

ชื่อแผนงานวิจัย
การประยุกต์วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมไหม
Application of Electrocoagulation for Silk Textile Wastewater treatment

โครงการวิจัยเรื่อง
การออกแบบเบื้องต้นถึงปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง
Preliminary Design of Continuous Flow Electrocoagulation Reactor for Textile
Wastewater Treatment

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องขนาด 200 ลิตรต่อวัน โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ถึงปฏิกรณ์แรกมีลักษณะเป็นถังปฏิกรณ์แบบไหลขึ้นมีสัดส่วน 15×15×40 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาตร 9 ลิตร ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร และ ผลของอัตราการไหลที่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิลิตร/นาที่ ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ตลอดจนการทดลอง การศึกษาแบ่งเป็น 5 ตอน 1 การศึกษาผลของอัตราการไหลและความหนาแน่นกระแสต่อประสิทธิภาพการบำบัดรวมถึงการทดลองเดินระบบในสถานะที่ดีที่สุด 2 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสีต่อปริมาณเหล็กละลายต่ออัตราส่วนของภาระสี 3 ศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมโดยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี 4 ศึกษาการดำเนินระบบระยะเวลา 1 วัน และ 5 การปรับปรุงรูปแบบถังปฏิกรณ์

จากการศึกษาพบว่าสถานะที่เหมาะสมที่สุดคือ ที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่ และที่ความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี 98.2 เปอร์เซ็นต์, ประสิทธิภาพการบำบัดสีเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์, ไม่พบปริมาณเหล็กละลาย มีค่าใช้จ่ายเท่ากับ 171.8 บาท/ลูกบาศก์เมตรโดยแบ่งเป็นค่าไฟฟ้า 171.7 บาท/ลูกบาศก์เมตร ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน 0.12 บาท/ลูกบาศก์เมตรและค่าแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.00085 บาท/ลูกบาศก์เมตร การศึกษาการเดินระบบ 1 วันพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 6 ชั่วโมงประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง เนื่องจากมีสารที่มีคุณลักษณะเหมือนฉนวนเคลือบอยู่ที่ผิวอิเล็กโทรด ทั้งนี้ทำการปรับปรุงถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดสั้น แต่ยาวขึ้น แต่พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียมีย้อมไม่ค่อยดี เนื่องจากอิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ทำให้กระแสไฟฟ้าทำปฏิกิริยาได้ไม่ทั่วถึง จึงทำการดัดแปลงถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดเล็กลงมีขนาด 20×10×20 นำมาต่อในลักษณะขนาดจำนวน 14 ถึงก็สามารถบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : ไฟฟ้าเคมี, สีย้อมไหม, การบำบัดน้ำเสีย, ขั้วเหล็ก , สีย้อมแอสิด

Abstract

The objectives of this research were to study silk textile wastewater treatment by Continuous Electrocoagulation Reactor that can treat 200 l/day. The dimension of up-flow reactor was 15X15X40 cm. Volume of reactor was 9 liter. This experiment used iron as electrode. Current density was varied at 1, 2, 3, 4 and 5 mA/cm². Flow rate was varied at 50, 100, 150, 200, 250 and 300 ml/min. Electrode of distance was 2 centimeters long. The study was separated to 5 parts. The first part was optimum operation system as studies of efficiencies of flow rate and current density. The second part was studied the efficiencies of colour of amount sacrifice iron per dye loading. The third part was the studies of calculate the Operating cost. The fourth part was studied operation along to 1 day. And the fifth part was re-designed the electrocoagulation reactor.

The results of the study were showed that the optimum condition at the flow rate was 100 ml/min, current density was 4 mA/cm². The efficiency of COD removal was 98.2 percent. The efficiency of colour removal was 100 percent. The effluent was not found dissolve iron. The operating costs were 171.8 baht/m³, as electricity cost was 171.67 baht/m³, sludge disposal in secure landfill was 0.120 baht/m³ and sacrifice iron was 0.00085 baht/m³. For operation 1 day study, the result was found that the removal efficiency was decrease at 6 hour after start operation, because electrode was coat by some chemical, which was the insulation ability. The first redesign of reactor was set lower than old design and increase wide distance but treatment efficiency was very low because the electric was not electrolytic effect in whole big electrode, so reactor was redesign in separation in 14 parts in parallel with separate electrode that was high treatment efficiency.

Key Words : Electrocoagulation, Silk textile, Wastewater treatment, Iron electrode, Acid dye

บทที่ 7

บทนำ

7.1 ปัญหาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสิ่งแวดล้อมที่เป็นธรรมชาติ ทั้งภายในประเทศและในท้องถิ่นมีแนวโน้มถูกทำลายเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่วัชพืชน้ำเสียจากอุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหามลภาวะทางน้ำเป็นอย่างมาก โดยอุตสาหกรรมสิ่งทอได้กำเริบขึ้นมากมายและมีแนวโน้มในการเจริญเติบโตเพิ่มมากขึ้น สิ่งก็ตามมาก็คือน้ำเสียที่ปล่อยลงสู่ธรรมชาติ เป็นปัญหาอย่างมากต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด สีจากน้ำเสียก็เช่นกัน มักมีความเข้มข้นสูง เนื่องจากในการย้อมสีของเส้นใย เส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น ดังนั้นจึงมีสีย้อมหลงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณของสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5-50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้ ถ้าหากปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะสกัดกั้นการสังเคราะห์แสงของพืช และเป็นที่น่ารังเกียจ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวก่อนทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

สีย้อมแอซิดเป็นสีย้อมผ้าไหมที่ให้สีสดใสและยึดติดกับเส้นไหมได้ดีจึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และยังพบว่าอุตสาหกรรมสิ่งทอในประเทศไทยย้อมสีแอซิดมากที่สุด สีย้อมแอซิดทำการกำจัดออกจากน้ำเสียได้ยากกว่าสีย้อมชนิดอื่นๆ เนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลมีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสามารถละลายน้ำได้ดีอีกด้วย

การบำบัดน้ำเสียที่มีสีสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตกตะกอน การดูดซับ แต่วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ วิธีนี้ได้พัฒนาขึ้นในปี 1979 โดยประยุกต์หลักการของเซลล์ไฟฟ้าแบบ Electrolytic Cell ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Power Supply) ขั้วไฟฟ้า (Electrode) อย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte Solution) วิธีนี้เป็นวิธีที่น่าสนใจเนื่องจากดูแลและควบคุมง่าย เพราะควบคุมที่กระแสไฟฟ้าจึงต้องการการดูแลรักษาน้อย ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมี ทำให้ไม่มีปัญหาเนื่องจากการใช้สารเคมี ตะกอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยและสามารถกำจัดได้ง่าย เพราะประกอบด้วยออกไซด์/ไฮดรอกไซด์ ส่วนข้อเสียคือเกิดกลิ่นเหม็น ที่ขั้วเกิดการละลาย และการใช้ไฟฟ้าอาจมีค่าใช้จ่ายที่สูง

การศึกษาในโครงการนี้เป็นการศึกษาต่อเนื่องจากจากแผนงานการประยุกต์วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อการบำบัดน้ำเสียจากการย้อมไหม โดยนำข้อมูลจากการศึกษาข้างต้นพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียให้มีความสามารถในการบำบัด 200 ลิตรต่อวัน และปัจจัย และปรับปรุงถึงปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด รวมถึงค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมด้วยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

บทที่ 8

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

8.1 ลักษณะของน้ำเสียสีย้อม

กระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนมีการใช้น้ำและสารเคมีหลายชนิดและมีปริมาณต่างๆ กัน ส่วนน้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตดังกล่าวจะกลายเป็นน้ำเสีย ซึ่งปนเปื้อนด้วยสารเคมีและสารอินทรีย์หลายชนิด อาจสามารถจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญ ๆ ได้ดังนี้

8.1.1 สีย้อม

ในการย้อมสี สีย้อมจะถูกดูดซึมเข้าสู่เส้นใยเพียงบางส่วนเท่านั้น สีที่เหลือจะคงอยู่ในน้ำย้อมและจะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสีย ปริมาณสีย้อมที่เหลืออยู่ในน้ำย้อมจะแตกต่างกันออกไปตั้งแต่ร้อยละ 5 – 50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

8.1.2 สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อมและกระบวนการตกแต่งสิ่งทอ

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมและตกแต่งสิ่งทอมีหลายประเภท สามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 3 ประเภท ดังนี้

(1) สารช่วยย้อม (Auxiliaries Chemicals) ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (Scouring Agent) สารช่วยเปียก (Wetting Agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้สม่ำเสมอ (Levelling Agent) สารช่วยย้อมมีหลายชนิด ที่สำคัญสามารถแบ่งได้ 7 ประเภท ดังตารางที่ 8-1

ตารางที่ 8-1 ประเภทของสารช่วยย้อม

ประเภท	ลักษณะการใช้งาน
กรด	ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนเมื่อใช้สีย้อมแอสิค
ด่าง	ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก สีแวต และสีซัลเฟอร์
เกลือ	ใช้สำหรับย้อมสีแอสิคและเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ	ใช้สำหรับย้อมสีแวต สีดิสเพิร์ส และสีแอสิคบางชนิด
สารนำ (Carriers)	ใช้สำหรับย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
สารละลายอินทรีย์	ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
สารรีดิวซ์	ใช้สำหรับรีดิวซ์สีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

(เป็นสยาม ภูมิพานิชย์ , 2546)

สารเคมีพื้นฐาน (Basic Chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้กระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแบ่ง

(2) สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ สารกันยับ ฯลฯ

8.1.3 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่ โดยเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่สูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเหล่านี้มีทั้งสารซีฟิ่ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ยังมีสารเคมีที่เติมลงไป在线ใยระหว่างกระบวนการผลิต เช่น สารหล่อลื่นและแป้ง เป็นต้น สิ่งสกปรกเหล่านี้จะถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมสิ่งทอซึ่งจะหลุดออกมากับน้ำเสีย

8.1.4 สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ

นอกจากสิ่งเจือปนที่ได้กล่าวข้างต้นแล้ว อาจยังมีสิ่งสกปรกอื่นๆ เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนของผ้า ซึ่งมักเป็นสารจำพวกคลอรีเนเตดเบนซีน (Chlorinated Benzene) สารเคมีที่ใช้ล้างเครื่องจักร ฯลฯ

จะเห็นได้ว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่หลายประเภท ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของน้ำเสียขึ้นอยู่กับ กระบวนการฟอกย้อมผลิตภัณฑ์ ชนิดของสารลงแป้งบนผ้าทอ ชนิดและความสกปรกของเส้นใย ชนิดของสีย้อม ตลอดจนกรรมวิธีในการย้อม โดยลักษณะของน้ำเสียสามารถแสดงได้ดัง ตารางที่ 8-2 และ ตารางที่ 8-3

ตารางที่ 8-2 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์	pH	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Color (Pt.Co)	จำนวนข้อมูล
ด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ผ้าถัก	9.0	110	370	50	570	16
ผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	670	41
ด้ายและผ้าหรือ อื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม ,2542)

8.2 สีย้อม

การฟอกย้อมเป็นหัวใจสำคัญของอุตสาหกรรมสิ่งทอ การย้อมสีทำให้สิ่งทอเกิดลวดลายและมีสีสันสวยงาม สิ่งทอแต่ละชนิดใช้สี และวิธีการย้อมที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสิ่งทอและสีย้อมแต่ละชนิด สีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งการที่จะนำสีย้อมใดๆ มาใช้ย้อมให้ได้ผลดีนั้น ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ สภาวะเช่นนี้จะเกิดได้ เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยและเกิดพันธะ (Bond) ยึดติดกันแน่น อิทธิพลเชิงเคมีที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond), แรงแวนเดอร์วาล (Van der Waal's forces), แรงไอออน (Ionic forces) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

8.2.1 การเกิดสีของสีย้อม

สีที่ตาของมนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการจัดเรียงตัวของอะตอมกลุ่มหนึ่งในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมดังกล่าว คือ โครโมฟอร์ (Chromophores) มีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1	กลุ่มไนโตรโซ (Nitroso group)	: -NO (หรือ =N-OH)
กลุ่มที่ 2	กลุ่มไนโตร (Nitro group)	: -NO ₂ (หรือ =NO·OH)
กลุ่มที่ 3	กลุ่มอะโซ (Azo group)	: -N=N-
กลุ่มที่ 4	กลุ่มเอทิลีน (Ethylene group)	: >C=C<
กลุ่มที่ 5	กลุ่มคาร์บอนิล (Carbonyl group)	: >C=O<
กลุ่มที่ 6	กลุ่มคาร์บอนิลไนโตรเจน (Carbonyl-nitrogen group)	: >C=NH และ -CH=N-
กลุ่มที่ 7	กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulfur group)	: >C=S และ -C-S-S-C-

สีย้อมโดยทั่วไป นอกจากจะมีกลุ่มโครโมฟอร์แล้วยังจะต้องมีกลุ่มออกโซโครมเพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดกับเส้นใยได้ กลุ่มออกโซโครมที่สำคัญได้แก่ -OH, -NH₂, -NHR, -SO₃ และ -COOH โมเลกุลที่ไม่มีกลุ่มออกโซโครมจะแสดงคุณสมบัติของสีแต่จะขาดความสามารถในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวเรียกว่า โครมาเจน ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ออกโซโครมและโครมาเจน เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี

8.2.2 การจำแนกประเภทของสีย้อม

สีย้อมที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายประเภท ซึ่งการจำแนกประเภทของสีย้อมนั้นต้องอาศัยหลักเกณฑ์ต่างๆ ในการพิจารณา ปัจจุบันสีย้อมสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ สีธรรมชาติ และสีเคมี สำหรับสีธรรมชาติ ส่วนใหญ่ได้จากพืชในส่วนของเปลือกไม้ ใบไม้ ลูกไม้ และรากไม้ ซึ่งจะมีกรรมวิธีในการย้อมแตกต่างกันไป แล้วแต่ชนิดพืชและส่วนที่นำมาเป็นสีย้อม สีธรรมชาติที่นำมาย้อมเส้นไหม ได้แก่ สีแดงจากครั่ง รากยอ ดอกคำฝอย สีน้ำเงินจากต้นคราม สีเหลืองจากแก่นขนุน ขมิ้นชัน แก่นเข สีดำจากลูกมะเกลือ สีชมพูจากต้นฟาง สีฟ้าก็จากเปลือกและแก่นเพกา สีเขียวจากใบหูกวาง เป็นต้น ส่วนสีเคมี เป็นสีที่มีความบริสุทธิ์ของตัวสีมาก สามารถนำสีเหล่านี้มาผสมเพื่อให้ได้สีที่ต้องการ และปรับระดับความเข้มของสีได้ วิธีการย้อมทำได้ง่ายและสะดวก สีที่ย้อมได้จะมีความสดสวยและมีความทนทานของสีดี สีเคมีที่นำมาย้อมเส้นไหมมีหลายประเภท ได้แก่ สีแอซิด (Acid Dyestuff) สีเมทัลคอมเพลกซ์ (Metal Complex Dyestuff) สีเบสิก (Basic Dyestuff) สีโครมอร์แดนท์ (Chrom Mordant Dyestuff) สีไดเรกต์ (Direct Dyestuff) และสีรีแอคทีฟ (Reactive Dyestuff)

หรือพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างทางเคมี และลักษณะการใช้งาน ดังนี้

(1) การจำแนกประเภทของสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ

หากพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพ สามารถจำแนกสีย้อมออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ประเภทที่ละลายน้ำได้ เรียกว่า สีย้อม (Dyes) และประเภทที่ละลายน้ำไม่ได้เรียกว่าพิกเมนต์ (Pigment) วิธีนี้เป็นวิธีจำแนกสีย้อมอย่างง่าย ๆ ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากก่อให้เกิดความสับสน

(2) การจำแนกประเภทของสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้มีความยุ่งยาก เนื่องจากมีสีย้อมในกลุ่มเคมีเดียวกันอาจมีวิธีในการย้อมที่แตกต่างกันใช้ย้อมเส้นใยต่างชนิดกันบางชนิดติดสีได้เมื่อน้ำย้อมมีสถานะเป็นกรดบางชนิดต้องเติมสารเคมีช่วยในการยึดติดเส้นใยจึงมีความยุ่งยากและมีความซับซ้อนการจำแนกประเภทสีย้อมด้วยวิธีนี้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาในการบำบัดสีออกจากน้ำเสีย ประเภทของสีย้อมสามารถจำแนกตามโครงสร้างทางเคมีได้ดังตารางที่ 8-4

ตารางที่ 8-3 ประเภทของสีย้อมจำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

Class	Subclass	Example
Nitro	-	Naphthol Yellow S
Nitroso	-	Fast Green O
Diphenylmethane	-	Auramine O
Triphenylmethane	-	Malachite Green
Xanthene	-	Fluorescein
Azo	Monoazo Diazo Triazo Polyazo Mordant Azo Stilbene Azo Pyrazolone Azo	Acid Orange II Congo Red Direct Blue 15 - Eriochrome Black T Chrysophenine G Tartrazine
Acridine	-	Acridine Orange NO
Indamine & Indophenol	-	Toluylene Blue
Azine	-	Safranine T
Oxazine	-	Capri Blue GN
Thiazine	-	Methylene Blue
Cyanine	Methine Quinoline	Astrafloxine FF Kryptocyanine
Sulphur	-	Sulphur Black T
Lactone	-	Resoflavine W
Aminoketone	-	Helindon Brown CR
Hydroxyketone	-	Alizarin Dark W
Anthraquinonoid	-	Perlon Fast Green 3B
Indigoid	-	Indigo
Sulphurized Vat Dyes	-	Hydron Blue R

(Rangnekar and Singh ,1980)

8.2.3 การจำแนกประเภทของสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ให้ความสะดวกแก่ผู้ใช่มากกว่าวิธีอื่นจึงเป็นที่ยอมรับกันในปัจจุบัน แม้แต่สมาคมผู้ย้อมและผู้ผลิตสี (The Society of Dyes and Colorist) ก็ยอมรับว่าเป็นวิธีจำแนกที่เหมาะสมที่สุด หนังสือดัชนีสี (Color index) ที่พิมพ์จำหน่ายทั่วโลกก็ใช้การจำแนกด้วยวิธีนี้ จึงทำให้มีความคล่องตัวสูง ซึ่งทำการจำแนกประเภทของสีย้อมตามลักษณะการใช้งานได้ 11 ประเภท ดังนี้

(1) สีย้อมเบสิค (Basic dyes)

เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (Organic base) ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมเส้นใยจากสัตว์ ติดได้โดยตรง ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย สีกกลุ่มนี้มีโครโมฟอร์ที่มีพฤติกรรมทำให้สีขึ้นอยู่กับ

ปฏิกิริยารีดิวซ์และออกซิไดซ์ ที่ให้แคทอออน บางครั้งจึงเรียกสีชนิดนี้ว่า สีแคทอออน ย้อมติดเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุล สีย้อมจะจับตัวกับประจุลบของเส้นใย

(2) สีย้อมแอซิด (Acid dyes)

สีชนิดนี้เกิดขึ้นจากสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถันใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดอาจใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่บริสุทธิ์ได้

(3) สีย้อมดิสเพิร์ส (Disperse dyes)

สีชนิดนี้มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะเป็นละอองลอยอยู่ในน้ำเมื่อมีสารกระจายตัว (Dispersing agent) ที่เหมาะสม ในการย้อมไม่ต้องเติมสารเคมีอย่างอื่นนอกจากสารนำ (Carrier) ให้สีเข้าไปใกล้เส้นใยเท่านั้นใช้ย้อมเส้นใยอาซิเตทกลีสนเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย

(4) สีย้อมอะโซอิก (Azoic dyes)

เป็นสารประกอบอะโซ ตัวสีไม่ละลายน้ำ ต้องย้อมในสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับด้วยเกลือไดอะโซเดียม (Diazodium salt) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลเกิดเป็นสารประกอบอะโซที่ให้สีบนเส้นใยปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า coupling สีย้อมชนิดนี้นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้นเนื่องจากสารประกอบฟีนอลละลายในต่างซึ่งเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน

(5) สีย้อมไดเรกต์ (Direct dyes)

บางครั้งเรียกว่าสีย้อมฝ้ายเป็นสีย้อมชนิดแรกที่ถูกคิดค้นได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยย้อมแต่ในปัจจุบันมีการเติมเกลือเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซโมเลกุล มีน้ำหนักสูงมีหมู่ซัลโฟนิคซึ่งทำให้สีสามารถละลายน้ำได้ ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสซึ่งไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

(6) สีย้อมมอร์ดนต์ (Mordant dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีน ซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มสีประเภทแอซิดที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ อนุภาคของสีที่ก่อรูปบนเส้นใยภายหลังเมื่อย้อมทับด้วยเกลือโลหะแล้วจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำ (Wet fastness) ได้ดีกว่าเมื่อไม่ย้อมทับ

(7) สีย้อมซัลเฟอร์ (Sulfur dyes)

ใช้ย้อมฝ้ายโดยเฉพาะ ให้สีไม่สดใส ปกติไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่ในปัจจุบันมีผู้ผลิตสีย้อมผ้าชนิดนี้ขึ้นใหม่โดยนำตัวสีย้อมไปทำการรีดิวซ์ทำให้สามารถละลายน้ำได้ ตัวรีดิวซ์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายที่สุด คือ โซเดียมซัลไฟด์

(8) สีย้อมแวต (Vat dyes)

นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้ายเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำในการย้อมต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมทำให้เกิดการละลายจึงจะสามารถติดเส้นใยเซลลูโลสได้ สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ เมื่อสีย้อมถูกรีดิวซ์จะให้สารประกอบ ลิวโค (Leuco compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไปติดเส้นใยได้ และเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสอากาศ สารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดซ์กลับเป็นสีย้อมวัตซึ่งไม่ละลายน้ำ ทำให้สีที่ติดเส้นใยมีความคงทน

(9) สีย้อมรีแอกทีฟ (Reactive dyes)

เป็นสีที่ละลายน้ำได้ดีมีคุณสมบัติเป็นแอนไอออนเมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็น

สารประกอบชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติในการละลายและดูดติดเส้นใยได้ดีของสี ทำให้สีย้อมชนิดนี้เป็นสีย้อมเซลลูโลสที่ดี

(10) ย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal complex dyes)

สีชนิดนี้เดิมเป็นสีมอร์แดนท์ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะจะได้สารประกอบที่ให้สีชนิดใหม่นิยมใช้เกลือของโครเมียมมาทำปฏิกิริยาสีเมทัลคอมเพล็กซ์สามารถแยกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของน้ำย้อมได้แก่ สีเมทัลคอมเพล็กซ์ในน้ำย้อมที่เป็นกรด และสีเมทัลคอมเพล็กซ์ในน้ำย้อมที่เป็นด่างสีชนิดนี้ถ้ามีเกลืออนินทรีย์ในน้ำจะทำให้ละลายน้ำได้ไม่ดี ดังนั้นจึงต้องใช้น้ำค่อนข้างบริสุทธิ์ ไม่มีเกลือแร่ปนอยู่

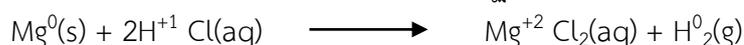
(11) สีย้อมโอเนียม (Onium Dyes)

ปกตินิยมใช้พิมพ์มากกว่าใช้ย้อมผ้าจัดเป็นฟิกเมนต์ที่สามารถละลายน้ำได้ วิธีการย้อมคล้ายกับสีน้อมแวต คือ ทำให้สีย้อมกลับคืนสู่รูปเดิมที่ไม่ละลายน้ำด้วยการออกซิไดซ์

8.3 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

กระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ ปฏิกิริยา (ออกซิเดชัน-รีดักชัน) ซึ่งเป็นพลังงานที่เกิดขึ้นได้เองนั้นถูกเปลี่ยนไปเป็นไฟฟ้า หรือการที่ต้องการไฟฟ้าในการทำปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเองไม่ได้ให้เกิดขึ้นได้ กระบวนการแบบนี้ เรียกว่า การแยกสลายด้วยไฟฟ้า หรืออิเล็กโทรไลซิส

ในปฏิกิริยารีดอกซ์ จะมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่ง ปฏิกิริยาระหว่างโลหะแมกนีเซียมกับกรดไฮโดรคลอริกเป็นตัวอย่างหนึ่งของปฏิกิริยารีดอกซ์



ตัวเลขที่อยู่เหนือธาตุ คือ เลขออกซิเดชันของธาตุนั้น การสูญเสียอิเล็กตรอนของธาตุในระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชันแสดงโดยการเพิ่มเลขออกซิเดชัน จะมีการลดลงของเลขออกซิเดชันจากการรับอิเล็กตรอนของธาตุ ในปฏิกิริยาของแมกนีเซียมข้างต้น แมกนีเซียมถูกออกซิไดซ์ และไอออน H^+ ถูกรีดิวซ์ ในขณะที่ไอออน Cl^- นั้นไม่มีส่วนในปฏิกิริยา จึงเรียกว่าเป็นสเปกเตเตอร์ไอออน

8.3.1 กฎของฟาราเดย์

กฎการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์ ได้กล่าวไว้ว่า “ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าเซลล์เป็นสัดส่วนโดยตรง กับปริมาณการเปลี่ยนแปลงสมมูลเคมีของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์นั้น” ซึ่งเขียนในดั่งสมการได้ดังนี้

$$Q = F (\text{No equivalents})$$

F เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์ เพื่อให้ความสัมพันธ์ของปริมาณไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเขียนรูปสมการได้ ตามความหมายจากสมการ F หรือเรียกเป็นฟาราเดย์เป็นปริมาณประจุที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหนึ่งกรัมสมมูลของสารที่ขั้วไฟฟ้า

F มีค่าเท่ากับ 6.022×10^{23} อิเล็กตรอน หรือ 96,485 คูลอมป์ (C) ต่อ 1 กรัมสมมูลของสาร Q แทนปริมาณประจุไฟฟ้าที่ถูกพาเข้าสู่เซลล์ โดยการไหลของกระแสที่คงที่ ที่ 1 แอมแปร์ (A) ในเวลา 1 วินาที (s) มีหน่วยเป็น C (คูลอมป์) ซึ่งเขียนในดั่งสมการได้ดังนี้

$$Q = i.t$$

ในระหว่างการทำปฏิกิริยาการแยกสลายสาร กระแสแปรไปตามเวลาด้วย ดังนั้นปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง มีค่าดั่งสมการ

8.3.2 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

ขั้วไฟฟ้า (electrode) คือ เป็นส่วนประกอบของแต่ละครึ่งเซลล์ไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ต่อเชื่อมระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า ในการจัดการวิเคราะห์หนึ่งๆ เพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้าจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือ ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด

ขั้วไฟฟ้าทั้งสองที่กล่าวมาข้างต้นมีหน้าที่แตกต่างกัน โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งจะถูกใช้เป็นเพียงขั้วที่ต่อเพื่อให้ครบวงจรไฟฟ้าเท่านั้นตามสัจนิยม ขั้วนี้มักถูกต่อไว้ทางด้านแอโนด และเรียกขั้วไฟฟ้านี้ว่า “ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode)” ลักษณะเฉพาะของขั้วอ้างอิง คือ ค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้ามีค่าเฉพาะที่ไม่แปรตามการไหลของกระแสในวงจร จัดเป็นขั้วไฟฟ้าแบบนอนโพลาไรซ์ในอุดมคติ การเปลี่ยนแปลงใดในสารละลายอันเป็นผลเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง จะไปมีผลต่อค่าศักย์ของอีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดของเซลล์ และเรียกว่า “ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode)” หรือ “ขั้วไฟฟ้าชี้บอก (indicating electrode)”

ในบางเทคนิควิธีการวิเคราะห์จำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าต่อเข้ากับวงจร 3 ขั้ว เช่น ในเทคนิคการวิเคราะห์โวลแทมเมตรี เรียกขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมานี้ว่า “ขั้วไฟฟ้าช่วย (auxillary electrode)” หรือ “ขั้วไฟฟ้าร่วม (counter electrode)” หน้าที่เฉพาะของขั้วไฟฟ้าช่วย คือ เป็นผู้ช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอน หรือกระแสไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยไม่ส่งผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร

การใช้งานของขั้วไฟฟ้าทั้งสาม คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าช่วย ทำหน้าที่ในวงจรเซลล์ไฟฟ้าได้ต่างกัน เป็นเพราะส่วนประกอบที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าไม่เหมือนกัน เนื่องจากขั้วไฟฟ้าเป็นตัวนำไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า ด้านของขั้วไฟฟ้าที่ต่อกับอุปกรณ์วัดสัญญาณมักเป็นลวดตัวนำเพื่อส่งอิเล็กตรอนไปยังอุปกรณ์วัด อีกด้านของขั้วไฟฟ้าที่จุ่มในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีส่วนประกอบแตกต่างกันไปตามแต่วัตถุประสงค์ของการใช้งาน

8.3.3 วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด

1) อะลูมิเนียม (Aluminum)

เป็นโลหะหมู่เดียวกับแกเลเลียม อินเดียม และเทลเลียม อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุด และเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสามบนผิวโลก ในธรรมชาติไม่พบอะลูมิเนียมในรูปธาตุอิสระ อะลูมิเนียมจัดว่าว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆ ได้ อะลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชันเท่ากับ +3 เมื่อโลหะให้อิเล็กตรอนออกไป 3 อิเล็กตรอน Al^{3+} มีขนาดเล็กมาก สารประกอบโลหะที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มักจะเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ อย่างไรก็ตามเมื่ออยู่ในน้ำ Al^{3+} จะเกิดไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส เกิด อัลไซด และไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายน้ำ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมมีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีประโยชน์หลากหลายชนิดหนึ่ง มีความหนาแน่นต่ำ (2.7 g/cm^3) มีความทนแรงดึงสูง นอกจากนี้เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม การนำไฟฟ้ามีค่า 65% ของทองแดง เนื่องจากอะลูมิเนียมราคาถูกและน้ำหนักเบากว่าทองแดง จึงถูกใช้เพื่อผลิตสายส่งไฟฟ้าต่างศักย์สูง แม้ประโยชน์หลักของอะลูมิเนียม คือ เพื่อผลิตเครื่องบิน

2) เหล็ก (Steels)

เป็นโลหะแข็ง ที่พบมากที่สุดบนผิวโลกรองจากอะลูมิเนียม (6.2% โดยมวล) มีจุดหลอมเหลวสูงและจุดเดือดสูง มีความว่องไวปานกลางต่อปฏิกิริยา สารประกอบของธาตุเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆ มีบ้างแต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ใน

อากาศที่มีความชื้น มักจะกลายเป็นสื่อน้ำตาลที่ผิวเรียกว่า สนิมเหล็ก ดังนั้นเครื่องมือเครื่องใช้ที่ทำด้วยเหล็ก จึงต้องหาวิธีป้องกัน เช่น ทาสีกันสนิมเคลือบด้วยโลหะที่เหมาะสม (ดีบุก สังกะสี โครเมียม) หรือผสมโลหะ บางชนิดลงไป เพื่อให้เหล็กปลอดสนิม เมื่อเผาไหม้ในอากาศจะได้ออกไซด์ผสม FeO Fe₂O₃ หรือ Fe₃O₄ ซึ่งมีประโยชน์ในการฉาบผิวเหล็กเพื่อป้องกันสนิมได้ เหล็กสามารถเกิดสารประกอบกับโลหะได้หลายชนิด เมื่อให้ความร้อน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนเมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe²⁺ และ Fe³⁺ ปนกัน เนื่องจาก Fe(II) ถูกออกซิไดซ์โดยอากาศได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะที่เป็นกลางหรือเบส ดังจะเห็นได้จากค่า E⁰



สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ Fe(II) ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของ ไอออน [Fe(H₂O)₆]³⁺ สารประกอบ Fe(III) มักมีสมบัติเป็นกรดมากกว่าของ Fe(II) ทั้งนี้ปรากฏว่า Fe(III) ในสารละลายจะอยู่ในรูปของ [Fe(H₂O)₆]³⁺ ซึ่งมีสีม่วงจาง เมื่อ pH ต่ำมากๆ เท่านั้น มิฉะนั้นจะถูกไฮโดรไลส์ กลายเป็น [Fe(H₂O)₅(OH)]²⁺ หรือไอออนเชิงซ้อนคล้ายๆ กันนี้ทำให้ได้สารละลายสีเหลือง

3) คาร์บอน (Carbon)

คาร์บอนบนผิวโลกมีเพียง 0.09% โดยมวล แต่คาร์บอนเป็นธาตุที่สำคัญมากต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิด สามารถพบคาร์บอนอิสระในรูปเพชรและแกรไฟต์ คาร์บอนยังเป็นองค์ประกอบในแก๊สธรรมชาติปิโตรเลียม และถ่านหิน คาร์บอนรวมตัวกับออกซิเจนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศหรือเกิดเป็นสารประกอบคาร์บอนเนตในหินปูนและชอล์ก คาร์บอนมีคุณสมบัติผสมผสานเฉพาะตัวจนเป็นองค์ประกอบสำคัญของแบตเตอรี่ และเซลล์เชื้อเพลิง คาร์บอนในรูปต่างๆ ทำจากส่วนประกอบสำคัญของแหล่งกำเนิดพลังงาน มานานมากกว่าหนึ่งศตวรรษครึ่ง หนึ่งในบรรดาการใช้ประโยชน์คาร์บอนในแบตเตอรี่ทางการค้า ยุคแรกสุดอยู่ในปี 1841 เมื่อ Robert Bunsen ได้เสนอให้เปลี่ยนตัวเก็บเก็บการะแสไฟฟ้าของ Grove cell จากพลาตินัมที่มีราคาแพงไปเป็นคาร์บอนซึ่งคุ้มค่ากว่า

8.3.4 การแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า

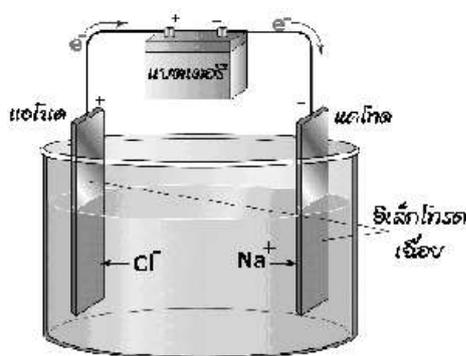
การแยกสลายด้วยไฟฟ้า คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแยกสลายด้วยไฟฟ้า คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันดังได้กล่าวไปแล้ว โดยแยกปฏิกิริยาออกเป็นสองส่วนคือออกซิเดชันกับรีดักชัน ครึ่งที่เป็นออกซิเดชันเกิดขึ้นที่แอโนด ส่วนครึ่งที่เป็นรีดักชันเกิดขึ้นที่แคโทด แอนไอออนเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากแอนไอออนให้แก่แอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนแคทไอออนเคลื่อนที่เข้าหาแคโทดแล้วรับอิเล็กตรอนจากแคโทดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน

เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงในโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลว จะได้โลหะโซเดียมเกาะที่แคโทดและแก๊สคลอรีนออกมาที่ทางแอโนด แสดงว่าเกิดปฏิกิริยาขึ้นมีการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ในสภาพของแข็งนำไฟฟ้าไม่ได้ แม้ว่าจะประกอบไปด้วยไอออนทั้งหมดก็ตาม การที่นำไฟฟ้าไม่ได้เพราะไอออนในของแข็งเคลื่อนที่ไม่ได้ แต่เมื่อให้ความร้อนจนโซเดียมคลอไรด์หลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส ใส่ขั้วไฟฟ้าที่เฉื่อย เช่น แท่งคาร์บอนหรือแพลทินัมลงไปแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากแหล่งกำเนิดไฟกระแสตรง เช่น แบตเตอรี่ จะพบว่าโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลวนำไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เพราะในสภาพของเหลวไอออนเคลื่อนที่ได้สะดวก การนำไฟฟ้าเกิดขึ้นดังกระบวนการต่อไปนี้

ก) Na^+ เคลื่อนที่ไปสู่แคโทดซึ่งมีประจุลบ รับอิเล็กตรอนจากแคโทดเกิดรีดักชัน Na^+ เปลี่ยนเป็นโลหะโซเดียม



ข) Cl^- เคลื่อนที่ไปสู่แอโนดซึ่งมีประจุบวก ให้อิเล็กตรอนแก่แอโนดเกิดออกซิเดชัน Cl^- เปลี่ยนเป็นอะตอมคลอรีนแล้วอะตอมคลอรีนสองอะตอมรวมกันเป็นแก๊สคลอรีนหนึ่งโมเลกุลได้แก๊สคลอรีนพุ่งออกมาทางแอโนด



ภาพที่ 8-1 การแยกสลายด้วยไฟฟ้าของ NaCl ที่หลอมเหลว (mahidol, 2007)

กระแสไฟฟ้าเดินครบวงจรได้เพราะแอโนดรับอิเล็กตรอนจากแอโนไอออน Cl^- อิเล็กตรอนเดินไปตามวงจรไฟฟ้านอกของเหลวมาที่แคโทด แล้วถ่ายโอนไปสู่แคโทไอออน Na^+ อิเล็กตรอนหายไปทางแคโทดแล้วได้อิเล็กตรอนกลับมาทางแอโนด ครบเป็นวงจร สำหรับภายในของเหลวการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าสืบเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของไอออนในสนามไฟฟ้า

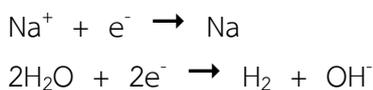
ผลที่ได้จากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน 1 โมล ทำให้เกิดโซเดียม 1 โมล และคลอรีน $\frac{1}{2}$ โมล เพื่อให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันกับรีดักชันสมดุลกัน จึงทำจำนวนอิเล็กตรอนให้เท่ากันเสีย ดังนี้



กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลงในโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลว ทำให้ได้โซเดียมที่แคโทดและแก๊สคลอรีนที่แอโนด กระบวนการเช่นนี้เป็นการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า เรากล่าวว่าโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลวถูกแยกสลายด้วยไฟฟ้า ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อนให้ปฏิกิริยาที่ไม่เกิดขึ้นเองให้เกิดขึ้นได้ อุปกรณ์ทั้งหมดซึ่งประกอบด้วยภาชนะบรรจุอิเล็กโทรไลต์ มีขั้วไฟฟ้าคู่หนึ่งต่อจากแหล่งทำไฟกระแสตรงเรียกว่าเซลล์อิเล็กโทรไลติก เซลล์ชนิดนี้ใช้พลังงานจากแหล่งภายนอกไปทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี

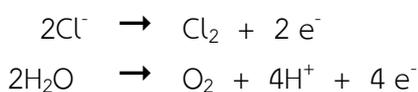
ถ้าเราทำการแยกสลายสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า ละลายโซเดียมคลอไรด์ได้จากการละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ ภายในสารละลายไม่ได้มีแต่เพียง Na^+ และ Cl^- เท่านั้น แต่ยังมีโมเลกุลน้ำซึ่งอาจถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ด้วย สิ่งที่เกิดขึ้นภายในเซลล์อิเล็กโทรไลติกมีดังนี้

- 1) Na^+ เคลื่อนที่ไปสู่แคโทด
- 2) ที่แคโทดมีทั้ง Na^+ และโมเลกุลน้ำ อาจเกิดรีดักชันขึ้นกับ Na^+ หรือโมเลกุลน้ำดังนี้

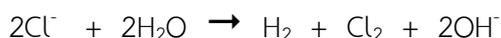


ระหว่าง Na^+ กับ H_2O จะถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่า Na^+ ปฏิกิริยาที่แคโทดจึงเป็นปฏิกิริยา ได้แก๊สไฮโดรเจน

- 3) Cl^- เคลื่อนที่ไปสู่แอโนด
- 4) ที่แอโนดมีทั้ง Cl^- และโมเลกุลน้ำ อาจเกิดออกซิเดชันขึ้นกับ Cl^- หรือโมเลกุลน้ำดังนี้



แต่เนื่องจาก Cl^- ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่า H_2O จึงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนดได้แก๊สคลอรีน ปฏิกิริยาของเซลล์ได้จากการรวมกันของปฏิกิริยาทั้งสองเข้าด้วยกัน



การแยกสลายสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เข้มข้นพอควรด้วยไฟฟ้า ได้แก๊สไฮโดรเจนที่แคโทดและแก๊สคลอรีนที่แอโนด ส่วน Na^+ คงอยู่ในสารละลายตามเดิมและเมื่อทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้าเรื่อยไปนานเข้าก็จะมี OH^- สะสมมากขึ้น ภายหลังการแยกสลายด้วยไฟฟ้าแล้ว ถ้าเอาสารละลายที่เหลือไประเหยจะได้ของแข็งโซเดียมไฮดรอกไซด์ตกผลึกออกมา การแยกสลายสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้าจึงเป็นวิธีเตรียมโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือโซดาไฟด้วย

8.3.5 หลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับเรื่องต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

8.3.5.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้าเพราะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านตัวนำในการผลักดันประจุ 1 คูโลมบ์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรนั้น และจะต้องมีการรับหรือปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วยเสมอ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูล ในการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ 1 คูโลมบ์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์ จะหมายความว่าจุดสองจุดนั้นมีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้นความต่างศักย์ 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูโลมบ์และทางไฟฟ้าเคมีมักจะแทนโวลต์ด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้างกล่าวข้างต้น ทำให้เห็นได้ว่า

$$\text{งานทางไฟฟ้าสุทธิ (Welec)} = \text{คูโลมบ์} \times \text{โวลต์}$$

แต่งานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้านั้นเพราะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วย คูโลมบ์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมลของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คู

ลอมบ์ สมมติว่า ในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายเทอิเล็กตรอน n โมล จะมีปริมาณประจุเท่ากับ $n \times 96,487$ หรือ nF คุลอมบ์ ในเมื่อ F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ $96,487$ คุลอมบ์ต่อโมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการที่ 2.15 จะเปลี่ยนเป็น

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

แต่งานนี้จะเกิดขึ้นได้ต้องมีการลดพลังงานอิสระที่มีอยู่ในเซลล์ด้วย และในกรณีที่ปฏิกิริยาในเซลล์เกิดขึ้นอย่างผันกลับได้ การลดพลังงานอิสระ ($-\Delta G$) จะเท่ากับงานที่กระทำตังนั้น

$$\Delta G = -nFE$$

สมการนี้เป็นสมการที่มีความสำคัญมากเพราะเป็นสมการที่เชื่อมระหว่างความรู้ทาง อุณหพลศาสตร์เข้ากับไฟฟ้าเคมี ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ได้ แล้วจะสามารถหาสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ต่างๆ เช่น ΔG , ΔH , ΔS ได้ ในปฏิกิริยาหนึ่งๆ เครื่องหมายของ ΔG มีความสำคัญมาก คือถ้าที่อุณหภูมิและความดันหนึ่งๆ ΔG มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่ได้เอง ΔG จะมีเครื่องหมายเป็นบวก ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในสภาวะสมดุล ΔG จะเท่ากับศูนย์ แต่ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย่อมจะระบุให้ทราบว่าปฏิกิริยาในเซลล์นั้นเป็นแบบเกิดได้เองหรือเกิดไม่ได้เอง หรืออยู่ในสภาวะสมดุล

ตารางที่ 8-4 ความหมายของเครื่องหมายของ ΔG และ ΔE

ประเภทของปฏิกิริยา	เครื่องหมายของ ΔG	เครื่องหมายของ ΔE
เกิดได้เอง	ลบ (-)	บวก (+)
เกิดไม่ได้เอง	บวก (+)	ลบ (-)
ที่ภาวะสมดุล	ศูนย์ (0)	ศูนย์ (0)

ที่มา: กัญจมาศ (2539)

8.3.5.2 ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด ในทางปฏิบัตินั้นไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐานขึ้น คือ กำหนดให้อิเล็กโทรดไฮโดรเจนเมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน (คือผ่านก๊าซไฮโดรเจนที่มีความดัน 1 บรรยากาศ ลงไปในสารละลายที่มีลวดแพลทินัมจุ่มอยู่และสารละลายนั้นมีไฮโดรเจนไอออนที่มีแอกติวิตีเท่ากับ 1 หรือมีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรโดยประมาณ) มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ที่ทุกอุณหภูมิ ศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น Cu/Cu^{2+} หรือ Zn/Zn^{2+} เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนและวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0_{cell}) และเป็นค่าเดียวกันกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E^0) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำให้เช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ

ค่าศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทรดที่จะรับอิเล็กตรอนว่ามีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่าเป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดซ์ (หรือตัวรีดิวซ์) เช่น ครึ่งปฏิกิริยา Li^+/Li มีค่า E^0 เป็นลบมาก แสดงว่า Li^+ มีความสามารถน้อยในการรับอิเล็กตรอน จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อนมาก แต่ครึ่งปฏิกิริยา F_2/F^- มีค่า E^0 เป็นบวกมาก แสดงว่า F_2 มีความสามารถสูงในการรับอิเล็กตรอน จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก ในทางกลับกันโลหะ Li มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนได้ดี ดังนั้นโลหะ Li จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีมากและ F^- มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนได้ยาก จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่อ่อนมา ส่วนอีกตัวอย่างคือ MnO_4^- กับ Fe^{2+} ในสารละลายพบว่า ค่า E^0 ของระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ เท่ากับ +0.77 โวลต์ และค่า E^0 ของ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ เท่ากับ +1.52 โวลต์ แสดงว่าระบบ $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ มีแนวโน้มที่จะรับ อิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีกว่า จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

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

ในทำนองเดียวกัน ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใดๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกัน คือ

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

ตารางที่ 8-5 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส

ครึ่งปฏิกิริยา	ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรด (โวลต์)
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Fe}(s)$	-0.440
$\text{Fe}^{3+} + e^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	0.771

ที่มา: ทบวงมหาวิทยาลัย (2528)

8.4 กฎของฟาราเดย์เกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี

ปริมาณไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ หมายถึง ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านลงไปในการละลายในเซลล์อิเล็กโทรไลต์เพื่อให้อิเล็กตรอน 1 โมล ทำปฏิกิริยารีดอกซ์หรือผลคูณของประจุไฟฟ้ากับจำนวนอิเล็กตรอน 1 โมล

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

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

หรือ 1 ฟาราเดย์คือไฟฟ้า 1 ฟาราเดย์ทำให้เกิดสารแต่ละชนิดที่ขั้วไฟฟ้าจำนวน 1 โมล เท่ากัน

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

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

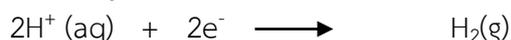
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าจะสามารถอธิบายด้วย กฎของฟาราเดย์ดังสมการต่อไปนี้

$$W = \frac{itM}{ZF}$$

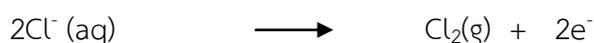
โดย	W	คือ ปริมาณโลหะที่ละลาย (g)
	I	คือ กระแสไฟฟ้า (A)
	M	คือ น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด
	t	คือ เวลาที่ใช้ (วินาที)
	Z	คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
	F	คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,500

8.5 กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

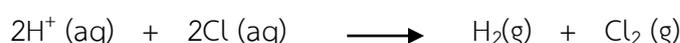
จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถบอกได้ว่า ปฏิกิริยานั้นๆเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าบวก ปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นเองได้ แต่ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของปฏิกิริยามีค่าเป็นลบ ปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นเองไม่ได้ เมื่อปฏิกิริยาดังกล่าวได้รับพลังงานจากแหล่งไฟฟ้าภายนอกจะสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีโดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกเรียกว่า อิเล็กโทรลิซิส ส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสคือ แหล่งให้พลังงานไฟฟ้า อิเล็กโทรดสองขั้ว(Electrode)และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในส่วนของอิเล็กโทรดสองขั้วและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้วเรียกว่าเซลล์อิเล็กโทรลิติก สำหรับอิเล็กโทรดสองขั้วนั้น ขั้วหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเรียกขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันว่า แอโนด(Anode) ส่วนขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันเรียกว่า แคโทด(Cathode) ตัวอย่างของเซลล์อิเล็กโทรลิติก คือ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นพอประมาณในน้ำโดยใช้แกรไฟต์เป็นอิเล็กโทรด สารละลายกรดไฮโดรคลอริกจะแตกตัวออกเป็น H^+ และ Cl^- ไอออน เมื่อใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแล้วมีเส้นลวดต่อไปยังอิเล็กโทรดที่ทำด้วยแกรไฟต์ พบว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในขณะเดียวกันอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้นรอบๆ และผุดขึ้นมาจากสารละลาย ส่วนอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่เกิดฟองก๊าซคลอรีนเช่นกัน การเกิดฟองก๊าซที่อิเล็กโทรดทั้งสองนี้แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ เมื่อปิดวงจรอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปตามเส้นลวดจนถึงอิเล็กโทรดซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ไอออนบวก H^+ จะเคลื่อนที่มารับอิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดนี้และถูกรีดิวซ์เป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการ



ส่วนไอออนลบ Cl^- จะให้อิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วของแบตเตอรี่ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนด ดังสมการ



อิเล็กตรอนที่ได้จะเคลื่อนที่ไปสู่อิเล็กโทรดของแบตเตอรี่ทำให้ครบวงจร ปฏิกิริยาของเซลล์จึงได้จากผลบวกของสมการ ดังนี้



8.6 ดัชนีที่มีผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียมีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าเคมี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำความเข้าใจดัชนีต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าเคมี

8.6.1 ค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีจะใช้ไฟฟ้ากระแสตรง นั่นคือไฟฟ้าที่มีทิศทางการเคลื่อนที่หรือการไหลของอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดไปสู่เครื่องใช้ไฟฟ้าได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น ส่วนความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไหลในวงจรไฟฟ้า โดยจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากจุดที่เป็นประจุลบไปสู่จุดที่เป็นประจุบวก ในวงจรไฟฟ้าใดๆก็ตาม จะมีสิ่งที่ต้านทานการไหลของอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าตลอดเวลาเรียกว่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า สิ่งที่ยับยั้งให้กระแสไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในวงจรเรียกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความต้านทานกระแสไฟฟ้า มีความสัมพันธ์กันตามกฎของโอห์ม ซึ่งกล่าวว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลไปในวงจรได้จะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้า สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการ ดังสมการ

$$V = I \times R$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีคือความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ตามสมการ

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

เมื่อ R เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์ม

l เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดในหน่วยเซนติเมตร

C เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโมห์ หรือซีเมน

A เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยตารางเซนติเมตร

ซึ่งสามารถหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้จากเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

8.6.2 ประเภทของสี

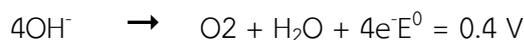
สีของน้ำมี 2 ประเภท คือ สีจริง(True color) และสีปรากฏ (Apparent)

1.สีจริง (True color) เกิดจากการละลายของสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำ ได้แก่โปรตีน ไซมันคาร์โบไฮเดรต และสารประกอบของสารทั้งสามประเภทดังกล่าว โดยปกติสีจริงของน้ำจะทราบได้โดยการเก็บตัวอย่างน้ำ มาทำให้ตกตะกอนด้วยการปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) หรือการกรองด้วย Millipore filter เพื่อกำจัดอนุภาคแขวนลอยออกไปแล้วนำส่วนที่เป็นน้ำใสมาทำการเปรียบเทียบกับสารละลายสีมาตรฐาน การวัดสีจริงให้ระวังขั้นตอนการกรองตัวอย่างน้ำ กระดาษกรองอาจดูดซึมน้ำและทำให้ค่าสีที่วัดคลาดเคลื่อนได้

2.สีปรากฏ (Apparent) เกิดจากการสะท้อนของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ได้แก่ พืชเล็ก ๆ ในน้ำ เช่น Phytoplankton และ Zooplankton รวมทั้งสิ่งที่ไม่มีชีวิตบางประเภท เช่น เปลือกของซากพืชและซากสัตว์ต่างๆ ตะกอนของดิน และทราย การหาสีปรากฏไม่ต้องผ่านการกรองหรือการปั่นเหวี่ยงตัวอย่างน้ำก่อน

8.6.3 สารอินทรีย์

ปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นที่แอโนด เช่น ไอออนลบถูกทำให้เป็นกลางหรืออาจจะให้โอเล็กตรอน ซึ่งในปฏิกิริยาที่มีศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาต่ำจะเกิดปฏิกิริยาก่อน เช่นดังสมการ



ในทางทฤษฎีจลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่โอเล็กโทรมจะให้อนุพันธ์อิสระซึ่งว่องไวในการทำปฏิกิริยา เช่น OH^- ซึ่งสูญเสียโอเล็กตรอน แต่ยังไม่สามารถทำปฏิกิริยากันเองหรือกับไอออนหรือสารประกอบ หรืออนุพันธ์อิสระอื่นๆ บริเวณโอเล็กโทรม รวมทั้งสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยหรืออาจจะรวมตัวกับอนุพันธ์อิสระอื่น ได้สารที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์และถ้าในน้ำเสียมีคลอไรด์ไอออน พบว่าวิธีไฟฟ้าเคมีจะทำให้เกิดก๊าซคลอรีนและอนุพันธ์ของคลอรีนที่แอโนด ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ได้อีกด้วย แต่การกำจัดสารอินทรีย์แบบสมบูรณ์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ไม่เป็นที่ยอมรับ เพราะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ใช่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย จะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์บางตัวในอัตราการกำจัดต่ำและบางสถานะเท่านั้น เช่น ในสถานะที่ใช้แพลทินัมเป็นโอเล็กโทรมในสารละลายกรดเข้มข้นหรือด่างเข้มข้นที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นต้น

สถานะเช่นนี้ไม่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องใช้ปริมาณสารเคมีมาก วัสดุที่ใช้ทำโอเล็กโทรมมีราคาแพงและต้องใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ยิ่งไปกว่านั้น การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ต้องการการถ่ายเทโอเล็กตรอนจำนวนมาก จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงไปได้ ในบางครั้งเพียงการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เล็กลงจะสามารถลดความเป็นพิษได้แล้ว ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ต้องใช้โอเล็กโทรมที่มีพื้นที่ผิวมาก เช่น คาร์บอน เป็นต้น

8.6.4 ค่า pH

เมื่อกล่าวถึงสารละลายน้ำ (aqueous solution) ไม่ว่าจะเป็นสารละลายกรด เบส หรือเกลือ เรามักจะสนใจว่าสารละลายนั้น มีความเป็นกรดหรือเบสมากน้อยแค่ไหน สิ่งที่ยังชี้ความเป็นกรดคือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน $[\text{H}^+]$ และสิ่งที่บ่งชี้ความเป็นเบสคือความเข้มข้นของไฮดรอกซิลไอออน $[\text{OH}^-]$ ความเข้มข้นของ H^+ และ OH^- ในน้ำน้อยมาก เช่น น้ำบริสุทธิ์จะแตกตัวให้ $\text{H}^+ 10^{-7}$ โมล/ลิตร การที่จะกล่าวถึงความเข้มข้นของ H^+ ด้วยตัวเลขดังกล่าวเป็นการไม่สะดวก จึงใช้บอกด้วยหน่วยที่เรียกว่า pH (positive potential of the hydrogen ions) โดยกำหนดให้

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

เมื่อ $[\text{H}^+]$ คือความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนมีหน่วยเป็น โมล/ลิตร

Sorenson ได้จัดให้ pH สเกลอยู่ในช่วง 0-14 โดยที่สารละลายกรดจะมี pH น้อยกว่า 7 และสารละลายเบสจะมี pH มากกว่า 7 ส่วนสารละลายที่เป็นกลางจะมี pH เท่ากับ 7 ค่า $[\text{H}^+]$ ยิ่งมาก สารละลายยิ่งเป็นกรดมาก pH ยิ่งต่ำ ซึ่งเป็นการกลับกัน การบอกความเป็นเบสของสารละลายอาจใช้ pOH โดยให้

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-]$$

8.6.5 คอลลอยด์

เป็นสถานะที่สารใดสารหนึ่งอยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆ แขนวนลอยอยู่ในตัวกลางหรือตัวทำละลาย สถานะนี้เป็นประเภทเนื้อผสม อนุภาคเหล่านี้อาจจะละลายในตัวทำละลายได้บ้าง แต่ไม่สามารถละลายได้หมด จึงปรากฏในรูปแขวนลอยอยู่ซึ่งจะคงสถานะ และไม่ยอมรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคคอลลอยด์มีขนาด 1-1,000 นาโนเมตร ถ้าพิจารณาจากเสถียรภาพ อาจจำแนกคอลลอยด์ออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพในตัวเอง ตัวอย่างระบบคอลลอยด์ประเภทนี้ ได้แก่ กาว แป้ง และสบู่ ซึ่งเกิดระบบคอลลอยด์ที่เสถียรในน้ำได้

2) คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพเนื่องจากสารอื่น แบ่งเป็น

ก) คอลลอยด์ที่สารอื่นป้องกัน เช่น หยตน้ำมันไม่อาจเกิดระบบคอลลอยด์ในน้ำได้ แต่ถ้าเติมสบู่ลงไปบ้างแล้วคนให้ทั่ว ส่วนที่ขบของสบู่จะละลายหยตน้ำมัน ซึ่งทำให้น้ำมันกระจายไปในน้ำในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ด้วย

ข) คอลลอยด์ที่ดูดซับไอออน เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ อนุภาคคอลลอยด์ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ดูดซับ H^+ ไว้ที่ผิวของอนุภาค ทำให้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มีประจุบวก การดูดซับ H^+ ที่ผิวของอนุภาค $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จึงทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อนุภาคต่างๆ ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มีโอกาสรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น อนุภาคคอลลอยด์ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จึงอยู่ได้อย่างเสถียร อีกตัวอย่างหนึ่ง ได้แก่ ระบบคอลลอยด์ของ As_2S_3 ซึ่งถูกทำให้เสถียรโดย OH^- และ SH^- ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ของ As_2S_3 จึงมีประจุลบ

8.7 หลักในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีหลายแบบดังภาพที่ 8-2 ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่จะประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีคือ

8.7.1 เครื่องปฏิกรณ์ควรเป็นแบบที่ง่ายที่สุดและค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ควรหลีกเลี่ยงการออกแบบระบบที่มีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย

8.7.2 เครื่องปฏิกรณ์ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้อย่างสมบูรณ์ก่อนจะผ่านสู่ขั้นตอนอื่น ในกรณีที่มีกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาเกี่ยวข้อง ควรทำการแยกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี

8.7.3 เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจจะต้องใช้แผ่นกั้นหรือใบพัด

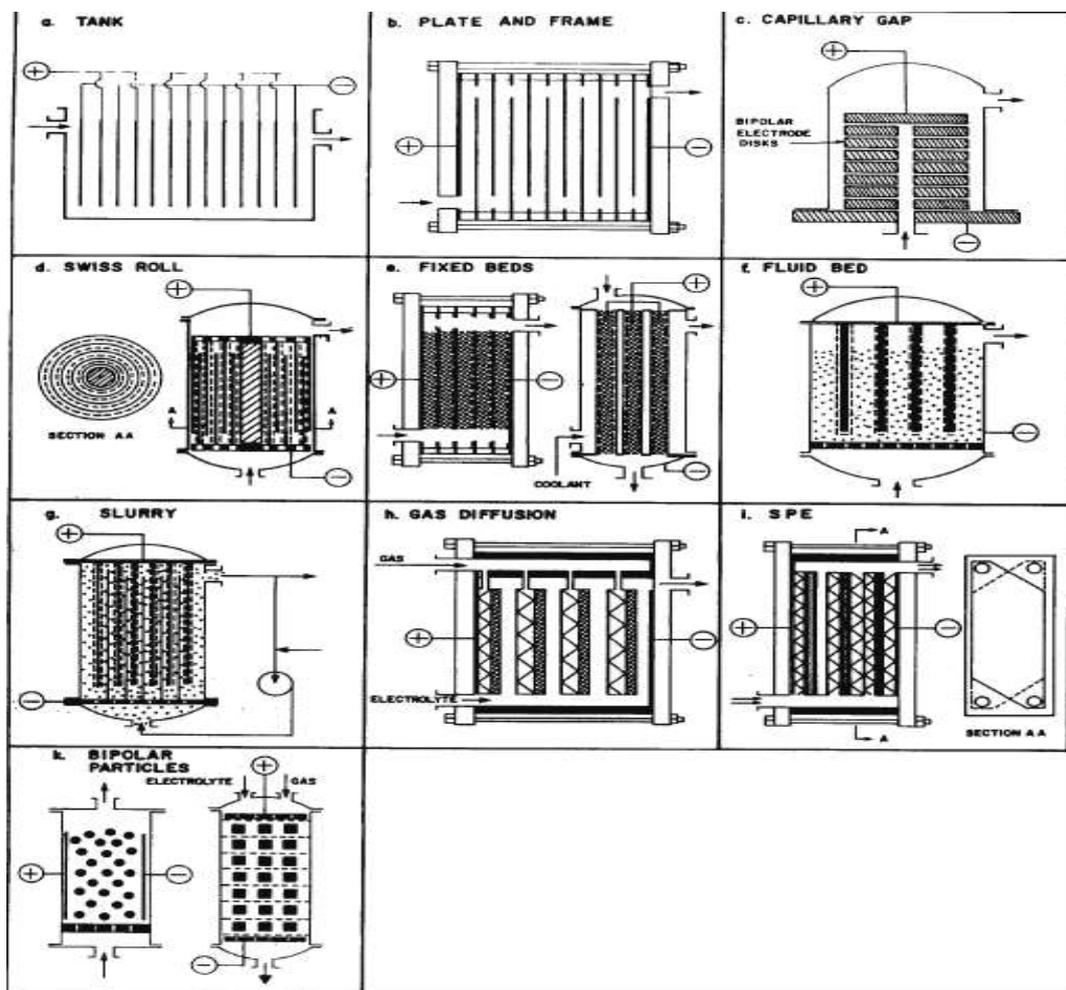
8.7.4 ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของอิเล็กโทรด

8.7.5 ควรออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยเพราะระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดยิ่งมากจะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง ซึ่งจะทำให้ค่าไฟฟ้าสูงขึ้น

8.7.6 การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้น ต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีโดยสามารถคงทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน

8.7.7 การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้น ให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัดและปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แกรไฟต์ ไม่นิยมทำอิเล็กโทรดเนื่องจากจะถูกออกซิไดซ์ด้วย CO_2 และมีราคาแพง เป็นต้น

8.7.8 การวางอิเล็กโทรดในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบ ขึ้นกับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางอิเล็กโทรดในแนวตั้ง เพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นตัวพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอน ควรวางอิเล็กโทรดในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง



ภาพที่ 8-2 ตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ
ที่มา : Oloman (1983)

8.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mahmut Bayramoglu และคณะ (2003) เป็นการศึกษาถึงการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการบำบัดน้ำเสียสีย้อมอีกวิธีหนึ่ง โดยงานวิจัยส่วนมากจะทำการศึกษาเฉพาะเทคนิควิธีการดำเนินการของกระบวนการ ในขณะที่ทางด้านเศรษฐศาสตร์ยังไม่มีการศึกษาอย่างแน่ชัด งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสำหรับการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยกระบวนการการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าที่ทำจากอะลูมิเนียมและเหล็ก ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของกระบวนการ เช่น ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำเสีย, pH, ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า และเวลาที่ให้กระแสไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียสีย้อม โดยจะทำการศึกษาแยกระหว่างอะลูมิเนียมและเหล็ก

ปาริฉัตร และคณะ (2548) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบด้ายพุ่งของอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้มีขนาด 3 ลิตร การจัดวางขั้วไฟฟ้าแบบมอโนโพลาร์ต่อแบบขนาน ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นขั้วเหล็กมีขนาด $86 \times 124 \times 1$ มิลลิเมตร โดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้ คือ ค่า pH ของน้ำเสียเริ่มต้น 2.98-9.02 อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ 1.23-4.1 ลิตร/นาที่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.2-31 แอมแปร์/ตารางเมตร ความเข้มข้นของน้ำมันของน้ำเสียเริ่มต้น 115-672 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัด 15-60 นาที จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไขมันในน้ำเสียน้อยลง โดยภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบด้ายพุ่ง คือ ค่า pH ของน้ำเสียเริ่มต้นประมาณ 7.7 อัตราการไหลวนของน้ำเสียเท่ากับ 4.1 ลิตร/นาที่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 18.6 แอมแปร์/ตารางเมตร ระยะเวลาในการบำบัด 60 นาที โดยที่ภาวะดังกล่าวสามารถลดค่าน้ำมัน CODs ค่าของแข็งแขวนลอย และค่าบีโอดี ได้ 97.2, 67.9, 16.7 และ 80.8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยมีต้นทุนการดำเนินงานรวมเพียง 12.19 บาท/ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีสมบัติผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำนี้สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

วรรณวรรณ (2546) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟโดยการใส่ กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งแบ่งเป็น 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง (CI Reactive Red 180) ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจะปรับเปลี่ยนชนิดของขั้วไฟฟ้าโดยใช้ขั้วเหล็ก อะลูมิเนียม และสแตนเลส ปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ 3 ค่า คือ 10, 20 และ 30 โวลต์ ปรับเปลี่ยนค่าเวลาเก็บกักตั้งแต่ 0.5-3 ชั่วโมง ขนาดพื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า 8 ค่า คือ 0.5×6.5 , 3×6.5 , 4×6.5 , 5×6.5 , 6.5×6.5 , 8×6.5 และ 11×6.5 ตารางเซนติเมตร ค่า pH 4 ค่า คือ pH 3, 7 และ 10 ปรับค่าความนำไฟฟ้าให้เท่ากับค่าความนำไฟฟ้า ของน้ำเสียรวมและน้ำเสียจากหม้อย้อมเป็น 7.2 กับ 72 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือใช้ขั้วเหล็กขนาด 3×6.5 เซนติเมตรขึ้นไป ใช้ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์โดยใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง ถ้าไม่ปรับค่าความนำไฟฟ้า แต่ถ้าปรับค่าความนำไฟฟ้าเป็น 7.2 มิลลิซีเมนต์/เซนติเมตร จะใช้ความต่างศักย์ที่ 6.4 โวลต์ และเวลาที่ใช้จะเหลือเพียง 30 นาที และการทดลองที่ 2 จะศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทางเคมี ที่ไม่ผ่านและหลังผ่านการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่าการใช้วิธีการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ก็สามารถกำจัดสีได้มีประสิทธิภาพเป็นอย่างดี ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีร่วมด้วย โดยสามารถกำจัดสีได้สูงมากถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป ส่วนประสิทธิภาพการกำจัด CODs ไม่สูงมากนักเพียง 55 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยืนยันได้ว่าการกำจัดสีไม่ได้เกิดจากการตกตะกอนของสีย้อมเพียงอย่างเดียว แต่สีมีการเปลี่ยนโครงสร้างของสีย้อมโดยเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน pH ของน้ำหลังการทดลองมีค่าสูงมากขึ้นเท่ากับ 9 อุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นถึง 38 องศาเซลเซียส เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัม/ลิตร การทดลองที่ 3 คือการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียจริงจากโรงฟอกย้อม โดยใช้ใช้น้ำเสียรวมก่อนผ่านการบำบัดและน้ำเสียจากหม้อย้อมซึ่งมีความเข้มข้นสี 500 มิลลิกรัม/ลิตร โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น แต่มีการเปลี่ยนระยะเวลาที่ใช้ทดลอง และค่าความต่างศักย์เป็น 2 นาที และ 6.4 โวลต์ สำหรับน้ำเสียรวม เนื่องจากมีค่าความเข้มข้นน้อยลงและค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าไฟฟ้าเท่ากับ 2.7 บาท/ลูกบาศก์เมตร และสำหรับน้ำเสียจากหม้อย้อมจะใช้เวลาเท่ากับ 1.5 ชั่วโมง เพราะความเข้มข้นสีสูงขึ้นและความต่างศักย์เท่ากับ 2 โวลต์ เนื่องจากค่าความนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นมาก ซึ่งมีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ โดยค่าไฟฟ้าเท่ากับ 31.95 บาท/ลูกบาศก์เมตร จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีจะมากถึง 85 และ 98 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ซึ่งถือว่าเป็นที่น่าพอใจ

บทที่ 9

ระเบียบและวิธีการวิจัย

9.1 ขอบเขตงานวิจัย

- 1 น้ำเสียจริงการย้อมไหม และล้างไหมจากศูนย์นวัตกรรมหม่อนไหม
- 2 ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการขนาดความจุ 200 ลิตรต่อวัน
- 3 ข้อกำหนดถังปฏิกรณ์ที่ทำการศึกษาได้แก่
 - ระยะห่างของขั้วแอโนด และ คาโทด คงที่ 2 เซนติเมตร
 - ขนาดของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ของขั้ว 1-5 mA/cm²
 - ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ใช้เหล็ก
 - ระยะเวลาพักเก็บ(HRT) 30-200 นาที
 - ลักษณะการไหลของน้ำ Up - Flow
- 4 พารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ทำการศึกษาได้แก่
 - ซีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, สี, เหล็ก, และ น้ำมันและไขมัน
- 5 ค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ คำนวนจาก ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าการสูญเสียโลหะ และ ค่าฝังกลบกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

9.2 การเตรียมน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียจากการทดลองได้จากน้ำเสียที่ศูนย์นวัตกรรมหม่อนไหม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ทำการนำตัวอย่างทันทีหลังจากการย้อมไหม และ เก็บไว้ในตู้อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง

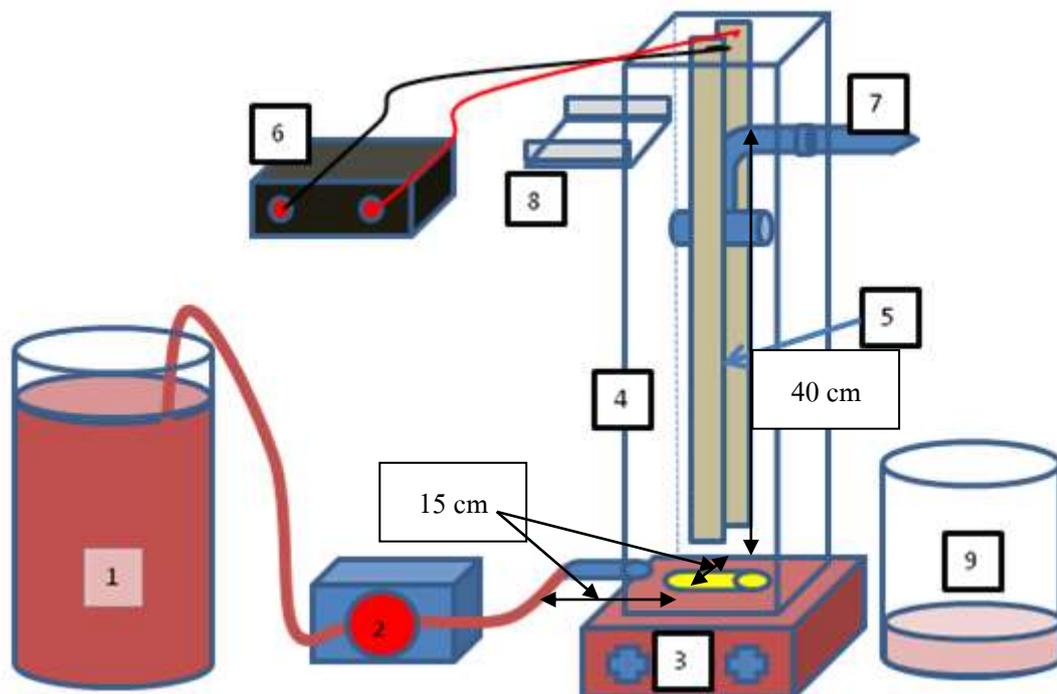
9.3 การติดตั้งถังปฏิกรณ์บำบัด

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะประกอบไปด้วย (ตามหมายเลขในภาพที่ 9-1)

- (1) ถังปรับสภาพ
- (2) ปั๊ม (Peristaltic pump)
- (3) เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic Stirrer)
- (4) ถังปฏิกรณ์ ขนาด 9 ลิตร
- (5) ขั้วไฟฟ้า(Electrode)แผ่นเหล็กหนา 2 มิลลิเมตร ขนาด 40 × 2 เซนติเมตร
- (6) เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (Dynamo)
- (7) ทางออกน้ำใส
- (8) ทางออกตะกอน
- (9) ถังรับน้ำใส

9.3.1 ถังปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องทำด้วยอะครีลิกใส ขนาด 15×15×40 เซนติเมตร คิดเป็นปริมาตร 9 ลิตร ปริมาตรน้ำเข้าจริงคิดเป็น 9 ลิตร แสดงดังภาพที่ 9-1

9.3.2 ปั๊มน้ำ (Peristaltic pump) จ่ายน้ำเข้าถังปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊มน้ำที่ปรับอัตราการไหลดังตาราง 3-1 (Peristaltic pump) สูบน้ำจากถังปรับสภาพ (Equalization Tank) แสดงดังภาพที่ 9-1



ภาพที่ 9-1 การติดตั้งเครื่องมือการทดลอง Electrocoagulation แบบต่อเนื่อง

9.3.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังภาพที่ 3-1 ที่สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 700 มิลลิแอมแปร์ การปรับค่ากระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังตารางที่ 3-2

9.3.4 ขั้วไฟฟ้า (Electrode) เป็นขั้วเหล็ก (steel plate) ทั้งแคโทดและแอโนด (แสดงดังภาพที่ 3-1) ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร หนา 0.2 เซนติเมตร เป็นพื้นที่สัมผัสกับน้ำเสีย 132 ตารางเซนติเมตร โดยวางระยะห่างระหว่างขั้ว 2 เซนติเมตร ก่อนทำการทดลองเหล็กที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งแคโทดและแอโนด จะต้องนำไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl) 15% ประมาณ 30 นาทีแล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น เช็ดให้แห้งจากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง ทำมาใช้ทันที (เนื่องจากหากทิ้งไว้จะเกิดสนิมเหล็ก)

ตารางที่ 9-1 การคำนวณระยะเวลาพักในแต่ละอัตราการไหล

อัตราการไหล (มิลลิลิตร/นาที่)	ระยะเวลาพักเก็บ (นาที่)
50	198.0
100	99.0
150	66.0
200	49.5
250	39.6
300	33.0

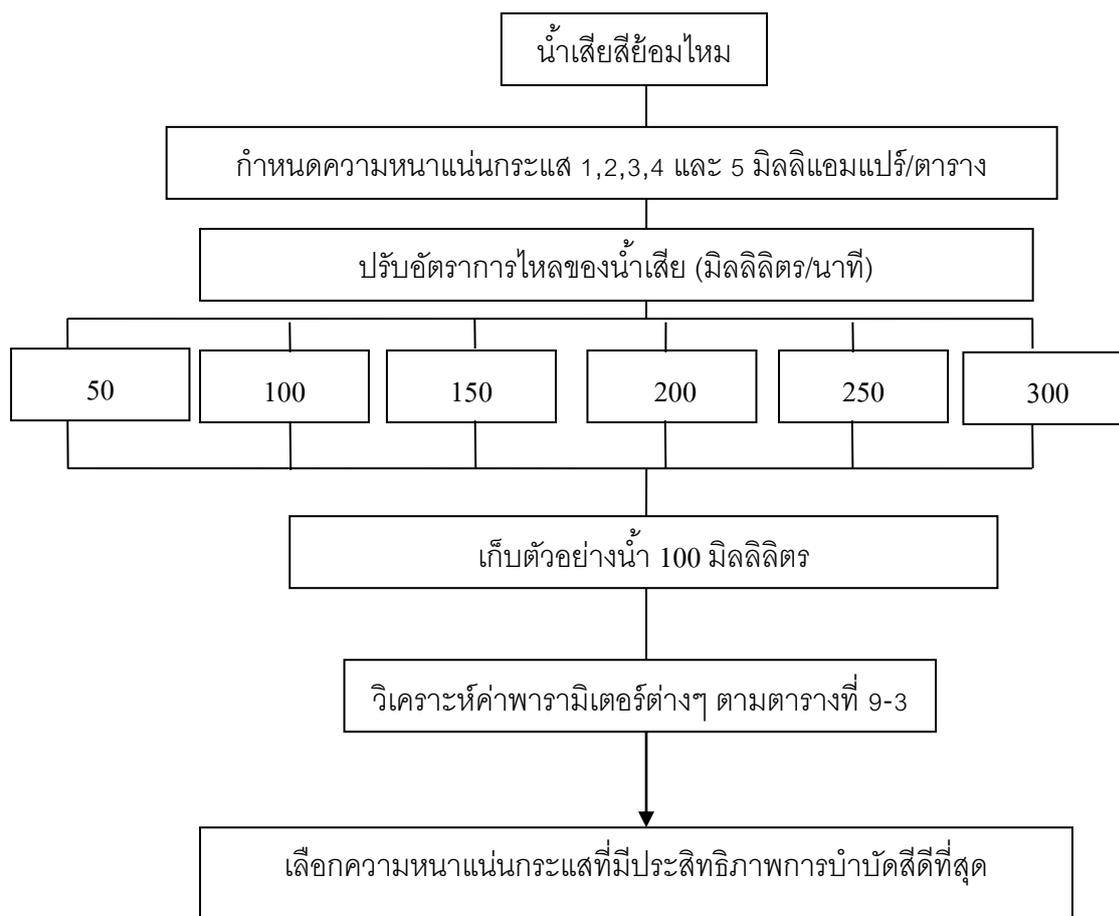
ตารางที่ 9-2 การคำนวณการปรับกระแสไฟฟ้า

	ข	กxข
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร)	พื้นที่จมน้ำ (ตารางเซนติเมตร)	กระแสไฟฟ้า (mA)
1	132	132
2	132	264
3	132	396
4	132	528
5	132	660

9.4 วิธีการทดลอง

9.4.1 ศึกษาความหนาแน่นกระแส และอัตราการไหลของน้ำเสีย

โดยกำหนดความหนาแน่นกระแสที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร และจะปรับอัตราการไหลที่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิลิตร/นาที่ และจะเก็บตัวอย่างครั้งละ 100 มิลลิลิตร เพื่อทำการวิเคราะห์ pH, ซี, CODs, ปริมาณเหล็กละลายและของแข็งแขวนลอย ดังตารางที่ 9-3 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ



ภาพที่ 9-2 วิธีการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหล

9.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis)

นำผลที่ได้จากการทดลองมาเขียนความสัมพันธ์ เพื่อเลือกความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหลที่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุด ดังนี้

- (1) ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสในแต่ละอัตราการไหล
- (2) ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดต่อความหนาแน่นกระแสในแต่ละอัตราการไหล
- (3) ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัด CODs กับความหนาแน่นกระแสในแต่ละอัตราการไหล
- (4) ความสัมพันธ์ระหว่างผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหลต่อปริมาณเหล็กละลาย
- (5) ความสัมพันธ์ระหว่างผลการของประสิทธิภาพจากปริมาณเหล็กที่ละลายต่ออัตราส่วนของภาระสีจากการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลที่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิลิตร/นาทื นำไปคำนวณอัตราภาระสี (loading rate) ดังสมการ (9-1)

$$\text{อัตราภาระสี} = (\text{อัตราการไหล} \times \text{ความเข้มข้นของสี}) / 1000 \quad (9-1)$$

และจากการปรับเปลี่ยนความหนาแน่นกระแสเข้ามาคำนวณปริมาณเหล็กที่ละลาย โดยใช้สมการที่ (9-2)

$$W = ItM / ZF \quad (9-2)$$

โดย	W	=	ปริมาณโลหะที่ละลาย (กรัม)
	I	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	M	=	น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด
	t	=	เวลาที่ใช้ (วินาที)
	Z	=	จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
	F	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487 คูลอมป์

9.4.3 ศึกษาค่าใช้จ่ายของการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

(1) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

จากสูตรที่ (9-3)

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{ค่ายูนิต/หน่วย}) + (\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้} \times \text{FT}) + (\text{VAT} 7\%) \quad (9-3)$$

โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้หาได้จากสมการที่ (9-4)

	W	=	VIT / 1000	(9-4)
โดยที่	W	=	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	
	V	=	ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)	
	I	=	ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	
	T	=	ระยะเวลาที่ใช้ไฟฟ้า (ชั่วโมง)	

(2) ค่ากำจัดตะกอน

โดยคำนวณได้จาก ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมกับปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น

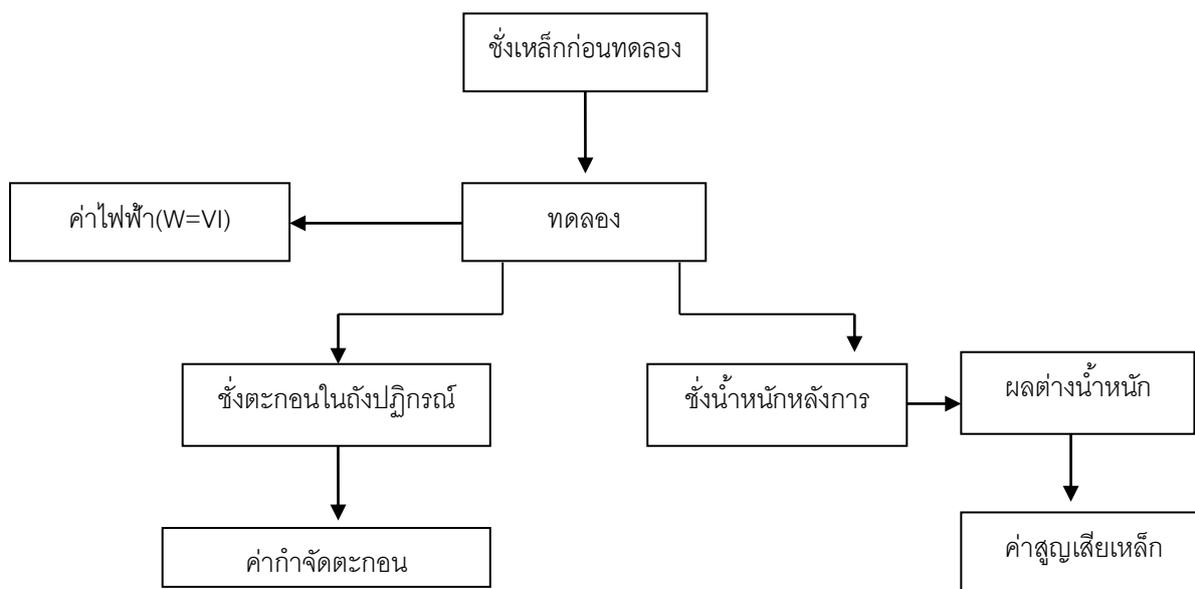
(3) ค่าขั้วไฟฟ้าเหล็ก

ซึ่งหาปริมาณน้ำหนักขั้วไฟฟ้าก่อนบำบัดและหลังบำบัด เพื่อหาปริมาณของแผ่นเหล็กที่แตกตัว ซึ่งก่อนขังขั้วไฟฟ้ามีวิธีการเตรียมดังนี้

(3.1) นำขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการเตรียม (ขั้วไฟฟ้าก่อนบำบัด) หรือขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการบำบัด (ขั้วไฟฟ้าหลังบำบัด) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง และนำไปเข้าโถทำแห้ง 1 ชั่วโมง

(3.2) นำขั้วไฟฟ้าที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก

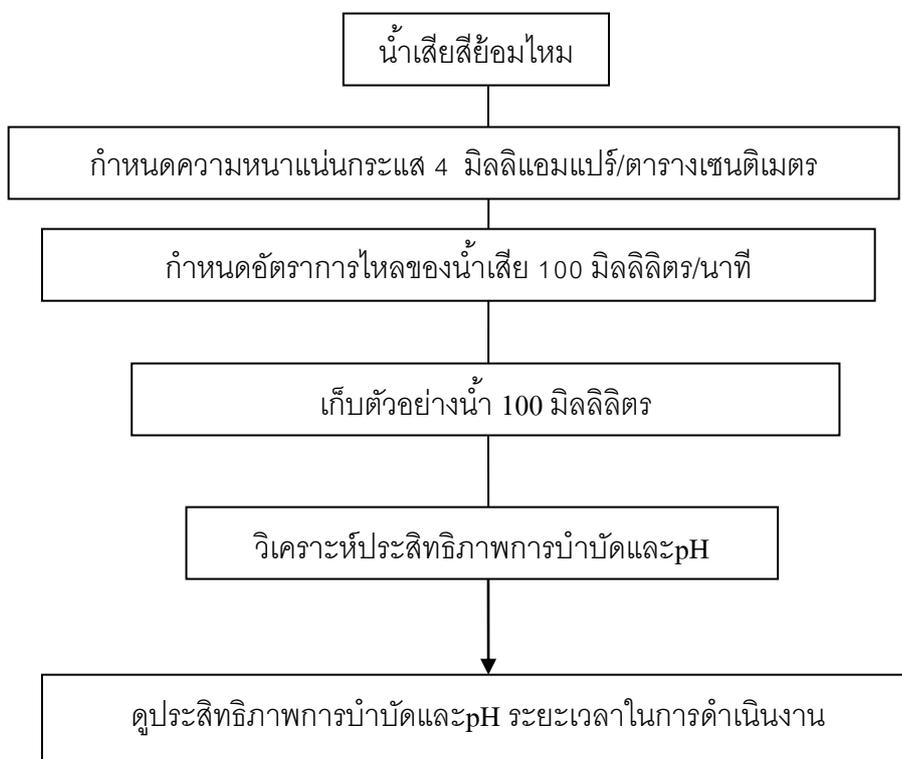
(3.3) น้ำหนักขั้วไฟฟ้าก่อนบำบัด - น้ำหนักขั้วไฟฟ้าหลังบำบัด = น้ำหนักขั้วไฟฟ้าที่สลายไป



ภาพที่ 9-3 ขั้นตอนการศึกษาค่าใช้จ่ายในการเดินระบบบำบัด

9.4.4 การทดลองเดินระบบ

หลังจากได้สภาวะที่ดีที่สุดแล้วซึ่งนั่นก็คือที่ความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร และที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที จะถูกนำมาเดินระบบในระยะยาว (ภาพที่ 3-4)



ภาพที่ 9-4 วิธีการศึกษาการทดลองเดินระบบ

ตารางที่ 9-3 แสดงช่วงที่ตรวจวัด พารามิเตอร์ วิธีวิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

ช่วงที่ตรวจวัด	พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
น้ำเสียเข้าระบบ และ น้ำเสียออก ระบบ	pH	เครื่องวัด pH (pH meter)
	สี	เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer)
	TS	การทำให้แห้งที่ 103-105 °C (Gravimetric Method) (มันลิน, 2546)
	CODs	วิธีรีฟลักซ์ปิดแบบเทียบสี (มันลิน, 2546)
	ปริมาณเหล็ก ละลาย	อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)

บทที่ 10

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

10.1 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำผ่านการย่อยหมักจากศูนย์นวัตกรรมหมักใหม่ โดยวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียเบื้องต้นได้ผลดังตารางที่ 10-1

ตารางที่ 10-1 ลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสีย

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าตรวจวัดได้
pH	-	5.43
ปริมาณตะกอน	มก./ล.	45
CODs	มก./ล.	549
สี	-	สีแดงเป็นที่พึงรังเกียจ
ความเข้มข้นของเหล็กละลาย	มก./ล.	N/A
Oil&Grease	มก./ล.	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง มีค่าน้อยเกินกว่าที่เครื่องหรือวิธีวัดสามารถวัดได้

10.2 ผลจากการศึกษาความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหลของน้ำเสียต่อการบำบัดน้ำเสีย

10.2.1 ผลการเปลี่ยนแปลงค่า pH จากการปรับความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหล

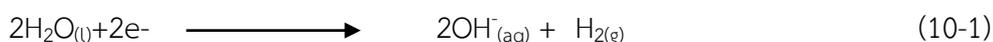
การศึกษาค่า pH เนื่องจากค่า pH เป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่มีอยู่ในระบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบว่ายังคงมีประสิทธิภาพในการทำงานมากเพียงใด

เมื่อทำการศึกษาค่า pH ต่อความหนาแน่นกระแส จากภาพที่ 10-1 ทำการวัดค่า pH เริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 5.43 เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแส ค่า pH จะเพิ่มขึ้นตาม ซึ่งเกิดการแตกตัวของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) จากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำดังสมการ (10-1) (Zaroual et al., 2006) จึงทำให้ pH มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อให้ความหนาแน่นกระแสสูงขึ้น น้ำจะมีสภาพเป็นเบส เนื่องจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เพิ่มขึ้น

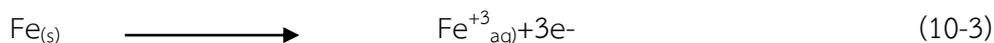
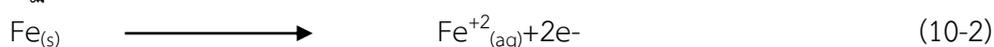
แต่จะเห็นว่าไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่เกิดขึ้นในระบบจากปฏิกิริยารีดักชันนั้นไม่ได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ที่แตกตัวจากขั้วแคโทดรวมตัวกับไอออนของเหล็ก ที่แตกตัวจากขั้วแอโนดดังสมการ (10-2) (10-3) และอยู่ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_2(\text{s})$) และเฟอริกไฮดรอกไซด์ ($\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{s})$) แสดงดังสมการ (10-4) และ (10-5) ซึ่งเป็นผลให้ pH ที่อัตราการไหลคงที่ที่ระยะเวลาหนึ่ง โดยที่งานวิจัยของ (ธัญดา และพัชรนันท์, 2552) พบว่า pH จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเริ่มระบบและจะคงที่ในเวลา 40 นาที

Daneshvar และคณะ (2006)

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด (รีดักชัน)



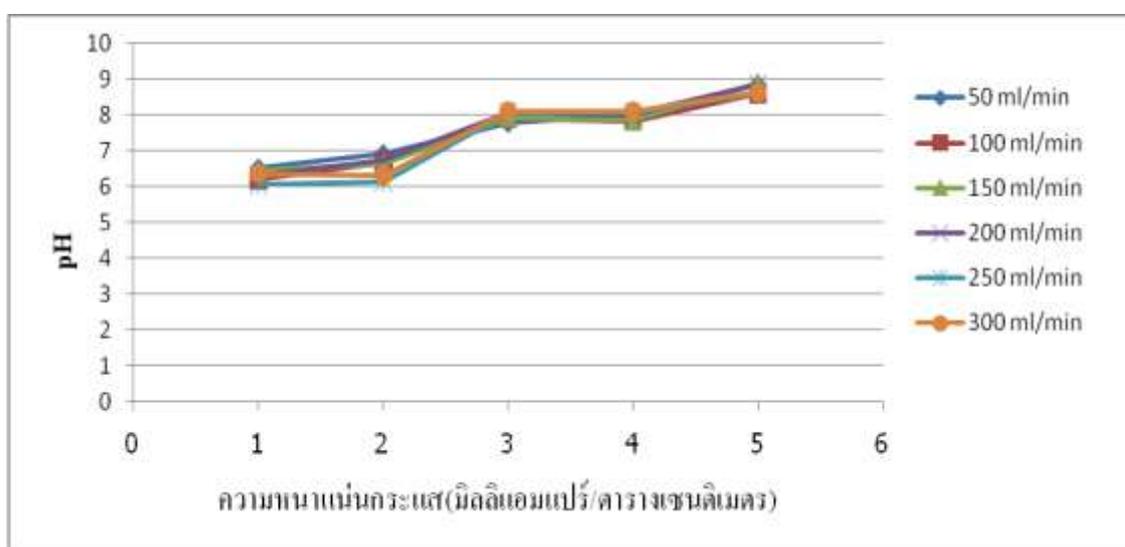
ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนด (ออกซิเดชัน)



ปฏิกิริยารวม



เมื่อทำการศึกษาค่า pH ต่ออัตราการไหล จากภาพที่ 10-1 ทำการวัดค่า pH เริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 5.43 เมื่อเพิ่มอัตราการไหล ค่า pH จะเพิ่มขึ้น เพราะเกิดเป็นสารประกอบ $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งทำปฏิกิริยากันหมดพอดีทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) น้อย สอดคล้องกับปริมาณเหล็กละลายคือที่อัตราการไหลต่ำปริมาณเหล็กแตกตัวออกมาน้อย



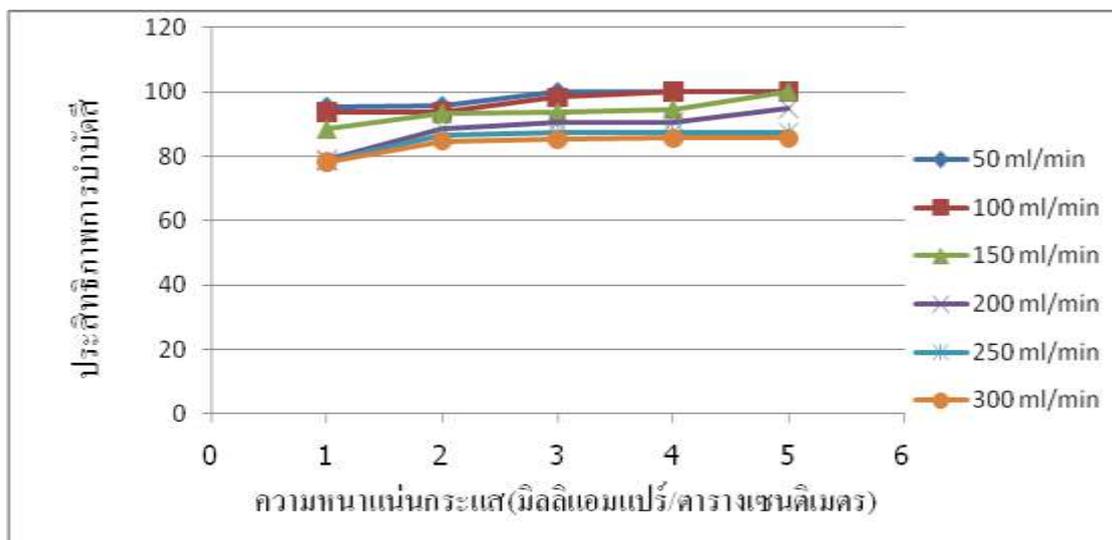
ภาพที่ 10-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH จุดสมมูลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหล

10.2.2 ประสิทธิภาพการบำบัดสีเมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหลที่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุดเพื่อที่จะนำไปใช้ในการทดลองในส่วนของการทดลองเดินระบบ

ในการทดลองนี้ จากภาพที่ 10-2 พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแส ประสิทธิภาพการบำบัดสีเพิ่มขึ้นด้วย แล้วเริ่มคงที่ที่ความหนาแน่นกระแส 3 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร ดังภาพที่ 10-3 ที่ความหนาแน่นกระแส 3-5 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพการบำบัดสีประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการบำบัด CODs เนื่องจากการเพิ่มความหนาแน่นกระแสส่งผลให้ที่ขั้วอิเล็กโทรดแตกตัวได้มากขึ้น ซึ่งกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเกิดขึ้นได้ดีที่ pH 7-8 OH^- จับกับ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ได้ดี ปฏิกิริยาสุดท้ายเกิดเป็นสารช่วยรวมตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Merzouk et al, 2009) ซึ่งกลไกการสร้างสารช่วยรวมตะกอนขึ้นมาเพื่อให้อนุภาคคอลลอยด์มาเกาะจับ ได้สารช่วยรวมตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ทำหน้าที่ให้อนุภาคมาเกาะแล้วรวมตัวกันเป็นตะกอนได้

จากการศึกษาผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี พบว่า ระบบการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องชนิดไหลขึ้น สามารถบำบัดสีสูงสุดประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอัตราการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้มีระยะเวลาพักพักน้อยลง ส่งผลต่อกลไกการบำบัดสี (Merzouk.et al, 2009) จากกลไกการแตกตัวของเหล็ก (Fe^+) ที่ขั้วแอโนด จะเกิดเหล็กละลายและทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ได้สารช่วยรวมตะกอนของ $Fe(OH)_{2(s)}$ ดังสมการ (10-4) และ $Fe(OH)_{3(s)}$ ดังสมการ (10-5)



ภาพที่ 10-2 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดสีต่อความหนาแน่นกระแสในแต่ละอัตราการไหล



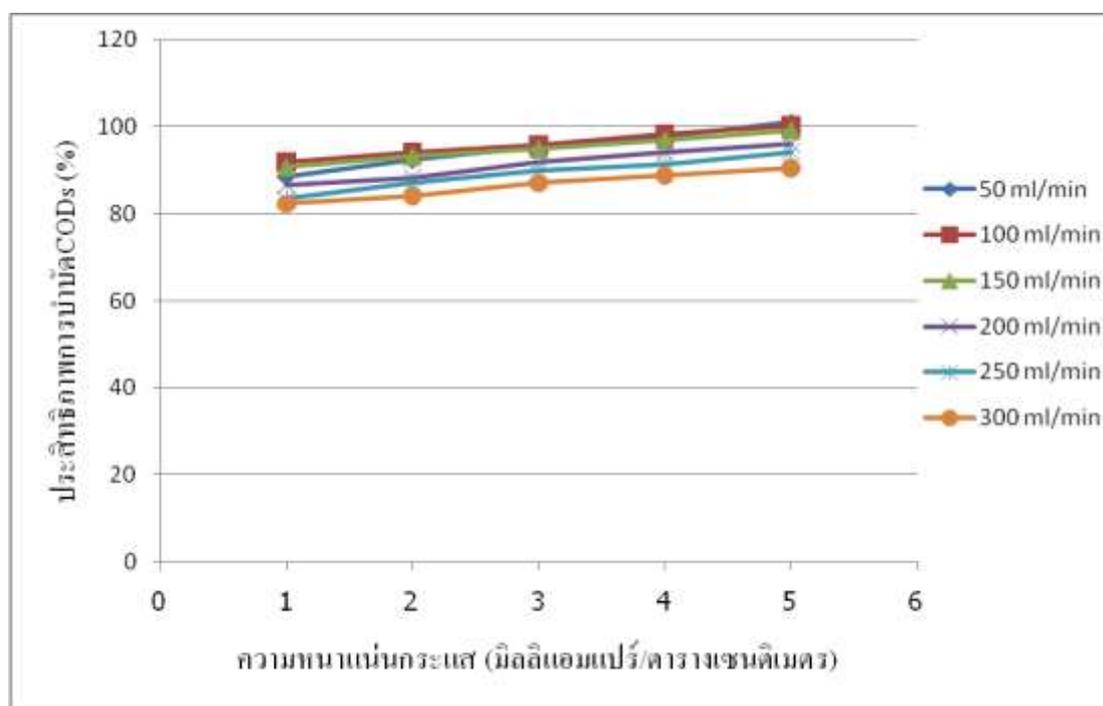
ภาพที่ 10-3 น้ำเสียหลังการบำบัด

10.2.3 ประสิทธิภาพการบำบัด CODs เมื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหล

เนื่องจาก CODs เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีการตรวจวัดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาค่า CODs ที่เหลืออยู่ว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานหรือมัยเพื่อที่จะได้หาแนวทางการกำจัดต่อไป

จากการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัด พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแส ค่าประสิทธิภาพ CODs มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพการบำบัดสี่ประมาณ 84-100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นกระแส 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร เนื่องจากความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นส่งผลให้แผ่นเหล็กซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดสามารถแตกตัวเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายด้วยกฎของฟาราเดย์

จากการศึกษาปรับเปลี่ยนอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัด CODs จากภาพที่ 10-3 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัด CODs อยู่ระหว่าง 84-100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 50, 100, 150, 200, 250 และ 300 มิลลิลิตร/นาที อัตราการไหลที่เหมาะสมที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัด CODs สูงสุดคือ 100 มิลลิลิตร/นาทีเนื่องจากอัตราการไหลที่ 150, 200, 250 และ 300 อัตราการไหลมีผลให้ระยะเวลาพักน้อยลงแต่ก็เพิ่มความปั่นป่วนในถังปฏิกิริยา ซึ่งความปั่นป่วนมีความสำคัญน้อยกว่าระยะเวลาพักที่ส่งผลให้กลไกการบำบัด CODs น้อยลง นอกจากการเพิ่มอัตราการไหลจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัด CODs ลดลงแล้วอัตราการไหลที่น้อยเกินไปคือ 50 มิลลิลิตร/นาที ซึ่งมีระยะเวลาพักนานถึง 3.3 ชั่วโมง ก็มีประสิทธิภาพการบำบัด CODs ลดลงด้วย กล่าวคือประสิทธิภาพการบำบัด CODs ลดลงเนื่องจากความปั่นป่วนในถังเป็นส่วนสำคัญมากกว่าระยะเวลาพัก ซึ่งมีความสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดสี เพราะว่าค่า CODs จะแปรผันตามกับสี (Merzouk et al.,2009) ดังนั้นอัตราการไหลที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือ 100 มิลลิลิตร/นาที และจะเห็นได้ว่า CODs ยังได้หมดไปจากในระบบ หมายความว่าสารอื่นๆ ที่สามารถออกซิไดซ์กับออกซิเจนในน้ำได้หมดไปด้วยเช่นกัน ดังภาพที่ 10-4



ภาพที่ 10-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการบำบัดCODsต่อความหนาแน่นกระแสในแต่ละอัตราการไหล

10.2.4 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสและอัตราการไหลต่อปริมาณเหล็กละลาย

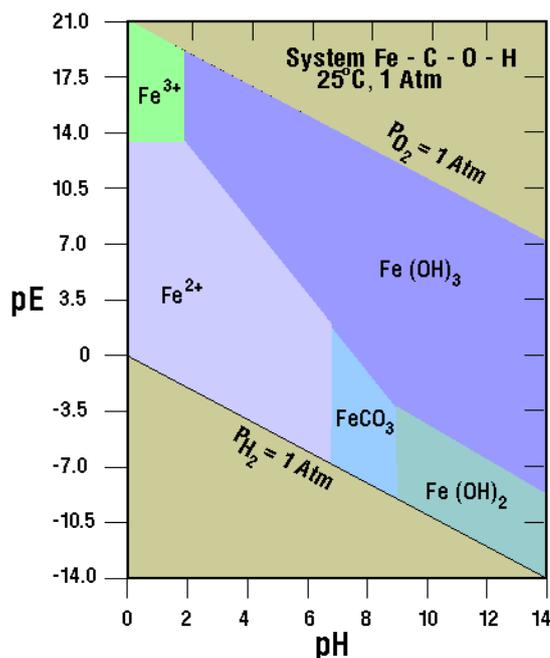
เนื่องจากปริมาณเหล็กละลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีการตรวจวัดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำธรรมชาติการวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาค่าปริมาณเหล็กละลายที่เหลือยู่ว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานหรือมัยเพื่อที่จะได้หาแนวทางการบำบัดต่อไป

จากการศึกษาปริมาณเหล็กละลายต่อความหนาแน่นกระแสพบว่า ที่ความหนาแน่นกระแสต่ำๆ จะมีปริมาณเหล็กละลายอยู่มาก เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสส่งผลให้แผ่นเหล็กซึ่งเป็นขั้วอิเล็กโทรดสามารถแตกตัวได้เพิ่มขึ้น โดยที่ขั้วแอโนดเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเหล็ก ทำให้ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ออกมาในน้ำเสีย ซึ่งมีผลต่อปริมาณของเหล็กละลาย ดังตารางที่ 10-2 จะเห็นว่าปริมาณเหล็กละลายที่ความหนาแน่นกระแส 1 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตรจะมีเหล็กละลายอยู่มาก และการเพิ่มความหนาแน่นกระแสมีปริมาณเหล็กละลายลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH ที่เกิดขึ้น เนื่องจากที่ pH 5-6 มีสถานะเป็นกรดอ่อน ทำให้ที่สถานะมี Fe^{2+} และ Fe^{3+} ละลายอยู่มาก และ pH 7-8 จะมีเหล็กละลายลดลง ซึ่งหมายความว่าที่ขั้วแคโทดจะมีการให้ไฮดรอกไซด์ไอออนที่ทำให้ค่า pH ของน้ำสูงขึ้นได้ ทำให้เหล็กที่มาจากแผ่นขั้วไฟฟ้าแอโนด สามารถตกตะกอนในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ เช่น $Fe(OH)_2$ และ $Fe(OH)_3$ ดังภาพที่ 10-5 ดังนั้นจากตารางที่ 10-2 จึงพบว่าที่ความหนาแน่นกระแส 3 และ 4 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะมีปริมาณเหล็กละลายลดลง

จากการศึกษาการเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำต่อปริมาณเหล็กละลาย พบว่าที่อัตราการไหลต่ำจะมีปริมาณเหล็กละลายน้อยกว่าอัตราการไหลสูง ดังตารางที่ 10-2 เนื่องจากการที่อัตราการไหลต่ำมีระยะเวลาพักมาก เหล็กที่แตกตัวออกมาสามารถทำปฏิกิริยากับสารแขวนลอยในน้ำเสียได้ดี โดยที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตร/นาที่ และ 100 มิลลิลิตร/นาที่ มีปริมาณเหล็กละลายลดลง

ตารางที่ 10-2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กละลายกับความหนาแน่นกระแส

ความหนาแน่นกระแส (มิลลิแอมแปร์/ตาราง เซนติเมตร)	ค่าปริมาณเหล็กละลายของน้ำออก (มิลลิกรัม/ลิตร)					
	50 มิลลิลิตร/ /นาที่	100 มิลลิลิตร/ นาที่	150 มิลลิลิตร/ นาที่	200 มิลลิลิตร/ นาที่	250 มิลลิลิตร/ นาที่	300 มิลลิลิตร/ นาที่
1	5.1	1.53	1.95	9.03	9.80	7.71
2	1.58	1.56	1.39	4.09	3.69	4.35
3	N/A	N/A	2.87	1.87	2.27	5.17
4	N/A	N/A	0.43	1.34	2.45	4.30
5	N/A	N/A	3.76	6.00	5.59	5.80



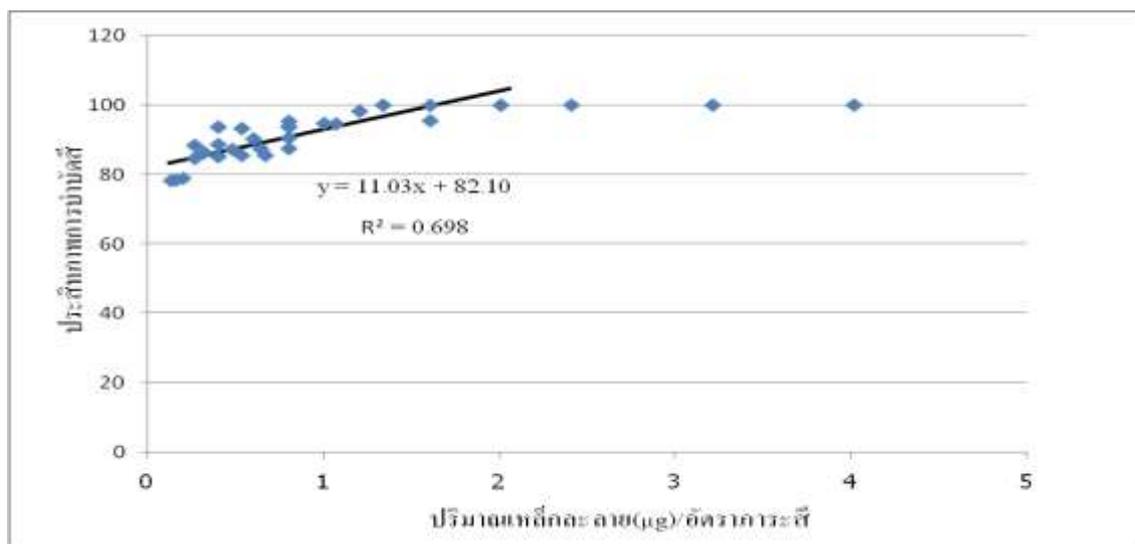
ภาพที่ 10-5 แสดงความสัมพันธ์ของค่า pH และการตกตะกอนของเหล็ก

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง ได้ศึกษา ค่า pH ประสิทธิภาพการบำบัดสี CODs เหล็กละลาย พบว่าที่ความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตาราง เซนติเมตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที pH อยู่ในช่วง 7-8 ซึ่งเหมาะสมต่อการรวมตะกอน ประสิทธิภาพการบำบัดสีได้ 100 เปอร์เซ็นต์ บำบัด CODs ได้ 98.22 เปอร์เซ็นต์ และไม่พบปริมาณเหล็ก ละลาย ดังนั้นจึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด

10.3 ผลของประสิทธิภาพการบำบัดสีต่อปริมาณเหล็กละลายต่ออัตราส่วนของภาระสี

การศึกษาในส่วนนี้เพื่อที่จะศึกษาถึงปริมาณเหล็กที่ละลายออกมาจากแท่งเหล็กกับภาระสีที่เข้า มาในระบบว่าที่ปริมาณเหล็กละลายต่ออัตราส่วนของภาระสีเท่าไรถึงจะมีความคุ้มค่าและมีประสิทธิภาพการ บำบัดที่ดีที่สุดในการใช้งาน

จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็ก ซึ่งปริมาณเหล็กจะแปรผันตามปริมาณ ของกระแสไฟที่ให้กับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีดังสมการที่ (10-1),(10-2),(10-3), (10-4) และ (10-5) ต่อปริมาณ ภาระสี จากภาพที่ 10-6 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ปริมาณเหล็กละลายต่อภาระสีมีความสัมพันธ์โดยที่ ปริมาณเหล็กต่อภาระสีเพิ่มขึ้นมีแนวโน้มประสิทธิภาพการบำบัดสีมากขึ้นด้วยแต่ ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังไม่ บ่งชี้ชัดเจนนักเนื่องจากค่า R^2 เพียง 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่ายังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ทำให้ค่าประสิทธิภาพสี มีความ เปลี่ยนแปลงด้วย นอกจากนี้ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณเหล็กต่อสี คือ 1.6 ไมโครกรัม/มิลลิกรัม ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีมีค่า 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากปริมาณไอออนของเหล็ก ทำปฏิกิริยาสมมูลกันกับสัดส่วนของสี โดยพบว่าที่สัดส่วนของปริมาณเหล็กต่อสีที่ 1.6 ไมโครกรัม/มิลลิกรัม ปริมาณเหล็กมีความเหมาะสมต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีสูงสุดถึงแม้จะจ่ายกระแสเพิ่มขึ้นเพื่อให้ปริมาณเหล็ก แยกตัวออกมาจับกับสีมากขึ้น ทำให้อัตราส่วนเหล็กต่อสีมากขึ้นก็ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสีดังกล่าว แต่ปริมาณเหล็กที่มากขึ้นทำให้สูญเสียกระแสไฟฟ้าและขั้วเหล็กโดยไม่จำเป็น นอกจากนี้ยังส่งผลให้น้ำทิ้งมี ปริมาณเหล็กสูงด้วย



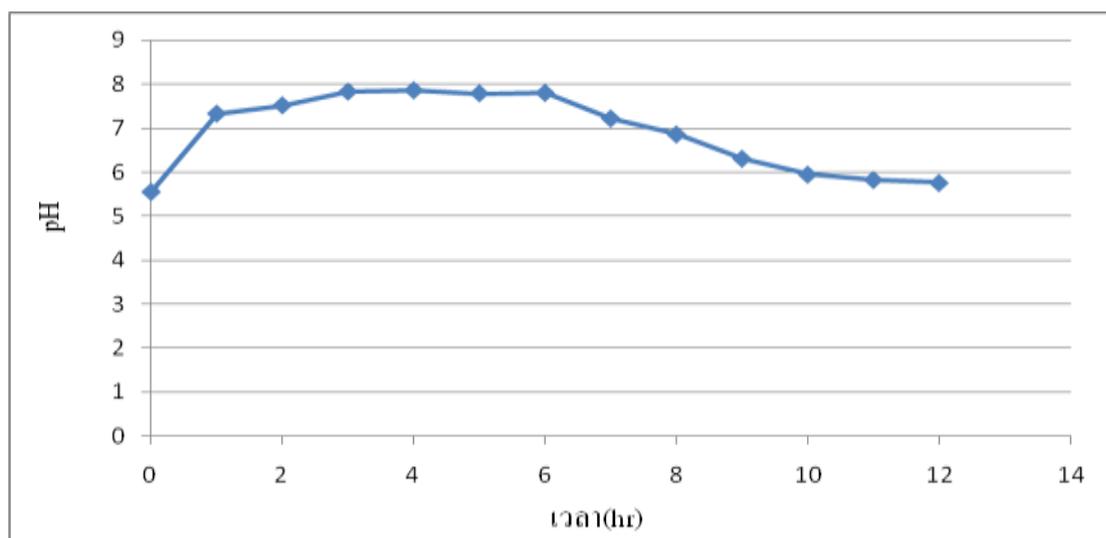
ภาพที่ 10-6 ความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ปริมาณเหล็กละลายต่อภาระสี

จากการศึกษาข้างต้น สภาวะที่เหมาะสมคือที่ความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร และที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่ ซึ่งมีอัตราส่วนปริมาณเหล็กละลายต่อภาระสีเท่ากับ 1.608 ไมโครกรัม/มิลลิกรัม และเนื่องจากที่สภาวะดังกล่าวบำบัดสีได้สูงถึง 100 เปอร์เซ็นต์ บำบัด CODs ได้ 98.22 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ นอกจากนี้ยังไม่พบปริมาณเหล็กละลายอยู่เลย จึงเลือกสภาวะดังกล่าวไปคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดและทดลองเดินระบบระยะยาว

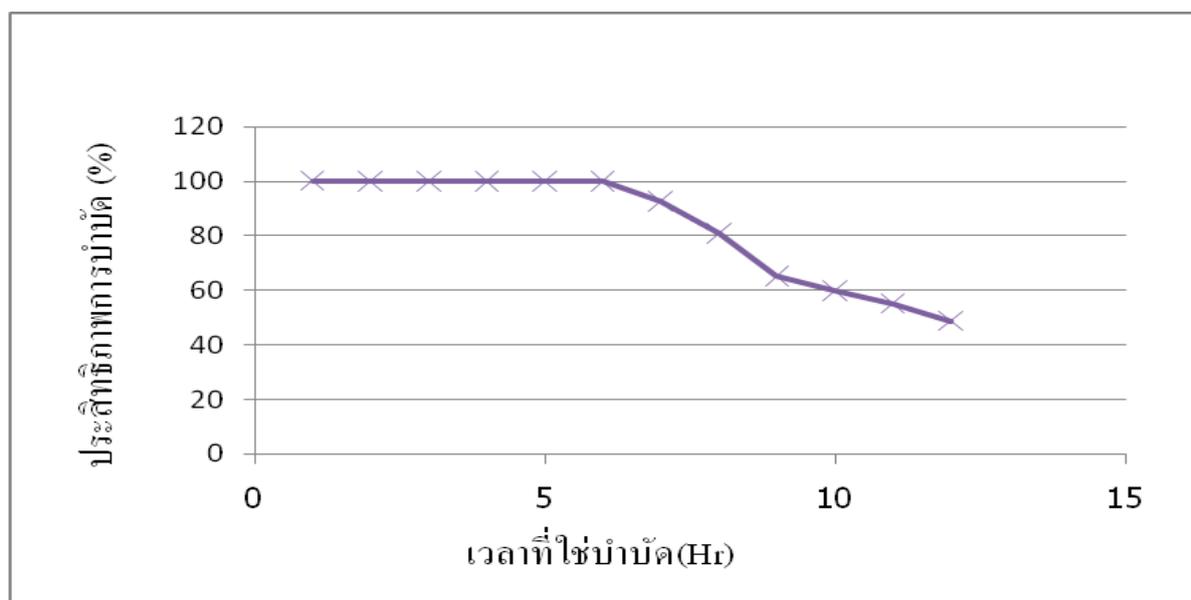
10.4 การทดลองเดินระบบ

การทดลองการเดินระบบนี้มีจุดประสงค์เพื่อการหาจุดสิ้นสุดของระบบในการทำงานในแต่ละครั้งเพื่อดูว่าเครื่องสามารถทำงานได้กี่ชั่วโมงและมีปริมาณน้ำที่บำบัดได้เท่าไรรวมถึงประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เข้าสู่ระบบ

จากการทดลองเดินระบบที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที่ และความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 12 ชั่วโมงโดยประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เวลา 1 - 6 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพการบำบัดสีถึง 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเวลาผ่านไปถึง 7 ชั่วโมงประสิทธิภาพการบำบัดสีกลับลดลงเรื่อยๆจนเมื่อเวลา 12 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการบำบัดสีได้แค่ 50 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษา pH พบว่า pH ของน้ำที่เวลา 1-6 ชั่วโมง มีค่า pH อยู่ระหว่าง 7-8 และในช่วงเวลาที่ 7-12 ชั่วโมงค่า pH จะค่อยๆลดลงจนที่เวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง pH เท่ากับ 5.8 ดังภาพที่ 10-7 และ 10-8 ซึ่งเป็นผลจากการแตกตัวของน้ำลดลงทำให้ OH^- ในน้ำมีปริมาณลดลงทำให้การจับตัวกับ Fe^{2+} , Fe^{3+} ไม่สามารถจับตัวเป็นของ $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งเป็นสารช่วยรวมตะกอนได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดสี



ภาพที่ 10-7 แสดงความสัมพันธ์ของ pH ที่เวลา 1-12 ชั่วโมงโดยมีอัตราการไหล 100 ml/min และความหนาแน่นกระแสที่ 4 mA/cm²



ภาพที่ 10-8 แสดงความสัมพันธ์ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่เวลา 1-12 ชั่วโมงโดยมีอัตราการไหล 100 ml/min และความหนาแน่นกระแสที่ 4 mA/cm²

ทั้งนี้สาเหตุที่เกิดขึ้นพบว่ามีสารบางชนิดเคลือบกับแผ่นเหล็ก แสดงดังภาพที่ 10-9 ซึ่งอาจมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าส่งผลให้ค่าความต้านทานของวงจรไฟฟ้าเคมีเพิ่มขึ้นจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าไม่สามารถเดินจนครบวงจรซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง



ภาพที่ 10-9 แสดงลักษณะของแผ่นเหล็กหลังการใช้งาน

10.5 ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี

การคำนวณค่าใช้จ่ายของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบ่งการคำนวณเป็น 3 ส่วน คือ การคำนวณค่าไฟฟ้า ค่ากำจัดตะกอน และค่าขั้วไฟฟ้า (เหล็ก) โดยเลือกความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที ซึ่งเป็นค่าที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด

10.5.1 การคำนวณค่าไฟฟ้า

$$\text{จากสมการ } W = V \times I \times t / 1000$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } W &= \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)} \\ V &= \text{ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)} \\ I &= \text{ค่ากระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)} \\ t &= \text{ระยะเวลาที่ใช้ไฟฟ้า (ชั่วโมง)} \end{aligned}$$

จากผลการทดลอง พบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร (528 มิลลิแอมแปร์ หรือ 0.528 แอมแปร์) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.63 โวลต์ อัตราการไหลที่ 100 มิลลิลิตร/นาที ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 1.65 ชั่วโมง สามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีที่สุด ดังนั้น

$$\begin{aligned} V &= 3.63 \text{ โวลต์ (วัดได้จากตอนทดลอง)} \\ I &= 0.528 \text{ แอมแปร์ (กระแสไฟที่จ่ายให้กับเหล็ก)} \\ t &= 1.65 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่าในสูตรจะได้ว่า

$$W = \frac{3.63 \text{ โวลต์} \times 0.528 \text{ แอมแปร์} \times 1.65 \text{ ชั่วโมง}}{1,000}$$

$$= 0.0032 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง}$$

คิดค่าไฟฟ้าต่อปริมาณน้ำเสีย CODs ที่ต้องการบำบัด

ในระบบบำบัดในงานวิจัยนี้อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาทีย มีประสิทธิภาพการบำบัด CODs ได้ดีที่สุด ซึ่งมีระยะเวลาพัก 1.65 ชั่วโมง มีปริมาณน้ำเสียรวมทั้งสิ้น ดังนี้

$$1 \text{ นาที่ มีปริมาตร} = 100 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$1.65 \text{ ชั่วโมงมีปริมาตร} = \frac{1.65 \text{ ชั่วโมง} \times 100 \text{ มิลลิลิตร} \times 60 \text{ นาที}}{1 \text{ นาที่}}$$

$$= 9900 \text{ มิลลิลิตร} = 9.9 \text{ ลิตร} = 0.0099 \text{ ลูกบาศก์เมตร}$$

ดังนั้น คิดค่าไฟฟ้าต่อปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัด มีค่าเท่ากับ

$$= \frac{0.0032 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง}}{0.0099 \text{ ลูกบาศก์เมตร}}$$

$$= 0.3232 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร}$$

เพราะฉะนั้น ค่าไฟฟ้า

$$= 2.978 \text{ บาท/กิโลวัตต์} \times 0.3232 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร}$$

$$= 0.9625 \text{ บาท-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร}$$

คิดค่าภาษี 7 %

เพราะฉะนั้นต้องเสียค่าไฟฟ้า

$$= 0.9625 \text{ บาท-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร} + (0.07 \times 0.9625)$$

$$= 1.03 \text{ บาท-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร}$$

ทำงาน 166.67 ชั่วโมงได้น้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร = 166.67 ชั่วโมง \times 1.03 บาท-ชั่วโมง/ลูกบาศก์เมตร

$$= 171.67 \text{ บาท/ลูกบาศก์เมตร}$$

10.7.2 ค่ากำจัดตะกอน

ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น = 0.0159 มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร(ได้จากการซึ่งกระดาดากรอง)

$$= 0.159 \text{ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร}$$

ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรม = 755 Bth/T (ภัคพงศ์, 2546)

$$= \frac{1 \text{ กิโลกรัม} \times 755 \text{ บาท}}{1000 \text{ กิโลกรัม}}$$

$$= 0.755 \text{ บาท/กิโลกรัม}$$

เพราะฉะนั้น ค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอน

$$= 0.755 \text{ บาท/กิโลกรัม} \times 0.159 \text{ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร}$$

$$= 0.120 \text{ บาท/ลูกบาศก์เมตร}$$

10.7.3 ค่าขี้ไฟฟ้า (เหล็ก)

ปริมาณของขี้ไฟฟ้า (เหล็ก) ที่สูญเสียไป จะสามารถคำนวณด้วยกฎฟาราเดย์

$$\text{จากสมการ} \quad W = ItM / ZF$$

โดยที่

- W = เป็นปริมาณโลหะที่ละลายน้ำ (กรัม)
 I = เป็นค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง (แอมแปร์)
 M = เป็นน้ำหนักโมเลกุลที่ขี้แอโนด
 t = เป็นเวลาที่ใช้ (นาที่)
 Z = เป็นจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์
 F = เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

จากผลการทดลอง พบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร (528 มิลลิแอมแปร์ หรือ 0.528 แอมแปร์) อัตราการไหลที่ 100 มิลลิลิตร/นาที่ เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 166.67 ชั่วโมงจะได้น้ำเป็น 1 ลูกบาศก์เมตร ดังนั้น

- I = 0.528 แอมแปร์
 M = 55.85
 t = 166.67 ชั่วโมง
 Z = 2
 F = เป็นค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,487

เมื่อแทนค่าในสูตรจะได้ว่า

$$W = \frac{0.528 \text{ แอมแปร์} \times 166.67 \text{ ชั่วโมง} \times 55.85 \text{ กรัม/โมล}}{(2 \times 96,487)}$$

$$= 0.025 \text{ กรัม}$$

ปริมาณเหล็กที่สลายไป 0.025 กรัม

ค่าเหล็กแผ่นรีบบด้า ขนาด 2 x 4 ฟุต หนา 2.0 มิลลิเมตร น้ำหนัก 47 กิโลกรัม/แผ่น ราคา 1600 บาท (www.indexpr.moc.go.th,2553)

น้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร แผ่นเหล็กสลายไป 0.025 กรัม

แผ่นเหล็กหนัก 47 กิโลกรัม ราคา 1600 บาท

แผ่นเหล็ก 1 กิโลกรัม ราคา = $\frac{1600}{47} = 34.04$ บาท/กิโลกรัม = 0.034 บาท/กรัม

47

$$\text{ค่าใช้จ่าย} = 0.025 \text{ กรัม/ลูกบาศก์เมตร} \times 0.034 \text{ บาท/กรัม}$$

$$= 0.00085 \text{ บาท/ลูกบาศก์เมตร}$$

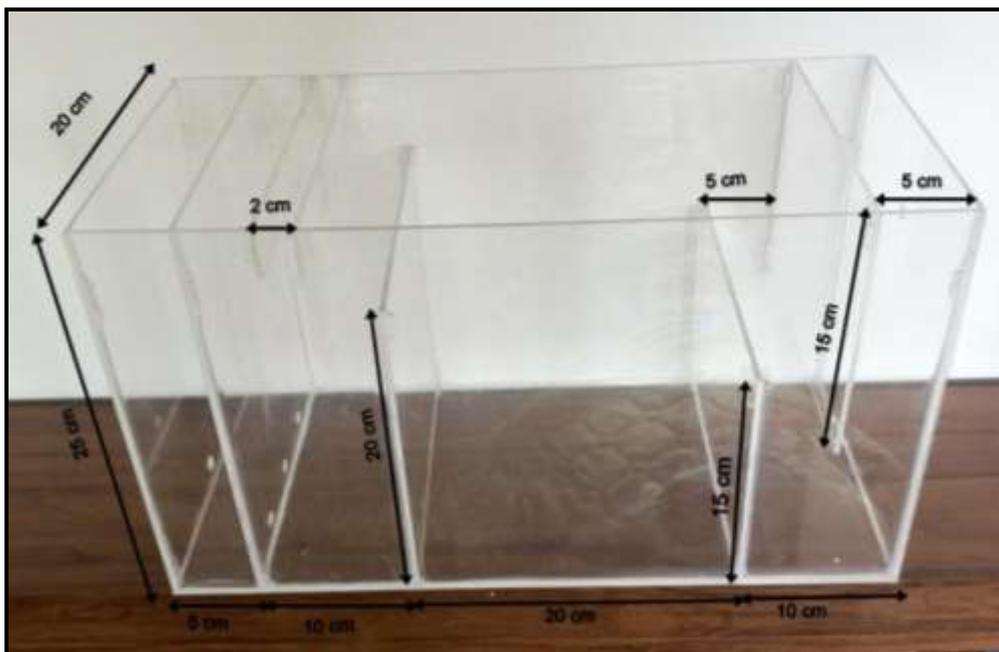
10.7.4 ค่าใช้จ่ายทั้งหมด

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าใช้จ่ายทั้งหมด} &= \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ค่ากำจัดตะกอน} + \text{ค่าแผ่นเหล็ก} \\
 &= 171.67 + 0.120 + 0.00085 \text{ บาท} \\
 &= 171.79085 \text{ บาท/ลูกบาศก์เมตร}
 \end{aligned}$$

10.6 การปรับแก้รูปแบบถังปฏิกรณ์

ทั้งนี้ในงานวิจัยลำดับต่อไปพบว่าอัตราการไหลที่ 100 ml/min ที่กระแสไฟฟ้า 5 mA/cm² นั้นไม่สามารถบำบัดมลสารได้ 200 V/day เนื่องจากระบบจะถูกตะกอนจับที่บริเวณขั้วทำให้เกิดฉนวนไฟฟ้านอกจากนี้ ถึงปฏิกรณ์ที่ออกแบบไว้ในตอนแรกยังเป็นถังทรงสูง ซึ่งยากต่อการขยายขนาด และทำความสะอาดหรือเปลี่ยนอิเล็กโทรด นอกจากนี้แท่งอิเล็กโทรดที่มีความยาวทำให้กระแสไฟฟ้าไปไม่ถึงข้างล่าง ทำให้ช่วงทำปฏิกิริยาจริงๆ น้อยกว่าความยาวของอิเล็กโทรด

จากปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวคิดในการแก้ไขระบบการบำบัด โดยจากงานวิจัยข้างต้นพบว่าปริมาณเหล็กต่อปริมาณมลสารมีความสอดคล้องในสัดส่วนซึ่งกันและกัน ถ้าอัตราการไหลน้ำมาก โดยออกแบบให้ปริมาณพื้นที่ผิวเหล็ก และกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น ระบบมีแนวโน้มบำบัดได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ระบบสามารถรับอัตราการไหลได้เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีส่วนถึงปฏิกรณ์แบบแนวตั้งซึ่งการซ่อมบำรุงขั้วไฟฟ้าทำได้ยาก และกระแสไฟฟ้าวิ่งค่อนข้างไกลว่าจะถึงปลายทางทำให้การแตกตัวของเหล็กจำกัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการออกแบบระบบใหม่ โดยมีลักษณะการไหลของน้ำเป็นแนวนอนทำให้ดูแลขั้วไฟฟ้าได้ง่ายขึ้นกว่าแบบแนวตั้ง การแตกตัวของเหล็กทั่วถึง เพิ่มกระแสไฟฟ้าในการดำเนินระบบให้มีค่ามากพอ ระบบที่ทำการศึกษาใหม่มีช่วงถึงปฏิกรณ์มีขนาด 20X10X20 ซึ่งสามารถรับน้ำเสียได้ 15 ลิตรต่อวัน ซึ่งเมื่อเดินระบบ 6 ชั่วโมงสามารถเปลี่ยนอิเล็กโทรดและทำความสะอาดอิเล็กโทรด ในโครงการต้องการบำบัดน้ำ 200 ลิตรต่อวัน ทางผู้วิจัยทดลองเพิ่มความยาวจาก 20 เซนติเมตรเป็น 280 เซนติเมตร ซึ่งสามารถรองรับน้ำได้ 205 ลิตรต่อวัน แต่การทดลองเบื้องต้นพบว่าแผ่นอิเล็กโทรดมีขนาดใหญ่ทำให้การกระจายเหล็กที่แตกตัวออกมาไม่สม่ำเสมอทางผู้วิจัยจึงแนวคิดนำถึงปฏิกรณ์เดิมมาต่อกันจำนวน 14 ชุดเพื่อให้แยกไฟฟ้าและน้ำเสียได้ ก็มีขนาดถึงปฏิกรณ์ยาว 280 เซนติเมตรแต่แยกส่วนเป็น 14 ส่วนซึ่งแยกจากกัน แสดงดังภาพที่ 10-10 พบว่าระบบสามารถดำเนินระบบบำบัดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากเหล็กที่แตกตัวออกมาสม่ำเสมอมากกว่า ถึงปฏิกรณ์เดียวขนาดใหญ่ซึ่งมีผลการบำบัดน้ำเสียดังต่อไปนี้



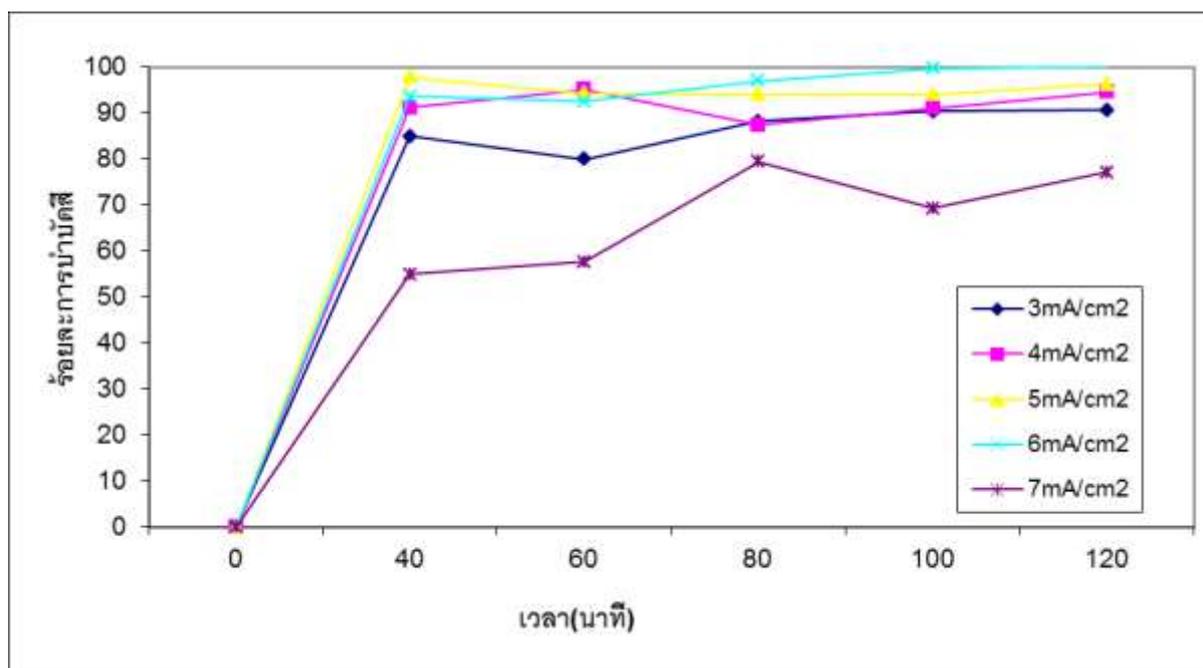
ภาพที่ 10-10 ถังปฏิกรณ์แนวนอนขนาดความจุ 9 ลิตร

10.7 แนวทางในการเดินระบบของถังปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียที่ปรับปรุง

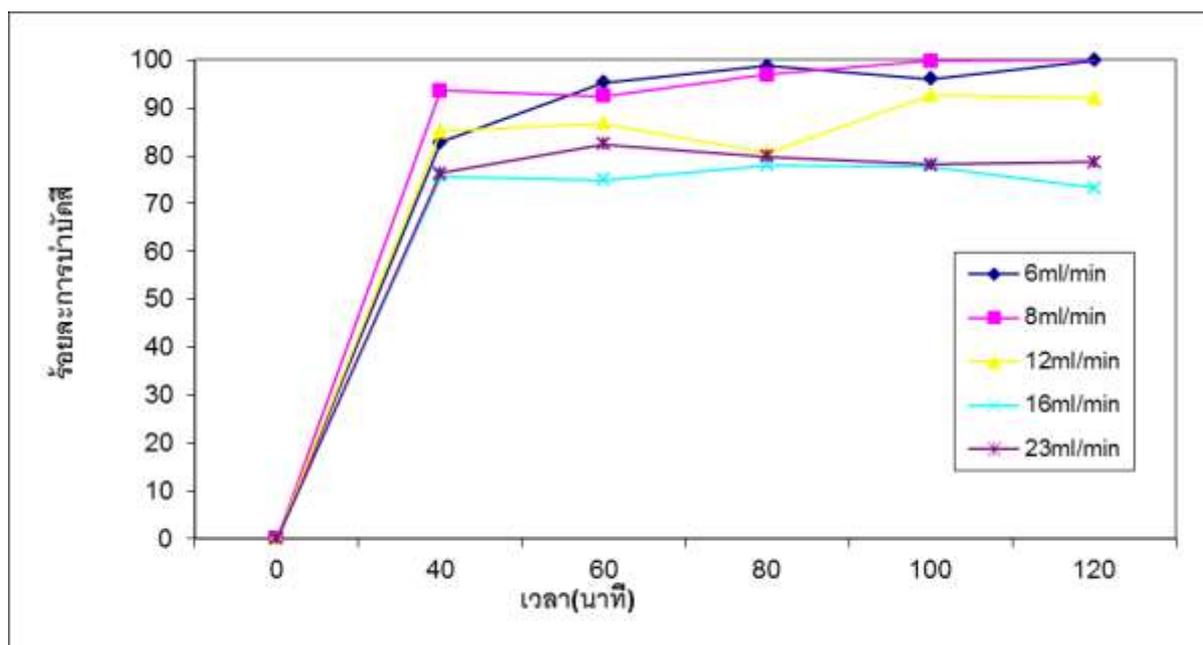
10.7.1 ความสามารถในการบำบัดน้ำเสียที่ย่อมใหม่

ทำการการศึกษา ที่ความหนาแน่นกระแส 6-23 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร และที่อัตราการไหล 3-7 มิลลิลิตร/นาที ต่อ 1 ชุด เดินระบบ 14 ชุด เดินระบบทั้งสิ้น 6 ชั่วโมงเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการเดินระบบ ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำหลังจากผ่านการบำบัด โดยศึกษาค่าพีเอส และ ประสิทธิภาพการบำบัดสี

ผลการศึกษาพบว่า กระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 6 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร อัตราการไหล 6-8 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการบำบัด 100 เปอร์เซ็นต์ โดยระบบเริ่มบำบัดได้คงที่ 30 นาที ดังนั้นในการดำเนินระบบบำบัดการให้เปิดเครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า เปิดระบบบำบัดน้ำเสีย ทำการเปลี่ยนอิเล็กโทรดแล้วสามารถดำเนินระบบเป็นเวลาทั้งสิ้น 6 ชั่วโมง แสดงดังภาพที่ 10-11 และ 10-12 ภาพที่ 10-13 แสดงให้เห็นการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องทางด้านซ้ายของถังเป็นน้ำเสียสีเข้า ส่วนช่องขวา เป็นช่องถังปฏิกรณ์ในการบำบัด น้ำเสียจะเข้าทางด้านล่างของถังซึ่งเห็นว่าน้ำเสียที่เข้ามามีสีแดงในช่วงสว่างไม่เกินครึ่งหนึ่งของถังปฏิกรณ์และมลสารสีในน้ำเสียจะถูกตะกอนของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จับลอยขึ้นไปอยู่ด้านบน ส่วนน้ำเสียที่ถูกบำบัดไม่มีสีไหลออกนำถังปฏิกรณ์ต่อไป



ภาพที่ 10-11 ผลการกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสี



ภาพที่ 10-12 ผลการอัตราการไหลของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสี



ภาพที่ 10-13 การเดินระบบบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี

บทที่ 11

สรุปผลการทดลอง

1. ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องชนิดไหลขึ้น ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีได้ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และประสิทธิภาพการบำบัด CODs ได้ 98.22 เปอร์เซ็นต์ โดยสรุปได้ดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 11-1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสียก่อน-หลังการบำบัดโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง

พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	มาตรฐาน
pH	5.43	7.82	5.5-9.0
ปริมาณตะกอน (มิลลิกรัม/ลิตร) (ยังไม่ผ่านการกรอง)	45	159	ไม่เกิน 50.0
ความเข้มข้นของค่า CODs (มิลลิกรัม/ลิตร)	549	9.73	ไม่เกิน 400.0
สี (มิลลิกรัม/ลิตร)	-	N/A	ไม่เป็นที่รังเกียจ
ความเข้มข้นของเหล็กละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	N/A	N/A	1(ในน้ำดื่ม)

ที่มา : ค่ามาตรฐาน: กรมควบคุมมลพิษ (2553)

2. ปัจจัยที่เหมาะสมในการบำบัดสีย้อมไหมด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องชนิดไหลขึ้น คือที่ความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร และที่อัตราการไหล 100 มิลลิลิตร/นาที ซึ่งเหมาะสมต่อการรวมตะกอน ซึ่งไม่พบปริมาณเหล็กละลาย อัตราส่วนปริมาณเหล็กละลายต่อภาระสีเท่ากับ 1.6 ไมโครกรัม/มิลลิกรัม

3. ค่าใช้จ่ายในการบำบัดสีย้อมไหมด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องชนิดไหลลงในสภาวะที่เหมาะสมคือ ที่ค่าความหนาแน่นกระแส 4 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร (222 มิลลิแอมแปร์ หรือ 0.22 แอมแปร์) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 3.63 โวลต์ ระยะห่างขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด มีค่าใช้จ่ายรวม 0.566 บาท/ลูกบาศก์เมตร โดยมีตะกอนเกิดขึ้นเท่ากับ 0.159 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าใช้จ่ายในกำจัดตะกอนเท่ากับ 0.120 บาท/ลูกบาศก์เมตร โดยคิดเป็นค่าไฟฟ้า 0.424 บาท/ลูกบาศก์เมตร และค่าแผ่นเหล็กเท่ากับ 0.022 บาท/ลูกบาศก์เมตร

4. การศึกษาระยะเวลาในการเดินระบบพบว่าระบบสามารถเดินได้มีประสิทธิภาพเป็นเวลา 6 ชั่วโมง หลังจากนั้นประสิทธิภาพการบำบัดลดลง โดยพบว่ามีสารบางชนิดเคลือบกับแผ่นเหล็ก แสดงดังภาพที่ 10-9 ซึ่งอาจมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าส่งผลให้ค่าความต้านทานของวงจรไฟฟ้าเคมีเพิ่มขึ้นจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าไม่สามารถเดินจนครบวงจรซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง

5. ในระบบแบบเดิมขั้วอิเล็กโทรดมีลักษณะยาวทำให้การถอดเปลี่ยนหรือทำความสะอาดทำได้ยาก ระบบถูกปรับให้มีลักษณะแนวยาวแทนแนวตั้ง แต่ยังคงพบปัญหาขนาดอิเล็กโทรดที่ใหญ่และยาวทำให้กระแสไฟฟ้าเดินไม่ทั่วถึง ทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดไม่ดึ้นก ดังนั้นแนวทางในการเดินระบบที่เหมาะสมจึงควรใช้ถังปฏิกรณ์มีขนาด 20X10X20 ซึ่งสามารถรับน้ำเสียได้ 15 ลิตรต่อวัน ต่อการเดินระบบ 6 ชั่วโมงสามารถต่อแบบขนาดจำนวน 14 ชุดเพื่อให้แยกไฟฟ้าและน้ำเสียได้ ทำให้เหมือนถังปฏิกรณ์ยาว 280 เซนติเมตรสามารถบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ