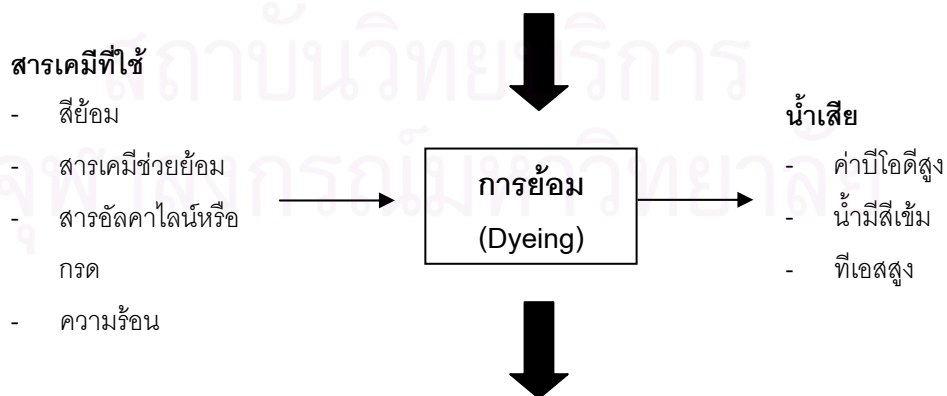
2.1 การย้อมสี (Textile Dyeing)

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่จะต้องมีการนำไปให้สีก่อนการใช้งาน ด้วยวิธีการย้อม (Dyeing) ซึ่งขั้นตอนการย้อม (Dyeing Process) มีวิธีการดังนี้คือ ผ้าดิบที่ผ่านการเตรียมและทำความสะอาดแล้วจะนำไปย้อมให้สีย้อมติดบนเส้นใยของผ้าด้วยเครื่องย้อม (Dyeing machine) จะให้สีพื้น ผ้าฝีน หรือเส้นด้ายที่มีลักษณะแตกต่างกันไป หลักการย้อมสีคือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลาย (Dispersion) ไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถซึมให้เกิดสีตลอด (Uniformly) บนผิวรอบภาคตัดขวางของวัสดุที่จะย้อมด้วย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม)

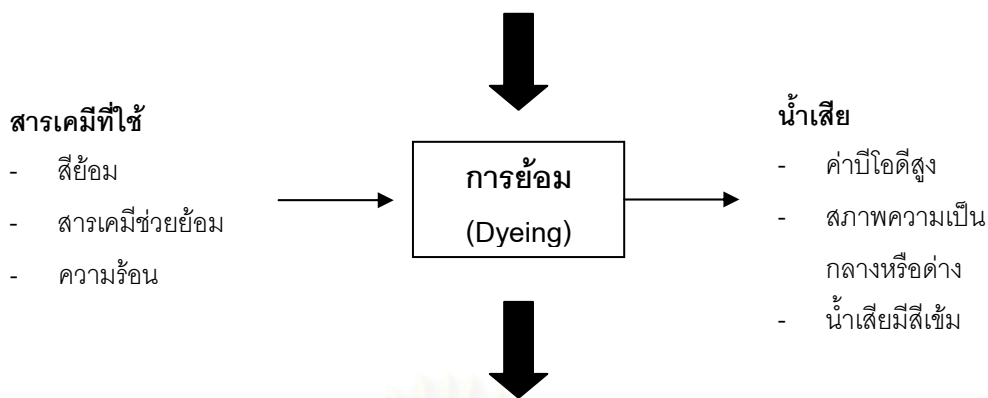
ประเภทของโรงงานฟอกย้อมสามารถแบ่งเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่

1. กระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย
2. กระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ
3. กระบวนการฟอกย้อมผ้าถัก

ในขั้นตอนการย้อม (Dyeing Process) แต่ละกระบวนการจะมีการใช้วัตถุดิบ สารเคมี และวิธีการซึ่งแตกต่างกัน ดังนั้นของเสียที่เกิดขึ้น จึงอาจมีความแตกต่างดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมเส้นด้าย



รูปที่ 2.2 สารเคมีที่ใช้และของเสียที่ออกมาในขั้นตอนของกระบวนการฟอกย้อมผ้าทอ, ผ้าถัก

2.1.1 ลักษณะน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม

จากการสำรวจโดยการเก็บตัวอย่างน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมในเขตกทม. และปริมาณ 100 ตัวอย่าง ซึ่งการเก็บตัวอย่างน้ำเสียได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วงตัก (Grab Sampling) ที่จุดรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งได้ผลสรุปค่าต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามผลิตภัณฑ์

| ผลิตภัณฑ์ที่ฟอกย้อม | ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัด | | | | | จำนวนข้อมูล |
|------------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|--------------|-------------------|-------------|
| | pH | BOD มก./ล. | COD มก./ล. | SS มก./ล. | สี หน่วย Pt Co | |
| ฟอกย้อมด้าย | 8.2 | 120 | 300 | 43 | 450 | 13 |
| ฟอกย้อมผ้าถัก | 9.0 | 110 | 370 | 50 | 570 | 16 |
| ฟอกย้อมผ้าทอ | 8.6 | 400 | 1200 | 140 | 670 | 41 |
| ฟอกย้อมด้ายและผ้า หรืออื่น ๆ | 9.1 | 230 | 713 | 65 | 400 | 30 |

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม.

หมายเหตุ : ค่าลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่แสดงเป็นค่าความน่าจะเป็นร้อยละเท่ากับ
หรือน้อยกว่า 50

2.2.2 ปัญหาเนื่องจากมีสีขุ่นมัวในน้ำเสีย

ผลกระทบจากการปนเปื้อนของสีขุ่นมัวที่มาจากน้ำทิ้งของโรงงานย้อมผ้า พอที่จะสรุปได้ว่าผลกระทบที่มีต่อแหล่งน้ำธรรมชาติขึ้นอยู่กับ (อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2538)

1. ความเข้มข้นของสีขุ่นมัวในน้ำเสีย โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 0-200 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. อัตราการไหลของน้ำเสีย
3. ขนาดของแหล่งน้ำธรรมชาติ
4. คุณภาพแหล่งน้ำธรรมชาตินั้น ๆ เช่น ออกซิเจนละลายน้ำ เป็นต้น

ปัญหาหลักของน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสีขุ่นมัว คือ สีที่ขัดขวางการเดินของแสงในน้ำ แม้ว่าแหล่งน้ำธรรมชาติจะมีขนาดใหญ่เพียงใดก็ตาม เนื่องจากสีขุ่นมัวสามารถสะสมได้ในน้ำ (Kuo W.G., 1992) การทิ้งน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีขุ่นมัวนอกจากจะทำให้ทัศนียภาพในแหล่งน้ำไม่สวยงามแล้ว สีในน้ำยังเป็นตัวขัดขวางการส่องแสงซึ่งมีผลต่อการสร้างออกซิเจนในน้ำ ส่งผลกระทบต่อกระบวนการทางชีวะในน้ำโดยตรง

สีขุ่นมัวที่ถูกทิ้งลงในแหล่งน้ำบางชนิดจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีใช้ออกซิเจนในแหล่งน้ำทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำและสีขุ่นมัวบางชนิดเป็นพิษโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำด้วย (Ajmal M.และKhan A.U., 1992)

ปัญหาที่เกิดจากสีขุ่นมัวในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมพอสรุปได้ว่า

1. เกิดความไม่สวยงามทางด้านทัศนียภาพ
2. สีขุ่นมัวที่เป็นสารอินทรีย์ย่อยสลายได้ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายน้ำลดลง
3. ขัดขวางการเดินทางของแสง ซึ่งจำเป็นต่อการสังเคราะห์แสงของพืช
4. การผลิตออกซิเจนลดลงทำให้มีผลต่อสัตว์น้ำอันเป็นผลมาจากข้อ 3.
5. ความเป็นพิษของตัวสีขุ่นมัว
6. จากข้อ 1 - ข้อ 5 ส่งผลให้สภาวะของแหล่งน้ำไม่เหมาะต่อการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และทำให้มนุษย์ไม่สามารถนำน้ำในแหล่งน้ำนั้นมาใช้อุปโภคและบริโภคได้

2.2 สีย้อม(Dye)

2.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับการฟอกย้อม สกัดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมและถ่านหิน เมื่อผ่านการสกัดจะได้สารไฮโดรคาร์บอน เช่น ไชลีน, แอนทราซีน และโทลูอีน เป็นต้น โดยสารไฮโดรคาร์บอนเหล่านี้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาด้วยกระบวนการไนเตรชัน, แอมมิเนชัน ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสภาพจากสารไฮโดรคาร์บอนไปเป็นสารตัวกลาง(Intermediates) และสารตัวกลางนี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่าง ๆ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีของแต่ละบริษัทที่ผลิตสีย้อม เพื่อที่จะได้สีย้อมชนิดต่าง ๆ ทั้งนี้ ขึ้นกับเส้นใยที่จะนำมาย้อมตลอดจนกระบวนการย้อม ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกันไป เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีสีที่ติดคงทน, ทนต่อแสงแดด, ทนต่อการซักล้าง

การที่จะนำสีย้อมใด ๆ มาใช้ย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ เราจะสามารถทำให้เกิดสภาวะเช่นนี้ขึ้นได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการติดติดกับเส้นใยแล้วเกิดพันธะยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆ ว่าอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิด(อัจฉราพร ไสละสูต, 2527) ที่ทำให้สีติดติดกับเส้นใยได้คือ

1. พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond)
2. แรงแวนเดอร์วาลส์ (van der waals forces)
3. แรงไอออน (ionic forces)
4. พันธะโควาเลนต์ (covalent bond)

กำลังแรงเหล่านี้มักจะไม่ทำหน้าที่แต่เพียงลำพัง การติดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใยอย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน สำหรับแรงยึดติดทางเคมีที่จะให้การยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ พันธะโควาเลนต์

การยึดติดของโมเลกุลสีย้อมกับโมเลกุลเส้นใยนอกจากจะเป็นอิทธิพลเชิงเคมีของแรงทั้ง 4 ชนิดแล้ว อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสี หรืออาจกล่าวง่ายๆ ว่ารูปร่างและขนาดของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น อันจะทำให้การติดสีดีขึ้น หรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้างมากกว่าความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีมีความคงทนสูงมากขึ้น ดังนี้ เป็นต้น

2.2.2 การมองเห็นสี

การมองเห็นสีจะเกิดได้เมื่อมีองค์ประกอบสี่ประการคือ แสง วัตถุ(สี) นัยน์ตาของผู้มองเห็นและสมองที่จะวิเคราะห์หรือตีความสิ่งที่เห็น ส่วนแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ต้นกำเนิดแสงอาจมาจากดวงอาทิตย์หรือแหล่งกำเนิดแสงอื่นที่มนุษย์เป็นผู้สร้างขึ้นก็ได้ ช่วงความยาวคลื่นที่ตามนุษย์สามารถรับภาพได้อยู่ในช่วงประมาณ 400 - 700 นาโนเมตร โดยแสงธรรมชาติหรือแสงแดดสามารถถูกแยกออกโดยการให้แสงส่องผ่านปริซึม ซึ่งจะทำให้เกิดการแบ่งสีตามลักษณะความยาวคลื่นคือ สีม่วง สีน้ำเงิน สีน้ำเงิน-เขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง ซึ่งในโมเลกุลของสีย้อม (อ้างถึงใน อติชาติ ปานเจริญ, 2527) มนุษย์สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากเกิดการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมในโมเลกุลสีย้อม ซึ่งกลุ่มอะตอมดังกล่าวเรียกว่า “โครโมฟอร์” (chromophores) ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มคือ

1.กลุ่มไนโตรโซ -NO

2.กลุ่มไนโตร -NO₂

3.กลุ่มเอโซ -N=N-

4.กลุ่มเอททิลีน $\begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ \text{C}=\text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \end{array}$

5.กลุ่มคาร์บอนิล $\begin{array}{c} \diagdown \\ \text{C}=\text{O} \\ \diagup \end{array}$

6.กลุ่มคาร์บอนิล - ไนโตรเจน $\begin{array}{c} \diagdown \\ \text{C}=\text{NH} \\ \diagup \end{array}$ และ $\begin{array}{c} \diagdown \\ \text{-CH=N-} \\ \diagup \end{array}$

7.กลุ่มซัลเฟอร์ $\begin{array}{c} \diagdown \\ \text{C}=\text{S} \\ \diagup \end{array}$ และ $\begin{array}{c} \diagdown \quad \diagup \\ \text{-C-S-S-C-} \\ \diagup \quad \diagdown \end{array}$

กลุ่มอะตอมต่างๆ เหล่านี้ จะเป็นตัวไปเพิ่มสีให้แก่สารประกอบอะโรเมติก โดยการดูดกลืนแถบแสงสีขาวไว้บางแถบแสงและปล่อยออกมาบางแถบแสง ทำให้มนุษย์มองเห็นสีย้อมมีโทนสีแตกต่างกันออกไป

สีย้อมโดยทั่วไปนอกจากจะต้องมีกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์แล้ว ยังจำเป็นต้องมีกลุ่มอะตอมอีกชนิดหนึ่งได้แก่ กลุ่มอะตอม “ออกโซโครม” (auxochromes) อันได้แก่ $-OH$, $-NH_2$, $-NHR$, $-NR_2$, $-SO_3$ และ $-COOH$ เพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดติดกับเส้นใยได้ โมเลกุลใดที่ปราศจากกลุ่มอะตอมออกโซโครม โมเลกุลนั้นจะแสดงสมบัติของสีออกมาได้แต่จะขาดสมบัติในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวนี้เรียกว่า “โครมาเจน” (chromagen) ยกตัวอย่างเช่น สีย้อมอะมิโนเอโซเบนซีน (aminoazobenzene dyestuff) มีสูตรโมเลกุลดังนี้ คือ $H_2N - \text{C}_6\text{H}_4 - N = N - \text{C}_6\text{H}_4$ ซึ่งกลุ่มอะตอมโครโมฟอร์คือ $-N=N-$ กลุ่มอะตอมออกโซโครมคือ $-NH_2$ และโมเลกุลที่เรียกว่าโครมาเจนคือ $\text{C}_6\text{H}_4 - N=N - \text{C}_6\text{H}_4$ ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ ออกโซโครม และโครมาเจนนี้จะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาการแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมีซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

2.2.3 การจำแนกสีย้อม (วรรณ ประทุมแก้ว, 2543)

2.2.3.1 การจำแนกตามลักษณะทางกายภาพออกได้เป็น 2 ชนิด

- 1) สีย้อม (dyes) สามารถละลายน้ำ
- 2) ปิกเมนต์ (pigments) ไม่สามารถละลายน้ำ อาจใช้ละลายในเรซิน ยึดติดเส้นใยได้โดยเชิงกล มีบางตัวเหมือนกันที่ติดเส้นใยได้โดยเชิงเคมี

2.2.3.2 การจำแนกตามวิธีใช้

ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในบรรดาผู้ใช้และอุตสาหกรรมการผลิตสี รวมถึงสมาคมผู้ย้อมสีและผู้ผลิต

- 1) สีย้อมเบสิค (basic dyes)
- 2) สีย้อมแอซิด (acid dyes)
- 3) สีย้อมมอดแดนท์ (mordant dyes)
- 4) สีย้อมไดเรกต์ (direct dyes)
- 5) สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dyes)
- 6) สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)
- 7) สีย้อมแวกัต (vat dyes)
- 8) สีย้อมซัลเฟอร์ (sulphur dyes)
- 9) สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)
- 10) สีย้อมโลหะ (metallic dyes)

11) สีย้อมไอออนเนียม (onium dyes)

2.2.3.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีย้อมแบบนี้ ใช้โครงสร้างทางเคมีของสีย้อมเป็นหลัก สีย้อมที่แบ่งตามลักษณะการย้อมบางตัวจะอยู่ในกลุ่มเคมีหนึ่ง บางตัวก็อาจอยู่ในกลุ่มเคมีหนึ่ง ทำให้เกิดความสับสนได้ แต่ถ้าสามารถจดจำได้จะทำให้ใช้ตัวสีย้อมได้ถูกต้อง ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

1) Azo Colourants

1.1)Aromatic Diazo Compound

- Diazotization and Diazo Compound
- The Coupling Reaction

1.2)Azo Compound

- Basic Dyes
- Acid Dyes
- Mordant and Premetallized Dyes
- Direct Dyes
- Azoic Dyes

2) Phenylmethane Dyes

3) Xanthene Dyes

4) Indigoid Dyes

5) Polycyclicquinone (Anthraquinone , etc.) Dyes

5.1) Anthraquinone Group – Vat Dyes

- Acylanino Anthraquinone
- Condensation Products of Amino Anthraquinone and Cyanuric Chloride
- Anthraquinone Acridones
- Benzantrones
- Anthrathrones
- Pyranthone and Flavanthrone
- Anthrimides
- Carbazoles

- Sulphur : Containing Anthraquinone Compounds

5.2) Naphthalenic Acid Group – Vat Dyes

5.3) Esters of Anthraquinone Vat Dyes

5.4) Anthraquinone Acid Dyes

6). Sulphur Fusion Dyes

7). Amine Oxidation Colorants

8). Phthalocyanine Colorants

9). Onium Dyes

10). Reactive Dyes

11). Pigments

การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมีแสดงตัวอย่างสี และลักษณะโครงสร้างดังตารางที่ 2.2 , รูปที่ 2.3 และแบบการใช้งานดังตารางที่ 2.3

2.2.4 ข้อมูลสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้

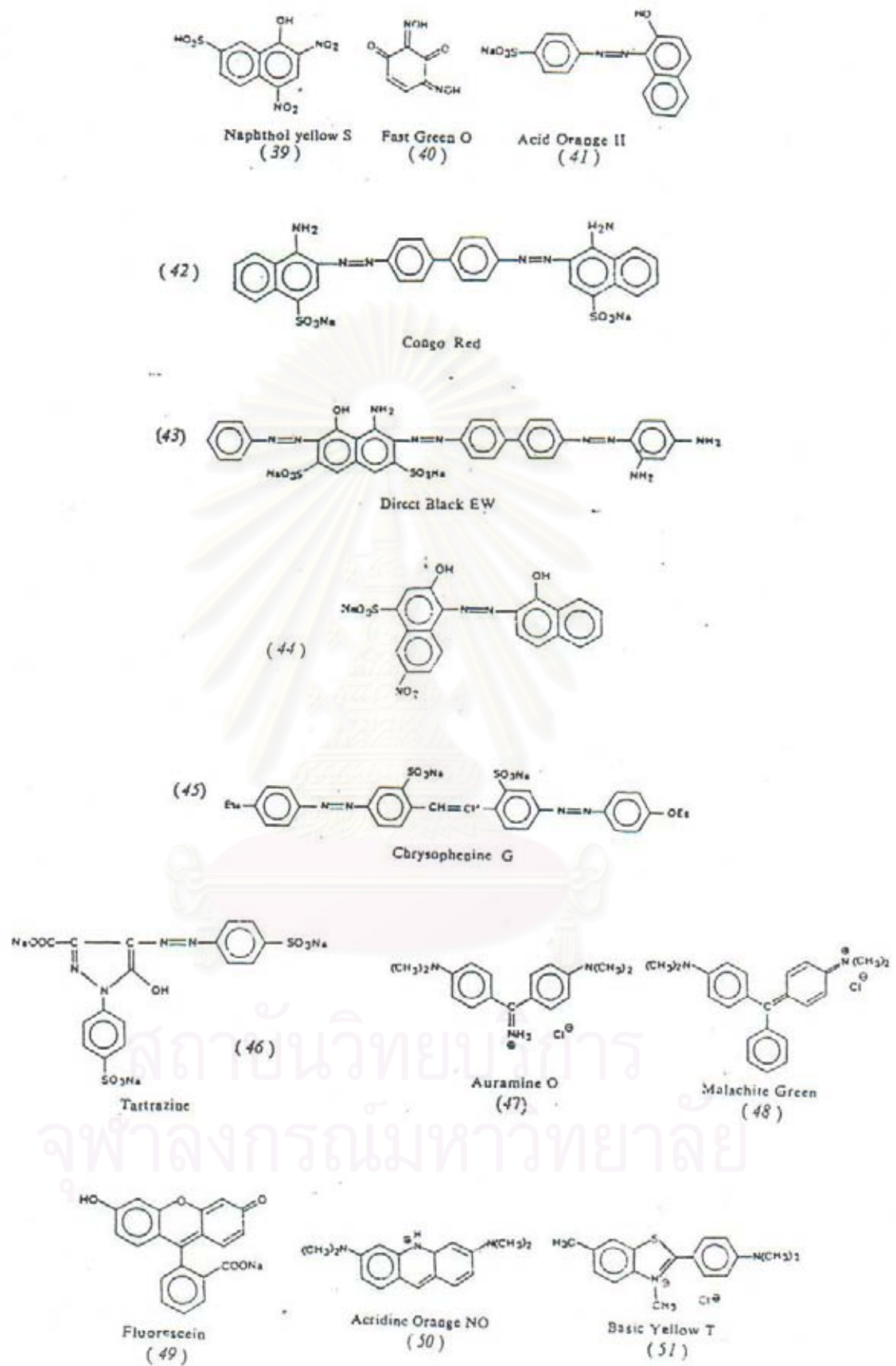
สีรีแอคทีฟเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดี โดยโมเลกุลของสีสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของเซลลูโลสได้เมื่ออยู่ในสภาพต่าง และเกิดการเชื่อมโยงกันโดยพันธะโควาเลนต์ทำให้สีติดได้ดี และจะติดได้มากกว่าสีที่ติดโดยแรงทาง physical- chemical forces ซึ่งสามารถสลายตัวได้

สีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่ให้ประจุลบ และประจุบวก โดยสีรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่ให้ประจุลบ

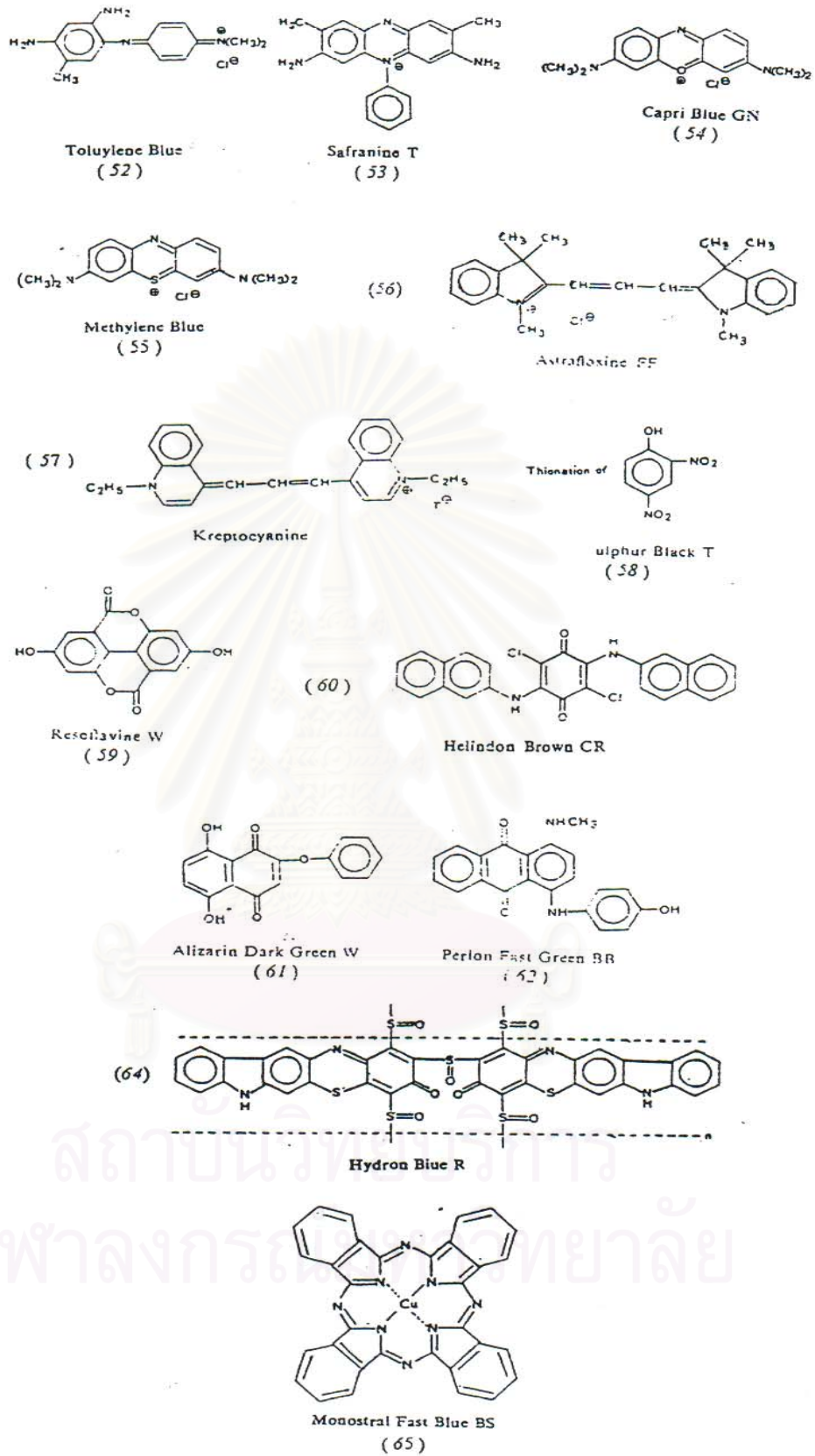
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (วรรณฯ ประทุมแก้ว, 2543)

| Class | Subclass | Example | Structure |
|----------------------|----------------|------------------------|-----------|
| Nitro | - | Naphthol Yellow S | (39) |
| Nitroso | - | Fast Green O | (40) |
| Azo | Monoazo | Acid Orange II | (41) |
| | Diazo | Congo Red | (42) |
| | Triazo | Direct Black EW | (43) |
| | Polyazo | - | (44) |
| | Mordant azo | Erichrome Black T | (45) |
| | Stilbene azo | Chrysophenine G | (46) |
| | Pyrazolone azo | Tartrazine | |
| Diphenylmethane | - | Auramine O | (47) |
| Triphenylmethane | - | Malachite Green | (48) |
| Xanthene | - | Fluorescein | (49) |
| Acridine | - | Acridine Orange NO | (50) |
| Thiazole | - | Basic Yellow T | (51) |
| Indamine&Indophenol | - | Toluylene Blue | (52) |
| Azine | - | Safranine T | (53) |
| Oxanzine | - | Capri Blue GN | (54) |
| Thiazine | - | Methylene Blue | (55) |
| Cyanine | Methine | Astrafloxine FF | (56) |
| | Quinoline | Kryptocyanine | (57) |
| Sulphur | - | Sulphur Black T | (58) |
| Lactone | - | Resoflavine W | (59) |
| Aminoketone | - | Helindon Brown CR | (60) |
| Hydroxyketone | - | Alizarin Dark Green W | (61) |
| Anthraquinonoid | - | Perlon Fast Green 3B | (62) |
| Indigoid | - | Indigo | (63) |
| Sulphurized Vat Dyes | - | Hydron Blue R | (64) |
| Phthalocyanine | - | Monastral Fast Blue BS | (65) |



รูปที่ 2.3 การจำแนกสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี (วราภา ประทุมแก้ว, 2543)



รูปที่ 2.3(ต่อ) การจำแนกสี้อมตามโครงสร้างทางเคมี (วรรณ ประทุมแก้ว, 2543)

ตารางที่ 2.3 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539)

| ประเภทสีย้อม | สมบัติทางกายภาพและเคมี | เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม | พันธะหรือกลไกการติดสี | วิธีใช้ทั่วไป |
|----------------------------|--|--|--|---|
| สีย้อมแอสิด | - กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น | - ไนลอน - ขนสัตว์ | - พันธะไอออนิก | - แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 3-5 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50 – 110°C |
| สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์แอสิด | - กระจุก - ละลายน้ำน้อย - สีติดแน่นดี | - ไนลอน - ขนสัตว์ | - พันธะไอออนิก | - แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 5-7 - เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50 – 110°C |
| สีย้อมไดเรกต์ | - กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดไม่แน่น | - ผ้าฝ้าย - วิสคอส | - พันธะไอออนิก | - แช่เส้นใยในสารละลายต่างอุณหภูมิ - เติมนิโคตโรไลท์โซเดียมคลอไรด์โซเดียมซัลเฟต และสีย้อมที่อุณหภูมิ 98 °C |
| สีย้อมเบสิก | - กระจุก - ละลายน้ำดี | - อะคริลิก | - พันธะไอออนิก | - แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-6 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100-105°C |
| สีย้อมดิสเพอร์ส | - ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก - กระจายอยู่ในน้ำเป็นอนุภาคคอลลอยด์ - สีติดแน่นดี | - อะคริลิก - โพลีเอสเตอร์ - ไนลอน - เซลลูโลส - อะซิเตต | - คอลลอยด์ของสีย้อม - ดูดติดผิวเส้นใย | - แช่เส้นใยในสารละลายที่มีพีเอช 4-5 - เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 100- 105°C |

ตารางที่ 2.3(ต่อ) การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน (อภิชาติ หิรัญจิตต์, 2539)

| ประเภทสีย้อม | สมบัติทางกายภาพและเคมี | เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม | พันธะหรือกลไกการติดสี | วิธีใช้ทั่วไป |
|-----------------|---|---------------------------------|--|--|
| สีย้อมรีแอกทีฟ | - กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดแน่น | - ฝ้าย - ขนสัตว์ - วิสกอส | - พันธะโควาเลนต์ | - แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เติมหेतือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย - เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย |
| สีย้อมซัลเฟอร์ | - เป็นคอลลอยด์หลังเกิด - ปฏิกริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น | - ฝ้าย - วิสกอส | - ปฏิกริยาตกตะกอน - ผลึกภายในเส้นใย | - ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ |
| สีย้อมแวท | - เป็นคอลลอยด์หลังเกิด - ปฏิกริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น | - ฝ้าย - วิสกอส | - ปฏิกริยาตกตะกอน - ผลึกภายในเส้นใย | - ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ |
| สีย้อมอซิสิก | - เป็นคอลลอยด์หลังเกิด - ปฏิกริยาในน้ำ - ไม่ละลายน้ำ - สีติดแน่น | - ฝ้าย - วิสกอส | - ปฏิกริยาตกตะกอน - ผลึกภายในเส้นใย | - ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียม ซัลเฟอร์ - สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ - ต้มเพื่อให้เกิดตะกอนผลึก |
| สีย้อมมอร์แดนต์ | - กระจุก - ละลายน้ำดี - สีติดแน่น | - ขนสัตว์ | - คอลลอยด์ของสีย้อม - ดูดติดผิวเส้นใย | - แช่เส้นใยในสารละลายกรด - เติมโครเมียมไดโครเมต และสีย้อม - เพิ่มอุณหภูมิถึง 98°C |

2.2.4.1 โครงสร้างทางเคมีของสีรีแอกทีฟ

กลุ่มเคมีของสีรีแอกทีฟประกอบด้วยกลุ่มพื้นฐาน 4 กลุ่ม ซึ่งสามารถแสดงเป็นโครงสร้างทั่วไปได้ดังนี้

S-D-T-X

โดย S คือ กลุ่มที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้สูง โดยทั่วไปจะเป็นพวกซัลโฟนิค

($-\text{SO}_2\text{Na}$) ซึ่งติดอยู่กับกลุ่มโครโมฟอร์

D คือ กลุ่มของเคมีที่ทำให้เกิดสี เรียกว่ากลุ่มโครโมฟอร์ (Chromophore)

T คือ กลุ่มอะตอมที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลุ่มรีแอกทีฟกับกลุ่มโครโมฟอร์

(Bridging Group) เช่นกลุ่ม $-\text{NH}-$, $-\text{NHCO}-$, $-\text{SO}_2-$, $-\text{NHSO}_2-$ และ $-\text{NCH}_3-$ เป็นต้น

X คือ กลุ่มรีแอกทีฟ (Reactive Group) ซึ่งจะเป็นกลุ่มที่ทำให้สีทำปฏิกิริยากับกลุ่มไฮดรอกซิลในเส้นใย

ในบางกรณีกลุ่มรีแอกทีฟก็จะติดกับระบบโครโมฟอร์โดยตรง ไม่ต้องมีตัวเชื่อมก็ได้ และกลุ่มรีแอกทีฟส่วนใหญ่เป็นสาร Heterocyclic ring ลักษณะของกลุ่มตัวเชื่อมและส่วนประกอบของ Heterocyclic ring มีอิทธิพลอย่างมากต่อความสามารถทำปฏิกิริยา และคุณสมบัติอื่นๆ ของสี จากส่วนประกอบที่กล่าวมานี้ พบว่ามีสองส่วนที่สำคัญคือ สารที่ทำให้เกิดสี และกลุ่มรีแอกทีฟ โดยส่วนประกอบทั้งสองส่วนนี้ จะเป็นปัจจัยที่ทำให้สีแต่ละชนิดแตกต่างกันไป

2.2.4.2 กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสี (Chromophore)

กลุ่มอะตอมที่ทำให้เกิดสีส่วนใหญ่พัฒนามาจากสีแอซิด โดยแบ่งโครงสร้างได้เป็นหลายกลุ่มดังนี้

- 1) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลักซึ่งสีรีแอกทีฟส่วนใหญ่จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก
- 2) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Metal-Complex Azo เป็นหลัก
- 3) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Anthraquinone เป็นหลัก
- 4) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Phthalocyanine เป็นหลัก
- 6) กลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Azo เป็นหลัก ในสีกลุ่มที่มีกลุ่มรีแอกทีฟแบบ Bifunctional

กลุ่มสารที่ทำให้เกิดสีในสีย้อมรีแอคทีฟนั้น ต่างก็มีโครงสร้างที่แตกต่างกันซึ่งเหมาะสำหรับการนำไปใช้งานที่แตกต่างกันออกไป โดยองค์ประกอบของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีย้อมรีแอคทีฟนั้นแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงเปอร์เซ็นต์การกระจายของลักษณะโครงสร้างของกลุ่มโครโมฟอร์ในสีย้อมรีแอคทีฟ แบ่งตามโทนสีต่างๆ (Shore.,1990)

| Chemical class | Distribution in hue sector (%) | | | | | | | | % of all reactive dyes |
|-------------------|--------------------------------|--------|-----|--------|------|-------|-------|-------|------------------------|
| | Yellow | Orange | Red | Violet | Blue | Green | Brown | Black | |
| Unmetallised azo | 97 | 90 | 90 | 63 | 20 | 16 | 57 | 42 | 66 |
| Metal-complex azo | 2 | 10 | 9 | 32 | 17 | 5 | 43 | 55 | 15 |
| Anthraquinone | | | | 5 | 34 | 37 | | 3 | 10 |
| Phthalocyanine | | | | | 27 | 42 | | | 8 |
| Miscellaneous | 1 | | 1 | | 2 | | | | 1 |

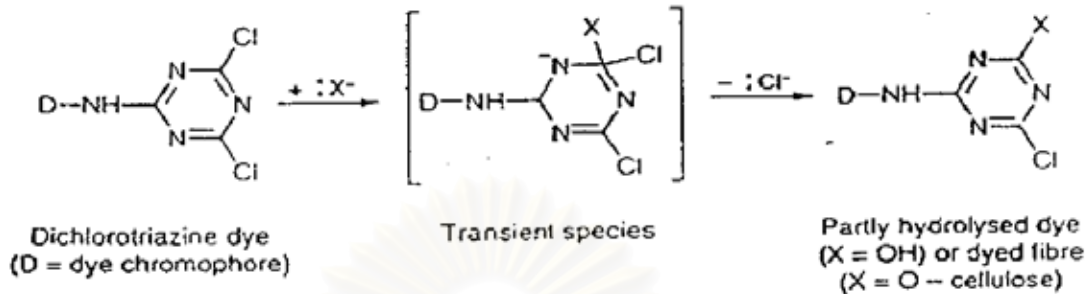
จากตารางจะเห็นได้ว่าสีย้อมรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสีย้อมโครโมฟอร์ชนิด Azo (Unmetallised Azo Metal-complex Azo) เป็นส่วนมากสูงถึงร้อยละ 81 และถ้าไม่รวมสีย้อมรีแอคทีฟที่มีโทนสีฟ้าและสีเขียว ซึ่งประกอบด้วยโครโมฟอร์ประเภท Anthraquinone และ Phthalocyanine เป็นส่วนใหญ่แล้วพบว่า สีย้อมรีแอคทีฟจะมีกลุ่มอะโซ เป็นองค์ประกอบอยู่สูงถึงร้อยละ 95 ดังนั้นในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อม ถ้าสามารถทำลายพันธะอะโซในกลุ่มโครโมฟอร์ของสีย้อมรีแอคทีฟได้ก็จะสามารถลดสีในน้ำเสียได้

- ดังนั้นสีย้อมรีแอคทีฟที่ใช้ในการทดลองนี้ ได้แก่สีย้อมรีแอคทีฟ โทนสีแดง (C.I. Reactive 180) โดยทราบสูตรโครงสร้างสีซึ่งเป็นสีย้อมที่มีกลุ่มโครโมฟอร์ที่มีโครงสร้าง Unmetallised Azo เป็นหลัก ซึ่งสีย้อมรีแอคทีฟส่วนใหญ่จะมีสารที่ทำให้เกิดสีชนิดนี้เป็นส่วนมาก

2.2.4.3 กลุ่มรีแอคทีฟ (Reactive Group)

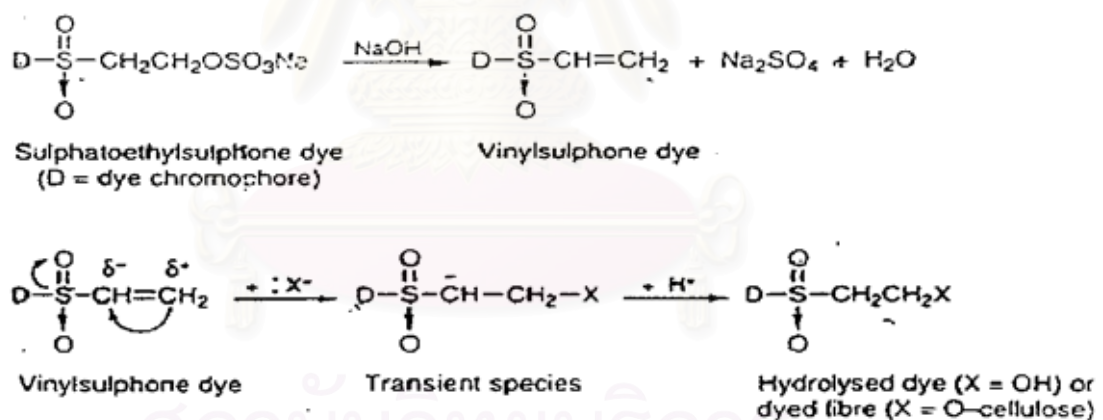
กลุ่มรีแอคทีฟเป็นกลุ่มที่มีหน้าที่สร้างพันธะกับเส้นใยทำให้สีย้อมสามารถติดกับเส้นใยได้ การสร้างพันธะระหว่างกลุ่มรีแอคทีฟกับเส้นใยแบ่งได้ 2 ลักษณะคือ

1. เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนเข้าไปแทนที่อะตอมฮาโลเจนในกลุ่มรีแอกทีฟในโมเลกุลของสีย้อมทำให้เกิดเป็นพันธะระหว่างสีกับเส้นใยขึ้น ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแบบ (Nucleophilic Substitution) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Substitution (ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์, 2543)

2. เส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออนสร้างพันธะกับกลุ่มรีแอกทีฟในโมเลกุลของสีย้อมโดยการสลายพันธะคู่ของคาร์บอนอะตอม 2 อะตอม ในกลุ่มไวนิลซัลโฟน แล้วไฮดรอกไซด์ไอออนจะเชื่อมตัวมันเข้าไปกับคาร์บอนตัวสุดท้ายของกลุ่มไวนิลซัลโฟน ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยาแบบ (Nucleophilic Addition) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาแบบ Nucleophilic Addition (ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์, 2543)

การสร้างพันธะกับโมเลกุลสีสามารถเกิดได้ทั้งกับเส้นใยหรือไฮดรอกไซด์ไอออน แต่ความสามารถในการสร้างพันธะกับเส้นใยจะมีมากกว่าการสร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน สีที่สร้างพันธะกับไฮดรอกไซด์ไอออน เรียกว่าสีที่ไฮโดรไลซ์ แล้วไม่สามารถสร้างพันธะติดกับเส้นใยได้อีก จึงหลงเหลือไปกับน้ำย้อมและน้ำล้างได้เป็นบางส่วน นอกจากนี้กลุ่มรีแอกทีฟที่มีการพัฒนาคิดค้นขึ้นมา การพิจารณาจัดกลุ่มขึ้นอยู่กับกลไกในการสร้างพันธะและความคงทนของพันธะนี้ในขั้นตอนต่างๆ หลังการย้อม โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

1.พวก Monofunctional ส่วนใหญ่จะมีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวในโมเลกุล เช่น กลุ่มรีแอกทีฟที่มีอะตอมฮาโลเจนของสีพวก Aminohalotriazine หรือกลุ่มรีแอกทีฟที่มีกลุ่มไวนิลซัลโฟน นอกจากนี้ยังมีกลุ่มรีแอกทีฟเพียงกลุ่มเดียวแต่มีอะตอมฮาโลเจนมากกว่า 1 อะตอม เช่น กลุ่มรีแอกทีฟพวก Dichlorotriazine , Difluoropyrimidine

2.พวก Bifunctional จะมีกลุ่มรีแอกทีฟ 2 กลุ่มใน 1 โมเลกุลซึ่งทำให้ความสามารถในการติดติดกับเส้นใยดีขึ้น ทั้งนี้เพราะเท่ากับมีกลุ่มรีแอกทีฟให้เส้นใยเข้าสร้างพันธะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า และเมื่อกลุ่มหนึ่งเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยแล้ว อีกกลุ่มก็ยังมีความสามารถในการสร้างพันธะได้ดีอยู่

2.3 การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม

การกำจัดสีในน้ำเสียโรงฟอกย้อมได้ถูกพัฒนาต่อๆ กันมา โดยในสมัยก่อนสีที่ถูกปล่อยออกมาปริมาณน้อยทำให้ยังไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งโรงงานทั่ว ๆ ไปมักจะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แต่ในปัจจุบันอุตสาหกรรมสิ่งทอได้เพิ่มจำนวนมากขึ้นตามการเพิ่มประชากร อีกทั้งยังมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฟอกย้อม ทำให้น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมประกอบด้วยสารเคมีและสีย้อมมากมายหลายชนิด จนไม่สามารถใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพชนิดแอกทิเวเตดสลัดจ์ในการกำจัดสีให้ลดลงได้ จึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการกำจัดสีหลายวิธีได้แก่ กระบวนการทางกายภาพ, ทางเคมีและทางชีวภาพ (Reife และ Free man. ,1996)

2.3.1 การกำจัดสีโดยวิธีทางกายภาพ

1. กระบวนการโคแอกกูเลชัน
2. กระบวนการดูดติดผิว
3. กระบวนการไฟฟ้าเคมี
4. กระบวนการเมมเบรน
5. การแลกเปลี่ยนไอออน
6. กระบวนการ Ionizing Radiation

2.3.2 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางเคมี

1. กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

2. กระบวนการรีดักชัน (Reduction)

2.3.3 การกำจัดสีโดยกระบวนการทางชีวภาพ

1. กระบวนการชีวภาพแบบแอโรบิก
2. กระบวนการแอนแอโรบิก
3. กระบวนการแอนแอโรบิก – แอโรบิก

2.4 กระบวนการตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมีหรือโคแอกกูเลชันนั้น หมายถึง กระบวนการทั้งหมดในการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ มารวมกันเป็นฟลอค ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าโคแอกกูเลชันหรือการทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ รวมตัวและจับกันเป็นฟลอค ควรมี 2 ขั้นตอน ดังนี้

ก) ต้องทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) ของคอลลอยด์ เช่น ลดแรงผลักระหว่างอนุภาคโดยทางใดทางหนึ่ง เป็นต้น

ข) ต้องทำให้อนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ เคลื่อนที่มากกระทบหรือสัมผัสกันให้มากที่สุด (Transport of Colloidal Particles) เมื่ออนุภาคถูกทำลายเสถียรภาพแล้ว การสร้างโอกาสสัมผัสระหว่างอนุภาค ย่อมเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าเดิม สิ่งที่เป็นความต้องการอีกอย่างหนึ่งคือ เมื่ออนุภาคต่าง ๆ สัมผัสกันแล้ว ควรเกาะติดกันแน่นและหลุดจากกันได้น้อยที่สุด

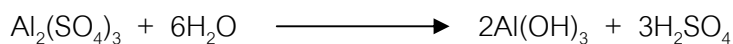
2.4.1 โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ หรือ PACL

เป็นสารตกตะกอนที่นิยมใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ และกลุ่มที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ อลูมิเนียมโคแอกกูแลนต์ ได้แก่ อลูมิเนียมซัลเฟต อลูมิเนียมคลอไรด์ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ และโซเดียมอลูมิเนียมเตตระไฮดรอกไซด์โคแอกกูแลนต์ ได้แก่ เหล็ก (II)คลอไรด์ เหล็ก (III) คลอไรด์ เหล็ก (III) ซัลเฟต เป็นต้น

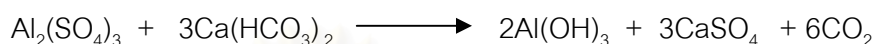
อลูมิเนียมและไฮดรอกไซด์เป็นโคแอกกูแลนต์ที่มีประสิทธิภาพในการตกตะกอน ราคาไม่แพง เมื่ออยู่ในน้ำจะมีความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก และจะถูกควบคุมปฏิกิริยาโดยพีเอชในระบบ

ปัญหาหนึ่งที่มีมักจะเกิดขึ้นต่อโคแอกกูแลนต์ คือ ผลกระทบจากค่าพีเอชและค่าสภาพต่าง หากพีเอชไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม กระบวนการตกตะกอนจะมีประสิทธิภาพต่ำหรือไม่มี

ประสิทธิภาพเลย ตัวอย่างเช่น การใช้อลูมิเนียมซัลเฟตเป็นตัวโคแอกกูแลนต์เพียงปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ค่าพีเอชลดต่ำลงมาก ดังสมการต่อไปนี้

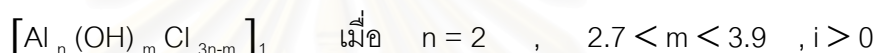


ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอันได้แก่ สารประกอบไฮดรอกไซด์ซึ่งจะตกตะกอนลงมา และกรดแอมโมเนียมจะทำให้พีเอชต่ำลง มีผลต่อสภาพต่างในน้ำ ดังนั้นจึงต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพต่างในน้ำไม่ให้พีเอชต่ำลงมากนัก ดังสมการ



จากสมการข้างต้นทำให้เกิด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะรบกวนขั้นตอนการตกตะกอน โดยที่ก๊าซนี้จะลอยขึ้นสู่น้ำด้านบนตะกอนลอยขึ้น หรือทำให้ตะกอนตกสู่เบื้องล่างช้าลงและเกิดความกระด้างถาวรขึ้น

PACL เป็นสารเคมีที่มีสูตรโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นสายยาว มีสูตรโมเลกุล ดังนี้



PACL เป็นโคแอกกูแลนต์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวในการทำปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ เมื่อมีการสร้างตะกอนเกิดขึ้น และจำนวนสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพน้ำก็น้อยกว่า ดังสมการต่อไปนี้



2.4.2 คุณสมบัติ PACL เมื่อเป็นโคแอกกูแลนต์

1. มีอำนาจในการสร้างตะกอนและการรวมตัวของตะกอนสูง และการตกตะกอนจะเป็นไปอย่างรวดเร็วกว่าสารส้ม
2. สะดวกในการทำงานเนื่องจากมีสมบัติในการละลายน้ำได้ดี
3. ในการทำงาน PACL จะมีช่วงพีเอชในการเกิดปฏิกิริยากว้างกว่าโคแอกกูแลนต์ตัวอื่น ๆ ซึ่งปกติจะมีพีเอชในช่วง 6 ถึง 9 แต่บางกรณีจะสามารถตกตะกอนได้ในช่วงพีเอช 5 ถึง 10
4. PACL สามารถสร้างตะกอนได้เร็วกว่าสารส้ม โดยที่ใช้ระยะเวลาในการกวนเร็วขึ้นน้อยกว่า

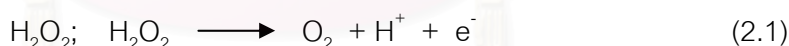
2.4.3 กลไกการตกตะกอนด้วย PACL

PACL เป็นสารเคมีที่อยู่ในรูปของแข็ง หรืออยู่ในรูปของสารละลาย เมื่ออยู่ใน

น้ำจะเกิดการแตกตัวได้ Al^{+3} ที่มีความสามารถในการให้ไฮโดรเจนไอออนจึงเกิดการไฮโดรไลซิสของอลูมิเนียมได้สารต่าง ๆ เช่น $Al_{13}(OH)_{34}^{+5}$, $Al_7(OH)_{17}^{+4}$ และ $Al_6(OH)_{15}^{+3}$ เป็นต้น ซึ่งเป็นที่มีอลูมิเนียมหลายอะตอมที่เรียกว่า Polymeric Hydroxo Complex ซึ่งมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ไม่เสถียร แล้วทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น แล้วจึงตกตะกอน สำหรับการสร้างตะกอนพีเอชของน้ำจะมีความสำคัญต่อประจุที่เกิดขึ้นจากการไฮโดรไลซิส เนื่องจากถ้าพีเอชต่ำสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกจะเกิดขึ้นมาก จะให้ผลในการเพิ่มปริมาณและอัตราเร็วในการตกตะกอน นอกจาก Al^{+3} จะจับกับอนุภาคคอลลอยด์แล้ว Al^{+3} ยังทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออนในน้ำกลายเป็น $Al(OH)_3$ เป็นตะกอนเล็ก ๆ และเนื่องจาก Al^{+3} มีประสิทธิภาพสูงในการทำละลายประจุของอนุภาคคอลลอยด์ ดังนั้นเมื่อเติม PACL ลงในน้ำจะต้องผสมอย่างรวดเร็วทันที แล้วจึงลดอัตราเร็วในการกวนให้ช้าลงเพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสและจับตัวกันเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้น แล้วจึงแยกตะกอนที่เกิดขึ้นออกมาโดยการปล่อยให้ตกตะกอนตามธรรมชาติ (กาญจนาภา ครอบธรรมชาติ, 2535)

2.5 กระบวนการออกซิเดชัน

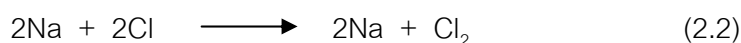
เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูง โดยสีจะทำปฏิกิริยาอย่างแรงกับสารออกฤทธิ์ทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี วิธีนี้สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณมากได้และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย ซึ่งสารเคมีที่ใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ การใช้โอโซน การใช้สารเคมีฟีนตัน และการใช้คลอรีน ซึ่งสารเหล่านี้จะเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีแนวโน้มในการรับอิเล็กตรอนได้ดีพอสมควร เช่น



โดย H_2O_2 มีแนวโน้มในการให้อิเล็กตรอนที่ไม่ดีแสดงว่าเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดี

2.5.1 ไฮโปคลอไรต์

เป็นตัวออกซิไดซ์ชนิดหนึ่งซึ่งช่วยในการลดสีได้ ซึ่งตัวออกซิไดซ์ชนิดนี้เราสามารถสร้างได้ด้วยการเติม โซเดียมคลอไรด์ลงไป ($NaCl$) (Zhan และคณะ, 2001) การเติมโซเดียมคลอไรด์ลงไปนี้น้ำเสียยังมีประโยชน์ในการช่วยเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า ซึ่งมีผลดีต่อเวลาในการกำจัดสีได้อีกทางหนึ่ง จากสมการรีดอกซ์

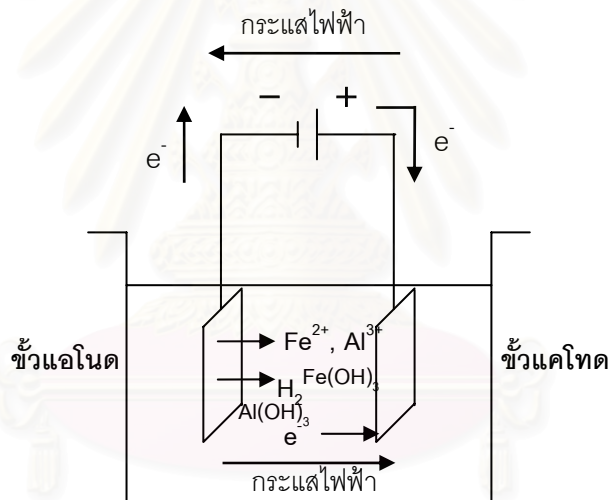


และเมื่อคลอรีนละลายในน้ำแล้วจะเกิดเป็นสมการดังต่อไปนี้



2.6 หลักการทำงานของไฟฟ้าเคมี

หลักการของเซลล์ไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลติกเซลล์นั้นจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC supply) โดยจะใช้ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้วและสารละลายนำไฟฟ้างดรูปที่ 2.6 เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาที่ขั้วโลหะเป็นขั้วไฟฟ้าจะเกิดปฏิกิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาออกซิเดชัน - รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ของขั้วไฟฟ้า เช่น เหล็ก โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นที่ขั้วบวกหรือขั้วแอโนด ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำดังสมการที่ 2.4 และ 2.5 ในขณะที่ขั้วลบหรือขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ซึ่งน้ำเกิดการแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการที่ 2.6 เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่างและทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอริกไอออน (Fe^{3+}) ในรูปของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_{2(S)}$) และเฟอริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_{3(S)}$) (ปริเมษ เจริญนพคุณ, 2545)



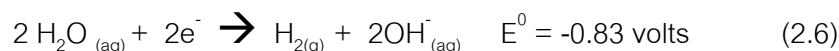
รูปที่ 2.6 องค์ประกอบการเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

ขั้วเหล็ก

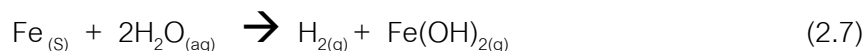
การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด (Biwyk, 1991)



การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด

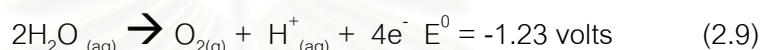


การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์

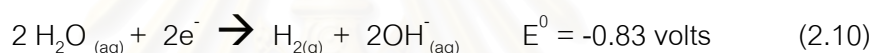


ขั้วอะลูมิเนียม

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่แอโนด



การเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่แคโทด



การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์



2.6.1 หลักการของเซลล์ไฟฟ้า

2.6.1.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

ในเซลล์ไฟฟ้ามักมีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูลในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์จะหมายความว่า จุดสองจุดนั้นมีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ ฉะนั้น 1 โวลต์จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมบ์ และทางไฟฟ้าเคมีมักจะแทนโวลต์เตจด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวข้างต้น ทำให้เห็นได้ว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ (} W_{\text{elec.}} \text{)} = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลต์} \quad (2.12)$$

แต่งงานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้านั้นเพราะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมบ์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ สมมติว่า ในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายเทอิเล็กตรอน n โมล จะมีปริมาณประจุเท่ากับ $n \times 96,487$ หรือ nF คูลอมบ์ ในเมื่อ F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ต่อโมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการที่ (2.12) จะเปลี่ยนเป็น

$$W_{\text{elec.}} = (nF) (E) = nE \times 96,487 \quad (2.13)$$

แต่งงานนี้จะเกิดขึ้นได้ ต้องมีการลดพลังงานอิสระที่มีอยู่ในเซลล์ด้วย และในกรณีที่ปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นอย่างผันกลับได้ การลดพลังงานอิสระ ($-\Delta G$) จะเท่ากับงานที่กระทำ ดังนั้น

$$\Delta G = -nFE \quad (2.14)$$

เครื่องหมายของ ΔG มีความหมายสำคัญมาก คือ ถ้าที่อุณหภูมิและความดันหนึ่ง ๆ ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่ได้เอง ΔG จะมีเครื่องหมายเป็นบวก ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในภาวะสมดุล ΔG จะเท่ากับศูนย์ แต่ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันดังสมการที่(2.14) ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย่อมจะระบุให้ทราบว่า ปฏิกิริยาในเซลล์นั้นเป็นแบบเกิดขึ้นได้เอง หรือเกิดขึ้นไม่ได้เอง หรืออยู่ในภาวะสมดุล ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ความหมายของเครื่องหมาย ΔG และ ΔE

| ประเภทของปฏิกิริยา | เครื่องหมายของ ΔG | เครื่องหมายของ ΔE |
|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| เกิดขึ้นได้เอง | ลบ (-) | บวก (+) |
| เกิดขึ้นไม่ได้ | บวก (+) | ลบ (-) |
| ที่ภาวะสมดุล | ศูนย์ (0) | ศูนย์ (0) |

ที่มา : กัณษมาศ สุทธิเรืองวงศ์ , 2539

2.6.1.2 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือ ผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด ในทางปฏิบัติไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐานขึ้น คือ กำหนดให้อิเล็กโทรดไฮโดรเจนเมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจน และวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0_{cell}) และเป็นค่าเดียวกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E^0_{cell}) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำให้เช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่น ๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ศักย์ไฟฟ้าที่แสดงในตารางที่ 2.6 แสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทรดที่จะรับอิเล็กตรอนว่า มีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่า เป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดส์ (หรือรีดิวซ์) เช่น MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายกรดพบว่า จากตารางที่ 2.6 ค่า E^0 ของระบบ $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+} = +0.77$ โวลต์ และค่า E^0 ของ $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+} = +1.52$ โวลต์ แสดงว่าระบบ $\text{MnO}_4^- / \text{Mn}^{2+}$ มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+} / \text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดส์ที่ดีกว่า จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

$$E^0_{\text{cell}} = E^0(\text{ขั้วบวก}) - E^0(\text{ขั้วลบ}) \quad (2.15)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใด ๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกับสมการที่ (2.16) คือ

$$E_{\text{cell}} = E(\text{ขั้วบวก}) - E(\text{ขั้วลบ}) \quad (2.16)$$

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส
(ที่มา : ทบวงมหาวิทยาลัย ,2528)

| ครึ่งปฏิกิริยา | ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ของอิเล็กโทรด (โวลต์) |
|---|---|
| $F_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF(aq)$ | 3.06 |
| $O_3(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2(g) + H_2O$ | 2.07 |
| $S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$ | 2.01 |
| $Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$ | 1.842 |
| $H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$ | 1.776 |
| $MnO_4^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons MnO_2(s) + 2H_2O$ | 1.695 |
| $Ce^{4+} + e \rightleftharpoons Ce^{3+}$ | |
| $HClO + H^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Cl_2(g) + H_2O$ | 1.63 |
| $H_5IO_6 + H^+ + 2e \rightleftharpoons IO_3^- + 3H_2O$ | 1.60 |
| $BrO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{3}{2}Br_2(l) + 3H_2O$ | 1.52 |
| $MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$ | 1.51 |
| $Mn^{3+} + e \rightleftharpoons Mn^{2+}$ | |
| $ClO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{3}{2}Cl_2(g) + 3H_2O$ | 1.47 |
| $PbO_2(s) + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2H_2O$ | 1.455 |
| $Cl_2(g) + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$ | 1.359 |
| $Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$ | 1.33 |
| $Tl^{3+} + 2e \rightleftharpoons Tl^+$ | 1.25 |
| $IO_3^- + 2Cl^- + 6H^+ + 4e \rightleftharpoons$ $ICl_2^- + 3H_2O$ | 1.24 |
| $MnO_2(s) + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$ | 1.23 |
| $O_2(g) + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$ | 1.229 |
| $IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(s) + 3H_2O$ | 1.195 |
| $IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(aq) + 3H_2O$ | 1.178 ^o |
| $SeO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2SeO_3 + H_2O$ | 1.15 |
| $Br_2(l) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$ | 1.065 |
| $Br_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$ | 1.087 ^o |
| $ICl_2^- + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2(s) + 2Cl^-$ | 1.06 |
| $V(OH)_4^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + 3H_2O$ | 1.00 |
| $HNO_2 + H^+ + e \rightleftharpoons NO(g) + H_2O$ | 1.00 |
| $Pd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pd(s)$ | 0.987 |
| $NO_3^- + 3H^+ + 2e \rightleftharpoons HNO_2 + H_2O$ | 0.94 |
| $2Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$ | 0.920 |
| $HO_2^- + H_2O + 2e \rightleftharpoons 3OH^-$ | 0.88 |
| $Cu^{2+} + I^- + e \rightleftharpoons CuI(s)$ | 0.86 |
| $Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg(l)$ | 0.854 |
| $Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag(s)$ | 0.799 |
| $Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l)$ | 0.789 |
| $Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$ | 0.771 |
| $H_2SeO_3 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons Se(s) + 3H_2O$ | 0.740 |
| $PtCl_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt(s) + 4Cl^-$ | 0.73 |
| $C_6H_4O_2(quinone) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons$ $C_6H_4(OH)_2$ | 0.699 |
| $O_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$ | 0.682 |
| $PtCl_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons PtCl_4^{2-} + 2Cl^-$ | 0.68 |
| $Hg_2SO_4(s) + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l) + SO_4^{2-}$ | 0.615 |
| $Sb_2O_5(s) + 6H^+ + 4e \rightleftharpoons 2SbO^+ + 3H_2O$ | 0.581 |
| $MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$ | 0.564 |
| $H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_3AsO_3 + H_2O$ | 0.559 |

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) ตัวอย่างศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส
(ที่มา : ทบวงมหาวิทยาลัย ,2528)

| ครึ่งปฏิกิริยา | ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน ของอิเล็กโทรด (โวลต์) |
|---|---|
| $I_3^- + 2e \rightleftharpoons 3I^-$ | 0.536 |
| $I_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$ | 0.5355 |
| $I_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$ | 0.620 ^o |
| $Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu(s)$ | 0.521 |
| $H_2SO_3 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons S(s) + 3H_2O$ | 0.45 |
| $Ag_2CrO_4(s) + 2e \rightleftharpoons 2Ag(s) + CrO_4^{2-}$ | 0.446 |
| $VO_2^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons V^{3+} + H_2O$ | 0.361 |
| $Fe(CN)_6^{3-} + e \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$ | 0.36 |
| $Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu(s)$ | 0.337 |
| $UO_2^{2+} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons U^{4+} + 2H_2O$ | 0.334 |
| $BiO^+ + 2H^+ + 3e \rightleftharpoons Bi(s) + H_2O$ | 0.32 |
| $Hg_2Cl_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2Hg(l) + 2Cl^-$ | 0.268 |
| $AgCl(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + Cl^-$ | 0.222 |
| $SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2SO_3 + H_2O$ | 0.17 |
| $BiCl_4^- + 3e \rightleftharpoons Bi(s) + 4Cl^-$ | 0.16 |
| $Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$ | 0.154 |
| $Cu^{2+} + e \rightleftharpoons Cu^+$ | 0.153 |
| $S(s) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2S(g)$ | 0.141 |
| $TiO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons Ti^{3+} + H_2O$ | 0.1 |
| $AgBr(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + Br^-$ | 0.095 |
| $S_4O_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2S_2O_3^{2-}$ | 0.08 |
| $Ag(S_2O_3)_2^{3-} + e \rightleftharpoons Ag(s) + 2S_2O_3^{2-}$ | 0.01 |
| $2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2(g)$ | 0.000 |
| $Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb(s)$ | -0.126 |
| $Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn(s)$ | -0.136 |
| $AgI(s) + e \rightleftharpoons Ag(s) + I^-$ | -0.151 |
| $CuI(s) + e \rightleftharpoons Cu(s) + I^-$ | -0.185 |
| $N_2(g) + 5H^+ + 4e \rightleftharpoons N_2H_5^+$ | -0.23 |
| $Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni(s)$ | -0.250 |
| $V^{3+} + e \rightleftharpoons V^{2+}$ | -0.255 |
| $Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co(s)$ | -0.277 |
| $Ag(CN)_2^- + e \rightleftharpoons Ag(s) + 2CN^-$ | -0.31 |
| $Tl^+ + e \rightleftharpoons Tl(s)$ | -0.336 |
| $PbSO_4(s) + 2e \rightleftharpoons Pb(s) + SO_4^{2-}$ | -0.356 |
| $Ti^{3+} + e \rightleftharpoons Ti^{2+}$ | -0.37 |
| $Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd(s)$ | -0.403 |
| $Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$ | -0.41 |
| $Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe(s)$ | -0.440 |
| $2CO_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2C_2O_4$ | -0.49 |
| $Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr(s)$ | -0.74 |
| $Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn(s)$ | -0.763 |
| $Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn(s)$ | -1.18 |
| $Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al(s)$ | -1.66 |
| $Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg(s)$ | -2.37 |
| $Na^+ + e \rightleftharpoons Na(s)$ | -2.714 |
| $Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca(s)$ | -2.87 |
| $Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba(s)$ | -2.90 |
| $K^+ + e \rightleftharpoons K(s)$ | -2.925 |
| $Li^+ + e \rightleftharpoons Li(s)$ | -3.045 |

2.6.1.3 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย และมีผลต่อปริมาณประจุที่ปล่อยออกมาในปฏิกิริยาการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าตามกฎหมายของฟาราเดย์ที่ว่า 1 ฟาราเดย์ ของประจุที่ผ่านเข้าวงจรจะสะสมประจุออกมาจากขั้วไฟฟ้า 96,487 วัตต์-ชั่วโมง ซึ่งถ้าจำนวนประจุมากขึ้นก็จะทำให้มีประจุสะสมหรือเหล็กหลุดออกมาจากขั้วไฟฟ้าเพียงพอที่จะทำให้โลหะไฮดรอกไซด์ตกตะกอนได้มากขึ้น จากกฎของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้ จะมีค่าเท่ากับ ผลคูณของกระแสไฟฟ้า และความต้านทานกระแสไฟฟ้า สามารถขึ้นอยู่ในรูปของสมการ ดังสมการที่ (2.17)

$$V = I \times R \quad (2.17)$$

และมีความสัมพันธ์กับงานทางไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.18)

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ (} W_{\text{elec.}} \text{)} = \text{คูลอมบ์} \times \text{โวลท์} = nE \times 96,487 \quad (2.18)$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี คือ ความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์ กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามสมการที่ (2.19)

$$R = l / (C \times A) \quad (2.19)$$

- เมื่อ
- R เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยโอห์ม
 - l เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในหน่วยเซนติเมตร
 - C เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วยโมห์ หรือซีเมน
 - A เป็นพื้นที่หน้าตัด ของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในหน่วย ตารางเซนติเมตร

2.6.1.4 การแลกเปลี่ยนประจุและการเคลื่อนที่ของประจุ

การเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอน จากที่หนึ่งไปอีกที่หนึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดได้ในหน่วยแอมแปร์ (amp) จำนวนกระแสที่ผ่านไปหนึ่งหน่วยพื้นที่หน้าตัดจะวัดในรูปความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (current intensity, I) การวัดของกระแสซึ่งผ่านเข้าไปในวัสดุเรียกว่า การนำไฟฟ้าของวัสดุ (conductivity) ในโลหะส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้กฎโอห์ม ซึ่งสามารถเขียนเป็นในรูปความเข้มของสนามไฟฟ้า (E_r) มีหน่วยเป็น volt/cm ได้คือ

$$I = \sigma \cdot E_r \quad (2.16)$$

$$E_r = \frac{I}{\sigma} = \frac{V}{R \cdot \sigma} \quad (2.17)$$

โดย σ เป็นค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น mhos/cm

V เป็นความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น volt

R เป็นความต้านทานระหว่างจุดสองจุด มีหน่วยเป็น mhos

I เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน มีหน่วยเป็น (amp)

2.6.1.5 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปโดยสารละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลต์ เพื่อให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือคือ ผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

$$\begin{aligned} 1 \text{ F (Faraday)} &= eN = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C}) (6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) \\ &= 96487 \text{ C mol}^{-1} \quad (\text{C} = \text{coulomb}) \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } X \text{ coulomb} = I \text{ (ampere)} \times t \text{ (second)}$$

หรือ 1 ฟาราเดย์ คือไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วไฟฟ้าจำนวน 1 โมลเท่ากัน เช่น

- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน Al^{+3} จะได้ Al(s) 1 โมล = $\frac{\text{น.น.กรัมโมล}}{\text{ประจุ}} = \frac{26.98}{3} = 9$ กรัม

- ผ่านกระแสไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ลงใน Fe^{+2} จะได้ Fe(s) 1 โมล = $\frac{\text{น.น.กรัมโมล}}{\text{ประจุ}} = \frac{55.85}{2} = 27.9$ กรัม

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของมวลโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วยกฎของฟาราเดย์ดังสมการต่อไปนี้ (ปริเมธ เจริญนพคุณ, 2545)

$$W = \frac{i \cdot t \cdot M}{Z \cdot F} \quad (2.18)$$

โดย W เป็นปริมาณโลหะที่ละลาย (g)
 i เป็นค่ากระแสไฟฟ้าหลังการทดลอง (A)
 M เป็น น.น.โมเลกุลของขั้วแอโนด
 t เป็นเวลาที่ใช้ (วินาที)
 Z เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
 F เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,500

2.6.1.6 ขั้วไฟฟ้า (electrodes)

ขั้วไฟฟ้าที่ใช้จะแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

- ก. ขั้วที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (active electrodes)
- ข. ขั้วที่ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (inert electrodes)
- ค. ขั้วแก๊ส (gas electrodes)

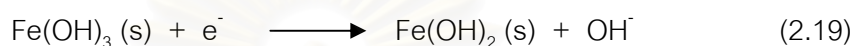
1) อะลูมิเนียม (aluminium)

เป็นโลหะหมู่เดียวกับแกเลียม, อินเดียม และเทลลูเรียม อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุดบนผิวโลก อะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่น ๆ ได้ อะลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 เมื่อโลหะให้อิเล็กตรอนออกไป 3 อิเล็กตรอน Al^{3+} มีขนาดเล็กมาก สารประกอบโลหะที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มักจะเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ อย่างไรก็ตามเมื่ออยู่ในน้ำ Al^{3+} จะเกิดไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส เกิดอัลเฟต, ไนเตรต และเฮไลด์ของอะลูมิเนียมละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายในน้ำ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมมีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก อะลูมิเนียมที่นำมาใช้งานเป็นชนิด Al 406 จะมีคุณภาพดีที่สุด

2) เหล็กกล้า (steels)

เป็นโลหะแข็งมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงมีความว่องไวปานกลางต่อปฏิกิริยา สารประกอบของธาตุเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูง ๆ มีบ้างแต่ไม่เสถียร

และเป็นออกซิไดส์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้นมักจะกลายเป็นสนิมที่ผิว เรียกว่า สนิมเหล็ก ดังนั้นเครื่องมือเครื่องใช้ที่ทำด้วยเหล็ก จึงต้องหาวิธีป้องกัน เช่น ทาสีกันสนิมเคลือบด้วยโลหะที่เหมาะสม (ดีบุก, สังกะสี, โครเมียม) หรือผสมโลหะบางชนิดลงไปเพื่อให้ได้เหล็กปลอดสนิม เมื่อเผาไหม้ในอากาศจะได้ออกไซด์ผสม $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ หรือ Fe_3O_4 ซึ่งมีประโยชน์ใช้ฉาบผิวเหล็กเพื่อป้องกันสนิมได้ เหล็กสามารถเกิดสารประกอบกับบอโลหะได้หลายชนิด เมื่อให้ความร้อนแต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน เมื่ออยู่ในสารละลายเหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เนื่องจาก $\text{Fe}(\text{II})$ ถูกออกซิไดส์โดยอากาศได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะเป็นกลางหรือเป็นเบสดังจะเห็นจากค่า E^0



สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ $\text{Fe}(\text{II})$ ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอกไซด์ $\{\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6\}^{2+}$ สารประกอบ $\text{Fe}(\text{III})$ มักมีสมบัติเป็นกรดมากกว่าของ $\text{Fe}(\text{II})$ ทั้งนี้ปรากฏว่า $\text{Fe}(\text{III})$ ในสารละลายจะอยู่ในรูปของ $\{\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6\}^{3+}$ ซึ่งมีสีม่วงจาง เมื่อ pH ต่ำมาก ๆ เท่านั้น มิฉะนั้นจะถูกไฮโดรไลซิสกลายเป็น $\{\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})\}^{2+}$ หรือไฮดรอกไซด์ของเหล็กหลาย ๆ กันนี้ทำให้ได้สารละลายสีเหลือง

เหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1.เหล็กกล้าคาร์บอนและ 2.เหล็กกล้าผสม โดยเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นเหล็กที่นำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายซึ่งขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน เหล็กที่นำมาใช้งานนี้เป็นเหล็กชนิด Fe 306 ดีที่สุด

3) เหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel)

เป็นเหล็กกล้าที่จัดอยู่ในขอบข่ายเหล็กกล้าผสม ธาตุผสมที่สำคัญคือ โครเมียม ซึ่งจะมีตั้งแต่ 11 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป โครเมียมที่อยู่ในเนื้อเหล็กกล้า จะก่อให้เกิดฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวของเหล็กกล้า ฟิล์มอันนี้มีความเงางามและป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิมให้คุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนและผิวมีความเงาแวววาว

โดยเหล็กกล้าไร้สนิมที่นำมาใช้งานนี้เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทเฟอร์ริติก เพราะเป็นเหล็กกล้าที่มีความเหนียวหยุ่น และสามารถดัดขึ้นรูปโดยวิธีกลึงได้ดี ส่วนใหญ่ใช้งานในด้านวิศวกรรมเคมี เนื่องจากทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีได้

2.6.1.7 ปัจจัยที่ต้องควบคุมของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ทิศทางของอิออนและกระแสไฟฟ้าที่ไหลจะขึ้นอยู่กับควบคุม (ปริเมฆ เจริญ นพคุณ, 2545) ดังนี้

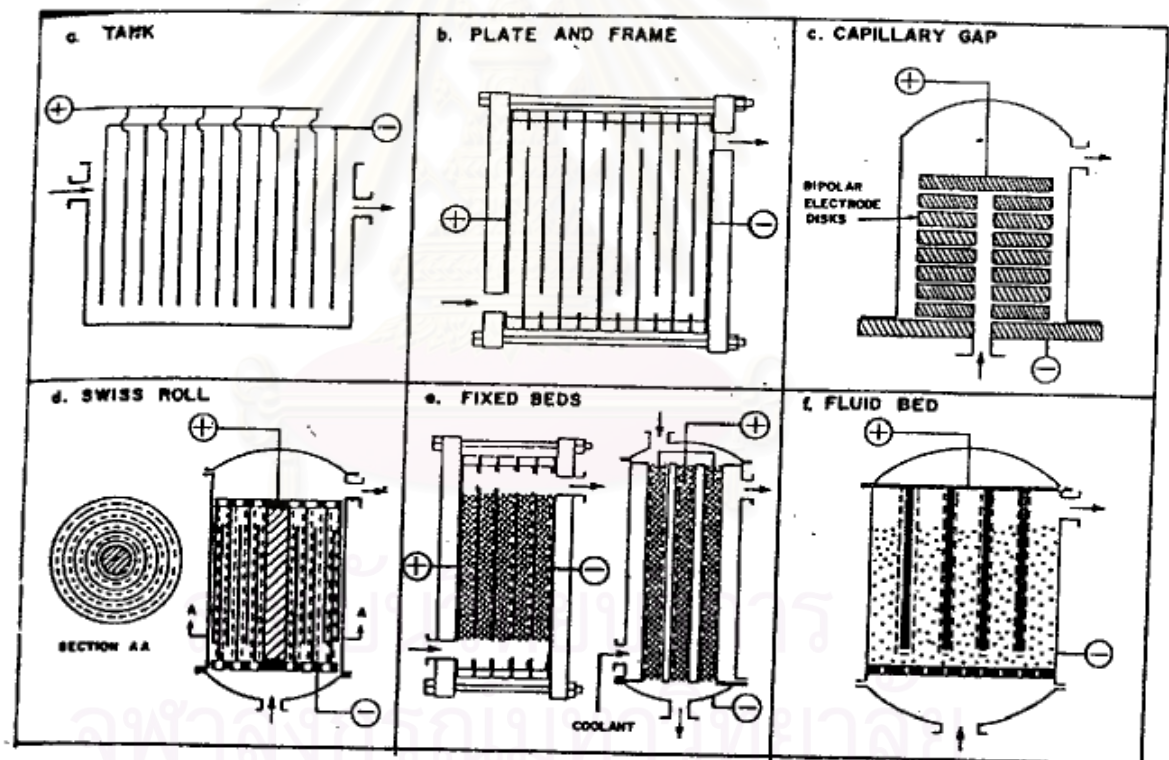
1. ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าโดยกระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับกระแสภายนอกที่ให้แก่ระบบ
2. การเคลื่อนที่ของประจุอิออน ความสามารถของอิออนที่จะนำกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับประจุบอิออนและขนาดของอิออน
3. คุณสมบัติในการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับคุณสมบัติของสารละลาย โดยที่ความสามารถในการเคลื่อนที่จะเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 ต่อการเพิ่มคุณสมบัติขึ้น 1 องศาเซลเซียส
4. พื้นที่สัมผัสของขั้วไฟฟ้า ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดของผิวสัมผัสใหญ่จะดีสำหรับการถ่ายและรับอิเล็กตรอน โดยที่กระแสไฟฟ้าจะมีสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า
5. ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า จำนวนกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับระยะทางที่อิออนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้า ระยะห่างน้อยกระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น
6. จำนวนประจุของอิออนจะมีมากขึ้น เมื่อมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้ามากขึ้น
7. ความเข้มข้นของสารละลายนำไฟฟ้าได้ ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายจะมีสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น ๆ

2.6.1.8 หลักการในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีหลายรูปแบบดังรูปที่ 2.7 ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการที่สำคัญในการออกแบบ คือ

1. ควรออกแบบเป็นแบบง่ายที่สุด ค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบที่มีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย
2. ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้อย่างสมบูรณ์ ก่อนที่จะผ่านสู่ขั้นตอนอื่นในกรณีที่มีกระบวนการอื่น นอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง ควรทำการแยกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี
3. เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจจะต้องใช้แผ่นกั้นหรือใบพัด

4. ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอ ทั่วพื้นผิวของอิเล็กโทรด
5. ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อย เพราะระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดยิ่งมาก จะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงซึ่งจะทำให้ค่าไฟฟ้าสูงขึ้น
6. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้น ต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น จากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยสามารถคงทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน
7. การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้น ต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัดและปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แกร์ไฟต์ไม่นิยมใช้ทำอิเล็กโทรดเนื่องจากจะถูกออกซิไดส์ด้วย CO_2 และมีราคาแพงเป็นต้น (Mendia, 1982)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบต่าง ๆ (Oloma, 1985)

2.6.2 ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการกำจัดสีโดยวิธี Electrocoagulation

จากปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะพบว่า เซลล์ไฟฟ้าเคมี จะทำให้เกิดปฏิกริยาหลายอย่างดังต่อไปนี้

1) กระบวนการ oxidation

เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านน้ำ จะเกิดปฏิกริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) จะได้ก๊าซออกซิเจน ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ที่แรง อีออนของโลหะที่ละลายน้ำได้ (วาเลนซ์ 2 ขึ้นไป) จะตกตะกอนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ (Organic contaminant) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความพร้อมที่จะรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex)

2) กระบวนการ Flotation

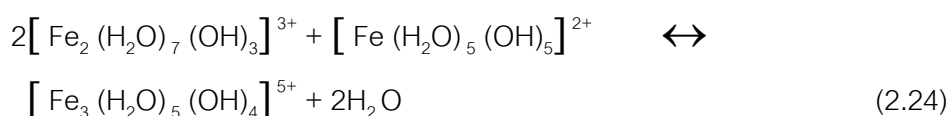
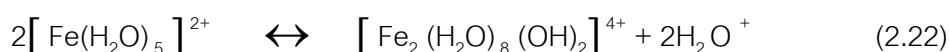
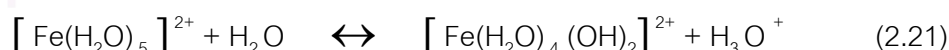
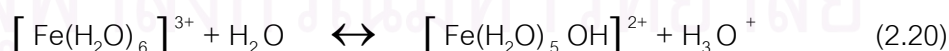
ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งเป็นฟองเล็กมาก เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดหนึ่ง จะลอยตัวขึ้นสู่ผิวและพองอนุภาคเล็กๆ ให้ลอยขึ้นสู่ผิว เกิดการแยกของสารแขวนลอย

3) กระบวนการรวมตัวเป็นสารเชิงซ้อน

ที่ขั้วบวก ion ของ Fe^{3+} , Al^{3+} จะทำปฏิกริยารวมตัวเป็น Organometallic complex กับสารอินทรีย์พวก Aromatic และ Alkanes สารเชิงซ้อนเหล่านี้ ไม่ละลายในน้ำ จะลอยสู่ผิวน้ำเสียโดยการลอยตัว (Flotation) จึงเกิดการพองโดยฟองก๊าซ และบางส่วนจะจมลง (Precipitation)

2.6.2.1 การกำจัดสีโดยกระบวนการออกซิเดชัน

กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันในการกำจัดสี โดยจะเกิดฟลอคของโลหะไฮดรอกไซด์เกาะจับอนุภาคของสีตกตะกอนลงมา ซึ่งการเกิดปฏิกริยาโคแอกกูเลชันก็จะเกิดปฏิกริยาออกซิเดชันของไฮดรอกซีที่คอมเพล็กซ์ของเหล็กในเวลาเดียวกัน ดังสมการที่ (2.20- 2.24) (Szpyrkowicz และคณะ)



2.6.2.2 การกำจัดสีโดยการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์

ในการบำบัดน้ำเสียที่สารปนเปื้อนเช่นสีและสารอินทรีย์ ซึ่งถือว่าเป็นคอลลอยด์ นั้นถือว่ามีเสถียรภาพเมื่อสามารถดำรงสถานะแขวนลอยในน้ำได้โดยไม่ตกตะกอน ภายในเวลาสั้น เมื่อทำให้อนุภาคคอลลอยด์ตกตะกอนและแยกตัวจากน้ำก็ถือว่า เสถียรภาพของคอลลอยด์ถูกทำลายและไม่มีเสถียรภาพอีกต่อไป เราสามารถใช้ทฤษฎี เกี่ยวกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอลลอยด์ คือ Electric Double Layer มาอธิบายได้ว่า ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และน้อยลงเมื่อห่างออกไป (ดังรูปที่ 2.8) ณ ตำแหน่งที่ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์แสดงว่าไม่อยู่ภายใต้อำนาจไฟฟ้าของคอลลอยด์ ทำให้การกระจายตัวของอิออนบวกและลบเป็นไปตามปกติ ตามทฤษฎี Double Layer เชื่อว่าอิออนบวกชั้นในที่สุดไม่สามารถเข้าถึงผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้เพราะอิออนบวก มักมีโมเลกุลของน้ำห่อหุ้มอยู่ ระยะห่างระหว่างผิวอนุภาคคอลลอยด์และจุดศูนย์กลางของอิออนที่อยู่ใกล้ที่สุด (ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของอิออน) คล้ายมีเปลือกทรงกลมบางซึ่งมีความหนาเท่ากับ Ω กั้นขวางอยู่ เปลือกหรือชั้นบางนี้เรียกว่า Stern Layer และถือว่าเป็นชั้นในของทฤษฎีนี้ ศักย์ไฟฟ้าที่เปลือกนี้มีค่าเท่ากับ Stern Potential ส่วนเปลือกชั้นนอกเรียกว่า Diffuse Layer (ชั้นกระจาย) ครอบคลุมจากเปลือกชั้นในไปถึงตำแหน่งที่อนุภาคคอลลอยด์หมดอำนาจไฟฟ้าพอดี (ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์)

นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรสามารถวัดศักย์ไฟฟ้าที่จุดอื่นซึ่งไม่ใช่ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ ทั้งนี้โดยการวัดอัตราการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามไฟฟ้า (Electrophoretic Mobility) และคำนวณศักย์ไฟฟ้าจากค่าที่วัดได้ ศักย์ไฟฟ้าที่คำนวณได้นี้เรียกว่า ซีตาโพเทนเชียล (Z_p) หมายถึงศักย์ไฟฟ้าที่ผิว (หรือเปลือก) นอกสุดของน้ำที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับอนุภาคคอลลอยด์ ผิววนอกที่สุดนี้เรียกว่า Plane of Shear

บทบาทของซีตาโพเทนเชียล มีมากกว่าศักย์ไฟฟ้าตัวอื่นๆ เนื่องจาก ซีตาโพเทนเชียล ใช้เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงระดับของเสถียรภาพของคอลลอยด์ได้ คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพต่ำ จะมีซีตาโพเทนเชียลต่ำและทำให้รวมตัวกันเป็นฟลอคได้ง่าย (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2538) ด้วยเหตุนี้ เสถียรภาพของคอลลอยด์จึงขึ้นอยู่กับแรงดูดและแรงผลักระหว่างอนุภาค แรงผลักจะต้องสูงกว่าแรงดูดจึงจะทำให้คอลลอยด์มีเสถียรภาพ ถ้าแรงดูดมากกว่าแรงผลักอนุภาคคอลลอยด์ต่าง ๆ สามารถจับกันเป็นกลุ่มก้อนหรือฟลอคได้ ทำให้คอลลอยด์ไม่มีเสถียรภาพ แรงดูดระหว่างอนุภาคเรียกว่า van der Waals Force เป็นแรงอ่อนที่มีอำนาจเมื่ออนุภาคอยู่ใกล้กัน ส่วนแรงผลักระหว่างอนุภาคเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าของอนุภาค หรือซีตาโพเทนเชียล ทั้งนี้เป็นไปตามศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุลบของคอลลอยด์ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ผิว (Nernst Potential) และ

น้อยลงเมื่อห่างออกไป ดังนั้นถ้าค่าซีตาโพเทนเชียลสูงจะเกิดการผลึกดี ซึ่งเกิดจากประจุลบของคอลลอยด์เสถียรภาพก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 2.8 (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2538)

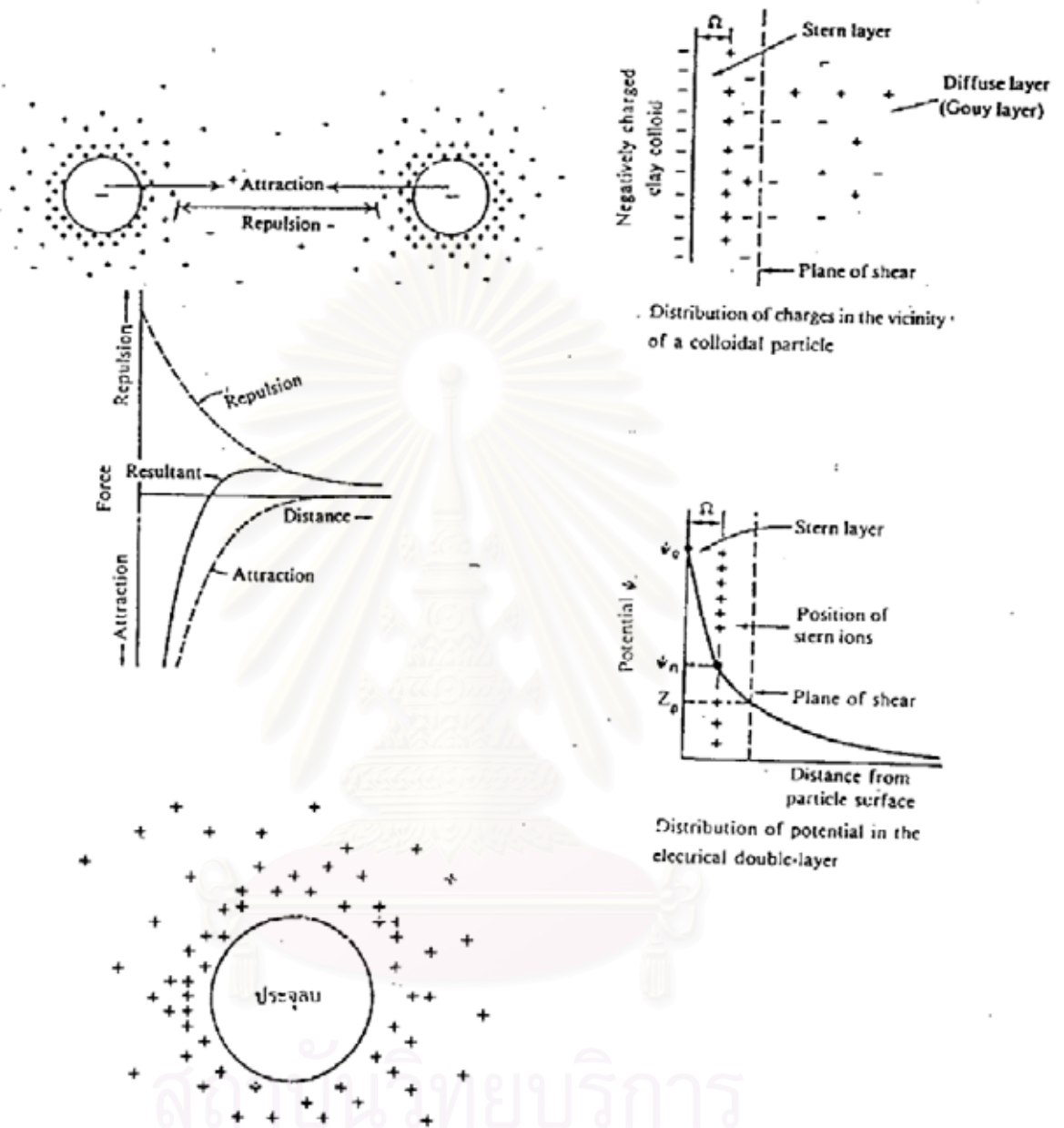
ดังนั้นการกำจัดสีโดยการทำลายเสถียรภาพของคอลลอยด์จะอาศัยกลไก 2 แบบในการทำลายเสถียรภาพของสีและสารอินทรีย์ ดังนี้

(1) กลไกโคแอกกูเลชันแบบดูดติดผิวและทำลายประจุ

กลไกแบบดูดติดผิว / ทำลายประจุ โดยการแตกตัวเป็นอิออนคอมเพล็กซ์ชนิดต่างๆเช่น $Al(OH)^{+2}$, $Al_8(OH)_{20}^{+4}$ ซึ่งสามารถดูดติดบนผิว ของอนุภาคคอลลอยด์และทำลายประจุลบของคอลลอยด์ทำให้คอลลอยด์สูญเสียเสถียรภาพ และพร้อมที่จะรวมตัวกันหลายๆอนุภาคจนกลายเป็นฟล็อก คุณสมบัติที่ดีของกลไกนี้คืออัดตัวได้แน่นและทำให้แห้งหรือดึงเอาน้ำออกจากสลัดจ์ได้ง่าย ถึงแม้ว่ากลไกแบบดูดติดผิว/ทำลายประจุจะมีข้อดีดังกล่าว แต่ในทางปฏิบัติ ปรากฏว่าโคแอกกูเลชันส่วนใหญ่มีกลไกเป็นแบบ Sweep Coagulation ซึ่งเกิดได้ง่ายกว่ามาก เนื่องจากว่ากลไกนี้ต้องเกิดขึ้นและเสร็จสิ้นภายในเวลา 10^{-4} ถึง 1 วินาที มิฉะนั้นแล้วอิออนคอมเพล็กซ์จะไฮโดรไลซ์ต่อไปจนเกิดผลึก $Al(OH)_3$ ทำให้เกิด Sweep Coagulation (มันลิน ตันทุลเวศม์, 2538)

(2) กลไกโคแอกกูเลชันแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึก

กลไกแบบห่อหุ้มอนุภาคด้วยผลึกหรือ Sweep Coagulation โดยการสร้างผลึก $Al(OH)_3$ ซึ่งมีลักษณะคล้ายเป็นปุ๋ย เมื่ออนุภาคคอลลอยด์สัมผัสกับผลึก $Al(OH)_3$ ก็จะเกาะตัวจับอยู่บนผลึกนั้นเมื่อเกิดขึ้นมากๆ จะได้ฟล็อกขนาดใหญ่ที่ตกตะกอนได้ง่าย กลไกแบบนี้เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าแบบแรกแต่มีข้อเสียคือ เปลืองสารส้มและให้สลัดจ์จำนวนมากที่มีคุณภาพต่ำคืออัดตัวไม่แน่นและดึงน้ำออกยาก



รูปที่ 2.8 ทฤษฎี Electrical Double Layer (มันสิ้น ตันทุลเวศม์, 2538)

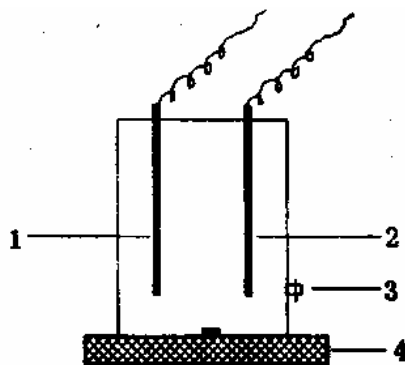
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดสีย้อมโดยวิธีไฟฟ้าเคมีและการตกตะกอนทางเคมี

Naumczyk , Szpyrkowicz และ Zilio – Grandi (1996) ศึกษาการกำจัดสีน้ำเสียจากน้ำย้อมผ้าโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยใช้แผ่นอิเล็กโทรดชนิดต่าง ๆ 3 ชนิด พบว่ากระบวนการนี้สามารถกำจัดสีได้สูง 94 – 97 % กำจัด COD 10 – 20 % โดยที่แผ่นอิเล็กโทรดต่างกันจะกำจัดสีได้ต่างกันเล็กน้อย และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัดสี และ COD จะเพิ่มขึ้น คือหลังจาก 1 ชั่วโมงจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสี 99 % และกำจัด COD 85 – 92 % แต่วิธีนี้ พบว่า จะมีสารประกอบอื่น ๆ เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก

Lin และ Lo (1997) ศึกษาการใช้กระบวนการเฟนตอนร่วมกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด คือ สีย้อมไดเร็กซ์ สีน้ำเงิน และสีรีแอกทีฟ สีดำ ซึ่งมีโพลีไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นองค์ประกอบรวมอยู่ด้วยในปริมาณน้อยกว่า 2 % สำหรับกระบวนการตกตะกอนทางเคมีจะใช้ โพลีอลูมิเนียมคลอไรด์ 100 มล./ล. ร่วมกับ โพลีเมอร์ 1 มก./ล. จากการศึกษาพบว่า พีเอช ที่เหมาะสมคือ พีเอช 3.0 และอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 30 องศาเซลเซียส สำหรับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเฟอร์รัสซัลเฟต คือ 1,000 มก./ล. และ 200 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัดสีไดเร็กซ์ได้ 60 % และกำจัดสีรีแอกทีฟได้มากกว่า 90 % กำจัด COD ได้ประมาณ 60 % สำหรับสีทั้ง 2 ชนิด และเมื่อใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมี พบว่าช่วยลดเวลาในการตกตะกอนให้เร็วขึ้น และสามารถเพิ่มการกำจัดสีไดเร็กซ์จาก 60 % เป็น 90 % ส่วนสีรีแอกทีฟจะมีผลเล็กน้อย เนื่องจากสามารถกำจัดสีได้ดีอยู่แล้วย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังเดิม อากาศ และไม่ต้องการถังตกตะกอนชั้นปฐมภูมิ เพราะการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียด้วยไอโซนไม่ก่อให้เกิดสลัดจ์

JIA และคณะ (1999) ได้ทำการศึกษาการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมโดยใช้ขั้วไฟฟ้า ACF (Activated Carbon Fiber) ในปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยการทดลองเป็นถึงปฏิกิริยาแบบเท ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การติดตั้งถังปฏิกริยาแบบเท

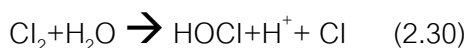
1. แอนโนด (ACF+Fe) 2. แคโทด (ACF)
3. วาล์วเก็บตัวอย่าง 4. magnetic stirring controllen แบบ digital

ทำการทดลองกับน้ำเสีย 1 ลิตร และใช้ช่วงที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ความต่างศักย์ 25 โวลต์ เดิมโซเดียมซัลเฟต 0.5 กรัม/ลิตร และใช้เวลาบำบัด 1 ชม. จากวิธีนี้พบว่าให้ประสิทธิภาพดีและสูงเมื่อเทียบกับการใช้ เพนตอน รีเจนต์ในการบำบัดแต่ผลก็อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกัน จะมีการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปร เช่น ความต่างศักย์ , พีเอช , การเติมเกลือ (Na_2SO_4) เพื่อศึกษาถึงผลในการบำบัด ด้วยวิธีนี้ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมากกว่า 90 % และกำจัด COD ได้ในช่วง 40-80 %

Zhan และคณะ (2001) ได้ทำการบำบัดความเค็มของน้ำเสียฟอกย้อมโดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมี เพราะในน้ำเสียจาก ร.ง. ฟอกย้อมจะมีความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สูงในการบำบัดทางชีวภาพจะไม่ค่อยได้ผล โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ปฏิกริยาออกซิเดชัน ที่เกิดจากปฏิกริยาไฟฟ้าเคมี โดยจะเกิดเป็นสารที่มีอำนาจในการออกซิไดซ์สูงเช่นเพนตอน รีเจนต์ ในการทำให้เกิดไฮโปคลอไรต์ ซึ่งพบว่าสามารถกำจัด COD ได้ 87% และกำจัดสีได้ 100 % ภายในเวลา 50 นาที ในขณะที่ถ้าบำบัดโดยปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีในทางตรงจะกำจัด COD ได้เพียง 47% และสีได้ 50 % ในเวลา 5 ชม. โดยการเกิดไฮโปคลอไรต์จะเกิดที่ขั้วแอนโนด



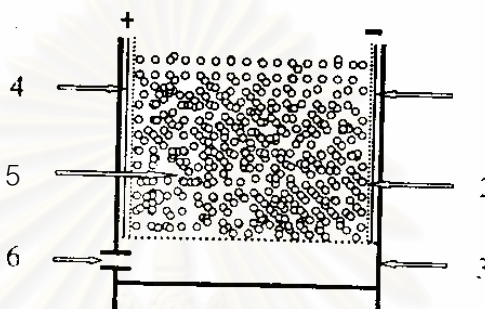
โดย Cl_{ads} คือ คลอรีนที่ถูกดูดซับไว้ที่ขั้วแอนโนด



ถ้าปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดจากปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีจะเกิดกลไกการกำจัด COD ซึ่งเป็นขั้นปฏิกริยาที่หนึ่ง จะมีอัตราการกำจัด COD คงที่คือ 0.0018 ต่อนาที และ 0.038 ต่อนาที ถ้าเกิดปฏิกริยาไฟฟ้าเคมีในทางตรง และประสิทธิภาพโดยวิธีนี้จะเพียง 0.16 แต่ถ้าเกิดปฏิกริยาออกซิเดชัน

ทางไฟฟ้าเคมีประสิทธิภาพจะเท่ากับ 1 และประสิทธิภาพในการลงทุนเป็น 8000 มก.-ซีโอดี/กิโลวัตต์-ชม. และ 1000 มก.-ซีโอดี/กิโลวัตต์-ชม. สรุปว่าถ้าใช้ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ที่จะก่อให้เกิดสารออกซิไดซ์จะสามารถกำจัดความเค็มในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมได้

Xiong และคณะ (2001) งานวิจัยนี้ได้ทำการบำบัดสีแอสิต ออเรนจ์ 2 ในน้ำเสียฟอกย้อมโดยใช้เซลล์ไฟฟ้าเป็นแบบ 3 เฟสและ 3 โดเมนชั้น ในถังปฏิกิริยาแบบเท ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โดอะเฟรมของถังปฏิกิริยาแบบ 3 เฟส 3 โดเมนชั้น

- (1.) แคโทด (2.) โดอะเฟรม (3.) Support (4.) แอโนด
(5.) อนุภาคของชั้นไฟฟ้า (เป็น GAC หรือเหล็ก) (6.) แรงดันอากาศ

โดย 3 เฟสคือ มีทั้งของแข็ง, ของเหลวและแก๊ส ซึ่งในการทดลองจะใช้กระบวนการโคแอกกูเลชันและอิเล็กโทรออกซิเดชัน จะมีโคแอกกูเลชัน 2 ชนิด คือ โคแอกกูเลชันของเหล็ก และอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน โดยอิเล็กโทรออกซิเดชันจะเกิดในถังปฏิกิริยาโดยมี GAC เป็นชั้นไฟฟ้า จะทำการทดลองโดยสนใจผลของความต่างศักย์ไฟฟ้า, อัตราการไหลของอากาศ, ความนำไฟฟ้า, เวลาในการบำบัด ประสิทธิภาพในการกำจัด COD และสีของระบบนี้ สูงถึง 99 % และ 87% ตามลำดับ โดยใช้อัตราโมลาร์ของ Fe(II)/สี เป็น 0.5 ใช้ความต่างศักย์ 20.V. อัตราการไหลของอากาศ 0.1 ม³/ชม. และใช้เวลาเพียง 30 นาที

Szpyrkowicz และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการแตกตัวของสีย้อมโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยวิธีไฟฟ้าเคมี, โอโซน, ไฮโปคลอไรต์ และ เพนตอนรีเอเจนต์ จากผลการทดลองพบว่าการแตกตัวของสีโดยใช้ ไฮโปคลอไรต์ไม่เป็นที่น่าพอใจ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีไฟฟ้าเคมีเหมือนกับวิธีอื่น ๆ เพราะลดสีได้เพียง 35% โดยใช้ความเข้มข้น 6 g/m³ การใช้โอโซนจะช่วยเพิ่มการกำจัดได้มากถึง 90% โดยใช้ความเข้มข้น 0.5 g/m³ แต่ที่สามารถกำจัด COD ได้เพียง 10% และเมื่อทำการทดลองโดยใช้วิธีไฟฟ้าเคมีจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นอย่างมาก โดยใช้ pH ในช่วง

ที่เป็นกรด ภายในเวลา 40 นาที จะใช้ขั้วแอโนดเป็นแพลทินัม และเหล็กส่วนแคโทดจะใช้ไทเทเนียม สามารถกำจัด COD ได้ 79% กำจัดสีได้ 90% ปฏิกริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในทุกวิธีนั้นก็จะเกิดคลอรีนที่เป็นสารประกอบ ซึ่งทำให้เป็นวิธีที่มีผลในการกำจัดสารปนเปื้อน ส่วนวิธีการกำจัดที่ได้ผลดีที่สุดก็คือการใช้สารฟenton โดยที่ pH3 จะเหมาะสมที่สุด และใช้ความเข้มข้นของ H_2O_2 และ Fe_0 เท่ากับ 600 และ 550 mg/m^3 ผลที่ได้คือกำจัดสีได้มาก และมี COD เหลือในน้ำเสียเพียง 100 mg/m^3

Tak และคณะ (2002) ทำการศึกษากระบวนการในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อม เป็นกระบวนการร่วมของ fluidized biofilm ,chemical coagulation และ electrochemical oxidation เนื่องจากกระบวนการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งใช้เชื้อจุลินทรีย์ 2 สายพันธุ์ก็มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ซึ่งจะแยกจากกันโดยการประยุกต์ใช้กับ supporting media ส่วนภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการตกตะกอนทางเคมีจะใช้ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ที่พีเอชเท่ากับ 6 ประมาณ 3.25×10^{-3} โมล/ลิตร และภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ electrochemical oxidation คือใช้ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ 25 Mm NaCl ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 2.1 mA/cm^2 และใช้เวลา 0.71 นาที/อัตราการไหลที่เลือกใช้สำหรับประสิทธิภาพที่ดีที่สุด กระบวนการนี้ ซึ่งกระบวนการ fluidized biofilm สามารถกำจัด COD ได้ 68.8% และสามารถกำจัดสีได้ 54% เมื่อความเข้มข้นของ MLSS ต่ำ และค่าเวลากักสลัดจัสตัน และเมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการร่วมทั้งหมด ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ 95.4% และสามารถกำจัดสีได้ถึง 98.5% จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD จะเพิ่มขึ้น 25.7% และสามารถกำจัดสีเพิ่มขึ้น 20.5% เมื่อเทียบกับกระบวนการ fluidized biofilm อย่างเดียว แสดงให้เห็นว่ากระบวนการ fluidized biofilm นี้มีประสิทธิภาพเพียงพอและปริมาณมลพิษในกระบวนการบำบัดขั้นต้นนี้ลดลงอย่างมาก

กระบวนการร่วมนี้ถือว่ามีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการร่วมในลักษณะคล้าย ๆ กันซึ่งในกระบวนการร่วมนี้ถือว่าประสบความสำเร็จและในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมขั้นต้นนี้มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณมลพิษลงได้

กาญจนา คลองธรรมชาติ (2535) ศึกษาการใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงฟอกย้อม ตัวแปรที่ศึกษา คือ พีเอช ปริมาณโพลีลูมิเนียมคลอไรด์ และปริมาณโพสิเมอร์ โดยการศึกษาใช้น้ำเสียจริง คือ น้ำเสียที่ออกจากหม้อย้อมโดยตรง แบ่งน้ำเสียตามประเภทสีย้อม ได้แก่ สีรีเอกทีฟ เอซิดไดเร็กท์ และดิสเพิร์ส พบว่าในการกำจัดสีน้ำเสีย ขึ้นอยู่กับประเภท

ของสี่ข้อม ชนิดโทนสี พีเอชที่เหมาะสมปริมาณโพลีโอลูมิเนียม และปริมาณโพลีโอเมอร์ชนิดประจุบวกที่เหมาะสม ปริมาณโพลีโอลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสม เท่ากับ 400 – 500 , 500 ถึงมากกว่า 3,000 , 600 – 3,000 และ 100 – 1,500 มก./ล. สำหรับสี่รีแอกทีฟ เอซิด ไดเรกท์ และดิสเพิร์ทตามลำดับ ปริมาณโพลีโอเมอร์ที่ใช้อยู่ระหว่าง 0.2 – 0.5 มก./ล.

สวีณา เกตุสุวรรณ (2543) ศึกษาการลดค่าซีโอดีในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยโพลีโอลูมิเนียมคลอไรด์ เพอร์ริคซัลเฟต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยมีสารช่วยในการตกตะกอนชนิดแอนไอออน และแคทไอออน พบว่าสารสร้างตะกอนที่ลดค่าซีโอดีในน้ำเสียจากบ่อพักได้สูงสุด คือ เพอร์ริคซัลเฟต 250 มก./ล. เมื่อใช้สารช่วยตกตะกอนชนิดแคทไอออน 3.5 มก./ล. และพีเอชประมาณ 7 ลดค่าซีโอดีได้ 57.8 % ส่วนโพลีโอลูมิเนียมคลอไรด์ใช้ 2,000 มก./ล. ร่วมกับสารช่วยตกตะกอนชนิดแคทไอออน 5.0 มก./ล. ที่พีเอชประมาณ 10 ลดค่าซีโอดีได้ 51.9 % และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใช้ 400 มก./ล. ร่วมกับสารช่วยตกตะกอนแคทไอออน 3.50 มก./ล. ที่พีเอชประมาณ 7.5 ลดค่าซีโอดีได้ 48.3 %

ขนิษฐา เจริญลาภ (2545) ศึกษาการกำจัดสีดิสเพิร์ส สีไดเรกท์ และสี่รีแอกทีฟ จากน้ำย้อมผ้าโดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งใช้สารตกตะกอน 5 ชนิด คือ อลูมิเนียมซัลเฟต โพลีโอลูมิเนียมคลอไรด์ เพอร์ริคซัลเฟต และเพอร์ริคซัลเฟต พบว่าสีไดเรกท์ สารตกตะกอนทั้ง 5 ชนิดมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยสีไดเรกท์ตกตะกอนได้เกือบ 100 % ส่วนสีดิสเพิร์ส พบว่าโพลีโอลูมิเนียมคลอไรด์มีประสิทธิภาพสูงสุดในการตกตะกอนสี คือ 97 % และเพอร์ริคซัลเฟตมีประสิทธิภาพต่ำสุด คือ ประมาณ 41 % สำหรับสี่รีแอกทีฟ พบว่าสารตกตะกอนทั้ง 5 ชนิดนี้ ไม่สามารถตกตะกอนสี่รีแอกทีฟได้เลย ต้องอาศัยสารช่วยในการตกตะกอน

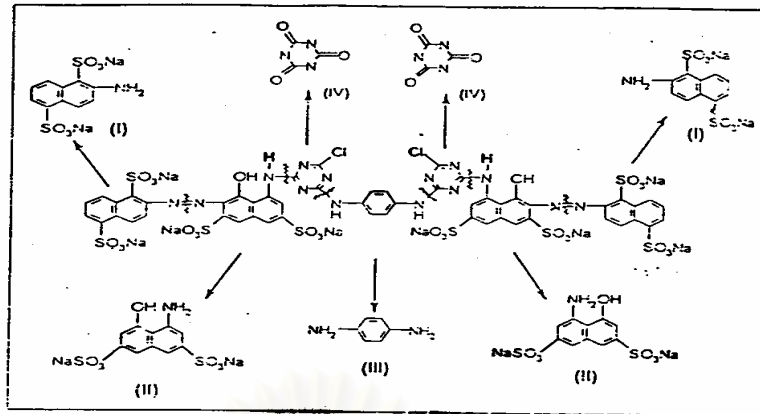
ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์ (2546) การวิจัยครั้งนี้มุ่งศึกษาการบำบัดสี่ข้อมรีแอกทีฟด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณอ็อกซิเจนของเหล็กที่ละลายจากขั้วแอโนดและความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดสี่ข้อมรีแอกทีฟในน้ำเสียซึ่งสังเคราะห์ขึ้นจากสี่ข้อมรีแอกทีฟ 4 โทนสี ได้แก่ สีดำ สีน้ำเงิน สีแดงและสีเหลือง การทดลองทำในถังปฏิกรณ์แบบเบบที่ภายในบรรจุด้วยขั้วไฟฟ้าไบโพลาร์ที่ทำจากแผ่นเหล็กต่อกันแบบอนุกรม โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 แอมแปร์ 50 โวลต์ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของปริมาณอ็อกซิเจนของเหล็กที่ละลายจากขั้วแอโนดต่อการบำบัดสี่ข้อมรีแอกทีฟโทนสีต่าง ๆ ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 5 7 9 และ 11 ช่วงที่สองทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของความนำไฟฟ้า ต่อการบำบัดสี่ข้อมรีแอกทีฟโทนสีต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นของ

โซเดียมคลอไรด์ 5 10 15 20 และ 30 กรัมต่อลิตร จากการศึกษาพบว่าปริมาณอิออนของเหล็กที่เหมาะสมในการบำบัดสีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลือง เมื่อใช้ความเข้มข้นสี 250 มิลลิกรัมต่อลิตร อยู่ในช่วง 120-187 177-186 95 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีโดยเฉลี่ยร้อยละ 92 97.5 89.5 และ 87.5 ตามลำดับ ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7-9 และใช้เวลาในการบำบัดโดยประมาณ 3-4 ชั่วโมง ในทุกโทนสี ความนำไฟฟ้าที่เหมาะสมในการบำบัดสีคือ 8.56 9.36 24.20 และ 24.60 มิลลิซีเมนต่อเซนติเมตร สำหรับสีดำ สีน้ำเงิน สีแดง และสีเหลืองตามลำดับ หรือที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5 กรัมต่อลิตร สำหรับสีดำและสีน้ำเงินและ 15 กรัมต่อลิตร สำหรับสีแดงและสีเหลือง

ปริมาณอิออนของเหล็กมีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด โดยจะแปรผันตามกัน โดยการเพิ่มความนำไฟฟ้าให้แก่น้ำเสียส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการบำบัดสั้นลง โดยใช้เวลาประมาณไม่เกิน 1 ชั่วโมง

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดสีย้อมโดยวิธีอื่น

Carliell และคณะ (1994) ได้ทำการทดลองกำจัดสีรีแอกทีฟ ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ดี โดยใช้การแอนแอโรบิกที่มีการเติมคาร์บอนเสริมแทนกระบวนการแอโรบิกที่ไม่สามารถกำจัดสีรีแอกทีฟได้ ผลการทดลองพบว่า ร้อยละ 80 ของจำนวนสีที่ทำการทดลองสามารถกำจัดสีได้ในช่วงร้อยละ 70-79 ยกเว้นสี C.I. Reactive Yellow 95 ที่ไม่สามารถลดสีได้เลยเนื่องจากเชื่อว่าที่องค์ประกอบของสารพิษในสีนี้ นอกจากนี้ยังเห็นได้ชัดว่า สีย้อมโครงสร้างอื่น ๆ เช่น anthraquinone และ phthalocyanine การลดของสีไม่ได้ขึ้นกับการแตกโครโมฟอร์เหมือนโครงสร้างอาโซ ซึ่งน่าจะเป็นเพราะสีเหล่านี้มีความคงตัวสูงและเกิดการรีดักชันได้ยาก และจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง column chromatography เพื่อดูผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสี C.I. Reactive Red 141 พบว่ามีการแตกพันธะสีเป็น 4 ชนิด ดังรูปที่ 2.11 โดย 3 ชนิดสามารถวิเคราะห์พบโดยอุปกรณ์ NMR คือ (1) 2-aminonaphthalene-1,5-disulphonic acid (2) 1,7-diamino-8-naphtho-3,6-disulphonic acid และ (3) p-diamino-benzene ส่วนสารตัวที่ 4 นั้นไม่สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยอุปกรณ์ NMR เพราะไม่มีไฮโดรเจนอะตอมในโมเลกุล แต่คาดได้ว่าเป็น cyanuric acid จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การลดสีในสภาวะไร้อากาศเกิดจากการแตกพันธะอาโซในโมเลกุลของสี



รูปที่ 2.11 การแตกโครงสร้างของสี C.I. Reactive Red 141

Carliell และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษารายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการกำจัดสีโดยกระบวนการแอนแอโรบิก ดังนี้

1) ทดลองเพื่อหาลำดับโคเนตริกของการกำจัดสี C.I.Reactive Red 141 ในแต่ละความเข้มข้นของสีที่ 100,150 และ 200 มก./ล. เมื่อนำผลไม่ที่ได้มาพล็อตกราฟระหว่างค่า $\ln/(Ct/Co)$ (เมื่อ Co คือความเข้มข้นของสีเมื่อเวลาเริ่มต้น, Ct คือความเข้มข้นของสีที่มีเวลาใด ๆ) กับเวลา (ชม.) ได้กราฟเป็นเส้นตรง ซึ่งสรุปได้ว่าการลดลงของสีกับเวลาเป็นความสัมพันธ์ลำดับที่หนึ่ง

2) การลดลงของสี C.I.Reactive Red 141 ที่ความเข้มข้น 100 มก./ล. เมื่อมีสีเป็นแหล่งคาร์บอนเพียงแหล่งเดียว อัตราการลดลงของสีต่ำกว่าเมื่อมีกลูโคสความเข้มข้น 1000 มก./ล. เป็นแหล่งคาร์บอนเสริมอย่างมาก

3) เมื่อมีไนเตรตความเข้มข้น 1 mM., 5 mM. และ 10 mM. ในขวดทดลองที่มีสี C.I.Reactive Red 141 เข้มข้น 100 มก./ล. จะทำให้เวลาเริ่มต้นของการลดสีในกระบวนการแอนแอโรบิกเพิ่มขึ้น คือสถานะที่ไม่มีไนเตรตจะเกิดการลดสีในชั่วโมงที่หนึ่ง เมื่อปริมาณไนเตรตเพิ่มขึ้นเวลาเริ่มต้นที่จะเกิดการลดสีคือชั่วโมงที่ 4 , 10 และ 23 ตามลำดับ และในการทดลองที่คล้ายกันเพียงแต่เปลี่ยนจากการใช้ไนเตรตเป็นซัลเฟต ปรากฏว่าไม่เห็นผลที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถเรียงลำดับสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนได้ดังนี้ ไนเตรต > C.I.Reactive Red 141 > ซัลเฟต

4) ค่าไออาร์พีที่ทำการวัดระหว่างกระบวนการแอนแอโรบิก เปรียบเทียบระหว่างขวดที่มีสีอย่างเดียว ขวดที่มีการเติมไนเตรต และขวดที่มีการเติมซัลเฟต โดยขวดที่มีสีอย่างเดียวกับขวดที่

เติมซัลเฟตมีลักษณะกราฟของค่าไออาร์พีที่ได้ไม่แตกต่างกันเท่าใดนัก แต่ขบวนการเติมในเทอร์ตค่าไออาร์พีจะปรับระดับสูงขึ้นไปที่ประมาณ -225 มิลลิโวลต์ ช่วงนี้แทบจะไม่มี การลดลงของสีเลย หลังจากนั้นค่าไออาร์พีจะลดลงอย่างรวดเร็วพร้อม ๆ กับการลดลงของสีอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นไปได้ว่ากระบวนการกำจัดสีที่เกิดขึ้น จะเกิดในช่วงค่าไออาร์พีหนึ่ง ๆ เท่านั้น และเมื่อค่าไออาร์พีอยู่นอกช่วงนี้ก็อาจบอกได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยากำลังถูกรบกวน

5) เมื่อทำการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการสลายของสี C.I.Reactive Red 141 โดยกระบวนการแอนไอโอมิก โดยใช้ column chromatography ร่วมกับการวิเคราะห์โดยใช้ NMR (Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy) พบว่าโครงสร้างของสีถูกทำลายได้ไม่หมด เป็นเพียงการสลายพันธะใดพันธะหนึ่งให้โครงสร้างโมเลกุลที่ใหญ่แตกออกเป็น ส่วน ๆ เท่านั้น

6) จุลชีพที่เลี้ยงให้เคยชินกับน้ำเสียสี สามารถรับสภาพน้ำเสียสีที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 100 มก./ล. ได้ดีกว่าจุลชีพที่ไม่ได้มีการปรับชินสภาพอย่างเห็นได้ชัด สำหรับน้ำเสียสีที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า 50 มก./ล. ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างจุลชีพทั้งสองชนิด

Cook (1996) ทำการศึกษาปฏิกิริยารีดักชันโดยโบโรไฮไดรด์ที่มีไบซัลไฟต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เพื่อกำจัดสีย้อมที่ละลายน้ำได้ประเภทไดเรค แอซิด และรีแอกทีฟ ทั้งหมดประกอบด้วยโครงสร้างเคมีของหมู่อะโซ โดยศึกษาที่พีเอชเท่ากับ 6 ณ อุณหภูมิบรรยากาศ และทำการเปรียบเทียบระหว่างรีดิวซ์เอเจนต์ อันได้แก่ไดไฮโดรไนโตรเจนกับ FAS (Formamidine Sulfinic Acid) ผลปรากฏว่า FAS ไม่สามารถลดสีในน้ำเสียได้เลย ในขณะที่การรีดิวซ์พันธะเคมีของอะโซด้วยโบโรไฮไดรด์จะให้ผลผลิตเป็นอะโรมาติกอะมีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลง และเป็นการกำจัดสีพร้อมกันไปด้วย สำหรับสีย้อมที่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบได้ทดลองร่วมกับการใช้สารโคแอกกูแลนต์ประจุบวกตามด้วยโพลิเมอร์ประจุลบ โดยเติมในขณะที่ทำปฏิกิริยาหรือหลังการทำปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสี

นอกจากนี้ยังได้ศึกษากับน้ำเสียจริงทางอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นส่วนผสมของสีย้อมในกลุ่มอะโซ โดยใช้โบโรไฮไดรด์ที่มีไบซัลไฟต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อรีดิวซ์สีย้อมตามด้วยการตกผลึกของแข็งด้วยสารโคแอกกูแลนต์ประจุบวก และพบว่าประสิทธิภาพการรีดิวซ์สีมีมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ พีเอช $5-6$ ด้วยการเติมไบซัลไฟต์ก่อนหน้า ($200-500$ มก./ลิตร) หลังจากนั้นจึงเติมสารละลายต่างของโซเดียมโบโรไฮไดรด์ในปริมาณมากกว่า ทฤษฎีเพียงเล็กน้อยจากค่าสตอยชิโอเมตริก ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเสถียรอยู่ที่พีเอช $5.5-7.0$

Luangdilok และ Panswad (2000) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการลดสี ภายใต้สรีระ แยกที่ฟที่มีโครงสร้างทางเคมีที่ต่างกัน ด้วยแบบจำลองขนาดโต๊ะทดลองระบบเอสปีอาร์แบบแอน แอโรบิก-แอโรบิกที่มีเวลารวบรวมเท่ากับ 24 ชั่วโมง โดยมีเวลา แอนแอโรบิก + แอโรบิก เท่ากับ 18+5 ชั่วโมง และมีอายุสลัดจ์เท่ากับ 8 วัน การศึกษานี้ใช้น้ำเสียสีสังเคราะห์ที่มีซีไอดีเท่ากับ 1,000 มก./ล. และสีที่ใช้ในการทดลองนี้ใช้สรีระแยกที่ฟที่มีโครงสร้างต่าง ๆ ดังนี้

- สี (1) C.I.Reactive Black 5 มีโครงสร้าง Diazo Vinyl Sulphonyl
- สี (2) C.I.Reactive Blue R มีโครงสร้าง Anthraquinone
Visul Sulphonyl
- สี (3) C.I.Reactive Blue CR มีโครงสร้าง Anthraquinone
Monochlorotrizinyl
- สี (4) C.I.Reactive Blue H-EGN มีโครงสร้าง Oxazine

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาประสิทธิภาพการลดสีเมื่อความเข้มข้นสีต่างกันในแต่ละโครงสร้างสี โดยใช้ความเข้มข้นสีที่ 20 และ 100 มก./ล. และสามารถสรุปได้ดังนี้

- เมื่อความเข้มข้นของสี (1) ต่างกันจะเห็นว่าประสิทธิภาพการลดสีในหน่วย SU มีความแตกต่างกันไม่มากนัก ส่วนในหน่วยของ ADMI จะมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เป็นเพราะหน่วย ADMI เป็นการวัดสีที่คิดขึ้นมาเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าของสีที่มีปริมาณน้อย ๆ (ประมาณ 300-500 ADMI) ดังนั้นเมื่อใช้หน่วยนี้วัดสีที่เข้มข้นมากอาจทำให้ได้ค่าวัดสีที่คลาดเคลื่อนได้ ส่วนสีที่มีโครงสร้างแอนทราควิโนนทั้งสองชนิด สี(2) และสี (3) เมื่อมีความเข้มข้นสูงขึ้นทำให้ประสิทธิภาพลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน สำหรับสีที่มีโครงสร้าง Oxazine สี(4) พบว่าสีที่ปรากฏและเห็นด้วยตาในถังปฏิกริยาช่วงแอนแอโรบิกมีการลดของสีจนแทบจะไม่มีสี แต่เมื่อตักน้ำเพื่อนำไปวิเคราะห์กลับปรากฏว่ามีสีเข้มขึ้นมาอีกซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถหาสาเหตุได้

- ผู้วิจัยกล่าวว่าจากการสังเกตกราฟแอมซอบแบนซ์ที่เกิดขึ้นจากการสแกนความเข้มข้นสี ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 นาโนเมตร การลดของสี (1) จะมีการเปลี่ยนความยาวคลื่นเด่น (dominant wavelength) และมีการลดของค่าแอมซอบแบนซ์ลงด้วย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการลดสีของสีอะโซจะเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างสี ส่วนสีที่มีโครงสร้างแอนทราควิโนนทั้งสองนั้นเมื่อมีการลดสีจะไม่มีการเปลี่ยนความยาวคลื่นเด่นแต่มีค่าแอมซอบแบนซ์ลดลง แสดงว่ามีการลดสีแต่ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างสี ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากลไกการลดสีของสีแอนทราควิโนนน่าจะเกิดจากการดูดซับไว้บนฟล็อก ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นสีเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการ

ลดสี ต่ำลงเพราะการจำกัดของการดูดซับสีของฟล็อก สำหรับสีออกซาซีนยังไม่สามารถสรุปกลไกหลักในการลดสีได้

- ผู้วิจัยติดตามการเปลี่ยนแปลงของสี (1) ด้วยเทคนิคทาง High Performance Liquid Chromatography (HPLC) โดยสรุปว่าสีเปลี่ยนโครงสร้างในกระบวนการแอนแอโรบิก ซึ่งทำให้เกิดการลดสี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองทั้งหมดที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้จะเป็นการทดลองเพื่อกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟ โดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสีย้อมรีแอกทีฟ โทนสีแดง (C.I Reactive 180) ซึ่งมีความเข้มข้นคงที่ตลอดการทดลองที่ 200 มก./ล. ซึ่งแผนการทดลองสำหรับงานวิจัยจะมีขั้นตอนดังนี้

3.1.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

จะเป็นการทดลองแบบแบตช์ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟของน้ำเสียสังเคราะห์ และทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดสี เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสม โดยปรับเปลี่ยนปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี คือ

- ◆ ชนิดของขั้วไฟฟ้า จะใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด คือ ขั้วเหล็ก อะลูมิเนียม และ เหล็กกล้าไร้สนิม โดยการใช้ขั้วเหล็กก่อนการทดลองจะแช่ด้วย HCl 20% เป็นเวลา 20 นาที เพื่อล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรกออกก่อน
- ◆ ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้า จะทำการปรับเปลี่ยน 3 ค่า คือ 10 โวลต์ 20 โวลต์ และ 30 โวลต์
- ◆ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา จะใช้เวลาดังแต่ 0.5 – 3 ชั่วโมง
- ◆ ขนาดพื้นที่ผิวหน้าตัด จะปรับเปลี่ยนเป็น 0.5 × 6.5 ซม. 3.0 × 6.5 ซม. 4.0 × 6.5 ซม. 5.0 × 6.5 ซม. 6.0 × 6.5 ซม. 8.0 × 6.5 ซม. และ 11 × 6.5 ซม.
- ◆ พีเอช จะปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ 4 ค่าคือ พีเอช 3 พีเอชปกติ(ประมาณ6) พีเอช 7 และ พีเอช 10 โดยใช้ H₂SO₄ และ NaOH
- ◆ ค่าความนำไฟฟ้า ทำการปรับเปลี่ยนค่าความนำไฟฟ้า ของน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ค่า เป็น 7.2 ms/cm และ 72 ms/cm เพื่อให้ได้เป็นเท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียรวมและน้ำเสียจากหม้อย้อม โดยใช้ NaCl

รายละเอียดแผนการทดลองได้แสดงใน รูปที่ 3.1 – 3.6

3.1.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านและหลังผ่านวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

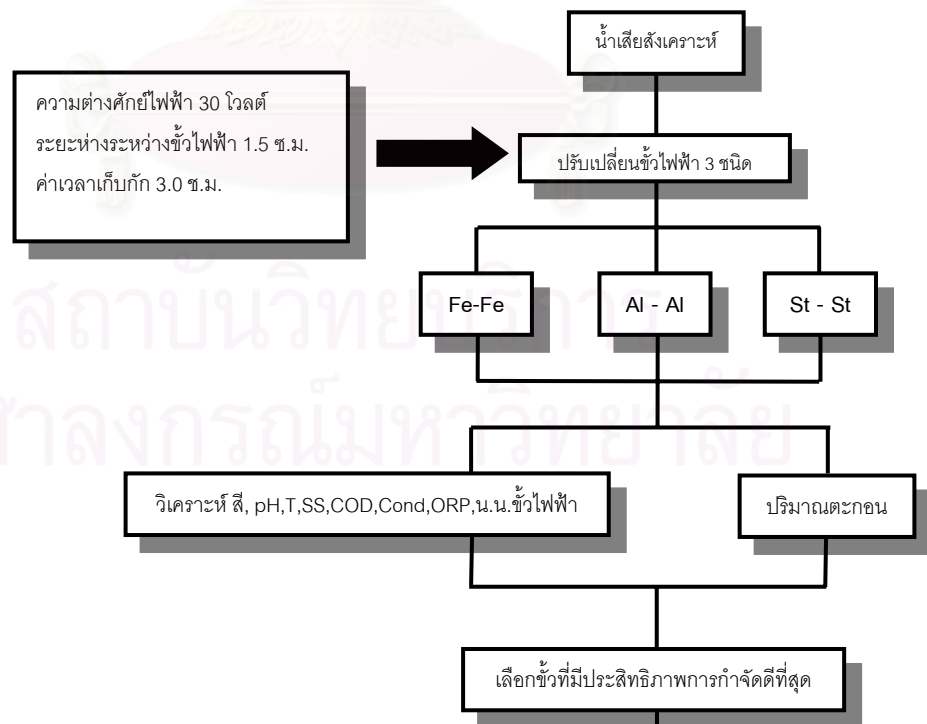
จะเป็นการทดลองแบบแบตช์ โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสี ย้อมรีแอกทีฟของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านและไม่ได้ผ่านวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า และทำการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพในการกำจัดสี เพื่อให้ได้ค่าปริมาณ PACL ที่เหมาะสม ดังแสดงรายละเอียดแผนการทดลองในรูปที่ 3.7

3.1.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียจริง โดยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

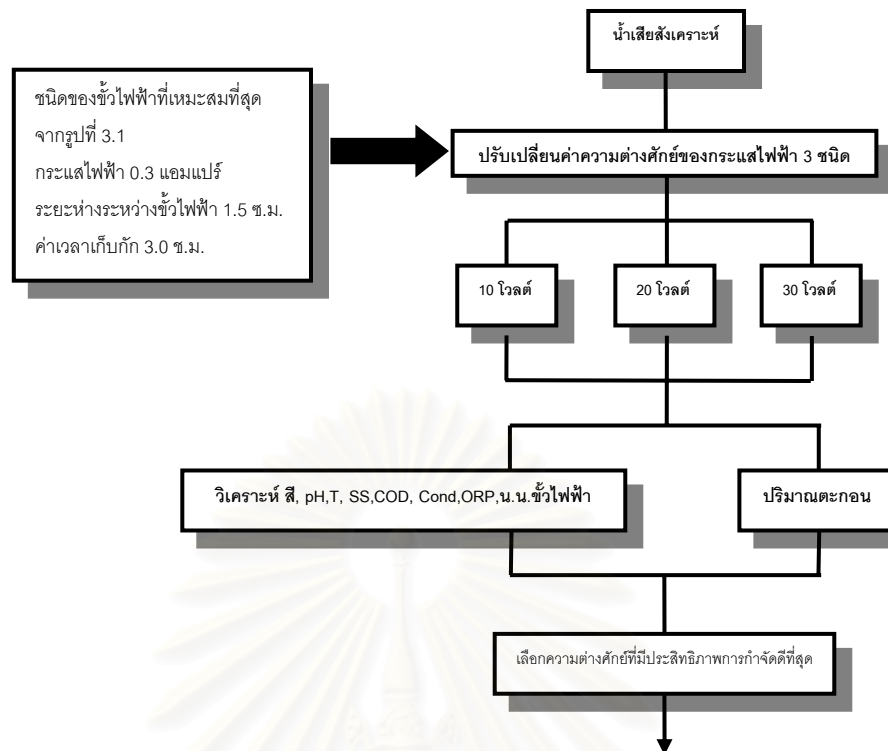
จะเป็นการทดลองแบบแบตช์ โดยใช้ผลการทดลองที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองที่ 1 และ 2 เพื่อหาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม โดยปรับเปลี่ยนชนิดของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง 2 ชนิด คือ

- ◆ น้ำเสียสีความเข้มสูงจากหม้อย้อม
- ◆ น้ำเสียรวมก่อนผ่านการบำบัด

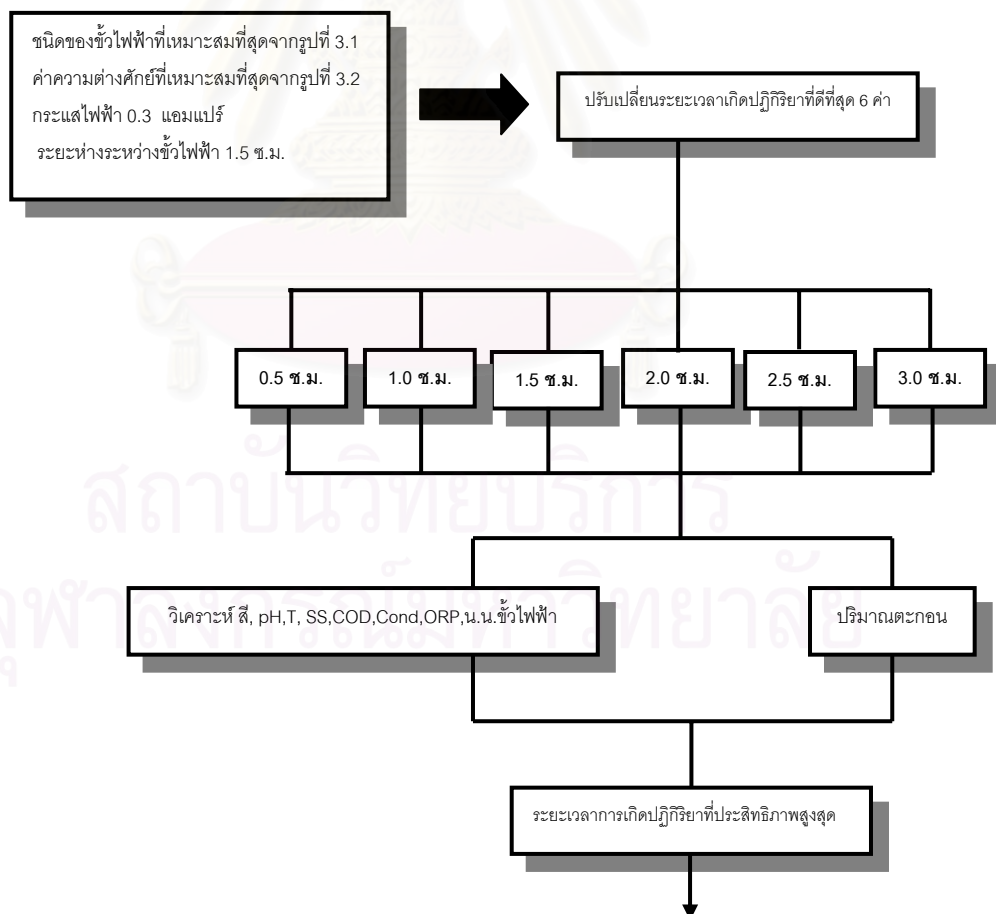
ส่วนแผนการทดลองได้แสดงในรูปที่ 3.8



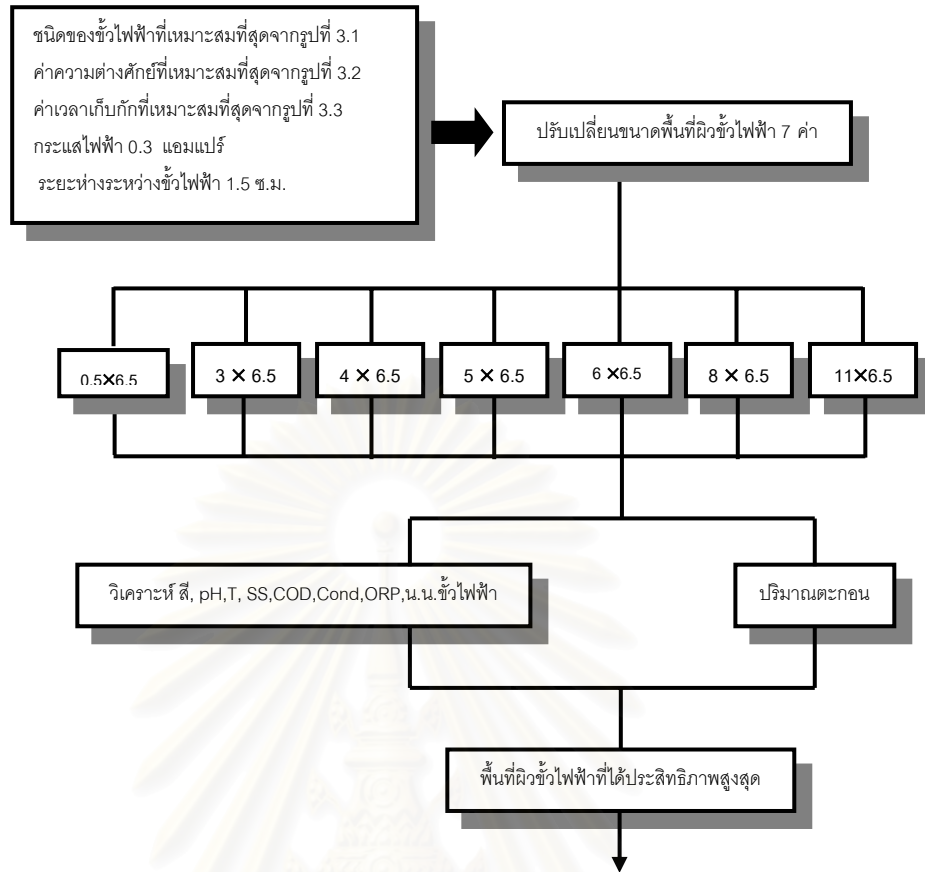
รูปที่ 3.1 แผนผังการศึกษานหาชนิดของขั้วไฟฟ้า



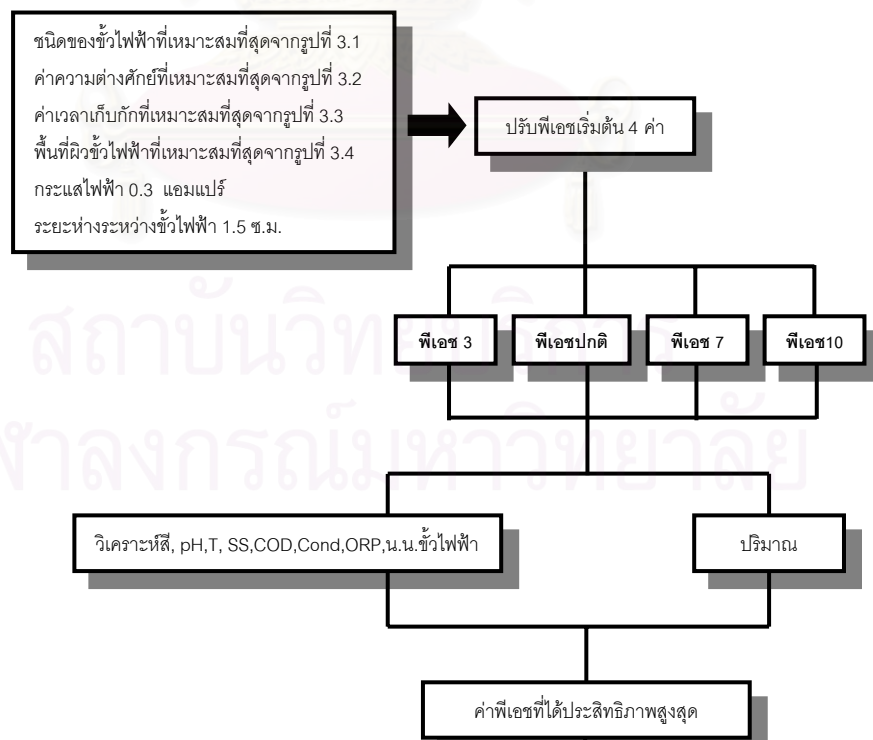
รูปที่ 3.2 แผนผังการศึกษาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม



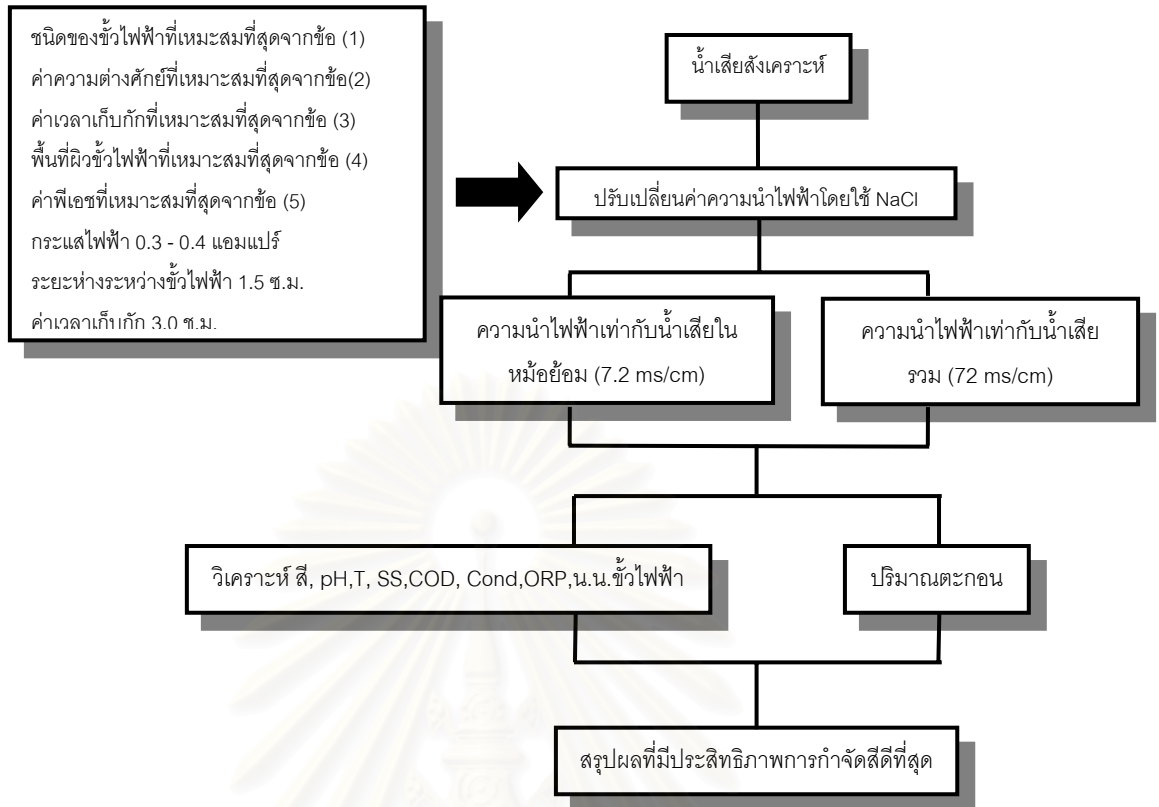
รูปที่ 3.3 แผนผังการศึกษาเวลาเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม



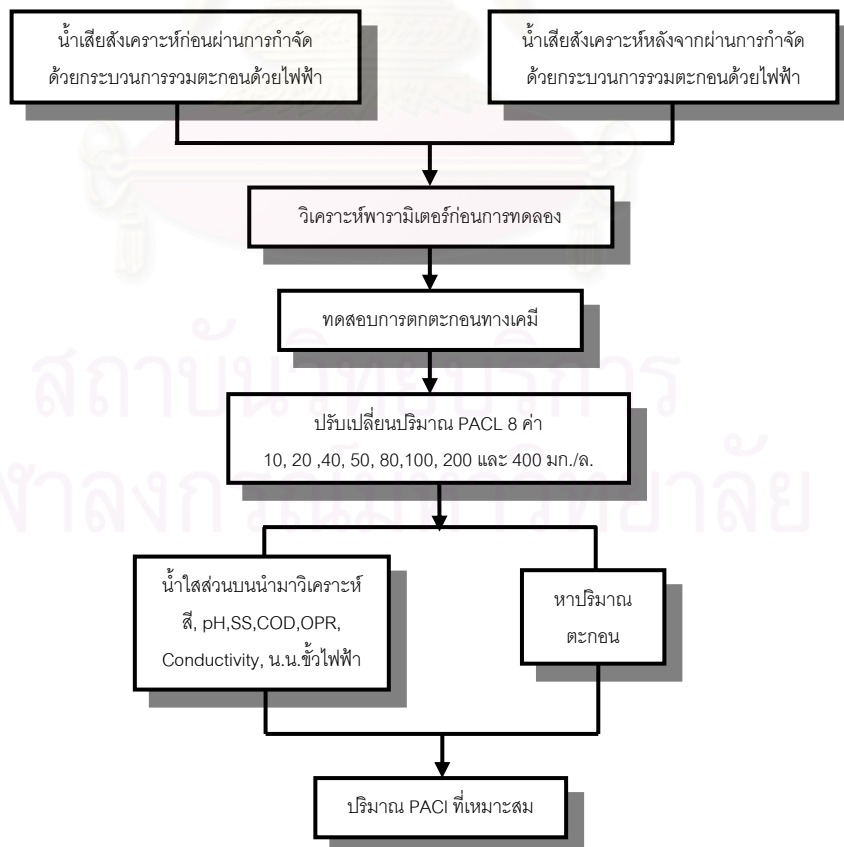
รูปที่ 3.4 แผนผังการศึกษาขนาดพื้นที่ผิวหน้าตัดของขี้วัวไฟฟ้าที่เหมาะสม



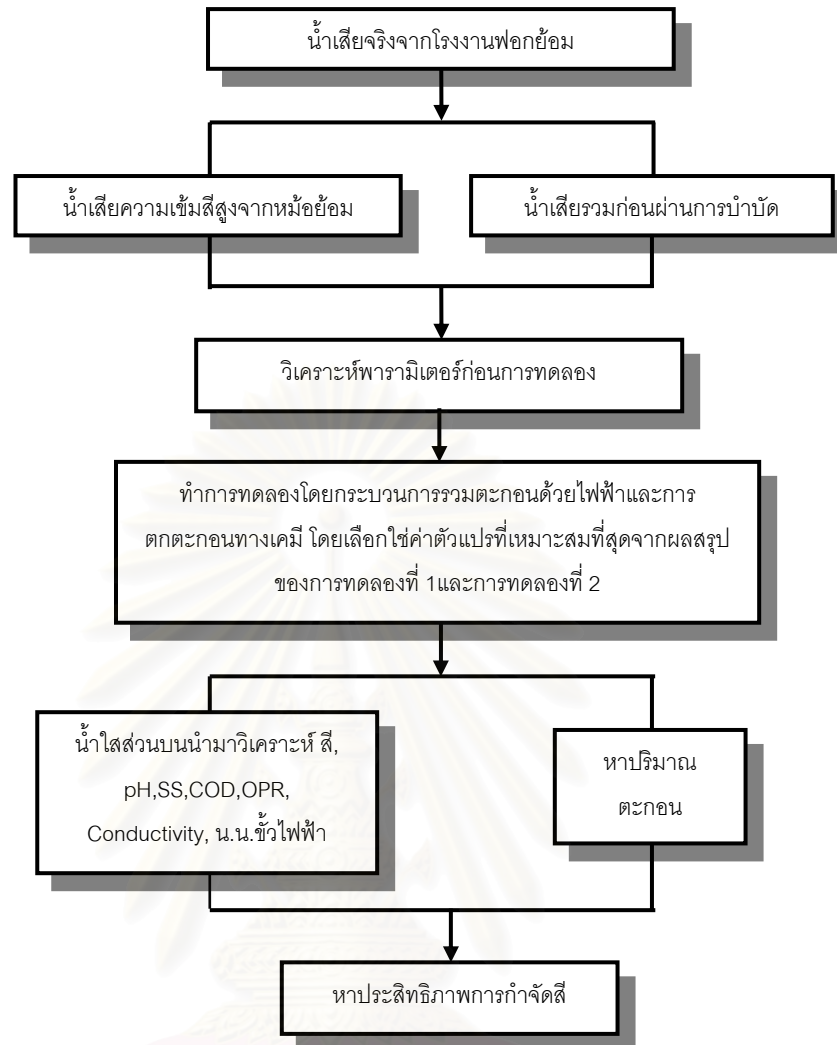
รูปที่ 3.5 แผนผังการศึกษาพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม



รูปที่ 3.6 แผนผังการศึกษาความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม



รูปที่ 3.7 แผนผังการทดลองการตกตะกอนด้วย PACL



รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลองการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ากับน้ำเสียสีย้อมจริง

3.2 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์

การวิจัยนี้จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังการทดลอง เพื่อวิเคราะห์หาคุณสมบัติของน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัดสีของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.3 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

จะแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. น้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการเติมสีย้อมรีแอกทีฟไทโตนสีแดง (C.I. Reactive 180) ที่มีโครงสร้างเป็นโมโนอะโซ โดยใช้ความเข้มข้นของสีที่ 200 มก./ล. ตลอดการทดลอง ความเข้มสีที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 450 SU
2. น้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อม จะแบ่งเป็นน้ำเสียสีจากหม้อย้อม ซึ่งมีความเข้มของสีสูงมาก โดยจะเป็นสีรีแอกทีฟไทโตนสีแดง โดยโรงงานจะใช้ความเข้มข้นสีที่ 500 มก./ล. ความเข้มสีที่วัดได้เป็น 2600 SU และน้ำเสียรวมก่อนผ่านการบำบัด ความเข้มสีที่วัดได้เป็น 100 SU

3.4 อุปกรณ์การทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการทดลองแบบแบตช์ ซึ่งจะใช้อุปกรณ์การทดลองดังภาพที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

1. เครื่องเรียงกระแส (Rectifier) เป็นเครื่องเรียงกระแสไฟฟ้าสลับให้เป็นกระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด 60 โวลต์
2. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมหนา 2 มิลลิเมตร. ทำเป็นรูปตัวที ซึ่งทำด้วย เหล็ก, อะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม ดูได้ดังรูปที่ 3.9
3. กล่องพลาสติกใสทรงกลมปริมาตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 ซม. สูง 15.5 ซม. ทำการบากร่องลงมา 3 ซม. 2 ร่องห่างกันร่องละ 1.5 ซม. ทั้ง 2 ด้านเพื่อไว้รองรับก้านโลหะ เจาะรูเก็บน้ำตัวอย่างมีวาล์วขนาดเล็กเป็นตัวปิดเปิด
4. เครื่องกวน (Stir Plate)
5. เครื่องกวนจาร์เทส ดังรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

| | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----|-------------|---|-------------|---|-----------|---|
| การทดลองที่ 1 | ขั้นตอนที่ | 1.1 | ตัวแปรอิสระ | (ชนิดของขั้วไฟฟ้า) 1. เหล็ก 2. เหล็กกล้าไร้สนิม 3. อะลูมิเนียม | ตัวแปรคงที่ | 1. ความต่างศักย์ไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้ว 3. เวลาเก็บกัก | ตัวแปรตาม | 1. สี 2. พีเอช 3. อุณหภูมิ 4. เอสเอส 5. ซีไอดี 6. ปริมาณตะกอน 7. ไออาร์พี 8. น.น. ขั้วเหล็กที่ใช้ 9. ค่าความนำไฟฟ้า 10. กระแสไฟฟ้า |
| | ขั้นตอนที่ | 1.2 | ตัวแปรอิสระ | (ความต่างศักย์ไฟฟ้า) 1. 10 โวลต์ 2. 20 โวลต์ 3. 30 โวลต์ | ตัวแปรคงที่ | 1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้ว 3. เวลาเก็บกัก | ตัวแปรตาม | 1. สี 2. พีเอช 3. อุณหภูมิ 4. เอสเอส 5. ซีไอดี 6. ปริมาณตะกอน 7. ไออาร์พี 8. น.น. ขั้วเหล็กที่ใช้ 9. ค่าความนำไฟฟ้า 10. กระแสไฟฟ้า |

ตารางที่ 3.1(ต่อ) ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

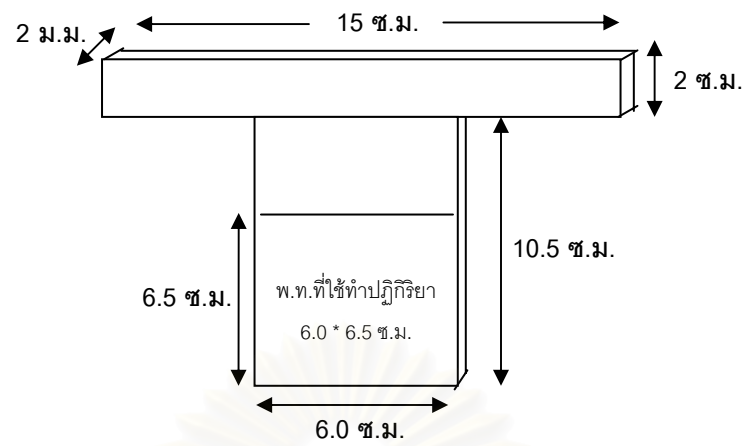
| | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----|-------------------------------------|---|-------------|---|-----------|---|
| การทดลองที่ 1 | ขั้นตอนที่ | 1.3 | ตัวแปรอิสระ (เวลาเก็บกัก) | 1. 0.5 ชม. 2. 1.0 ชม. 3. 1.5 ชม. 4. 2.0 ชม. 5. 2.5 ชม. 6. 3.0 ชม. | ตัวแปรคงที่ | 1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้ว 3. ความต่างศักย์ | ตัวแปรตาม | 1. สี 2. พีเอช 3. อุณหภูมิ 4. เอสเอส 5. ซีไอดี 6. ปริมาณตะกอน 7. ไออาร์พี 8. น.น. ขั้วเหล็กที่ใช้ 9. ค่าความนำไฟฟ้า 10. กระแสไฟฟ้า |
| | ขั้นตอนที่ | 1.4 | ตัวแปรอิสระ (พื้นที่ผิวของไฟฟ้า) | 1. 0.5 x 6.5 ซม. 2. 3.0 x 6.5 ซม. 3. 4.0 x 6.5 ซม. 4. 5.0 x 6.5 ซม. 5. 6.0 x 6.5 ซม. 6. 8.0 x 6.5 ซม. 7. 11 x 6.5 ซม. | ตัวแปรคงที่ | 1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้ว 3. เวลาเก็บกัก 4. ความต่างศักย์ | ตัวแปรตาม | 1. สี 2. พีเอช 3. อุณหภูมิ 4. เอสเอส 5. ซีไอดี 6. ปริมาณตะกอน 7. ไออาร์พี 8. น.น. ขั้วเหล็กที่ใช้ 9. ค่าความนำไฟฟ้า 10. กระแสไฟฟ้า |

ตารางที่ 3.1(ต่อ) ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

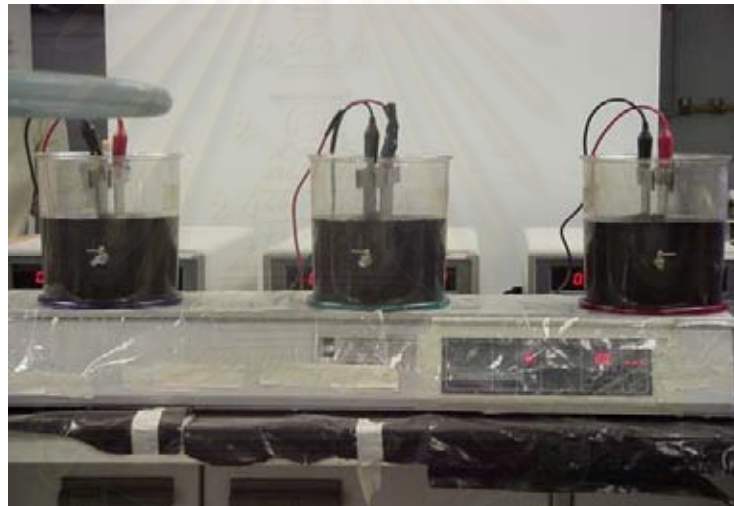
| | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----|-------------|---|-------------|---|-----------|--|
| การทดลองที่ 1 | ขั้นตอนที่ | 1.5 | ตัวแปรอิสระ | (ค่าพีเอชเริ่มต้น) 1. pH = 3 2. pHปกติ = ประมาณ 6 3. pH = 7 4. pH = 10 | ตัวแปรคงที่ | 1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้ว 3. เวลาเก็บกัก 4. ความต่างศักย์ | ตัวแปรตาม | 1. สี 2. พีเอช 3. อุณหภูมิ 4. เอสเอส 5. ซีไอดี 6. ปริมาณตะกอน 7. ไออาร์พี 8. น.น.ขั้วเหล็กที่ใช้ 9. ค่าความนำไฟฟ้า 10. กระแสไฟฟ้า |
| | ขั้นตอนที่ | 1.6 | ตัวแปรอิสระ | (ค่าความนำไฟฟ้า) 1. ค่าความนำของ น้ำเสียรวมก่อนบำบัด เท่ากับ 7.2 ms/cm 2. ค่าความนำของ น้ำเสียจากหม้อต้ม เท่ากับ 72 ms/cm | ตัวแปรคงที่ | 1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้ว 3. เวลาเก็บกัก 4. ความต่างศักย์ | ตัวแปรตาม | 1. สี 2. พีเอช 3. อุณหภูมิ 4. เอสเอส 5. ซีไอดี 6. ปริมาณตะกอน 7. ไออาร์พี 8. น.น.ขั้วเหล็กที่ใช้ 9. ค่าความนำไฟฟ้า 10. กระแสไฟฟ้า |

ตารางที่ 3.1(ต่อ) ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

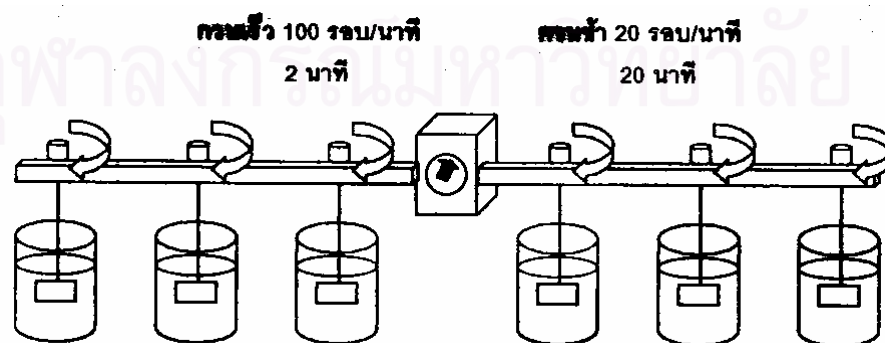
| | | | | | | | | |
|---------------|------------|------------|-------------|---|-------------|---|-----------|--|
| การทดลองที่ 2 | ขั้นตอนที่ | 2.1 | ตัวแปรอิสระ | 1. ปริมาณสารโคแอกกูแลนต์ 2. ชนิดของน้ำเสีย | ตัวแปรคงที่ | 1. อัตราการกวนเร็ว 2. อัตราการกวนช้า 3. เวลาการตกตะกอน | ตัวแปรตาม | 1. สี 2. พีเอช 3. เอสเอส 4. ซีไอดี 5. ปริมาณตะกอน |
| การทดลองที่ 3 | ขั้นตอนที่ | 3.1 3.2 | ตัวแปรอิสระ | (น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม) 1. น้ำเสียจากหม้อต้ม 2. น้ำเสียรวมก่อนบำบัด | ตัวแปรคงที่ | 1. ชนิดของขั้วไฟฟ้า 2. ระยะห่างระหว่างขั้ว 3. เวลาเก็บกัก 4. ความต่างศักย์ 5. อัตราการกวนเร็ว 6. อัตราการกวนช้า 7. เวลาการตกตะกอน | ตัวแปรตาม | 1. สี 2. พีเอช 3. อุณหภูมิ 4. เอสเอส 5. ซีไอดี 6. ปริมาณตะกอน 7. ไออาร์พี 8. น.น.ขั้วเหล็กที่ใช้ 9. ค่าความนำไฟฟ้า 10. กระแสไฟฟ้า |



รูปที่ 3.9 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.1 อุปกรณ์การทดลองโดยวิธีรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์การทดลองโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

3.5 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์

| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์ |
|--------------------------------|---|
| 1. ความเข้มข้นของสารละลายยีสี่ | - เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-1201 |
| 2. พีเอช | - เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ HORIBA รุ่น F-13 |
| 3. อุณหภูมิ | - เครื่องวัดพีเอช ยี่ห้อ HORIBA รุ่น F-13 |
| 4. เอสเอส | - Gravimetric method |
| 5. ซีไอดี | - วิธีรีฟลักซ์แบบปิด |
| 6. ปริมาณตะกอน | - SV 60 |
| 7. ไออาร์พี | - เครื่องวัดค่าไออาร์พี |
| 8. น.น. ชั่วเหล็กที่ใช้ | - เครื่องชั่งวัดแบบละเอียด |
| 9. ค่าความนำไฟฟ้า | - เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า |
| 10. กระแสไฟฟ้า | - อ่านจากเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง |

3.5.1 การวัดสี

นำตัวอย่างที่นำมาทำการวัดสีจะกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C ก่อน แล้วนำไปเข้าเครื่องเซ็นตริฟิวจ์หมุนที่ความเร็ว 1000 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจึงนำไปเข้าเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ใช้วัดสีออกมาในรูปของค่าแอบซอบแนนซ์ และเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแทนซ์ แล้วนำมาแสดงเป็นรูปกราฟระหว่างค่าแอบซอบแนนซ์กับความยาวคลื่น พื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวจะนำมาคำนวณเป็นค่าสีในหน่วยเอสยู สามารถใช้เป็นตัวแทนในการดูแนวโน้มการกำจัดสีได้ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ทรานสมิตแทนซ์จะนำมาคำนวณเป็นค่าสีเอดีเอ็มไอ

3.6 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ตะกอน

ทำการเก็บตัวอย่างหลังจากตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาที แล้วเทน้ำใสส่วนบนออกจากกระบอกตวง เทตะกอนใสที่ระคายฟอลด์นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR และ NMR เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสี ส่วนเครื่อง AA จะต้องนำตะกอนไปย่อยสลายให้ได้น้ำใสก่อนส่งวิเคราะห์เพื่อศึกษาปริมาณเหล็กออกไซด์ที่มีในตะกอน

3.7 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์น้ำเสีย

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 60 นาทีหลังจากบำบัดแล้ว เทน้ำใสส่วนบนออกจากกระบอกตวง แล้วนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง GF/C และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสี

3.8 น้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลองได้เก็บตัวอย่างจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมแห่งหนึ่งในจังหวัดสมุทรปราการ มีปริมาณน้ำเสียที่เข้าระบบบำบัดประมาณ 300 ลบ.ม./วัน โดยเป็นน้ำเสียที่มาจากกระบวนการย้อมเส้นด้าย, น้ำฝนและน้ำเสียจากหอพักในโรงงาน

1) สีย้อมที่ใช้ในโรงงานได้แก่ สีรีแอกทีฟ สีไดเร็กซ์ สีแอซิด และ สีแวต

2) สารเคมีที่ใช้ในการฟอกย้อม

| | | |
|--|-----|-------------|
| 2.1) Na_2SO_4 | 130 | ตัน / เดือน |
| 2.2) CH_3COOH | 0.5 | ตัน / เดือน |
| 2.3) NaOH | 10 | ตัน / เดือน |
| 2.4) Na_2CO_3 | 2 | ตัน / เดือน |
| 2.5) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ | 0.5 | ตัน / เดือน |

3) ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน

ในโรงงานนี้จะใช้ระบบบำบัดแบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (AS) ดังภาพที่ 3.2 โดยน้ำเสียที่ออกจากโรงงานจะแยกเป็นท่อน้ำเสียสีเข้ม, ท่อน้ำเสียสีอ่อนและท่อน้ำฝน ส่งต่อไปยังถังปรับอัตราการไหล แล้วส่งต่อไปยังบ่อรองรับน้ำสีเข้มซึ่งจะรวมน้ำเสียจากหอพักไว้ด้วยแล้วสู้นำไปยังถังสัมผัสแบบ plug flow แล้วจึงส่งลงมาที่บ่อสีอ่อน คูต่อไปที่บ่อปรับพีเอช ส่งต่อไปยังบ่อเติมอากาศหลายบ่อ ต่อไปยังถังตกตะกอนและพักไว้ที่ Polishing Pond ก่อนปล่อยลงสู่ทะเล



ภาพที่ 3.2 ระบบบำบัดแบบ AS ของโรงงาน

4) จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียในการทดลอง

ในการทดลองนี้จะใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานฟอกย้อม 2 ชนิด คือ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากหม้อย้อมในโรงงาน และน้ำเสียรวมจะเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อที่เก็บน้ำเสียรวมก่อนผ่านการบำบัด

5) ลักษณะน้ำเสียจริงก่อนการทดลอง

น้ำเสียหลังจากเก็บตัวอย่างแล้วจะนำมาวิเคราะห์เพื่อดูคุณลักษณะของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านเข้าสู่ระบบบำบัดดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบบำบัด

| ว / ด / ป | pH | | COD | | SS | |
|-----------|-------|------|------|------|------|------|
| | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| 9/1/03 | 9.66 | 8.27 | 500 | 100 | 45 | 6 |
| 23/1/03 | | 8.05 | | 76 | | 7 |
| 6/2/03 | 10.05 | 8 | 425 | 79 | 50 | 8 |
| 20/2/03 | | 8.02 | | 120 | | 6 |
| 6/3/03 | 10.07 | 8.13 | 525 | 100 | 20 | 8 |
| 20/3/03 | | 7.99 | | 137 | | 9 |
| 3/4/03 | 9.89 | 7.97 | 465 | 127 | 40 | 15 |
| 24/4/03 | | 8.26 | | 120 | | 5 |
| 8/5/03 | 9.7 | 8.47 | 465 | 127 | 38 | 13 |
| 30/5/03 | | 8.29 | | 100 | | 6 |
| 5/6/03 | 10.16 | 8.12 | 433 | 84 | 77 | 8 |
| average | 9.92 | 8.14 | 469 | 106 | 45 | 8 |

ที่มา : โรงงานอุตสาหกรรมรามาทิพย์ (1988 จำกัด)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมีในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งเป็นน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโทเนสแดง(C.I. Reactive 180)และน้ำเสียจริงในการทดลองซึ่งเป็นน้ำเสียสีรีแอกทีฟจากหม้อย้อมและน้ำเสียรวมก่อนผ่านการบำบัด

ผลการศึกษานหาสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพในการกำจัดสีแบ่งออกเป็น 3 ช่วงการทดลองดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพื่อศึกษาถึงชนิดของขั้วไฟฟ้า ความต่างศักย์ ระยะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ค่าพีเอชเริ่มต้น ขนาดพื้นที่ผิวหน้าตัดของขั้วไฟฟ้าและค่าความนำไฟฟ้า

การทดลองที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ผ่านและหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งจะทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ PACL

การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำเสียจริงโดยการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี

4.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

4.1.1 การทดลองหาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้จะใช้ขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน 3 ชนิด คือ เหล็ก อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วตรวจวัดลักษณะของน้ำเสียหลังการทดลอง ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.1

4.1.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

จากผลการทดลองพบว่า วัสดุของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพในการ

กำจัดสีและซีไอดี โดยขั้วเหล็กมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีได้ดีที่สุดคือ 99.38%, 99.69% ในหน่วย SU และ ADMI และ 67% ตามลำดับรองลงมาคืออะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม โดยกำจัดสีและซีไอดีได้ 68.06%, 72.42% ในหน่วย SU และ ADMI และ 52.76% และ 58.16%, 68.27% ในหน่วย SU และ ADMI 25.8% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากค่าไออาร์พีหลังการทดลองจะมีค่าติดลบมากที่สุดเท่ากับ -136 แสดงว่าขั้วเหล็กเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากที่สุด มีการแตกตัวให้เหล็กไอออนมากจึงเกิดการกำจัดสีได้ดี ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.1 และกราฟรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

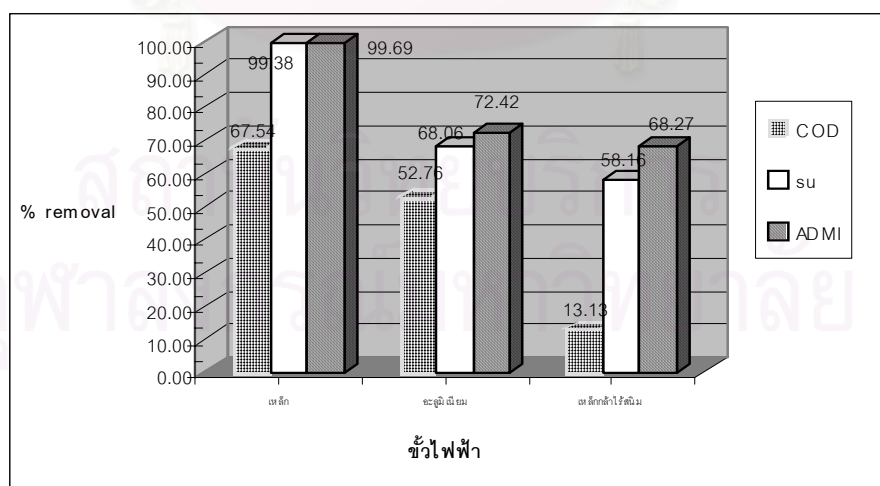
| พารามิเตอร์ | น้ำเสียสังเคราะห์ ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการทดลอง | | | ประสิทธิภาพการกำจัด % | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|---------------------|---------|---------|-----------------------|---------|---------|
| | | ขั้ว Fe | ขั้ว Al | ขั้ว St | ขั้ว Fe | ขั้ว Al | ขั้ว St |
| พีเอช | 5.86 | 9.54 | 9.2 | 6.05 | | | |
| อุณหภูมิ (C°) | 29.9 | 41.5 | 41.3 | 41.7 | | | |
| สี (SU) | 397 | 2.46 | 126.7 | 166 | 99.38 | 68.06 | 58.16 |
| สี (ADMI) | 15,276 | 46.88 | 4,213 | 4,847 | 99.69 | 72.42 | 68.27 |
| COD | 158 | 51.33 | 74.73 | 137.4 | 67.54 | 52.76 | 58.16 |
| SS (mg/l) | - | 19 | 13.33 | 0.67 | | | |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | - | 36 | 109 | ไม่มี | | | |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | - | 29.3 | 105 | ไม่มี | | | |
| ความต่างศักย์ (โวลต์) | 30 | 30 | 30 | 30 | | | |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | | | |
| ค่า ORP | 58 | -136 | -114 | 11.33 | | | |
| ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{s/cm}$) | 101 | 120.4 | 107.7 | 108 | | | |
| น.น.ขั้วบวกที่ใช้ไป (กรัม) | - | 1.3143 | 0.3856 | 0.0584 | | | |
| น.น.ขั้วลบที่ใช้ไป (กรัม) | - | 0.0079 | 0.0066 | 0.0023 | | | |

หมายเหตุ Fe = ขั้วเหล็ก Al = ขั้วอะลูมิเนียม St = ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

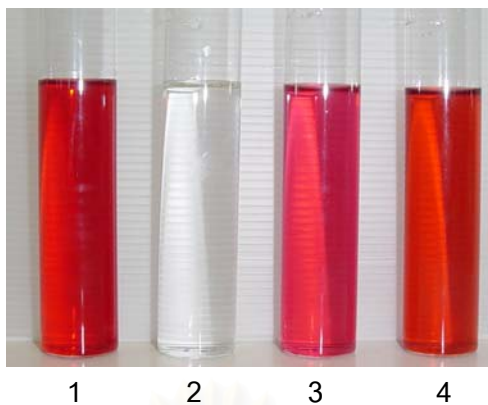
4.1.1.2 สีเฮสซุและเอดีเอ็มไอ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความเข้มสี 2 หน่วยคือหน่วย SU และ ADMI จากตารางที่ 4.1 ค่าความเข้มสีก่อนการทดลองมีค่าเฉลี่ย 396.7 SU และ 15,275.7 ADMI แต่หลังจากการทดลองถ้าใช้ขั้วเหล็ก พบว่าค่าความเข้มสีหลังการทดลองลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.46 SU และ 46.88 ADMI ถ้าใช้ขั้วอะลูมิเนียมค่าความเข้มสีจะลดลงโดยมีค่าเฉลี่ย 126.77 SU และ 4213.2 ADMI ส่วนขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมค่าความเข้มสีจะลดลงน้อยที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย 166 SU และ 4846.8 ADMI

ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการตรวจสอบโครงสร้างสี (โครมาโทแกรม) ด้วยเครื่องมือ HPLC ดังแสดงในภาคผนวก ข. พบว่าโครงสร้างสีในน้ำก่อนทดลองจะมีจุดสูงสุดอยู่ที่เวลา 1.96 ส่วนน้ำที่ผ่านขั้วเหล็ก, อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิมมีจุดสูงสุดที่เวลา 2.23, 2.2 และ 1.91 ตามลำดับ และมีลักษณะโครมาโทแกรมของแต่ละขั้วไฟฟ้าต่างกัน แสดงว่าชนิดของขั้วไฟฟ้ามีผลต่อการกำจัดสีและผลของการกำจัดสีทำให้สีมีการเปลี่ยนโครงสร้างอีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถยืนยันด้วยผลของการวัดสีด้วยเครื่อง UV-3101pc ดังแสดงในภาคผนวก ค. พบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนทดลองเท่ากับ 533 นาโนเมตรแต่น้ำเสียสังเคราะห์หลังการทดลองไม่แสดงจุดสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตรเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าน้ำสีแดงมีการเปลี่ยนสีเป็นน้ำใสเมื่อผ่านขั้วเหล็ก ดังภาพที่ 4.1 ผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการกำจัดสีย้อมชนิดอะโซโดยวิธีนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสีร่วมกับการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วย



รูปที่ 4.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีไอดีเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้า 3 ชนิด



ภาพที่ 4.1 ผลการกำจัดสีด้วยขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิด

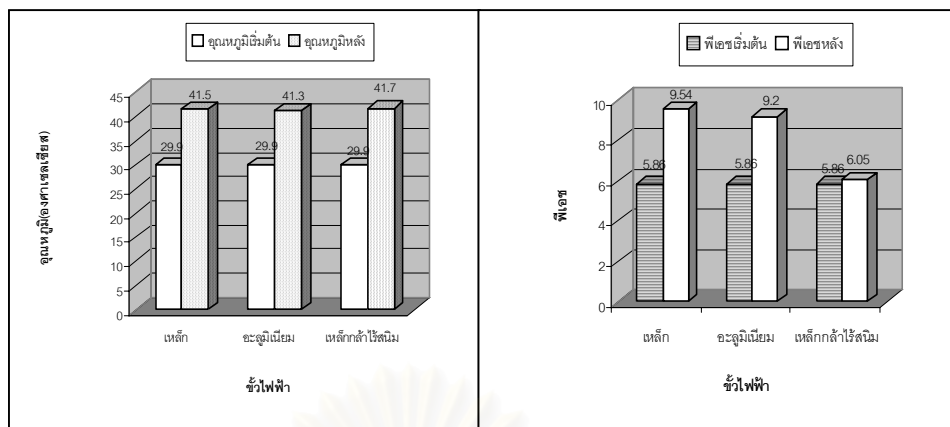
1) น้ำเสียสังเคราะห์ 2) ขั้วเหล็ก 3) ขั้วอะลูมิเนียม 4) ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม

4.1.1.3 อุณหภูมิ

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ทำให้อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 4.1 น้ำเสียสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเฉลี่ย 29.9 องศาเซลเซียส แต่หลังการทดลองพบว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 41.5 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าบางส่วนได้ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (Ampere loss) (กัณฑมาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2538)

4.1.1.4 พีเอช

พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าเฉลี่ยประมาณ 5.86 ส่วนค่าพีเอชหลังการทดลองพบว่าการใช้ขั้วเหล็กและอะลูมิเนียม มีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเท่ากับ 9.54 และ 9.2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 การที่พีเอชเพิ่มขึ้นก็เนื่องมาจากการเกิดตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ กับ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ส่วนการใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้ค่าพีเอชมีค่าลดลงอาจเนื่องมาจากการที่เหล็กออกซิไดส์หลุดออกจากขั้วได้น้อยดังเหตุผลหัวข้อ 4.1.1.8 จึงเกิดตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ได้น้อยค่าพีเอชจึงไม่เพิ่มขึ้นมากนัก



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิและพีเอชก่อนและหลังทดลอง

4.1.1.5 ไออาร์พี

ค่าไออาร์พีเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บ่งชี้สภาวะการทำงานของระบบทางชีวภาพหรือปฏิกิริยาทางเคมีของระบบว่า ค่าไออาร์พีที่มีค่าเป็นบวกแสดงว่าอยู่ในปฏิกิริยารีดักชันหรืออยู่ในสภาวะแอโรบิก แต่ถ้าค่าไออาร์พีมีค่าเป็นลบแสดงว่าอยู่ในปฏิกิริยาออกซิเดชันหรืออยู่ในสภาวะแอนแอโรบิก จากตารางที่ 4.1 พบว่าค่าไออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าเป็นบวกคือประมาณ + 58 แสดงว่าในน้ำมีสารรีดิวซ์เหลืออยู่ แต่หลังจากที่ผ่านการบำบัด โดยใช้ขั้วเหล็กและอะลูมิเนียมแล้วน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าติดลบคือ ประมาณ -136 และ -114 แสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างสีเปลี่ยนแปลงเกิดการแตกตัวของพันธะไฮโดรเจนที่ 2.6.2.1 และค่าไออาร์พียังมีความสัมพันธ์กับพีเอช โดยเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นค่าไออาร์พีจะลดลงซึ่งตรงตามผลการทดลอง ยกเว้นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดด้วยขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีค่าไออาร์พีประมาณ + 11.3 แสดงว่าไม่ได้เกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีต่ำดังหัวข้อที่ 4.1.1.1

4.1.1.6 ความนำไฟฟ้า

น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าความนำไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 101.1 μ s/cm แต่หลังจากผ่านการบำบัดด้วยขั้วไฟฟ้า ทั้ง 3 ชนิดแล้วพบว่า ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 108 – 120 μ s/cm

4.1.1.7 กระแสไฟฟ้า

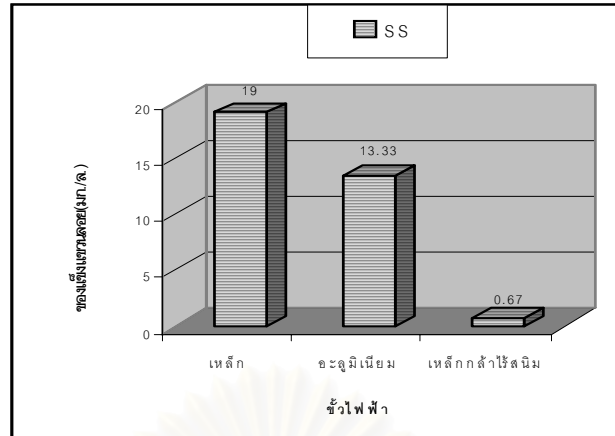
ในการทดลองนี้ใช้ค่าความต่างศักย์คงที่คือ 30 โวลต์ ดังนั้นจากผลที่แสดงในตารางที่ 4.1 จะพบว่าเมื่อใช้ขั้วไฟฟ้าทั้ง 3 ชนิดค่ากระแสไฟฟ้าเริ่มต้นก่อนการทดลองจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 แอมแปร์ หรือ 0.034 ฟาราเดย์ และหลังจากผ่านการบำบัดเป็นเวลา 3 ชม. แล้วค่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.40 แอมแปร์ หรือ 0.045 ฟาราเดย์ เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้าและแปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ($V = IR$) คือถ้าความต้านทานต่ำ กระแสไฟฟ้าจะสูงขึ้นและค่าความนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดูได้จากผลในหัวข้อ 4.1.1.6 ค่าความนำไฟฟ้าก็มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการบำบัดแล้วเช่นกัน

4.1.1.8 ของแข็งแขวนลอย

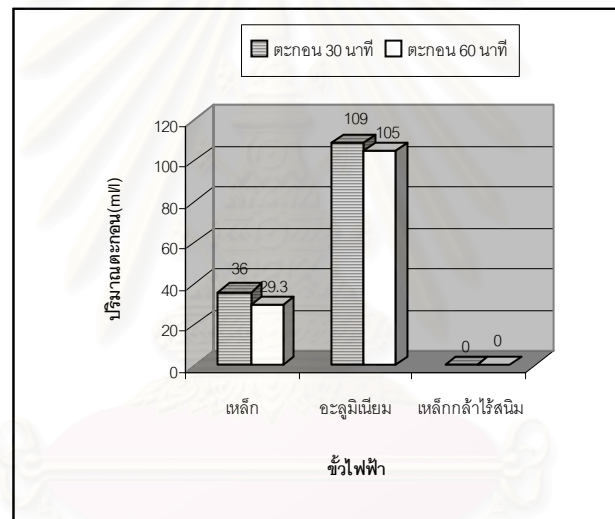
ในการทดลองนี้ น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองไม่มีสารแขวนลอยเนื่องจากสียละลายน้ำได้หมด ดังนั้นจากตารางผลการทดลองที่ 4.1 เห็นว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ขั้วเหล็กและขั้วอะลูมิเนียมในการบำบัดหลังจากตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปวัดค่า SS จะพบว่า มีของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้น ดังรูปที่ 4.3 เนื่องจากการเกิดตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการสลายตัวของขั้วไฟฟ้า ส่วนการใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม ของแข็งแขวนลอยจะเกิดขึ้นน้อยมาก ๆ อาจเป็นเพราะเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นมีโครเมียมออกไซด์ซึ่งมีเสถียรภาพสูงอยู่ที่ผิวเหล็กป้องกันไม่ให้เกิดการออกซิเดชันกับเหล็กซึ่งอยู่ภายใน(พรรคดี อรรถวาณิช,2540) ดังนั้นอิออนของเหล็กจึงหลุดออกจากขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมได้น้อยมาก การเกิดตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์จึงมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย

4.1.1.9 ปริมาณตะกอน

นำน้ำเสียสังเคราะห์หลังการทดลองมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 และ 60 นาที พบว่าถ้าใช้ขั้วเหล็กและขั้วอะลูมิเนียมในการบำบัดหลังจากตั้งทิ้งไว้จะเกิดการตะกอนขึ้น ที่ 30 นาทีมีค่าเฉลี่ยเป็น 36 มล./ลิตร และ 109 มล./ลิตร ตามลำดับ ที่ 60 นาที ปริมาณลดลงมีค่าเฉลี่ยเป็น 29.3 มล./ลิตร และ 105 มล./ลิตร ตามลำดับ ส่วนการใช้ขั้วเหล็กกล้าไร้สนิมจะไม่มีตะกอนเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมากดังรูปที่ 4.4 เหตุผลเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.1.8



รูปที่ 4.3 สารแขวนลอยหลังการทดลอง

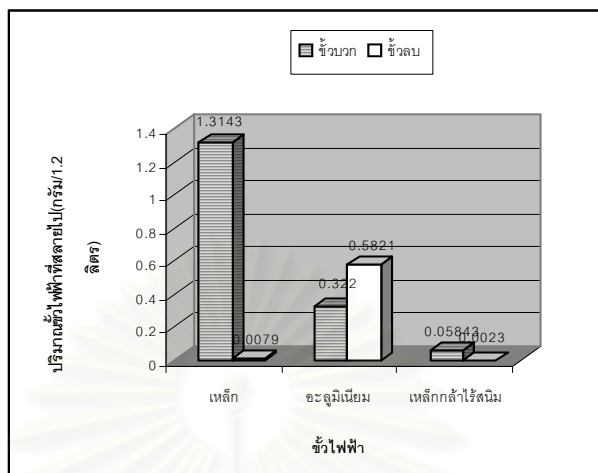


รูปที่ 4.4 ปริมาณตะกอนหลังการทดลอง

4.1.1.10 น้ำหนักข้าวไฟฟ้าที่สลายไปหลังการทดลอง

น้ำหนักของข้าวไฟฟ้ามักมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้มีการหลุดออกของโลหะไอออน พบว่าน้ำหนักของข้าวเหล็กที่สลายไปหลังการทดลองหายไปมีค่ามากที่สุด ดังรูปที่ 4.5 โดยที่ข้าววงและข้าวลบมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.314 และ 0.0079 กรัม ตามลำดับ น้ำหนักข้าววงและข้าวลบของอะลูมิเนียมลดลง 0.322 และ 0.0066 กรัม และน้ำหนักข้าววงและข้าวลบของเหล็กกล้าไร้สนิมหายไปน้อยที่สุด คือ 0.058 และ 0.0023 กรัม ซึ่ง

เหตุผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นหลังการทดลอง ซึ่งพบว่าขี้เห็ดก็มีค่าสูงสุดเช่นกัน



รูปที่ 4.5 ปริมาณขี้เห็ดที่ใช้ไป

4.1.1.11 สรุปชนิดของขี้เห็ดที่เหมาะสม

ขี้เห็ดที่เป็นเห็ดจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้สูงที่สุดมากถึง 99 % โดยมากกว่าการใช้ขี้เห็ดอะลูมิเนียม 31% และขี้เห็ดกัลป์ไรส์นิม 41% ซึ่งดูได้จากค่าไออาร์พี หลังการทดลองที่มีค่าติดลบมากที่สุด แสดงว่าขี้เห็ดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันมากที่สุด มีการสลายตัวของเห็ดออกนอกจากขี้แอมโมเนียของเห็ดได้มาก โดยยืนยันได้จากน้ำหนักของขี้เห็ดที่สลายไปมากที่สุดเท่ากับ 1.3 กรัม/น้ำเสีย 1.2 ลิตร มากกว่าขี้เห็ดอะลูมิเนียม 1 กรัม และขี้เห็ดกัลป์ไรส์นิม 1.25 กรัม ดังนั้นจึงเกิดปฏิกิริยาการกำจัดได้ดี ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะสูงเท่ากับ 67.5 % มากกว่าการใช้ขี้เห็ดอะลูมิเนียมและเห็ดกัลป์ไรส์นิม 14.7% และ 54.4% ตามลำดับ แต่ก็มีข้อเสียคือจะเกิดตะกอนมากและเห็ดที่ใช้จะสลายตัวไปมาก จึงต้องมีการเปลี่ยนขี้เห็ดแผ่นบ่อยกว่าการใช้ชนิดอื่น ๆ

4.1.2 การทดลองปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า

ในการทดลองนี้ได้ใช้ขี้เห็ดเป็นเห็ด แล้วทำการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 ค่า คือ 10, 20 และ 30 โวลต์ ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.2

4.1.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 จะพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีผลต่อการกำจัดสีและซีไอดี เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อปริมาณประจุของขั้วไฟฟ้าที่ปล่อยออกมา ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีมีค่าสูงสุดที่ 30 โวลต์ คือ 98.48% และ 65.43% ส่วนการกำจัดสีและซีไอดีที่ 20 โวลต์ มีค่าเท่ากับ 90.84%, 30.26% และที่ 10 โวลต์ ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีต่ำสุดเท่ากับ 37% และ 26.31% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาความต่างศักย์ที่เหมาะสม

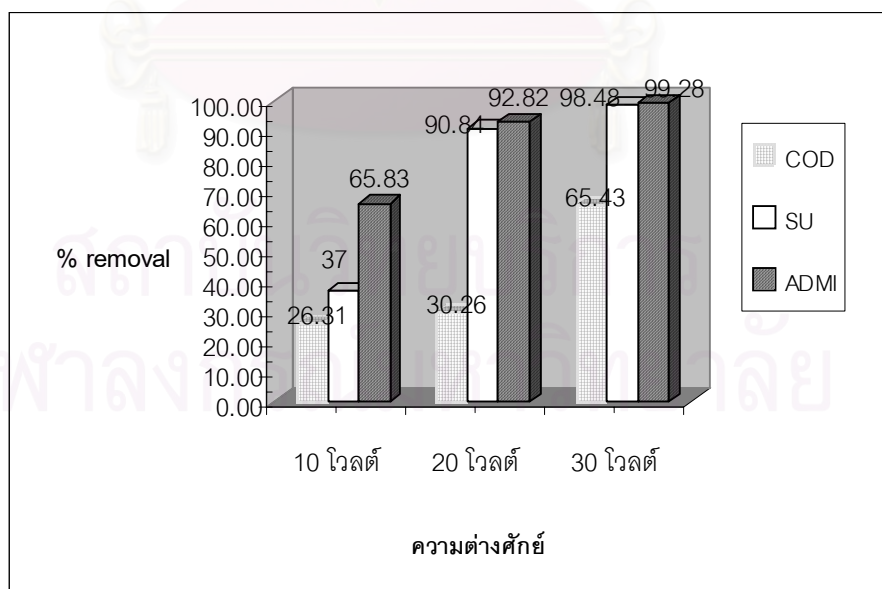
| พารามิเตอร์ | น้ำเสียสังเคราะห์ | น้ำเสียหลังการทดลอง | | | ประสิทธิภาพการกำจัด % | | |
|--|----------------------|---------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|
| | ก่อนทดลอง | 10 โวลต์ | 20 โวลต์ | 30 โวลต์ | 10 โวลต์ | 20 โวลต์ | 30 โวลต์ |
| พีเอช | 5.93 | 8.65 | 9.13 | 9.51 | | | |
| อุณหภูมิ (C°) | 30.5 | 32.8 | 35.7 | 42.2 | | | |
| สี (SU) | 392 | 247.8 | 35.91 | 5.95 | 37 | 90.84 | 98.48 |
| สี (ADMI) | 15,740 | 5,378.20 | 1,129.60 | 113.30 | 65.83 | 92.82 | 99.28 |
| COD | 159 | 117 | 111 | 55.1 | 26.31 | 30.26 | 65.43 |
| SS (mg/l) | - | 167 | 19.67 | 16.33 | | | |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | - | 2 | 14 | 48.3 | | | |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | - | 1 | 11.66 | 42 | | | |
| ค่า ORP | 64 | -61.7 | -105 | -133.3 | | | |
| ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | 102 | 105 | 112 | 128 | | | |
| น.น.ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป (ขั้วบวก) กรัม | - | 0.2511 | 0.4702 | 1.2938 | | | |
| น.น.ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป (ขั้วลบ) กรัม | - | 0.0042 | 0.0029 | 0.0069 | | | |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 0.07*,0.13**,0.30*** | 0.08 | 0.15 | 0.38 | | | |

หมายเหตุ * คือ 10 โวลต์ ** คือ 20 โวลต์ *** 30 โวลต์

4.1.2.2 สีเฮสซูและเอดีเอ็มไอ

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความเข้มสี 2 หน่วยคือหน่วย SU และ ADMI จากตารางที่ 4.2 ค่าความเข้มสีก่อนการทดลองมีค่าเฉลี่ย 392 SU และ 15,740.4 ADMI แต่หลังจากการปรับค่าความต่างศักย์ความเข้มสีจะลดลงมากที่สุดที่ 30 โวลต์ โดยมีค่าเฉลี่ย 5.95 SU และ 113.3 ADMI ถ้าใช้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ จะมีค่าเฉลี่ย 35.91 SU และ 1129.6 ADMI และถ้าใช้ความต่างศักย์ 10 โวลต์ ความเข้มสีจะลดลงน้อยที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ย 278.4 SU และ 5378.2 ADMI

ซึ่งเมื่อพิจารณาผลที่วัดได้จากเครื่อง UV-3101pc ดังแสดงในภาคผนวก ค พบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ max) ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองเท่ากับ 533 นาโนเมตร ส่วนน้ำเสียหลังการทดลองที่ 10 โวลต์ ค่าความยาวคลื่นสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.14 และกราฟความโค้งมีการเปลี่ยนแปลงส่วนที่ 20 และ 30 ไม่แสดงจุดสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร เหตุผลเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1.1.2



รูปที่ 4.6 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อแปรเปลี่ยนความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า



1 2 3 4

ภาพที่ 4.2 การกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ทั้ง 3

1) น้ำเสียสังเคราะห์ 2) 10 โวลต์ 3) 20 โวลต์ 4) 30 โวลต์

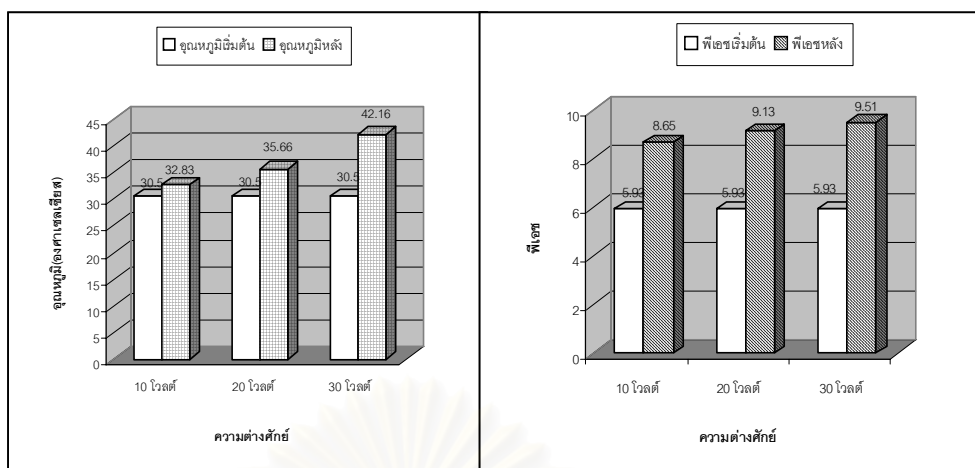
4.1.2.3 อุณหภูมิ

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ทำให้อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 4.2 น้ำเสียสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเฉลี่ย 29.9 องศาเซลเซียส แต่หลังการทดลองพบว่า การปรับค่าความต่างศักย์ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นไม่เท่ากัน โดยที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์ จะมีอุณหภูมิต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 32.8 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับมีค่าน้อย ดังนั้นพลังงานบางส่วนที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน (Ampere loss) จึงลดลงตามไปด้วย (กัณฑ์มาศ สุทธิเรืองวงศ์, 2538)

4.1.2.4 พีเอช

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 จะพบว่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 5.93 ส่วนค่าพีเอชหลังการทดลองจะเห็นว่ามีค่าพีเอชไม่แตกต่างกันมากนักคือมีพีเอชเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 8.6 ถึง 9.5 ดังรูปที่ 4.6 เหตุผลเช่นเดียวกับข้อ

4.1.1. 4



รูปที่ 4.7 พีเอชและอุณหภูมิหลังการทดลองปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า

4.1.2.5 ไออาร์พี

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าไออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าเป็นบวกคือเท่ากับ + 64 และหลังผ่านการทดลองโดยการปรับค่าความต่างศักย์พบว่าค่าไออาร์พีมีค่าเพิ่มขึ้นตามการปรับค่าความต่างศักย์ โดยค่าความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ค่าไออาร์พีจะมีค่าเป็น -62 และที่ 30 โวลต์มีค่าเพิ่มเป็น -133 โวลต์ อาจเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในการกำจัดสีเพิ่มขึ้นดังดูได้จากประสิทธิภาพในการกำจัดสีและยังมีความสัมพันธ์ทางตรงกับค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นด้วย

4.1.2.6 ความนำไฟฟ้า

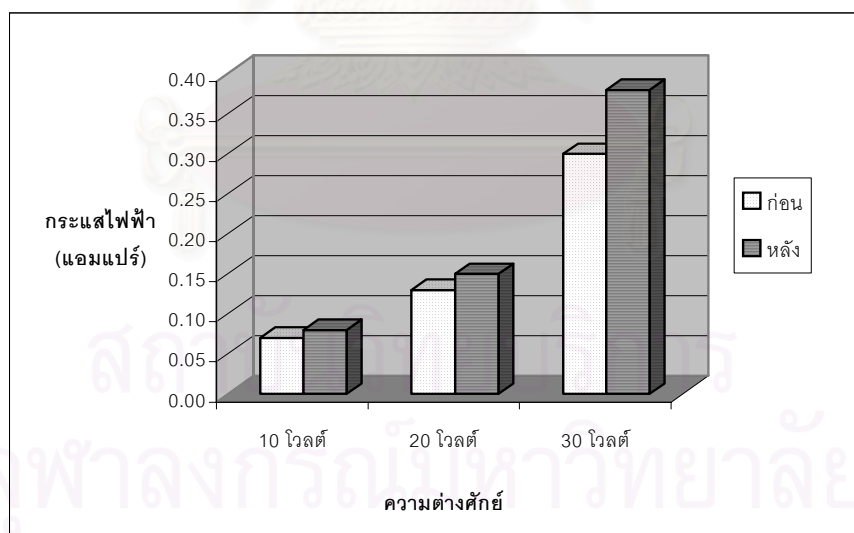
จากตารางที่ 4.2 จะพบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าความนำไฟฟ้าเฉลี่ยเป็น 101.8 $\mu\text{s/cm}$ และหลังจากผ่านการบำบัดแล้วพบว่า ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 105 – 128 $\mu\text{s/cm}$ ทั้งนี้เป็นเพราะอาจมีปริมาณไอออนเพิ่มขึ้นมากกว่าปริมาณไอออนที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากปริมาณไอออนมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้า คือถ้าปริมาณไอออนมีค่าลดลง ค่าความนำไฟฟ้าก็จะลดลงตามไปด้วย(มันสิน ตันทุลเวศม์, 2545)

4.1.2.7 กระแสไฟฟ้า

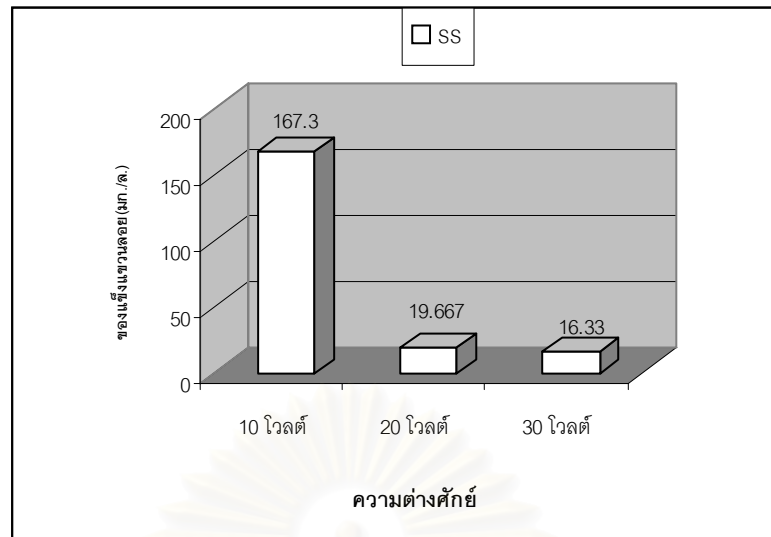
ในการทดลองนี้ จะทำการปรับค่าความต่างศักย์เป็น 10, 20 และ 30 โวลต์ ดังนั้นจากผลที่แสดงในตารางที่ 4.2 จะพบว่าเมื่อความต่างศักย์เพิ่ม ค่ากระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้น ตามสมการ ($V = IR$) โดยถ้าใช้ความต่างศักย์ 10 โวลต์หลังการทดลองจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.08 แอมแปร์ หรือ 0.0089 ฟาราเดย์ ที่ 20 โวลต์มีค่าเฉลี่ย 0.147 แอมแปร์ หรือ 0.017 ฟาราเดย์ และที่ 30 โวลต์จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.38 แอมแปร์ หรือ 0.043 ฟาราเดย์ ดังรูปที่ 4.8

4.1.2.8 ของแข็งแขวนลอย

ในการทดลองนี้ น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองจะไม่มีสารแขวนลอย เนื่องจากสีจะถูกละลายไปหมด ดังนั้นจากตารางผลการทดลองที่ 4.2 จะเห็นว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ ในการบำบัดจะมีค่ามากที่สุดประมาณ 167.33 มก./ล ดังรูปที่ 4.9 อาจเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวเป็นฟลอคของตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์มีค่าน้อยเกินไป จึงไม่ตกตะกอนแต่แขวนลอยอยู่ในน้ำ



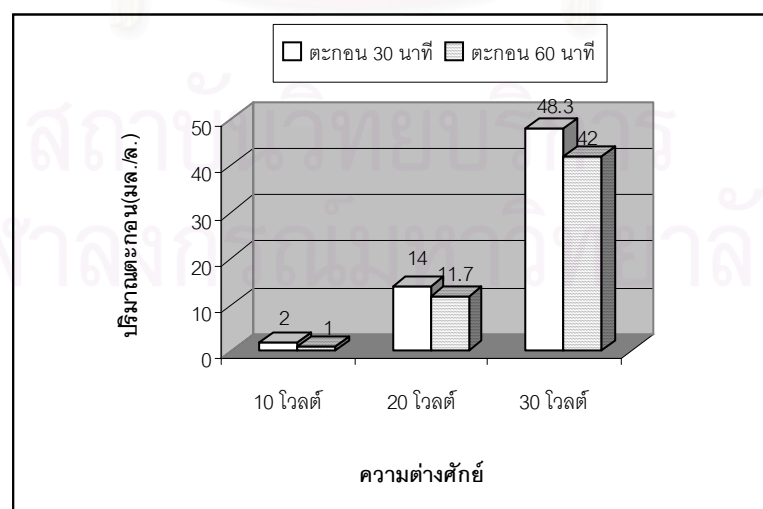
รูปที่ 4.8 กระแสไฟฟ้าที่ใช้ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน



รูปที่ 4.9 ของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังการทดลอง

4.1.2.9 ปริมาณตะกอน

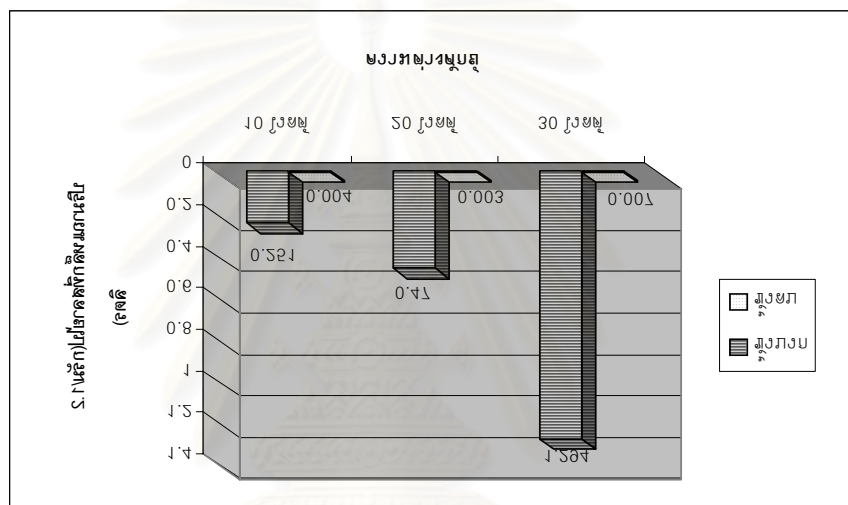
จากหัวข้อที่ 4.1.1.8 นั้น พบว่าผลการทดลอง จากตารางที่ 4.2 มีความสัมพันธ์กันโดยตรง เนื่องจากถ้าใช้ความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ การเกิดสารแขวนลอยมีมาก ทำให้การเกิดตะกอนมีน้อยตามไปด้วยคือมีค่าเฉลี่ยประมาณ 1 มก./ลิตร ซึ่งถ้าความต่างศักย์เพิ่มเป็น 20 และ 30 โวลต์ ปริมาณตะกอนจะเพิ่มเป็น 11.67 และ 42 มก./ลิตรตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ปริมาณตะกอนหลังทดลองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน

4.1.2.10 น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สลายตัวไปหลังการทดลอง

การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำให้น้ำหนักของขั้วไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงคือถ้าความต่างศักย์เพิ่มน้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไปก็จะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าที่ผ่านขั้วเหล็กเพิ่มขึ้น ดังนั้นปริมาณของเหล็กออกก็จะหลุดออกจากขั้วเพิ่มขึ้นตามกฎข้อที่ 1 ของฟาราเดย์ โดยที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์ จะใช้ปริมาณไฟฟ้า 0.045 ฟาราเดย์ ซึ่งจะทำให้เกิดการหลุดออกของขั้วเหล็กมีค่าเฉลี่ย 1.29 กรัม



รูปที่ 4.11 ปริมาณขั้วเหล็กที่สลายไปหลังทดลองที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 3 ค่า

4.1.2.11 สรุปค่าความต่างศักย์ที่เหมาะสม

สรุปว่าความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ มีประสิทธิภาพการกำจัดสีได้สูงถึง 98.48 % มากกว่าความต่างศักย์ที่ 10 และ 20 โวลต์ 61.5% และ 7.5% ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดสีโอดีเท่ากับ 65.4% จะมากกว่าที่ความต่างศักย์ที่ 10 โวลต์ และ 20 โวลต์ เช่นกัน ขั้วไฟฟ้าที่เป็นบวักจะสลายตัวไปมากที่สุดที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์นี้ เท่ากับ 1.29 กรัม/1.2 ลิตร ค่าโออาร์พีจะสูงที่สุดแสดงว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงกว่าที่ความต่างศักย์ที่ 10 และ 20 โวลต์ แต่ก็ทำให้เกิดปริมาณตะกอนมากขึ้นเนื่องจากขั้วเหล็กสลายออกจากขั้วแอโนดได้มากที่สุด และมีข้อเสียคืออุณหภูมิจะสูงเท่ากับ 42.2 °C มากกว่าที่ความต่างศักย์ 10 โวลต์ 9.4 °C และที่ 20 โวลต์ 6.7 °C เนื่องจากกระแสไฟฟ้าหลังเสร็จสิ้น

ปฏิกิริยาจะมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 0.38 แอมแปร์ ทำให้พลังงานที่ระบบได้รับถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้มากขึ้นด้วย(Ampare loss)และยังทำให้ค่าไฟฟ้าในการบำบัดสูงขึ้นอีกด้วย ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ต่าง ๆ

| ความต่างศักย์ | พลังงานที่ใช้ในการบำบัด kWh / m ³ | ค่าไฟฟ้า บาท / kWh / m ³ |
|---------------|---|--|
| 10 โวลต์ | 2 | 5.14* |
| 20 โวลต์ | 7.5 | 19.28* |
| 30 โวลต์ | 28.5 | 73.26* |

หมายเหตุ * ค่าไฟฟ้าคิดจากอัตราปกติของการไฟฟ้านครหลวง ประเภทที่ 6 โดยไม่รวมค่าบริการรายเดือน

4.1.3 การทดลองเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้จะใช้ขั้วเหล็กและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคงที่ที่ 30 โวลต์ และปรับเปลี่ยนเวลา ตั้งแต่ 0.5 ถึง 3 ชั่วโมง โดยในการทดลองนี้จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.4

4.1.3.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4พบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี โดยที่เวลา 3 ช.ม.ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีได้ดีที่สุดคือ 99%, กับ 99% ในหน่วย SU และ ADMI และ 65% แต่จากรูปที่ 4.12 พบว่าที่เวลา 0 - 1.5 ช.ม. กราฟเริ่มมีค่าความชันสูงแต่หลังจาก 1.5 ช.ม. ไปแล้วพบว่ากราฟมีความชันต่ำมากคือประสิทธิภาพในการกำจัดสีเริ่มใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 93% ขึ้นไปทั้งในหน่วย SUและADMI ส่วนค่าซีไอดีก็เพิ่มขึ้นตามเวลาเกือบกักเช่นกัน แต่ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 3 ช.ม. เท่ากับ 65 % ส่วนที่ 1.5 ช.ม.ประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับ 46 %

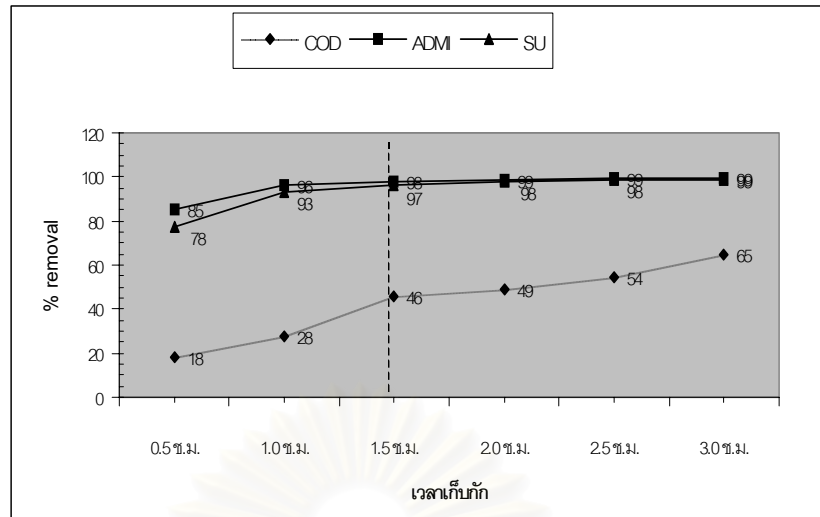
4.1.3.2 สีเอซยูและเอดีเอ็มไอ

จากตารางที่ 4.4 ค่าความเข้มข้นสีก่อนการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 445 – 448 SU และ 16,500 – 16,8000 ADMI แต่หลังจากการทดลองความเข้มข้นสีจะลดลงตามเวลาที่ใช้ทดลองโดยที่เวลา 0.5 – 3 ช.ม.คือมีค่าลดลงอยู่ในช่วง 99 จนถึง 4.76 SU และอยู่ในช่วง 2,460 – 12.67 ADMI

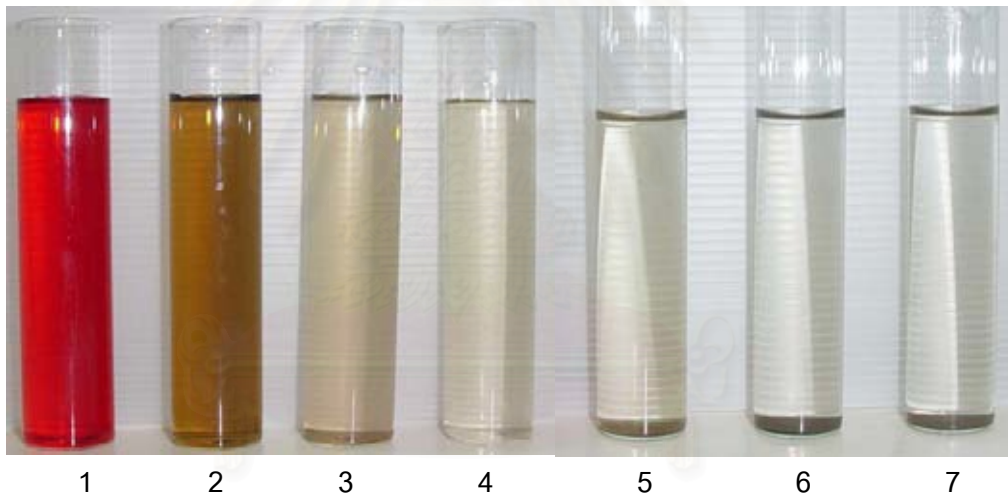
ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการตรวจสอบโครงสร้างสี (โครมาโทแกรม) ด้วยเครื่องมือ HPLC ดังแสดงในภาคผนวก ข. จะพบว่าโครงสร้างสีในน้ำก่อนทดลองจะมีจุดสูงสุดอยู่ที่เวลา 1.96 ส่วนน้ำที่ผ่านการบำบัดที่ 3 ช.ม.จะมีค่าสูงสุดที่ 2.23 และมีลักษณะโครมาโทแกรมของแต่ละช่วงไฟฟ้าต่างกัน ซึ่งเหมือนกับการตรวจสอบโครงสร้างสีด้วยเครื่อง FTIR ดังแสดงในภาคผนวก ง. โครงสร้างสีก่อนการทดลองและหลังผ่านการทดลอง 1.5 ช.ม.และ 3 ช.ม. พบว่าโครงสร้างจะแตกต่างกัน แต่ที่เวลา 1.5 และ 3 ช.ม. โครงสร้างสีมีความคล้ายกันอาจแตกต่างกันเล็กน้อย

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

| พารามิเตอร์ | น้ำเสียสังเคราะห์ ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการทดลอง | | | | | |
|--|--------------------------------|---------------------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | | 0.5 ช.ม. | 1 ช.ม. | 1.5 ช.ม. | 2 ช.ม. | 2.5 ช.ม. | 3 ช.ม. |
| พีเอช | 5.95 | 8.15 | 8.84 | 8.89 | 9.24 | 9.41 | 9.52 |
| อุณหภูมิ (C°) | 30.5 - 31.2 | 33.5 | 36.67 | 37.5 | 38.17 | 39.67 | 41.5 |
| สี (SU) | 445 - 448 | 99.4 | 29.44 | 15.1 | 10.7 | 7.37 | 4.76 |
| สี (ADMI) | 16,538 - 16,880 | 2,459.9 | 623.10 | 299.70 | 210.5 | 135.7 | 90.4 |
| COD | 160 - 162 | 132 | 116.7 | 87.3 | 82.4 | 73.4 | 56.5 |
| SS (mg/l) | - | 4.3 | 2.1 | 3 | 23.33 | 19.33 | 12.67 |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | - | 9.7 | 16 | 9.3 | 31.7 | 39.3 | 42.3 |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | - | 7.3 | 14.3 | 6 | 25 | 35.7 | 36.7 |
| ความต่างศักย์ (โวลต์) | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 0.3 | 0.33 | 0.35 | 0.37 | 0.37 | 0.38 | 0.4 |
| ค่า ORP | 62.3 - 66.3 | -52.7 | -61.3 | -74.3 | -83.3 | -112 | -133 |
| ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | 108 | 116 | 116 | 122 | 119 | 121 | 125 |
| น.น.ชีวไฟฟ้าที่ใช้ไป (ชีวบวก) กรัม | - | 0.187 | 0.383 | 0.632 | 0.84 | 1.067 | 1.336 |
| น.น.ชีวไฟฟ้าที่ใช้ไป (ชีวลบ) กรัม | - | 0.006 | 0.0061 | 0.0060 | 0.0060 | 0.0061 | 0.006 |



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดซีและซีไอดีที่เวลาเกิดปฏิกิริยาต่างกัน



ภาพที่ 4.3 ผลการกำจัดสีที่เวลาเกิดปฏิกิริยา 0.5 – 3 ชม.

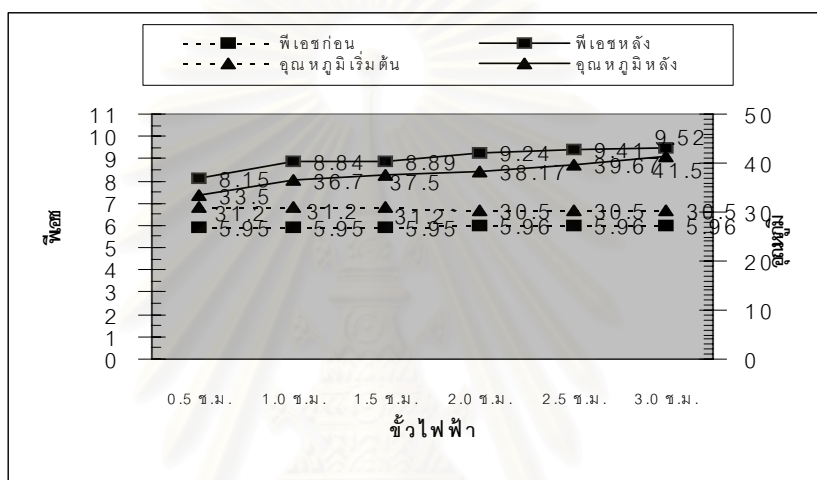
1) น้ำเสียสังเคราะห์ 2) 0.5 ชม. 3) 1 ชม. 4) 1.5 ชม. 5) 2 ชม. 6) 2.5 ชม. 7) 3 ชม.

4.1.3.3 อุณหภูมิ

การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ทำให้อุณหภูมิของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากตารางที่ 4.4 น้ำเสียสังเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเฉลี่ย 31.2 องศาเซลเซียส แต่หลังการทดลองพบว่าถ้าเวลาในการบำบัดเพิ่มขึ้นอุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยถ้าใช้เวลาที่ 0.5 ชม. อุณหภูมิอาจเพิ่มเพียง 2-3 องศาเซลเซียส แต่ที่เวลา 1.5 – 3 ชม. อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในช่วง 5-11 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.13

4.1.3.4 พีเอช

พีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าเฉลี่ยประมาณ 5.95 ส่วนค่าพีเอชหลังการทดลองจะเพิ่มขึ้นตามเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นด้วย โดยอยู่ในช่วงพีเอช 8 - 10 ดังรูปที่ 4.13 จากภาคผนวก จ. พบว่าที่เวลา 0 ถึง 25 นาที ค่าพีเอชค่อนข้างเป็นกรด แต่หลังจาก 30 นาทีผ่านไปค่าพีเอชจะเพิ่มขึ้นและมีค่าเป็นด่าง การที่พีเอชเพิ่มขึ้นก็เนื่องมาจากการเกิดตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ กับ $\text{Al}(\text{OH})_3$



รูปที่ 4.13 ขุ่นมัวและพีเอชก่อนและหลังทดลองที่เวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้น

4.1.3.5 ไออาร์พี

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าไออาร์พีของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าเป็นบวกคือประมาณ + 62 ถึง + 66 แสดงว่าในน้ำมีสารรับอิเล็กตรอน แต่หลังจากที่ผ่านการบำบัดแล้วพบว่าค่าไออาร์พีมีค่าลดลงตามเวลาที่ใช้บำบัดโดยอยู่ในช่วง -50 ถึง -130 แสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งมีผลทำให้โครงสร้างสีเปลี่ยนแปลงเกิดการแตกตัวของพันธะอะโซ่ ดังหัวข้อที่ 2.6.2.1 จากภาคผนวก จ. ทำให้ทราบว่าที่เวลา 0 ถึง 20 นาที ค่าไออาร์พียังมีค่าเป็นบวก แต่เมื่อ 25 นาทีเป็นต้นไปค่าไออาร์พีมีค่าติดลบ

4.1.3.6 ความนำไฟฟ้า

น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าความนำไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 108 $\mu\text{s/cm}$ แต่หลังจากผ่านการบำบัดที่ 0.5 – 3 ชม.แล้ว พบว่า ค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 116 – 125 $\mu\text{s/cm}$

4.1.3.7 กระแสไฟฟ้า

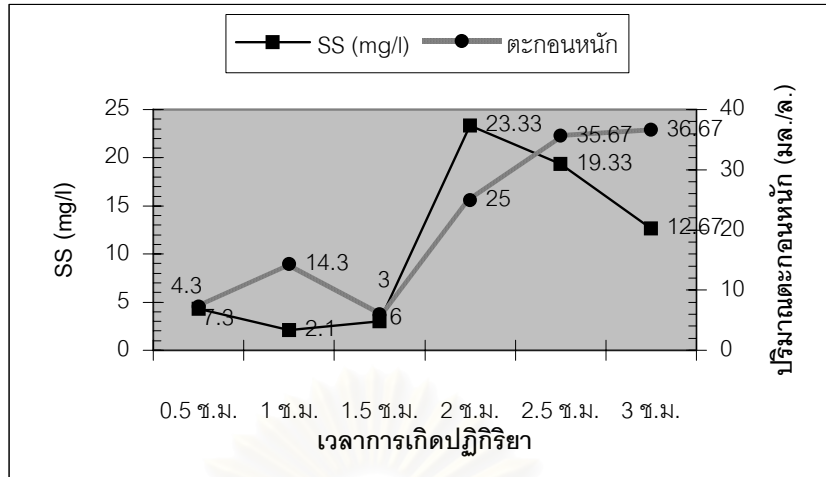
ในการทดลองนี้ใช้ค่าความต่างศักย์คงที่คือ 30 โวลต์ ดังนั้นจากผลที่แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าก่อนการทดลองอยู่ที่ 0.3 แอมแปร์ และเพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังการทดลองโดยอยู่ในช่วง 0.30 – 0.40 แอมแปร์ หรือ 0.00011 – 0.046 ฟาราเดย์ เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความนำไฟฟ้าและแปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ($V = IR$) คือถ้าความต้านทานต่ำ กระแสไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นและค่าความนำไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.1.3.8 ของแข็งแขวนลอย

น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองจะไม่มีสารแขวนลอย เนื่องจากสึละลายได้ดี ดังนั้นจากตารางผลการทดลองที่ 4.3 จะเห็นว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดเป็นเวลา 0.5 – 1.5 ชม. หลังจากตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปวัดค่า SS จะพบว่า มีของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นน้อยกว่าการเพิ่มเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 2 – 3 ชม.แต่ที่เวลาเพิ่มขึ้นปริมาณตะกอนกลับมีค่ามากขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4.14 เนื่องจากการเกิดตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการสลายตัวของขี้ไฟฟ้า ยิ่งเวลานานขึ้นตะกอนก็จะเกิดมากขึ้นเช่นกัน

4.1.3.9 ปริมาณตะกอน

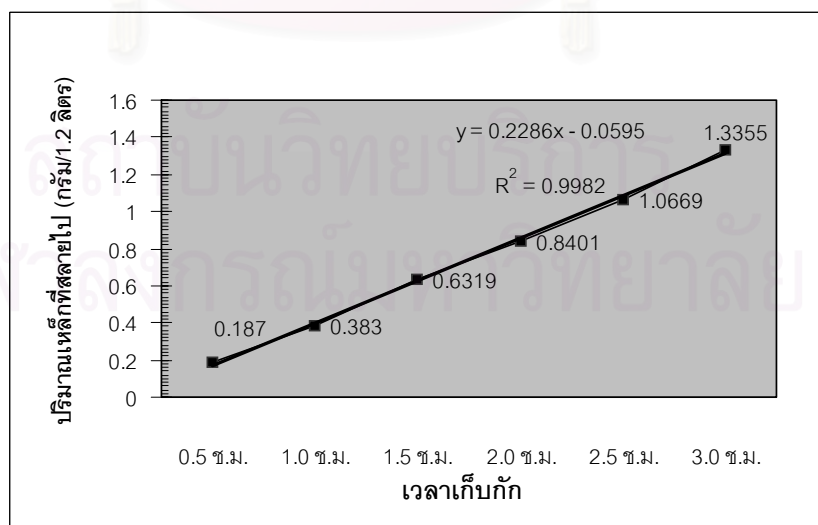
จากหัวข้อที่ 4.1.3.8 นั้นเมื่อนำน้ำเสียสังเคราะห์มาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 และ 60 นาที จะพบว่า เมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้น จะเกิดตะกอนเพิ่มมากขึ้นด้วย และมีปริมาณตะกอนสูงสุดที่เวลา 3.0 ชั่วโมง



รูปที่ 4.14 สารแขวนลอยและตะกอนหนักที่เวลาต่าง ๆ

4.1.3.10 น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป

น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าเหล็กจะมีการเปลี่ยนแปลงลดลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้มีการหลุดออกของโลหะออกไซด์จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าน้ำหนักของขั้วเหล็กที่เป็นขั้วบวกหลังการทดลองมีค่าต่ำลงเมื่อเพิ่มเวลาทำปฏิกิริยามากขึ้น โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลามีค่าลดลงค่อนข้างคงที่มีค่าความลาดชันเท่ากับ 0.9982 ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ $Y = 0.0086X - 0.0595$ ส่วนขั้วเหล็กที่เป็นลบจะมีค่าต่ำลงน้อยมากเนื่องจากเป็นไม่ได้เป็นขั้วที่สลายตัวให้เหล็กออกไซด์ในการเกิดปฏิกิริยาแต่เป็นขั้วที่รับอิเล็กตรอน



รูปที่ 4.15 ปริมาณขั้วเหล็กที่ใช้หลังการทดลอง

4.1.3.11 สรุปการหาเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

สรุปว่าเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเมื่อใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าและความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ คือที่เวลาทำปฏิกิริยา 1.5 ชม. เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 46% และประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอได้สูงถึง 97% และพบว่าการเพิ่มระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 1.5 ถึง 3 ชม. ปริมาณของการสลายขั้วเหล็กออกจากขั้วแอโนดนั้นมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 0.6 กรัม โดยที่มีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอได้เช่นกัน ปริมาณตะกอนเกิดน้อยและของแข็งแขวนลอยน้อยน้ำจึงมีความใส ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีไอและซีโอดีที่เวลา 3 ชม. จะมีค่าสูงที่สุด แต่พบว่าค่าไฟฟ้าในการบำบัดจะมีค่าสูงเท่ากับ 92.54 บาท / m^3 เพิ่มขึ้นมากกว่าที่เวลา 1.5 ชม. ถึง 55.91 บาท / m^3 แต่สามารถกำจัดซีไอได้เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 2 เท่านั้น ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าไฟฟ้าที่เวลาการเกิดปฏิกิริยา 1.5 – 3 ชม.

| เวลาการเกิดปฏิกิริยา | พลังงานที่ใช้ KWh / m^3 | ค่าไฟฟ้า บาท / m^3 | การกำจัดซีไอ % |
|----------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------|
| 1.5 ชม. | 14.25 | 36.63 | 97 |
| 2 ชม. | 18.5 | 47.55 | 98 |
| 2.5 ชม. | 23.75 | 61.05 | 98 |
| 3 ชม. | 36 | 92.54 | 99 |

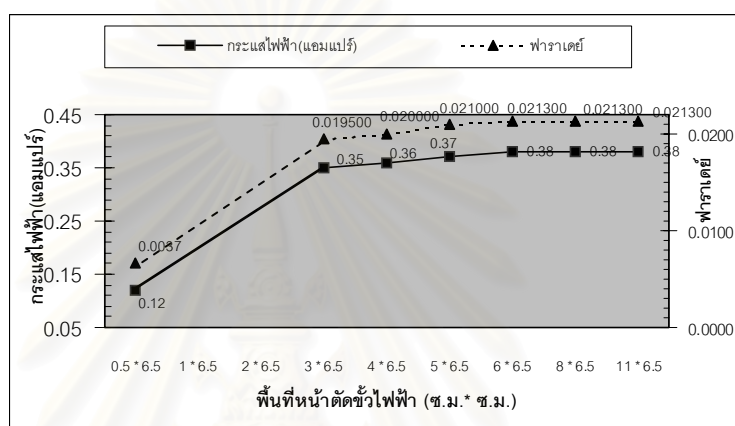
4.1.4 การทดลองขนาดพื้นที่ผิวหน้าตัดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน 7 ค่า ดังนี้ 0.5 × 6.5 ซม. 3.0 × 6.5 ซม. 4.0 × 6.5 ซม. 5.0 × 6.5 ซม. 6.0 × 6.5 ซม. 8.0 × 6.5 ซม. และ 11 × 6.5 ซม. โดยในการทดลองนี้ใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าแล้วบ่อนความต่างศักย์ 30 โวลต์ที่เวลาการเกิดปฏิกิริยา 1.5 ชม. ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.8

4.1.4.1 กระแสไฟฟ้า

ในการทดลองนี้ พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าหลังการทดลองจะเพิ่มขึ้นตาม

พื้นที่หน้าตัดของขั้วเหล็กที่เพิ่มขึ้น โดยพื้นที่หน้าตัดขนาด 0.5×6.5 ตร.ซ.ม.มีการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าน้อยที่สุดเท่ากับ 0.12 แอมแปร์ หรือ 0.0067 ฟาราเดย์ และหลังจากเพิ่มพื้นที่หน้าตัดเป็น 3.0 × 6.5 ตร.ซ.ม.ถึง 11×6.5 ตร.ซ.ม. กระแสไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นคงที่ไปเรื่อยๆ เพราะความสัมพันธ์จากกฎของโอห์มได้บอกไว้ว่าค่าความต้านทานของตัวนำใด ๆ จะเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของขั้วตัวนำไฟฟ้านั้น และค่าความต้านทานไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อเพิ่มขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองจึงเพิ่มขึ้นดังกราฟรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กระแสไฟฟ้าหลังการทดลอง

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยผลการหาขนาดพื้นที่หน้าตัดขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

| พารามิเตอร์ | น้ำเสียสังเคราะห์ ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการทดลอง | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | | 0.5 * 6.5 ซ.ม. | 3 * 6.5 ซ.ม. | 4 * 6.5 ซ.ม. | 5 * 6.5 ซ.ม. | 6 * 6.5 ซ.ม. | 8 * 6.5 ซ.ม. | 11 * 6.5 ซ.ม. |
| พีเอช | 5.81-5.93 | 7.09 | 8.47 | 8.6 | 8.81 | 8.82 | 8.89 | 8.99 |
| อุณหภูมิ (C°) | 30.25-30.67 | 32.5 | 34.5 | 37.75 | 38.25 | 38 | 38.63 | 38.5 |
| สี (SU) | 436-446 | 411 | 18.55 | 18.53 | 17.4 | 15.96 | 14.96 | 12.63 |
| สี (ADMI) | 16,611-17,001 | 12,734 | 521 | 513 | 418 | 338 | 290 | 245 |
| COD | 153-165 | 128.8 | 113.1 | 106.64 | 104 | 95.3 | 84 | 63.57 |
| SS (mg/l) | 58 | 58 | 3 | 5 | 5.5 | 5.33 | 3.67 | 3.33 |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | - | 3.5 | 24 | 14 | 12.5 | 19.33 | 16.67 | 13.33 |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | - | 3.5 | 20 | 10 | 9.5 | 14 | 11.67 | 10.67 |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 0.09-0.30 | 0.12 | 0.35 | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.38 | 0.38 |
| ค่า ORP | 57.5-59 | 39 | -39 | -61.5 | -66 | -70.3 | -82 | -82.7 |
| ค่าความนำไฟฟ้า (µs/cm) | 108-111 | 120 | 126 | 122 | 124 | 122 | 125 | 129 |
| น.น. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป (ขั้วบวก) กรัม | - | 0.1984 | 0.5572 | 0.5997 | 0.6233 | 0.6231 | 0.6317 | ~ 0.5 |
| น.น. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป (ขั้วลบ) กรัม | - | 0.0037 | 0.0029 | 0.0077 | 0.0069 | 0.0054 | 0.007 | * |

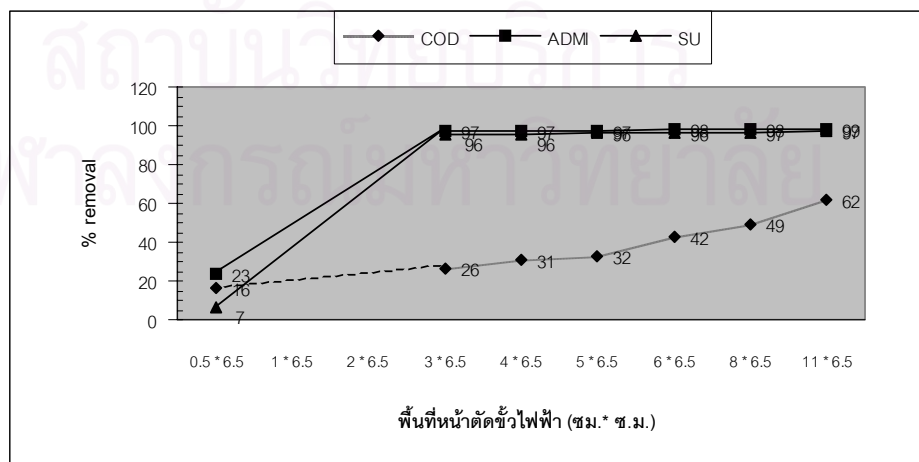
หมายเหตุ * เนื่องจากน้ำหนักเกินจุดศุนิยม 4 ตำแหน่งของเครื่องชั่งแบบดิจิตอลจึงต้องชั่งด้วยเครื่องชั่งปกติค่าที่ได้จึงไม่เปลี่ยนแปลง

4.1.4.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

พื้นที่ขั้วไฟฟ้ามีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ถ้าใช้พื้นที่พื้นที่หน้าตัดขนาด 0.5×6.5 ตร.ซ.ม.พบว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีไอดีมีค่าต่ำที่สุดคือ 16% และเมื่อพื้นที่หน้าตัดเพิ่มขึ้นจนถึงขนาด 11 × 6.5 ตร.ซ.ม. การกำจัดซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดเท่ากับ 62% ดังกราฟรูปที่ 4.17 เนื่องจากการที่พื้นที่หน้าตัดขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นการสลายตัวของเหล็กอ็อนก็จะมากขึ้นส่งผลให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์มากขึ้นทำให้กำจัดซีไอดีได้มากขึ้น

4.1.4.3 ประสิทธิภาพการกำจัดสี

การกำจัดสีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดขั้วไฟฟ้า โดยที่พื้นที่หน้าตัดขนาด 11 × 6.5 ตร.ซ.ม. มีประสิทธิภาพการกำจัดสีดีที่สูงสุดเท่ากับ 97% และประสิทธิภาพการกำจัดสีน้อยที่สุดเมื่อมีขนาด 0.5 × 6.5 ตร.ซ.ม เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดมีขนาดน้อยมากปริมาณอิเล็กตรอนที่วิ่งผ่านขั้วเหล็กมีค่าน้อยลง ทำให้เหล็กอ็อนที่จะสลายออกไปจึงน้อยตามไปด้วย ปฏิกิริยาการกำจัดสีจึงลดลง แสดงว่าการกำจัดสีจะขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้า(แอมแปร์)หรือฟาราเดย์ โดยพบว่าถ้าปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.02 ฟาราเดย์ จะสามารถกำจัดสีได้ถึง 400 SU



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี



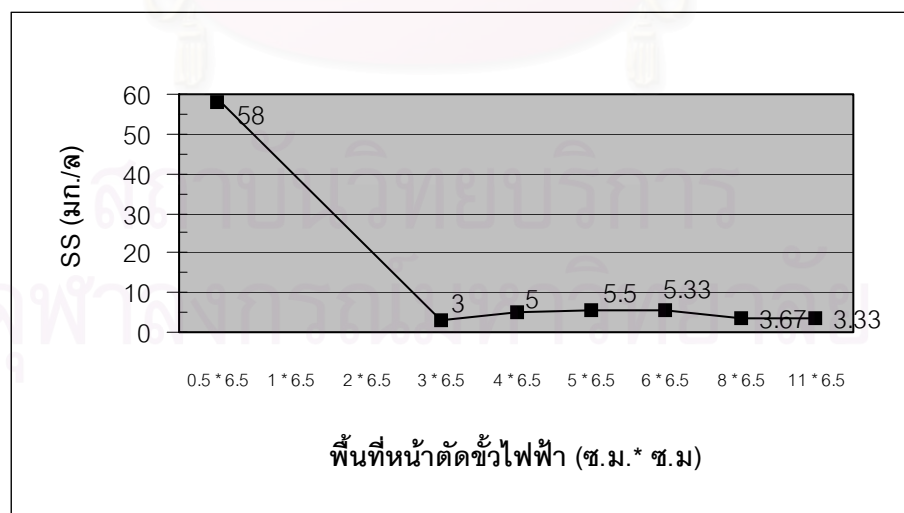
1 2 3 4 5 6 7 8

ภาพที่ 4.4 ผลการกำจัดสีที่ขนาดพื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ

- 1) น้ำเสียสังเคราะห์ 2) 0.5×6.5 ตร.ซม. 3) 3×6.5 ตร.ซม 4) 4×6.5 ตร.ซม
5) 5×6.5 ตร.ซม 6) 6×6.5 ตร.ซม 7) 8×6.5 ตร.ซม 8) 11×6.5 ตร.ซม

4.1.4.4 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน

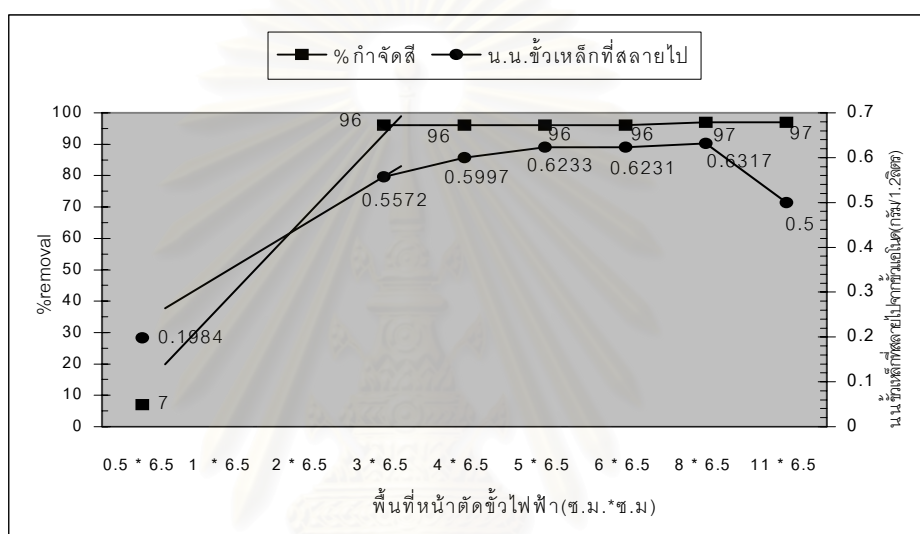
ในการทดลองนี้พบว่า ของแข็งแขวนลอยมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัด เนื่องจากสีมีการตกตะกอนเพิ่มมากขึ้น ดังกราฟรูปที่ 4.18 เพราะกระแสไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้มีตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์เกิดได้มากขึ้น โดยพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 3×6.5 ตร.ซ.ม จะเกิดตะกอนมากที่สุด



รูปที่ 4.18 สารแขวนลอยและปริมาณตะกอนหลังการทดลอง

4.1.4.5 น้ำหนักขี้เหล็กที่สลายไปจากขี้แอมโนด

น้ำหนักของขี้เหล็กที่เป็นขี้บวมมีการเปลี่ยนแปลง โดยพบว่าถึงแม้ว่ามีการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของขี้ไฟฟ้า แต่น้ำหนักของขี้เหล็กที่สลายไปที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 3×6.5 ตร.ซ.ม จนถึง 11×6.5 ตร.ซ.ม มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.6 กรัม เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีที่มีค่าใกล้เคียงกันคือเท่ากับ 97% – 99% แสดงว่าการเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของขี้ไฟฟ้าไม่มีผลต่อการสลายไปของขี้ไฟฟ้าที่ออกจากขี้แอมโนด



รูปที่ 4.19 น้ำหนักขี้เหล็กที่ใช้ไปที่พื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ

4.1.4.6 สรุปลักษณะผิวของขี้ไฟฟ้าที่เหมาะสม

พื้นที่ผิวหน้าตัดของเหล็กขนาด 11×6.5 ตร.ซ.ม มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีสูงสุดสามารถกำจัดซีโอทีได้สูงถึง 97% ของแข็งแขวนลอยน้อย ทำให้น้ำมีความใส มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอทีได้สูงที่สุด เท่ากับ 62% โดยอัตราส่วนของขี้เหล็กที่สลายไป/พ.ท. ผิวหน้าตัดขี้ไฟฟ้าจะมีค่าน้อยที่สุดประมาณ 0.007 กรัม / ตร.ซ.ม. ดังตารางที่ 4.7 และเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่หน้าตัดผิวขี้ไฟฟ้า 8×6.5 ตร.ซ.ม พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอทีเพิ่มขึ้นเท่ากับ 19% แต่พบว่ามีค่าไฟฟ้าเท่ากันคือเท่ากับ 36.63 บ / m^3 เช่นเดียวกับค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเพียงร้อยละ 8.5 ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 อัตราการสลายของเหล็กจากขั้วแอโนด/พ.ท.ผิวหน้าตัดของขั้วไฟฟ้า

| พื้นที่หน้าตัด ซม. x ซม. | 0.5 × 6.5 | 3 × 6.5 | 4 × 6.5 | 5 × 6.5 | 6 × 6.5 | 8 × 6.5 | 11 × 6.5 |
|--|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| อัตราการสลาย กรัม/ ซม.ม. ² | 0.06 | 0.029 | 0.023 | 0.019 | 0.016 | 0.012 | ~ 0.007 |

ตารางที่ 4.8 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดที่พื้นที่หน้าตัดต่าง ๆ

| พื้นที่หน้าตัด ซม. x ซม. | 0.5 × 6.5 | 3 × 6.5 | 4 × 6.5 | 5 × 6.5 | 6 × 6.5 | 8 × 6.5 | 11 × 6.5 |
|----------------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| ค่าไฟฟ้า บาท / ม ³ | 11.75 | 33.75 | 34.70 | 35.65 | 36.63 | 36.63 | 36.63 |
| การกำจัดCOD % | 16 | 26 | 31 | 32 | 42 | 49 | 62 |

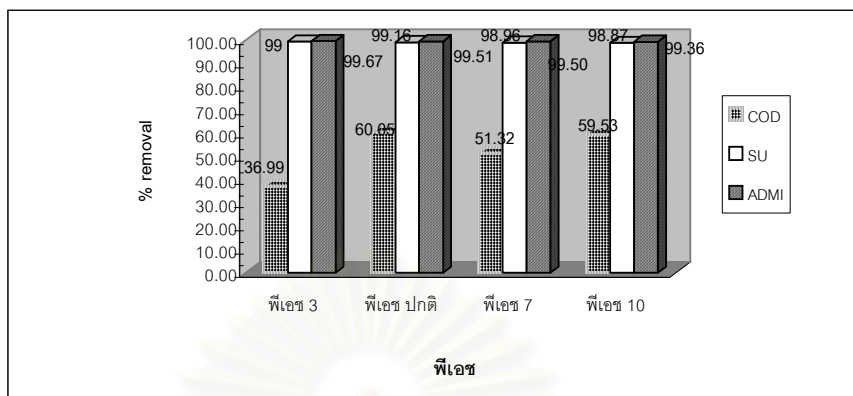
4.1.5 การทดลองค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้ใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้ามีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 11 × 6.5 ตร.ซม. ที่ความต่างศักย์ 30 โวลต์ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา 1.5 ชม.แล้วทำการปรับค่าพีเอชให้มีค่าเป็น 3 7 และ 10 เพื่อเปรียบเทียบกับค่าพีเอช 5.85 (พีเอชปกติ) ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.9

4.1.5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอและซีไอดี

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.9 พบว่าค่าพีเอชเริ่มต้นไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอ ดังดูได้จากรูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอมีค่าสูงประมาณ 98 - 99% ทั้งในหน่วย SU และ ADMI แต่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเล็กน้อย โดยที่พีเอช 5.85, 7 และ 10 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีใกล้เคียงกันส่วนพีเอชที่เป็นกรดคือพีเอช 3 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีต่ำที่สุด คือ 36.99 % เพราะการที่ซีไอมีค่าลดลงอาจเกิดจากกลไกการ

ออกซิเดชันมากกว่าการตกตะกอนทำให้ค่าซีโอดีลดลงไม่มาก ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีคือ พีเอช 5.85 ถึง 10



รูปที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและซีโอดี

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

| พารามิเตอร์ | น้ำเสียสังเคราะห์ ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการทดลอง | | | | ประสิทธิภาพการกำจัด % | | | |
|--|--------------------------------|---------------------|------------|----------|----------|-----------------------|------------|---------|----------|
| | | พีเอช 3 | พีเอช 5.85 | พีเอช 7 | พีเอช 10 | พีเอช 3 | พีเอช 5.85 | พีเอช 7 | พีเอช 10 |
| พีเอช | 3, 5.85, 7 และ 10 | 5.62 | 9.08 | 9.79 | 10.28 | | | | |
| อุณหภูมิ (C°) | 29.8 | 42.75 | 40.5 | 46.5 | 46.5 | | | | |
| ซี (SU) | 435 | 2.3 | 3.65 | 4.5 | 4.9 | 99 | 99.16 | 98.96 | 98.87 |
| ซี (ADMI) | 15,463 | 51.6 | 75.1 | 76.9 | 98.72 | 99.67 | 99.51 | 99.5 | 99.36 |
| COD | 151 | 95.2 | 60.32 | 73.5 | 61.11 | 36.99 | 60.05 | 51.32 | 59.53 |
| SS (mg/l) | - | 2.5 | 7 | 22 | 22.5 | | | | |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | - | 12.5 | 46 | 100 | 105 | | | | |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | - | 11 | 40 | 85 | 90 | | | | |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 0.3* และ 0.63** | 0.70 | 0.40 | 1.06 | 1.05 | | | | |
| ค่า ORP | 48 | -33 | -11 | -149 | -140 | | | | |
| ค่าความนำไฟฟ้า ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | 102.4-115.5 | 177.4 | 126.1 | 189.8 | 196 | | | | |
| น.น. ชั่วไฟฟ้าที่ใช้ไป (ชั้วบวก) กรัม | - | ~ 1*** | ~ 0.5*** | ~ 1.5*** | ~ 1.5*** | | | | |

หมายเหตุ * เป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับพีเอช 5.85

** เป็นกระแสไฟฟ้าที่ใช้สำหรับพีเอช 3 7 และ 10

**** เนื่องจากน้ำหนักเกินจุดทศนิยม 4 ตำแหน่งของเครื่องชั่งแบบดิจิตอลจึงต้องชั่งด้วยเครื่องชั่งปกติค่าที่ได้จึงเป็นค่าประมาณ



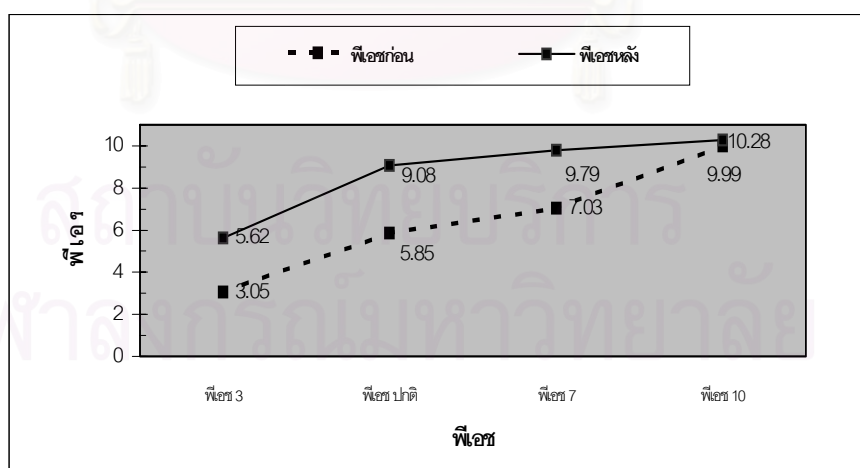
1 2 3 4 5

ภาพที่ 4.5 ผลการกำจัดสีที่ค่าพีเอชเริ่มต้นต่าง ๆ

1. น้ำตัวอย่าง 2. พีเอช 3 3. พีเอช 5.85 4. พีเอช 7 5. พีเอช 10.

4.1.5.2 พีเอช

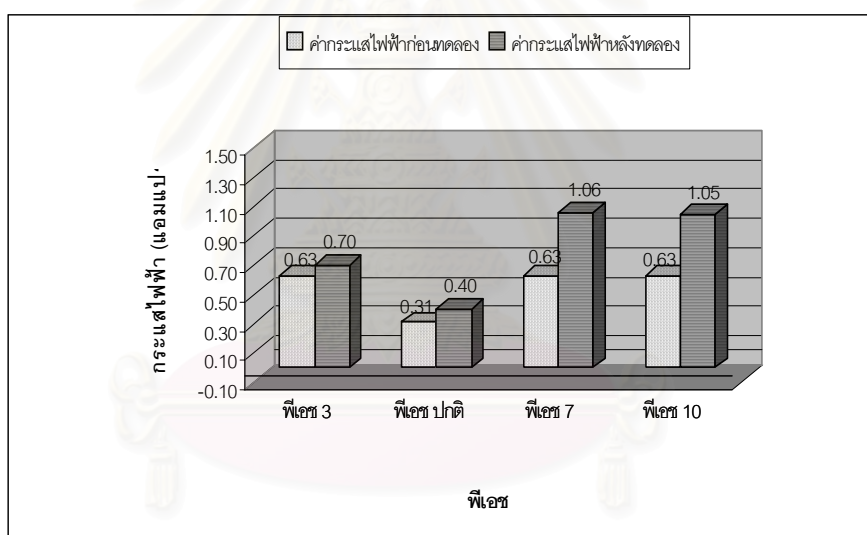
จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์หลังการทดลองมีค่าเฉลี่ยประมาณ 9 – 10 ส่วนที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 3 หลังการทดลองค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 5.62 แต่ทุกค่าพีเอชมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของพีเอช ดังรูปที่ 4.17 การที่พีเอชเพิ่มขึ้นก็เนื่องมาจากการเกิดตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ กับ $\text{Al}(\text{OH})_3$ นั้นเอง



รูปที่ 4.21 พีเอชก่อนและหลังทดลอง

4.1.5.3 กระแสไฟฟ้า

ในการทดลองนี้จะพบว่าที่พีเอชของน้ำเท่ากับ 5.85 ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ก่อนการทดลองมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.3 แอมแปร์และหลังการทดลองเพิ่มเป็น 0.4 แอมแปร์ แต่ที่พีเอช 3,7 และ 10 ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนการทดลองจะสูงขึ้นเท่ากับ 0.63 แอมแปร์และมีค่าสูงขึ้นอีกหลังการทดลอง ดังรูปที่ 4.22 เพราะที่พีเอชที่เป็นค่าต่างมากหรือเป็นกรดมากเนื่องจากการใช้สารเคมีปรับค่าพีเอชทำให้ปริมาณไอออนเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าก่อนการทดลองมีค่าสูงมากขึ้นด้วยนั่นเอง(มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2545) ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมคือที่พีเอช 5.85 ซึ่งเป็นค่าพีเอชปกติ เนื่องจากใช้กระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการทดลองมีค่าน้อย ทำให้ประหยัดไฟฟ้า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูง ของแข็งแขวนลอยมีค่าน้อย และมีปริมาณตะกอนหนักต่ำ

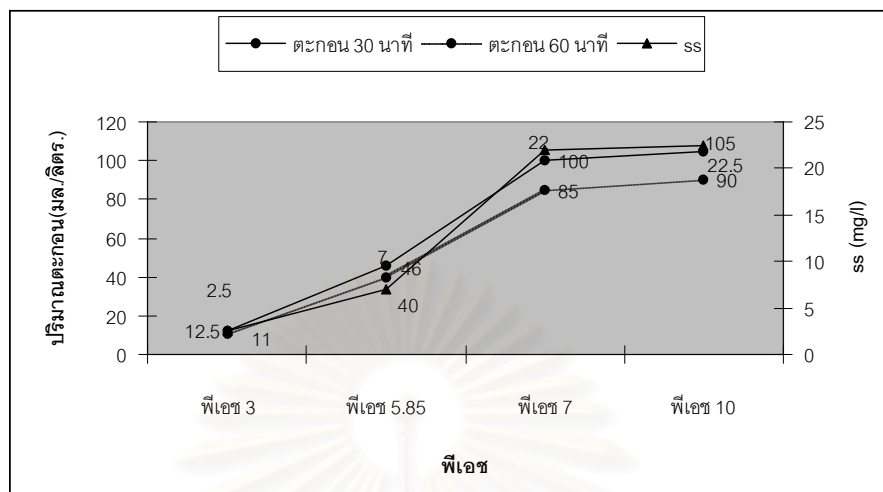


รูปที่ 4.22 ค่ากระแสไฟฟ้าก่อนและหลังการทดลอง

4.1.5.4 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน

น้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช 3 และ 5.85 หลังการทดลองพบว่าไม่มีของแข็งแขวนลอยต่ำอยู่ในช่วง 2 – 7 มก./ล. ส่วนพีเอช 7 และ 10 จะเกิดสารแขวนลอยเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกับปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น ถ้าทำการบำบัดที่พีเอช 5.85 หลังจากตั้งทิ้งไว้จะเกิดการตกตะกอนขึ้น ที่ 30 และ 60 นาทีที่มีค่าเท่ากับ 46 และ 40 มล./ลิตร ตามลำดับอาจเพราะตะกอนมีการ

อัดตัวได้ดีไม่มีน้ำแทรกอยู่ในชั้นตะกอน ส่วนที่พีเอช 7 และ 10 ปริมาณตะกอนเพิ่มสูงขึ้นมาก ดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นหลังทดลอง

4.1.5.5 น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป

น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้มีการหลุดออกของโลหะออกไซด์ จากตารางที่ 4.9 จะเห็นว่าผลที่ได้จะเป็นค่าประมาณ เนื่องจากน้ำหนักของเหล็กที่เกินค่าการอ่านของเครื่องซึ่งแบบดิจิตอลจึงต้องชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบปกติ และทำให้การอ่านค่าที่ขั้วลบเป็นไปได้ลำบากเนื่องจากที่ขั้วลบจะเกิดการรับอิเล็กตรอนมากกว่าส่วนขั้วบวกจะเป็นตัวสลายเหล็กออกไซด์ออกไปค่าจึงต้องชั่งที่ค่าทศนิยม 4 ตำแหน่งเท่านั้น ส่วนที่ขั้วบวกประมาณได้ว่าที่พีเอช 5.85 จะใช้ขั้วเหล็กในปริมาณน้อยกว่าประมาณ 0.5 กรัม / น้ำ 1.2 ลิตร เพราะค่ากระแสไฟฟ้าหลังการทดลองมีค่าน้อยกว่าที่พีเอช 3, 7 และ 10 ตรงตามกฎข้อที่ 1 ของฟาราเดย์ที่ว่า ปริมาณของสารใดสารหนึ่งที่แยกสลายออกมาจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ผ่านลงไป ถ้าผ่านน้อยสารที่เกิดขึ้นก็จะน้อยตามไปด้วยเช่นกัน

4.1.4.6 สรุปค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหมาะสม

สรุปว่าที่พีเอชเริ่มต้น 5.85 (พีเอชเริ่มต้นปกติ) เหมาะสมที่สุดโดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและสีเท่ากับ 99.16 % และ 60.05 % ตามลำดับ และพีเอชหลังการทดลองมีค่าเท่ากับ 9 ตามเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง โดยถ้าพีเอชเริ่มต้นเป็น 7 พีเอชสุดท้ายจะ

มากกว่า 9 ซึ่งจะเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง และที่พีเอช 5.85 จะเกิดตะกอนหลังการทดลองมีปริมาณต่ำ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ก่อนและหลังการทดลองจะมีค่าน้อยกว่าที่พีเอช 3 7 และ 10 เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าหลังการทดลองมีค่าน้อยที่สุดกระแสจึงไหลผ่านได้น้อยกว่าทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้หลังการทดลองมีค่าน้อยตามไปด้วย ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 ค่าไฟฟ้าเมื่อปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์

| พีเอช | พลังงานที่ใช้ในการบำบัด kWh / m ³ | ค่าไฟฟ้า บาท / ม. ³ |
|-------|---|-----------------------------------|
| 3 | 26.25 | 67.48 |
| 5.85 | 15 | 38.56 |
| 7 | 39.75 | 98.02 |
| 10 | 47.25 | 121.46 |

4.1.6 การทดลองค่าความนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

ในการทดลองนี้จะใช้ขั้วเหล็กขนาดพื้นที่หน้าตัด 11×6.5 ตร.ซ.ม. และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 0.5 ซ.ม และเปลี่ยนค่าความต่างศักย์จาก 30 โวลต์ เป็น 6.4 โวลต์สำหรับค่าความนำไฟฟ้า 7.2 ms/cm และใช้ค่าความต่างศักย์ที่ 2.0 โวลต์ สำหรับค่าความนำไฟฟ้า 72 ms/cm เนื่องจากเมื่อมีการปรับค่าความนำไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำให้ค่าความต้านทานลดลงดังนั้นค่าความต่างศักย์จึงลดลงด้วยตามสมการ ($V=IR$) และเป็นค่าความต่างศักย์สูงสุดที่เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) จะจ่ายได้ให้กับน้ำเสียในแต่ละสภาวะนี้ โดยทำการปรับค่าความนำไฟฟ้าโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ในน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 5.72 กรัม/น้ำ 1 ลิตร เพื่อให้มีค่าเท่ากับ 7.2 ms/cm. เท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียรวมและใช้โซเดียมคลอไรด์ประมาณ 80 กรัม/น้ำ 1 ลิตร เพื่อให้ได้ค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 72 ms/cm เท่ากับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียจากหม้อย้อม โดยในการทดลองนี้จะทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.11

4.1.6.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีที่เวลา 30 นาที ต่ำที่สุดเมื่อไม่มีการปรับค่าความนำไฟฟ้าคือมีค่าเท่ากับ 9% และ 5% ตามลำดับ แต่เมื่อมีการปรับค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเท่ากันคือ 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นถึง 99 % และ 45 % ดังกราฟรูปที่ 4.24 และภาพที่ 4.6 ซึ่งจะเท่ากับประสิทธิภาพการกำจัดสีที่ระยะเวลา 1.5 ชม เมื่อไม่มีการปรับค่าความนำไฟฟ้าแสดงว่าการปรับค่าความนำไฟฟ้าจะช่วยลดระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาในการกำจัดสีและซีไอดีให้น้อยลง

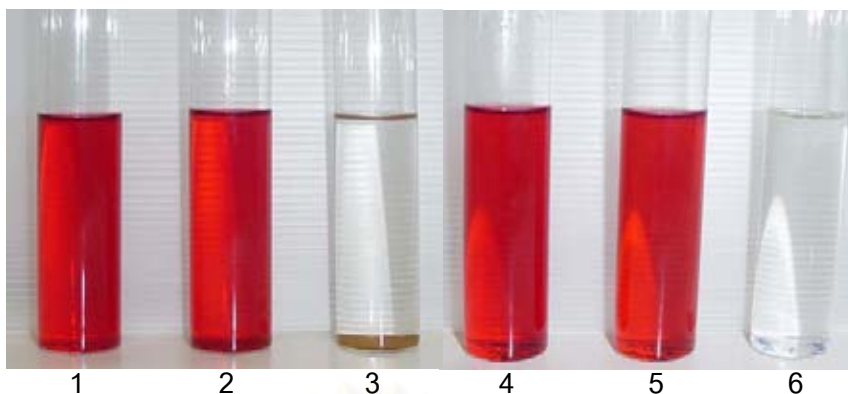
ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองหาค่าความนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

| พารามิเตอร์ | น้ำเสียสังเคราะห์ ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการทดลอง | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------|------------|----------|
| | | 0.11 ms/cm | 7.2 ms/cm | 0.11 ms/cm | 72 ms/cm |
| พีเอช | 5.99-6.02 | 6.8 | 10.1 | 6.76 | 10.24 |
| อุณหภูมิ (C°) | 30.5 | 31.6 | 36.5 | 31.2 | 37 |
| สี (SU) | 397 | 329 | 1.53 | 384 | 3.31 |
| สี (ADMI) | 14,080-16,112 | 12,109.3 | 40.29 | 14,672.10 | 69.47 |
| COD | 157*,165.12**,367*** | 149 | 90 | 151 | 206 |
| SS (mg/l) | - | 14 | 6 | 12 | 10 |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | - | - | 100 | - | 131 |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | - | - | 90 | - | 110 |
| ความต่างศักย์ (โวลต์) | 6.4**, 2.0*** | 6.4 | 6.4 | 2.0 | 2.0 |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 0.08*0.03*,3.6**,3.8*** | 0.08 | 4.03 | 0.03 | 4.35 |
| ค่า ORP | 48* 54*,33**, -19*** | -30 | -117 | -19 | -152 |
| ค่าความนำไฟฟ้า (ms/cm) | 0.112* 0.119* | 0.112 | 7.23 | 0.109 | 80.5 |

หมายเหตุ * ที่ความนำไฟฟ้า 0.11 ms/cm

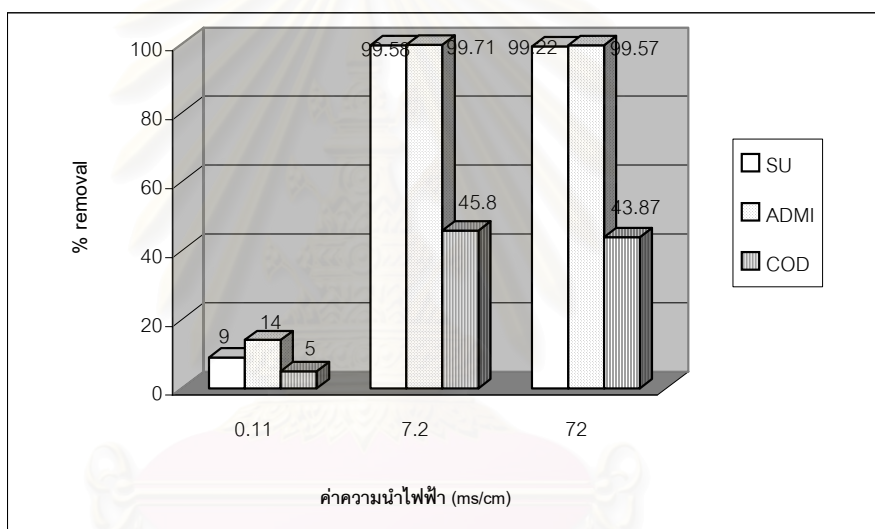
** ที่ความนำไฟฟ้า 7.2 ms/cm

*** ที่ความนำไฟฟ้า 72 ms/cm



ภาพที่ 4.6 ผลการกำจัดสีที่ค่าความนำไฟฟ้าต่าง ๆ

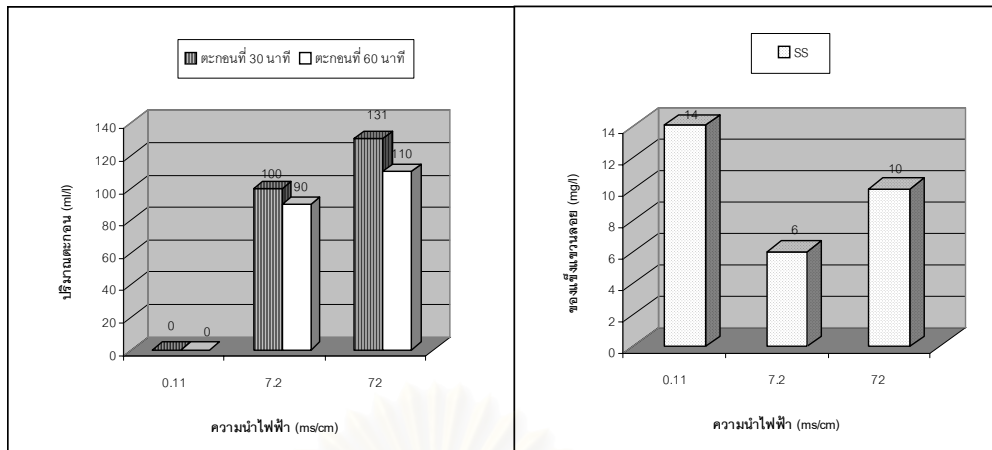
- 1). น้ำเสียสังเคราะห์ 2) ความนำไฟฟ้า 0.11 ms/cm (30 นาที) 3) ความนำไฟฟ้า 7.2ms/cm (30 นาที)
- 4). น้ำเสียสังเคราะห์ 5) ความนำไฟฟ้าที่ 0.11ms/cm(30 นาที) 6) ความนำไฟฟ้า 72 ms/cm(30นาที)



รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

4.1.6.2 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน

ในการทดลองนี้ จะเห็นว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ได้ปรับค่าความนำไฟฟ้ามีค่าของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 14มก./ล.มากกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปรับค่าความนำไฟฟ้า เพราะระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยลงเท่ากับ 30 นาที แต่ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีการปรับค่าความนำไฟฟ้าจะสูงเท่ากับที่เวลา 1.5 ชั่วโมง จึงทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์มากขึ้น ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้นไปเท่ากับ 131 มก./ล หลังจากตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จึงมีผลทำให้ให้ตะกอนแขวนลอยน้อยกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ไม่ได้ปรับค่าความนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอนหลังการทดลองที่ความนำไฟฟ้าต่าง ๆ

4.1.6.3 สรุปค่าความนำไฟฟ้าที่เหมาะสม

สรุปว่าการปรับค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 7.2 ms/cm จะดีที่สุดเพราะใช้ NaCl ในการปรับค่าความนำไฟฟ้าน้อยกว่าเพียง 5.72 กรัม/ลิตร ในขณะที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้สูงเท่ากันคือมากกว่า 99% ขึ้นไป และมีค่าของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นน้อยกว่าและเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดกับน้ำเสียที่ไม่ปรับค่าความนำไฟฟ้า (0.11ms/cm) พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่ถึง 85.85% และสามารถกำจัดซีโอไซด์ได้เพิ่มขึ้นถึง 40.8% และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเหลือเพียง 30 นาที เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับน้ำเสียที่ไม่ปรับค่าความนำไฟฟ้าที่ระยะเวลา 1.5 ชม.แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเท่ากัน พบว่าทำให้ลดค่าไฟฟ้าในการบำบัดได้ถึง 27.3 บาท / m^3 ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 พลังงานและค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

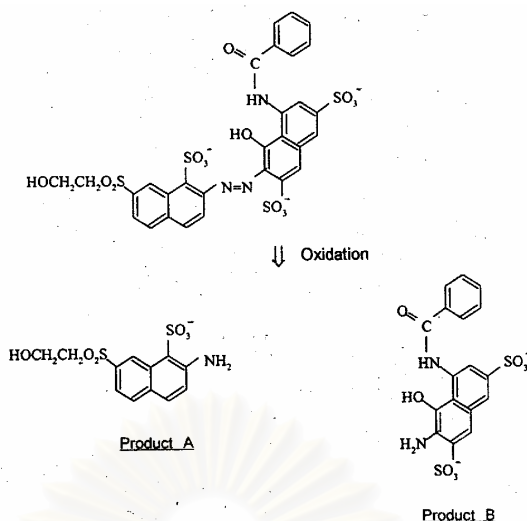
| ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยา ชั่วโมง | ค่าความต่างศักย์ โวลต์ | กระแสไฟฟ้า แอมแปร์ | พลังงานในการบำบัด kWh / m^3 | ค่าไฟฟ้า บาท / m^3 |
|----------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1.5 (ไม่ปรับค่าความนำไฟฟ้า) | 30 | 0.38 | 14.25 | 36.63 |
| 0.5 (ไม่ปรับค่าความนำไฟฟ้า) | 6.4 | 0.08 | 0.213 | 0.55 |
| 0.5 (7.2 ms/cm) | 6.4 | 4.03 | 10.75 | 27.63 |
| 0.5 (72ms/cm) | 2.0 | 4.35 | 3.63 | 9.33 |

4.1.7 สรุปสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียสีสังเคราะห์โดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

สรุปได้ว่าควรใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 11×6.5 ตร.ซ.ม. และสภาวะที่เหมาะสมจะแบ่งเป็น 2 สภาวะ คือ 1) สภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความนำไฟฟ้า จะใช้ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 1.5 ชม. 2) สภาวะที่มีการปรับค่าความนำไฟฟ้า จะใช้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 6.4 โวลต์ แทน 30 โวลต์เนื่องจากปัจจัยดังนี้ 1) คุณลักษณะของน้ำเนื่องจากการปรับค่าความนำไฟฟ้าทำให้สภาพน้ำเปลี่ยนไป 2) Reactor ที่ใช้ทดลอง และ 3) ข้อจำกัดของเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ที่ในสภาวะนี้จะจ่ายค่าความต่างศักย์สูงสุดได้แค่ 6.4 โวลต์ การปรับค่าการนำไฟฟ้าให้เท่ากับ 7.2 ms/cm . จะใช้เกลือ (NaCl) เท่ากับ 5.72 กรัม/ลิตร และระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 30 นาที และทั้ง 2 สภาวะพีเอชค่อนข้างเป็นกรด (เท่ากับประมาณ 6)

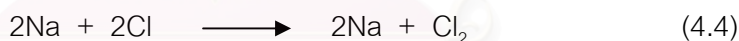
4.1.8 กลไกการกำจัดสีด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ถึงแม้ว่าการเกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันของเหล็กจะสามารถกำจัดสีได้โดยการตกตะกอนของเหล็กไฮดรอกไซด์ แต่จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีโอดีไม่ได้ลดลงมากเท่ากับประสิทธิภาพการกำจัดสีแสดงว่าสีไม่ได้ถูกกำจัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันเพียงอย่างเดียวแต่จากการศึกษาพบว่า การลดลงของสีน้ำจะเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยมีเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสีโดยการสลายพันธะของ nitrogen bond ให้แตกออกเป็นส่วน ๆ ซึ่งโครงสร้างสีจะถูกทำลายได้ไม่หมด โดย nitrogen bond เป็นกลุ่มโครโมฟอร์ที่ก่อให้เกิดสี ดังรูปที่ 2.6 เมื่อมีการแตกตัวจึงทำให้เกิดการลดลงของสี (Carriel และคณะ 1995) และ (Cook 1996) ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer (Loungdilok และ Panswad 2000) จากภาคผนวก ค พบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของน้ำเสียสีสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 533 นาโนเมตร แต่หลังจากผ่านการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าด้วยขั้วเหล็กแล้วจะเห็นว่า ค่า (λ_{max}) จะไม่แสดงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร และพบว่าค่าแอมพลิจูดแบนด์มีค่าลดลงด้วย นอกจากนี้ยังยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย HPLC ดังภาคผนวก ข พบว่าค่าเวลาสูงสุดของน้ำเสียสีสังเคราะห์ก่อนและหลังการทดลองมีค่าไม่เท่ากันคือเท่ากับ 1.96 และ 2.23 ตามลำดับ และ peak สูงสุดของกราฟก็มีลักษณะแตกต่างกัน แสดงว่าโครงสร้างสีมีการเปลี่ยนไป



รูปที่ 4.26 การสลายพันธะของสียแอกทีฟสีแดง C.I. Reactive 180 (บุษรา ประชุมญาติ, 2545)

สภาวะที่มีการปรับค่าความนำไฟฟ้าโดยการเติม NaCl เพื่อเพิ่มค่าความนำไฟฟ้า พบว่าจะเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยในการกำจัดสีและลดระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจาก 90 นาที เป็น 30 นาที เพราะ NaCl จะสามารถแตกตัวกลายเป็นไฮโปคลอไรต์ได้เมื่อเจอกับน้ำ ดังสมการ ซึ่งไฮโปคลอไรต์จะเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อีกตัวหนึ่งที่มีส่วนช่วยให้เกิดการทำให้ปฏิกิริยาอย่างแรงกับโมเลกุลของสีทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออก(Zhan และคณะ, 2001) เช่นเดียวกับการใช้สารเพนตอนรีเอเจนท์



ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสีที่เกิดจากการเติม NaCl นี้ สามารถยืนยันได้โดยการวิเคราะห์โครงสร้างของสีด้วยเครื่อง HPLC ในภาคผนวก ข พบว่ากราฟที่ได้ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนทดลองและหลังการทดลองมีลักษณะแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงและในภาคผนวก ค ซึ่งเป็นการวัดสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer พบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 533 นาโนเมตร ซึ่งเท่ากับค่าความยาวคลื่นสูงสุดของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ยังไม่ปรับค่าความนำไฟฟ้า (0.11 ms/cm) ที่ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา 30 นาที แต่เมื่อปรับค่าความนำไฟฟ้าให้สูงขึ้นด้วย NaCl พบว่าค่า (λ_{max}) จะไม่แสดงค่าความยาวคลื่นสูงสุดในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร และค่าแอมพลิจูดมีค่าลดลงด้วยจึงสรุปได้ว่าโครงสร้างสีเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นด้วย

4.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยการตกตะกอนทางเคมี

4.2.1 การหาปริมาณ PACL ที่เหมาะสมโดยการตกตะกอนทางเคมีก่อนผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

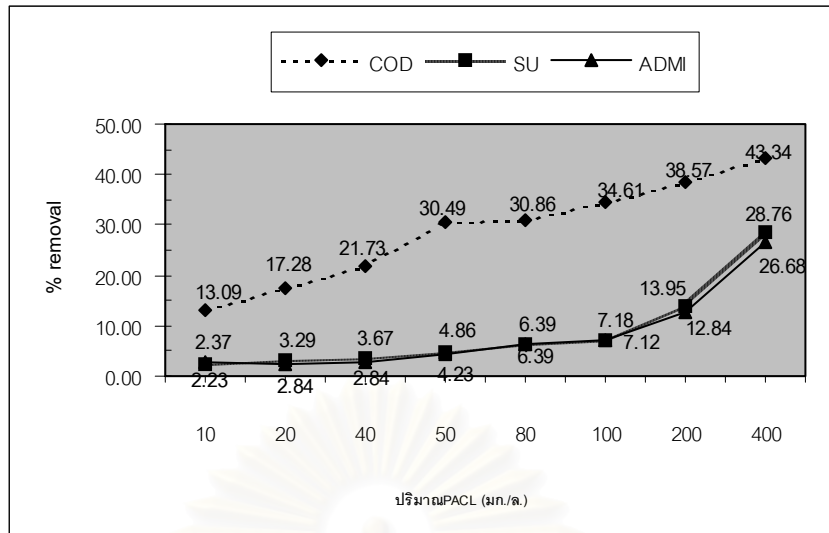
ในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนค่าปริมาณ PACL เป็น 8 ค่าคือ 10 20 40 50 80 100 200 และ 400 มก./ล. ซึ่งผลการทดลองการตกตะกอนทางเคมีกับน้ำเสียสังเคราะห์จะแสดงในตารางที่ 4.8

4.2.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

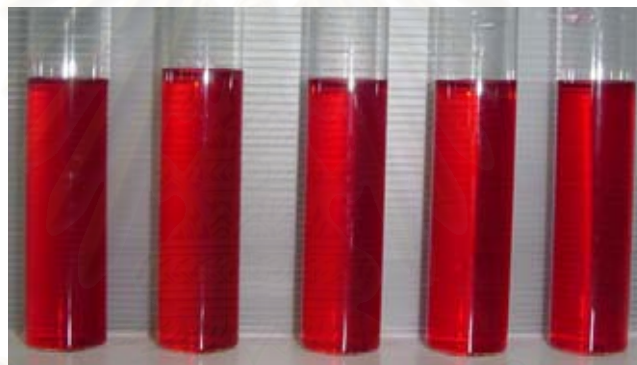
ปริมาณ PACL มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดี เมื่อเพิ่มปริมาณ PACL มากขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีมีค่าเพิ่มขึ้น แต่พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีโดยวิธีนี้จะมีค่าต่ำ โดยเมื่อใช้ปริมาณ PACL สูงถึง 400 มก./ล. ก็ลดสีลงได้เพียง 28.76%, 26.68 % ในหน่วย SU และ ADMI ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเท่ากับ 43.34 % เพราะการตกตะกอนทางเคมีจะอาศัยการทำลายประจุและรวมตัวเป็นฟลอคของอนุภาคสี ซึ่งฟลอคของสีไม่จับตัวกันหนาแน่นเพียงพอทำให้ไม่สามารถตกตะกอนลงมาได้ ดังรูปที่ 4.27

ตารางที่ 4.13 การตกตะกอนทางเคมีของน้ำเสียสีสังเคราะห์

| พารามิเตอร์ | น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการทดลอง | | | | | | | |
|--------------|----------------------------|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | ปริมาณ PACL (มก./ล.) | | | | | | | |
| | | 10 | 20 | 40 | 50 | 80 | 100 | 200 | 400 |
| พีเอช | 5.97-5.99 | 4.93 | 4.83 | 5.21 | 4.64 | 5.14 | 4.52 | 5.02 | 4.85 |
| อุณหภูมิ (C) | 27.3 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| สี (SU) | 435-438 | 428 | 423.7 | 422 | 417 | 407 | 404 | 374 | 310 |
| สี (ADMI) | 16,681-16,796 | 16,319 | 16,422 | 16,319 | 16,085 | 15,615 | 15,483 | 14,524 | 12,230 |
| % กำจัดสี | – | 2.37 | 3.29 | 3.67 | 4.86 | 6.39 | 7.12 | 14.05 | 28.76 |
| COD | 160-162 | 141 | 134 | 127 | 113 | 111 | 105 | 97.92 | 90.88 |
| %กำจัดซีไอดี | – | 13.09 | 17.28 | 21.73 | 30.49 | 30.86 | 34.61 | 38.95 | 43.34 |
| SS (mg/l) | – | 0.5 | 2 | 2 | 4 | 4 | 8 | 40 | 44 |



รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพการกำจัดซีและซีไอดีด้วย PACL



1 2 3 4 5

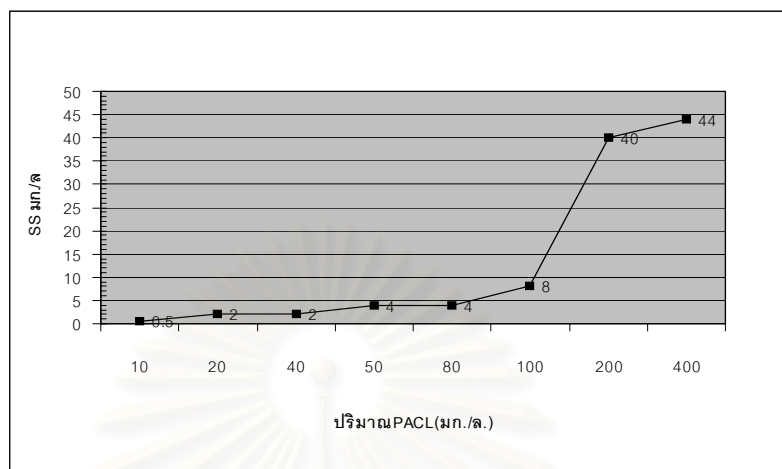
ภาพที่ 4.7 ผลการกำจัดสีโดยการตกตะกอนทางเคมีด้วย PACL ด้วยความเข้มข้นต่าง ๆ

1. น้ำเสียสังเคราะห์ 2.80 มก./ล. 3. 100 มก./ล. 4. 200 มก./ล. 5. 400 มก./ล.

4.2.1.2 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน

ในการทดลองนี้ น้ำเสียสังเคราะห์ก่อนการทดลองไม่มีสารแขวนลอย เนื่องจากสีถูกละลายไปหมด ดังนั้นจากตารางผลการทดลองที่ 4.13 พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการตกตะกอนด้วย PACL หลังจากตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 60 นาที แล้วนำไปวัดค่า SS จะพบว่ามีของแข็งแขวนลอยเกิดขึ้นตามปริมาณ PACL ที่ใส่ลงไป ดังรูปที่ 4.28 สารแขวนลอยมีปริมาณเกิดขึ้นตั้งแต่ 0.5 มก./ล. ถึง 44 มก./ล. เนื่องจากการเกิดฟลอคของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ดังหัวข้อที่ 2.4.1 แต่ฟลอคที่เกิดขึ้นจะตกตะกอนลงได้ไม่ดีจึงทำให้มีสารแขวนลอยเหลืออยู่ในน้ำ ดังนั้น

พบว่าเมื่อตะกอนเกิดขึ้นน้อยมากเนื่องจากแขวนลอยอยู่ในน้ำเป็นส่วนมากจึงทำให้ไม่สามารถอ่านค่าออกมาได้ดังภาพที่ 4.8



รูปที่ 4.28 สารแขวนลอยหลังการทดลอง



ภาพที่ 4.8 ปริมาณตะกอนหลังการทดลอง

4.2.2 การหาปริมาณ PACL ที่เหมาะสมหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยการตกตะกอนทางเคมี

ในการทดลองนี้จะนำน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็กขนาด 11×6.5 ซม. (71.5 ตร.ซ.ม.) ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่

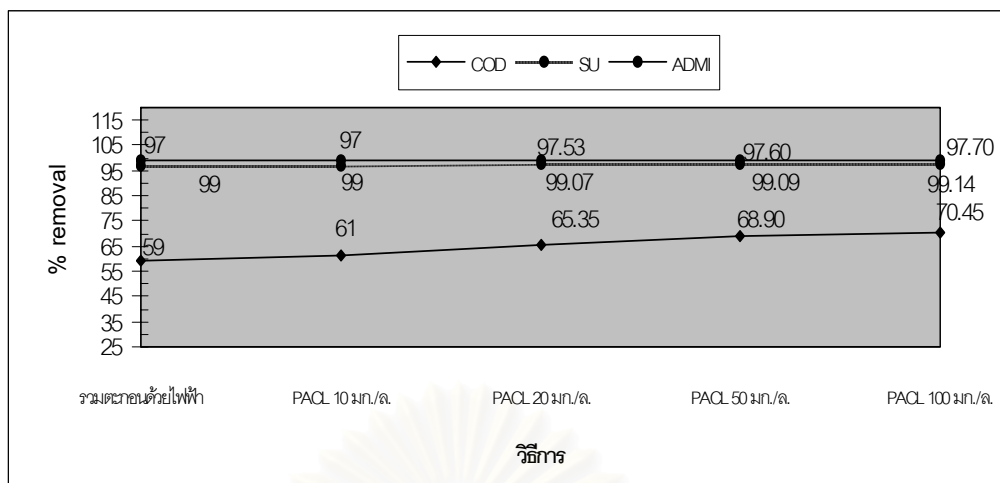
0.3 แอมแปร์ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่ 1.5 ชม.หลังจากนั้นจึงนำมาผ่านการตกตะกอนโดยการปรับค่าปริมาณ PACL เป็น 4 ค่า คือ 10, 20, 50, และ 100 มก./ล. ซึ่งผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.14

4.2.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

น้ำเสียสังเคราะห์หลังจากบำบัดด้วยวิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า พบว่ามีค่าซีไอดี ของแข็งแขวนลอย และสี เท่ากับ 70.4 มก./ล. 4 มก./ล. 9.7 SU และ 138.71 ADMI ตามลำดับ ซึ่งการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็มีประสิทธิภาพเพียงพอในการกำจัดสี เนื่องจากว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยวิธีนี้มีค่าสูงถึง 97 และ 99% ในหน่วย SU และ ADMI และหลังจากผ่านการตกตะกอนด้วย PACL จะพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีจะเพิ่มเพียง 0.5 – 0.7 และ 0.7 – 1.4 ในหน่วย SU และ ADMI และประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 11.15 % ซึ่งจากเดิมประสิทธิภาพหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนอย่างเดียวจะกำจัดซีไอดีได้มากอยู่แล้วถึง 59.3 % แต่หลังจากการตกตะกอนด้วย PACL 100 มก./ล. ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีจะสูงขึ้นเท่ากับ 70.45%

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองหาปริมาณ PACL ที่เหมาะสมหลังผ่านการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

| พารามิเตอร์ | น้ำเสียสังเคราะห์ ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการ รวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | น้ำเสียหลังการตกตะกอนทางเคมี | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|------------|
| | | | 10 มก./ล. | 20 มก./ล. | 50 มก./ล. | 100 มก./ล. |
| พีเอช | 5.86 | 9.05 | 8.55 | 8.41 | 8.39 | 8.31 |
| อุณหภูมิ (C°) | 29.5 | 38 | 31 | 31 | 31 | 31 |
| สี (SU) | 421 | 13.7 | 12.3 | 10.4 | 10.1 | 9.7 |
| สี (ADMI) | 16,116 | 188 | 170 | 150 | 146 | 139 |
| COD | 155 | 63.1 | 60.4 | 53.7 | 48.2 | 45.8 |
| SS (mg/l) | 12 | 12 | 10 | 6 | 4 | 4 |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | – | 8 | 25 | 25 | 30 | 30 |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | – | 5 | 22 | 20 | 25 | 25 |



รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี



1 2 3 4 5

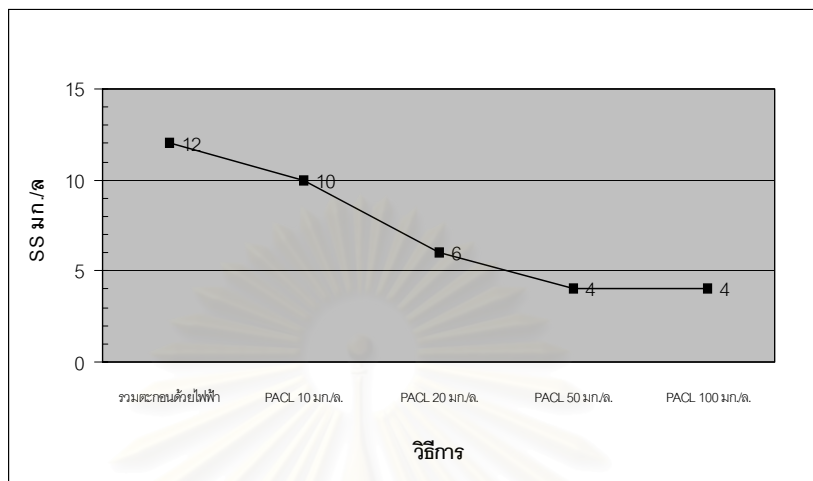
ภาพที่ 4.9 ผลการกำจัดสีก่อนและหลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า
ด้วยการตกตะกอนทางเคมี

1. น้ำเสียสังเคราะห์
2. ผ่านขั้วไฟฟ้า
3. PACL 20 มก./ล.
4. PACL 50 มก./ล.
5. PACL 100 มก./ล.

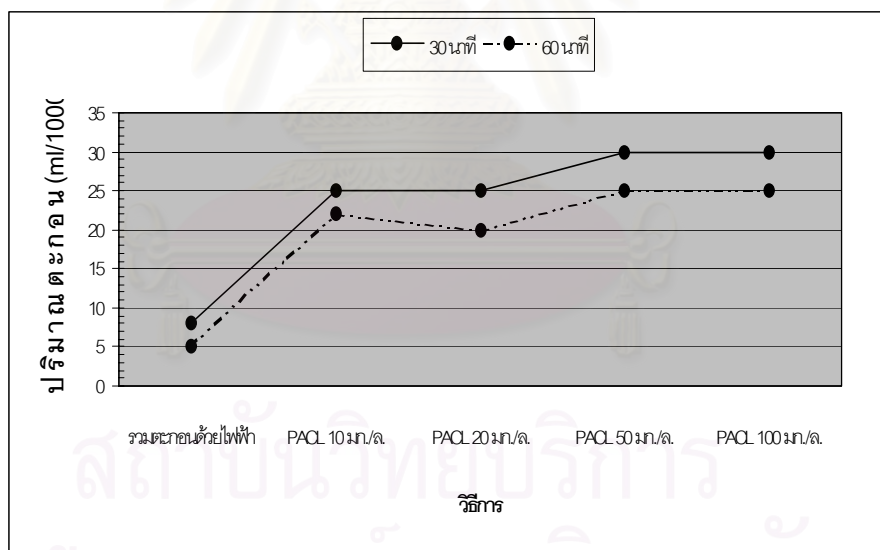
4.2.2.2 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน

การใช้ PACL เป็นตัวโคแอกกูแลนต์ จะช่วยทำให้ตกตะกอนสีที่เหลืออยู่ในน้ำได้อีกเล็กน้อย โดยดูได้จากกราฟรูปที่ 4.30 และ 4.31 จะเห็นว่าของแข็งแขวนลอยจะมีค่าลดลงจาก 12 เป็น 4 มก./ล. เมื่อผ่านการตกตะกอนด้วย PACL และทำให้ปริมาณตะกอนมีค่า

สูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นจึงไม่จำเป็นต้องใช้ PACL ช่วยในการตกตะกอน



รูปที่ 4.30 สารแขวนลอยหลังการทดลอง



รูปที่ 4.31 ปริมาณตะกอนหลังการทดลอง

ตารางที่ 4.15 ค่าใช้จ่ายโดยรวมเปรียบเทียบกับกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

1. กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

| สถานะน้ำเสียสังเคราะห์ | ประสิทธิภาพการกำจัด % | ค่าไฟฟ้า | ค่าเหล็ก | ค่าเกลือ | ค่าใช้จ่ายโดยรวม |
|---|--------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | บาท / kWh / ม ³ | บาท / ม ³ | บาท / ม ³ | บาท / ม ³ |
| ความนำไฟฟ้า 7.2 ms/cm (เวลาเกิดปฏิกิริยา 30 นาที) | 99.58 | 27.63 | 8 * | 11.4** | 47.03 |
| ความนำไฟฟ้า 0.11 ms/cm (เวลาเกิดปฏิกิริยา 90 นาที) | 97 | 36.63 | 8* | 80** | 44.63 |

2. กระบวนการตกตะกอนทางเคมี

| ปริมาณ PACL (มก./ล) | 10 | 20 | 40 | 50 | 80 | 100 | 200 | 400 |
|------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| ประสิทธิภาพการกำจัด (%) | 2.37 | 3.29 | 3.67 | 4.86 | 6.39 | 7.12 | 14.5 | 28.46 |
| ราคา (บาท / ม ³) | 0.6 | 1.2 | 2.4 | 3.0 | 4.8 | 6.0 | 12 | 24 |

หมายเหตุ * ราคาจากบริษัทสหวิริยาจำกัด (ปริมาณเหล็กเท่ากับ 500 กรัม/ม³)

** ราคาเกลือสินเธาว์ 2 บาท / กก. (ปริมาณ NaCl เท่ากับ 5.7 กก./ม³)

*** ค่าใช้จ่าย PACL กิโลกรัมละ 60 บาท

4.2.3 สรุปผลการตกตะกอนทางเคมี

การกำจัดโดยใช้ PACL พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดและซีโอดีต่ำแม้ว่าจะใช้ปริมาณ PACL ที่ความเข้มข้นสูงถึง 400 มก./ล. และถ้านำวิธีการตกตะกอนทางเคมีมาช่วยในการกำจัดซีโอดีและสารแขวนลอยของน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแล้วถึงแม้ว่าจะช่วยลดปริมาณสารแขวนลอยให้น้อยลงแต่ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเพิ่มขึ้นเพียง 1% และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีค่าสูงอยู่แล้วเท่ากับ 59.3% และจากตารางที่ 4.15 พบว่าค่าใช้จ่ายโดยรวมในการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าในการกำจัดซีโอดีมีที่พั้ง 2 สถานะจะเท่ากับ 47.03 และ 44.63 บ./ม³ ตามลำดับ ซึ่งแพงกว่าการใช้กระบวนการตกตะกอน

ทางเคมีโดยการใช้ PACL เท่ากับ 23.03 บ./ม³ แต่เห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงกว่ามากถึง 70.82% ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียสีสังเคราะห์โดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็กจึงไม่จำเป็นต้องใช้การตกตะกอนทางเคมีมาช่วยหลังจากผ่านกระบวนการนี้ เพราะจะเป็นการสิ้นเปลืองค่าสารเคมีเพิ่มขึ้น

4.3 การทดลองที่ 3 ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดสีของน้ำเสียจริงจากโรงงานโรงงานฟอกย้อมโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี

4.3.1 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำเสียรวมจากโรงงานฟอกย้อม

ในการทดลองนี้ทำการกำจัดสีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า โดยใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 11 × 6.5 ตร.ซ.ม. ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ 6.4 โวลต์ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาพบว่าเหมาะสมที่ 5 นาที โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวกับการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับการตกตะกอนทางเคมี โดยผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.16

4.3.1.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.32 พบว่าทำการทดลองกำจัดสีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีมีค่าใกล้เคียงกันมากคือเท่ากับ 85 %, 83% ในหน่วย SU และ ADMI และ 32% ตามลำดับ ส่วนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าร่วมกับการตกตะกอนทางเคมีพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไม่สูงขึ้นนัก โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีไอดีสูงคือ 87 %, 85 % ในหน่วย SU และ ADMI และ 39% ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าการกำจัดสีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำการบำบัดน้ำเสียรวมจากโรงงานฟอกย้อมได้

4.3.1.2 สีเอสยูและเอดีเอ็มไอ

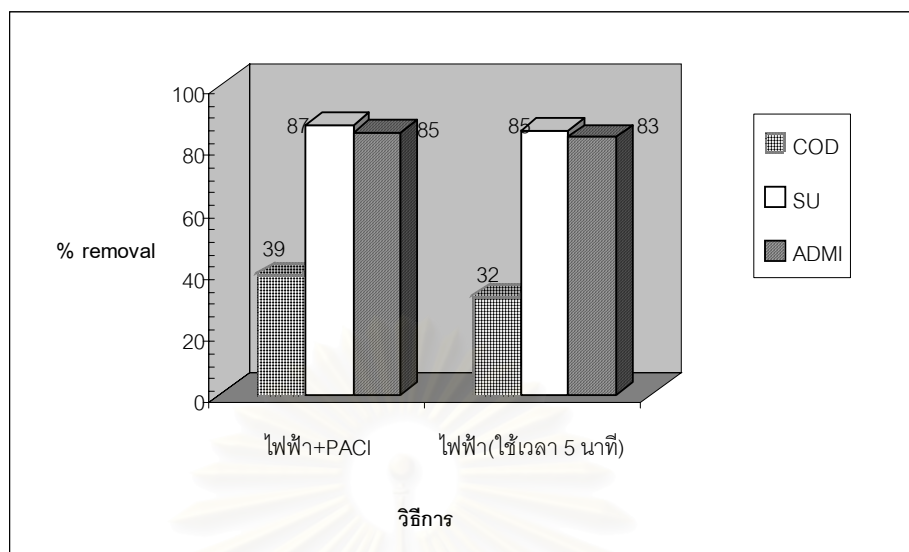
งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าความเข้มสี 2 หน่วยคือหน่วย SU และ ADMI จากตารางที่ 4.16 ค่าความเข้มสีก่อนการทดลองมีค่าเฉลี่ย 100.4 SU และ 949.6 ADMI แต่หลังจากผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวพบว่าค่าความเข้มสีมีค่าเฉลี่ย

เท่ากับ 14.93 SU และ 160.54 ADMI ส่วนการกำจัดสีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมีจะมีค่าความเข้มสีลดลงลดลงใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าเฉลี่ย 13.12 SU และ 146.69

ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการวัดสีด้วยเครื่องUV-3101pcดังแสดงในภาคผนวก ค. พบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนทดลองและหลังการทดลองจะไม่แสดงจุดสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร แต่พบว่าค่าแอบซอร์เบ้นซ์ และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าน้ำสีแดงมีการเปลี่ยนสีเป็นน้ำใสเมื่อ ดังภาพที่ 4.10

ตารางที่ 4.16 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียรวม

| พารามิเตอร์ | น้ำเสีย ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการทดลอง | |
|-------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------------|
| | | ไฟฟ้า + PACL | ไฟฟ้า(ใช้เวลา 5 นาที) |
| พีเอช | 5.95 | 9.39 | 9.45 |
| อุณหภูมิ (C°) | 28.5 | 30.5 | 36.75 |
| สี (SU) | 100 | 13.1 | 14.94 |
| สี (ADMI) | 950 | 147 | 161 |
| COD | 367 | 225 | 250 |
| SS (mg/l) | 104 | 45 | 67 |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | - | 162.5 | 24 |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | - | 110 | 20 |
| ความต่างศักย์ (โวลต์) | 6.4 | 6.4 | 6.4 |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 2.63 | 2.71 | 2.71 |
| ค่า ORP | -25 | -40.5 | -61 |
| ค่าความนำไฟฟ้า (ms/cm) | 7.2 | 6.92 | 7.04 |



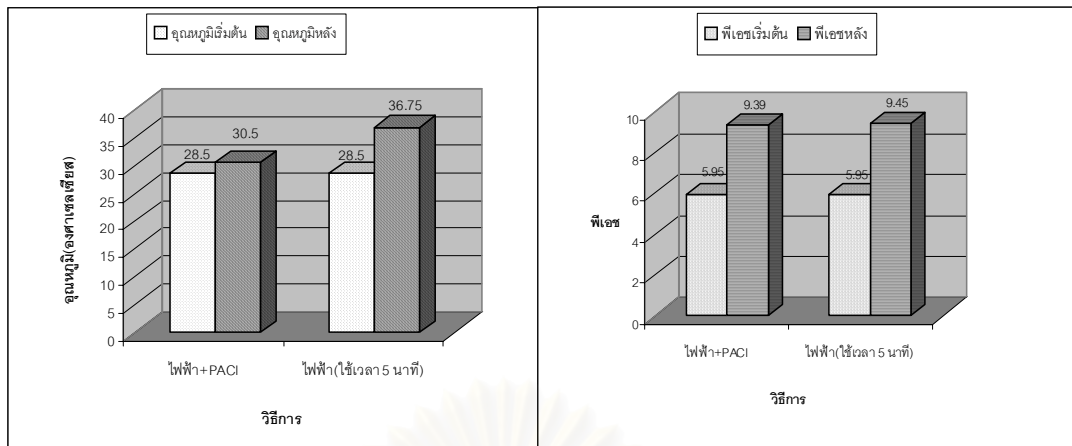
รูปที่ 4.32 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี



1 2 3

ภาพที่ 4.10 ผลการกำจัดสีของน้ำเสียรวม

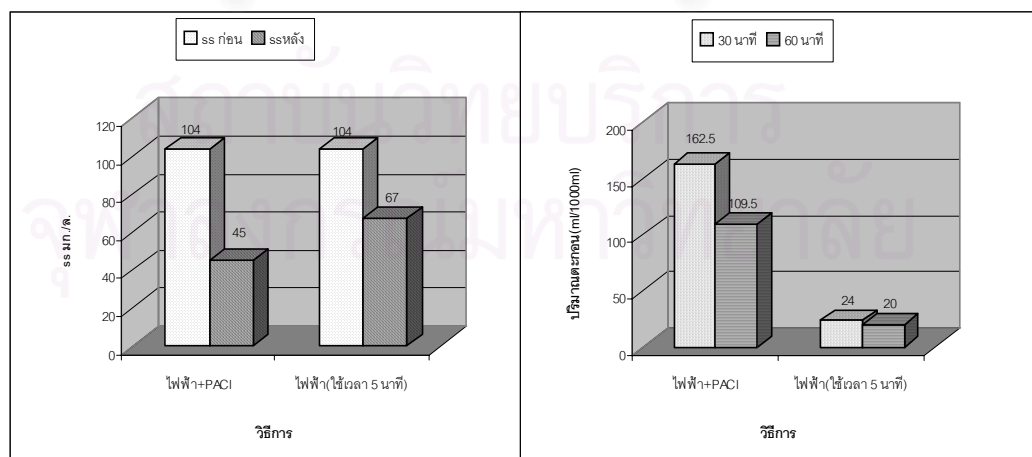
1. น้ำเสียรวม 2. ผ่านขั้วไฟฟ้า + PACl 3. ผ่านขั้วไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4.33 คุณหมูมิและพีเอชก่อนและหลังทดลอง

4.3.1.3 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน

ในการทดลองนี้ น้ำเสียรวมก่อนการทดลองมีสารแขวนลอยเนื่องจากเป็นน้ำเสียจริง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 104 มก./ล. ดังนั้นจากรายผลการทดลองที่ 4.16 พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดแล้ว มีของแข็งแขวนลอยลดลง เนื่องจากการรวมตัวเป็นฟล็อกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการสลายตัวของขี้เถ้าจึงทำให้สารแขวนลอยลดน้อยลง โดยจะลดลงประมาณ 40 – 60 มก./ล. และพบว่าปริมาณตะกอนที่เกิดจากการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว นั้น มีตะกอนเกิดขึ้นน้อยกว่ากระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมีประมาณ 20 – 24 มก./ล. ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.34 เอสเอสและปริมาณตะกอนหลังทดลอง

ตารางที่ 4.17 ค่าไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียรวม

| ระบบบำบัด | พลังงานในการบำบัด kWh / ม ³ | ค่าไฟฟ้า | ค่าไฟฟ้าเมื่อน้ำเสียมีปริมาณ 2500 ม ³ /วัน |
|-----------------------------|---|----------------------|---|
| | | บาท / ม ³ | บาท / วัน |
| การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 1.2 | 2.7* | 6750 |
| ระบบ AS ของโรงงานฟอกย้อม | 1 | 2.25* | 5750 |

หมายเหตุ * ค่าไฟฟ้าคิดจากค่าไฟฟ้าจริงของโรงงานอุตสาหกรรมรามาทีกไทล์ (1988) จำกัด เท่ากับ 2.25 บาท / kWh / ม³

4.3.1.4 สรุปสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียรวมจากโรงงานฟอกย้อม

การกำจัดน้ำเสียรวม พบว่าการใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง โดยสถานะที่เหมาะสมคือใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ขนาดพื้นที่หน้าตัด 11 × 6.5 ตร.ซ.ม ให้ความต่างศักย์ที่ 6.4 และเมื่อเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าที่ใช้จริงจากโรงงานฟอกย้อมพบว่า น้ำเสียรวมมีการผลิตในอัตราวันละ 2500 ม³ โดยรวมจากน้ำเสียสีเข้มจากหม้อย้อม น้ำเสียสีอ่อนและรางน้ำฝน ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดเท่ากับ 5,750 บ./ วัน และจากตารางที่ 4.17 จะเห็นว่าค่าไฟฟ้าที่ใช้การบำบัดด้วยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีค่ามากกว่าถึง 1,000 บ./วัน เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการบำบัดมีค่ามากกว่า แต่ถึงแม้ว่าค่าไฟฟ้าจะสูงกว่าแต่สีของน้ำเสียรวมหลังการบำบัดเมื่อมองด้วยตาเปล่าจะเห็นว่ามีความใสมาก และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพียงแค่ 5 นาที จะทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงถึง 87 % เนื่องจากน้ำเสียรวมมีความเข้มของสีน้อย ประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ดีเท่ากับ 39 % และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยเท่ากับ 35.57 % แต่มีข้อเสียคือ อุณหภูมิจะสูงขึ้นประมาณ 37 องศาเซลเซียส และพีเอชหลังการบำบัดจะมีค่าสูงมากกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งคือมากกว่า 9 เพราะค่าพีเอชของน้ำเสียรวมก่อนทำการบำบัดจะมีค่าสูงอยู่แล้วคือมีค่าเท่ากับ 10 แต่ข้อดีก็คือในการบำบัดน้ำเสียรวมจากโรงงานฟอกย้อมด้วยกระบวนการนี้จะมีค่าไฟฟ้าถูกมากเพียงแค่ 2.7 บาท / ม³

4.3.2 การหาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำเสียจากหม้อต้ม

ในการทดลองนี้จะทำการกำจัดน้ำเสียสีรีแอกทีฟสีแดงจากหม้อต้มด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงกระบวนการเดียว โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้ามีขนาดพื้นที่หน้าตัด 11×6.5 ตร.ซ.ม ใช้ค่าความต่างศักย์ 2.0 โวลต์ โดยทำการปรับเวลาในการทำปฏิกิริยา เป็น 30, 60 และ 90 นาที เนื่องจากน้ำเสียจากหม้อต้มมีค่าความเข้มข้นสูงมาก คือเท่ากับ 500 มก./ล. โดยผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 4.18

4.3.2.1 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.35 พบว่าการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่เวลา 30 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้สูงถึง 95.85% ถึง ในหน่วย SU และ 97.43% ถึง 99.41% ในหน่วย ADMI และเมื่อเพิ่มเวลาในการบำบัดเป็น 60 และ 90 นาที ประสิทธิภาพก็จะสูงขึ้นแต่ก็ไม่ต่างกันมากนักคือมีค่าเท่ากับ 98.61%, 98.84%, ในหน่วย SU และ 99.34%, 99.41% ในหน่วย ADMI ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าการกำจัดสีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็สามารถทำการบำบัดน้ำเสียของหม้อต้มจากโรงงานฟอกย้อมได้ และเมื่อทำการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี พบว่าจะไม่สามารถทำการวิเคราะห์ค่าออกมาได้เนื่องจากในน้ำเสียหม้อต้มมีสารปนเปื้อนต่างๆมากมาย เช่น สารเคมีช่วยย้อม ทั้งยังมีค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าสารชนิดใดมีผลต่อการวิเคราะห์ค่าซีไอดี

4.3.2.2 สีเอสยูและเอดีเอ็มไอ

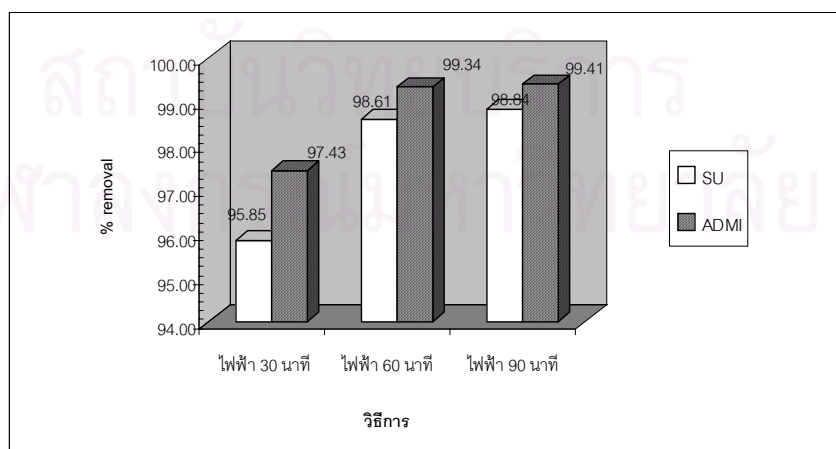
จากตารางที่ 4.18 ค่าความเข้มข้นก่อนการทดลองมีค่าเท่ากับ 2606.04 SU และ 100,582.8 ADMI ซึ่งถือว่ามีความเข้มข้นสูงมาก แต่หลังจากการกำจัดสีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าที่ระยะเกิดปฏิกิริยาเพียงแค่ 30 นาที พบว่าค่าความเข้มข้นมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีค่าเท่ากับ 108 SU และ 2,582.8 ADMI แต่ถ้าทำการบำบัดโดยใช้เวลาเป็น 60 และ 90 นาที พบว่าค่าความเข้มข้นจะลดลงอีกโดยใกล้เคียงกันมากคือเท่ากับ 36.35, 30.29 SU และ 667.88, 595.21 ADMIตามลำดับ

ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการวัดสีด้วยเครื่องUV-3101pcดังแสดงในภาคผนวก

ค. จะพบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) ของน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนทดลองเท่ากับ 503.7 นาโนเมตร แต่น้ำเสียสังเคราะห์หลังการทดลองที่เวลาบำบัด 30 – 90 นาที ไม่แสดงจุดสูงสุดในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร และเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะพบว่าน้ำสีแดงมีการเปลี่ยนสีเป็นน้ำใสเมื่อ ดังภาพที่ 4.11 ผลการทดลองดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าการกำจัดสีน้ำเสียจากหม้อย้อมโดยวิธีนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสีด้วย

ตารางที่ 4.18 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียจากหม้อย้อม

| พารามิเตอร์ | น้ำเสีย ก่อนทดลอง | น้ำเสียหลังการทดลองโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | | |
|-------------------------------|----------------------|--|---------|---------|
| | | 30 นาที | 60 นาที | 90 นาที |
| พีเอช | 10.66 | 10.89 | 11.38 | 11.48 |
| อุณหภูมิ (C°) | 29 | 31 | 34.5 | 36.5 |
| สี (SU) | 2,606 | 108 | 36.35 | 30.29 |
| สี (ADMI) | 100,584 | 2,583 | 668 | 595 |
| SS (mg/l) | 484 | 480 | 458 | 392 |
| ปริมาณตะกอนที่ 30 นาที (ml/l) | - | 965 | 990 | 125 |
| ปริมาณตะกอนที่ 60 นาที (ml/l) | - | 928 | 959 | 110 |
| ความต่างศักย์ (โวลต์) | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | 3.9 | 4.08 | 5.67 | 5.68 |
| ค่า ORP | -81 | -179 | -188 | -326 |
| ค่าความนำไฟฟ้า (ms/cm) | 71.9 | 73 | 73.2 | 77.6 |

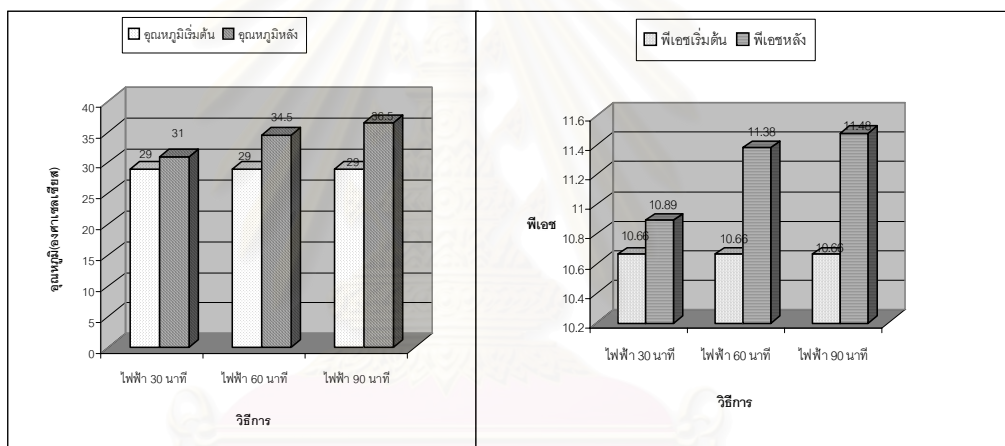


รูปที่ 4.35 ประสิทธิภาพการกำจัดสีและซีไอดี



ภาพที่ 4.11 ผลการกำจัดสีน้ำเสียจากหม้อย้อม

1.น้ำเสียสีหม้อย้อม 2. ผ่านขั้วไฟฟ้า 90 นาที 3. ผ่านขั้วไฟฟ้า 60 นาที 4.ผ่านขั้วไฟฟ้า 30 นาที

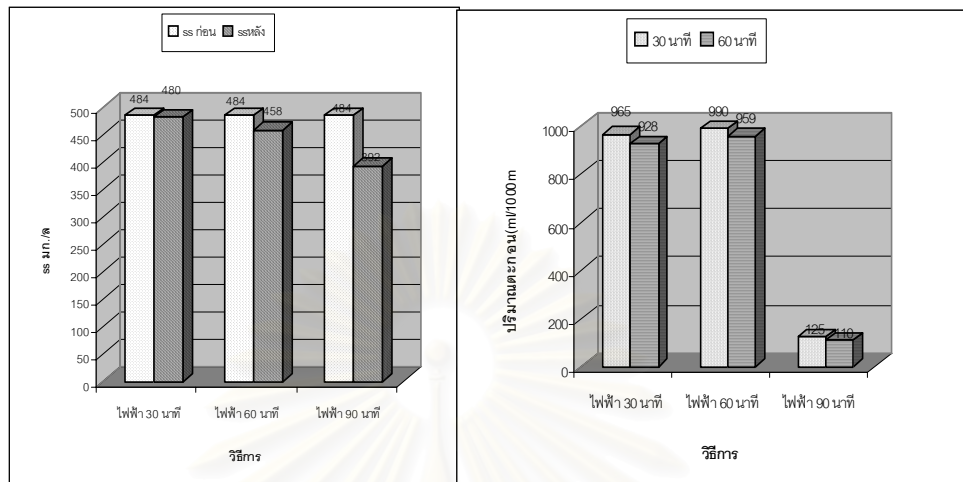


รูปที่ 4.36 คุณหมูมิและพีเอชก่อนและหลังทดลอง

4.3.2.3 ของแข็งแขวนลอยและปริมาณตะกอน

ในการทดลองนี้ น้ำเสียจากหม้อย้อมก่อนการทดลองมีสารแขวนลอยเนื่องจากเป็นน้ำเสียจริง โดยมีค่าเท่ากับ 484 มก./ล. และหลังจากผ่านการบำบัดแล้ว พบว่าของแข็งแขวนลอยมีค่าลดต่ำลงไม่มากนัก เนื่องจากน้ำเสียจากหม้อย้อมก่อนบำบัดมีสารแขวนลอยอยู่ในปริมาณที่สูง ดังนั้นการเกิดปริมาณตะกอนหลังการบำบัดที่เวลา 30 และ 60 นาทีมีค่าสูงมากคือมีค่าประมาณ 965 ถึง 990 มก./ล. ซึ่งในการบำบัดถือว่าไม่เหมาะสมเนื่องจากตะกอนมีปริมาณมากเกินไป แต่ถ้าทำการบำบัดที่เวลา 90 นาที พบว่าปริมาณตะกอนจะลดลง

มากคือมีค่าประมาณ 120 มก./ล. ดังรูปที่ 4.37 อาจเนื่องมาจากตะกอนเกิดการตกตะกอนได้ดี เป็นฟล็อกที่ดีมีการอัดตัวกันแน่นจึงเหลือชั้นตะกอนน้อยลง



รูปที่ 4.37 เอสเอสและปริมาณตะกอนหลังทดลอง

4.3.2.4 ปริมาณขั้วไฟฟ้าที่ใช้ไป

จากการทดลองนี้ขั้วไฟฟ้าที่ใช้มีขนาด 11×6.5 ตร.ซ.ม. ซึ่งเป็นการขั้วน้ำหนักครั้งสุดท้ายหลังจากเสร็จการทดลอง จะพบว่าก่อนการทดลองขั้วเหล็กขนาดนี้มีน้ำหนักเท่ากับ 221 กรัม และน้ำหนักหลังการทดลองที่สามารถชั่งได้อย่างคร่าว ๆ จากเครื่องชั่งแบบปกติพบว่า มีน้ำหนักประมาณ 216 แสดงว่าในการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง ปริมาณเหล็กหายไปเพียง 4 กรัม เฉลี่ยใช้ครั้งประมาณ 0.4 กรัมต่อน้ำ 1.2 ลิตร ซึ่งพบว่าใกล้เคียงกับน้ำหนักของขั้วเหล็กที่ใช้ไปในการกำจัดสีของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความนำไฟฟ้าเท่ากับ 7.2 และ 72 ms/cm โดยมีค่าประมาณ 0.5 กรัม/น้ำ 1.2 ลิตร

ตารางที่ 4.19 ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากหม้อย้อม

| ระบบบำบัด | พลังงานในการบำบัด kWh / ม ³ | ค่าไฟฟ้า | ค่าไฟฟ้าเมื่อน้ำเสียมีปริมาณ 500 ม ³ / วัน |
|-----------------------------|---|----------------------|---|
| | | บาท / ม ³ | บาท / วัน |
| การรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 14.2 | 31.95 | 15975 |
| ระบบ AS ของโรงงานฟอกย้อม | 1 | 2.25 | 1125 |

4.3.2.5 สรุปสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียจากหม้อย้อม

การกำจัดน้ำเสียจากหม้อย้อม ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 500 มก./ล. จะใช้การบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า และใช้ขั้วไฟฟ้าที่เป็นขั้วเหล็ก ขนาด 11× 6.5 ตร.ซม. ให้ความต่างศักย์ที่ 2.0 โวลต์ เนื่องจากน้ำเสียมีสารปนเปื้อนสูงมากเช่นสารช่วยย้อมทำให้มีค่าโออาร์พีติดลบสูงมากและค่าความนำไฟฟ้ามีค่าสูงถึง 72 ms/cm จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดข้อจำกัดแก่เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) ซึ่งที่ความต่างศักย์ 2.0 โวลต์จะเป็นค่าความต่างศักย์สูงสุดที่เครื่องจะจ่ายให้ได้โดยไม่ทำให้ค่าความต่างศักย์มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเมื่อค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดความต้านทานลดลง ค่าความต่างศักย์ จึงลดลงด้วยตามสมการ ($V=IR$) ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเป็น 90 นาที เพราะน้ำเสียมีความเข้มข้นสูง แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดจะสูงถึง 98.84% ปริมาณตะกอนจะต่ำที่สุดและมีข้อเสียคืออุณหภูมิจะสูงขึ้น พีเอชหลังการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งเท่ากับ 11.48 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารแขวนลอยเท่ากับ 19% และเนื่องจากน้ำเสียจากหม้อย้อมมีสารปนเปื้อนอยู่สูงจึงทำให้มีผลต่อการหาค่าซีไอดี จึงไม่สามารถหาค่าได้ ค่าไฟฟ้าในการบำบัดมีค่าเท่ากับ 31.95 บาท / ม³ ซึ่งค่าไฟฟ้าสูงกว่าการบำบัดของน้ำเสียรวมถึง 29.25 บาท / ม³ โดยโรงงานฟอกย้อมจะมีการผลิตน้ำเสียรวมทั้งหมดก่อนผ่านการบำบัดเท่ากับ 2,500 ม³ / วัน ส่วนน้ำเสียจากหม้อย้อมจะมีปริมาตร 500 ม³ / วัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าไฟฟ้าพบว่า ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่าในการบำบัดสูงกว่ามากถึง 14,850 บ. / วัน เนื่องจากค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัดโดยการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าพลังงานของระบบบำบัดของโรงงานฟอกย้อม ดังนั้นน้ำเสียจากหม้อย้อมจึงควรทำการเจือจางผสมกับน้ำเสียรวมในโรงงานก่อนที่จะผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพื่อเป็นการประหยัดค่าไฟฟ้าในโรงงาน.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

- 1) ระบบรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ซีเอ็มรีแอกทีฟได้ดี โดยสามารถกำจัดได้สูงกว่าร้อยละ 96 ขึ้นไป สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์รีแอกทีฟสีแดงที่มีความเข้มข้นของสี 200 มก./ล. โดยไม่ปรับค่าความนำไฟฟ้า พบว่า ต้องใช้ขั้วเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ขนาด 11×6.5 ซม. ให้ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์ เป็นเวลา 1.5 ชม. ที่พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 5.9 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและสีเท่ากับ 62% และ 97 % ตามลำดับ
- 2) เมื่อปรับค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความนำไฟฟ้าให้เท่ากับน้ำเสียจริงก่อนผ่านการบำบัดเท่ากับ 7.2 ms/cm พบว่าสามารถลดค่าความต่างศักย์ที่ใช้ได้เป็น 6.4 โวลต์ ส่วนเวลาในการบำบัดจะลดเหลือเพียง 30 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและสี เท่ากับ 45% และ 99% ขึ้นไป ตามลำดับ
- 3) น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 7.2 ms/cm ที่ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา 1.5 ชม. พลังงานที่ใช้ในการบำบัดเท่ากับ 14.25 kWh / m³ คิดเป็นราคาค่าไฟฟ้าประมาณ 363.63 บาท / ลบ.ม. ในการบำบัดน้ำเสียที่ปรับค่าความนำไฟฟ้าเป็น 7.2 ms/cm ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาลดลงเหลือเพียง 30 นาที พลังงานที่ใช้เท่ากับ 10.75 kWh / m³ คิดเป็นราคาค่าไฟฟ้าต่ำลงเท่ากับ 27.63 บาท / ลบ.ม.
- 4) ปริมาณของขั้วเหล็กที่สลายตัวไปในการบำบัดโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าพบว่ามีค่าประมาณ 500 กรัม / ลบ.ม. คิดเป็นราคาค่าใช้จ่ายในการสูญเสียเหล็กในการทำปฏิกิริยาแต่ละครั้งของการเดินระบบกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเท่ากับ 8 บาท / ลบ.ม.
- 5) กระบวนการตกตะกอนทางเคมีที่ใช้ PACL ในการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ซีเอ็มรีแอกทีฟ ที่มีความเข้มข้นของสี 200 มก./ล. พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีและสีต่ำเท่ากับ 43.34% และ 28.76% ตามลำดับ เมื่อใช้ PACL ปริมาณสูงถึง 400 มก./ล.

6) การใช้ PACL เป็นตัวโคแอกกูแลนต์ในการช่วยกำจัดตะกอนสีและซีโอดีที่แขวนลอยอยู่ในน้ำหลังจากผ่านกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแล้วพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้นเพียง 1% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ามีค่าสูงอยู่แล้วเท่ากับ 60% ดังนั้นกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวก็มีประสิทธิภาพในการกำจัดสีได้ไม่ต้องใช้การตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย

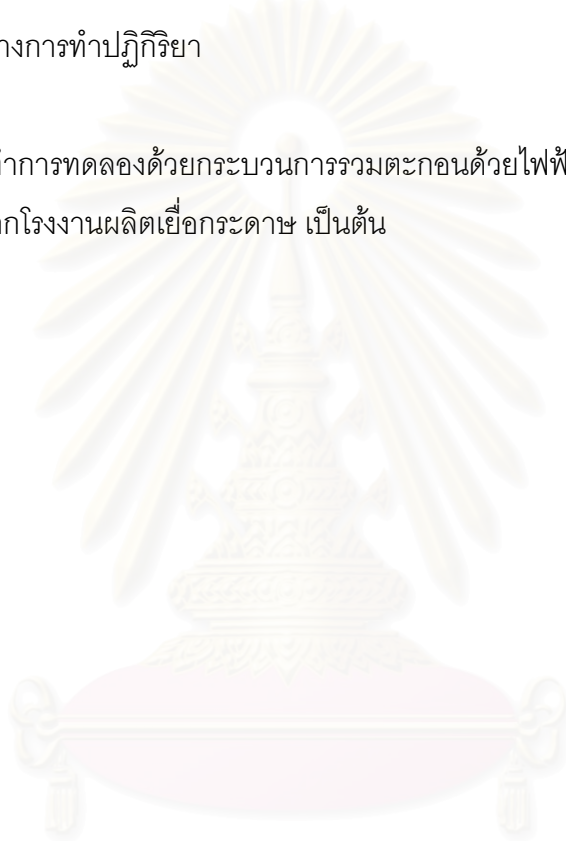
7) สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของน้ำเสียรวมจากโรงงานฟอกย้อมโดยใช้กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า คือใช้ความต่างศักย์ที่ 6.4 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ 2.63 แอมแปร์ เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียจากโรงงานมีค่าสูงถึง 7.2 ms/cm. เวลาในการทำปฏิกิริยาจึงใช้น้อยลงเท่ากับ 5 นาที ส่วนสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสีของน้ำเสียจากหม้อย้อมของโรงงาน คือใช้ความต่างศักย์ที่ 2.0 โวลต์ กระแสไฟฟ้าที่ 3.9 แอมแปร์ ส่วนเวลาในการทำปฏิกิริยาจะเท่ากับ 1.5 ชม. เนื่องจากสีของน้ำเสียจากหม้อย้อมมีความเข้มข้นสูงถึง 500 มก./ล.

8) พลังงานที่ใช้ในการบำบัดของน้ำเสียรวมจะเท่ากับ 1.2 kWh / ลบ.ม. คิดเป็นราคาค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.7 บาท / ลบ.ม. ส่วนพลังงานที่ใช้ในการบำบัดของน้ำเสียจากหม้อย้อมจะเท่ากับ 14.2 kWh / ลบ.ม. คิดเป็นราคาค่าไฟฟ้าเท่ากับ 31.95 บาท / ลบ.ม.

9) การกำจัดสีของสีย้อมด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสีเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ร่วมกับการรวมตัวกันเป็นตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์เนื่องจากระบบสามารถกำจัดสีได้เป็นอย่างดีแต่ความสามารถในการกำจัดซีโอดีจะไม่เท่ากันคือมีค่าน้อยกว่ามาก และยืนยันด้วยผลการตรวจวัดโครงสร้างสีด้วยเครื่อง HPLC แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างภายในของสีย้อมก่อนและหลังจากผ่านการบำบัดโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีลักษณะโครงสร้างและเวลาของจุดสูงต่างกัน นอกจากนี้ยังเก็บตัวอย่างตะกอนอบแห้งไปศึกษาด้วยเครื่อง FTIR พบว่าลักษณะโครงสร้างสีมีจุดสูงสุดต่างกันด้วย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรทำการทดลองกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบระบบต่อเนื่อง เพื่อที่จะได้นำไปประยุกต์ใช้ในงานจริงได้
- 2) ถึงแม้ว่าการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดี แต่ก็ต้องมีการปรับปรุงในเรื่องของสภาพความเป็นต่างของน้ำเสียหลังการทดลอง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยา
- 3) ควรทำการทดลองด้วยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้ากับน้ำเสียประเภทอื่น ๆ มีสีเข้ม เช่น น้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กาญจนา ครองธรรมชาติ. 2535. การใช้โพลีลูมิเนียมคลอไรด์ในการกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2452. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานฟอกย้อม. สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม.
- กฤษณา ชูติมา. 2538. หลักเคมีทั่วไป. เล่มที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กัณฑ์มาส สุทธิเรืองวงศ์. 2539. การบำบัดน้ำเสียโดยวิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนิษฐา เจริญลาภ. 2543 การกำจัดสีดีสเพิร์ส สีไดเร็กซ์ และสีรีเอกทีฟจากน้ำทิ้งย้อมผ้าโดยกระบวนการตกตะกอน. คัลเลอร์เวย์ 34 (พฤษภาคม – มิถุนายน 2543): 32 - 38
- ทบวงมหาวิทยาลัย. 2528. คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ สาขาเคมี ตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัย. เคมีเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : อักษรเจริญทัศน์.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2527. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า เล่มที่ 1 สรุปรวม: รายงานวิจัยขั้นสมบูรณ์. ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล. สถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุษรา ประชุมญาติ. 2545. การกำจัดสีรีเอกทีฟหมู่อะโซด้วยไฮเดียมโบโรไฮไดรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปริเมษ เจริญนพคุณ. 2545. การกำจัดไนเตรดในน้ำทิ้งชุมชนด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.
- ปิ่นสยาม ภูมิพาณิชย์. 2546. การบำบัดสีย้อมรีเอกทีฟด้วยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปรีชาวิทย์ รอดรัตน์. 2543. ผลของเวลากักแวนแอโรบิกและความเข้มข้นต่อประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมรีเอกทีฟชนิดอะโซที่มีโครงสร้างทางเคมีต่างกันโดยกระบวนการเอสปีอาร์แบบแวนแอโรบิก-แอโรบิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- พรรคดี อรรถวานิช. 2543. ตำราชุดวัสดุศาสตร์. คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2543. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2538. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2545. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรญา ประทุมแก้ว. 2543. การลดสีรีแอกทีฟและการกำจัดไนโตรเจนโดยกระบวนการเอสบีบีอาร์แบบแอนแอโรบิก/แอโรบิก/แอนนออกซิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วุฒิ วิพันธ์พงษ์. 2540. การใช้สารเคมีเฟนตันกำจัดสีและสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สวีณา เกตุสุวรรณ. 2543. การลดค่าซีโอดีจากอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยโพลิออลูมิเนียมคลอไรด์ เฟอร์ริกซัลเฟต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อานนท์ ดุษฎีพรรณ. 2537. การจัดสารอินทรีย์และสีของน้ำกากส่าโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศและแบบเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อดิชาติ ปานเจริญ. 2527. การสำรวจสารลดสีที่มีศักยภาพสำหรับน้ำเสียจากโรงย้อม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิชาติ หิรัญจิตต์. 2539. การกำจัดสีย้อมรีแอกทีฟจากน้ำเสียย้อมผ้าด้วยกระบวนการร่วมของการดูดติดผิว และโคแอกูเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อินทรา หาญพงษ์พันธ์. 2538. เคมีทั่วไปสำหรับนิสิตวิศวกรรมศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อัจฉราพร ไสละสูต. 2527. คู่มือการย้อมสี. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: เทคนิค 19 การพิมพ์.

ภาษาอังกฤษ

- Altinbas, U., Dokmeci, s., and Baristiran, A. 1995. Treability study of wastewater from textile industry. Environmental Technology. 16: 389–394.
- Ajmal, M., and Khan, A.U. 1992. Effect of textile factory effluent on soil and crop plant. Environ. Pollution Ser. A.37: 131–148.
- Biwyk, A. 1991, June. Electrocoagulation of biologically treated sewage. World Congress of Chemical Engineering (Karlsruhe, Germany) 16-21: 41-49.
- Carliell, C.M., Barclay, S.J. Naidoo, N., Buckley, C.A., Mulholland, D.A. and Senior, E., 1995. Microbial decolourisation of areactive azo dye under anaerobic condition, Water SA. Vol. 21, No.1 : 61-69.
- Carliell, C.M., Barclay S.J., Buckley, C.A., Naidoo, N., Mulholland, D.A., and Senior, E., 1994. Anaerobic decolourisation of reactive dyes in conventional sewage treatment processes, Water SA. Vol. 20 : 341-344.
- Cook, M.Micheal. Sodiam borohydride dye reduction in wastewater in reise, Abraham and Freeman, S. Harold, Environmental chemistry of dyes and pigmens,pp.33-41. NewYork : John willey & Sons, 1996.
- Comminellis, C. 1992. Electrochemical treatment of wastewater containing phenol. ICHEME Symposium series.127: 97-103.
- Chen G, Chen X , and Yue P. 2000 “ Electrocoagulation and electroflotation of resturant wastewater”, Environmental Engineering, Vol.126, No.9 : 858 – 863.
- Hussain, N.1994. Cleaner Production in the Dyeing Industry. AIT thesis NO. EV. 94-113, AIT. Bangkok.
- Jia, J., YANG, J., Liao, J., Wang, W. and Wang, Z,. 1999. Treatment of dyeing waste water with ACF electrodes. Water Research, Vol. 33, No. 3: 881-884.
- Kennedy, M.1991. Electrochemical wastewater treatment technology for textile. American Dyestuff Report. September: 26 – 28.
- Kootatep, T. 1993. Color removal from textile finishing wastewater. Master thesis in Engineering, AIT. Bangkok.
- Koprivanac, N., Bosanac, G., Grabaric, Z., and Papic, S. 1993. Treatment of wastewater from dye industry. Environmental Technlogy. 14: 385 - 390

- Krause, W.A. and Shea E.P. 1979, December. System for electrocatalytic treatment of wastewater stream. U.S.Pat 18: 4, 179, 347.
- Kuo, W.G. 1992. Decolorizing dye wastewater with fenton 's reagent. Wat.Res. 26(7): 881–886.
- Laszlo, J.A. Electrolyte Effects on Hydrolyzed Reactive Dye Binding to Quaternized Cellulose. Textile Chemist and Colorist.Vol.27 No.4 (1995): 25-27.
- Lin, S.H., and Lo, c.c. 1997. Fenton process for treatment of desizing wastewater. Wat.Res. 31(8): 2050 – 2056.
- Lin, S.H., Liu, W.Y. 1994. Continuous treatment of textile water by ozonation and coagulation. Journal of environmental engineering. Vol. 20, No.2: 437–446. (English translation of khimiyai Tekhnologiya Vody) 10(2): 119– 21.
- Luangdilok, W. and Pansawad, T. 2000. Decolorization of Reactive dyes with different molecular structures under different environmental corditions. Wat.Res., Vol.34, No.17 : 4177-4184.
- Mendia, L. 1982. Electrochemical processes for wastewater treatment. Wat. Sci. Tech. 14: 331- 344.
- Molina, C., Rigal, C., and Lacoste, G. 1991, June. Electrotreatment of industrial wastewaters and products: A good way for environmental protection. World Congress Chemical Engineering (Karlsruhe, Germany) 16-21: 20-21.
- Szpyrkowicz, L., Naumczyk, J., and Zilio – Grandi, F.1996. Electrochemical treatment of textile wastewater. Wat. Sci. Tech. 34: 17–24.
- Nuphan, P. 1992. Treatment of Jeans bleaching factory waste water for removal Of colour, COD and manganese by Ferrous Sulphate, Ferric Sulphate in Conjunction with polymer coagulant aids. M.S.Thesis. Kasatsart University.
- Ohsasa, K., Nakakura, H. , and Sambuichi, M. 1991, June. Development of electroflotation technique using sacrificial electrodes for treatment of oily wastewater. Congress of Chemical Engineering (Karlsruhe, Germany) 16-21: 1-2.
- Oloman, M. 1985. Tutorial lectures in electrochemical Eng. And Tech-II. AIChE. Symposium Series 79: 69-77.

- Pretorius, W., Johannes, W., and Lempert, G. 1991. April. Electrolytic iron flocculant production with a bipolar electrode in series arrangement. Water SA 17: 133-138.
- Rajesh S.B. 2002. Electrochemical treatment of cigarette industry wastewater: feasibility study. Wat.Res., Vol. 36, No. 17, 2002: 4386–4390.
- Reife,A and Freeman,H.S.1996.Chemical Pretreatment and Aerobic-Anaerobic Degradtion of Textile Dye Wastewater.Environmental Chemistry of Dye and Pigments. John Wiley and Sons,Inc.
- Shah,T.J.1997.Color Removal from Textile Effluent using a Two-stage Activated Process.Thesis No.EV.97-39.Asian Institute of Technology.Bangkok: Thailand.
- Shore, J.1990.England Society of Dyes and Colorists. Colorants and Auxiliaries Organic Chemistry and Application Properties Vol 1.
- Szpyrkowicz, L., Juzzolino, C. and Kaul, S.N. 2001. A comparative study on oxidation of disperse dye by electrochemical process, ozone, Hypochlorite and Fenton Reagent. Wat. Res., Vol.35, No.9 : 2129-2136.
- Tak, H.K., Chulwan, P., Jinwon, L., Eung, B.S. and Sangyong, K. 2002. Pilot scale treatment of textile wastewater by combined process (fluidized biofilm process-chemical coagulation-electrochemical oxidation). Wat.Res., Vol. 36, No.16 : 3979–3988.
- Xiong, Y., Strunk, J.P., Xia, H., Zhu, X., and Karlsson T.H. 2001. Treatment of dye wastewater ontaining acid orange II using a cell with three-phase three-diminsional electrode. Wat. Res., Vol.35, No.17 : 4226-4230.
- Zhan, X.M., Wang, J. L., Wen, X. H. and Qian, Y. 2001. Indirect electrochemical treatment of saline dyestuff wastewater. Wat. Res., Vol.22 : 1105-1111.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลองทุกชุดการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองหาขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

| ขั้วไฟฟ้า | ครั้งที่ | ว/ด/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | COD | | SS (mg/l) | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) | | ค่า ORP | |
|------------------|----------|---------|-------|-------|-------------------------|-------|----------|--------|------------|--------|--------|--------|-----------|-----------------------|-------|----------------------|------|-------------------------|---------|---------|-------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | หน่วย SU | | หน่วย ADMI | | ก่อน | หลัง | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | 30 นาที | 60 นาที | ก่อน | หลัง |
| | | | | | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | | | | | | | |
| เหล็ก | 1 | 18/4/46 | 5.84 | 9.4 | 29.9 | 41.5 | 423.8 | 0.96 | 16,362 | 24.2 | 155 | 42.3 | 18 | 30 | 30 | 0.3 | 0.42 | 48 | 42 | 54 | -139 |
| | 2 | 21/4/46 | 5.93 | 10.13 | 28.5 | 41 | 383.4 | 4.797 | 14,792 | 80.79 | 158 | 47.4 | 24 | 30 | 30 | 0.3 | 0.38 | 25 | 16 | 56 | -141 |
| | 3 | 22/4/46 | 5.8 | 9.09 | 31.3 | 42 | 383 | 1.631 | 14,673 | 35.67 | 161.4 | 64.3 | 15 | 30 | 30 | 0.31 | 0.4 | 35 | 30 | 64 | -128 |
| | avg | | 5.86 | 9.54 | 29.9 | 41.5 | 396.73 | 2.4627 | 15276 | 46.887 | 158.13 | 51.333 | 19 | 30 | 30 | 0.3033 | 0.4 | 36 | 29.3333 | 58 | -136 |
| | SD | | 0.1 | 0.5 | 1.4 | 0.5 | 23.4 | 2.0 | 942.7 | 29.9 | 3.2 | 11.5 | 4.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 11.5 | 13.0 | 5.3 | 7.0 |
| อะลูมิเนียม | 1 | 18/4/46 | 5.84 | 8.92 | 29.9 | 41.5 | 423.8 | 129.8 | 16,362 | 5222.1 | 155 | 69.2 | 12 | 30 | 30 | 0.3 | 0.4 | 112 | 110 | 54 | -106 |
| | 2 | 21/4/46 | 5.93 | 9.65 | 28.5 | 40.5 | 383.4 | 134.2 | 14,792 | 4738.9 | 158 | 73.8 | 12 | 30 | 30 | 0.3 | 0.39 | 115 | 110 | 56 | -118 |
| | 3 | 22/4/46 | 5.8 | 9.02 | 31.3 | 42 | 383 | 116.3 | 14,673 | 4579.5 | 161.4 | 81.2 | 16 | 30 | 30 | 0.31 | 0.41 | 100 | 95 | 64 | -117 |
| | avg | | 5.86 | 9.20 | 29.90 | 41.33 | 396.73 | 126.77 | 14733 | 4213.2 | 158.13 | 74.73 | 13.33 | 30.00 | 30.00 | 0.30 | 0.40 | 109.00 | 105.00 | 58.00 | -114 |
| | SD | | 0.1 | 0.4 | 1.4 | 0.8 | 23.4 | 9.3 | 84.1 | 334.6 | 3.2 | 6.1 | 2.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 7.9 | 8.7 | 5.3 | 6.7 |
| เหล็กกล้าไร้สนิม | 1 | 18/4/46 | 5.84 | 6.05 | 29.9 | 42 | 423.8 | 197.6 | 16,362 | 5509.4 | 155 | 133.7 | 1 | 30 | 30 | 0.3 | 0.4 | ไม่มี | ไม่มี | 54 | 13 |
| | 2 | 21/4/46 | 5.93 | 6.12 | 28.5 | 41 | 383.4 | 155.8 | 14,792 | 3746.4 | 158 | 137.8 | 0.5 | 30 | 30 | 0.3 | 0.39 | ไม่มี | ไม่มี | 56 | 11 |
| | 3 | 22/4/46 | 5.8 | 5.97 | 31.3 | 42 | 383 | 144.6 | 14,673 | 3383.8 | 161.4 | 140.6 | 0.5 | 30 | 30 | 0.31 | 0.4 | ไม่มี | ไม่มี | 64 | 10 |
| | avg | | 5.86 | 6.05 | 29.90 | 41.7 | 396.73 | 166.00 | 15276 | 4848.8 | 158.13 | 137.37 | 0.67 | 30.00 | 30.00 | 0.30 | 0.40 | ไม่มี | ไม่มี | 58.00 | 11.33 |
| | SD | | 0.1 | 0.1 | 1.4 | 0.6 | 23.4 | 27.9 | 942.7 | 1137.1 | 3.2 | 3.5 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | ไม่มี | ไม่มี | 5.3 | 1.5 |

| ขั้วไฟฟ้า | ครั้งที่ | ว/ด/ป | ค่าความนำไฟฟ้า ไมโครซีเมนต์ / ซม. | | น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่ใส่ไป (กรัม) | | | | | |
|------------------|----------|---------|-----------------------------------|--------|---------------------------------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|----------------------------|
| | | | ก่อน | หลัง | จุ่มแรก | | น้ำหนักขั้วที่หายไป (กรัม) | จุ่มจบ | | น้ำหนักขั้วที่หายไป (กรัม) |
| | | | | | ก่อน | หลัง | | ก่อน | หลัง | |
| เหล็ก | 1 | 18/4/46 | 102.1 | 126.5 | 149.4278 | 148.1117 | 1.3161 | 151.42375 | 151.4159 | 0.00785 |
| | 2 | 21/4/46 | 100 | 117.2 | 148.1117 | 146.7172 | 1.3945 | 151.4159 | 151.4091 | 0.0068 |
| | 3 | 22/4/46 | 101.3 | 117.4 | 146.7172 | 145.4848 | 1.2324 | 151.4091 | 151.4002 | 0.0089 |
| | avg | | 101.1 | 120.4 | 148.0856 | 146.7712 | 1.3143 | 151.4163 | 151.4084 | 0.0079 |
| | SD | | 1.1 | 5.3 | 1.355 | 1.314 | 0.081 | 0.007 | 0.008 | 0.001 |
| อะลูมิเนียม | 1 | 18/4/46 | 102.1 | 109.8 | 52.8602 | 52.4697 | 0.3905 | 53.4497 | 53.4429 | 0.0068 |
| | 2 | 21/4/46 | 100 | 106 | 52.4727 | 52.0941 | 0.3786 | 53.4429 | 53.4357 | 0.0072 |
| | 3 | 22/4/46 | 101.3 | 107.4 | 52.0941 | 51.7065 | 0.3876 | 53.4357 | 53.4298 | 0.0059 |
| | avg | | 101.13 | 107.73 | 52.4757 | 52.0901 | 0.3856 | 53.4428 | 53.4361 | 0.0066 |
| | SD | | 1.1 | 1.9 | 0.383 | 0.382 | 0.006 | 0.007 | 0.007 | 0.001 |
| เหล็กกล้าไร้สนิม | 1 | 18/4/46 | 102.1 | 111 | 153.6988 | 153.6445 | 0.0543 | 152.945 | 152.9419 | 0.0031 |
| | 2 | 21/4/46 | 100 | 109.4 | 153.6445 | 153.5833 | 0.0612 | 152.9419 | 152.9403 | 0.0016 |
| | 3 | 22/4/46 | 101.3 | 108.4 | 153.5833 | 153.5235 | 0.0598 | 152.9403 | 152.938 | 0.0023 |
| | avg | | 101.1 | 109.6 | 153.64220 | 153.58377 | 0.05843 | 152.94240 | 152.94007 | 0.00233 |
| | SD | | 1.1 | 1.3 | 0.058 | 0.061 | 0.004 | 0.002 | 0.002 | 0.001 |

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองหาความต่างศักย์ที่เหมาะสม

| Volt | ครั้งที่ | ว/ด/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | COD | | SS (mg/l) | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) | | ค่า ORP | |
|---------|----------|---------|-------|------|-------------------------|--------|-------|--------|-----------|---------|-------|-------|-----------|-----------------------|------|----------------------|-------|-------------------------|---------|---------|-------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | 30 นาที | 60 นาที | ก่อน | หลัง |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 volt | 1 | 23/4/46 | 5.99 | 8.78 | 30.9 | 33 | 402.5 | 314.4 | 15,740.40 | 6342.8 | 164 | 115.5 | 180 | 10 | 10 | 0.07 | 0.08 | . | . | 70 | -81 |
| | 2 | 24/4/46 | 5.84 | 8.43 | 29.6 | 32.5 | 373 | 274.2 | 15,108.6 | 5587.4 | 154 | 118.6 | 148 | 10 | 10 | 0.07 | 0.08 | 2 | 1 | 68 | -49 |
| | 3 | 5/4/46 | 5.96 | 8.73 | 31 | 33 | 400.8 | 154.8 | 15,237.2 | 4204.5 | 160 | 118.1 | 174 | 10 | 10 | 0.07 | 0.08 | 2 | 1 | 54 | -55 |
| | avg | | 5.93 | 8.65 | 30.5 | 32.833 | 392.1 | 247.8 | 15362.07 | 5378.23 | 159.3 | 117.4 | 167.3 | 10 | 10 | 0.07 | 0.08 | 2 | 1 | 64 | -61.7 |
| | SD | | 0.1 | 0.2 | 0.8 | 0.3 | 16.6 | 83.0 | 333.9 | 1084.4 | 5.0 | 1.6 | 17.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 8.7 | 17.0 |
| 20 volt | 1 | 23/4/46 | 5.99 | 9.22 | 30.9 | 36 | 402.5 | 41.4 | 15,740.40 | 1150.9 | 164 | 109.4 | 22 | 20 | 20 | 0.12 | 0.14 | 15 | 12 | 70 | -112 |
| | 2 | 24/4/46 | 5.84 | 9.02 | 29.6 | 35 | 373 | 30.2 | 15,108.6 | 1115.9 | 154 | 112.3 | 18 | 20 | 20 | 0.14 | 0.16 | 12 | 10 | 68 | -97 |
| | 3 | 5/4/46 | 5.96 | 9.14 | 31 | 36 | 400.8 | 36.14 | 15,237.2 | 1121.94 | 160 | 111.5 | 19 | 20 | 20 | 0.13 | 0.14 | 15 | 13 | 54 | -106 |
| | avg | | 5.93 | 9.13 | 30.5 | 35.667 | 392.1 | 35.913 | 15362.07 | 1129.58 | 159.3 | 111.1 | 19.67 | 20 | 20 | 0.13 | 0.147 | 14 | 11.667 | 64 | -105 |
| | SD | | 0.1 | 0.1 | 0.8 | 0.6 | 16.6 | 5.6 | 333.9 | 18.7 | 5.0 | 1.5 | 2.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.7 | 1.5 | 8.7 | 7.5 |
| 30 volt | 1 | 23/4/46 | 5.99 | 9.8 | 30.9 | 42.5 | 402.5 | 8.97 | 15,740.40 | 175.35 | 164 | 62.5 | 18 | 30 | 30 | 0.3 | 0.37 | 50 | 45 | 70 | -142 |
| | 2 | 24/4/46 | 5.84 | 9.34 | 29.6 | 41 | 373 | 3.73 | 15,108.6 | 65.86 | 154 | 48.3 | 14 | 30 | 30 | 0.3 | 0.38 | 40 | 36 | 68 | -122 |
| | 3 | 5/4/46 | 5.96 | 9.4 | 31 | 43 | 400.8 | 5.17 | 15,237.2 | 98.73 | 160 | 54.4 | 17 | 30 | 30 | 0.31 | 0.38 | 55 | 45 | 54 | -136 |
| | avg | | 5.93 | 9.51 | 30.5 | 42.167 | 392.1 | 5.9567 | 15362.07 | 113.313 | 159.3 | 55.07 | 16.33 | 30 | 30 | 0.303 | 0.377 | 48.3 | 42 | 64 | -133 |
| | SD | | 0.1 | 0.3 | 0.8 | 1.0 | 16.6 | 2.7 | 333.9 | 56.2 | 5.0 | 7.1 | 2.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 7.6 | 5.2 | 8.7 | 10.3 |

| ชื่อไฟฟ้า | ครั้งที่ | ว/ด/ป | ค่าความนำไฟฟ้า | | น้ำหนักขดไฟฟ้า (กรัม) | | | | | | |
|-----------|----------|---------|----------------|-------|-----------------------|----------|-----------|----------|----------|--------|----------------|
| | | | ไมโครกรัม/ซม | | ชวบก | | น้ำหนักขด | | ชวบล | | น้ำหนักขดหายไป |
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | |
| 10 volt | 1 | 23/4/46 | 103.2 | 105.7 | 145.4848 | 145.2383 | 0.2465 | 151.4002 | 151.3941 | 0.0061 | |
| | 2 | 24/4/46 | 100.9 | 103.8 | 145.2383 | 144.9756 | 0.2627 | 151.3941 | 151.3902 | 0.0039 | |
| | 3 | 5/4/46 | 101.2 | 106.2 | 144.9756 | 144.7316 | 0.244 | 151.3902 | 151.3876 | 0.0026 | |
| | avg | | 101.77 | 105.2 | 145.2329 | 144.9818 | 0.25107 | 151.3948 | 151.3906 | 0.0042 | |
| | SD | | 1.3 | 1.3 | 0.3 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 20 volt | 1 | 23/4/46 | 103.2 | 114.2 | 148.0856 | 147.598 | 0.4876 | 151.4002 | 151.3968 | 0.0034 | |
| | 2 | 24/4/46 | 100.9 | 109.4 | 147.598 | 147.1401 | 0.4579 | 151.3968 | 151.3942 | 0.0026 | |
| | 3 | 5/4/46 | 101.2 | 111.6 | 147.1401 | 146.6749 | 0.4652 | 151.3942 | 151.3914 | 0.0028 | |
| | avg | | 101.77 | 111.7 | 147.6079 | 147.1377 | 0.4702 | 151.3971 | 151.3941 | 0.0029 | |
| | SD | | 1.3 | 2.4 | 0.5 | 0.5 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |
| 30 volt | 1 | 23/4/46 | 103.2 | 135.6 | 152.0822 | 150.9948 | 1.3211 | 151.2002 | 151.1883 | 0.0079 | |
| | 2 | 24/4/46 | 100.9 | 125.4 | 150.9948 | 149.9301 | 1.2649 | 151.1883 | 151.1737 | 0.0059 | |
| | 3 | 5/4/46 | 101.2 | 122.3 | 149.9301 | 148.8139 | 1.2953 | 151.1737 | 151.1735 | 0.0068 | |
| | avg | | 101.77 | 127.8 | 151.0024 | 149.9129 | 1.2938 | 151.1874 | 151.1785 | 0.0069 | |
| | SD | | 1.3 | 7.0 | 1.1 | 1.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองหาเวลาเก็บกักที่เหมาะสม

| เวลาเก็บกัก | ครั้งที่ | ว/ด/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | COD | | SS (mg/l) | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมป์) | | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) | | ค่า ORP | |
|-------------|----------|---------|----------|--------|----------------------------|-------|----------|--------|------------|---------|----------|--------|--------------|--------------------------|----------|-----------------------|------------|----------------------------|----------|---------|------------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| | | | หน่วย SU | | หน่วย ADMI | | หน่วย SU | | หน่วย ADMI | | หน่วย SU | | หน่วย ADMI | | หน่วย SU | | หน่วย ADMI | | หน่วย SU | | หน่วย ADMI |
| 0.5 ชม. | 1 | 6/5/46 | 5.91 | 8.16 | 31.5 | 34 | 442.8 | 90.5 | 15,275.0 | 2,311.1 | 154.6 | 120.9 | 5 | 30 | 30 | 0.3 | 0.34 | 9 | 6 | 62 | -52 |
| | 2 | 7/5/46 | 5.95 | 8.12 | 31 | 33 | 443.6 | 104.3 | 17,191.2 | 2,485.6 | 168.96 | 140.8 | 4 | 30 | 30 | 0.3 | 0.33 | 10 | 8 | 58 | -49 |
| | 3 | 9/5/46 | 5.99 | 8.17 | 31 | 33.5 | 448.5 | 108.2 | 17,147.5 | 2,582.8 | 161.3 | 134.4 | 4 | 30 | 30 | 0.29 | 0.33 | 10 | 8 | 79 | -57 |
| | avg | | 5.95 | 8.15 | 31.17 | 33.5 | 445 | 99.35 | 16537.9 | 2459.85 | 161.62 | 132.03 | 4.3 | 30 | 30 | 0.30 | 0.33 | 9.7 | 7.3 | 66.33 | -52.67 |
| | SD | | 0.04 | 0.03 | 0.3 | 0.5 | 3.1 | 12.5 | 1093.9 | 137.6 | 7.2 | 10.2 | 0.6 | 0 | 0 | 0.01 | 0.01 | 0.6 | 1.2 | 11.2 | 4.04 |
| 1 ชม. | 1 | 6/5/46 | 5.91 | 8.81 | 31.5 | 37 | 442.8 | 27.29 | 15,275.0 | 448.46 | 154.6 | 109.2 | 2 | 30 | 30 | 0.3 | 0.35 | 13 | 11 | 62 | -60 |
| | 2 | 7/5/46 | 5.95 | 8.85 | 31 | 36.5 | 443.6 | 33.6 | 17,191.2 | 853.9 | 168.96 | 126.72 | 6 | 30 | 30 | 0.3 | 0.34 | 15 | 20 | 58 | -59 |
| | 3 | 9/5/46 | 5.99 | 8.87 | 31 | 36.5 | 448.5 | 27.45 | 17,147.5 | 567.02 | 161.3 | 114.24 | 3 | 30 | 30 | 0.29 | 0.35 | 20 | 12 | 79 | -65 |
| | avg | | 5.95 | 8.8433 | 31.17 | 36.67 | 445 | 29.447 | 16537.9 | 623.127 | 161.62 | 116.72 | 4 | 30 | 30 | 0.30 | 0.35 | 16 | 14.3 | 66.33 | -61.33 |
| | SD | | 0.04 | 0.0306 | 0.289 | 0.289 | 3.1 | 3.6 | 1093.9 | 208.5 | 7.2 | 9.0 | 2.1 | 0 | 0 | 0.01 | 0.01 | 3.6 | 4.9 | 11.2 | 3.2 |
| 1.5 ชม. | 1 | 6/5/46 | 5.91 | 8.83 | 31.5 | 38 | 442.8 | 14.3 | 15,275.0 | 267.92 | 154.6 | 80.67 | 4 | 30 | 30 | 0.3 | 0.36 | 10 | 8 | 62 | -76 |
| | 2 | 7/5/46 | 5.95 | 8.91 | 31 | 37.5 | 443.6 | 15.04 | 17,191.2 | 292.16 | 168.96 | 94.1 | 2 | 30 | 30 | 0.3 | 0.37 | 8 | 5 | 58 | -68 |
| | 3 | 9/5/46 | 5.99 | 8.95 | 31 | 37 | 448.5 | 15.97 | 17,147.5 | 339.15 | 161.3 | 87.24 | 3 | 30 | 30 | 0.29 | 0.37 | 10 | 5 | 79 | -79 |
| | avg | | 5.95 | 8.8967 | 31.17 | 37.5 | 445 | 15.103 | 16537.9 | 299.7 | 161.62 | 87.34 | 3 | 30 | 30 | 0.30 | 0.37 | 9.3 | 6 | 66.33 | -74.33 |
| | SD | | 0.04 | 0.1 | 0.3 | 0.5 | 3.1 | 0.8 | 1093.9 | 36.2 | 7.2 | 6.7 | 1 | 0 | 0 | 0.01 | 0.01 | 1.2 | 1.7 | 11.2 | 5.7 |
| 2 ชม. | 1 | 20/5/46 | 5.97 | 9.15 | 30.1 | 38 | 446 | 12.34 | 17,041.2 | 243.67 | 161.3 | 85.3 | 26 | 30 | 30 | 0.30 | 0.37 | 30 | 20 | 67 | -80 |
| | 2 | 21/5/46 | 5.99 | 9.31 | 30.4 | 38 | 467.5 | 10.67 | 17,196.1 | 201.22 | 164.2 | 82.74 | 24 | 30 | 30 | 0.29 | 0.36 | 30 | 25 | 62 | -91 |
| | 3 | 22/5/46 | 5.93 | 9.26 | 31 | 38.5 | 429.7 | 9.17 | 16,401.8 | 186.50 | 154.88 | 79.11 | 20 | 30 | 30 | 0.31 | 0.37 | 35 | 30 | 58 | -79 |
| | avg | | 5.96 | 9.24 | 30.50 | 38.17 | 447.7 | 10.73 | 16879.70 | 210.46 | 160.13 | 82.38 | 23.33 | 30.00 | 30.00 | 0.30 | 0.37 | 31.67 | 25.00 | 62.33 | -83.33 |
| | SD | | 0.03 | 0.08 | 0.46 | 0.29 | 18.96 | 1.59 | 421.06 | 29.69 | 4.77 | 3.11 | 3.06 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 2.69 | 5.00 | 4.51 | 6.66 |
| 2.5 ชม. | 1 | 20/5/46 | 5.97 | 9.37 | 30.1 | 39 | 446 | 8.42 | 17,041.2 | 147.68 | 161.3 | 78.46 | 18 | 30 | 30 | 0.30 | 0.39 | 45 | 40 | 67 | -119 |
| | 2 | 21/5/46 | 5.99 | 9.46 | 30.4 | 40 | 467.5 | 7.13 | 17,196.1 | 135.13 | 164.2 | 72.63 | 24 | 30 | 30 | 0.29 | 0.38 | 38 | 35 | 62 | -110 |
| | 3 | 22/5/46 | 5.93 | 9.41 | 31 | 40 | 429.7 | 6.55 | 16,401.8 | 124.21 | 154.88 | 69.17 | 16 | 30 | 30 | 0.31 | 0.38 | 35 | 32 | 58 | -106 |
| | avg | | 5.96 | 9.41 | 30.50 | 39.67 | 447.7 | 7.37 | 16879.70 | 135.67 | 160.13 | 73.42 | 19.33 | 30.00 | 30.00 | 0.30 | 0.38 | 39.33 | 35.67 | 62.33 | -111.7 |
| | SD | | 0.03 | 0.05 | 0.46 | 0.58 | 18.96 | 0.96 | 421.06 | 11.74 | 4.77 | 4.70 | 4.16 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 5.13 | 4.04 | 4.51 | 6.66 |
| 3.0 ชม. | 1 | 20/5/46 | 5.97 | 9.48 | 30.1 | 41 | 446 | 5.73 | 17,041.2 | 104.62 | 161.3 | 59.64 | 12 | 30 | 30 | 0.30 | 0.41 | 47 | 40 | 67 | -139 |
| | 2 | 21/5/46 | 5.99 | 9.56 | 30.4 | 41.5 | 467.5 | 4.92 | 17,196.1 | 90.27 | 164.2 | 60.47 | 12 | 30 | 30 | 0.29 | 0.39 | 45 | 40 | 62 | -131 |
| | 3 | 22/5/46 | 5.93 | 9.52 | 31 | 42 | 429.7 | 3.63 | 16,401.8 | 76.44 | 154.88 | 49.52 | 14 | 30 | 30 | 0.31 | 0.41 | 35 | 30 | 58 | -129 |
| | avg | | 5.96 | 9.52 | 30.50 | 41.50 | 447.7 | 4.76 | 16879.70 | 90.44 | 160.13 | 56.54 | 12.67 | 30.00 | 30.00 | 0.30 | 0.40 | 42.33 | 36.67 | 62.33 | -133.0 |
| | SD | | 0.03 | 0.04 | 0.46 | 0.50 | 18.96 | 1.06 | 421.06 | 14.09 | 4.77 | 6.10 | 1.15 | 0.00 | 0.0 | 0.01 | 0.01 | 6.43 | 5.77 | 4.51 | 5.29 |

สถาบันวิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3(ต่อ) ผลการทดลองหาเวลาเก็บกักที่เหมาะสม

| เวลาเก็บกัก | ครั้งที่ | ว/ด/ป | ค่าความนำไฟฟ้า | | น้ำหนักขั้วไฟฟ้า (กรัม) | | | | | | |
|-------------|----------|---------|----------------------|--------|-------------------------|-------------|---------------|----------|-------------|---------|---------------|
| | | | ไม่เคาะแผ่นดี / ช.ม. | | ขั้วบวก | | น.น ขั้วหายใจ | | ขั้วลบ | | น.น ขั้วหายใจ |
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | (กรัม) | ก่อน | หลัง | (กรัม) | |
| 0.5 ช.ม. | 1 | 6/5/46 | 123.7 | 136.3 | 152.0822 | 151.8997 | 0.1825 | 151.1883 | 151.1821 | 0.0073 | |
| | 2 | 7/5/46 | 100 | 104.8 | 151.8997 | 151.7120 | 0.1877 | 151.1821 | 151.1747 | 0.0048 | |
| | 3 | 9/5/46 | 101.2 | 107.9 | 151.7120 | 151.5208 | 0.1912 | 151.1747 | 151.1689 | 0.0058 | |
| | avg | | 108.3 | 116.33 | 151.8979667 | 151.7108333 | 0.18713 | 151.1817 | 151.1752333 | 0.0060 | |
| | sd | | 13.4 | 17.4 | 0.2 | 0.2 | 0.0044 | 0.01 | 0.01 | 0.001 | |
| 1 ช.ม. | 1 | 6/5/46 | 123.7 | 130 | 147.1401 | 146.7577 | 0.3824 | 151.3942 | 151.1693 | 0.0067 | |
| | 2 | 7/5/46 | 100 | 106.3 | 146.7577 | 146.3839 | 0.3738 | 151.1693 | 151.1620 | 0.0069 | |
| | 3 | 9/5/46 | 101.2 | 110.6 | 146.3839 | 145.9882 | 0.3957 | 151.1620 | 151.1572 | 0.0048 | |
| | avg | | 108.3 | 115.63 | 146.7606 | 146.3766 | 0.38397 | 151.2418 | 151.1628 | 0.0061 | |
| | sd | | 13.4 | 12.6 | 0.4 | 0.4 | 0.011 | 0.1 | 0.01 | 0.001 | |
| 1.5 ช.ม. | 1 | 6/5/46 | 123.7 | 145 | 144.9756 | 144.3514 | 0.6242 | 151.3876 | 151.3821 | 0.0056 | |
| | 2 | 7/5/46 | 100 | 109.6 | 144.3514 | 143.6993 | 0.6521 | 151.3821 | 151.3754 | 0.0067 | |
| | 3 | 9/5/46 | 101.2 | 111.8 | 143.6993 | 143.0800 | 0.6193 | 151.3754 | 151.3698 | 0.0056 | |
| | avg | | 108.3 | 122.13 | 144.3421 | 143.7102 | 0.6319 | 151.3817 | 151.3758 | 0.00597 | |
| | sd | | 13.4 | 19.8 | 0.6 | 0.6 | 0.018 | 0.01 | 0.01 | 0.001 | |
| 2.0 ช.ม. | 1 | 20/5/46 | 103.4 | 115.3 | 151.5208 | 150.6914 | 0.8294 | 151.1883 | 151.1821 | 0.0073 | |
| | 2 | 21/5/46 | 108 | 119.4 | 150.6914 | 149.8378 | 0.8536 | 151.1821 | 151.1747 | 0.0048 | |
| | 3 | 22/5/46 | 112.6 | 121.6 | 149.8378 | 149.0006 | 0.8372 | 151.1747 | 151.1689 | 0.0058 | |
| | avg | | 108 | 118.77 | 150.6833 | 149.8433 | 0.8401 | 151.1817 | 151.1752 | 0.0060 | |
| | sd | | 4.6 | 3.2 | 0.8 | 0.8 | 0.0124 | 0.01 | 0.01 | 0.001 | |
| 2.5 ช.ม. | 1 | 20/5/46 | 103.4 | 118.5 | 147.1401 | 146.0689 | 1.0712 | 151.3942 | 151.1693 | 0.0067 | |
| | 2 | 21/5/46 | 108 | 121.2 | 146.0689 | 145.0014 | 1.0675 | 151.1693 | 151.1620 | 0.0069 | |
| | 3 | 22/5/46 | 112.6 | 124.2 | 145.0014 | 143.9393 | 1.0621 | 151.1620 | 151.1572 | 0.0048 | |
| | avg | | 108 | 121.3 | 146.0701 | 145.0032 | 1.0669 | 151.2418 | 151.1628 | 0.0061 | |
| | sd | | 4.6 | 2.9 | 1.1 | 1.1 | 0.005 | 0.1 | 0.01 | 0.001 | |
| 3.0 ช.ม. | 1 | 20/5/46 | 103.4 | 124.3 | 143.0800 | 141.7458 | 1.3342 | 151.3876 | 151.3821 | 0.0056 | |
| | 2 | 21/5/46 | 108 | 123.6 | 141.7458 | 140.4091 | 1.3367 | 151.3821 | 151.3754 | 0.0067 | |
| | 3 | 22/5/46 | 112.6 | 128.5 | 140.4091 | 139.0735 | 1.3356 | 151.3754 | 151.3698 | 0.0056 | |
| | avg | | 108 | 125.47 | 141.7450 | 140.4095 | 1.3355 | 151.3817 | 151.3758 | 0.0060 | |
| | sd | | 4.6 | 2.7 | 1.3 | 1.3 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.001 | |

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองหาพื้นที่รับไฟฟ้าที่เหมาะสม

| ขนาดพื้นที่ | ครั้งที่ | ว/ด/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | ที | | | | COD | | SS (mg/l) | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมป์) | | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) | | ค่า ORP | |
|----------------|----------|---------|----------|------|-------------------------|-------|----------|-------|------------|---------|----------|--------|-----------|-----------------------|-------|--------------------|------|-------------------------|-------|----------|--------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | |
| | | | หน่วย SU | | หน่วย ADMI | | หน่วย SU | | หน่วย ADMI | | หน่วย SU | | | หน่วย ADMI | | หน่วย SU | | หน่วย ADMI | | หน่วย SU | |
| 0.5 * 6.5 ช.ม. | 1 | 26/8/46 | 5.8 | 6.99 | 30 | 32 | 455.3 | 425.1 | 16,778.8 | 14,002 | 161.92 | 133.76 | 60 | 30 | 30 | 0.09 | 0.11 | 3 | 3 | 55 | 41 |
| | 2 | 28/8/46 | 5.82 | 7.19 | 30.5 | 33 | 427.2 | 397.3 | 16,443.2 | 11,467 | 144.48 | 123.8 | 56 | 30 | 30 | 0.08 | 0.12 | 4 | 4 | 61 | 37 |
| | avg | | 5.81 | 7.09 | 30.25 | 32.5 | 441.2 | 411.2 | 16611 | 12734.3 | 153.2 | 128.78 | 58.0 | 30 | 30 | 0.09 | 0.12 | 3.5 | 3.5 | 58.00 | 39 |
| 3 * 6.5 ช.ม. | 1 | 26/8/46 | 5.8 | 8.38 | 30 | 34 | 455.3 | 18.2 | 16,778.8 | 489.55 | 161.92 | 116.2 | 4 | 30 | 30 | 0.29 | 0.35 | 23 | 20 | 55 | -35 |
| | 2 | 28/8/46 | 5.82 | 8.56 | 30.5 | 35 | 427.2 | 18.9 | 16,443.2 | 552.78 | 144.48 | 110.08 | 2 | 30 | 30 | 0.29 | 0.35 | 25 | 20 | 61 | -43 |
| | avg | | 5.81 | 8.47 | 30.25 | 34.5 | 441.2 | 18.55 | 16611 | 521.165 | 153.2 | 113.14 | 3 | 30 | 30 | 0.29 | 0.35 | 24 | 20.0 | 58.00 | -39 |
| 4 * 6.5 ช.ม. | 1 | 30/8/46 | 5.91 | 8.53 | 30 | 38 | 426.1 | 18.71 | 16,300.4 | 524.28 | 151.36 | 103.20 | 5 | 30 | 30 | 0.3 | 0.35 | 13 | 10 | 58 | -61 |
| | 2 | 31/8/46 | 5.95 | 8.67 | 30 | 37.5 | 446.0 | 18.34 | 17,041.2 | 501.74 | 156.82 | 110.08 | 5 | 30 | 30 | 0.3 | 0.35 | 13 | 10 | 58 | -61 |
| | avg | | 5.93 | 8.6 | 30 | 37.75 | 436.1 | 18.53 | 16670.8 | 513.0 | 154.09 | 106.64 | 5 | 30 | 30 | 0.30 | 0.36 | 14.0 | 10 | 57.50 | -61.5 |
| 5 * 6.5 ช.ม. | 1 | 30/8/46 | 5.91 | 8.78 | 30 | 38.5 | 426.1 | 17.92 | 16,300.4 | 452.36 | 151.36 | 105.3 | 6 | 30 | 30 | 0.29 | 0.36 | 10 | 9 | 57 | -65 |
| | 2 | 31/8/46 | 5.95 | 8.83 | 30 | 38 | 446.0 | 16.86 | 17,041.2 | 384.27 | 156.82 | 102.74 | 5 | 30 | 30 | 0.29 | 0.37 | 15 | 10 | 58 | -67 |
| | avg | | 5.93 | 8.81 | 30.00 | 38.25 | 436.1 | 17.39 | 16670.80 | 418.32 | 154.09 | 104.02 | 5.50 | 30.00 | 30.00 | 0.29 | 0.37 | 12.50 | 9.50 | 57.50 | -66.00 |
| 6.5 * 6.5 ช.ม. | 1 | 8/6/46 | 5.99 | 8.89 | 30 | 38 | 451.1 | 16.55 | 17,407.3 | 371.15 | 177.12 | 100.8 | 5 | 30 | 30 | 0.3 | 0.38 | 15 | 12 | 62 | -75 |
| | 2 | 9/6/46 | 5.92 | 8.82 | 31 | 38 | 449.5 | 15.83 | 16,812.9 | 335.13 | 164 | 95.04 | 6 | 30 | 30 | 0.29 | 0.38 | 15 | 12 | 62 | -75 |
| | 3 | 10/6/46 | 5.86 | 8.76 | 31 | 38 | 437.3 | 15.49 | 16,782.0 | 308.46 | 154.88 | 90.12 | 5 | 30 | 30 | 0.31 | 0.38 | 20 | 15 | 58 | -69 |
| | avg | | 5.92 | 8.82 | 30.67 | 38.00 | 446.0 | 15.96 | 17000.73 | 338.25 | 165.33 | 95.32 | 5.33 | 30.00 | 30.00 | 0.30 | 0.38 | 19.33 | 14.00 | 59.00 | -70.3 |
| | SD | | 0.07 | 0.07 | 0.58 | 0.00 | 7.54 | 0.54 | 352.44 | 31.46 | 11.18 | 5.35 | 0.58 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 4.04 | 1.73 | 2.65 | 4.16 |
| 8 * 6.5 ช.ม. | 1 | 8/6/46 | 5.99 | 8.93 | 30 | 38.5 | 451.1 | 14.37 | 17,407.3 | 276.93 | 177.12 | 88.13 | 3 | 30 | 30 | 0.30 | 0.38 | 20 | 15 | 57 | -80 |
| | 2 | 9/6/46 | 5.92 | 8.91 | 31 | 38.9 | 449.5 | 15.24 | 16,812.9 | 299.53 | 164 | 86.74 | 4 | 30 | 30 | 0.29 | 0.38 | 15 | 10 | 62 | -85 |
| | 3 | 10/6/46 | 5.86 | 8.83 | 31 | 38.5 | 437.3 | 15.11 | 16,782.0 | 293.24 | 154.88 | 77.12 | 4 | 30 | 30 | 0.31 | 0.38 | 15 | 10 | 58 | -81 |
| | avg | | 5.92 | 8.89 | 30.67 | 38.63 | 446.0 | 14.91 | 17000.73 | 289.90 | 165.33 | 84.00 | 3.67 | 30.00 | 30.00 | 0.30 | 0.38 | 16.67 | 11.67 | 59.00 | -82.0 |
| | SD | | 0.07 | 0.05 | 0.58 | 0.23 | 7.54 | 0.47 | 352.44 | 11.66 | 11.18 | 6.00 | 0.58 | 0.00 | 0.0 | 0.01 | 0.00 | 2.89 | 2.89 | 2.65 | 2.65 |
| 11 * 6.5 ช.ม. | 1 | 8/9/46 | 5.99 | 9.12 | 30 | 38 | 451.1 | 13.5 | 17,407.3 | 275.52 | 177.12 | 68.5 | 4 | 30 | 30 | 0.30 | 0.38 | 15 | 13 | 57 | -79 |
| | 2 | 9/6/46 | 5.92 | 8.95 | 31 | 39 | 449.5 | 12.7 | 16,812.9 | 256.31 | 164 | 67.4 | 4 | 30 | 30 | 0.29 | 0.37 | 15 | 10 | 62 | -87 |
| | 3 | 10/6/46 | 5.86 | 8.89 | 31 | 38.5 | 437.3 | 11.7 | 16,782.0 | 204.49 | 154.88 | 54.8 | 2 | 30 | 30 | 0.31 | 0.39 | 10 | 9 | 58 | -82 |
| | avg | | 5.92 | 8.99 | 30.67 | 38.50 | 446.0 | 12.63 | 17000.73 | 245.44 | 165.33 | 63.57 | 3.33 | 30.00 | 30.00 | 0.30 | 0.38 | 13.33 | 10.67 | 59.00 | -82.67 |
| | SD | | 0.07 | 0.12 | 0.58 | 0.50 | 7.5 | 0.90 | 352.4 | 36.74 | 11.18 | 7.61 | 1.15 | 0.00 | 0.0 | 0.01 | 0.01 | 2.89 | 2.08 | 2.65 | 4.04 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4(ต่อ) ผลการทดลองหาพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสม

| ขนาดพื้นที่ | ครั้งที่ | ว/ด/ป | ค่าความนำไฟฟ้า | | น้ำหนักขั้วไฟฟ้า (กรัม) | | | | | | |
|----------------|----------|---------|---------------------|--------|-------------------------|----------|---------------|----------|----------|--------|---------------|
| | | | ไมโครซีเมนต์ / ซ.ม. | | ขั้วบวก | | น.น ขั้วทาบไป | | ขั้วลบ | | น.น ขั้วทาบไป |
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | (กรัม) | ก่อน | หลัง | (กรัม) | |
| 0.5 * 6.5 ซ.ม. | 1 | 26/8/46 | 110.3 | 116.6 | 53.1921 | 52.1921 | 0.1984 | 56.6219 | 56.6187 | 0.0032 | |
| | 2 | 28/8/46 | 112.3 | 122.3 | 52.1921 | 52.794 | 0.1997 | 56.6187 | 56.6145 | 0.0042 | |
| | avg | | 111.3 | 119.45 | 52.6921 | 52.49305 | 0.19906 | 56.6203 | 56.6166 | 0.0037 | |
| 3 * 6.5 ซ.ม. | 1 | 26/8/46 | 110.3 | 120.4 | 92.6425 | 92.1099 | 0.5326 | 94.3552 | 94.352 | 0.0032 | |
| | 2 | 28/8/46 | 112.3 | 132.2 | 92.1099 | 91.5281 | 0.5818 | 94.352 | 94.3493 | 0.0027 | |
| | avg | | 111.3 | 126.3 | 92.3762 | 91.8190 | 0.55720 | 94.3536 | 94.3507 | 0.0029 | |
| 4 * 6.5 ซ.ม. | 1 | 30/8/46 | 109.7 | 124.4 | 104.8341 | 104.233 | 0.6011 | 107.0811 | 107.0724 | 0.0087 | |
| | 2 | 31/8/46 | 105.2 | 118.5 | 104.233 | 103.6348 | 0.5982 | 107.0724 | 107.0657 | 0.0067 | |
| | avg | | 107.45 | 121.45 | 104.53355 | 103.9339 | 0.59965 | 107.0768 | 107.0691 | 0.0077 | |
| 5 * 6.5 ซ.ม. | 1 | 30/8/46 | 109.7 | 127.6 | 119.1996 | 118.5749 | 0.6247 | 125.9868 | 125.9814 | 0.0054 | |
| | 2 | 31/8/46 | 105.2 | 121.1 | 118.5749 | 117.9531 | 0.6218 | 125.9814 | 125.9730 | 0.0084 | |
| | avg | | 107.45 | 124.35 | 118.8873 | 118.2640 | 0.6233 | 125.9841 | 125.9772 | 0.0069 | |
| 6.5 * 6.5 ซ.ม. | 1 | 8/6/46 | 109.6 | 119.4 | 149.0006 | 148.3761 | 0.6245 | 151.1689 | 151.1632 | 0.0057 | |
| | 2 | 9/6/46 | 108.4 | 120.3 | 148.3761 | 147.7427 | 0.6334 | 151.1632 | 151.1569 | 0.0063 | |
| | 3 | 10/6/46 | 115.4 | 127.2 | 147.7427 | 147.1312 | 0.6115 | 151.1569 | 151.1518 | 0.0051 | |
| | avg | | 111.13 | 122.3 | 148.3731 | 147.7500 | 0.6231 | 151.1630 | 151.1573 | 0.0057 | |
| | sd | | 3.7 | 4.3 | 0.6 | 0.6 | 0.011 | 0.01 | 0.01 | 0.001 | |
| 8 * 6.5 ซ.ม. | 1 | 8/6/46 | 109.6 | 122.7 | 175.5043 | 174.8595 | 0.6448 | 175.3414 | 175.3342 | 0.0072 | |
| | 2 | 9/6/46 | 108.4 | 121.6 | 174.8595 | 174.2206 | 0.6389 | 175.3342 | 175.3249 | 0.0093 | |
| | 3 | 10/6/46 | 115.4 | 129.8 | 174.2206 | 173.6093 | 0.6113 | 175.3249 | 175.3204 | 0.0045 | |
| | avg | | 111.13 | 124.7 | 174.8615 | 174.2298 | 0.6317 | 175.3335 | 175.3265 | 0.0070 | |
| | sd | | 3.7 | 4.5 | 0.6 | 0.6 | 0.02 | 0.008 | 0.007 | 0.002 | |
| 11 * 6.5 ซ.ม. | 1 | 8/6/46 | 109.6 | 125 | 221* | 220.5* | 0.5 | 220 | 220 | * | |
| | 2 | 9/6/46 | 108.4 | 126.1 | 220.5* | 220* | 0.5 | 220 | 220 | * | |
| | 3 | 10/6/46 | 115.4 | 135.4 | 220* | 119.5* | 0.5 | 220 | 220 | * | |
| | avg | | 111.13 | 128.83 | 220.5 | 186.67 | 0.5 | 220 | 220 | * | |
| | sd | | 3.7 | 5.7 | 0.5 | 58.2 | 0 | 0 | 0 | * | |

* เนื่องจากน้ำหนักเกินจุดทศนิยม 4 ตำแหน่งของเครื่องชั่งแบบดิจิตอลจึงต้องชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบปกติ

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

| พีเอช | ครั้งที่ | ว/ค/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | COD | | SS (mg/l) | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) | | ค่า ORP | |
|------------|----------|---------|----------|-------|-------------------------|-------|-------|-------|-----------|--------|-------|-------|-----------|-----------------------|------|----------------------|-------|-------------------------|---------|---------|------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | 30 นาที | 60 นาที | ก่อน | หลัง |
| | | | หน่วย SU | | หน่วยADMI | | | | | | | | | | | | | | | | |
| พีเอช 3 | 1 | 13/7/46 | 3.1 | 5.63 | 29.6 | 43 | 426.4 | 2.113 | 14,142.00 | 42.95 | 147.8 | 89.5 | 2 | 30 | 30 | 0.63 | 0.7 | 15 | 14 | 52 | -31 |
| | 2 | 14/7/46 | 3 | 5.61 | 30 | 43.5 | 442.8 | 2.41 | 16,784.3 | 60.14 | 154.1 | 100.8 | 3 | 30 | 30 | 0.63 | 0.71 | 10 | 8 | 44 | -35 |
| | avg | | 3.05 | 5.62 | 29.8 | 43.25 | 434.6 | 2.262 | 15463.15 | 51.545 | 151 | 95.15 | 2.5 | 30 | 30 | 0.63 | 0.705 | 12.5 | 11 | 48 | -33 |
| พีเอช ปกติ | 1 | 13/7/46 | 5.86 | 9.13 | 29.6 | 40 | 426.4 | 3.41 | 14,142.00 | 69.52 | 147.8 | 55.34 | 8 | 30 | 30 | 0.31 | 0.4 | 45 | 40 | 52 | -102 |
| | 2 | 14/7/46 | 5.84 | 9.02 | 30 | 41 | 442.8 | 3.89 | 16,784.3 | 80.63 | 154.1 | 65.3 | 6 | 30 | 30 | 0.31 | 0.41 | 47 | 40 | 44 | -118 |
| | avg | | 5.85 | 9.08 | 29.8 | 40.5 | 434.8 | 3.65 | 15463.15 | 75.075 | 151 | 60.32 | 7 | 30 | 30 | 0.31 | 0.405 | 46 | 40 | 48 | -110 |
| พีเอช 7 | 1 | 13/7/46 | 7.02 | 9.82 | 29.6 | 46 | 426.4 | 4.21 | 14,142.00 | 73.24 | 147.8 | 67.2 | 25 | 30 | 30 | 0.63 | 1.06 | 75 | 70 | 52 | -147 |
| | 2 | 14/7/46 | 7.05 | 9.75 | 30 | 47 | 442.8 | 4.79 | 16,784.3 | 80.59 | 154.1 | 79.8 | 19 | 30 | 30 | 0.63 | 1.07 | 125 | 100 | 44 | -151 |
| | avg | | 7.035 | 9.79 | 29.8 | 46.5 | 434.6 | 4.5 | 15463.15 | 76.915 | 151 | 73.5 | 22 | 30 | 30 | 0.63 | 1.065 | 100.0 | 85 | 48 | -149 |
| พีเอช 10 | 1 | 13/7/46 | 9.98 | 10.25 | 29.6 | 46 | 426.4 | 4.78 | 14,142.00 | 79.14 | 147.8 | 53.8 | 25 | 30 | 30 | 0.63 | 1.05 | 85 | 80 | 52 | -139 |
| | 2 | 14/7/46 | 10 | 10.31 | 30 | 47 | 442.8 | 5.02 | 16,784.3 | 118.31 | 154.1 | 68.4 | 20 | 30 | 30 | 0.62 | 1.06 | 125 | 100 | 44 | -141 |
| | avg | | 9.99 | 10.28 | 29.8 | 46.5 | 434.6 | 4.9 | 15463.15 | 98.725 | 151 | 61.11 | 22.5 | 30 | 30 | 0.625 | 1.055 | 105.0 | 90 | 48 | -140 |

| พีเอช | ครั้งที่ | ว/ค/ป | ค่าความนำไฟฟ้า | | น้ำหนักของไฟฟ้า (กรัม) | | | | | | | |
|------------|----------|---------|----------------------|--------|------------------------|---------|------------|--|-------|-------|------------|--|
| | | | เมโคเรซิเมนต์ / ช.ม. | | ชีวบวก | | เนชีวหายไป | | ชีวลบ | | เนชีวหายไป | |
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | (กรัม) | | ก่อน | หลัง | (กรัม) | |
| พีเอช 3 | 1 | 13/7/46 | 111.9 | 164.2 | -221* | -220* | -1* | | 220 | 220 | * | |
| | 2 | 14/7/46 | 115.5 | 190.5 | -220* | -219* | -1* | | 220 | 220 | * | |
| | avg | | 113.7 | 177.35 | -220.5 | -219.5 | -1* | | 220.0 | 220.0 | * | |
| พีเอช ปกติ | 1 | 13/7/46 | 101.3 | 124 | -119.5* | -119* | -0.5* | | 220 | 220 | * | |
| | 2 | 14/7/46 | 103.5 | 128.2 | -119* | -118.5* | -0.5* | | 220 | 220 | * | |
| | avg | | 102.4 | 126.1 | -119.3 | -118.8 | -0.5* | | 220.0 | 220.0 | * | |
| พีเอช 7 | 1 | 13/7/46 | 109.1 | 189.6 | -220* | -218.5* | -1.5* | | 220 | 220 | * | |
| | 2 | 14/7/46 | 110.7 | 190 | -218.5* | -217* | -1.5* | | 220 | 220 | * | |
| | avg | | 109.9 | 189.8 | -218.50 | -217.75 | -1.5* | | 220 | 220 | * | |
| พีเอช 10 | 1 | 13/7/46 | 115.8 | 191.5 | -220* | -218.5* | -1.5* | | 220 | 220 | * | |
| | 2 | 14/7/46 | 116.7 | 200.4 | -218* | -217* | -1.5* | | 220 | 220 | * | |
| | avg | | 116.25 | 195.95 | -219.25 | -217.75 | -1.5* | | 220.0 | 220.0 | * | |

* เนื่องจากน้ำหนักเกินจุดหตุนิยม 4 ตำแหน่งของเครื่องชั่งแบบดิจิตอลจึงต้องชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบปกติทำให้อ่านค่าได้ไม่ละเอียด

ตารางที่ ก-6 ผลการทดสอบหาค่าความนำไฟฟ้า

| ความนำไฟฟ้า มิลลิซีเมนต์/ซ.ม. | ว/ด/ป | เวลาที่ใช้ทดลอง | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | COD | | SS (mg/l) | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | |
|--|---------|-----------------|-------|-------|----------------------------|------|----------|------|-----------|--------|--------|-------|--------------|--------------------------|------|-------------------------|------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | หน่วย SU | | หน่วยADMI | | ก่อน | หลัง | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| | | | | | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | | | |
| 7.2 เท่ากับค่าความนำ ไฟฟ้าของน้ำเสียรวม | 15/7/46 | 5 นาที | 6.02 | 9.69 | 30.5 | 32 | 360 | 2.73 | 14,080.3 | 63.77 | 165.12 | 100.8 | 32 | 6.4 | 6.4 | 3.6 | 3.74 |
| | | 30 นาที | 6.02 | 10.1 | 30 | 36.5 | 360 | 1.53 | 14,080.3 | 40.29 | 165.12 | 89.5 | 26 | 6.4 | 6.4 | 3.61 | 4.03 |
| 72 เท่ากับค่าความนำ ไฟฟ้าน้ำเสียในหม้อต้ม | 16/7/46 | 15 นาที | 5.99 | 9.62 | 30.5 | 33 | 423.7 | 3.97 | 16,112.4 | 103.38 | 367 | 215.7 | 24 | 2.0 | 2.0 | 3.8 | 3.96 |
| | | 30 นาที | 5.99 | 10.24 | 30 | 37 | 423.7 | 3.31 | 16,112.4 | 69.47 | 367 | 206 | 20 | 2.0 | 2.0 | 3.8 | 4.35 |

| ความนำไฟฟ้า มิลลิซีเมนต์/ซ.ม. | ว/ด/ป | เวลาที่ใช้ทดลอง | ปริมาณของ NaCl กรัม/น้ำ 1 ลิตร | ค่าความนำไฟฟ้า หลังทดลอง มิลลิซีเมนต์/ซ.ม. | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) | | ค่า ORP | |
|--|---------|-----------------|-----------------------------------|--|----------------------------|---------|---------|------|
| | | | | | 30 นาที | 60 นาที | ก่อน | หลัง |
| | | | | | | | | |
| 7.2 เท่ากับค่าความนำ ไฟฟ้าของน้ำเสียรวม | 15/7/46 | 5 นาที | 5.72 | 7.19 | 60 | 50 | 33 | -52 |
| | | 30 นาที | | 7.23 | 100 | 90 | 33 | -117 |
| 72 เท่ากับค่าความนำ ไฟฟ้าน้ำเสียในหม้อต้ม | 16/7/46 | 15 นาที | 80 | 80.9 | 100 | 95 | -19 | -107 |
| | | 30 นาที | | 80.5 | 131 | 110 | -19 | -152 |

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองหาปริมาณ PACL ก่อนผ่านการทำบำบัดด้วยไฟฟ้า

| ปริมาณ PACL (มก./ล.) | ว/ด/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | %กำจัด สี | COD | | %กำจัด COD | SS (mg/l) หลัง | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) |
|-------------------------|--------|-------|------|----------------------------|------|----------|--------|-----------|----------|--------------|-------|--------|---------------|----------------------|----------------------------|
| | | | | | | หน่วย SU | | หน่วยADMI | | | ก่อน | หลัง | | | |
| | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | | |
| 10 | 3/7/46 | 5.99 | 4.93 | 27.3 | 27 | 438.1 | 427.7 | 16,796 | 16,319 | 2.37 | 162 | 140.79 | 13.09 | 0.5 | * |
| 20 | 3/7/46 | 5.99 | 4.83 | 27.3 | 27 | 438.1 | 423.68 | 16,796 | 16,422 | 3.29 | 162 | 134.01 | 17.28 | 2 | * |
| 40 | 3/7/46 | 5.99 | 5.21 | 27.3 | 27 | 438.1 | 422.02 | 16,796 | 16,319 | 3.67 | 162 | 126.79 | 21.73 | 2 | * |
| 50 | 3/7/46 | 5.99 | 4.64 | 27.3 | 27 | 438.1 | 416.81 | 16,796 | 16,085.4 | 4.86 | 162 | 112.61 | 30.49 | 4 | * |
| 80 | 4/7/46 | 5.97 | 5.14 | 27.3 | 27 | 435 | 407.2 | 16,681 | 15,614.8 | 6.39 | 160.4 | 110.90 | 30.86 | 4 | * |
| 100 | 4/7/46 | 5.97 | 4.52 | 27.3 | 27 | 435 | 404.03 | 16,681 | 15,483.1 | 7.12 | 160.4 | 104.89 | 34.61 | 8 | * |
| 200 | 4/7/46 | 5.97 | 5.02 | 27.3 | 27 | 435 | 373.9 | 16,681 | 14,524 | 14.05 | 160.4 | 97.92 | 38.95 | 40 | * |
| 400 | 4/7/46 | 5.97 | 4.85 | 27.3 | 27 | 435 | 309.9 | 16,681 | 12,230 | 28.76 | 160.4 | 90.88 | 43.34 | 44 | * |

* น้อยมากจนอ่านค่าไม่ได้

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองหาปริมาณ PACL ที่เหมาะสมหลังผ่านการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า

| วิธีทดลอง | ว/ด/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | COD | | SS (mg/l) หลัง | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) | | ค่า ORP | | ค่าความนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์ / ซม.) | |
|------------------------------|--------|-------|------|----------------------------|------|----------|-------|-----------|--------|------|------|----------------------|--------------------------|-------|-------------------------|------|----------------------------|------|---------|------|--|-------|
| | | | | | | หน่วย SU | | หน่วยADMI | | ก่อน | หลัง | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง |
| | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | 30 นาที | | | | | | | | | | |
| ผ่านการรวมตะกอน ด้วยไฟฟ้า | 5/7/46 | 5.86 | 9.05 | 29.5 | 38 | 421 | 13.73 | 16,116 | 187.45 | 155 | 63.1 | 12 | 30 | 30.00 | 0.30 | 0.40 | 8 | 5 | 67 | -90 | 100 | 114.5 |
| PACL 10 มก./ล. | 5/7/46 | 9.05 | 8.55 | 38 | 31 | 13.73 | 12.3 | 187.45 | 169.76 | 98.6 | 60.4 | 10 | - | - | - | - | 25 | 22 | -90 | -45 | 114.5 | 116.5 |
| PACL 20 มก./ล. | 5/7/46 | 9.05 | 8.41 | 38 | 31 | 13.73 | 10.4 | 187.45 | 150.31 | 98.6 | 53.7 | 6 | - | - | - | - | 25 | 20 | -90 | -33 | 114.5 | 116.7 |
| PACL 50 มก./ล. | 5/7/46 | 9.05 | 8.39 | 38 | 31 | 13.73 | 10.1 | 187.45 | 146.32 | 98.6 | 48.2 | 4 | - | - | - | - | 30 | 25 | -90 | 13 | 114.5 | 121.1 |
| PACL 100 มก./ล. | 5/7/46 | 9.05 | 8.31 | 38 | 31 | 13.73 | 9.7 | 187.45 | 138.71 | 98.6 | 45.8 | 4 | - | - | - | - | 30 | 25 | -90 | 67 | 114.5 | 133.8 |

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพกำจัดน้ำเสียรวมจากโรงงานพอกซ์อม

| วิธีทดลอง | ครั้งที่ | ว/ด/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | COD | | SS (mg/l) | | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | | ปริมาณตะกอน (ml/1000ml) | | ค่า ORP | |
|--------------|----------|--------|-------|------|----------------------------|-------|----------|--------|-----------|---------|-------|--------|--------------|------|--------------------------|------|-------------------------|------|----------------------------|---------|---------|-------|
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | หน่วย SU | | หน่วยADMI | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | 30 นาที | 60 นาที | ก่อน | หลัง |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ไฟฟ้า + PACL | 1 | 7/7/46 | 5.93 | 9.37 | 28 | 30 | 101.0 | 13.17 | 956.0 | 147.3 | 402.5 | 239.4 | 108 | 46 | 6.4 | 6.4 | 2.63 | 2.71 | 170 | 119 | -25 | -20 |
| | 2 | 8/7/46 | 5.96 | 9.4 | 29 | 31 | 99.8 | 13.07 | 943.2 | 146.09 | 330.9 | 211.2 | 100 | 44 | 6.4 | 6.4 | 2.63 | 2.7 | 155 | 100 | -30 | -61 |
| | avg | | 5.945 | 9.39 | 28.5 | 30.5 | 100.4 | 13.12 | 949.6 | 146.695 | 366.7 | 225.3 | 104.0 | 45.0 | 6.4 | 6.4 | 2.63 | 2.71 | 162.5 | 109.5 | 25 | -40.5 |
| ไฟฟ้า | 1 | 7/7/46 | 5.93 | 9.45 | 28 | 36.5 | 101.0 | 13.92 | 956.0 | 150.6 | 402.5 | 253.4 | 108 | 70 | 6.4 | 6.4 | 2.63 | 2.71 | 23 | 20 | -25 | -57 |
| | 2 | 8/7/46 | 5.96 | 9.46 | 29 | 37 | 99.8 | 15.95 | 943.2 | 170.48 | 330.9 | 247.1 | 100 | 63 | 6.4 | 6.4 | 2.63 | 2.71 | 25 | 20 | -30 | -65 |
| | avg | | 5.945 | 9.4 | 28.5 | 36.75 | 100.4 | 14.935 | 949.6 | 160.54 | 366.7 | 250.25 | 104 | 67 | 6.4 | 6.4 | 2.63 | 2.71 | 24 | 20.0 | -28 | -61 |

| วิธีทดลอง | ครั้งที่ | ว/ด/ป | ค่าความนำไฟฟ้า | | น้ำหนักขี้ไฟฟ้า (กรัม) | | | | | | | |
|-------------------------|----------|--------|---------------------|-------|------------------------|------|-----------------|------|-------|--------|-----------------|--|
| | | | ไมโครซีเมนต์ / ช.ม. | | ขี้บวก | | น.น ขี้ที่หายไป | | ขี้ลบ | | น.น ขี้ที่หายไป | |
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | (กรัม) | ก่อน | หลัง | (กรัม) | | |
| ไฟฟ้า + PACL | 1 | 7/7/46 | 7.19 | 6.91 | ~217 | . | . | ~220 | . | . | | |
| | 2 | 8/7/46 | 7.2 | 6.94 | . | ~216 | . | . | ~220 | . | | |
| | avg | | 7.195 | 6.925 | | | | | | | | |
| ไฟฟ้า ใช้เวลา 2 นาที | 1 | 7/7/46 | 7.19 | 6.98 | ~219 | . | . | ~220 | . | . | | |
| | 2 | 8/7/46 | 7.2 | 7.10 | . | ~218 | . | . | ~220 | . | | |
| | avg | | 7.195 | 7.04 | | | | | | | | |

* เนื่องจากน้ำหนักเกินจุดทศนิยม 4 ตำแหน่งของเครื่องชั่งแบบดิจิตอลจึงต้องรังด้วยเครื่องชั่งแบบปกติทำให้จำนวนค่าได้ไม่ละเอียด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

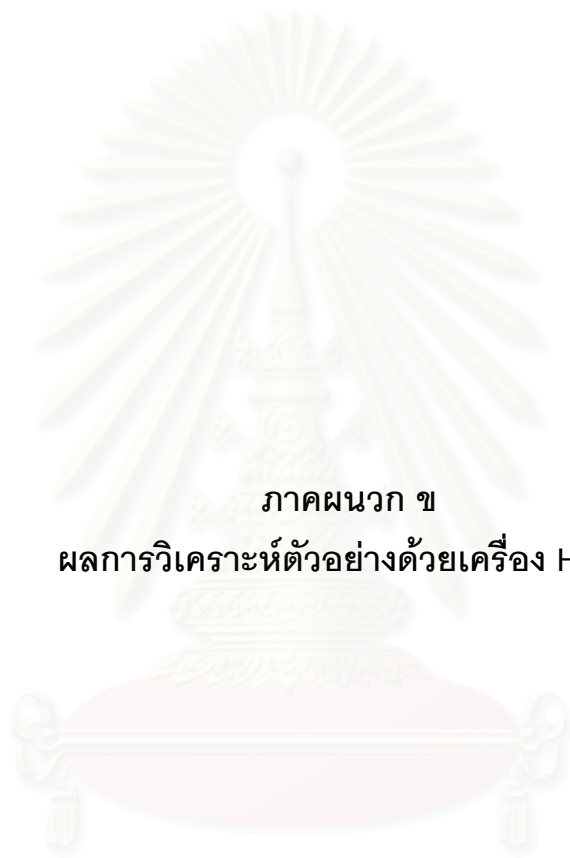
ตารางที่ ๓-9 ผลการทดลองหาประสิทธิภาพกำจัดน้ำเสียในหน่วยย่อยจากโรงงานฟอกย้อม

| วิธีทดลอง | เวลาที่ใช้ | ว/ด/ป | พีเอช | | อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) | | สี | | | | SS (mg/l) | | ความต่างศักย์ (โวลต์) | | กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์) | | ปริมาณตะกอน | | ค่า ORP | |
|-------------------|------------|---------|-------|-------|----------------------------|------|----------|-------|-----------|---------|--------------|------|--------------------------|------|-------------------------|------|-------------|---------|---------|------|
| | | | | | | | หน่วย SU | | หน่วยADMI | | | | | | | | 30 นาที | 60 นาที | | |
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | | | | | | |
| รวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 30 นาที | 14/7/46 | 10.66 | 10.89 | 29 | 31 | 2606.04 | 108.2 | 100,583.9 | 2,582.8 | 484 | 480 | 2.0 | 2.0 | 3.9 | 4.08 | 965 | 928 | -81 | -179 |
| รวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 60 นาที | 14/7/46 | 10.66 | 11.38 | 29 | 34 | 2606.04 | 36.35 | 100,583.9 | 667.68 | 484 | 458 | 2.0 | 2.0 | 3.89 | 5.67 | 990 | 959 | -81 | -188 |
| รวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 90 นาที | 14/7/46 | 10.66 | 11.48 | 29 | 36.5 | 2606.04 | 30.29 | 100,583.9 | 595.21 | 484 | 392 | 2.0 | 2.0 | 3.9 | 5.68 | 125 | 110 | -81 | -326 |

| วิธีทดลอง | เวลาที่ใช้ | ว/ด/ป | ค่าความนำไฟฟ้า | | น้ำหนักขี้ไฟฟ้า (กรัม) | | | | | |
|-------------------|------------|---------|---------------------|------|------------------------|------|-----------------|-------|------|-----------------|
| | | | ไมโครซีเมนต์ / ช.ม. | | ขี้บวก | | น.น ขี้ที่หายไป | ขี้ลบ | | น.น ขี้ที่หายไป |
| | | | ก่อน | หลัง | ก่อน | หลัง | (กรัม) | ก่อน | หลัง | (กรัม) |
| รวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 30 นาที | 14/7/46 | 71.9 | 73 | -216 | -216 | ** | -220 | -219 | * |
| รวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 60 นาที | 14/7/46 | 71.9 | 73.2 | -218 | -216 | ** | -220 | -219 | * |
| รวมตะกอนด้วยไฟฟ้า | 90 นาที | 14/7/46 | 71.9 | 77.6 | -217 | -216 | ** | -220 | -219 | * |

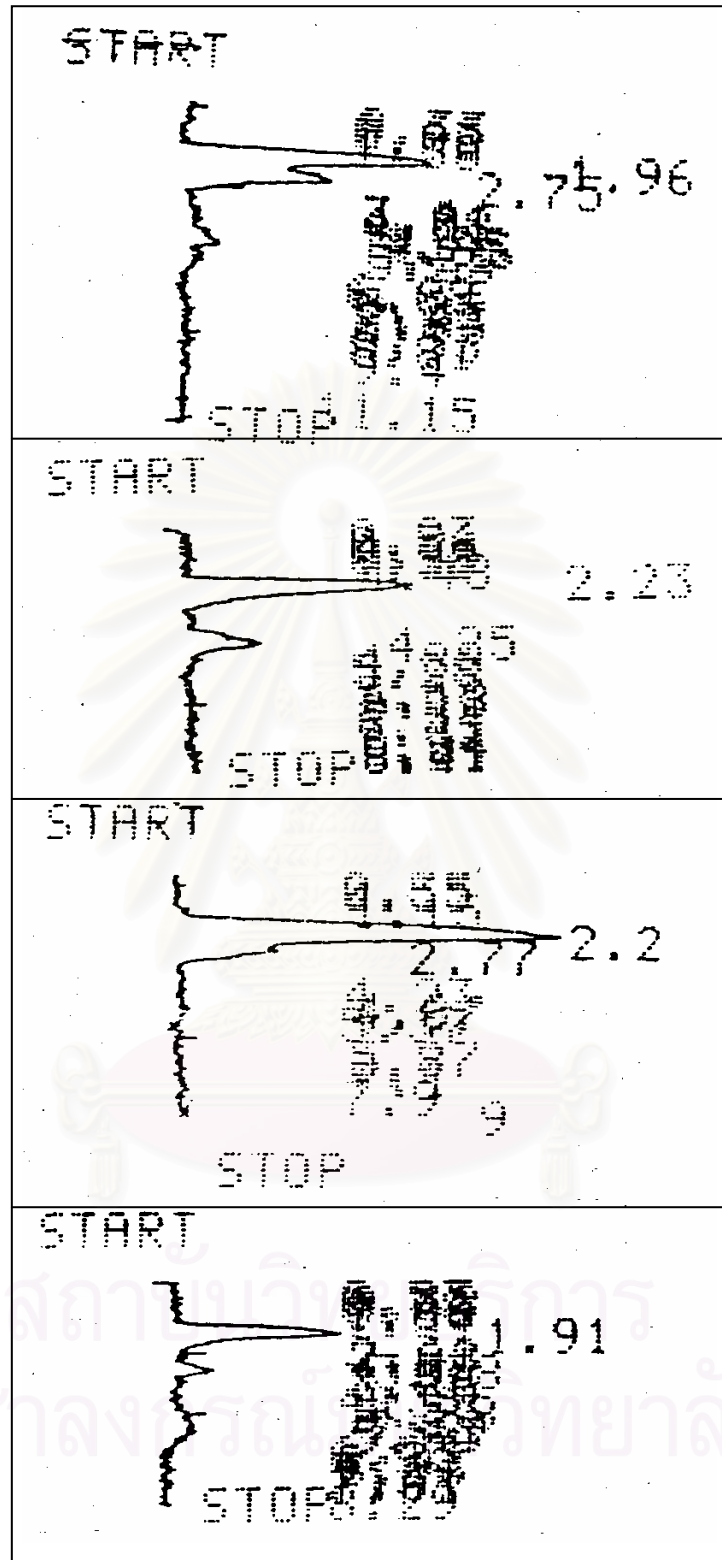
* เป็นการชั่งน้ำหนักครั้งสุดท้ายหลังจากทำการทดลองหลายครั้ง จึงไม่ชั่งน้ำหนักแท้จริงที่ใช้ไป

** เนื่องจากน้ำหนักเกินจุดทศนิยม 4 ตำแหน่งของเครื่องชั่งแบบดิจิตอลจึงต้องชั่งด้วยเครื่องชั่งแบบปกติทำให้อ่านค่าได้ไม่ละเอียด

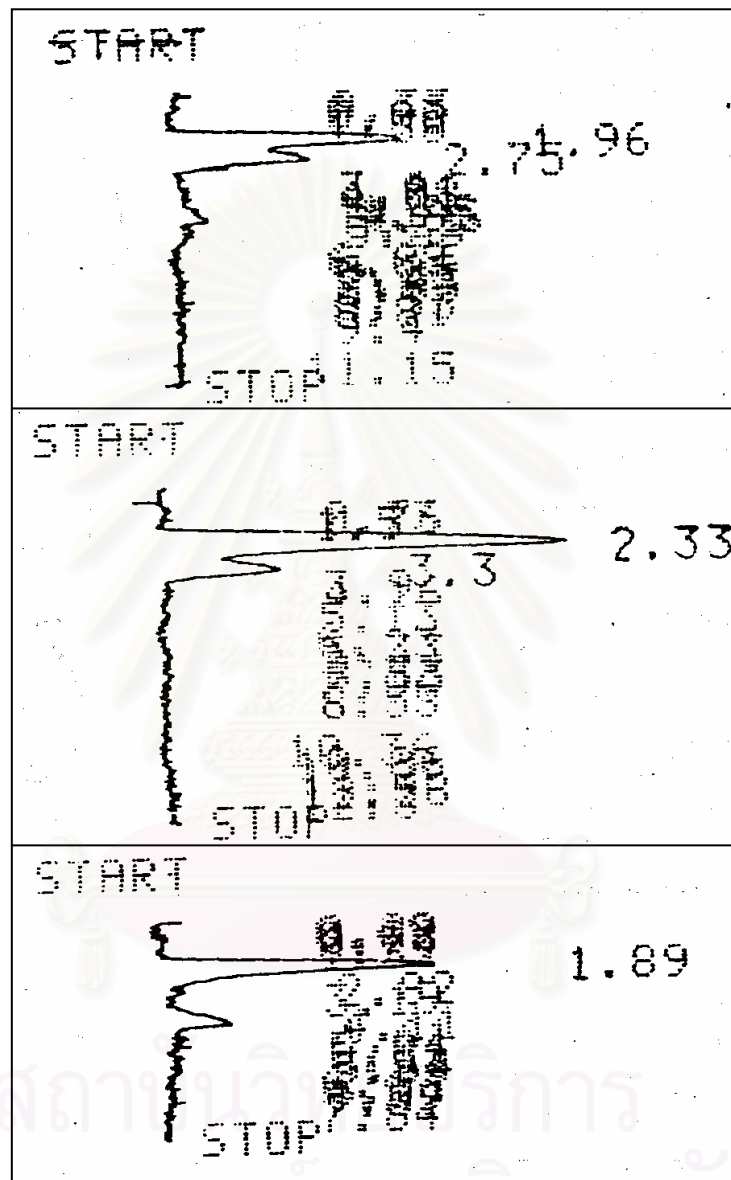


ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างด้วยเครื่อง HPLC

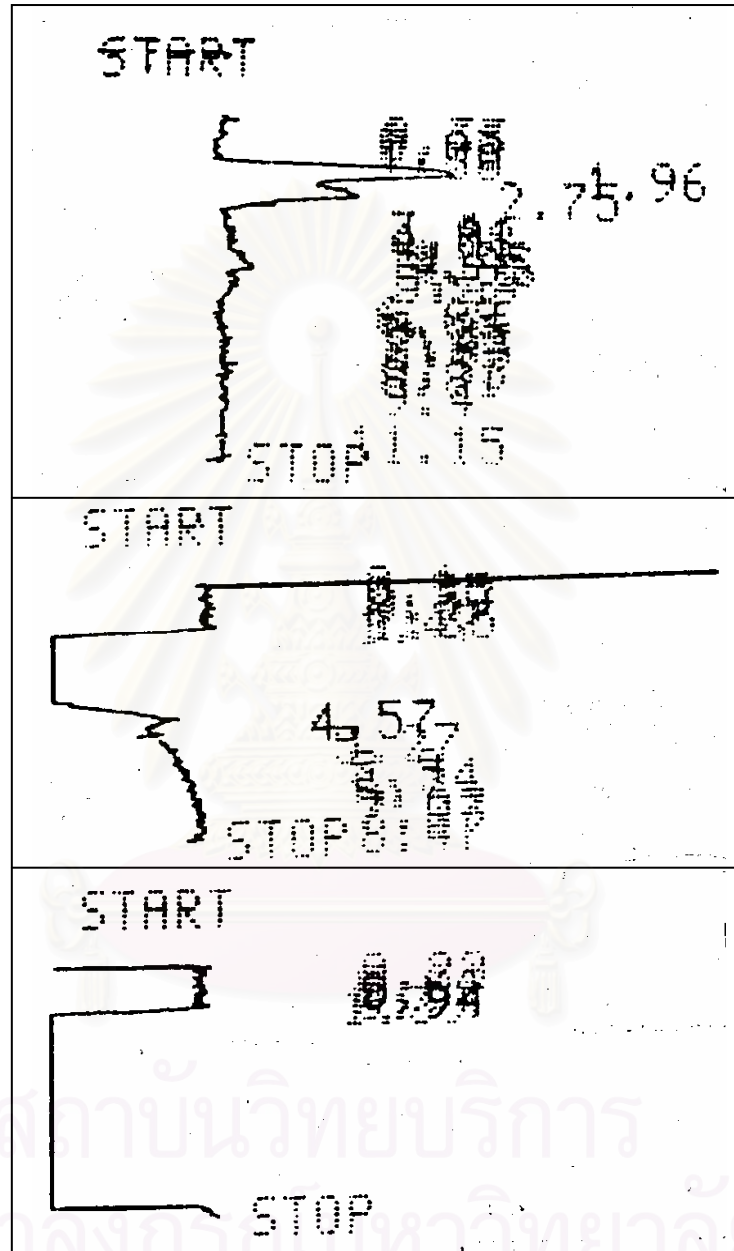
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วย HPLC ของการทดลองที่ 1
 จากบนลงล่าง 1) น้ำเสียสังเคราะห์ 2) ผ่านขั้วเหล็ก 3) ผ่านขั้วเหล็กกล้าไร้สนิม
 และ 4) ผ่านขั้วอะลูมิเนียม



รูปที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วย HPLC ของการทดลองที่ 2
จากบนลงล่าง 1) น้ำเสียสังเคราะห์ 2) ตกตะกอนด้วย PACL 3) ผ่านขั้วไฟฟ้า+PACL

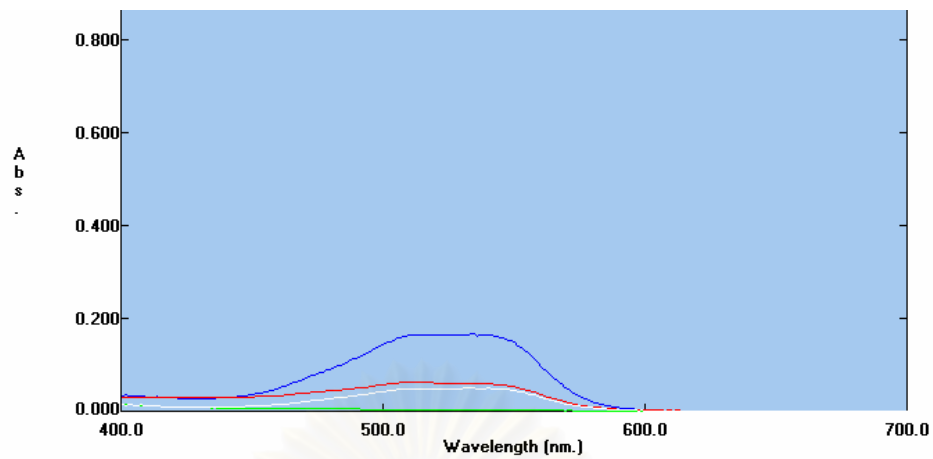


รูปที่ ข-3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำด้วย HPLC ของการทดลองที่ 3
จากบนลงล่าง 1) น้ำเสียสังเคราะห์ 2) ปรับความนำไฟฟ้าเป็น 7.2 ms/cm
3) ปรับความนำไฟฟ้าเป็น 72 ms/cm

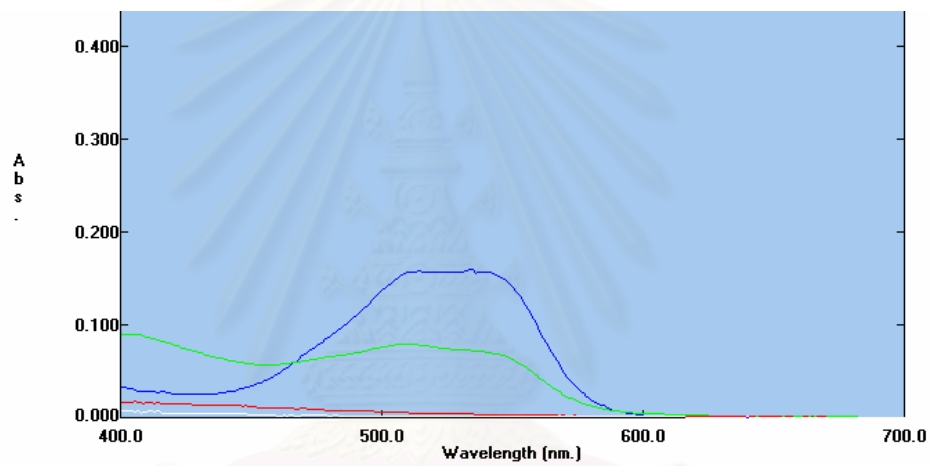


ภาคผนวก ค
ผลการวัดสีด้วยเครื่อง spectrophotometer

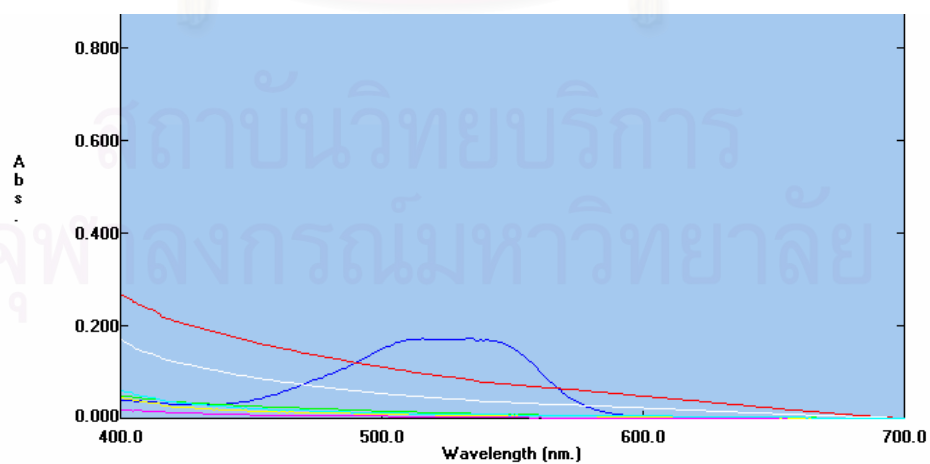
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



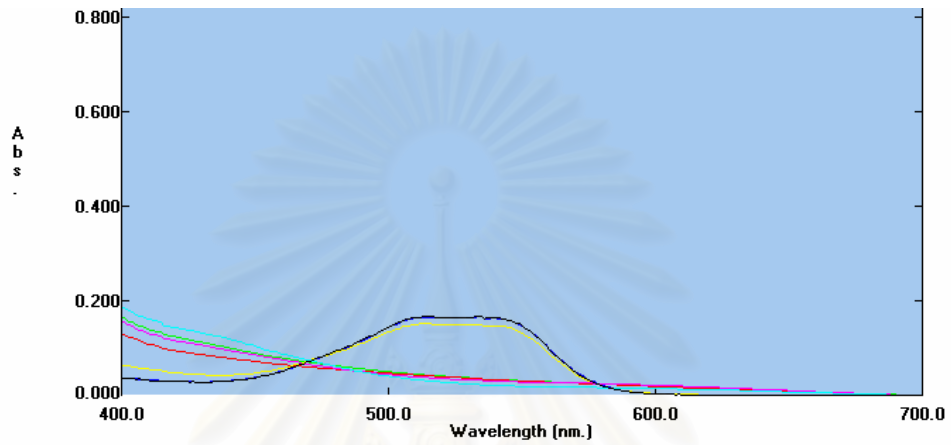
รูปที่ ค-1 การทดลองที่ 1.1 ชั่วไฟฟ้า



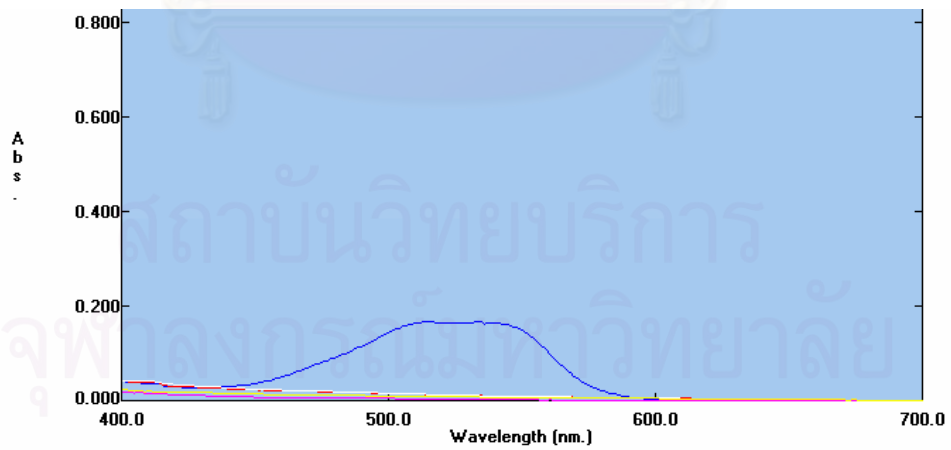
รูปที่ ค-2 การทดลองที่ 1.2 ความต่างศักย์



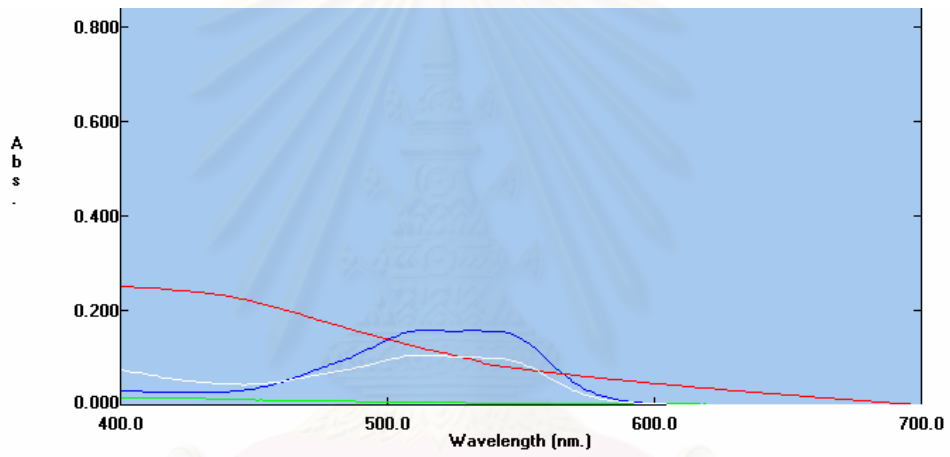
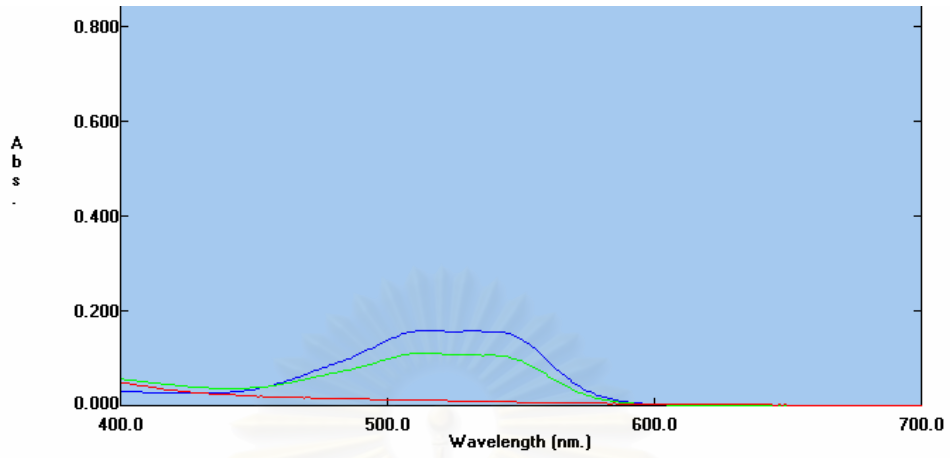
รูปที่ ค-3 การทดลองที่ 1.3 ระยะเวลาเกิดปฏิกิริยา



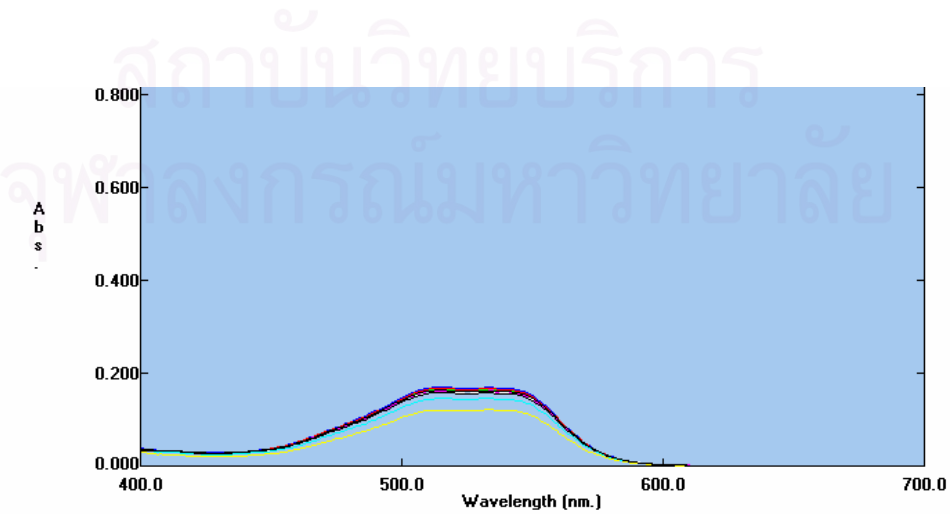
รูปที่ ค-4 การทดลองที่ 1.4 พื้นที่ผิวหน้าตัด



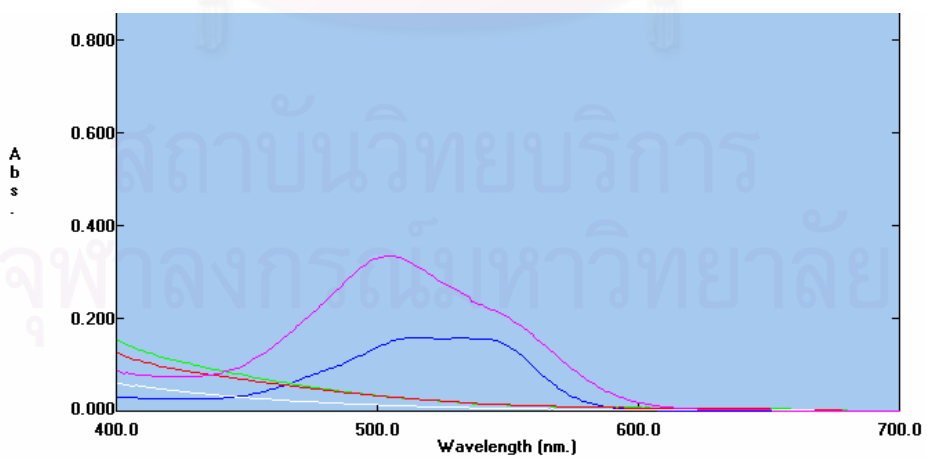
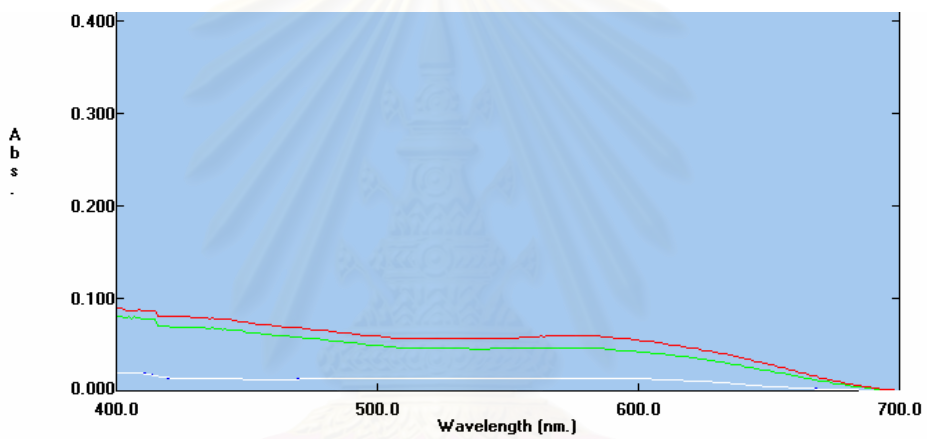
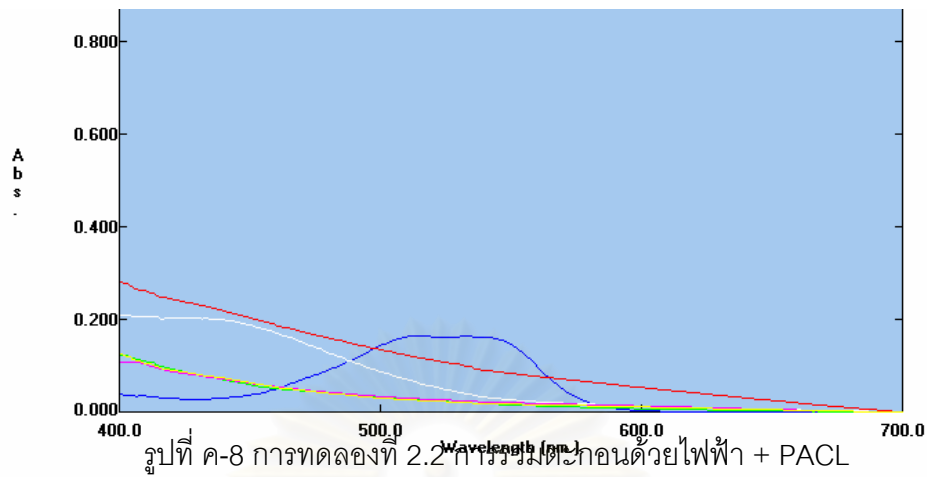
รูปที่ ค-5 การทดลองที่ 1.5 พีเอชเริ่มต้น



รูปที่ ค-6 การทดลองที่ 1.6 ความนำไฟฟ้า



รูปที่ ค-7 การทดลองที่ 2.1 การตกตะกอนด้วย PACL

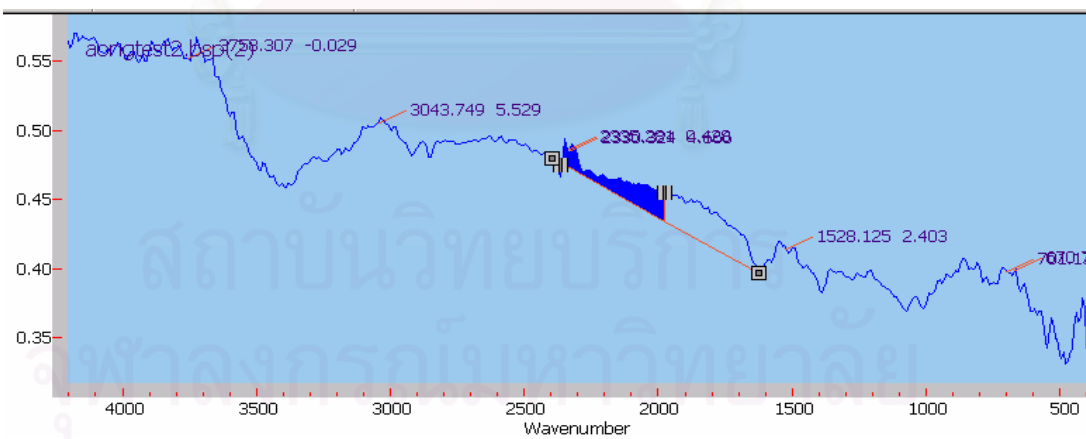
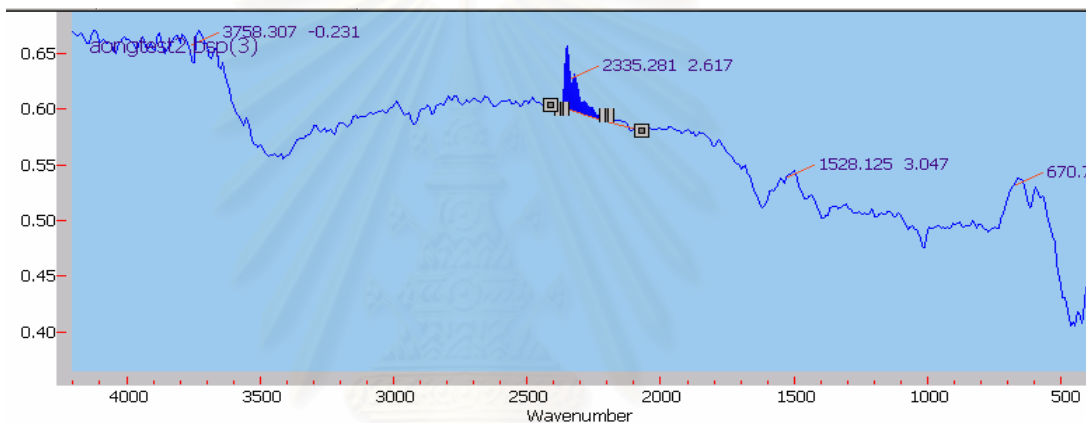
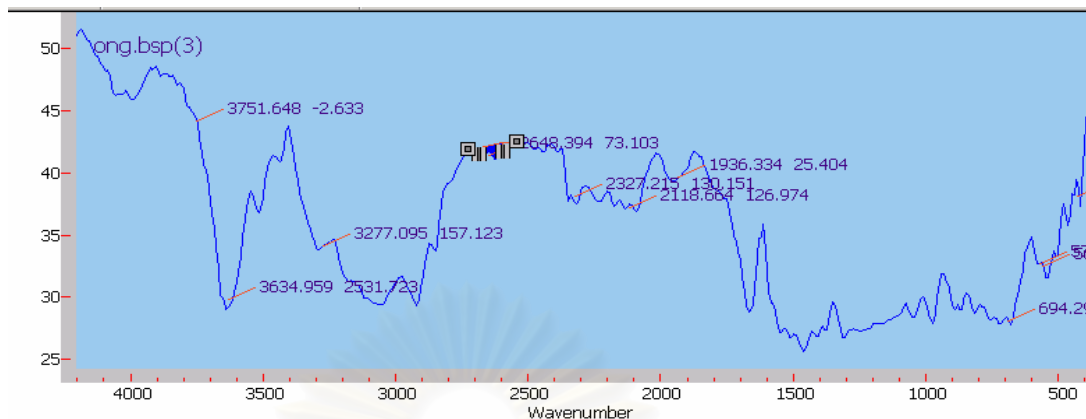




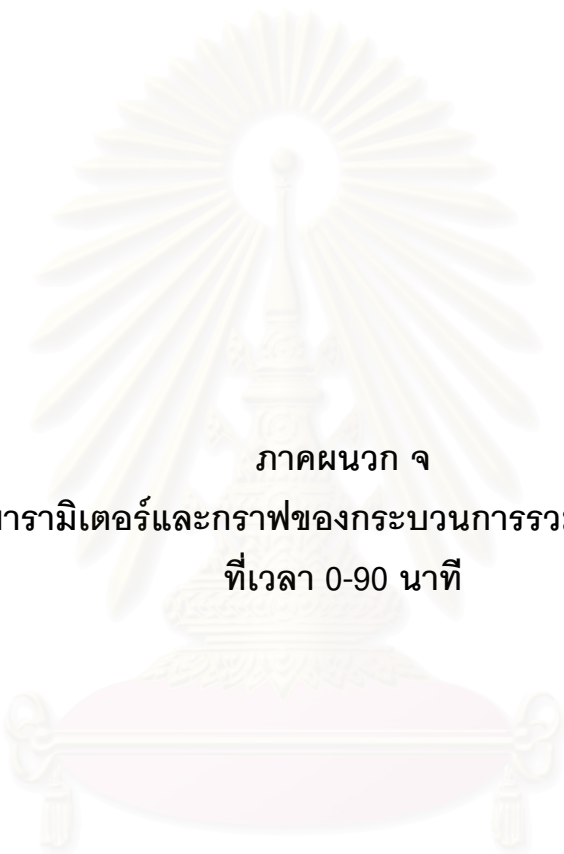
ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ตะกอนตัวอย่างด้วยเครื่อง FTIR

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



- รูปที่ ง-1 ผลการวิเคราะห์ตะกอนด้วยเครื่อง FTIR จากบ่นลงล่าง
- 1) ตะกอนสีแดงก่อนทดลอง
 - 2) ตะกอนหลังบำบัดด้วยซัลฟิด 1.5 ช.ม.
 - 3) ตะกอนหลังบำบัดด้วยซัลฟิด 3 ช.ม.

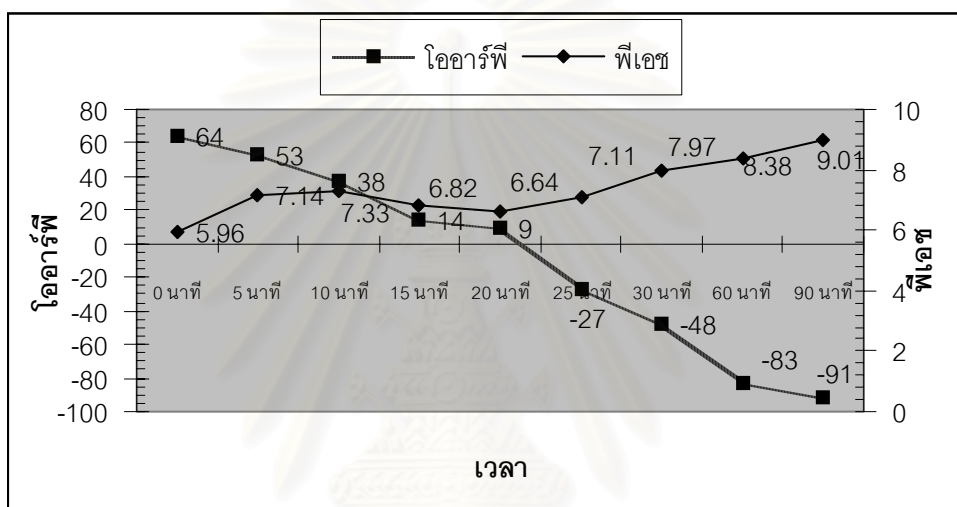


ภาคผนวก จ
ข้อมูลค่าพารามิเตอร์และกราฟของกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า
ที่เวลา 0-90 นาที

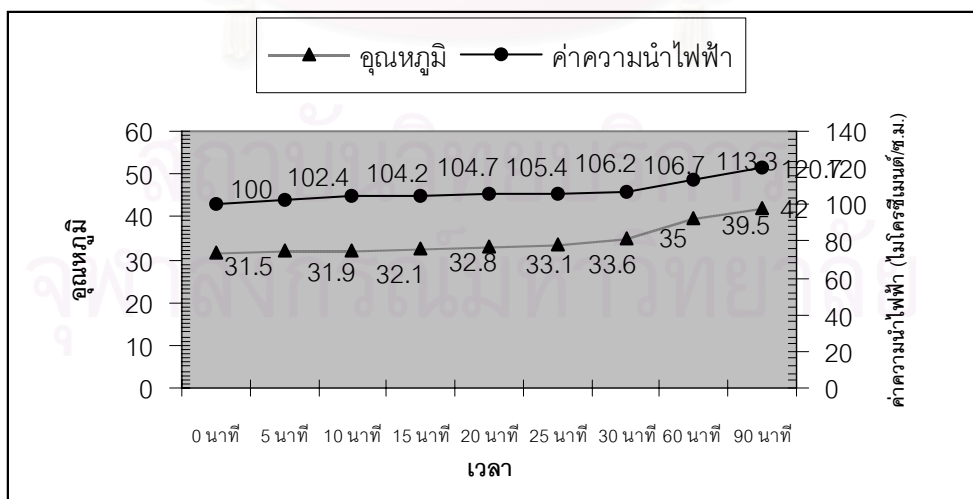
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑ - 1 ผลการผลการทดลองหาค่าตัวแปรที่เวลา 0 ถึง 90 นาที

| พารามิเตอร์ | 0 นาที | 5 นาที | 10 นาที | 15 นาที | 20 นาที | 25 นาที | 30 นาที | 60 นาที | 90 นาที |
|--|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. ไออาร์พี | 64 | 53 | 38 | 14 | 9 | -27 | -48 | -83 | -91 |
| 2. ค่าความนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนต์/ซ.ม.) | 100 | 102.4 | 104.2 | 104.7 | 105.4 | 106.2 | 106.7 | 113.3 | 120.7 |
| 3. พีเอช | 5.96 | 7.14 | 7.33 | 6.82 | 6.64 | 7.11 | 7.97 | 8.38 | 9.01 |
| 4. อุณหภูมิ | 31.5 | 31.9 | 32.1 | 32.8 | 33.1 | 33.6 | 35 | 39.5 | 42 |



รูปที่ ๑ - 1 ค่าไออาร์พีและพีเอชที่เวลาต่าง ๆ



รูปที่ ๑ - 2 ค่าอุณหภูมิและความนำไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ



ภาคผนวก จ
รูปภาพการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ๑ - 1 การเกิดปฏิกิริยาขณะทดลอง



ภาพที่ ๑ - 1 การตกตะกอนที่ดื้อของน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัด



ภาพที่ ๓ - 3 รางรับน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด (รางน้ำฝน, รางสีเข้ม, รางสีอ่อน)



ภาพที่ ๓ - 4 น้ำสีเข้มจากหม้อต้ม



ภาคผนวก ซ
วิธีการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1) การคำนวณกระแสไฟฟ้าในหน่วยฟาราเดย์

ตัวอย่างการคำนวณ ตัวอย่างการคำนวณ การการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1.2 ลิตร โดยใช้ขั้วเหล็กกว้าง 11 ซม. ยาว 6.5 เซนติเมตรหนา 2 มิลลิเมตรเป็นอิเล็กโทรด จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1.5 ซม. ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.38 แอมแปร์ เวลาที่ใช้ในการกำจัดสี 1.5 ชม.

$$\begin{aligned}
 \text{จากสูตร ปริมาณไฟฟ้า} &= I (\text{แอมแปร์}) \times t (\text{วินาที}) \\
 &= 0.38 \times 1.5 \times 60 \times 60 \\
 &= 2052 \text{ Columb.mol}^{-1} \\
 &= 2052 / 96500 (e^{-1} \text{ 1 mol มีประจุ } 96500 \text{ C}) \\
 &= 0.0212 \text{ ฟาราเดย์}
 \end{aligned}$$

2) การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า

ตัวอย่างการคำนวณ การการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1.2 ลิตร โดยใช้ขั้วเหล็กกว้าง 11 ซม. ยาว 6.5 เซนติเมตรหนา 2 มิลลิเมตรเป็นอิเล็กโทรด จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1.5 ซม. ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.38 แอมแปร์

$$\text{จากสูตร } C = I/A \text{ มีหน่วยมิลลิเป็นแอมแปร์/ตร.ซ.ม.}$$

$$C = \frac{0.38 \times 1000 \text{ มิลลิแอมแปร์}}{(1.5+0.4) \times 11 \times 6.5 \text{ ตร.ซ.ม.}}$$

$$C = 2.79 \text{ มิลลิแอมแปร์/ตร.ซ.ม.}$$

3) การคำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ในการบำบัดและค่าไฟฟ้า

ตัวอย่างการคำนวณ การการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาตร 1.2 ลิตร โดยใช้ขั้วเหล็กกว้าง 11 ซม. ยาว 6.5 เซนติเมตรหนา 2 มิลลิเมตรเป็นอิเล็กโทรด จำนวน 2 แผ่น ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 1.5 ซม. ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 โวลต์ กระแสไฟฟ้า 0.38 แอมแปร์ เวลาที่ใช้ในการกำจัดสี 1.5 ชม.

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad W &= \frac{V \times I \times t}{v \times 1000} \\ W &= \frac{30 \times 0.38 \times 1.5}{(1.2/1000) \times 1000} \\ W &= 14.25 \text{ kWh / m}^3 \end{aligned}$$

การคิดค่าไฟฟ้าจะคิดจากการใช้พลังงานในการบำบัดคูณกับราคาไฟฟ้าต่อหน่วยในที่นี้จะคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวงประเภทที่ 6 สถานที่ราชการไม่หวังผลกำไร ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิต/หน่วย}) \\ &+ (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{FT}) + \text{vat 7\%} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่าไฟฟ้า} &= (14.25 \times 2.1412) + (14.25 \times 0.2612) \\ &+ \text{vat 7\%} \\ &= 36.63 \text{ บาท / m}^3 \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาววรรษวรรณ เทียงวรรณกานต์ เกิดเมื่อวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2522 ที่จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมศาสตร์ สิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยรามคำแหง เมื่อปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย