

ชื่อแผนงานวิจัย

การประยุกต์วิธีไฟฟ้าเคมีเพื่อบำบัดน้ำเสียจากการย้อมไหม

Application of Electrocoagulation for Silk Textile Wastewater treatment

โครงการวิจัยเรื่อง

การบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่อง :

ศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ

Silk Textile Wastewater Treatment by Continuous Electrocoagulation: Lab scale.

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมไหม ด้วยวิธีตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง โดยนำขั้วอิเล็กโทรดชนิดเหล็กกับอะลูมิเนียมเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการบำบัด โดยเทียบกับปัจจัยการเดินระบบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นของน้ำเสีย ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ค่าอัตราการไหล ค่าสี ค่าซีโอดี และ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา การศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหม โดยใช้เหล็กกับอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าการใช้ขั้วอะลูมิเนียม และเหล็กเป็นอิเล็กโทรดมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบสภาวะที่เหมาะสมของการใช้ขั้วอะลูมิเนียมมีค่าความกรดต่างของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้ร้อยละ 98.0 และประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 95.75 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายเบื้องต้นเท่ากับ 28 บาท ในขณะที่เหล็กเป็นอิเล็กโทรดเหล็ก มีสภาวะเหมาะสมที่ค่าความกรดต่างของน้ำเสียเริ่มต้นเท่ากับ 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้ร้อยละ 95.7 และประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 91.1 ซึ่งมีค่าใช้จ่ายเบื้องต้นเท่ากับ 23 บาท ค่าใช้จ่ายพบว่าขั้วเหล็กถูกกว่า โดยขั้วอะลูมิเนียมมีค่าใช้จ่ายเรื่องกระแสไฟฟ้าน้อยกว่าเนื่องจากใช้ไฟฟ้าต่อพื้นที่น้อยกว่า แต่ค่าใช้จ่ายในส่วนของการสูญเสียอิเล็กโทรดมากกว่าเนื่องจากราคาอะลูมิเนียมแพงกว่าเหล็ก ดังนั้นในงานวิจัยต่อไปจึงเลือกใช้ขั้วอิเล็กโทรดชนิดเหล็กในการทดลองหาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดแปรผันตามสัดส่วนของปริมาณเหล็กต่อปริมาณการระบรทุกของสี ในลักษณะสมการเส้นตรงโดยมีความชันเท่ากับ 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม

คำสำคัญ : น้ำเสีย, การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าแบบต่อเนื่อง, ย้อมไหม, อิเล็กโทรด

Abstract

The objectives of this research were studied a comparison with iron and aluminum electrode that were used to silk textile wastewater treatment by continuous electrocoagulation process. The studied factors of effect to treatment efficiency were type of electrode, initial pH of the wastewater, electric current density, flow rate of wastewater and operation time that was rise to equilibrium. Wastewater quality was studied in Color and COD. The optimum condition of dye wastewater treatment were compare with iron and aluminum as electrodes were found that an aluminum and iron electrode were not difference to treat the silk textile wastewater. The best condition of aluminum electrode were initial pH was 6; electric current density load was 8 mA/cm^2 and flow rate was 6 mL/min . the wastewater treatment efficiency were in color removal as 98% and COD removal as 96.75 %. The total operation cost of this condition was 28 Baht/m^3 . The best condition of iron electrode were initial pH was 6; electric current density load was 12 mA/cm^2 and flow rate was 8 mL/min . those condition was found a wastewater treatment efficiency were in color removal as 95.7 % and COD removal as 91.1 %. The total operation cost of this condition was 23 Baht/m^3 . Iron electrode was investigated to use for next experiment. The treatment efficiency had a relationship with sacrifice iron per dye loading in linear regression. The slope of equation was $10 \text{ } \mu\text{g/mg}$

Key Words : Wastewater, Continuous Electrocoagulation Process, Textile, Electrode

บทที่ 2

บทนำ

2.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการดำรงชีวิตคือเครื่องนุ่งห่มทำให้ในปัจจุบันมีอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วประเทศไทย นอกจากอุตสาหกรรมสินค้าจากพื้นบ้านเป็นที่นิยมกันมาก โดยเฉพาะสินค้าที่ผลิตจากสิ่งทอ การทอผ้าเป็นศิลปะพื้นบ้านที่ทำกันมาช้านานในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย โดยผ่านแนวคิดการขายหนึ่งตำบลหนึ่งผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ทำจากไหม การทอผ้าจะนิยมทอผ้าจากเส้นไหม แต่เส้นไหมที่นำมาทอต้องมีการผ่านกระบวนการย้อมสีให้มีความสวยงามและนำไปมัดเป็นลวดลายก่อนที่จะนำไปทอ เพื่อให้เครื่องนุ่งห่มมีสีสันที่สวยงามและเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์

อุตสาหกรรมสิ่งทอและฟอกย้อมเป็นอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดจากกระบวนการผลิตในหลายขั้นตอน เช่น น้ำเสียจากการย้อมสี ล้างแทนพิมพ์ เป็นต้นซึ่งปริมาณและลักษณะสมบัติของน้ำเสียแต่ละโรงงานจะมีความแตกต่างกันตามลักษณะการทำงานและเทคโนโลยีการพิมพ์หรือการฟอกย้อมเป็นน้ำเสียอีกประเภทหนึ่งที่เกิดปัญหามลพิษสิ่งแวดล้อมในหลายด้าน เช่น ค่า ซีโอดี , บีโอดี สูง อาจมีไขมันและกลิ่นเหม็นของสารระเหยจากตัวผ้าละลาย อาจมีโลหะหนักอันตรายบางประเภทจากแม่สี มีความขุ่นจากของแข็งแขวนลอย ดังนั้นทางโรงงานจึงต้องมีการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของกฎหมายก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมต่อไป (สหพงศ์พันธุ์, 2552) เนื่องจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย้อมสิ่งทอก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะกระบวนการการย้อมไหมที่ต้องใช้น้ำในการย้อมและก่อให้เกิดน้ำเสียจำนวนมาก ซึ่งยังยากต่อการบำบัดอีกด้วย มีผู้สนใจศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อม ผ้ามามากหลายวิธี เช่นการสร้างและการรวมตะกอน Coagulation and Flocculation (เกียรติศักดิ์, 2552) การบำบัดการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีแบบแท่งเหล็กและแท่งอลูมิเนียมมาแล้ว แต่ยังไม่มีการเปรียบเทียบชนิดของอิเล็กโทรด

โครงการในส่วนแรกจึงมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาชนิดอิเล็กโทรดที่เหมาะสมกับน้ำเสียย้อมไหม โดยการเปรียบเทียบขั้วอิเล็กโทรดชนิดเหล็กกับอลูมิเนียมในการบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมไหมโดยการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีแบบต่อเนื่องเพื่อบำบัด COD ความขุ่นและสีย้อมในน้ำเสียดังกล่าว ซึ่งเป็นผลการศึกษาจะนำไปสู่แนวโน้มที่จะพัฒนาไปสู่การใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์ อันจะส่งผลดีต่อโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวิธีหนึ่งที่ดูแลระบบได้ง่ายไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมี ตลอดจนสถานะที่เหมาะสมในการบำบัดและเพื่อเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียในอุตสาหกรรมฟอกย้อมต่อไป

บทที่ 3

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

3.1 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพื่อให้ผ้าและเส้นด้ายมีสีสันสวยงาม คงทนต่อสภาพแวดล้อมและให้ความรู้สึกสบายต่อผู้สวมใส่ผ้าหรือเส้นด้ายต่างชนิดกัน จะใช้กรรมวิธีหรือขั้นตอนการฟอกย้อมที่แตกต่างกันตามชนิดเส้นใยของผ้าหรือเส้นด้ายนั้นๆ เส้นใยที่ใช้กันโดยส่วนใหญ่ประกอบด้วยเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ ฝ้าย ไหม ลินิน เป็นต้น และเส้นใยประดิษฐ์ได้แก่ โพลีเอสเตอร์ ไนลอน เป็นต้น

นอกจากชนิดเส้นใยที่ทำให้การฟอกย้อมแตกต่างกันแล้ว การเลือกชนิดของสีย้อมให้เหมาะสมกับเส้นใยแต่ละชนิดก็เป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากการต้องการใช้สีย้อมซึมผ่านเข้าไปในเส้นใยสม่ำเสมอ และติดทนทานตลอดอายุการใช้งาน แต่ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบโดยทั่วไปคือผ้าหรือเส้นด้ายติดสีไม่เท่ากันในกระบวนการย้อมผ้า และผ้าหรือเส้นด้ายมีสีตกหรือจางลงเมื่อนำไปใช้งาน ดังนั้นการทำความเข้าใจถึงคุณสมบัติของเส้นใยและวิธีการฟอกย้อมผ้าหรือเส้นด้ายแต่ละชนิดจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้ผลิต และเป็นที่ยอมรับจากลูกค้า

โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนการฟอกย้อมผ้าและเส้นด้าย อันประกอบด้วยขั้นตอนการเตรียมผ้าหรือเส้นด้ายก่อนการย้อม ประเภทของการย้อมขั้นตอนการย้อมเส้นด้าย ผ้าทอและผ้าถักตามลำดับ ซึ่งได้ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากงานเขียนของผู้เชี่ยวชาญทางด้านอุตสาหกรรมสิ่งทอทั้งไทยและต่างประเทศ

3.2 ลักษณะของน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม

กระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนมีการใช้น้ำและสารเคมีหลายชนิดและมีปริมาณต่างกัน ส่วนน้ำที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวจะกลายเป็นน้ำเสีย ซึ่งปนเปื้อนด้วยสารเคมีและสารอินทรีย์หลายชนิด อาจสามารถจำแนกเป็นประเภทที่สำคัญๆ ได้ดังนี้

3.2.1 สีย้อม

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

3.2.2 สารเคมีที่ช่วยในกระบวนการฟอกย้อมและกระบวนการตกแต่งสิ่งทอ

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมและตกแต่งสิ่งทอมีหลายประเภท และสามารถจำแนกออกเป็นกลุ่มใหญ่ได้ 3 ประเภท ดังนี้

3.2.2.1 สารช่วยย้อม (Auxiliaries Chemicals) ได้แก่ สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (Scouring Agent) สารช่วยเปียก (Wetting Agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีสม่ำเสมอ (Leveling Agent) สารช่วยย้อมมีหลายชนิด ที่สำคัญสามารถแบ่งได้เป็น 7 ประเภท ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 ประเภทของสารช่วยย้อม

ประเภท	ลักษณะการใช้งาน
กรด	ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและในลอนเมื่อใช้สีย้อมแอสิก
ด่าง	ใช้สำหรับย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซติก สีแวต และสีซัลเฟอร์
เกลือ	ใช้สำหรับย้อมสีแอสิกและเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ	ใช้สำหรับย้อมสีแวต สีดิสเพิร์ส และสีแอสิกบางชนิด
สารนำ (Carriers)	ใช้สำหรับย้อมเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
สารละลายอินทรีย์	ใช้สำหรับย้อมขนสัตว์และเส้นใยสังเคราะห์บางชนิด
สารรีดิวซ์	ใช้สำหรับรีดิวซ์บางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

ที่มา : ธงชัย (2527)

3.2.2.2 สารเคมีพื้นฐาน (Basic Chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง

3.2.2.3 สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ สารกันยับ ฯลฯ

3.2.3 สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการฟอกย้อมล้วนมีสิ่งเจือปนอยู่ โดยเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่สูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ สิ่งสกปรกเหล่านี้มีทั้งสารขี้ผึ้ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่างๆ นอกจากนี้ยังมีสารเคมีที่เติมลงไป在线ใยระหว่างกระบวนการผลิต เช่น สารหล่อลื่นและแป้ง เป็นต้น สิ่งสกปรกเหล่านี้จะถูกกำจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมสิ่งทอซึ่งจะหลุดออกมากับน้ำเสีย

3.2.4 เศษเส้นใย

เส้นใยที่หลุดออกมาจากสิ่งทอเป็นสิ่งเจือปนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ในน้ำเสียฟอกย้อม หากมีปริมาณมากอาจก่อให้เกิดปัญหาการอุดตัน นอกจากนี้กรณีเส้นใยโพลีเอสเตอร์ ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่อาจหลุดปนมากับน้ำเสีย

3.2.5 สิ่งสกปรกเจือปนอื่นๆ

นอกจากสิ่งเจือปนที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว อาจยังมีสิ่งสกปรกอื่นๆ เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการจัดรอยเปื้อนของผ้า ซึ่งมักเป็นสารจำพวกคลอรีเนเตดเบนซีน (Chlorinated Benzene) สารเคมีที่ใช้ล้างเครื่องจักร ฯลฯ

จะเห็นได้ว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่หลายประเภทปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะของน้ำเสียขึ้นอยู่กับกระบวนการฟอกย้อมผลิตภัณฑ์ ชนิดของสารลงแป้งบนผ้าทอ ชนิดของความสกปรกของเส้นใย ชนิดของสีย้อม ตลอดจนกรรมวิธีในการฟอกย้อม โดยลักษณะของน้ำเสียสามารถแบ่งได้ดัง ตารางที่ 3-2 และ ตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-2 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์	pH	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Color (Pt.Co)	จำนวน ข้อมูล
ด้าย	8.2	120	300	43	450	13
ผ้าถัก	9.0	110	370	50	570	16
ผ้าทอ	8.6	400	1,200	140	470	41
ด้ายและผ้า หรืออื่นๆ	9.1	230	713	65	400	30

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2542)

ตารางที่ 3-3 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมแบ่งตามชนิดของเส้นใย

Type of fiber	pH	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	Color(ADMI)	References
Not mentioned	10.5-11.0	600-950	1380-1750	-	-	Altinbas, et al (1995)
Cotton yarn and sweater	10.4 - 12.85	-	1400-5145	34- 322	203-3533	Hussain (1994)
Cotton	8.0 - 9.09	86-240	298-782	47-79	452-1413	Jarusuthirak (1995)
Not mentioned	5.3 - 8.1	90-250	3500-5000	35-45	152000	Kongsricharoen (1994)
Nylon	5.27-8.89	95-253	429-3563	38-42	1195-15200	Kootatep (1993)
Not mentioned	9.3-10.3	-	500-1345	-	3186-16890	Ling (1993)
Polyester Colored Stream Colorless Stream	8.1 8.3	206 107	5318 609	44 46	1598 104	Paopuree (1993)
Stock and Yan Finishing	-	250	800	75	-	UNEP (1994)
Cotton Polyester and Acrylic	4.21-10.5	196- 1342	418-4145	0.27- 370	122-3186	Visaranathon, et al (1994)
Not mentioned	8.26	100	371	-	-	Yang and Pescod (1997)
Not mentioned	6.6-8.1	165-445	473-1200	32- 265	3020-9500	David and Adams (1997)

ที่มา : Rangneker and Singh (1980)

3.2.6 สีย้อม

การฟอกย้อมเป็นหัวใจสำคัญของอุตสาหกรรมสิ่งทอ การย้อมสีทำให้สิ่งทอเกิดลวดลายและมีสีสันสวยงาม สิ่งทอแต่ละชนิดใช้สี และวิธีการย้อมที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสิ่งทอและสีย้อมแต่ละชนิด สีย้อมที่นำมาใช้ในการย้อมเส้นใยมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งการที่จะนำสีย้อมใดๆ มาใช้ย้อมให้ได้ผลดีนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใย ซึ่งต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำสถานะเช่นนี้จะเกิดได้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่ทำให้เกิดการดูดติด (Substantivity) กับเส้นใยและเกิดพันธะ (Bond) ยึดติดกันแน่น อิทธิพลเชิงเคมีที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond), แรงแวนเดอร์วาล (Van der waal's forces), แรงไอออน (Ionic forces) และพันธะโควาเลนต์ (Covalent bond)

การเลือกสีย้อมต้องเลือกตามชนิดของวัสดุที่ย้อม ที่ความคงทนพอจะสามารถย้อมออกมาได้เหมือนสีตามตัวอย่าง และมีราคาเหมาะสม สีย้อมที่ผลิตขึ้นมาในท้องตลาดมีจำนวนมาก และมักมีสีสันทใกล้เคียงกัน ยากต่อการจดจำ เช่น สีฟ้าอาจมีสีฟ้าค่อนข้างแดง หรือฟ้าค่อนข้างเหลือง ดังนั้นต้องมีสัญลักษณ์ของสีเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว (เปล่งศักดิ์, 2546)

1. การผลิตสีย้อม

น้ำมันปิโตรเลียมหรือถ่านหินเมื่อสกัดแล้วจะได้สารไฮโดรคาร์บอนได้แก่ เบนซีน ไซลีน แอนทราซีน โทลูอิน แนฟทาลีน และฟาราฟิน ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว สารเหล่านี้จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการไนเตรชันแอมมิเนชัน (Nitrationamination) ฯลฯ เพื่อเปลี่ยนสภาพไฮโดรคาร์บอนเป็นสารตัวกลางที่เตรียมได้นี้จะถูกนำไปเปลี่ยนเป็นสีย้อมด้วยเทคนิคต่างๆ ที่ไม่เป็นที่เปิดเผย (เปล่งศักดิ์, 2546)

2. การเกิดสีของสีย้อม

สีที่ตาของมนุษย์ปกติมองเห็นได้เกิดจากการจัดเรียงตัวของอะตอมกลุ่มหนึ่งในโมเลกุลของสีย้อม กลุ่มอะตอมดังกล่าว คือ โครโมฟอร์ (Chromophores) มีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มคือ

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 กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (Carbonyl-Nitrogen Group)	: >C=NH และ -CH=N-
กลุ่มที่ 7 กลุ่มซัลเฟอร์ (Sulphur Group)	: >C=S และ -C-S-S-C-

สีย้อมโดยทั่วไป นอกจากจะมีกลุ่มโครโมฟอร์แล้วยังจะต้องมีกลุ่มออกโซโครมเพื่อให้สีย้อมสามารถทำปฏิกิริยายึดกับเส้นใยได้ กลุ่มออกโซโครมที่สำคัญได้แก่ -OH, -NH₂, -NHR, -SO₃ และ -COOH

โมเลกุลที่ไม่มีกลุ่มออกซิโครมจะแสดงคุณสมบัติของสีแต่จะขาดความสามารถในการยึดติดกับเส้นใย โมเลกุลดังกล่าวเรียกว่า โครมาเจน ทั้งกลุ่มโครโมฟอร์ออกซิโครมและโครมาเจน เป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาแบ่งกลุ่มของสีย้อมตามสูตรโครงสร้างทางเคมี

3. การจำแนกประเภทของสีย้อม

สีย้อมที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายประเภท ซึ่งการจำแนกประเภทของสีย้อมนั้นต้องอาศัยหลักเกณฑ์ต่างๆ ในการพิจารณา ปัจจุบันสีย้อมสามารถจำแนกออกได้ โดยพิจารณาจากลักษณะทางการภาพ โครงสร้างทางเคมี และลักษณะการใช้งาน

1. การจำแนกประเภทของสีย้อมตามลักษณะทางกายภาพ

หากพิจารณาตามลักษณะทางกายภาพ สามารถจำแนกสีย้อมออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ประเภทที่ละลายน้ำได้ เรียกว่า สีย้อม (Dyes) และประเภทที่ละลายน้ำไม่ได้ เรียกว่า พิกเมนต์ (Pigment) วิธีนี้เป็นวิธีจำแนกสีย้อมอย่างง่าย ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากก่อให้เกิดความสับสน

2. การจำแนกประเภทของสีย้อมตามโครงสร้างทางเคมี

การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้มักมีความยุ่งยาก เนื่องจากมีสีย้อมในกลุ่มเคมีเดียวกัน อาจมีวิธีในการย้อมที่แตกต่างกันใช้ย้อมเส้นใยต่างชนิดกัน บางชนิดติดสีได้เมื่อน้ำย้อมมีสถานะเป็นกรด บางชนิดต้องเติมสารเคมีช่วยในการยึดติดเส้นใยจึงมีความยุ่งยากและมีความซับซ้อนการจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาศาสตร์การบำบัดสีออกจากน้ำเสีย ประเภทของสีย้อมสามารถจำแนกตามโครงสร้างทางเคมีได้ดังตารางที่ 2-4

3. การจำแนกประเภทของสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

การจำแนกสีย้อมด้วยวิธีนี้ให้ความสะดวกแก่ผู้ใช้มากกว่าวิธีอื่นจึงเป็นที่ยอมรับกันในปัจจุบัน แม้แต่สมาคมผู้ย้อมและผู้ผลิตสี (The Society of dyes and Colorist) ก็ยอมรับว่าเป็นวิธีจำแนกที่เหมาะสมที่สุด หนังสือดัชนีสี (Color Index) ที่พิมพ์จำหน่ายทั้งโลกก็ใช้การจำแนกด้วยวิธีนี้จึงทำให้มีความคล่องตัวสูง ซึ่งทำการจำแนกประเภทของสีย้อมตามลักษณะการใช้งานได้ 10 ประเภทดังนี้

1. สีย้อมเบสิก (Basic Dyes)

สีย้อมชนิดนี้เป็นเกลือของเบสอินทรีย์ (organic base) ละลายน้ำได้ ใช้ย้อมเส้นใยจากสัตว์ ติดได้โดยตรง ย้อมติดเส้นใยเซลลูโลสได้เล็กน้อยหรือไม่ติดเลย สีย้อมนี้มีโครโมฟอร์ที่มีพฤติกรรมทำให้สีขึ้นอยู่กับปฏิกิริยารีดิวซ์และออกซิไดซ์ ที่ให้แคทไอออน บางครั้งจึงเรียกสีย้อมชนิดนี้ว่าสีแคทไอออน ย้อมติดเส้นใยได้โดยประจุบวกของโมเลกุล สีย้อมจะจับตัวกับประจุลบของเส้นใย

2. สีย้อมแอซิด (acid dyes)

สีย้อมชนิดนี้เกิดขึ้นจากสารประกอบอินทรีย์ มีประจุลบ ละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นเกลือของกรดกำมะถันใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นกรดอาจใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสที่ไม่บริสุทธิ์ได้

3. สีย้อมดิสเพิร์ส (disperse dyes)

สีย้อมชนิดนี้มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ แต่จะเป็นละอองลอยอยู่ในน้ำเมื่อมีสารกระจายตัว (Dispersing Agent) ที่เหมาะสม ในการย้อมไม่ต้องเติมสารเคมีอย่างอื่นนอกจากสารนำ (Carrier) ให้สีเข้าใกล้เส้นใยเท่านั้นใช้ย้อมเส้นใยอาซิเตททุกเส้นใยสังเคราะห์บางชนิดที่ดูดซึมน้ำได้น้อย

4. สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)

เป็นสารประกอบอะโซ ตัวสีไม่ละลายน้ำ ต้องย้อมในสารประกอบฟีนอล ซึ่งละลายน้ำได้ก่อนแล้วจึงนำไปย้อมทับด้วยเกลือไดอะโซเดียม (Diazodium Salt) ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับสารประกอบฟีนอลเกิดเป็นสารประกอบอะโซที่ให้สีบนเส้นใย ปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า Coupling สีย้อมชนิดนี้นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสเท่านั้น เนื่องจากสารประกอบฟีนอลละลายในต่าง ซึ่งเป็นอันตรายต่อเส้นใยโปรตีน

5. สีไคเรกท์ (direct dyes)

บางครั้งเรียกว่าสีย้อมฝ้ายเป็นสีย้อมชนิดแรกที่ถูกคิดค้นได้โดยไม่ต้องใช้สารช่วยย้อม ในปัจจุบันมีการเติมเกลือเข้าไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย้อมส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโซโมเลกุล มีน้ำหนักสูงมีหมู่ซัลโฟนิคซึ่งทำให้สีสามารถละลายน้ำได้ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสซึ่งไม่ต้องการความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำมากนัก

6. สีย้อมมอร์แดนต์ หรือโครม (mordant or chrome dyes)

ใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มสีประเภทแอลิดที่สามารถก่อรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะบางชนิดได้ อนุภาคสีที่ก่อรูปบนเส้นใยภายหลังเมื่อย้อมทับด้วยเกลือโลหะแล้วจะมีความคงทนต่อกระบวนการใช้น้ำ (Wet Fastness) ได้ดีกว่าเมื่อไม่ย้อมทับ

7. สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)

ใช้ย้อมฝ้ายโดยเฉพาะ ให้สีไม่สดใส ปกติไม่สามารถละลายน้ำได้ แต่ปัจจุบันมีผู้ผลิตสีย้อมผ้าชนิดนี้ขึ้นใหม่ โดยนำตัวสีย้อมไปทำปฏิกิริยารีดิวซ์ให้สามารถละลายน้ำได้ ตัวรีดิวซ์ที่ถูกใช้อย่างแพร่หลายที่สุดคือ โซเดียมซัลไฟด์

8. สีย้อมวัต (vat dyes)

นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส โดยเฉพาะฝ้ายเป็นสีที่ไม่ละลายน้ำในการย้อม ต้องใช้สารรีดิวซ์ที่เหมาะสมทำให้เกิดการละลายจึงจะสามารถติดเส้นใยเซลลูโลสได้ สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ เมื่อสีย้อมถูกรีดิวซ์จะให้สารประกอบ ลิวโค (Leuco Compound) ซึ่งมีสีครามและมีประสิทธิภาพในการแทรกซึมเข้าไปติดเส้นใยได้ และเมื่อนำเส้นใยไปสัมผัสอากาศ สารประกอบลิวโคจะถูกออกซิไดซ์กลับเป็นสีย้อมวัตซึ่งไม่ละลายน้ำ ทำให้สีที่ติดเส้นใยมีความคงทน

9. สีย้อมรีแอกทีฟ (reactive dyes)

เป็นสีที่ละลายน้ำได้ดีมีคุณสมบัติเป็นแอนไอออน เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่มีสภาพเป็นด่างโมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ในเซลลูโลส และเชื่อมโยงติดกันด้วยพันธะโควาเลนต์เกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่กับเซลลูโลส คุณสมบัติในการละลายและติดเส้นใยได้ดีของสี ทำให้สีย้อมชนิดนี้เป็นสีย้อมเซลลูโลสที่ดี

10. สีย้อมเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal Complex Dyes)

สีชนิดนี้เดิมเป็นสีย้อมมอร์แดนต์ เมื่อนำมาทำปฏิกิริยากับเกลือของโลหะจะได้สารประกอบที่ให้สีชนิดใหม่นิยมใช้เกลือของโครเมียมมาทำปฏิกิริยาสีเมทัลคอมเพล็กซ์สามารถแยกได้เป็น 2 ชนิด ตามลักษณะของน้ำย้อมได้แก่สีเมทัลคอมเพล็กซ์ ในน้ำย้อมที่เป็นด่างสีชนิดนี้ถ้ามีเกลืออนิออนในน้ำจะทำให้ละลายน้ำไม่ดี ดังนั้นจึงต้องใช้น้ำอ่อนข้างบริสุทธิ์ ไม่มีเกลือแร่ปนอยู่

ตารางที่ 3-4 ประเภทของสีย้อมจำแนกตามโครงสร้างทางเคมี

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

ที่มา : Rangnekar and Singh (1980)

ตารางที่ 3-5 การจำแนกสีย้อมตามลักษณะการใช้งาน

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีไดเร็กต์ (Direct dye)	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้ดี -สีติดไม่แน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายต่างอุณหภูมิ -เติมอิเล็กโตรไลต์ โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมซัลเฟต อมสีที่อุณหภูมิ 98°C
สีรีแอกทีฟ (Reactive dye)	-ประจุบวก -ละลายน้ำได้ดี -สีติดแน่น	-ฝ้าย -ขนสัตว์ -วิสคอส	พันธะโควาเลนต์	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมเกลือเพื่อกระจายสีสู่เส้นใย -เติมด่างเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใย
สีเบสิก (Basic dye)	-ประจุบวก -ละลายน้ำได้ดี	-อะคลิลิก	พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายพีเอช 3-5 -เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-100°C
สีแอซิด (Acid dye)	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้ดี -สีติดไม่แน่น	-ไนลอน -ขนสัตว์	พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลายพีเอช 3-5 -เส้นใยซึ่งสมมติว่ามีประจุบวกติดกับสีย้อมที่มีประจุลบที่อุณหภูมิ 50-110°C

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีมอร์แดนต์หรือโครม (Mordant or Chrome)	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้ดี -สีติดแน่น	-ขนสัตว์	คอลลอยด์ของสีย้อมดูดติดผิวเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายกรด -เติมโซเดียมไดโครเมตและสีย้อม -เพิ่มอุณหภูมิถึง 98°C
สีวอต (Vat dye)	-เป็นคอลลอยด์หลังหลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ	-ฝ้าย -วิสคอส	ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีซัลเฟอร์ (Sulfur dye)	-เป็นคอลลอยด์หลังหลังเกิดปฏิกิริยาในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	ปฏิกิริยาตกตะกอนผลึกภายในเส้นใย	-ละลายสีย้อมในสารละลายต่างที่มีโซเดียมซัลเฟอร์ -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์
สีดิสเพิร์ส (Disperse dye)	-ไม่ละลายน้ำหรือละลายได้น้อยมาก	-อะคลิลิก -โพลีเอสเตอร์ -ไนลอน -เซลลูโลส -อะซิเตต	คอลลอยด์ของสีย้อมดูดติดผิวเส้นใย	-แช่เส้นใยในสารละลายพีเอช 4.5 -เติมสีย้อมแล้วเพิ่มอุณหภูมิให้ได้ 130°C

ตารางที่ 3-5 (ต่อ)

ประเภทสีย้อม	สมบัติทางกายภาพและเคมี	เส้นใยที่เหมาะสมกับสีย้อม	พันธะหรือกลไกการติดสี	วิธีใช้ทั่วไป
สีย้อมอะโซอิก (Azoic dye)	-เป็นคอลลอยด์หลัง หลังเกิดปฏิกิริยาใน ในน้ำ -ไม่ละลายน้ำ -สีติดแน่น	-ฝ้าย -วิสคอส	ปฏิกิริยาตกตะกอน ในผลึกภายใน เส้นใย	-ละลายสีย้อมใน สารละลายต่างที่มี โซเดียมซัลเฟต -สีย้อมจะแพร่กระจายสู่ เส้นใยด้วยอิเล็กโตรไลต์ -ต้มเพื่อให้เกิดตะกอน ผลึก
สีเมทัลคอมเพล็กซ์แอซิด (Metalcomplex acid dye)	-ประจุลบ -ละลายน้ำได้น้อย -สีติดแน่น	-ไนลอน -ขนสัตว์	พันธะไอออนิก	-แช่เส้นใยในสารละลาย พีเอช 5-7 -เส้นใยสมมติว่ามีประจุ บวกติดกับสีย้อมที่มี ประจุ

ที่มา : เปล่งศักดิ์ (2546)

3.3 สีแอซิด

น้ำเป็นตัวกลางของการย้อมและซักล้าง สีแอซิด เป็นสารที่ทำให้เกิดสีบนเส้นใยไนลอน และเส้นใยโปรตีน ซึ่งเป็นเส้นใยมีประจุบวกในสภาวะการย้อม

สารช่วยกระจาย สารที่ช่วยทำให้สีกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ เป็นสารที่มีหมู่เคมีคล้ายกับสีแอซิด สารดังกล่าวจะแข่งกับตัวสีแอซิดโดยสารจะต้องเข้าไปจับกับหมู่ที่ว่องไวกับสีแอซิดของเส้นใย ก่อนที่สีจะจับ ดังนั้นจึงเป็นอัตราการดูดซับสี และทำให้ความเร็วในการย้อมสีลดลง ทำให้สีติดบนเส้นใยได้อย่างสม่ำเสมอ

สารประกอบเชิงซ้อนกับสีแอซิด

สารทำให้เกิดสาร เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับสีย้อมในอ่างย้อมก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งลดความเร็ว และอัตราการดูดซับของสี แอซิด เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเวลาในการย้อมเพิ่มขึ้น สารดังกล่าวจะค่อยๆ แตกตัวแล้วปลดปล่อยสีย้อมออกมา ดังนั้นสีแอซิดก็จะดูดซับบนเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ

-สารบัฟเฟอร์ สารควบคุมค่าความเป็นกรดเป็นด่าง อาจอยู่ในรูปของเกลือ หรือกรดแอมโมเนียมอะซิเตต หรือแอมโมเนียมซัลเฟต กรดน้ำส้ม หรือกรดมด มักนิยมในการย้อมสีแอซิด สำหรับเกลือแอมโมเนียมจะค่อยๆ แตกตัวเมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการย้อม จะปล่อยกรด ดังนั้นจึงลดค่าความเป็นกรดเป็นด่าง และสีแอซิดก็จะถูกดูดซึมเข้าไปในเส้นใย ลักษณะเช่นนี้จะช่วยลดอัตราการดูดซึมของสี เพื่อที่จะทำให้เกิดการย้อมที่สม่ำเสมอขึ้น สำหรับสีแอซิดบางตัวจำเป็นต้องเติมกรดเมื่ออยู่ในช่วงปลายของกระบวนการย้อม

-สารหล่อลื่น ใช้เพื่อป้องกันไม่ให้เส้นใยแตกตัว เมื่อถูกกับผนังเครื่อง หรือเกิดรอยยับและผิวหน้าวัสดุมีลักษณะขรุขระ

เนื่องจากสีในกลุ่มนี้ต้องย้อมในน้ำย้อมที่มีสภาวะเป็นกรด เพราะเหตุนี้สีกลุ่มนี้เกือบทุกตัวเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์มีประจุลบ (Anionic) จึงเรียกสีเหล่านี้ว่าสีแอซิด

สีแอซิดสามารถย้อมกับเส้นใยโปรตีน เช่น ขนสัตว์ ไหม เป็นต้น และเส้นใยไนลอนได้ ส่วนมากสีแอซิดดูดความชื้นจากอากาศได้ง่าย การเก็บและการหีบห่อจำเป็นต้องระมัดระวังเป็นอย่างดี ถ้าสีมีการดูดความชื้นเข้าไปจะทำให้สีเสื่อมสภาพรวดเร็ว ตัวสีต้องมีความสามารถในการติดสีกับเส้นใยโปรตีนโดยตรง ผลิตมาเพื่อใช้ย้อมเส้นใยขนสัตว์และไหม แต่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับสีไดเร็กซ์มาก ต่างกันที่หมู่ที่แสดงประจุลบ และสีแอซิดบางตัวมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก

เมื่อสีแอซิดมีน้ำหนักโมเลกุลมากขึ้น จะมีความสามารถในการติดสีเป็นประจุลบมากขึ้น จึงต้องการกรดในน้ำย้อมเพื่อให้ดูดซึมได้พอดี

3.4 การแบ่งประเภทของสีแอซิด

การจำแนกสีแอซิด แบ่งตามปริมาณความต้องการกรดในน้ำย้อมสามารถแบ่งได้ 4 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 สีที่ต้องการกรดแก่ (Leveling or Equalizing Acid Dyes)

สีในกลุ่มนี้สามารถละลายน้ำได้ดี ย้อมสีได้อย่างสม่ำเสมอ และความคงทนต่อแสงโดยปกติจะดี แต่ความคงทนของสีต่อการซักล้างไม่ดี เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย (ขนาดเล็ก) และค่อนข้างต้องการสภาวะกรดแก่ในการย้อม (pH 2-4 โดยการใช้กรดซัลฟูริกหรือกรดมด) เพื่อให้สีแทรกซึมได้ดี

กลุ่มที่ 2 สีที่ต้องการกรดปานกลาง (Milling Acid Dyes)

สีในกลุ่มนี้สามารถละลายน้ำได้ดี ย้อมสีได้สม่ำเสมอปานกลาง และความคงทนต่อการซักล้างดีขึ้น โมเลกุลของสีใหญ่กว่ากลุ่มที่ 1 ต้องการสภาวะเป็นกรดปานกลางในการย้อม (pH 4-6 โดยการใช้ น้ำส้ม)

กลุ่มที่ 3 สีที่ต้องการกรดอ่อนหรือสภาวะเป็นกลาง (Super Milling Acid Dyes)

สีในกลุ่มนี้สามารถละลายน้ำได้ดี ย้อมสีได้สม่ำเสมอไม่ดี แต่มีความคงทนต่อการซักล้างดีเยี่ยม มีขนาดโมเลกุลใหญ่ที่สุด ต้องการสภาวะการย้อมเป็นกรดอ่อน และสภาวะเป็นกลาง จนกระทั่งต่างอ่อนๆ (pH 6-8 โดยการใช้แอมโมเนียอะซิเตด)

กลุ่มที่ 4 สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal Complex Dyes , Premetallized)

สีย้อมที่มีประจุลบและมีโลหะเป็นองค์ประกอบอยู่ในโมเลกุล คำนี้มักใช้ร่วมกับชนิดสี เช่น สีดิสเพิร์ด เมทัลคอมเพล็กซ์ และสีรีแอคทีฟเมทัลคอมเพล็กซ์ แต่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ สีแอซิดเมทัลคอมเพล็กซ์ ซึ่งจะหมายถึงสีแอซิดที่ทำปฏิกิริยาคู่ควบ (coupling) กับเกลือของโลหะ (เช่น นิเกิล ทองแดง โครเมียมและโคบอลต์) ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามอัตราส่วนของ จำนวนอะตอมโลหะต่อโมเลกุลสี คือสีแอซิดเมทัลคอมเพล็กซ์ 1:1 และสีแอซิดเมทัลคอมเพล็กซ์ 1:2 สีแอซิดเมทัลคอมเพล็กซ์นี้นิยมใช้ย้อมเส้นใยโปรตีนและเส้นใยไนลอนโดยให้ความคงทนของ สีต่อการซักและแสงดีกว่าสีแอซิด

จำแนกสีแอสิตตามผู้ผลิตสีอาจแบ่งได้อีกแบบดังนี้

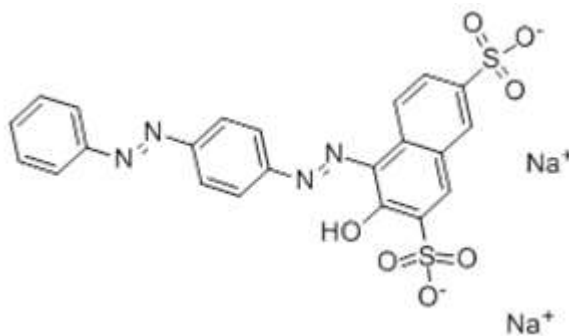
1. สีแอสิตจริง (True Acid Dyes)

สีกลุ่มนี้จะต้องย้อมในสภาวะกรด และบางครั้งอาจต้องย้อมในสภาวะกรดแก่ เพื่อให้เกิดการดูดซึมสูง

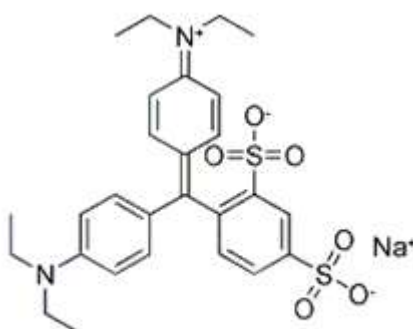
2. สีแอสิตที่ย้อมในสภาวะเป็นกลาง (Neutral Dyeing Acid Dyes)

สีกลุ่มนี้บางครั้งอาจเรียกว่าสีมิลลิ่งแอสิต (Milling Acid Dyes) สีกลุ่มนี้จะต้องย้อมในสภาวะที่เป็นกลาง โดยจะลดความความเป็นกรด เป็นด่างลง เมื่ออยู่ในช่วงท้ายของการย้อมเพื่อให้มั่นใจว่าสีที่ได้รับมีความสม่ำเสมอ

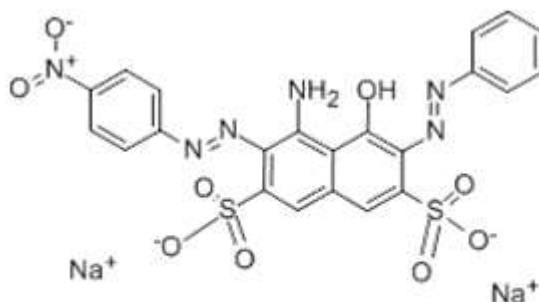
3. สีพรีเมทัลไลซ์ (Pre-metallized Dye) หรือเรียกว่า สีเมทัลคอมเพล็กซ์ (Metal Complex) ชื่อของสีกลุ่มนี้ได้มาจากว่า สารประกอบของโลหะโดยปกติโครเมียม จะปรากฏอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล สีกลุ่มนี้จะแสดงให้เห็นถึงความคงทนต่างๆ ที่ดีเยี่ยม แต่สีในกลุ่มนี้ เป็นสีที่มีราคาแพง และจะมีช่วงสีที่มืดๆ และไม่ค่อยครอบคลุมการย้อมที่ไม่สม่ำเสมอบนเส้นใยไนลอนได้ดีนัก กลุ่มสีนี้จะย้อมในสภาวะต่างอ่อนๆ เพื่อควบคุมให้สีกระจายตัวสม่ำเสมอบนวัสดุ



(ก) Acid Red 150



(ข) Acid Blue



(ค) Acid Black

ภาพที่ 3-1 สูตรโครงสร้างสีย้อมแอซิด

3.5 วิธีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมในปัจจุบัน

ปัจจุบันวิธีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อมมีหลายวิธี สามารถแยกได้เป็น 5 วิธีหลักๆ ดังนี้

1. เคมีคัลโคแอกกูเลชั่น (Chemical Coagulation) เป็นกระบวนการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว สารส้ม ฯลฯ ลงไปในน้ำเสีย เพื่อให้เกิดการรวมตัวของอนุภาคสีเกิดเป็นฟล็อกและตะกอน แยกตัวออกจากน้ำ วิธีนี้ต้องใช้สารเคมีในปริมาณสูงและก่อให้เกิดตะกอนปริมาณมาก ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกอนต่อไป ใช้บำบัดสีที่ไม่ละลายน้ำได้ดีเท่านั้น

2. การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่ใช้สารดูดซับ (Adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) จับอนุภาคสีไว้ใน มีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้บำบัดน้ำเสียปริมาณไม่มากในช่วงเวลาสั้นๆ กรณีที่น้ำเสียมีปริมาณมากวิธีนี้ไม่เหมาะสม เนื่องจากจะต้องใช้สารดูดซับปริมาณมาก ประกอบกับการคืนสภาพ (Regenerate) สารดูดซับทำได้ยากและต้องใช้ต้นทุนสูง

3. เคมีคัลออกซิเดชัน (Chemical Oxidation) ได้แก่ Chlorination, Ozonation, UV/Hydrogen Peroxide, Fenton's Reagent และ Photocatalysis เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน โดยสีจะทำปฏิกิริยาอย่างแรงกับสารออกซิไดซ์ทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลสีแตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่ไม่มีสี ต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์และสารเคมีสูง การควบคุมระบบต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเนื่องจากสารเคมีที่ใช้มีความเป็นพิษ

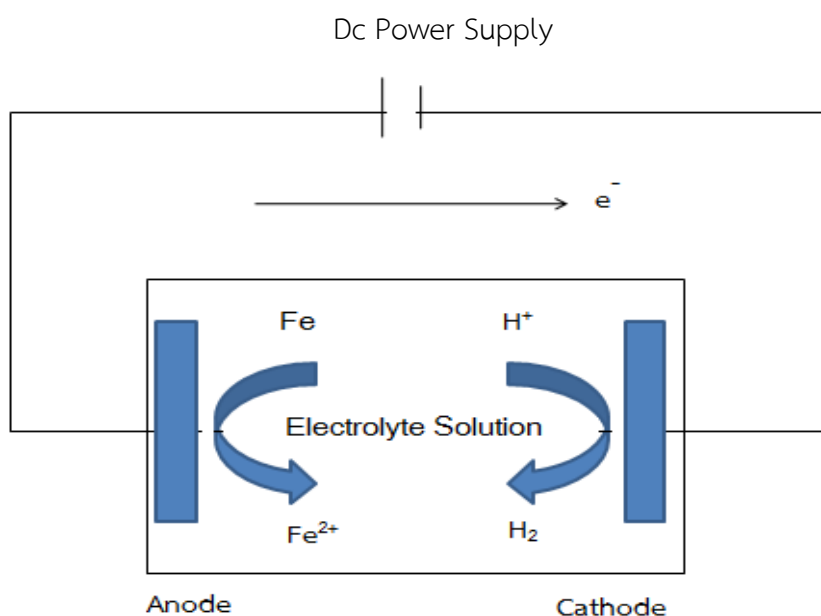
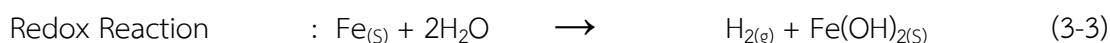
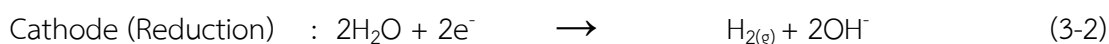
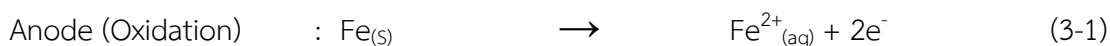
4. กระบวนการเมมเบรน (Membrane Technology) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังต่อไปนี้ คือ ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis), อัลตราฟิเตรชัน (Ultrafiltration) และนาโนฟิเตรชัน (Nanofiltration) วิธีอัลตราฟิเตรชัน ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูของเยื่อกรองใหญ่ ไม่สามารถกรองอนุภาคของสีออกจากน้ำเสียได้ ส่วนอีก 2 วิธี สามารถแยกสีออกจากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีนี้สามารถบำบัดน้ำเสียปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว แต่เป็นระบบที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษาอุปกรณ์สูง

5. การบำบัดทางชีวภาพ (Biological Treatment) เป็นวิธีการบำบัดโดยใช้จุลินทรีย์ ปัจจุบันพบว่า การบำบัดด้วยการใช้ออกซิเจน (Aerobic) ไม่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสี เนื่องจาก

กลไกที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับอิเล็กตรอนเป็นหลักแต่กระบวนการไร้ออกซิเจน (Anaerobic) เป็นที่ยอมรับกันว่ากำจัดสีย้อมประเภทอะโซได้

3.6 การประยุกต์ใช้กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสีย

วิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีได้พัฒนาขึ้นเมื่อปี 1979 โดยประยุกต์ใช้หลักการของเซลล์ไฟฟ้าแบบอิเล็กโทรไลติกเซลล์ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว และสารละลายนำไฟฟ้า ดังภาพที่ 3-2 เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์ไฟฟ้า หรือถึงปฏิกิริยาที่ใช้โลหะเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ที่ขั้วบวก (Anode) ทำให้โลหะเกิดการสึกกร่อนและละลายอยู่ในน้ำ ดังสมการที่ (3-1) ในขณะเดียวกันที่ขั้วลบ (Cathode) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction Reaction) ของน้ำโดยน้ำจะแตกตัวให้ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการที่ (3-2) เมื่อเวลาผ่านไปน้ำจะมีสภาพเป็นด่าง และทำให้เกิดตะกอนของ เฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และ เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ในรูปของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_{2(s)}$) และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_{3(s)}$) ดังสมการที่ (3-3) ซึ่งสามารถดูดซับและตกตะกอนสีย้อมและสิ่งสกปรกต่างๆ



ภาพที่ 3-2 องค์ประกอบของระบบไฟฟ้าเคมี

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและปริมาณของขั้วไฟฟ้าโลหะที่ละลายลงสู่สารละลายนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้โดยอาศัยกฎอิเล็กโทรไลซิสของฟาราเดย์ ซึ่งกล่าวว่ามวลของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดในขณะที่เกิดอิเล็กโทรไลซิสจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ และมวลของสารต่างๆที่เกิดขึ้นในระหว่างการเกิดอิเล็กโทรไลซิสที่ใช้ปริมาณไฟฟ้าไม่เท่ากันจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักสมมูลของสารนั้นจากกฎของฟาราเดย์สามารถนำมาเขียนแสดงความสัมพันธ์และศักย์ไฟฟ้าที่ต้องใช้แก่เซลล์ ซึ่งในปี 1989 JOHANNES ได้ใช้สมการดังกล่าวในการออกแบบ Electrolytic Cell

$$W = (J \times T \times M) / (Z \times F)$$

เมื่อ	W	=	ปริมาณโลหะที่ละลาย (g/cm ²)
	J	=	ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (A/cm ²)
	M	=	Molecular Weight of Anode
	T	=	เวลา (S)
	Z	=	จำนวนอิเล็กตรอนนปฏิกิริยารีดอกซ์
	F	=	Faraday's Constant (96500)

อิเล็กโทรไลติกเซลล์มีหลายรูปแบบ ได้แก่ แบบโมโนโพลาร์เซลล์เดี่ยว (Monopolar Electrode Single Cell), แบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์ต่ออนุกรมกัน (Monopolar Electrode With Cell in Series), แบบโมโนโพลาร์หลายเซลล์ต่อขนาน (Monopolar Electrode With Cell in Parallel), และแบบไบโพลาร์หลายเซลล์ต่ออนุกรมกัน (Bipolar Electrode With Cell in Series) การต่อแบบเซลล์เดี่ยวคือ มีขั้วแอโนดและแคโทดอย่างละ 1 ขั้ว เป็นการจัดการรูปแบบเซลล์ที่ง่ายที่สุด แต่ไม่เหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียเนื่องจากจะต้องใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับการจัดเซลล์ในรูปแบบอื่น ในขณะที่การจัดเซลล์แบบไบโพลาร์หลายเซลล์ต่ออนุกรมกันมีความคล่องตัวในการติดตั้งมากกว่าจึงเหมาะที่จะนำมาใช้มากที่สุด

วิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีวิธีหนึ่งแต่ยังมีการนำมาใช้กันน้อยในการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมฟอกย้อม เริ่มแรกมีการนำวิธีไฟฟ้าเคมีมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก ต่อมาจึงมีการประยุกต์ใช้ในการกำจัด บีโอดี ซีโอดี สารแขวนลอยและสีในน้ำเสีย JENKE และ DIEBOLD (1984) ได้ศึกษากระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมีโดยใช้ขั้วไฟฟ้าเหล็กทำการบำบัดน้ำเสียจากเหมืองแร่ ทำการแยกชั้นของผสมที่ประกอบด้วยน้ำมัน (Emulsified Oil) ของแข็งแขวนลอยและโลหะที่ละลายน้ำออกจากน้ำโดยใช้กระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน นอกจากนี้ยังเคยนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร ในปี 1988 วารสาร American Dyestuff Reporter ได้รายงานเรื่องปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานทอพรหมซึ่งดำเนินการโดย Andco Enviromental Processes , Inc. โดยน้ำเสียมาจากอุตสาหกรรมฟอกย้อมหลายชนิด ได้แก่ สีแวต สีดีสเพิร์ส สีซิลเฟอร์ และสีรีเอกทีฟการใช้วิธีอิเล็กโทรเคมีสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 94 โดยใช้เฟอร์รัสอออน 150 มก./ลิตร และหากใช้เพิ่มเป็น 200 มก./ลิตร สามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 98 สำหรับการใส่เฟอร์รัสอออน 500 มก./ลิตร สามารถกำจัดสีแบสติกได้ร้อยละ 90 กรณีของค่าซีโอดีนนั้นสามารถกำจัดสีได้ร้อยละ 50-70 สำหรับสีทุกประเภทต่อมาในปี 1991 ได้รายงานว่าการใช้เฟอร์รัสอออนระหว่าง 200-

500 มก./ลิตร สามารถกำจัดสีและซีโอดีได้ร้อยละ 90-98 และร้อยละ 50-70 ตามลำดับ ในขณะที่ของแข็งแขวนลอยและโลหะหนักถูกกำจัดร้อยละ 80-100 พีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7-9

3.7 กระบวนการไฟฟ้าเคมี

ไฟฟ้าเคมีเป็นเรื่องราวว่าด้วยการใช้พลังงานไฟฟ้า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่ให้พลังงานไฟฟ้า พฏิกิริยาทั้งสองอย่างดังกล่าวเป็นสิ่งที่ตรงกันข้ามแต่อาศัยพื้นฐานในหลักการอันเดียวกัน ปฏิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้าเคมี คือ ปฏิริยาเคมีที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนหรือที่เรียกว่าปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และปฏิริยานี้เกิดขึ้นในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นสารละลายที่ให้ไฟฟ้าผ่านได้

ปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หมายถึงปฏิริยาที่มีการเปลี่ยนค่าเลขออกซิเดชันหรือเป็นปฏิริยาที่มีการถ่ายโอนอิเล็กตรอน เมื่อมีการเพิ่มเลขออกซิเดชันหรือมีการให้อิเล็กตรอนเรียกว่า เกิดออกซิเดชัน และเมื่อมีการลดเลขออกซิเดชันหรือมีการรับอิเล็กตรอนเรียกว่ารีดักชัน ทั้งสองปฏิริยาเกิดขึ้นพร้อมกันเมื่อมีเลขออกซิเดชันก็ต้องมีรีดักชันปฏิริยาจึงสมบูรณ์

ปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันเมื่อเกิดขึ้นในสารละลาย ไอออนจะเป็นส่วนสำคัญที่เข้าร่วมด้วย โดยไอออนคืออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เมื่ออิเล็กโทรไลต์ละลายน้ำจะให้ไอออนบวกหรือแคโทดไอออนและไอออนลบหรือแอนไอออน ไอออนเหล่านี้เคลื่อนที่ไปได้ทั่วสารละลาย และถ้ามีขั้วไฟฟ้าจุ่มลงในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์นั้นแล้วปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไป ไอออนเหล่านี้ ต่างก็เคลื่อนเข้าหาขั้วไฟฟ้าที่มีประจุตรงข้ามกับไอออน ไฟฟ้าจะถูกนำไปโดยการเคลื่อนที่ของไอออนเป็นเหตุให้เราได้ว่าสารละลายอิเล็กโทรไลต์นำไฟฟ้าหรือยอมให้ไฟฟ้าผ่านได้ ไอออนบวกเคลื่อนที่เข้าหาแคโทดและรับอิเล็กตรอนจากแคโทด ส่วนไอออนลบเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดและให้อิเล็กตรอนแก่แอโนด ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าขั้วไฟฟ้าเป็นที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนนั่นเองถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากแคโทดมาสู่อิเล็กโทรไลต์และจากอิเล็กโทรไลต์ไปสู่แอโนด กระแสไฟฟ้าจึงผ่านสารละลาย อิเล็กโทรไลต์และทำให้ไฟเดินครบวงจร

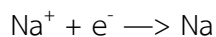
3.8 การแยกสลายด้วยไฟฟ้า

การแยกสลายด้วยไฟฟ้า คือกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในสารละลายของอิเล็กโทรไลต์แล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี การเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแยกสลายด้วยไฟฟ้า คือ ปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันดังได้กล่าวไปแล้ว โดยแยกปฏิริยาออกเป็นสองส่วนคือออกซิเดชันกับรีดักชัน ครั้งที่แปออกซิเดชันเกิดขึ้นที่แอโนด ส่วนอีกครั้งที่เป็นรีดักชันเกิดขึ้นที่แคโทด แอนไอออนเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากแอนไอออนให้แก่แอโนดเกิดปฏิริยาออกซิเดชัน ส่วนแคโทดไอออนเคลื่อนที่เข้าหาแคโทดแล้วรับอิเล็กตรอนจากแคโทดเกิดปฏิริยารีดักชัน

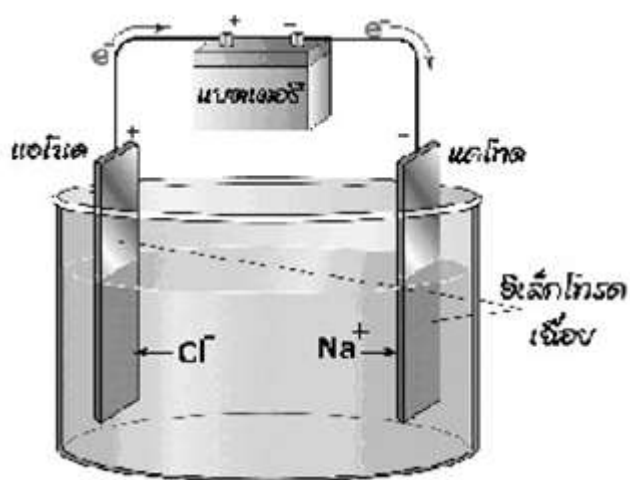
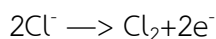
เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าลงในโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลว จะได้โลหะโซเดียมเกาะที่แคโทดและก๊าซคลอรีนออกมาที่ทางแอโนด แสดงว่าเกิดปฏิริยาขึ้นมีการแยกเกลือโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ในสภาพของแข็งนำไฟฟ้าไม่ได้ แม้ว่าจะประกอบไปด้วยไอออนทั้งผลึกก็ตาม การที่นำไฟฟ้าไม่ได้เพราะไอออนในของแข็งเคลื่อนที่ไม่ได้ แต่เมื่อให้ความร้อนจนโซเดียมคลอไรด์หลอมเหลวที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส ใส่ขั้วไฟฟ้ามีเฉื่อย เช่น แท่งคาร์บอนหรือแพลทินัมลงไปแล้วผ่านกระแสไฟฟ้าโดนต่อจากแหล่งกำเนิดไฟกระแสตรง เช่น แบตเตอรี่ จะพบว่าโซเดียมคลอไรด์ที่

หลอมเหลวนำไฟฟ้าได้ ทั้งนี้เพราะในสภาพของเหลวไอออนเคลื่อนที่ได้สะดวก การนำไฟฟ้าเกิดขึ้นดังกระบวนการต่อไปนี้

ก) Na^+ เคลื่อนที่ไปสู่แคโทดซึ่งมีประจุลบ รับอิเล็กตรอนจากแคโทดเกิดรีดักชัน Na^+ เปลี่ยนเป็นโลหะโซเดียม



ข) Cl^- เคลื่อนที่ไปสู่แอโนดซึ่งมีประจุบวก ให้อิเล็กตรอนแก่แอโนดเกิดออกซิเดชัน Cl^- เปลี่ยนเป็นอะตอมคลอรีนแล้วอะตอมคลอรีนสองอะตอมรวมกันเป็นแก๊สคลอรีนหนึ่งโมเลกุลได้แก๊สคลอรีนปุดออกมาทางแอโนด

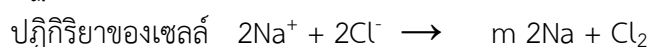


ภาพที่ 3-3 การแยกสลายด้วยไฟฟ้าของ NaCl ที่หลอมเหลว

ที่มา : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemistry/web/electrolysis.htm>

กระแสไฟฟ้าเดินครบวงจรได้เพราะแอโนดรับอิเล็กตรอนจากแอนไอออน Cl^- อิเล็กตรอนเดินไปตามวงจรไฟฟ้านอกของเหลวมาที่แคโทด แล้วถ่ายโอนไปสู่แคโทดไอออน Na^+ อิเล็กตรอนหายไปทางแคโทดแล้วได้อิเล็กตรอนกลับมาทางแอโนด ครบเป็นวงจร สำหรับภายในของเหลวการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าสืบเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของไอออนสนามไฟฟ้า

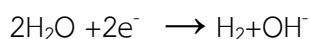
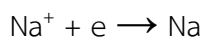
ผลที่ได้จากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน 1 โมล ทำให้เกิดโซเดียม 1 โมล และคลอรีน $\frac{1}{2}$ โมล เพื่อให้ปฏิกิริยาออกซิเดชันกับรีดักชันสมดุลกัน จึงทำจำนวนอิเล็กตรอนให้เท่ากันเสีย ดังนี้



กระแสไฟฟ้าที่ผ่านลงในโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลว ทำให้ได้โซเดียมที่แคโทดและแก๊สคลอรีนที่แอโนด กระบวนการเช่นนี้เป็นการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้า เราเรียกว่าโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลว ถูกแยกสลายด้วยไฟฟ้า ไฟฟ้าเป็นแรงผลักดันให้ปฏิกิริยาที่ไม่เกิดขึ้นเองให้เกิดขึ้นได้ อุปกรณ์ทั้งชุดซึ่งประกอบด้วยภาชนะบรรจุอิเล็กโทรไลต์ มีขั้วไฟฟ้าคู่หนึ่งต่อจากแหล่งทำไฟ กระแสตรงเรียกว่าเซลล์อิเล็กโทรไลติก เซลล์ชนิดนี้ใช้พลังงานจากแหล่งภายนอกไปทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี

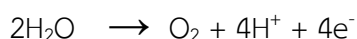
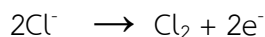
ถ้าเราทำการแยกสารละลายโซเดียมคลอไรด์ด้วยไฟฟ้า ละลายโซเดียมคลอไรด์ได้จากการละลายโซเดียมคลอไรด์ในน้ำ ภายในสารละลายไม่ได้มีแต่เพียง Na^+ และ Cl^- เท่านั้น แต่ยังมีโมเลกุลน้ำซึ่งอาจถูกออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ได้ด้วย สิ่งที่เกิดขึ้นภายในเซลล์อิเล็กโทรไลติกมีดังนี้

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

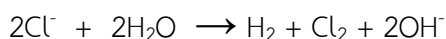


ระหว่าง Na^+ กับ H_2O H_2O จะถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่า Na^+ ปฏิกิริยาที่แคโทดจึงเป็นปฏิกิริยาได้แก๊สไฮโดรเจน

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



แต่เนื่องจาก Cl^- ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายกว่า H_2O จึงเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่แอโนดได้แก๊สคลอรีน ปฏิกิริยาของเซลล์ได้จากการรวมกันของปฏิกิริยาทั้งสองเข้าด้วยกัน



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

3.9 หลักการของกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ซึ่งมีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับเรื่องต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้า

ในเซลล์ไฟฟ้ามีการไหลของกระแสไฟฟ้า เพราะมีการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำในการผลักดัน 1 คูลอมบ์ เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในวงจรนั้น และจะต้องมีการรับหรือปลดปล่อยพลังงานไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วยเสมอ เซลล์ไฟฟ้าหนึ่งต้องการพลังงาน 1 จูล ในการที่ทำให้เคลื่อนที่ของประจุ 1 คูลอมบ์ จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในเซลล์ จะหมายความว่าจุดสองจุดนั้นมีความต่างศักย์เท่ากับ 1 โวลต์ ดังนั้นความต่างศักย์ 1 โวลต์ จึงมีค่าเท่ากับ 1 จูลต่อคูลอมบ์และทางไฟฟ้าเคมีมักจะแทนโวลต์ด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) จากความหมายของพลังงานไฟฟ้าดังกล่าวข้างต้น ทำให้เห็นได้ว่า

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

แต่งานที่ได้จากเซลล์ไฟฟ้านั้นเพราะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอน ดังนั้นจำนวนประจุในหน่วยคูลอมบ์ จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยา ซึ่งทุก 1 โมล ของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณประจุเท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ สมมติว่า ในปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้ามีการถ่ายเทอิเล็กตรอน $n \times 96,487$ หรือ nF คูลอมบ์ ในเมื่อ F คือ ค่าคงที่ฟาราเดย์ เท่ากับ 96,487 คูลอมบ์ต่อโมล เมื่อเป็นเช่นนี้สมการที่ 2.15 จะเปลี่ยนเป็น

$$\text{Welec} = (nF) (E) = nF \times 96,487$$

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

$$\Delta G = -nFE$$

สมการนี้เป็นสมการที่สำคัญมากเพราะเป็นสมการที่เชื่อมระหว่างความรู้ทางอุณหพลศาสตร์เข้ากับไฟฟ้าเคมี ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ได้ แล้วจะสามารถหาคุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์ต่างๆ เช่น ΔG , ΔH , ΔS ได้ ในปฏิกิริยาหนึ่งๆ เครื่องหมายของ ΔG มีความสำคัญมาก คือถ้าอุณหภูมิต่ำและความดันหนึ่งๆ เครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นได้เอง แต่ถ้าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ ΔG จะมีเครื่องหมายเป็นบวก ถ้าปฏิกิริยาอยู่ในสมดุล ΔG จะเท่ากับศูนย์ ΔG และแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ กัน ดังนั้นเครื่องหมายของแรงเคลื่อนไฟฟ้าย่อมจะระบุให้ทราบว่าปฏิกิริยาในเซลล์นั้นเป็นแบบเกิดได้เองหรือเกิดไม่ได้เอง หรืออยู่ภายในภาวะสมดุล

ตารางที่ 3-6 ความหมายของเครื่องหมายของ ΔG และ ΔE

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

ที่มา : กัณทมาศ (2539)

ศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดเดี่ยวและศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดมาตรฐาน

เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ คือผลรวมทางพีชคณิตของศักย์ไฟฟ้าของแต่ละขั้วอิเล็กโทรด ในทางปฏิบัติไม่มีวิธีวัดศักย์ไฟฟ้าเฉพาะแต่ละขั้วเดี่ยวได้โดยตรง แต่ต้องวัดเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ ดังนั้นจึงต้องกำหนดศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดมาตรฐานขึ้น คือกำหนดให้อิเล็กโทรดไฮโดรเจนเมื่ออยู่ที่สภาวะมาตรฐาน (คือผ่านก๊าซไฮโดรเจนที่มีความดัน 1 บรรยากาศ ลงไปในสารละลายที่มีลวดแพลทินัมจุ่มอยู่และสารละลายนั้นมีไฮโดรเจนไอออนที่มีแอกติวิตีเท่ากับ 1 หรือมีความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตรโดยประมาณ) มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์ที่ทุกอุณหภูมิ ศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจน เมื่อต้องการทราบศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดอื่น เช่น Cu/Cu^{2+} หรือ Zn/Zn^{2+} เป็นต้น ต้องนำอิเล็กโทรดเหล่านั้นมาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนและวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะเป็นศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่ต้องการทราบ ทั้งนี้เพราะศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับศูนย์นั่นเอง แต่ถ้าอิเล็กโทรดนั้นอยู่ในสภาวะมาตรฐานด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์จะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน (E^0_{cell}) และเป็นค่าเดียวกันกับศักย์มาตรฐานของอิเล็กโทรดเดี่ยว (E^0) ที่มาจับคู่กับอิเล็กโทรดไฮโดรเจนมาตรฐาน โดยการทำเช่นนี้กับอิเล็กโทรดอื่นๆ ทำให้ได้ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดต่างๆ

ค่าศักย์ไฟฟ้าแสดงให้เห็นแนวโน้มของขั้วอิเล็กโทรดที่จะรับอิเล็กตรอนว่ามีความสามารถมากน้อยเพียงใด หรือเรียกว่าเป็นการแสดงความสามารถในการเป็นตัวออกซิไดซ์ (หรือตัวรีดิวซ์) เช่น ครึ่งปฏิกิริยา Li^+/Li มีค่า E^0 เป็นลบมากแสดงว่า Li^+ มีความสามารถน้อยในการรับอิเล็กตรอน จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่อ่อนมาก แต่ครึ่งปฏิกิริยา F_2/F^- มีค่า E^0 เป็นบวกมาก แสดงว่า F_2 มีความสามารถสูงในการรับอิเล็กตรอน จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงมาก ในทางกลับกันโลหะ Li มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนได้ดี ดังนั้นโลหะ Li จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่ดีมาก และ F^- มีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนได้ยาก จึงเป็นตัวรีดิวซ์ที่อ่อนมาก ส่วนอีกตัวอย่างคือ MnO_4^- กับ Fe^{2+} ใน สารละลายพบว่า 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 $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนได้ดีกว่าระบบ $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่ดีกว่า จากสูตรการหาแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะมาตรฐาน คือ

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

ในทำนองเดียวกัน ถ้าวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเซลล์ที่สภาวะใดๆ จะได้ความสัมพันธ์คล้ายกัน คือ

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

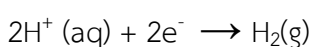
ตารางที่ 3-7 ศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดที่ 25 องศาเซลเซียส

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

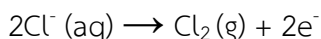
ที่มา : ทบวงมหาวิทยาลัย (2528)

3.10 กระบวนการอิเล็กโทรลิซิส

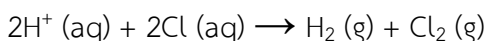
จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถบอกได้ว่า ปฏิกิริยานั้นๆเกิดขึ้นเองได้หรือไม่ ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าบวก ปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นเองได้ แต่ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของปฏิกิริยามีค่าเป็นลบ ปฏิกิริยานั้นจะเกิดขึ้นเองไม่ได้ เมื่อปฏิกิริยาดังกล่าวได้รับพลังงานจากแหล่งไฟฟ้าภายนอกจะสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาหรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งภายนอกเรียกว่า อิเล็กโทรลิซิส ส่วนประกอบสำคัญของกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสคือ แหล่งให้พลังงานไฟฟ้า อิเล็กโทรดสองขั้ว (Electrode) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ในส่วนของอิเล็กโทรดสองขั้วและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เมื่อประกอบเข้าด้วยกันแล้วเรียกว่า เซลล์อิเล็กโทรลิติก สำหรับอิเล็กโทรดสองขั้วนั้น ขั้วหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงเรียกขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันว่า แอโนด(Anode) ส่วนขั้วอิเล็กโทรดที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันเรียกว่า แคโทด(Cathode) ตัวอย่างของเซลล์อิเล็กโทรลิติก คือ กระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้นพอประมาณในน้ำโดไนซ์แกรไฟต์เป็นอิเล็กโทรด สารละลายไฮโดรคลอริกจะแตกตัวออกเป็น H^+ และ Cl^- ไอออนเมื่อใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแล้วมีเส้นลวดต่อไปยังอิเล็กโทรดที่ทำด้วยแกรไฟต์ พบว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในขณะเดียวกันอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้นรอบๆ และฟุดขึ้นมาจากสารละลาย ส่วนอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่ก็เกิดฟองก๊าซคลอรีนเช่นกัน การเกิดฟองก๊าซที่อิเล็กโทรดทั้งสองนี้แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือปฏิกิริยาทางเคมีขึ้น กระบวนการอิเล็กโทรลิซisdังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่ เมื่อปิตวงจรวจรอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ออกจากขั้วลบของแบตเตอรี่ไปตามเส้นลวดไปจนถึงอิเล็กโทรดซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด ไอออนบวก H^+ จะเคลื่อนที่มารับอิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดนี้และถูกรีดิวซ์เป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการ



ส่วนไอออนลบ Cl^- จะให้อิเล็กตรอนที่อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วของแบตเตอรี่ ซึ่งทำหน้าที่เป็นแอโนด ดังสมการ



อิเล็กตรอนที่ได้จะเคลื่อนที่ไปสู่ขั้วบวกของแบตเตอรี่ทำให้ครบวงจร ปฏิกิริยาของเซลล์จึงได้จากผลบวกของสมการดังนี้



3.11 ขั้วไฟฟ้า(Electrode)

ขั้วไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1) ขั้วไฟฟ้าที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา (Active electrodes) หมายถึง ขั้วที่มีส่วนในปฏิกิริยา เช่น ครึ่งเซลล์ Zn/Zn^{2+} ถ้า Zn เป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนไป Zn ก็จะผุกร่อนไป ถ้า Zn^{2+} รับอิเล็กตรอนมากก็จะเปลี่ยนเป็น Zn เกาะบนขั้ว

2) ขั้วที่ไม่ว่องไวในปฏิกิริยา (Inert electrodes) อาทิ Pt หรือ C (แกรไฟท์หรือคาร์บอน) ที่จุ่มลงในสารละลายหนึ่ง ก็จะทำหน้าที่เป็นทางให้อิเล็กตรอนไหลผ่านเข้าหรือออกได้โดยไม่มีการปฏิกิริยากับไอออนในสารละลายนั้นๆ

3) ขั้วแก๊ส (Gas electrodes) ในครึ่งเซลล์ $\text{H}^+/\text{H}_2 (\text{g})$ จะมี $\text{Pt}/\text{H}_2 (\text{g})$ (1บรรยากาศ) จุ่มในสารละลาย H^+ หรือ H_3O^+ (1M) และเรียกว่า ขั้วแก๊สไฮโดรเจน หรือเรียกว่า ขั้วแก๊สไฮโดรเจนมาตรฐาน (standard hydrogen electrodes ; SHE) โดยที่ปลายโลหะ Pt จะมี Pt ที่เป็นผงละเอียดเคลือบอยู่ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst)

3.12 วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด

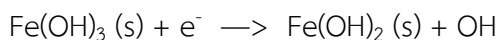
1) อะลูมิเนียม (Aluminum)

เป็นโลหะหมู่เดียวกับแกลเลียม อินเดียม และเทลลูเรียม อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีมากที่สุดในผิวโลก อะลูมิเนียมจัดว่า ว่องไวสามารถทำปฏิกิริยากับโลหะอื่นๆได้ อะลูมิเนียมมีเลขออกซิเดชัน เท่ากับ +3 เมื่อโลหะให้อิเล็กตรอนออกไป 3 อิเล็กตรอน Al^{3+} มีขนาดเล็กมาก สารประกอบโลหะที่มีเลขออกซิเดชัน +3 มักจะเป็นสารประกอบโคเวเลนต์ อย่างไรก็ตามเมื่ออยู่ในน้ำ Al^{3+} จะเกิดไฮดรอกไซด์และไฮโดรไลซิส กลือ ซัลเฟต ไนเตรต และเฮไลด์ของอะลูมิเนียมละลายน้ำได้ดี แต่ไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมไม่ละลายน้ำ ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียมมีสมบัติเป็นแอมโฟเทอริก

2) เหล็ก (steels)

เป็นโลหะแข็ง มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง มีความว่องไวปานกลางต่อปฏิกิริยา สารประกอบของธาตุเหล็กมีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 เลขออกซิเดชันสูงๆมีบ้างแต่ไม่เสถียรและเป็นตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่มีความชื้น มักจะกลายเป็นสนิมน้ำตาลที่ผิวเรียกว่าสนิมเหล็ก ดังนั้นเครื่องมือเครื่องใช้ที่ทำด้วยเหล็กจึงต้องหาวิธีป้องกัน เช่น ทาสีกันสนิมเคลือบด้วยโลหะที่เหมาะสม (ดีบุก สังกะสี โครเมียม) หรือผสมโลหะบางชนิดลงไปเพื่อให้ได้เหล็กปลอดสนิม เมื่อเผาไหม้ในอากาศจะได้ออกไซด์ ผสม FeO , Fe_2O_3 หรือ Fe_3O_4 ซึ่งมีประโยชน์ใช้ฉาบผิวเหล็กเพื่อป้องกันสนิมได้ เหล็กสามารถเกิดสารประกอบกับโลหะได้หลายชนิดเมื่อให้ความร้อน แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจน

รเจนเมื่ออยู่ในสารละลาย เหล็กมักอยู่ในรูปของ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ปนกัน เนื่องจาก Fe(II) ถูกออกซิไดซ์ โดยอากาศได้ง่าย โดยเฉพาะในสภาวะเป็นกลางหรือเบส ดังจะเห็นจากค่า E^0



สารประกอบที่ปราศจากน้ำของ Fe(II) ไม่มีสี แต่ถ้ามีน้ำหรืออยู่ในสารละลายจะมีสีเขียวอ่อนของไฮดรอกไซด์ $[\text{Fe(H}_2\text{O)}_6]^{2+}$ สารประกอบ Fe(III) มักมีสมบัติเป็นกรดมากกว่าของ Fe(II) ทั้งนี้ ปรากฏว่า Fe(III) ในสารละลายจะอยู่ในรูปของ $[\text{Fe(H}_2\text{O)}_6]^{3+}$ ซึ่งจะมีสีม่วงจาง เมื่อ pH ต่ำมากๆ เท่านั้น มิฉะนั้นจะถูกไฮดรอกไซด์ กลายเป็น $[\text{Fe(H}_2\text{O)}_5(\text{OH})]^{2+}$ หรือไฮดรอกไซด์เชิงซ้อนคล้ายๆ กันนี้ทำให้ได้สารละลายสีเหลือง

3) คาร์บอน (Carbon)

คาร์บอนมีคุณสมบัติผสมผสานเฉพาะตัวจนเป็นองค์ประกอบสำคัญของแบตเตอรี่ และเซลล์เชื้อเพลิง คาร์บอนในรูปแบบต่างๆ ทำจากส่วนประกอบสำคัญของแหล่งกำเนิดพลังงานมานานกว่าหนึ่งศตวรรษครึ่ง หนึ่งในบรรดาการใช้ประโยชน์คาร์บอนในแบตเตอรี่ทางการค้า ยุคแรกสุดอยู่ในปี 1841 เมื่อ Robert Bunsen ได้เสนอให้เปลี่ยนตัวเก็บกระแสไฟฟ้าของ Grove cell จากพลาตินัมที่มีราคาแพงไปเป็นคาร์บอนซึ่งมีความคุ้มค่ากว่ากัน

ปัจจุบันด้วยคุณสมบัติเฉพาะตัวของคาร์บอนทำให้นิยมใช้เป็นส่วนประกอบในเทคโนโลยีแหล่งกำเนิดพลังงานขณะที่โครงสร้างคาร์บอนรูปแบบใหม่มีการสังเคราะห์ขึ้นมาอย่าง nanotubes หรือ fullerenes ประโยชน์ของมันต่อเทคโนโลยีต้นกำเนิดพลังงานกำลังศึกษากันอย่างเอาจริงเอาจัง ขณะที่คาร์บอนเป็นตัวนำอิเล็กโทรดที่เฉื่อยและดีพอสมควร มันมีประโยชน์ทำเป็นขั้วไฟฟ้า (electrodes) หรือเพิ่มความนำไฟฟ้าให้แก่วัสดุชนิดอื่นๆ คาร์บอนยังมีราคาถูกและหาได้ง่ายในรูปแบบต่างๆ อีกด้วย ในสภาพของแข็งคาร์บอนทำให้อยู่ในรูปแท่งทรงกระบอกหรือเป็นแผ่นก็ได้ นอกจากนี้ยังใช้เป็นแผ่นผ้าให้ก๊าซแพร่ผ่านได้ ผงคาร์บอนและเส้นใยคาร์บอนมีพื้นที่ผิวกว้างใหญ่ จึงเป็นประโยชน์ต่อการรองรับสารเร่งปฏิกิริยาและทำขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวเนื่องจากโครงสร้างของมันทำให้เกิดความพรุนได้โครงสร้างเป็นชั้นๆ และเป็น nanotubes จึงมีการนำคาร์บอนไปประยุกต์ใช้เป็นการสอดใส่หรือเป็นตัวกลางสำหรับการเก็บไฮโดรเจน

คาร์บอนใช้ทั้งในแบตเตอรี่ซึ่งเก็บพลังงานของมันไว้ภายใน และใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงผลิตพลังงานจากแหล่งกำเนิดเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดซ์ภายนอก

4) ไทเทเนียม

เป็นธาตุหมู่เดียวกับเซอร์โคเนียม และแฮฟเนียม ไทเทเนียม มีเลขออกซิเดชันได้ทั้ง +2, +3 และ +4 ไทเทเนียมเป็นโลหะทรานสิชัน คือ มีลักษณะขาวคล้ายเงิน จุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูง แข็ง เหนียว ดึงให้เป็นเส้นได้ เป็นโลหะทรานสิชันที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุด ที่สภาวะปกติ ไทเทเนียมค่อนข้าง

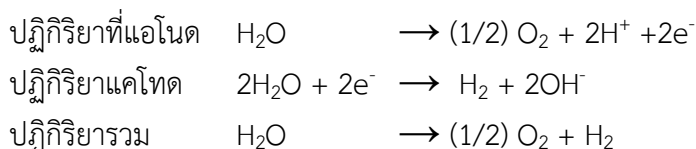
เฉื่อยมาก ทนได้แม้แต่ก๊าซคลอรีนแห้ง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ (สูงกว่า 500 องศาเซลเซียส) จะสามารถทำปฏิกิริยาอย่างรุนแรงกับโลหะ ได้สารประกอบโคเวเลนต์ เช่น TiO_2 , TiCl_4 เป็นต้น สารประกอบของไทเทเนียมที่มีเลขออกซิเดชัน +2 และ +3 ถึงแม้ไทเทเนียมจะมีข้อดีหลายประการ แต่ไม่นิยมใช้เป็นวัสดุโครงสร้างแทนเหล็ก ทั้งนี้เพราะความไวต่อปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ ดังได้กล่าวมาแล้ว

5) แพลทินัม

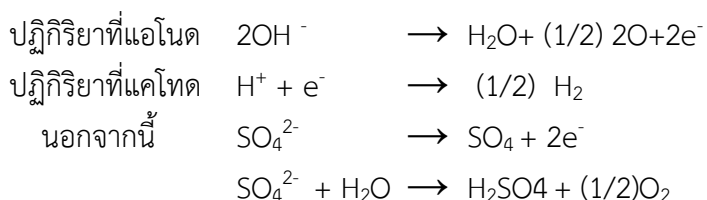
มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงมาก คือ มีจุดเดือด 3.827 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1770 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงพันธะโลหะและยังเป็นเหตุให้ไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้สารประกอบของแพลทินัมมักไม่ค่อยเสถียร เมื่อให้ความร้อนสูงขึ้นจะสลายตัวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงพบโลหะพวกนี้ในรูปของธาตุอิสระในธาตุอยู่บ้างนอกจากจะเกิดเป็นสินแร่กับธาตุอื่นๆ และมักจะพบอยู่รวมกับหลายธาตุเป็นโลหะเจือแล้ว และยังปรากฏรวมอยู่กับพวกธาตุทองแดง เงิน และทองคำอยู่ด้วย แพลทินัมนี้มีน้อยมาก จึงมีราคาแพงมาก แพลทินัมมีสีขาวและอ่อนมีเลขออกซิเดชันได้หลายค่า ตั้งแต่ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +8 แต่ที่สำคัญคือ +2 ถึง +4 เท่านั้น เนื่องจากมีสมบัติในการนำความร้อนไฟฟ้าได้ดี เชื่อยต่อปฏิกิริยา จึงมีประโยชน์ในการทำอิเล็กทรอนิกส์ แบตเตอรี่ และภาชนะสำหรับงานที่อุณหภูมิสูง และต้องการความต้านทานการกัดกร่อนสูง

ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียโดยมีวิธีไฟฟ้าเคมี

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากอิเล็กโทรดที่เสถียร เช่น แพลทินัม เป็นต้น ในสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย คอน้ำจะถูกออกซิไดส์ ได้ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจน

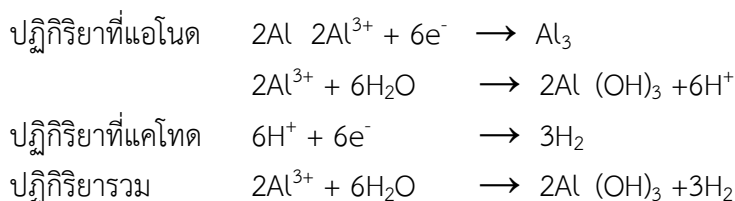


Allmand (1931) กล่าวถึงปฏิกิริยาในการเกิดไฮโดรเจน และก๊าซออกซิเจน อีกทั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของซัลเฟตไอออน

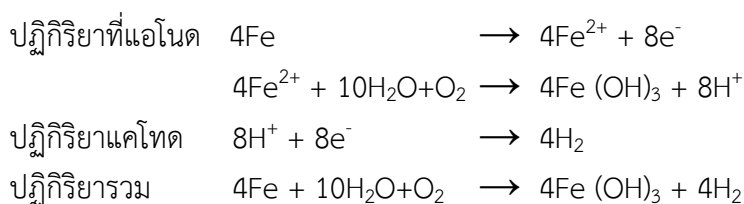


Biwyk (1991) ใช้อิเล็กโทรดที่สลายตัวได้ คือ เหล็กหรืออะลูมิเนียม บำบัดน้ำเสียจากชุมชนที่ผ่านการบำบัดทางชีววิทยาแล้ว

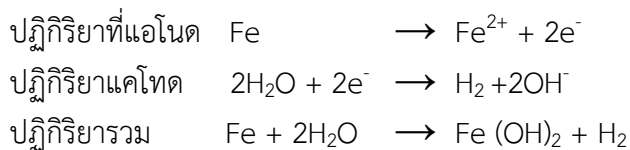
1. อะลูมิเนียม



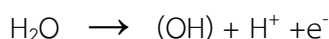
2. เหล็ก



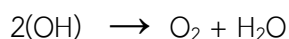
อิเล็กโทรดแบบสลายตัวได้ คือ เหล็ก เพื่อผลิตสารช่วยในการตกตะกอนรูปตะกอนของโลหะ ไฮดรอกไซด์



อิเล็กโทรดแบบเสถียร คือ แพลทินัม หรือไทเทเนียมเคลือบดีบุกออกไซด์ในการกำจัดฟีนอล ที่มีคุณสมบัติเป็นสารอินทรีย์ โดย OH หรืออนุพันธ์ไฮดรอกซิล ได้จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของน้ำด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีซึ่งจะเกิดบริเวณพื้นผิวของอิเล็กโทรด



ปฏิกิริยาข้างเคียง ที่จะเกิดขึ้น ได้แก่ การเกิดก๊าซออกซิเจน



3.13 ปฏิกิริยาของเซลล์ไฟฟ้าเคมี

1) กระบวนการ Oxidation

เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านน้ำจะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) จะได้ก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง ไอออนของโลหะที่ละลายน้ำได้ (วาเลนซ์ 2 ขึ้นไป) จะตกตะกอนเป็นโลหะ ไฮดรอกไซด์ (Organic contaminant) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความพร้อมที่จะรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Comolex)

2) กระบวนการ Flotation

ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งเป็นฟองเล็กมาก เกิดขึ้นที่อีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งที่จะลอยตัวไปสู่ผิวและพองอนุภาคเล็กๆ ให้ลอยขึ้นสู่ผิวเกิดการแยกของสารแขวนลอย

3) กระบวนการรวมตัวเป็นสารเชิงซ้อน

ที่ขั้วบวก Ion ของ Fe^{3+} , Al^{3+} จะทำปฏิกิริยารวมตัวเป็น (Organ metallic complex) กับสารอินทรีย์พวก (Aromatic และ Alkenes) สารเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายในน้ำ จะลอยสู่ผิวน้ำเสียโดยการลอยตัว (Flotation) ซึ่งเกิดจากการพองโดยฟองก๊าซและบางส่วนจะจมลง (Precipitation)

4) กระบวนการรวมตัวทางเคมี (Chemical Coagulation)

ในกรณีที่ใช้โลหะเหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์หรืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสาร (Coagulant และ Flocculants) ช่วยให้สารแขวนลอยเล็กๆ รวมตัวกัน สามารถตกตะกอนและแยกตัวออกได้ดี

3.14 เซลล์ไฟฟ้าเคมี

จะทำให้เกิดปฏิกิริยาหลายอย่าง ดังต่อไปนี้

1) กระบวนการ Oxidation

เมื่อกระแสไฟฟ้าผ่านน้ำจะเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) จะได้ก๊าซออกซิเจนซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรง อีออนของโลหะที่ละลายน้ำได้ (วาเลนซ์ 2 ขึ้นไป) จะตกตะกอนเป็นโลหะไดคโตรอกไซด์ (Organic contaminant) เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความพร้อมที่รวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex)

2) กระบวนการ Flotation

ก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งเป็นฟองเล็กมากเกิดขึ้นที่ขั้วที่ไฟฟ้าหนึ่งจะลอยสู่ผิวและพองอนุภาคเล็กๆ ให้ลอยขึ้นสู่ผิว เกิดการแยกของสารแขวนลอย

3) กระบวนการรวมตัวเป็นสารเชิงซ้อน

ที่ขั้วบวกไอออนของ Fe^{3+} และ Al^{+3} จะทำปฏิกิริยารวมตัวเป็น organometallic complex กับสารอินทรีย์พวก Aromatic และ Alkanes สารเชิงซ้อนเหล่านี้ไม่ละลายในน้ำ จะลอยสู่ผิวน้ำเสียโดยการลอยตัว (Flotation) ซึ่งเกิดจากการพองโดยฟองก๊าซและบางส่วนจะจมลง (Precipitation)

4) กระบวนการรวมตัวทางเคมี (Chemical Coagulation)

ในกรณีที่ใช้โลหะเหล็กหรืออะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จะเกิดการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์หรืออะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสาร Coagulant และ Flocculants ช่วยทำให้สารแขวนลอยเล็กๆ รวมตัวกัน สามารถตกตะกอนและแยกตัวออกได้ดี

3.15 ดัชนีที่มีผลต่อกระบวนการไฟฟ้าเคมี

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียมีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าเคมี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะทำความเข้าใจดัชนีต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของระบบไฟฟ้าเคมี

1) ค่าการนำไฟฟ้า

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

$$V = I \times R$$

ดังนั้นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีคือความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั่นเอง ซึ่งมีความสัมพันธ์กันกับค่าการนำไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการ

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

เมื่อ R เป็นความต้านทานกระแสไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโอห์ม

l เป็นระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดในหน่วยเซนติเมตร

C เป็นค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยโมห์ หรือซีเมน

A เป็นพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในหน่วยตารางเซนติเมตร

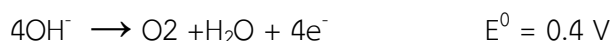
ซึ่งสามารถหาค่าการนำไฟฟ้าจำเพาะของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้จากเครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า

2) สี

สีในน้ำอาจเป็นผลมาจากไอออนของโลหะ เช่น เหล็ก แมงกานีส เป็นต้น ซากพืชซากสัตว์และของเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ตามมาตรฐานการบำบัดน้ำเสีย ความหมายของสี “สี” จะเป็นความหมายเดียวกันกับ “Colour” ซึ่งหมายถึงสีของน้ำที่กำจัดความขุ่นออกไปแล้ว ขณะที่ “Apparent colour” หมายถึงสีของน้ำที่มีสารแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ ในกรณีของน้ำเสียในอุตสาหกรรมที่มีสี พบว่าสีจะกระจายอยู่ทั่วไปในรูปของคอลลอยด์หรือสารแขวนลอย ซึ่งกรณีนี้จะทำให้ “True colour” ต่างจาก “Apparent colour” ชัดเจน

3) สารอินทรีย์

ปฏิกิริยาการกำจัดสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นที่แอโนด เช่น ไอออนลบถูกทำให้เป็นกลางหรืออาจจะให้อิเล็กตรอน ซึ่งในปฏิกิริยาที่มีศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาดำจะเกิดปฏิกิริยาก่อน เช่น



ในทางทฤษฎีจลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์แสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดจะให้อนุพันธ์อิสระซึ่งว่องไวในการทำปฏิกิริยา เช่น OH^- ซึ่งสูญเสียอิเล็กตรอน แต่ยังไม่ได้ทำปฏิกิริยาใดๆ สามารถทำปฏิกิริยากันเองหรือกับไอออนหรือสารประกอบ หรืออนุพันธ์อิสระอื่นๆบริเวณอิเล็กโทรด รวมทั้งสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำเสียด้วยหรืออาจจะรวมตัวกับอนุพันธ์อิสระอื่น ได้สารที่มีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของสารอินทรีย์และถ้าในน้ำเสียมีคลอไรด์ไอออน พบว่ามีวิธีไฟฟ้าเคมีจะทำให้เกิดก๊าซคลอรีนและอนุพันธ์ของคลอรีนที่แอโนด ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ได้อีกด้วย แต่การกำจัดสารอินทรีย์แบบสมบูรณ์ด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีนี้ไม่เป็นที่นิยม เพราะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ใช่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่าย จะเกิดขึ้นกับสารอินทรีย์บางตัวในอัตราการกำจัดต่ำและบางสถานะเท่านั้น เช่น ในสถานะที่ใช้แพลทินัมเป็นอิเล็กโทรดในสารละลายกรดเข้มข้นหรือด่างเข้มข้นที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นต้น

สถานะเช่นนี้ไม่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากต้องใช้สารเคมีมาก วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดมีราคาแพงและต้องใช้พลังงานในการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยา ยิ่งไปกว่านั้น การ

เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ของสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ต้องการการถ่ายเทอิเล็กตรอนจำนวนมาก จึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงไปได้ ในบางครั้งการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของสารอินทรีย์ให้เล็กลงจะสามารถลดความเป็นพิษได้แล้ว ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบสมบูรณ์ ของสารอินทรีย์ต้องใช้โอโซนที่ผลิตที่ผิวมาก เช่น คาร์บอน เป็นต้น

4) ค่าพีเอช pH

สารละลายในน้ำไม่ว่าจะเป็นกรด เป็นเบส หรือเป็นกลาง ย่อมประกอบด้วย H_3O^+ และ OH^- เสมอ โดยมีผลคูณของไอออนทั้งสอง เท่ากับ 10^{-14} ดังนั้นถ้าทราบ $[\text{H}_3\text{O}^+]$ เพียงอย่างเดียวสามารถบอกได้ว่าสารละลายเป็นกรด เป็นเบส หรือเป็นกลาง เนื่องจาก $[\text{H}_3\text{O}^+]$ ในสารละลายมีค่าน้อยและเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างจาก 1 โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร ถึง 10^{-14} โมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร การเขียนความเข้มข้นด้วยเลขยกกำลังที่ติดลบย่อมไม่สะดวกและผิดพลาดได้ง่าย ขอเสนอแนะให้ใช้มาตราส่วนใหม่ที่สะดวกกว่า ซึ่งเรียกว่ามาตราส่วน pH โดนมีนามว่า

$$\text{pH} = -\log [\text{H}_3\text{O}^+]$$

$$[\text{H}_3\text{O}^+] = 10^{-\text{pH}}$$

โดยที่สารละลายกรดจะมี pH น้อยกว่า 7 และสารละลายเบสจะมี pH มากกว่า 7 ส่วนสารละลายที่เป็นกลางจะมี pH เท่ากับ 7 มาตราส่วนนี้ นอกจากจะใช้บอกความเข้มข้นของ H_3O^+ แล้วยังใช้บอกความเข้มข้นของ OH^- ในรูปของ pOH ได้อีกด้วย คือ

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

5) คอลลอยด์

เป็นสถานะที่สารใดสารหนึ่งอยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆ แขนวลอยอยู่ในตัวกลางหรือตัวทำละลาย สถานะนี้เป็นประเภทย่อยผสม อนุภาคเหล่านี้อาจจะละลายในตัวทำละลายได้บ้าง แต่ไม่สามารถละลายได้หมด จึงปรากฏในรูปแขวนลอยอยู่ซึ่งจะคงสถานะ และไม่ยอมรับรวมตัวกันเกิดเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น อนุภาคคอลลอยด์มีขนาด 1- 1,000 นาโนเมตร ถ้าพิจารณาจากเสถียรภาพ อาจจำแนกคอลลอยด์ออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพในตัวเองตัวอย่างระบบคอลลอยด์ประเภทนี้ ได้แก่ กาว แป้ง และสบู่ ซึ่งเกิดระบบคอลลอยด์ที่เสถียรในน้ำได้

2) คอลลอยด์ที่มีเสถียรภาพเนื่องจากสารอื่น แบ่งเป็น

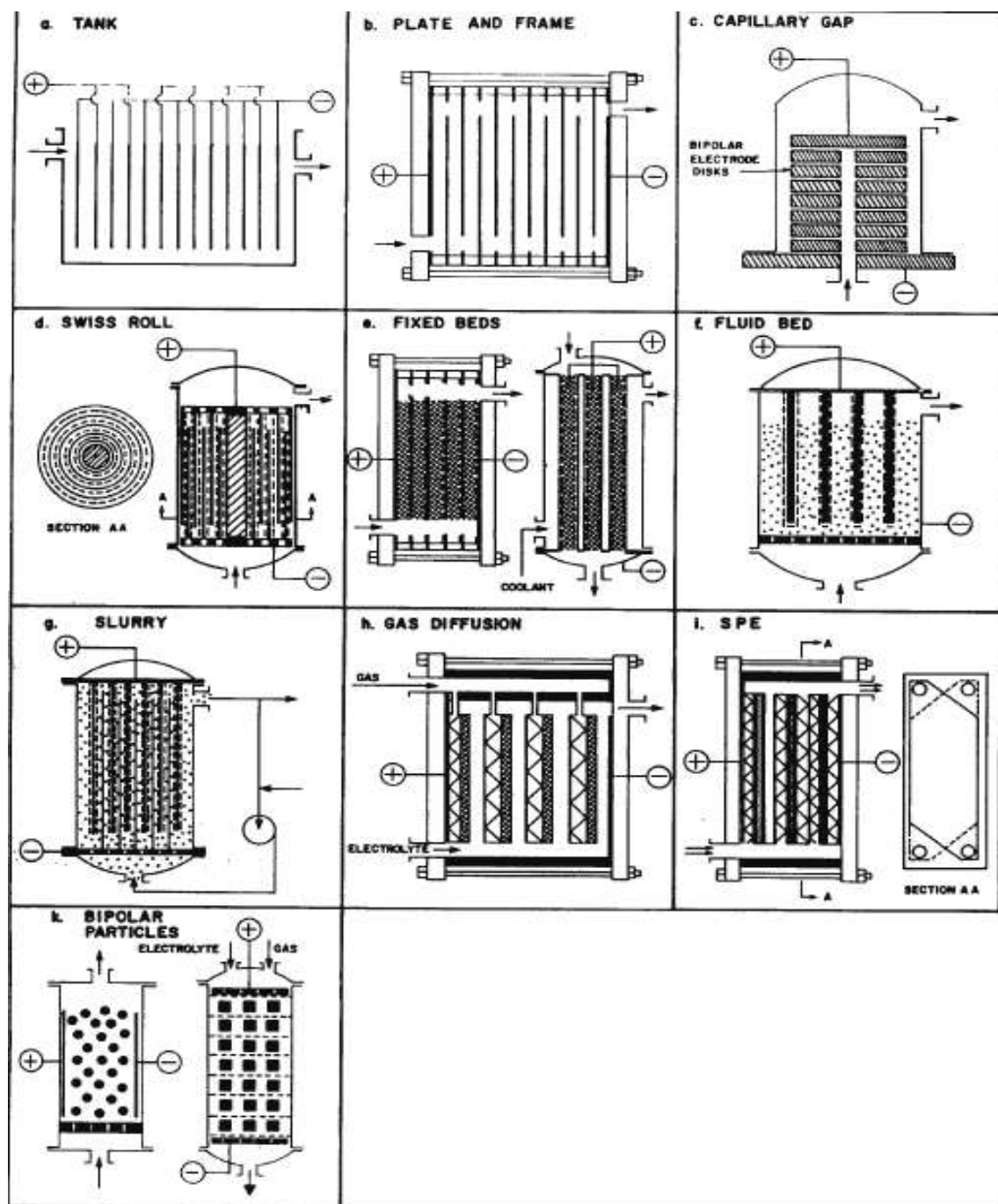
ก. คอลลอยด์ที่สารอื่นป้องกัน เช่น หยदन้ำมันไม่อาจเกิดระบบคอลลอยด์ในน้ำได้ แต่ถ้าเติมสบู่ลงไปบ้างแล้วคนให้ทั่ว ส่วนที่ขอบน้ำของสบู่จะละลายหยदन้ำมัน ซึ่งทำให้น้ำมันกระจายไปในน้ำในรูปของอนุภาคคอลลอยด์ด้วย

ข. อนุภาคคอลลอยด์ที่ดูดซับไอออน เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ อนุภาคคอลลอยด์ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ดูดซับ H^+ ที่ผิวของอนุภาค ทำให้ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ มีประจุบวก การดูดซับรวมตัวกันเป็นอนุภาคใหญ่ขึ้น อนุภาคคอลลอยด์ของ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ จึงอยู่ได้อย่างเสถียร อีกตัวอย่างหนึ่งได้แก่ ระบบคอลลอยด์ของ As_2S_3 ซึ่งถูกทำให้เสถียรโดย OH^- และ SH^- ผิวของอนุภาคคอลลอยด์ของ As_2S_3 จึงมีประจุลบ

3.16 หลักในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไฟฟ้าเคมี

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี มีหลายภาพดังภาพที่ 2-4 ขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่ประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการสำคัญในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมี คือ

- 1) เครื่องปฏิกรณ์ควรเป็นแบบง่ายที่สุดและค่าใช้จ่ายต่ำที่สุด ถ้าเป็นไปได้ควรจะหลีกเลี่ยงการออกแบบระบบที่การกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย
- 2) เครื่องปฏิกรณ์ต้องสามารถเกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีได้อย่างสมบูรณ์ก่อนจะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนอื่น ในกรณีที่มีกระบวนการอื่นนอกจากกระบวนการไฟฟ้าเคมีมาเกี่ยวข้อง ควรทำการแยกกระบวนการไฟฟ้าเคมี
- 3) เมื่อจำเป็นต้องมีการกวนผสมหรือการไหลของสารละลาย ต้องพิจารณาการถ่ายเทมวลสารเป็นอันดับแรก เช่น การกวนผสมอาจต้องใช้แผ่นกั้นหรือใบพัด
- 4) ควรออกแบบให้มีการกระจายความต่างศักย์ไฟฟ้าสม่ำเสมอทั่วพื้นผิวของอิเล็กโทรด
- 5) ควรออกแบบให้มีระยะห่างของอิเล็กโทรดน้อยเพราะระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดยิ่งมากจะต้องใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง
- 6) การเลือกวัสดุที่ใช้ทำเครื่องปฏิกรณ์นั้น ต้องคำนึงถึงสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะผ่านกระบวนการไฟฟ้าเคมี และสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฟฟ้าเคมี โดยสามารถคงทนไม่สึกกร่อนภายใต้สภาพการใช้งาน
- 7) การเลือกวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดนั้นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้น ให้สอดคล้องกับความต้องการของระบบบำบัดและปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นได้ เช่น แกร์ไฟต์ ไม่นิยมทำอิเล็กโทรดเนื่องจากจะถูกออกซิไดซ์ด้วย CO_2 และมีราคาแพงเป็นต้น
- 8) การวางอิเล็กโทรดในเครื่องปฏิกรณ์นั้นมี 2 แบบ ขึ้นกับความต้องการของวิธีที่ใช้ในการบำบัด ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีทำให้ลอย ควรวางอิเล็กโทรดในแนวตั้งเพื่อให้ฟองก๊าซที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีเป็นตัวพาสารแขวนลอยดังกล่าวขึ้นมาพร้อมกับตะกอนเบาที่เกิดขึ้น แต่ถ้าระบบบำบัดต้องการกำจัดสารแขวนลอยด้วยวิธีตกตะกอนควรวางอิเล็กโทรดในแนวนอนโดยให้ขั้วแอโนดอยู่ด้านล่าง ดังภาพที่ 3-4 เป็นตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ



ภาพที่ 3-4 ตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในการบวนการไฟฟ้าเคมีแบบต่างๆ
ที่มา : Oloman (1983)

3.17 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Koottatep (1993) ได้ทดลองใช้วิธีไฟฟ้าเคมีในการกำจัดสีย้อมในน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม โดยสร้างแบบจำลองถึงปฏิกิริยาการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยแผ่นขั้วไฟฟ้าซึ่งทำจากเหล็ก อยู่ในถังพลาสติกใส สีย้อมจะถูกฟล็อกที่เกิดจากเพอร์ไฮดรอกไซด์จับให้เกิดการตกตะกอน โดยไม่ต้องใช้สารเคมีมาทำหน้าที่เป็นฟล็อกคูแลนต์และฟล็อกคูแลนต์เอต ตะกอนที่ได้จมตัวดีมากเนื่องจากเป็นตะกอนที่มีประจุ วิธีนี้สามารถกำจัดสีย้อมได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ แต่มีข้อเสียคือ ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นทำให้สีบางส่วนลอยขึ้นไปด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะที่ขั้วแอโนดจะกร่อน เนื่องจากการปล่อยเพอร์ไฮดรอกไซด์และสภาพต่างที่เกิดจากไฮดรอกไซด์ในน้ำเสีย

Xiong และคณะ (2001) ได้ศึกษาการบำบัดสีแอซิดออเรนจ์ 2 ในน้ำเสียฟอกย้อมใช้เซลล์ไฟฟ้าแบบ 3 เฟสคือ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ในถังปฏิกิริยาแบบเบ มีโคแอโนด 2 ชนิด คือ โคแอโนดของเหล็ก และอิเล็กโทรดออกซิเดชัน ประสิทธิภาพในการกำจัดสีโอดี 99 และ 87 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยใช้ความต่างศักย์ 20 โวลต์ อัตราการไหลของอากาศ 0.1 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ใช้เวลาเพียง 30 นาที

M. Kobya และคณะ (2005) ศึกษากระบวนการกำจัดสีย้อมจากสิ่งทอ (Levafix Orange) โดยใช้วิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมี ซึ่งใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ได้แสดงการวิเคราะห์ในส่วนของการประสิทธิผลในการกำจัดสี และความคุ้มค่าในการบำบัด โดยใช้พารามิเตอร์ คือ การสูญเสียอะลูมิเนียมและพลังงานที่ใช้ไป ค่าพีเอชเริ่มต้น ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นกระแส ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และเวลาที่ใช้ในการแยกด้วยไฟฟ้า จากผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสี 95 เปอร์เซ็นต์ ที่ความหนาแน่นกระแส 100 แอมแปร์/ตารางเมตร ระยะเวลาพัก 12 นาที ค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 6.4 และที่ 1.8 kgAl/kg dye และ 35 kWh/kg dye คือค่าที่เหมาะสมของการให้กระแสในขั้วอะลูมิเนียมและค่าพลังงานที่ใช้ ตามลำดับ

B. Merzouk และคณะ (2009) การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการตกตะกอนไฟฟ้าเคมี ซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นอะลูมิเนียมในการตรวจวิเคราะห์ เพื่อกำจัดสีและลดซีโอดี (COD) น้ำเสียเป็นน้ำเสียสังเคราะห์จากโรงฟอกย้อม และมีการศึกษาพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่าการนำไฟฟ้า พีเอชของน้ำเข้า และความเข้มข้นของน้ำเสีย รวมทั้งศึกษาปัจจัยของการทดลอง ได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) และระยะเวลาพัก (Residence time) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการในการบำบัด ผลการศึกษาพบว่าสีแดงมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำเสียที่มีค่าซีโอดี 2,500 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าความเข้มข้นของสีย้อมต่ำกว่า 200 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 6-9 ระยะเวลาพัก 14 นาที โดยมีค่าความหนาแน่นกระแส 31.25 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้า 2.4 มิลลิซีเมนต/เซนติเมตร ที่ระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 1 เซนติเมตร ภายใต้ปัจจัยเหล่านี้ ทำให้การลดลงของซีโอดีมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

นพดล และ จงรักษ์ (2537) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิคการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะและโรงงานฟอกย้อม โดยศึกษาที่ความเข้มข้นของโครเมียมเริ่มต้นช่วง 570 – 2,100 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า เมื่อผ่านการบำบัดแล้วความเข้มข้นของโครเมียมลดลงน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร โดยมีสภาวะที่เหมาะสม คือ กระแสไฟฟ้าช่วง 1.0–1.5 แอมแปร์ เวลาพัก

เก็บมากกว่าหรือเท่ากับ 15 นาที และอุณหภูมิประมาณ 24–25 องศาเซลเซียส โดยมีสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือใช้กระแสไฟฟ้า 15 แอมแปร์ เวลาเก็บมากกว่าหรือเท่ากับ 45 นาที และอุณหภูมิประมาณ 24–25 องศาเซลเซียส โดยพบว่ากลไกที่สำคัญในการกำจัดโลหะหนักและสี คือการตกตะกอนทางเคมี (Precipitation) และการเกิดปฏิกิริยาของโลหะหนัก

ปิ่นสยาม (2546) ศึกษาการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟด้วยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณอ็อกซิเจนของเหล็กที่ละลายจากขั้วแอโนดและความนำไฟฟ้าที่มีผลต่อการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟในน้ำเสีย โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 5 แอมแปร์ 50 โวลต์ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของปริมาณอ็อกซิเจนของเหล็กที่ละลายจากขั้วแอโนดต่อการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีต่างๆ ที่พีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 5, 7, 9 และ 11 ช่วงที่สองทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลของความนำไฟฟ้าต่อการบำบัดสีย้อมรีแอกทีฟโทนสีต่างๆ ที่ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 5, 10, 15, 20 และ 30 กรัม/ลิตร จากการศึกษาพบว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7-9 และใช้เวลาในการบำบัดโดยประมาณ 3-4 ชั่วโมง ความนำไฟฟ้าที่เหมาะสมในการบำบัดสีคือ 8.56, 9.36, 24.20 และ 24.60 มิลลิซีเมน/เซนติเมตร

วรรณวรรณ (2546) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอกทีฟโดยการใช้ กระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้าและการตกตะกอนทางเคมี ซึ่งแบ่งเป็น 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ในการกำจัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์สีแดง (CI Reactive Red 180) ความเข้มข้น 200 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ 3 ค่า คือ 10, 20 และ 30 โวลต์ ค่าพีเอช 4 ค่า คือ พีเอช 3, 7 และ 10 ใช้ความต่างศักย์ที่ 30 โวลต์โดยใช้เวลา 1.5 ชั่วโมง จะใช้ความต่างศักย์ที่ 6.4 โวลต์ และเวลาที่ใช้จะเหลือเพียง 30 นาที การทดลองที่ 2 จะศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอนทางเคมี โดยสามารถกำจัดสีได้สูงมากถึง 96 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไปเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัม/ลิตร การทดลองที่ 3 คือการศึกษาหาประสิทธิภาพการกำจัดสีของน้ำเสียจริงจากโรงฟอกย้อม โดยใช้ น้ำเสียรวมก่อนผ่านการบำบัดและน้ำเสียจากหม้อย้อมซึ่งมีความเข้มข้นสี 500 มิลลิกรัม/ลิตร

ศังกรม์ คงเจาะ (2548) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ กระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าในเครื่องปฏิกรณ์แบบมีเยื่อเลือกผ่านและกระบวนการรวมตัวด้วยกระแสไฟฟ้า จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกหนังด้วยกระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 69.8 แอมแปร์/ตารางเมตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.5 และอัตราการไหลของน้ำเสียประมาณ 4.5 ลิตร/นาที ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียเท่ากับ 7-9 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือการจัดวางขั้วไฟฟ้าชนิดมอโนโพลาร์แบบขนาน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 20.67 แอมแปร์/ตารางเมตร อัตราการไหลของน้ำเสียประมาณ 3.67 ลิตร/นาที และเวลาในการทำงาน 20 นาที ต้นทุนในการบำบัดประมาณ 0.30 ดอลลาร์สหรัฐ/ลูกบาศก์เมตรน้ำตัวอย่าง ซึ่งมีแนวโน้มที่ต่ำกว่ากระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าและกระบวนการตกตะกอนเร่งของโรงงาน

คชพล และคณะ (2548) ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบด้ายพุ่งเพื่อนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดกลับมาใช้ใหม่ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีและการตกตะกอนด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับกระบวนการตกตะกอน คือ ความเข้มข้นของสารเคมี ส่วนตัวแปรที่ศึกษาสำหรับกระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความเข้มข้นของน้ำมันและไขมัน ค่าพีเอชเริ่มต้น อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงว่า ความเข้มข้นของโซเดียม ไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือ 130 กรัมต่อลิตร ซึ่งสามารถลดน้ำมันและไขมันได้ประมาณ 82 เปอร์เซ็นต์ ส่วนสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตกตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้าคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 2.73 แอมแปร์/ตารางเดซิเมตร ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์เท่ากับ 1.24 ลิตร/นาที่ และเวลา 80 นาที ซึ่งสามารถลดไขมันและน้ำมัน และซีโอดีได้ร้อยละ 94 และ 88 ตามลำดับ

ปาริฉัตร และคณะ (2548) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากเครื่องทอผ้าแบบด้ายพุ่งของอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยกระแสไฟฟ้า โดยมีตัวแปรที่ศึกษาดังนี้ คือ ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้น 2.98-9.02 อัตราการไหลวนของน้ำเสียในเครื่องปฏิกรณ์ 1.23-4.1 ลิตร/นาที่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 6.2-31 แอมแปร์/ตารางเมตร จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไขมันในน้ำเสียลดลง ค่าพีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นประมาณ 7.7 อัตราการไหลวนของน้ำเสียเท่ากับ 4.1 ลิตร/นาที่ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 18.6 แอมแปร์/ตารางเมตร ระยะเวลาในการบำบัด 60 นาที โดยมีต้นทุนการดำเนินงานรวมเพียง 12.19 บาท/ลูกบาศก์เมตร โดยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดมีสมบัติผ่านมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม และน้ำนี้สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

สุกัญญา (2549) ศึกษาการออกแบบการทดลองด้วยวิธี 2^k แฟกทอเรียล ทำการวิจัยเชิงทดลองแบบกะ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัด ซึ่งทำการทดลองที่ภาวะต่างๆ กัน คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการเกิดปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสีย้อม พบว่า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสีย้อม เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี และซีโอดี โดยเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจาก 10-30 มิลลิแอมแปร์/ตารางนอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ตัวแปร คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี และซีโอดีเช่นกัน น้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดด้วยขั้วเหล็กจะมีช่วงสีเป็นสีดำถึงสีเขียวอ่อน และขั้วอะลูมิเนียมจะมีความใส

ธนัญญ (2550) ศึกษาการกำจัดสีไดเรกต์โดยกระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าแบบต่อเนื่องที่มีแผ่นอะลูมิเนียม และแผ่นเหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ใช้น้ำเสียสีสังเคราะห์ความเข้มข้น 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 18 มิลลิซีเมนส์/เซนติเมตร การทดลองครั้งนี้ใช้พื้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 800, 1200, 1600 และ 2000 ตารางเซนติเมตร เวลาในการกักเก็บเท่ากับ 5.5, 7.33, 11 และ 22 นาที ค่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับ 2, 3, 4 และ 5 แอมแปร์ ค่าพีเอชของน้ำเสียสี

สังเคราะห์เท่ากับ 3, 6 และ 9 กระบวนการรวมตะกอนทางไฟฟ้าแบบต่อเนื่องตามสภาวะที่ศึกษาทั้งหมดมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ประมาณ 97 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ประมาณ 6.47 และ 5.86 บาท/ลูกบาศก์เมตร

อัญชลี (2551) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลโดยกระบวนการรวมตะกอนด้วยไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการออกแบบใช้ตัวแปรเดียวในการทดลองแต่ละครั้ง โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรการทดลองทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ ชนิดขั้วไฟฟ้า โดยใช้ขั้วแอโนดและแคโทดเป็นเหล็ก-เหล็ก (Fe-Fe) เหล็ก-แกรไฟต์ (Fe-C) แกรไฟต์-แกรไฟต์ (C-C) อะลูมิเนียม-แกรไฟต์ (Al-C) และอะลูมิเนียม-อะลูมิเนียม (Al-Al) สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดไบโอดีเซล ใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดอลูมิเนียม-แกรไฟต์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี ของแข็งแขวนลอย น้ำมันและไขมัน เท่ากับ 55.43, 96.88, 97.76 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ขั้นตอนที่ 2 เป็นการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน โดยใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นอะลูมิเนียม-แกรไฟต์ พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียไบโอดีเซลมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นการยืนยันว่าผลการทดลองของทั้ง 2 วิธีสามารถเชื่อถือได้

Vik (1984) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำด้วยกระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน โดยปล่อยให้ น้ำขั้วดิบให้ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พบว่า ที่ขั้วบวกเกิดการละลายของอะลูมิเนียม ส่วนขั้วลบเกิดก๊าซไฮโดรเจนทำให้เกิดการกวนผสมกันระหว่างขั้วไฟฟ้า เกิดกระบวนการโคแอกกูเลชันและฟล็อกคลูชัน การเกิดก๊าซไฮโดรเจนส่งผลให้เกิดการลอยตัวของตะกอน และค่าพีเอชสูงขึ้น

Pouet (1992) ได้ศึกษากระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชัน ตามด้วยการทำให้ลอย (Flotatio) และไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าขนาด 71 ลิตร ขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม 15 แผ่น แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าคงที่ (40 โวลต์ – 50 แอมแปร์) ปล่อยน้ำเสียด้วยอัตราการไหลคงที่ ศึกษาที่ค่ากระแสไฟฟ้า 2-5 แอมแปร์ พบว่ากระบวนการอิเล็กโทรโคแอกกูเลชันสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดี เนื่องจากสามารถกำจัดคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กได้

Lin และ Peng ศึกษาการใช้วิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมสิ่งทอ และหาประสิทธิภาพ ในการบำบัดเทียบกับวิธีโอโซนเนชัน พบว่าที่ความหนาแน่นของกระแส (Current Density) ประมาณ 92.5 แอมแปร์/ตร.ม. และความนำไฟฟ้า (Conductivity) ช่วง 2,000-3,000 ไมโครโมห์/ซม. (umho/cm) สามารถกำจัดซีโอดีทั้งหมด (TCOD) ได้สูงสุดร้อยละ 60 ที่พีเอชเริ่มต้นอยู่ในช่วง 5 - 10

บทที่ 4

ระเบียบและวิธีการวิจัย

4.1 ขอบเขตงานวิจัย

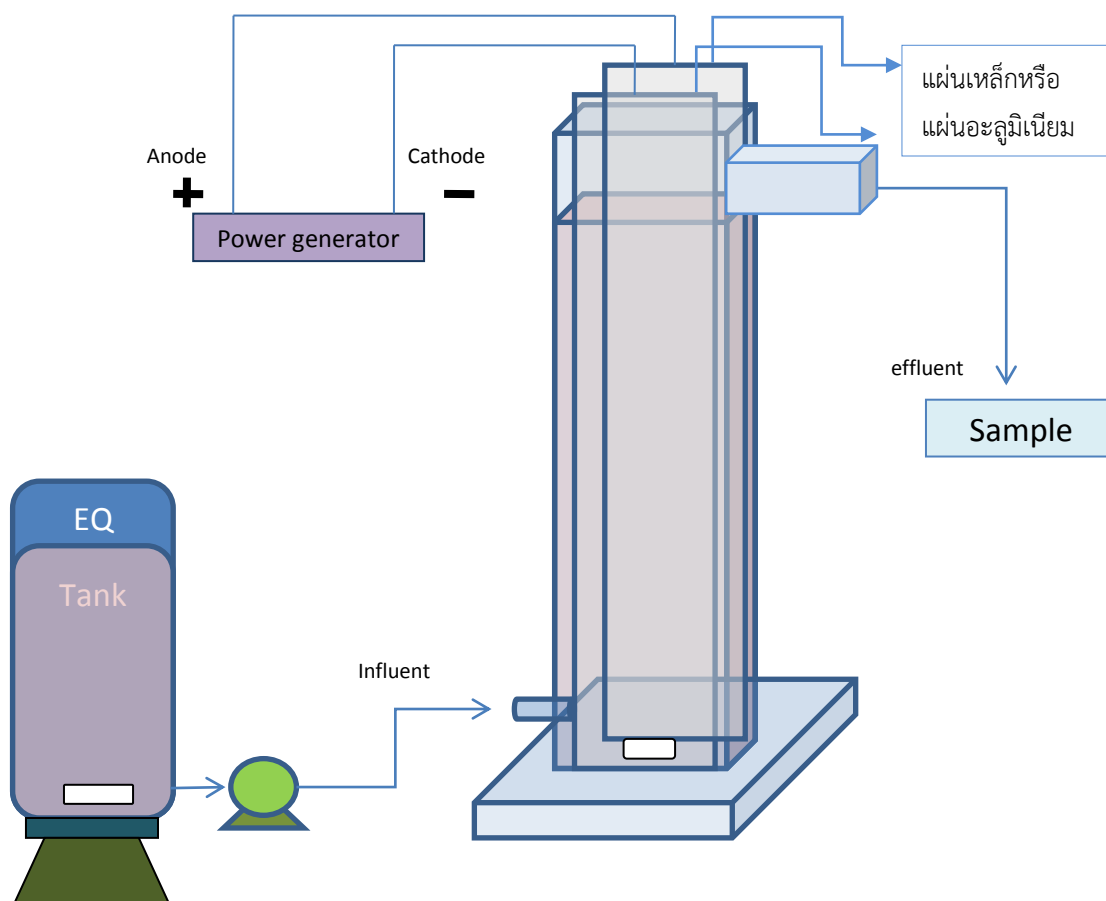
1. น้ำเสียจริงการย้อมไหม และล้างไหมจากศูนย์นวัตกรรมหม่อนไหม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
2. ถึงปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องสำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการขนาดความจุ 250 ml
3. ข้อกำหนดถึงปฏิกรณ์ที่ทำการศึกษาได้แก่
 - ระยะห่างของขั้วแอโนด และ แคโทด คงที่ 2 เซนติเมตร
 - ระยะเวลาพักเก็บ 10-30 นาที
 - ขนาดของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ของขั้ว 2-10 mA/cm²
 - ขั้วไฟฟ้าชนิดเหล็ก และ อลูมิเนียม
 - ระยะเวลาพักเก็บ (Hydrolic Retention Time, HRT) 10-40 นาที
 - ลักษณะการไหลของน้ำแบบล่างขึ้นบน (Up flow)
4. พารามิเตอร์ของน้ำเสียที่ทำการศึกษาได้แก่
 - ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), Chemical oxygen demand (COD), Suspended solid (SS)
 - สี ค่าเหล็กละลายน้ำ ค่าอลูมิเนียมละลายน้ำ และค่าไขมันและน้ำมัน (Oil and Grease)
5. ค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบ คำนวนจาก ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าการสูญเสียโลหะ และ ค่าฝังกลบกากตะกอนที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

4.2 การเตรียมน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียจากการทดลองได้จากน้ำเสียที่ศูนย์นวัตกรรมหม่อนไหม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยการนำตัวอย่างทันทีหลังจากการย้อมไหม และ เก็บไว้ในตู้อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง

4.3 การติดตั้งเครื่องมือบำบัดน้ำเสีย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะประกอบไปด้วย เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ ต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้า(Electrode) คือ แผ่นเหล็กและแผ่นอลูมิเนียมหนา 2 มิลลิเมตร ขนาด 10 × 1.75 เซนติเมตร โดยมีส่วนที่สัมผัสกับน้ำเสีย 10 เซนติเมตร พื้นที่ จมน้ำ 35 ตารางเซนติเมตร (แสดงดังภาพที่ 4-1) ภายในถึงปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (continuous reactor) ที่มีขนาด 5 × 5 × 15 เซนติเมตร จ่ายน้ำเข้าถึงปฏิกรณ์โดยใช้ปั๊ม (Peristaltic pump)



ภาพที่ 4-1 วิธีการติดตั้งเครื่องมือการทดลอง Electrocoagulation แบบต่อเนื่อง
ที่มา : ธิญาดา (2552)

4.4 การเตรียมขั้วไฟฟ้า

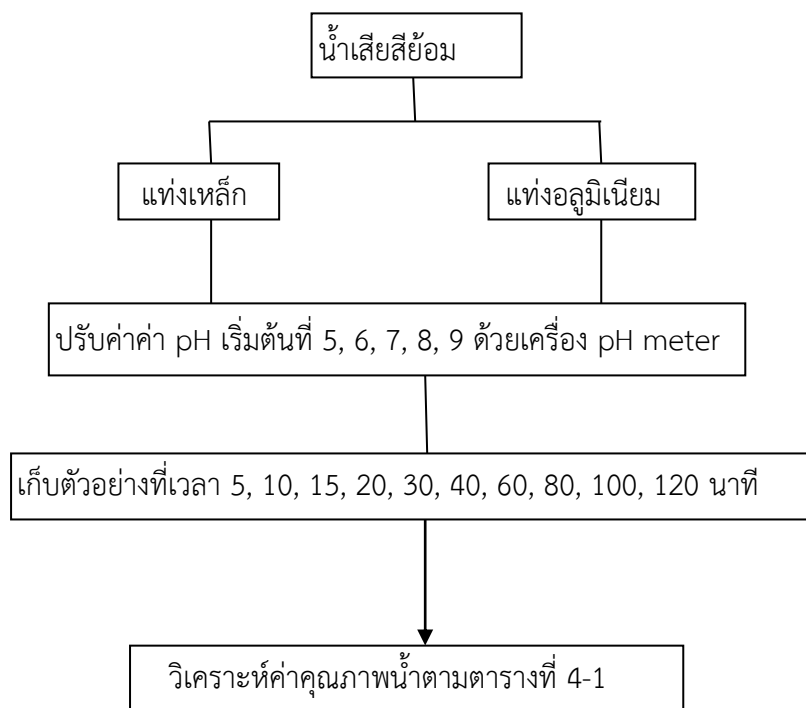
ก่อนทำการทดลองขั้วไฟฟ้าจะต้องนำไปแช่ในกรดไฮโดรคลอริก(HCl) 15 % ประมาณ 30 นาทีแล้วล้างออกด้วยน้ำกลั่น เช็ดให้แห้งจากนั้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 1 ชั่วโมง เก็บไว้ในตู้ดูดความชื้นนาน 24 ชั่วโมง

4.5 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 ผลของชนิดอิเล็กโทรดเหล็กและอลูมิเนียม

4.5.1 ศึกษาผลของ pH และ ชนิดขั้วต่อประสิทธิภาพการบำบัด

การศึกษาค่า pH ของน้ำเสียสีย้อมไหมโดยปรับค่า pH ด้วยกรด HCl หรือ NaOH ให้ได้ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 ก่อนการบำบัด มีกระแสไฟฟ้าคงที่ 8 mA/cm^2 อัตราการไหลน้ำเสีย 8 mL/min แสดงขั้นตอนการทดลองดังนี้ แสดงดังภาพ 4-2

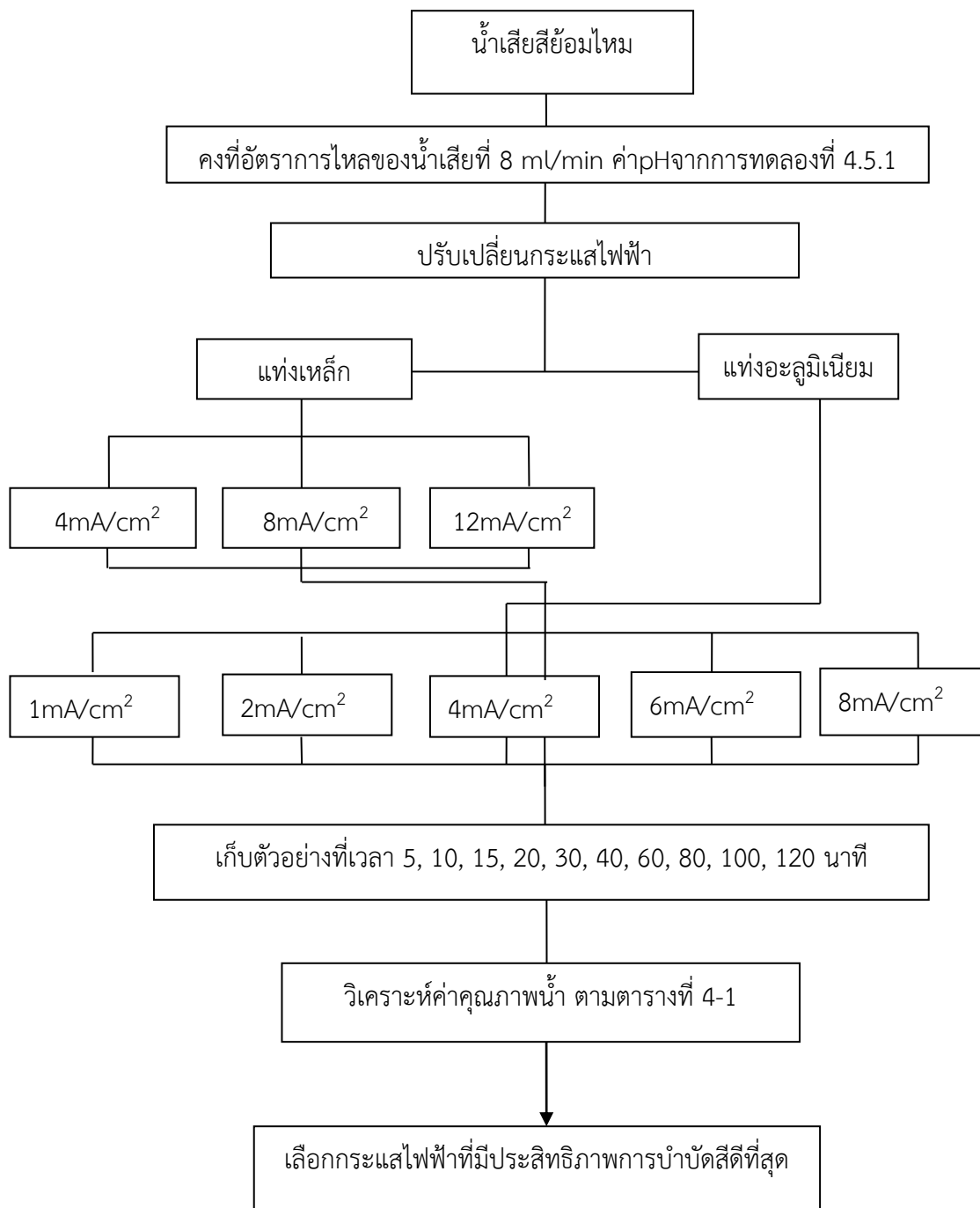


ภาพที่ 4-2 วิธีการศึกษาค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด

4.5.2 ศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่อประสิทธิภาพการบำบัด

จะเป็นการศึกษาเพื่อหาเวลาและปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่มีความเหมาะสมที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุดโดยมีวิธีการทดลองดังนี้

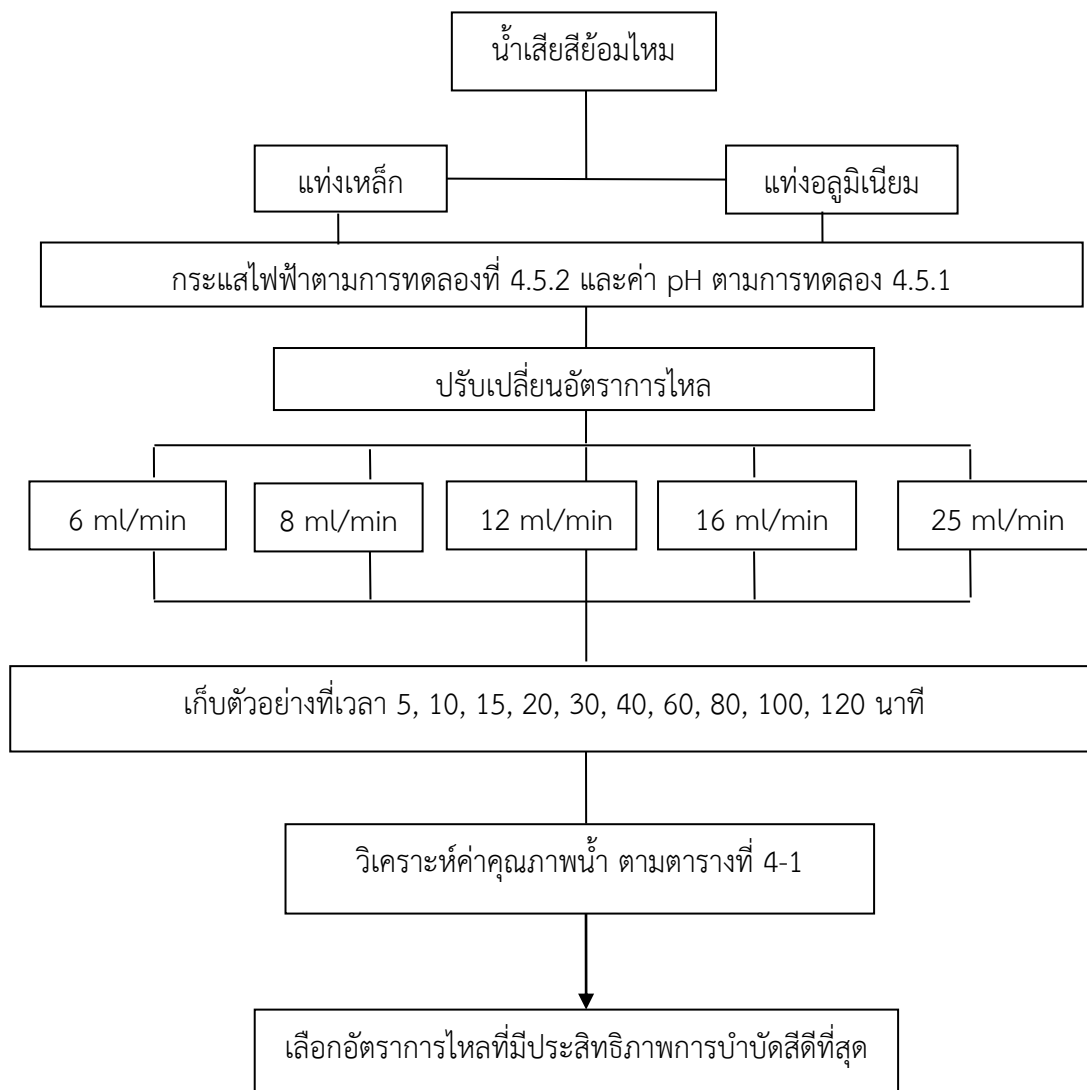
ศึกษาชนิดขั้วที่เป็นแท่งเหล็ก ที่มีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดโดยกำหนดค่าการจ่ายคือ 4, 8, และ 12 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ศึกษาชนิดขั้วที่เป็นแท่งอะลูมิเนียม ที่มีผลต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดโดยกำหนดค่าการจ่ายคือ 1, 2, 4, 6, และ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ค่า pH ได้จากการทดลองที่ 4.5.1 และ อัตราการไหลของน้ำเสีย 8 ml/min เพื่อที่จะได้ค่าการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียได้ดีที่สุด แสดงดังภาพ 4-3



ภาพที่ 4-3 วิธีการศึกษาผลของกระแสไฟฟ้าต่อประสิทธิภาพการบำบัด

4.5.3 ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ผลของอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียสู่ระบบที่ 6, 8, 12, 16 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที ศึกษาอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียสู่ระบบที่ 6, 8, 12, 16 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาทีโดยเลือกใช้ กระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 4.5.2 และ pH เริ่มต้น จาก 4.5.1 ศึกษาประสิทธิภาพการ กำจัดซีโอดีสูงสุด ทำการเก็บตัวอย่างที่เวลา 5-120 นาที และ ทำการตรวจวัดคุณภาพน้ำ ดังตารางที่ 3-1



ภาพที่ 4-4 วิธีการศึกษาผลของอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียต่อประสิทธิภาพการบำบัด

ตอนที่ 2 ศึกษาค่าใช้จ่ายของการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

4.5.4 ศึกษาค่าใช้จ่ายการดำเนินระบบบำบัด

เลือกผลการทดลองในตอนต้นที่ 1 ที่ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสูงสุด มาวิเคราะห์ราคา ค่าใช้จ่ายเบื้องต้น โดยคำนวณจาก

- 1) ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า

จากสูตร ค่าไฟฟ้า = (พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ X ค่ายูนิต/หน่วย) + (พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ X FT) + (VAT7%)

- 2) ค่าบำบัดและการกำจัดตะกอน

โดยคำนวณได้จาก ค่าใช้จ่ายสำหรับการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมกับปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น

- 3) ค่าแผ่นเหล็ก

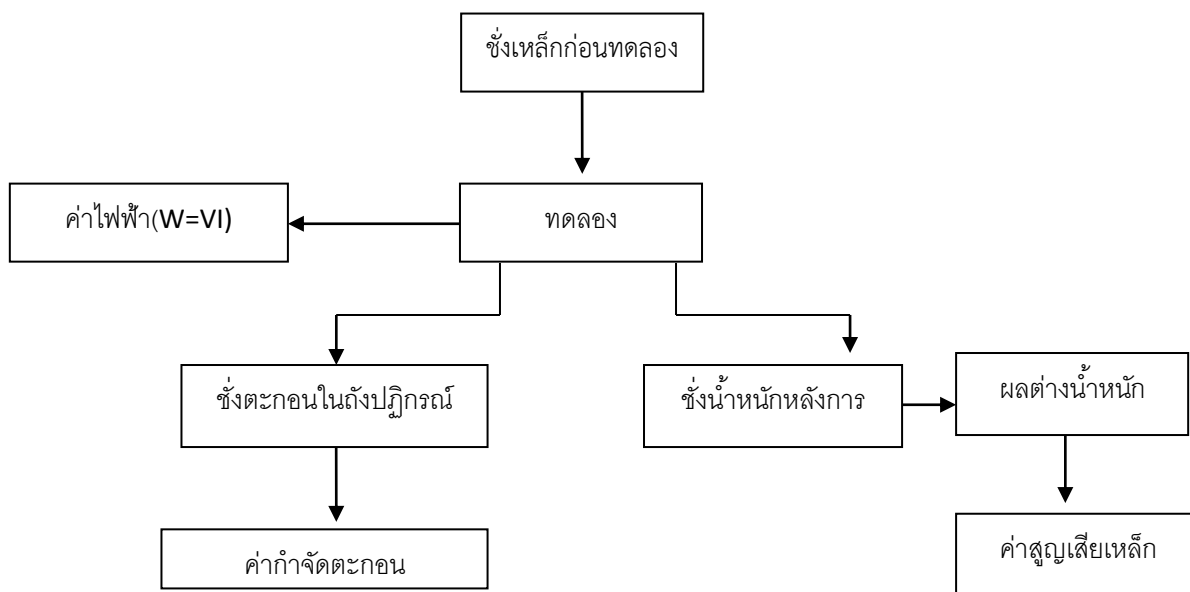
ซึ่งหาปริมาณน้ำหนักรั้วไฟฟ้าก่อนบำบัดและหลังบำบัด เพื่อหาปริมาณของแผ่นเหล็กที่แตกตัว ซึ่งก่อนซึ่งรั้วไฟฟ้ามีวิธีการเตรียมดังนี้

- 1) นำรั้วไฟฟ้าที่ผ่านการเตรียม (รั้วไฟฟ้าก่อนบำบัด) หรือรั้วไฟฟ้าที่ผ่านการบำบัด (รั้วไฟฟ้าหลังบำบัด) ไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง และนำไปเข้าโถทำแห้ง 1 ชั่วโมง

- 2) นำรั้วไฟฟ้าที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก

- 3) น้ำหนักรั้วไฟฟ้าก่อนบำบัด - น้ำหนักรั้วไฟฟ้าหลังบำบัด = น้ำหนักรั้วไฟฟ้าที่สลาย

ไป



ภาพที่ 4-5 วิธีการศึกษาค่าใช้จ่าย

ตารางที่ 4-1 วิเคราะห์คุณภาพน้ำ และเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ
pH	pH meter
COD	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด
Fe	AAS
Al	AAS
Oil & Grease	Standard Method
SS	Standard Method
Color	Spectrophotometer (SU Unit)

4.5.5 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีไฟฟ้าเคมี นำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดสี กับสัดส่วนของปริมาณอิเล็กโทรดต่อปริมาณน้ำเสีย สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทที่ 5

ผลการวิจัย และวิจารณ์ผล

ผลการศึกษาได้ทำการศึกษาภาพรวมของการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดและปัจจัยต่างๆ โดยมุ่งเน้นการเลือกขั้วไฟฟ้าและปัจจัยในการบำบัดที่นำมาใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป โดยมีรายละเอียดการศึกษาดังนี้ ขั้นต้นจะทำการศึกษาคูณลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสีย จากนั้นเป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมโดยการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าโดยใช้เหล็กและอะลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรด ในปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัด คือ pH เริ่มต้น ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า อัตราการไหลของน้ำเสีย และค่าใช้จ่ายในการบำบัด ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสี การเปลี่ยนแปลงของ pH ในน้ำเสีย และประสิทธิภาพในการบำบัดสีโอดี ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยมาใช้ในการคิดค่าใช้จ่ายในการบำบัด

5.1 คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองน้ำเสียผ่านการย้อมโดยใช้สีย้อมจากศูนย์นวัตกรรมหม่อนไหม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม โดยวิเคราะห์ลักษณะของน้ำเสียเบื้องต้นได้ผลดังตารางที่ 5-1

ตารางที่ 5-1 คุณลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสีย

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าตรวจวัดได้
พีเอช	-	5.78
ปริมาณของแข็งแขวนลอย (SS)	มิลลิกรัม/ลิตร	38.5
ความเข้มข้นของค่าซีโอดี (COD _S)	มิลลิกรัม/ลิตร	343.21
ค่าความเข้มข้นของสี	มิลลิกรัม/ลิตร	400
ความเข้มข้นของเหล็ก	มิลลิกรัม/ลิตร	N/A
ความเข้มข้นของอะลูมิเนียม	มิลลิกรัม/ลิตร	N/A
ความเข้มข้นของไขมัน	มิลลิกรัม/ลิตร	N/A

หมายเหตุ N/A หมายถึง ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ เนื่องจากขีดจำกัดต่ำสุดของเครื่องที่สามารถวิเคราะห์ได้มีค่าความเข้มข้น 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร

ในการศึกษาต่อไปทำการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดี และสี เป็นสำคัญ ส่วนไขมันไม่ทำการศึกษาในการบำบัดเนื่องจากน้ำเสียไม่พบไขมัน ความเข้มข้นเหล็กและอะลูมิเนียมทำการศึกษาในส่วนท้ายเพื่อตรวจสอบการบำบัดเกิดเหล็กหรืออะลูมิเนียมละลายจากขั้วอิเล็กโทรดไปยังน้ำเสียหรือไม่ ส่วนค่า SS ทำการศึกษา SS ทั้งหมดเพื่อวิเคราะห์ค่าใช้จ่าย

5.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดระหว่างขั้วไฟฟ้าเหล็กและขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม

5.2.1. ศึกษาผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการบำบัด โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

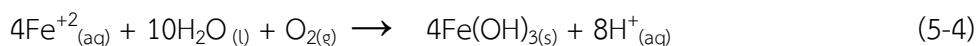
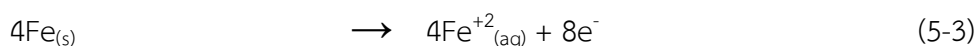
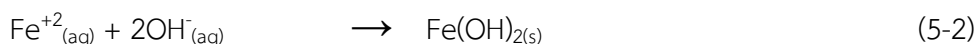
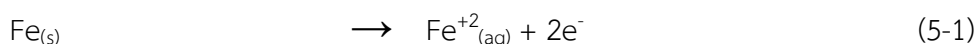
การทดลองนี้ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า โดยมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที

นิยาม เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบเวลาที่ 5 นาที คือ (5-10) นาที, 10 นาที คือ (10-15) นาที, 15 นาที คือ (15-20) นาที, 20 นาที คือ (20-25) นาที, 30 นาที คือ (30-35) นาที, 40 นาที คือ (40-45) นาที, 60 นาที คือ (60-65) นาที, 80 นาที คือ (80-85) นาที, 100 นาที คือ (100-105) นาที , และ 120 นาที คือ (120-125) นาที

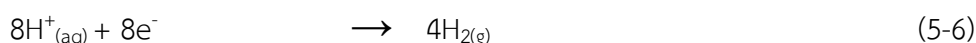
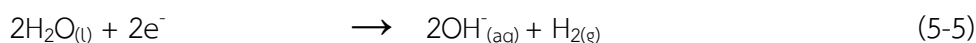
1. ประสิทธิภาพในการบำบัดสี

ความสามารถในการบำบัดสี พิจารณาได้จากค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปที่พีเอชต่างๆของค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ pH 5, 6, 7,8 และ 9 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 8 mA/cm² อัตราการไหลคงที่ 8 ml/min ดังสมการ (5-1) - (5-4) จากการศึกษาพบว่า pH 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีที่สุด เนื่องจากที่ขั้วแอโนดเกิดการละลายของเฟอร์รัสไอออน และในขณะเดียวกันที่ขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำเกิดก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน ดังสมการที่ (5-5) และ (5-6) (Daneshvar et al., 2006) เฟอร์รัสไอออนที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดจากขั้วแคโทดเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นอนุภาคของสีจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนดและถูกดูดติดผิวหรือถูกหุ้มด้วยเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์และเพอริกไฮดรอกไซด์ ซึ่งตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์และเพอริกไฮดรอกไซด์ รวมตัวกันเป็นตะกอนที่ใหญ่ขึ้นและลอยตัวขึ้นโดยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชัน

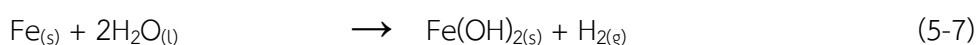
ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด (Daneshvar et al., 2006)



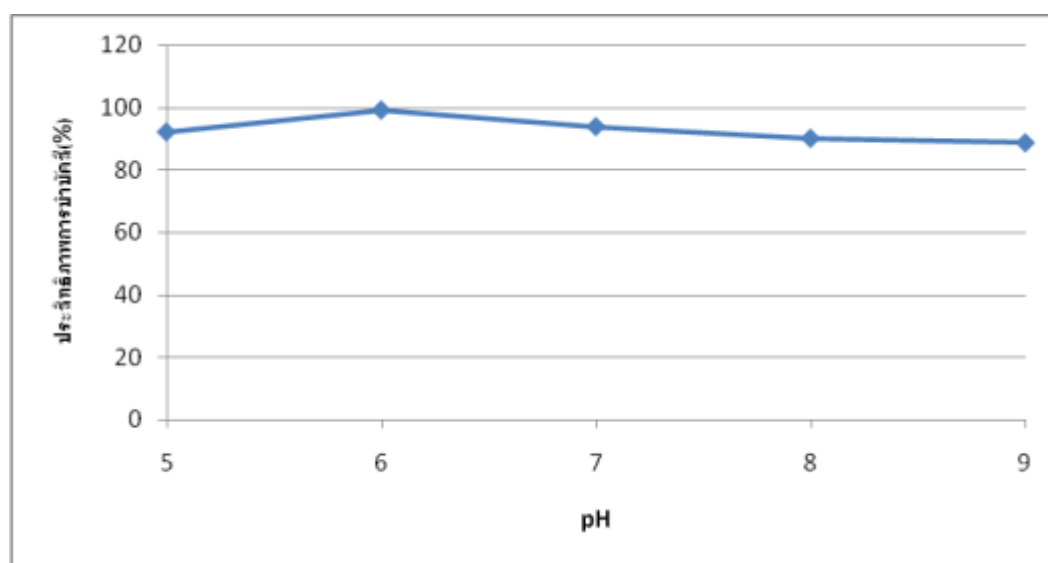
ปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด (Daneshvar et al., 2006)



ปฏิกิริยารวม (Daneshvar et al., 2006)

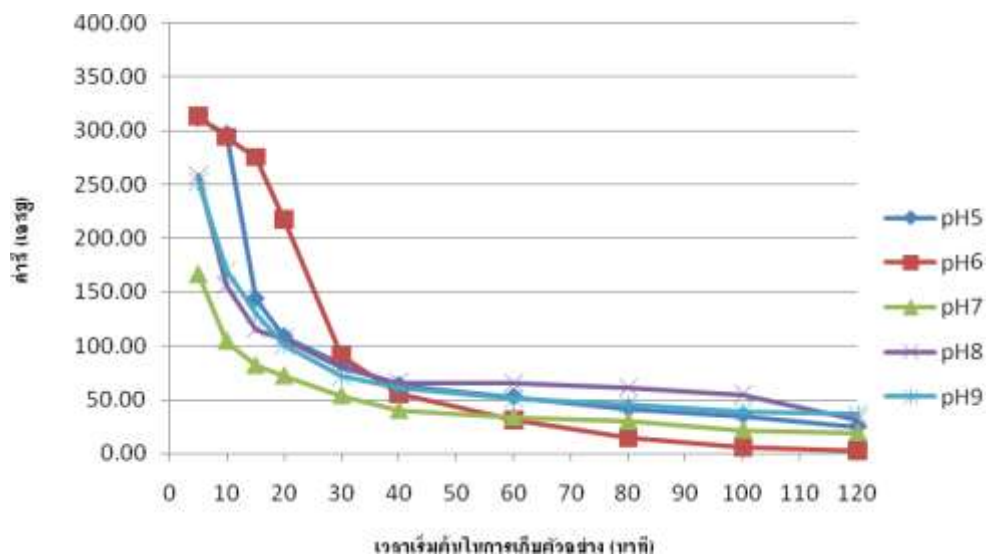


ความสามารถในการบำบัดสี ที่ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 จากผลการศึกษาพบว่า ที่ pH 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดีที่สุด ซึ่งสามารถบำบัดได้ เท่ากับ 99.26 % และพบว่าที่ pH 5, 7, 8 และ 9 สามารถบำบัดได้ที่ 92.19, 93.94, 90.12, และ 88.64 ตามลำดับ ดังภาพที่ 5-1 เนื่องจากพีเอชเริ่มต้นที่ 6 เข้าสู่จุดสมดุลที่ 8.3 พบว่าตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ ถ้าพีเอชสูงขึ้นตะกอนจะอยู่ในรูปอื่นที่ไม่ก่อให้เกิดสารรวมตะกอน ดังภาพที่ 5-4 ประสิทธิภาพในการบำบัดสี และซีโอดีเกิดจากเหล็กมีการแตกตัวที่แอโนด ส่งผลให้เฟอร์รัสไอออนละลายออกมา และที่แคโทดเกิด การแตกตัวของน้ำ เกิดก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อเฟอร์รัสไอออนทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนเกิดเป็นเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์และดูดติดหรือห่อหุ้มอนุภาคสีด้วยเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์และเพอริกไฮดรอกไซด์รวมตัวกันเกิดเป็นตะกอนลอยขึ้นโดยก๊าซไฮโดรเจน ที่อยู่ในรูปเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็น สารรวมตะกอน ดังภาพที่ 5-4



ภาพที่ 5-1 ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ pH เริ่มต้นต่างกันโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

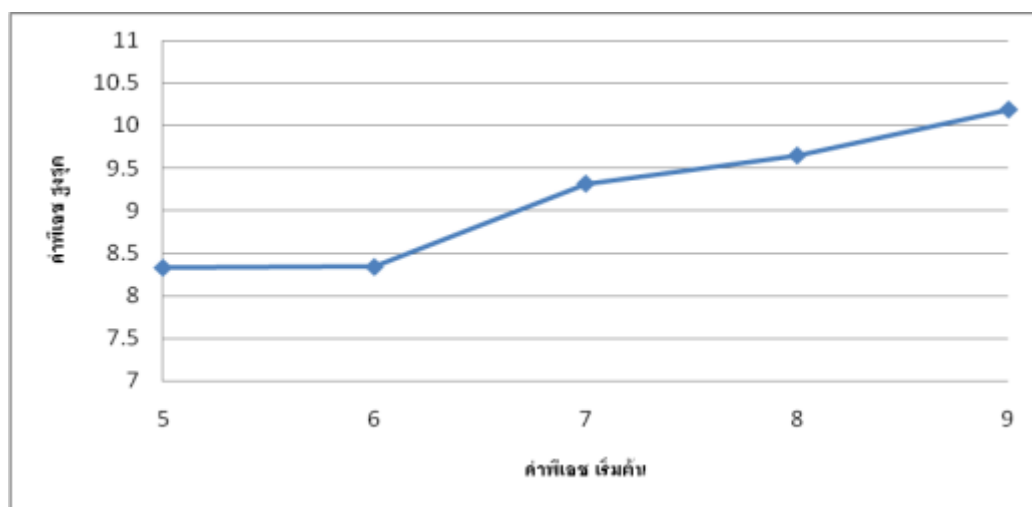
ในการทดลองนี้ใช้การวัดสีแบบเอสยู วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ซึ่งสีที่เข้มมากก็จะดูดกลืนสีได้มาก ผลการทดลองพบว่าค่าสีของน้ำเสียสีแอสิดเริ่มต้นในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ดังภาพที่ 5-2 ที่ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 ค่าสีมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง และเริ่มคงที่ที่ระยะเวลา 60 นาที เข้าสู่ภาวะสมดุลที่ 100 นาที พบว่า pH 6 สามารถบำบัดได้ได้ดีที่สุด ที่เวลา 120 นาที ซึ่งค่าสีลดลงที่ 2.27 ซึ่งพบว่าสามารถบำบัดสีได้ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ไม่เป็นที่พึงนารังเกียจ



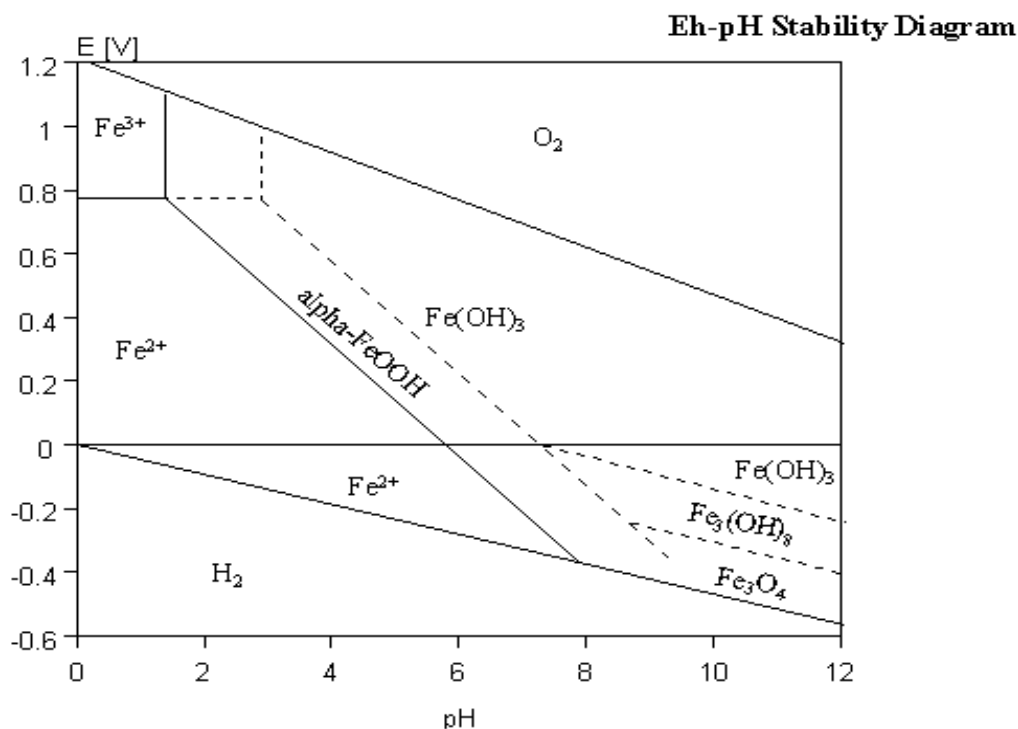
ภาพที่ 5-2 ผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชต่อค่าสี

2. การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในระบบ

จากการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงไปของค่า pH เริ่มต้นที่ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 8 mA/cm^2 และอัตราการไหลคงที่ 8 mL/min พบว่าเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าพีเอชที่สามารถบำบัดได้ดีที่สุดจะอยู่ที่ pH 6 เข้าสู่จุดสมดุลที่ 8.3 และที่ pH 5, 7, 8 และ 9 เข้าสู่จุดสมดุลที่ 8.3, 9.3, 9.7 และ 10.2 ตามลำดับ พบว่าทุกค่าพีเอชเพิ่มประมาณ 2.5 เนื่องจากที่ขั้วแคโทดเกิดการแตกตัวของน้ำ ซึ่งผลจากการแตกตัวของน้ำจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังสมการที่ (5-5) โดยไฮดรอกไซด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นและการที่เข้าสู่จุดสมดุลเนื่องจากแอโนดเกิดการละลายของเฟอร์รัสไอออนจับกับไฮดรอกไซด์ไอออนในรูป FeOH_2 , FeOH_3 ซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งทำให้ pH ไม่เพิ่มขึ้นและเข้าสู่จุดสมดุลที่ pH สูงกว่า pH เริ่มต้น ดังภาพที่ 5-3



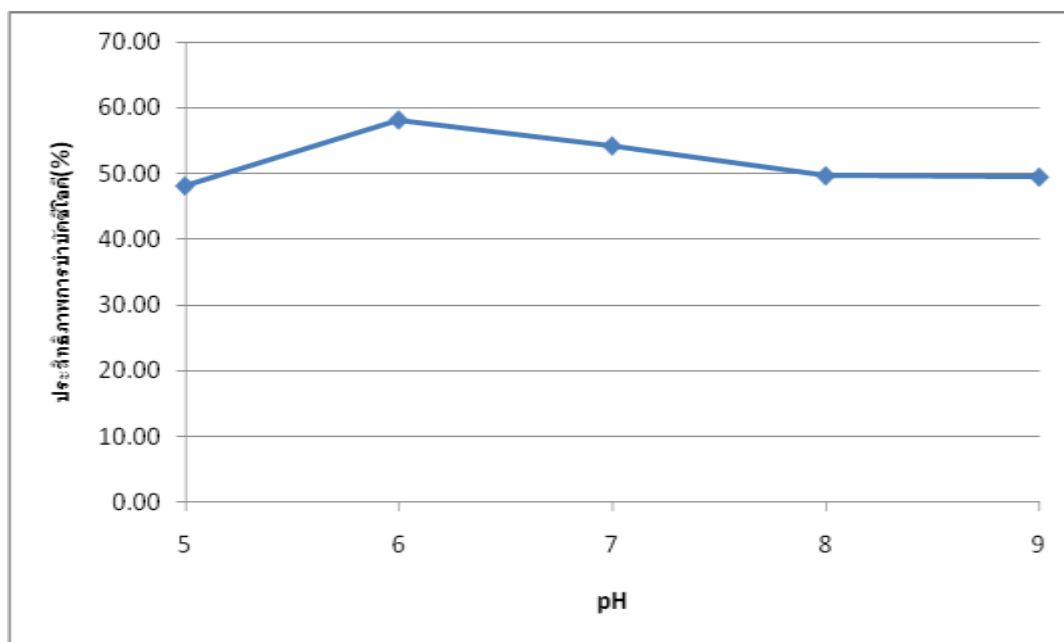
ภาพที่ 5-3 ค่าพีเอชเริ่มต้นต่อค่าพีเอช ณ จุดสมดุล



ภาพที่ 5-4 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพีเอชและการตกตะกอนของเหล็ก
ที่มา : www.soils.wisc.edu

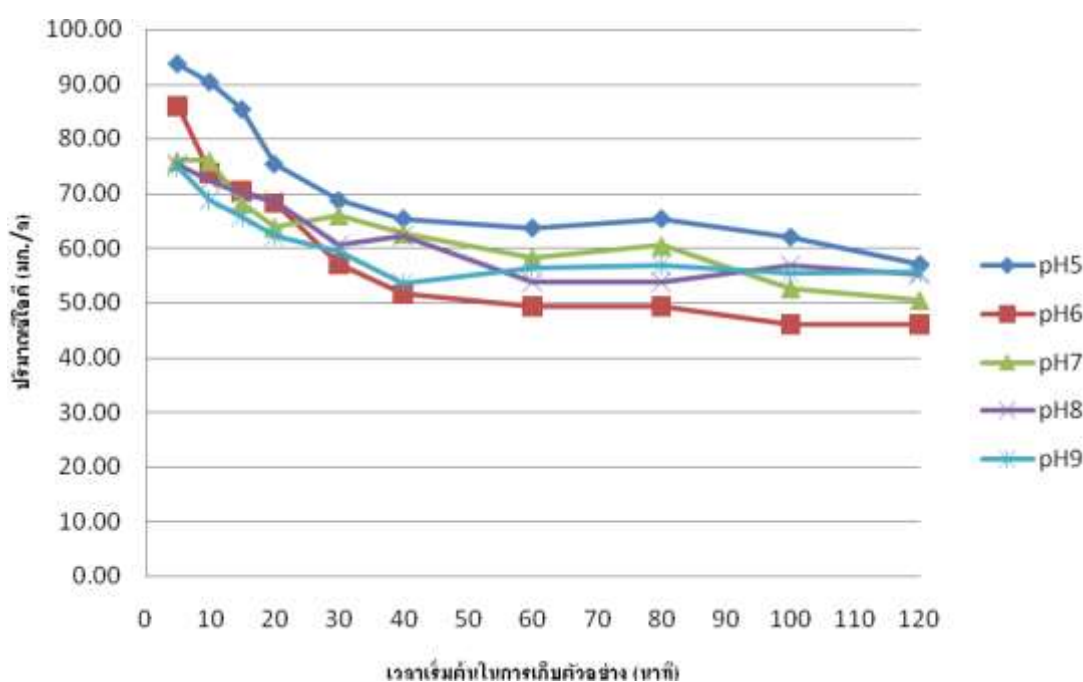
3. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี (COD)

ความสามารถในการบำบัดซีโอดี พิจารณาได้จากความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง โดยสามารถแสดงในรูปของความเข้มข้นซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 8 mA/cm² อัตราการไหลคงที่ 8 ml/min จากการทดลองพบว่า pH 5 มีการแตกตัวของเหล็กที่แอโนด ทำให้เฟอร์รัสไอออนละลายออกมา และมีไฮโดรเจนกับไฮดรอกไซด์ไอออนแตกตัวที่แคโทด เนื่องจากอยู่ในช่วงความเป็นกรดจึงมีการแตกตัวได้ดี และมีปริมาณซีโอดีหลงเหลืออยู่น้อย เมื่อพีเอชเพิ่มสูงขึ้นที่ 7, 8, และ 9 พีเอชที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้เฟอร์รัสไฮดรอกไซด์และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์จับกับอนุภาคซีโอดีได้น้อย ซึ่งจะอยู่ในรูปอื่นที่ไม่ก่อให้เกิดสารรวมตะกอน ส่งผลให้มีปริมาณเหล็กละลายหลงเหลืออยู่มาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียที่มี pH เริ่มต้นต่างกัน โดยจะพบว่าที่ pH 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถบำบัดซีโอดีได้ 58 % เนื่องจากมีการแตกตัวของเหล็กละลายเฟอร์รัสไอออนออกมาและมีการรวมตัวของอนุภาคซีโอดีมากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณเหล็กละลายหลงเหลืออยู่น้อย ดังภาพที่ 5-5 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเนื่องจากซีโอดีเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าซีโอดี แต่ยังพบว่าซีโอดียังเหลืออยู่ในระบบ ไม่สามารถบำบัดได้เท่ากับซีโอดีเนื่องจากในส่วนประกอบของซีโอดีไม่ได้มีแค่เม็ดซีโอดีแต่ยังมีสารอื่นๆที่สามารถออกซิไดซ์กับออกซิเจนในน้ำได้จึงทำให้ค่าการบำบัดซีโอดีและค่าการบำบัดซีโอดีมีความแตกต่างกัน



ภาพที่ 5-5 ประสิทธิภาพการบำบัด COD โดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

จากภาพที่ 5-6 ปริมาณซีโอติที่เปลี่ยนแปลงที่ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 พิจารณาได้จากปริมาณซีโอติที่ลดลง พบว่าอัตราการกำจัดซีโอติที่เกิดขึ้นลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วง 10-40 นาที แล้วเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที พบว่า pH 6 สามารถกำจัดซีโอติได้ดีที่สุด ซึ่งปริมาณซีโอติลดลงที่ 46 mg/l ซึ่งพบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการบำบัดซีโอติที่ 120 mg/l (มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง 2539)



ภาพที่ 5-6 ผลของค่าพีเอชต่อความเข้มข้นซีโอติในการบำบัดน้ำเสีย

5.2.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

การทดลองนี้ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ศึกษาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 4, 8 และ 12 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 6 อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที

1. ประสิทธิภาพในการบำบัดสี

ความสามารถในการบำบัดสี พิจารณาได้จากค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4, 8 และ 12 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ pH เริ่มต้นที่ 6 อัตราการไหลคงที่ 8 ml/min พบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดสีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกๆค่า เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เหล็กแตกตัวได้เพิ่มขึ้นทำให้รวมตัวกับอนุภาคสีได้ดีขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟาราเดย์ ดังสมการที่ (5-9) เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าที่ 4 mA/cm² ส่งผลให้เหล็กมีการแตกตัวที่ขั้วแอโนด และทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนส่งผลให้เหล็กออกไซด์รวมตัวกับอนุภาคสี เกิดเป็นตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ทำให้อนุภาคสีถูกกำจัดออกไป พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 8 mA/cm² ส่งผลให้ขั้วแอโนดมีการแตกตัวได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 12 mA/cm² มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด สามารถบำบัดได้ถึง 95.67 % พบว่าเหล็กมีการแตกตัวเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการแตกตัวของเหล็กแปรผันตามกระแสไฟ ตามกฎฟาราเดย์คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูง การแตกตัวของเหล็กสามารถแตกตัวได้ดี ส่งผลให้ตะกอนเพิ่มขึ้นทำให้อนุภาคสีถูกกำจัดได้มากขึ้น

$$W = \frac{ItM}{ZF} \quad (5-9)$$

โดย W คือ ปริมาณโลหะที่ละลาย (g)

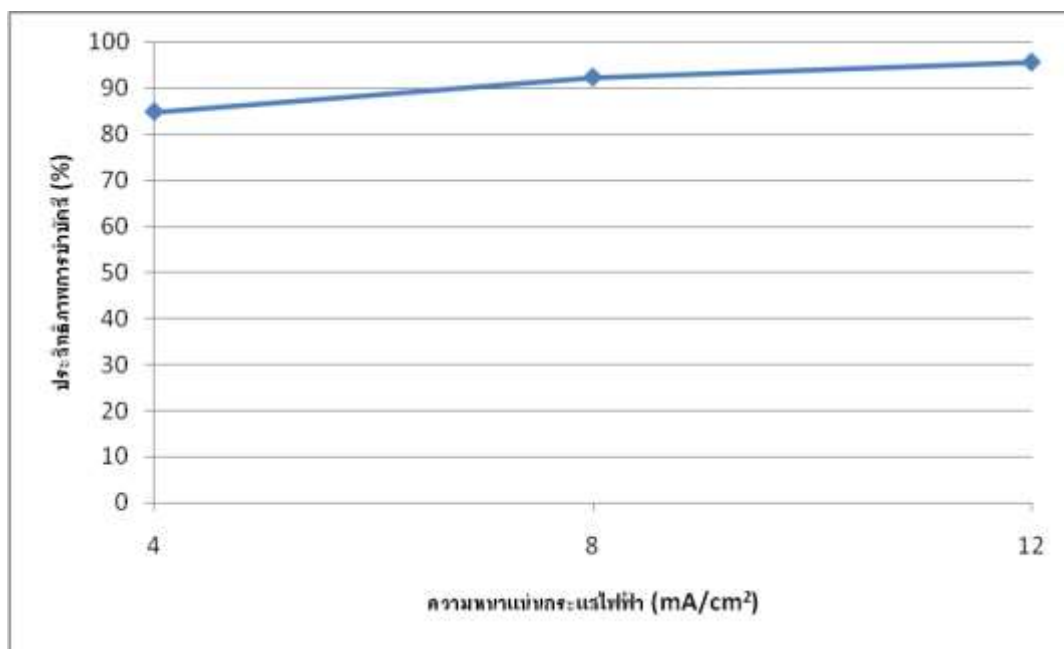
I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

t คือ เวลาที่ใช้ (วินาที)

M คือ น้ำหนักโมเลกุลของขั้วแอโนด

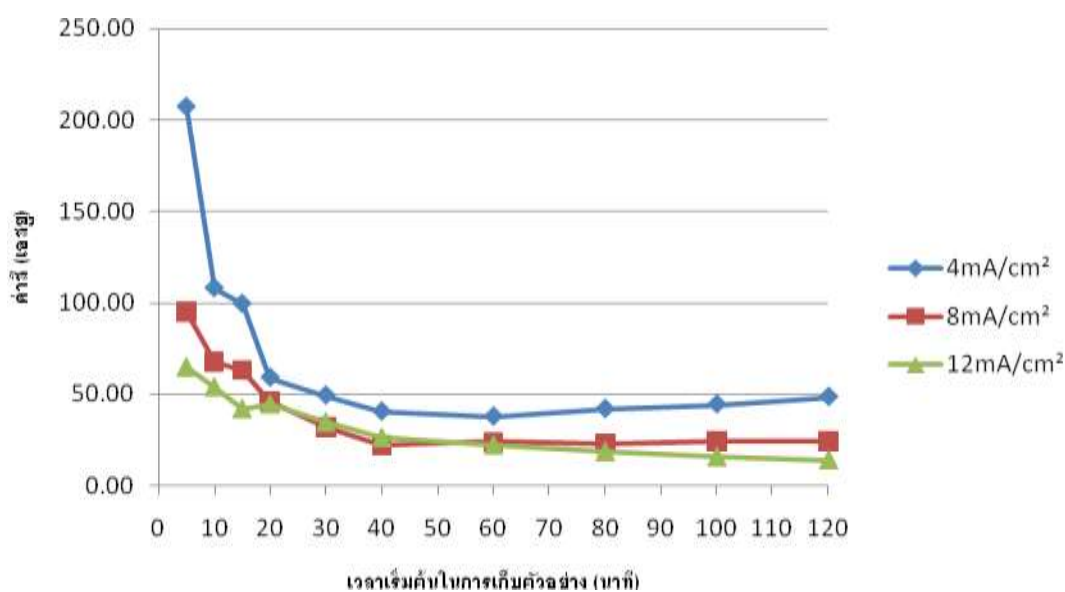
Z คือ จำนวนอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์เท่ากับ 96,500



ภาพที่ 5-7 ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกันโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

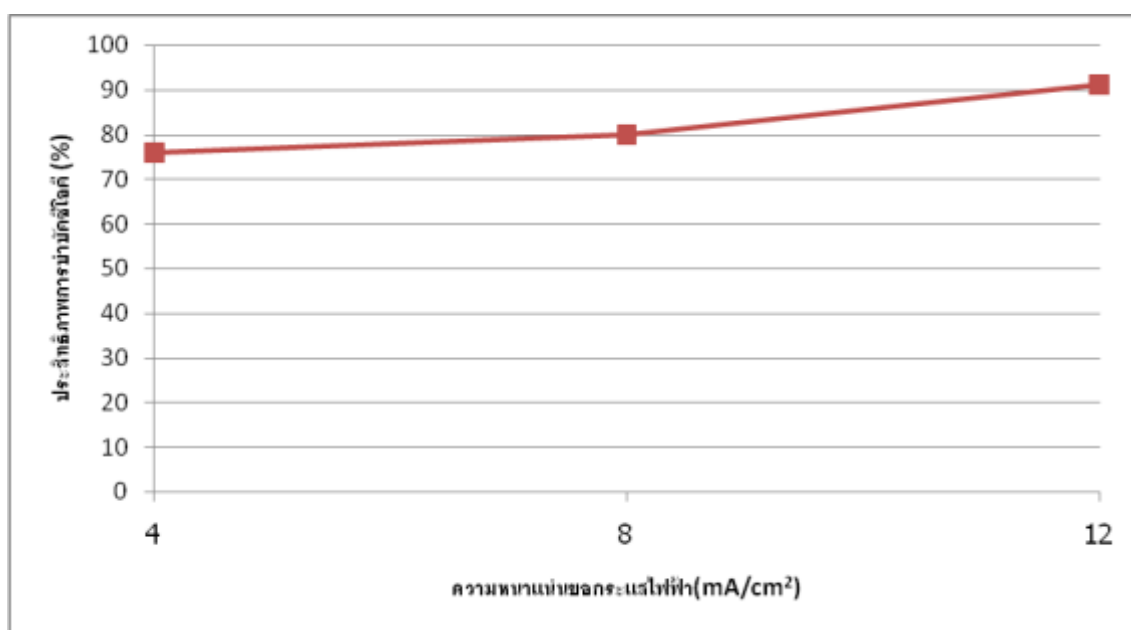
จากการทดลองค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4, 8 และ 12 mA/cm² พิจารณาจากค่าสีที่ลดลง ซึ่งสีที่เข้มมากก็สามารถดูดกลืนแสงได้มาก ผลการทดลองพบว่า ค่าสีลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 40 นาทีเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ค่าสีเริ่มคงที่ที่ระยะเวลา 60 นาที โดยพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 12 mA/cm² สามารถบำบัดสีได้ดีที่สุด เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เหล็กแตกตัวได้เพิ่มขึ้นทำให้รวมตัวกับอนุภาคสีได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่าสีลดน้อยลงถึง 13.85 SU.



ภาพที่ 5-8 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อค่าสี

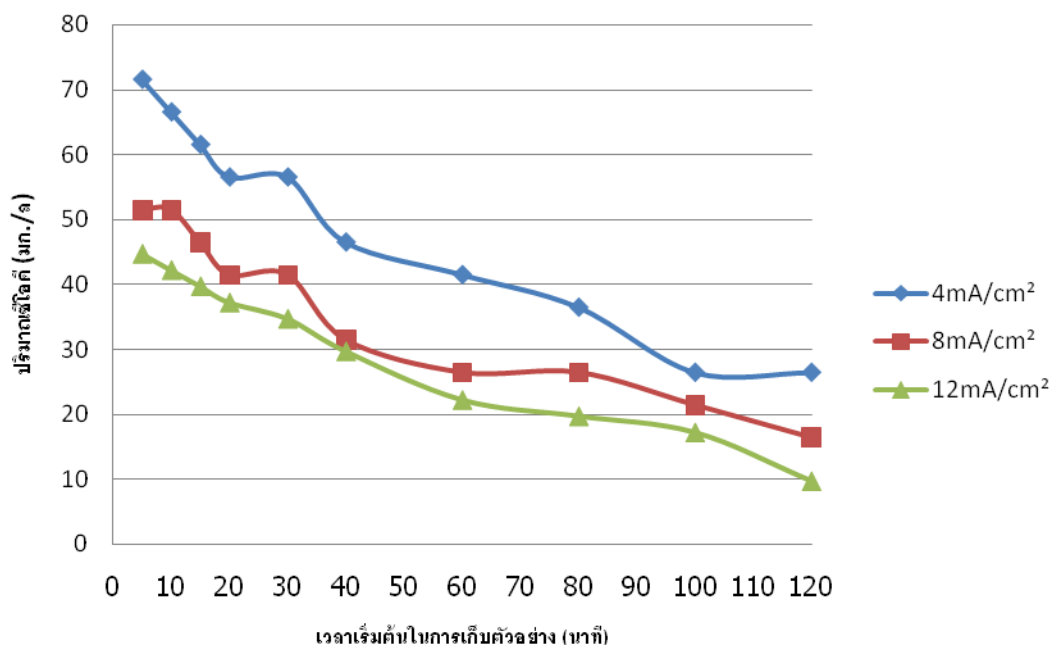
2. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี (COD)

ความสามารถในการบำบัดซีโอดี พิจารณาได้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีที่เพิ่มขึ้น โดยสามารถแสดงในรูปของประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่กระแสไฟฟ้าต่างกันที่ 4, 8 และ 12 mA/cm² pH เริ่มต้น 6 อัตราการไหลคงที่ 8 ml/min จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 5-9 จากการทดลองพบว่าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 12 mA/cm² เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นจะมีการแตกตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ออกมามากขึ้น ส่งผลให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้ดี เกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ทำให้อนุภาคสีถูกกำจัดออกไป ส่งผลให้อะลูมิเนียมละลายลงเหลืออยู่ในระบบน้อยลงเมื่อกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 75.91, 80 และ 91.14 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟฟ้า 4, 8 และ 12 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 5-9 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกันโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

ความสามารถในการกำจัดซีโอดี ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4, 8 และ 12 mA/cm² พิจารณาได้จากปริมาณซีโอดีที่ลดลง โดยแสดงในรูปความเข้มข้นของซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำ จากการทดลองพบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลให้เหล็กละลายและไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่ม ส่งผลให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้ดี เกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ปริมาณซีโอดีลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งทุกค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานการบำบัดซีโอดีที่ 120 mg/l (มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง 2539)



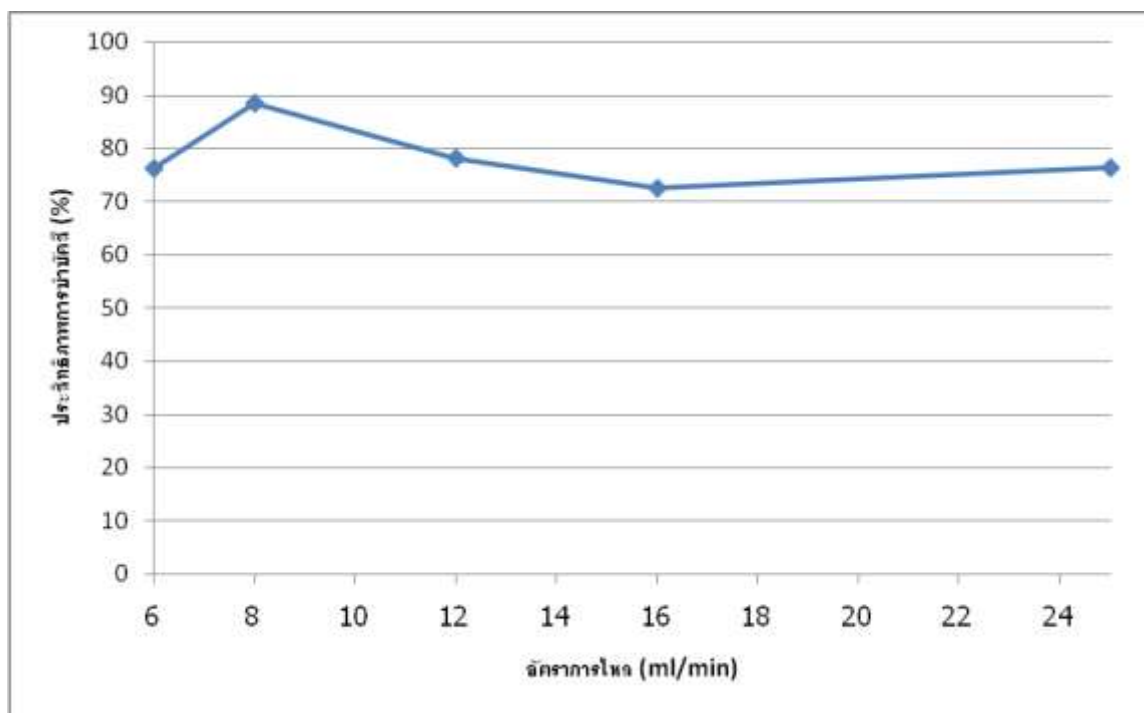
ภาพที่ 5-10 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณซีโอดี

5.2.3 การศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำเสีย

การทดลองนี้ใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า ศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 6, 8, 12, 16 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร และทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที

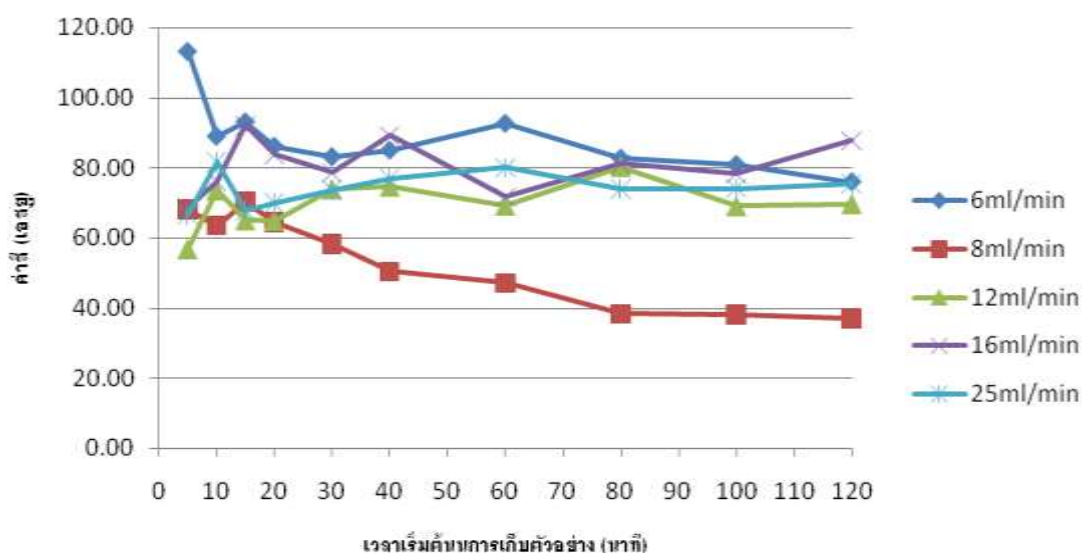
1. ประสิทธิภาพในการบำบัดสี

ความสามารถในการบำบัดสี พิจารณาได้จากค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปที่อัตราการไหลต่างๆของอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 6, 8, 12, 16 และ 25 mL/min ที่ pH เริ่มต้น 6 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 12 mA/cm² ดังแสดงในภาพที่ 5-11 จากการผลการทดลองพบว่าอัตราการไหล ที่ 8 mL/min มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดีที่สุด เนื่องจากมีระยะเวลากักพักในระบบนานพอที่อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ดูดซับหรือห่อหุ้มอนุภาคสีได้ดี เนื่องจากใช้กระแสไฟฟ้าที่เท่ากันทุกอัตราการไหล ขั้วไฟฟ้าสลายมากหรือน้อยลง เพราะการสลายตัวของขั้วเหล็กขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ซึ่งสอดคล้องกับกฎการแยกสลายสารด้วยไฟฟ้าของฟาราเดย์ คือ ปริมาณไฟฟ้าที่ผ่านเข้าเซลล์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการเปลี่ยนแปลงสมมูลเคมีของสารที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์นั้น



ภาพที่ 5-11 ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่อัตราการไหลต่างกันโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

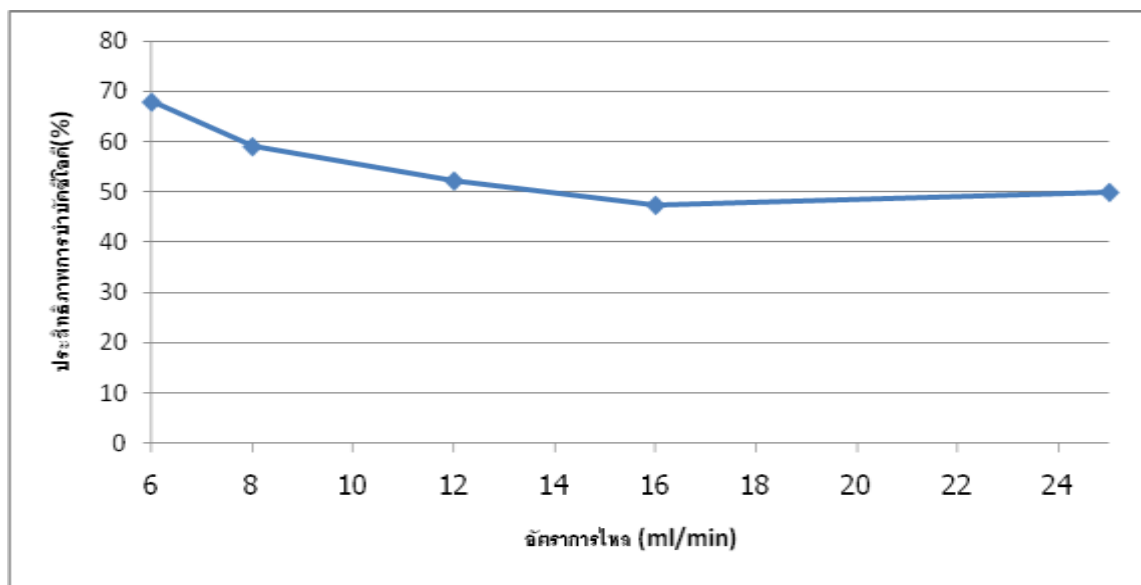
จากการทดลองค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 6, 8, 12, 16 และ 25 ml/min พบว่าค่าสีในแต่ละอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงไม่มาก เนื่องจากใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากันทุกอัตราการไหล จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการไหล 8 ml/min สามารถบำบัดสีได้ดีที่สุด ที่เวลา 80 นาที และคงที่เวลาจนถึง 120 นาที ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ของสีที่ไม่เป็นพิษที่น่ารังเกียจ



ภาพที่ 5-12 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่อค่าสี

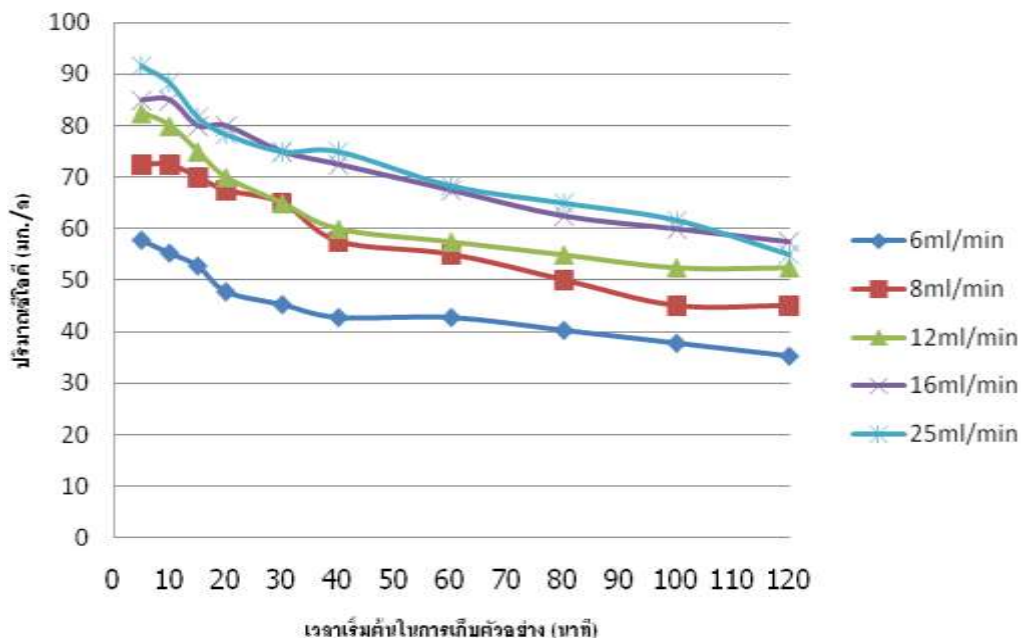
2. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดี (COD)

ความสามารถในการบำบัดซีไอดี พิจารณาได้จากความเข้มข้นซีไอดีที่ลดลง โดยสามารถแสดงในรูปของความเข้มข้นซีไอดีที่เหลืออยู่ในน้ำที่อัตราการไหล 6, 8, 12, 16 และ 25 ml/min ที่ pH เริ่มต้น 6 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 12 mA/cm^2 จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีมีลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น อัตราการไหลที่ช้าจะสามารถบำบัดซีไอดีได้มากกว่า โดยสามารถบำบัดซีไอดีเท่ากับ 67.95, 59.09, 52.27, 47.43 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 6, 8, 12, 16, และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที



ภาพที่ 5-13 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีไอดีที่อัตราการไหลต่างกันโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

ความสามารถในการกำจัดซีไอดี ที่อัตราการไหล 6, 8, 12, 16 และ 25 ml/min พิจารณาจากความเข้มข้นซีไอดีที่ลดลง จากการศึกษาพบว่าปริมาณซีไอดีลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการไหลช้าจะสามารถกำจัดซีไอดีได้มากกว่า ที่อัตราการไหลที่ 6 ml/min สามารถกำจัดซีไอดีได้ดีที่สุด ที่ระยะเวลา 40 นาที เข้าสู่ภาวะสมดุล ที่ 120 นาที ซึ่งปริมาณซีไอดีลดลงเหลือ 35 mg/L เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นทำให้น้ำเสียมีระยะเวลาพักในระบบน้อยลง ทำให้เกิดการบำบัดน้อยส่งผลให้ค่าซีไอดีหลงเหลืออยู่



ภาพที่ 5-14 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่อปริมาณซีโอดี

ในการทดลองที่ 1 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมแอซิดด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 12 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาในการบำบัด 60 นาที และอัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีและเหมาะสมที่สุดในการทดลอง

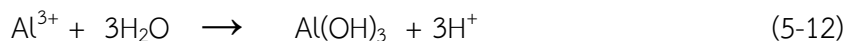
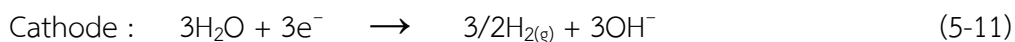
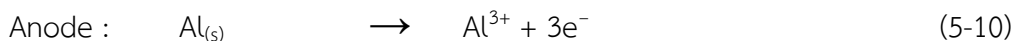
5.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

5.3.1 ศึกษาผลของ pH ในระบบ โดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

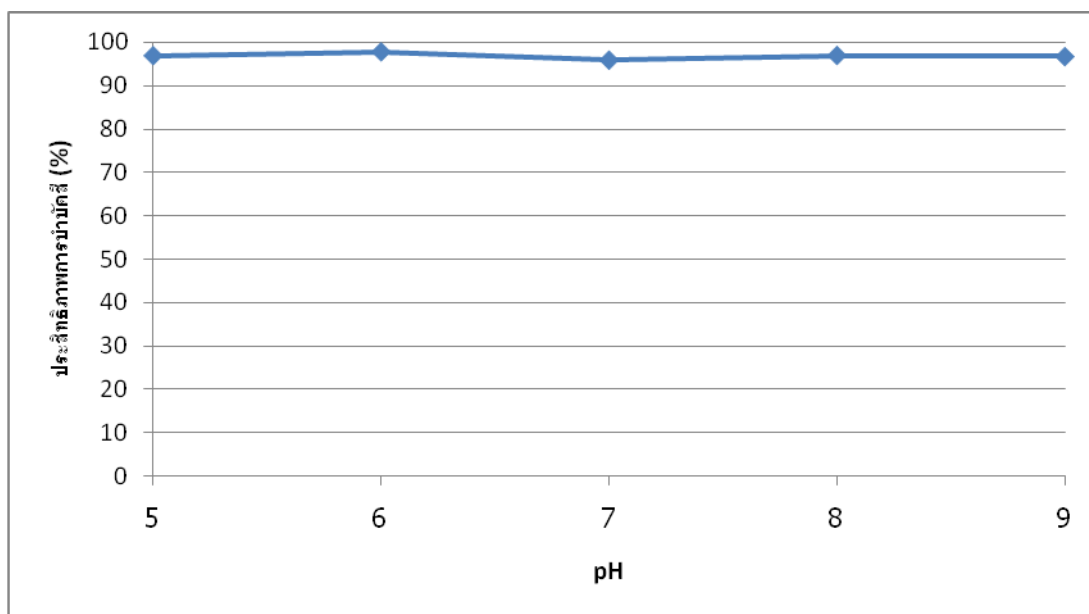
การทดลองนี้ใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า โดยมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8 แอมป์ต่อตารางเซนติเมตร อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที

1. ประสิทธิภาพในการบำบัดสี

สำหรับอะลูมิเนียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือไอออนของ Al^{3+} และ OH^- ซึ่งจะเกิดจากปฏิกิริยาดังสมการที่ (4.10) และ (4.11) ซึ่งสุดท้ายจะเปลี่ยนรูปไปเป็น $Al(OH)_3$ ดังสมการที่ (5-12) และ $Al(OH)_3$ จะรวมตัวกันแบบ sweep flocs ซึ่งมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่มาก มีประโยชน์สำหรับการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้และสำหรับดักจับอนุภาคคอลลอยด์ (Merzouk et al., 2009)

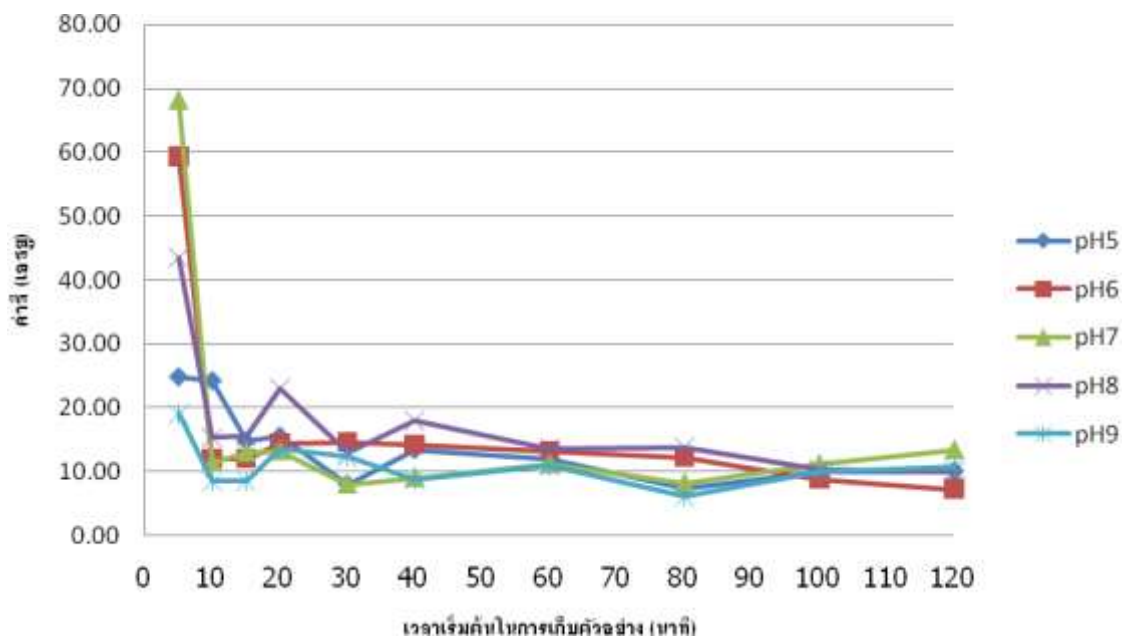


ความสามารถในการบำบัดสี พิจารณาได้จากค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปที่ระยะเวลาต่างๆของค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียที่ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 8 mA/cm² อัตราการไหลคงที่ 8 ml/min ดังแสดงในภาพที่ 5-15 จากการทดลองพบว่าทุกๆค่า pH มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ใกล้เคียงกัน แต่ pH 6 จะมีประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ดีที่สุด เนื่องจากที่ขั้วแอโนดเกิดการละลายของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และที่ขั้วแคโทด เกิดการแตกตัวของน้ำ เกิดก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อไฮดรอกไซด์ไอออนทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ตะกอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารรวมตะกอน อนุภาคสีจะถูกดูดซับหรือห่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นตะกอนลงชั้นสู่ผิว น้ำโดยก๊าซไฮโดรเจน ซึ่ง pH6 สามารถบำบัดได้ 97.73 % และพบว่าที่ pH 5, 7, 8, และ 9 สามารถบำบัดได้ 96.84, 95.8, 96.91 และ 96.63 % ตามลำดับ จากผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pablo et al., 2009 ที่พบว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Al}(\text{OH})_3$) มีความสามารถในการตกตะกอนได้ดีในช่วง pH 6 - 9



ภาพที่ 5-15 ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ค่า pH เริ่มต้นต่างกันโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

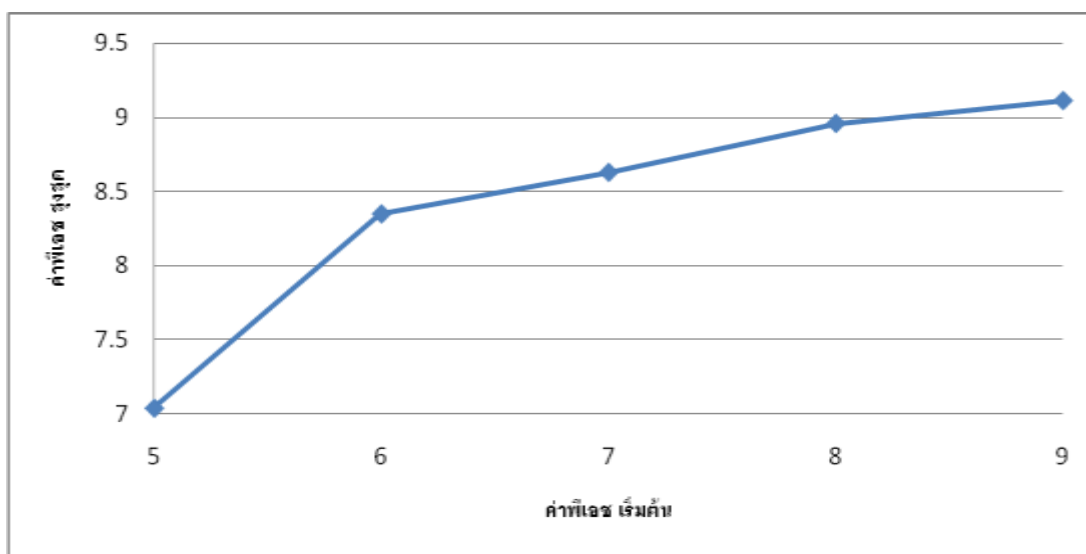
ในการทดลองนี้ใช้การวัดสีแบบเอสยู วัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ซึ่งสีที่เข้มมากก็จะดูดกลืนสีได้มาก ผลการทดลองพบว่าค่าสีของน้ำเสียสีแอสิตเริ่มต้นในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ดังภาพที่ 4-16 ที่ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 ค่าสีมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง พบว่า pH 6 สามารถบำบัดสีได้ดีที่สุด ที่ระยะเวลา 120 นาที พบว่าค่าสีลดลงที่ 7.25 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ไม่เป็นที่พึงนารังเกียจ



ภาพที่ 5-16 ผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชต่อค่ารี

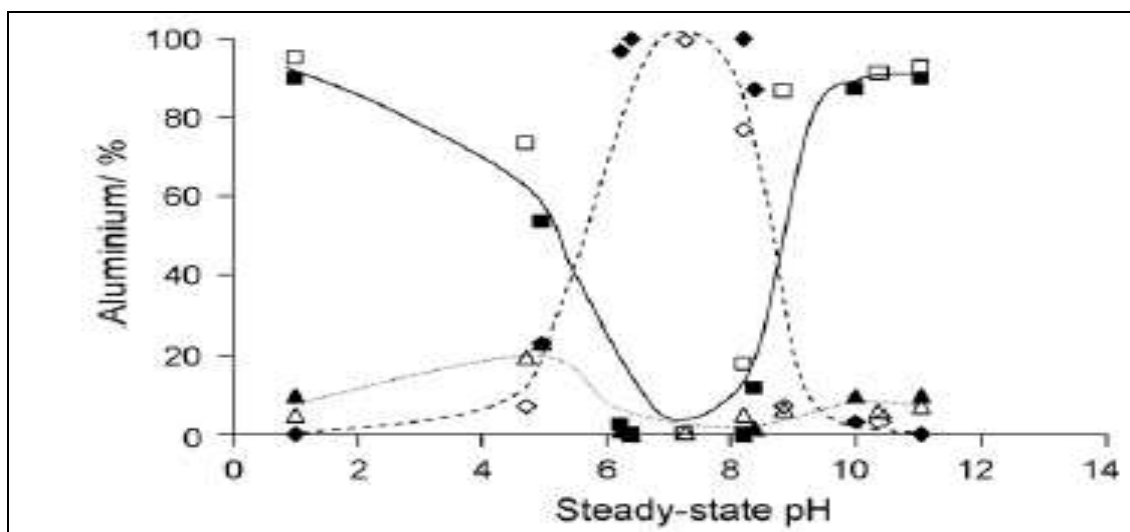
2. การเปลี่ยนแปลงของพีเอชในระบบ

จากการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบค่า pH ที่เปลี่ยนแปลงไปของค่า pH เริ่มต้นที่ต่างกันจะพบว่า เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อยู่ที่ pH6 เข้าสู่จุดสมดุลที่ 8.3 และที่ pH 5, 7, 8, และ 9 เข้าสู่จุดสมดุลที่ 7, 8.7, 8.9, และ 9.2 ตามลำดับ พบว่าทุกค่าพีเอชเพิ่มประมาณ 2.5 เนื่องจากที่ชั่วแคโทดเกิดการแตกตัวของน้ำ ซึ่งผลจากการแตกตัวของน้ำจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) โดยไฮดรอกไซด์ไอออนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้น้ำมีความเป็นด่างเพิ่มขึ้นและที่ชั่วแอโนดเกิดการละลายของอะลูมิเนียมไอออน โดยค่าพีเอชที่สามารถบำบัดได้ดีที่สุด ดังภาพที่ 5-17



ภาพที่ 5-17 ผลค่าพีเอชเริ่มต้นต่อค่าพีเอชที่จุดสมดุล

จากผลการศึกษา พบว่า ที่ pH 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดีที่สุด เนื่องจากค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 6 เข้าสู่จุดสมดุลที่ 8.3 ที่ช่วงแอโนดเกิดการละลายของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูป monomeric และที่ขั้วแคโทด เกิดการแตกตัวของน้ำ เกิดก๊าซไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อไฮดรอกไซด์ไอออนทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ เกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $Al(OH)_3$ ที่อยู่ในรูป polymeric ดังภาพที่ 5-18 ซึ่งเป็นสารรวมตะกอน อนุภาคสีจะถูกดูดติดหรือห่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำโดยก๊าซไฮโดรเจน พบว่าที่ pH 5, 7, 8, และ 9 เข้าสู่จุดสมดุลที่ 7, 8.7, 8.9, และ 9 ตามลำดับ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่ละลายออกมาจะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้น้อย เนื่องจากพีเอชที่เพิ่มขึ้นตะกอนจะอยู่ในรูปอื่นที่ไม่ก่อให้เกิดสารรวมตะกอน ส่งผลให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ดูดติดหรือห่อหุ้มกับอนุภาคสีได้น้อยลง ดังภาพที่ 5-18



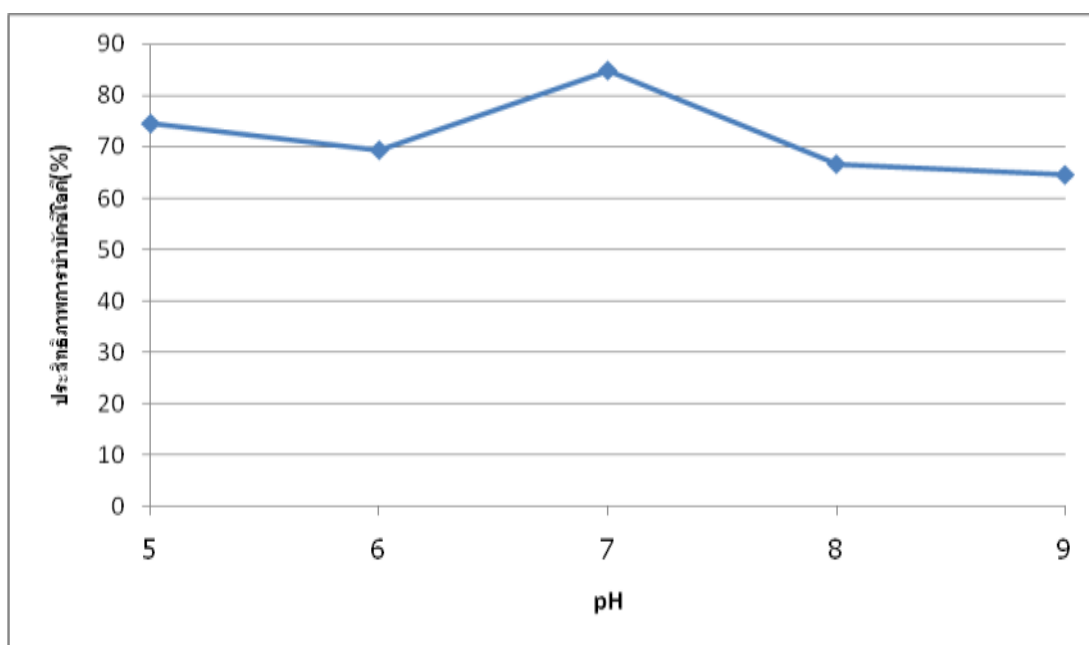
ผลของ พีเอช ในอะลูมิเนียมในการทดลองของเคมีและการตกตะกอนทางไฟฟ้า ◆ การตกตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า ◊ การตกตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยเคมี ■ การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีที่อยู่ในรูปของสารละลาย monomeric □ การตกตะกอนด้วยเคมีที่อยู่ในรูปของสารละลาย monomeric ▲ การตกตะกอนด้วยไฟฟ้าเคมีที่อยู่ในรูปของสารละลาย polymeric Δ การตกตะกอนด้วยเคมีที่อยู่ในรูปของสารละลาย polymeric

ภาพที่ 5-18 แสดงความสัมพันธ์ของค่าพีเอชและการตกตะกอนของอะลูมิเนียม
ที่มา : Pablo et al., (2009)

3. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี (COD)

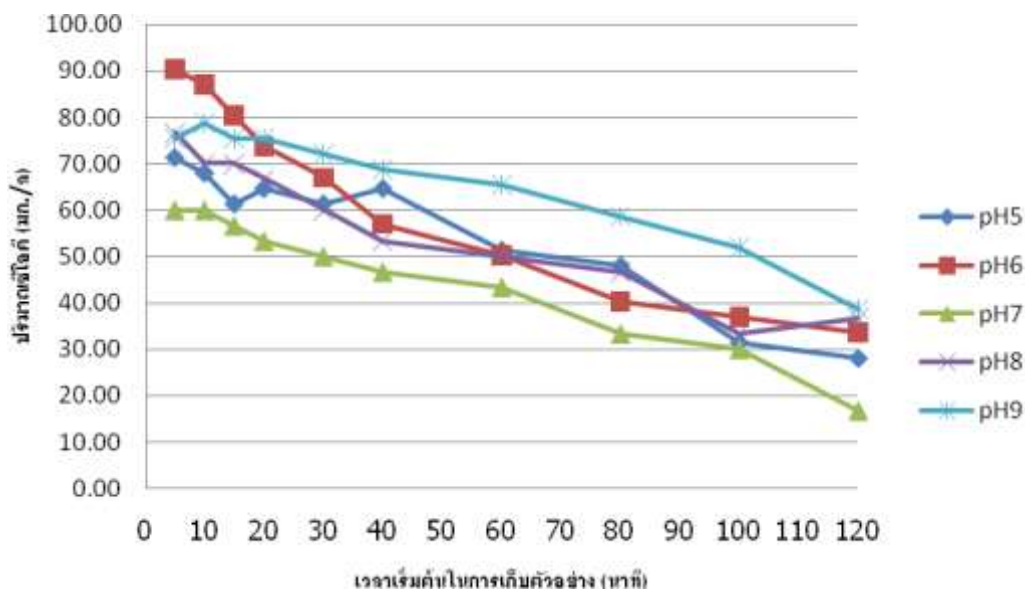
ความสามารถในการบำบัดซีโอดี พิจารณาได้จากความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง โดยสามารถแสดงในรูปของความเข้มข้นซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ pH 5, 6, 7, 8, และ 9 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 8 mA/cm^2 อัตราการไหลคงที่ 8 mL/min ดังแสดงในภาพที่ 5-19 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียที่มี pH เริ่มต้นต่างกัน พบว่าที่ pH 7 เพราะมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีดีที่สุด เนื่องจากค่าพีเอชเริ่มต้นที่ 7 เข้าสู่จุดสมดุลที่ 8.7 จะมีปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ที่สูง ส่งผลให้อะลูมิเนียมออกไซด์รวมตัวกับอนุภาคสีได้ดี และเกิดตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำอย่างต่อเนื่อง ทำให้อนุภาคสีถูกกำจัดได้มากขึ้น ส่งผลให้อะลูมิเนียมละลายน้อย และมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นพบว่า pH 5 มีการแตกตัวของอะลูมิเนียมที่ขั้วแอโนด ทำให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ละลายออกมา และมีไฮโดรเจนและไฮดรอกไซด์ไอออนแตกตัวที่ขั้วแคโทด เนื่องจากอยู่ที่ช่วงความเป็นกรด จึงส่งผลให้

มีการแตกตัวได้ดีและมีปริมาณซีโอต์กับอะลูมิเนียมละลายเหลืออยู่ในปริมาณน้อย เมื่อเพิ่ม pH6 พบว่าประสิทธิภาพจะลดลงเนื่องจากการแตกตัวของอะลูมิเนียมออกไซด์มีมาก ส่งผลให้อะลูมิเนียมออกไซด์รวมตัวกับอนุภาคสีไม่หมด ส่งผลให้อะลูมิเนียมละลายหลงเหลืออยู่มาก ที่ pH8 และ pH9 มีปริมาณซีโอต์ลดลงและมีประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากพีเอชที่สูงทำให้อะลูมิเนียมที่แอมโนดละลายอะลูมิเนียมอ็อกไซด์ออกมาได้น้อย และไฮโดรเจนกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่แคโทดแตกตัวออกมาได้น้อยเช่นกัน ส่งผลให้อะลูมิเนียมรวมตัวกับอนุภาคสีได้น้อย และมีปริมาณอะลูมิเนียมละลายหลงเหลืออยู่ในระบบมาก ดังภาพที่ 5-18 ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการบำบัดสีเนื่องจากสีเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าซีโอต์โดยตรง



ภาพที่ 5-19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอต์ที่ pH เริ่มต้น โดยใช้ลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

จากภาพที่ 4-20 ปริมาณซีโอต์ที่เปลี่ยนแปลงที่ pH 5, 6, 7, 8 และ 9 พิจารณาได้จากปริมาณซีโอต์ที่ลดลง พบว่าอัตราการกำจัดซีโอต์ที่เกิดขึ้นลดลงอย่างต่อเนื่อง พบว่า pH 7 สามารถกำจัดซีโอต์ได้ดีที่สุด พบว่าปริมาณซีโอต์ลดลงที่ 16.67 mg/L ซึ่งพบว่าทุกพีเอชผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการบำบัด ที่ 120 mg/L (มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง 2539)



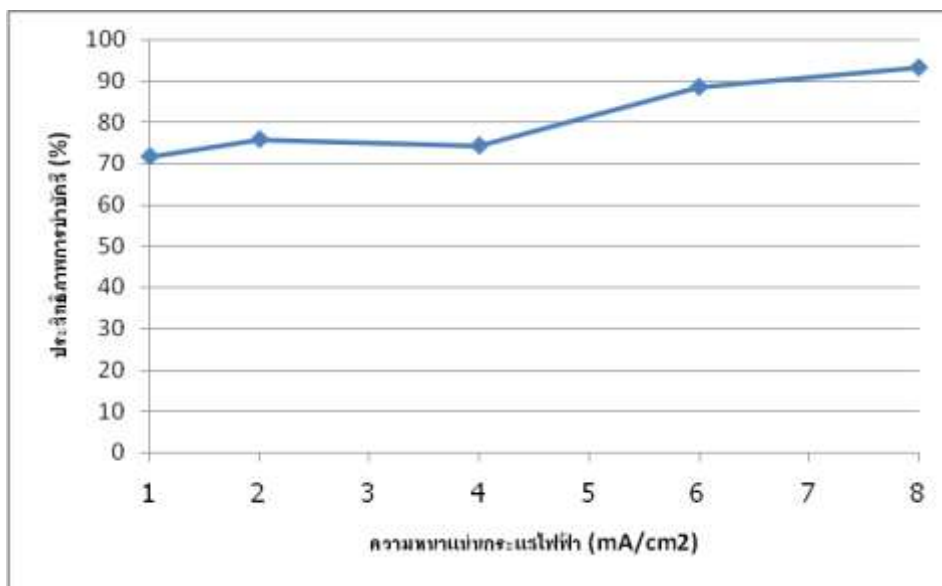
ภาพที่ 5-20 ผลของการเปลี่ยนแปลงพีเอชต่อปริมาณซีโอดี

5.3.2 การศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

การทดลองนี้ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ศึกษาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ 1, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร โดยมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 6 อัตราการไหล 8 มิลลิลิตรต่อนาที และทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที

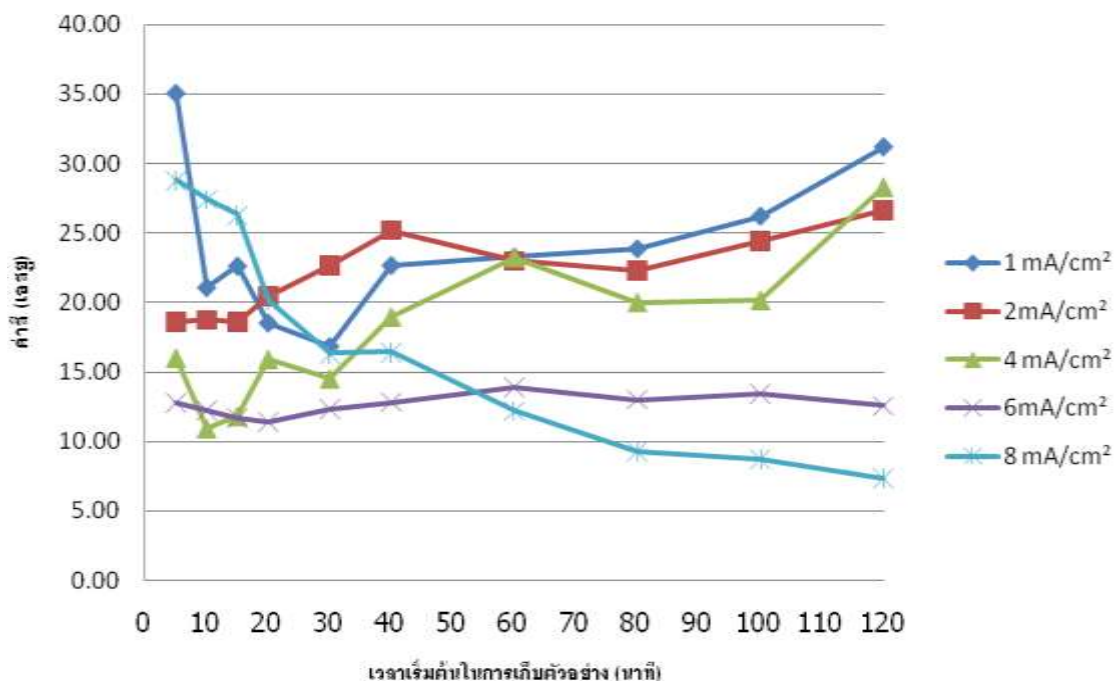
1. ประสิทธิภาพในการบำบัดสี

ความสามารถในการบำบัดสี พิจารณาได้จากค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปที่ระยะเวลาต่างๆ ของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร pH เริ่มต้น 6 อัตราการไหลคงที่ 8 ml/min พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีของกระแสไฟฟ้าที่ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดีที่สุด เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขั้วแอโนดมีอะลูมิเนียมแตกตัวได้เพิ่มขึ้นและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้มากขึ้น ทำให้อะลูมิเนียมรวมตัวกับอนุภาคสีเกิดเป็นตะกอนลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ทำให้อนุภาคสีถูกกำจัดได้มากขึ้น เมื่อลดกระแสไฟฟ้าลงที่ เมื่อลดกระแสไฟฟ้าลงที่ 6, 4, 2 และ 1 mA/cm² เนื่องจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่น้อยส่งผลให้อะลูมิเนียมแตกตัวได้น้อย ส่งผลให้อนุภาคสีถูกกำจัดได้น้อยลง ดังแสดงในภาพที่ 5-21 เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขั้วแอโนดจะมีอะลูมิเนียมแตกตัวได้เพิ่มขึ้นและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้มากขึ้นส่งผลให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์รวมตัวกับอนุภาคสีเกิดเป็นตะกอนและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำทำให้อนุภาคสีถูกกำจัดได้มากขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพการบำบัดสีแปรผันโดยตรงกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 5-21 ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกันโดยใช้อะลูมิเนียมเป็น
ตัวไฟฟ้า

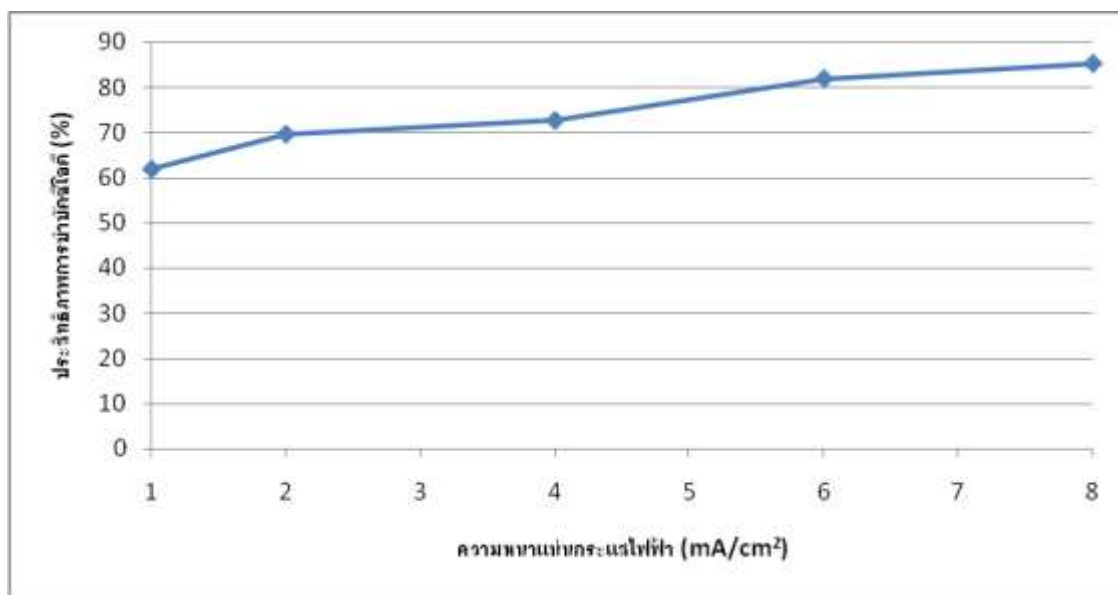
จากการทดลองค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1, 2, 4, 6 และ 8 mA/cm² พิจารณาจากค่าสีที่ลดลง ซึ่งสีที่เข้มมากก็สามารถดูดกลืนแสงได้มาก โดยพบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 8 mA/cm² สามารถบำบัดได้ดีที่สุด ที่ระยะเวลา 80 นาที เนื่องจากความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ตัวแอโนดมีอะลูมิเนียมแตกตัวได้เพิ่มขึ้นและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้มากขึ้น ทำให้อนุภาคสีถูกกำจัดได้มากขึ้น ซึ่งพบว่าค่าสีลดลงที่ 7.31 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานไม่เป็นที่พึงนารังเกียจ



ภาพที่ 5-22 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อค่าซี

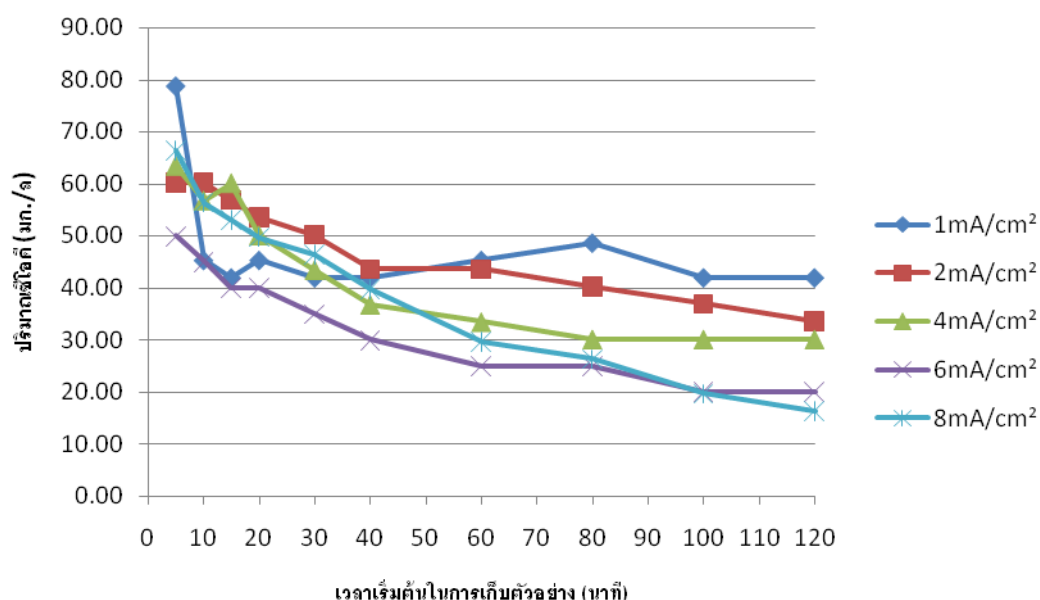
2. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี (COD)

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสามารถแสดงในรูปของความเข้มข้นซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1, 2, 4, 6, และ 8 mA/cm² ที่ pH เริ่มต้น 6 และอัตราการไหลคงที่ 8 ml/min ดังภาพที่ 5-23 จากการทดลองพบว่าที่ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 8 mA/cm² เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นจะมีการแตกตัวของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ออกมามากขึ้น ส่งผลให้อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนได้ดี เกิดเป็นอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ทำให้อนุภาคสีถูกกำจัดออกไป ส่งผลให้อะลูมิเนียมละลายลงเหลืออยู่ในระบบน้อยลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 61.82, 69.55, 72.58, 81.82, และ 85.15 เปอร์เซ็นต์ ที่กระแสไฟฟ้า 1, 2, 4, 6, และ 8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ



ภาพที่ 5-23 ประสิทธิภาพการบ่มซีโอดีของกระแสไฟฟ้าต่างกันโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

ความสามารถในการกำจัดซีโอดี ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1, 2, 4, 6 และ 8 mA/cm² พิจารณาได้จากปริมาณซีโอดีที่ลดลง โดยแสดงในรูปความเข้มข้นของซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำ จากการทดลองพบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลให้เหล็กละลายและไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่ม ส่งผลให้ปริมาณซีโอดีลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 8 mA/cm² สามารถกำจัดซีโอดีได้ดีที่สุด และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง เมื่อระยะเวลาเพิ่ม



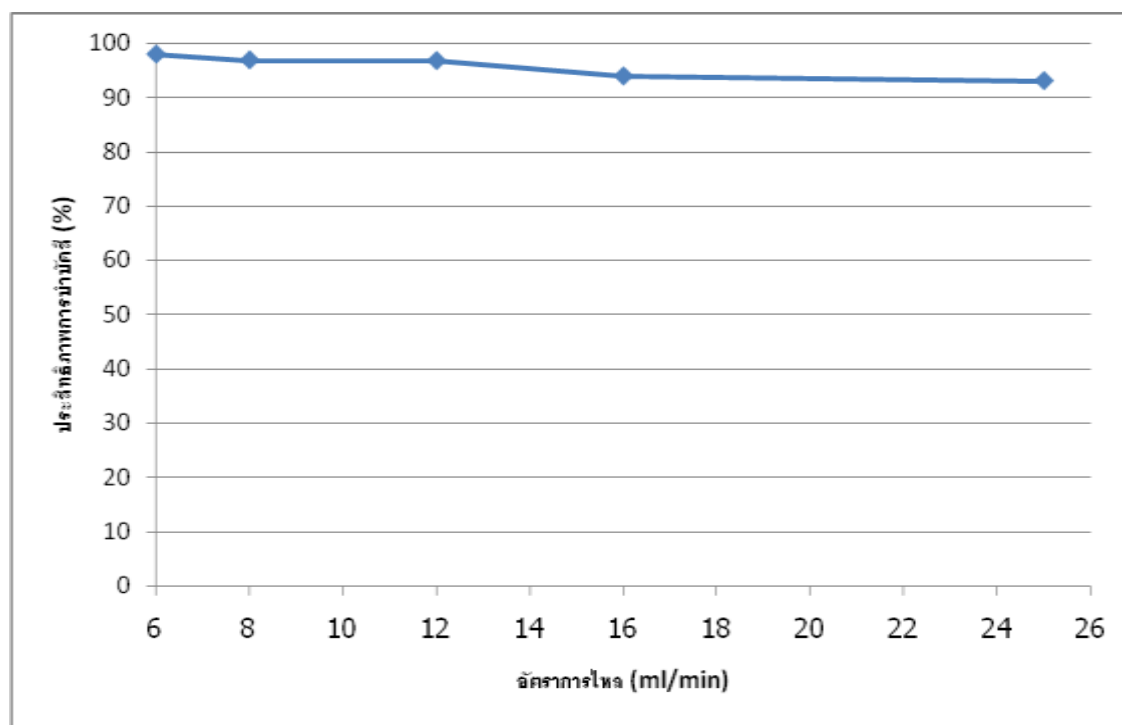
ภาพที่ 5-24 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อปริมาณซีโอดี

5.2.3 การศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำเสีย

การทดลองนี้ใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ศึกษาอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 6, 8, 12, 16 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที โดยมีระยะห่างของขั้วไฟฟ้า 2 เซนติเมตร ค่า pH เริ่มต้นเท่ากับ 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และทำการเก็บตัวอย่างที่ระยะเวลา 5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 100 และ 120 นาที

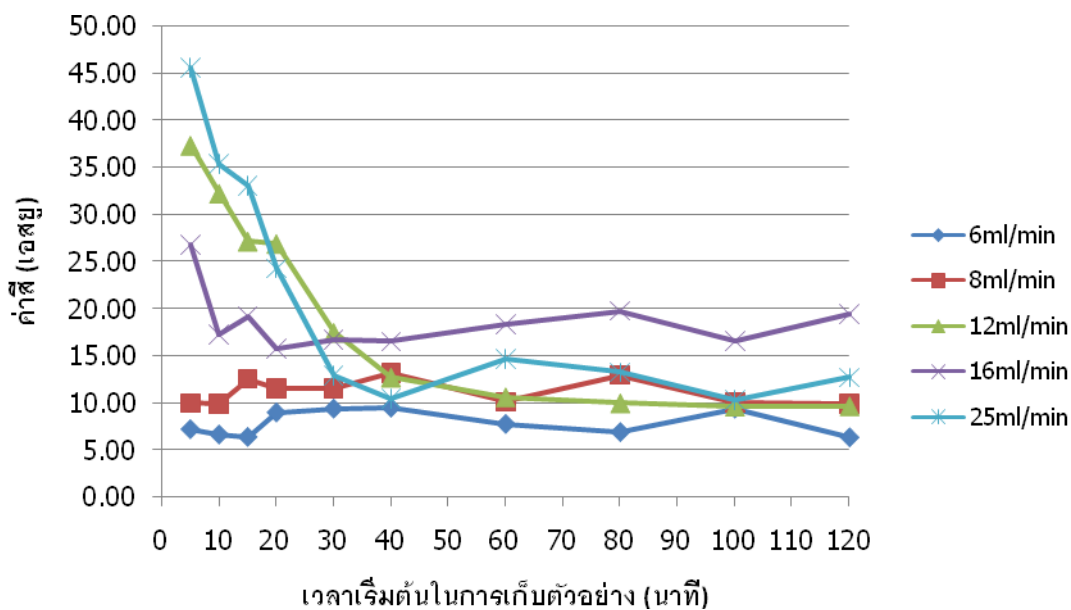
1. ประสิทธิภาพในการบำบัดสี

ความสามารถในการบำบัดสี พิจารณาได้จากค่าสีที่เปลี่ยนแปลงไปที่อัตราการไหลต่างๆ ของอัตราการไหลของน้ำเสียที่ 6, 8, 12, 16 และ 25 ml/min ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 8 mA/cm² pH เริ่มต้น 6 ดังแสดงในภาพที่ 5-25 พบว่าอัตราการไหล ที่ 6 ml/min มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดีที่สุด เนื่องจาก มีระยะเวลากักพักในระบบนานพอ ที่อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ดูดซับหรือห่อหุ้มอนุภาคสีได้ดี



ภาพที่ 5-25 ประสิทธิภาพการบำบัดสีที่อัตราการไหลต่างกันโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

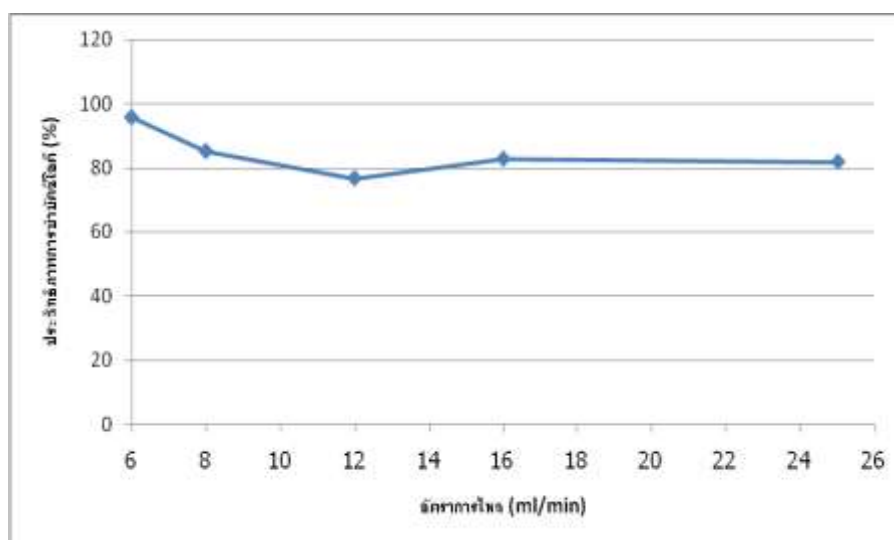
จากการทดลองค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ที่อัตราการไหล 6, 8, 12, 16 และ 25 ml/min พบว่าค่าสีในแต่ละอัตราการไหลเปลี่ยนแปลงไม่มาก เนื่องจากใช้กระแสไฟฟ้าเท่ากันทุกอัตราการไหล พบว่าที่อัตราการไหล 8 ml/min สามารถบำบัดสีได้ดีที่สุด ที่เวลา 60 นาที และคงที่เวลาจนถึง 120 นาที พบว่าค่าสีลดลงที่ 6.4 ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานของสีที่ไม่เป็นที่พึงนารังเกียจ



ภาพที่ 5-26 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่อค่าสี

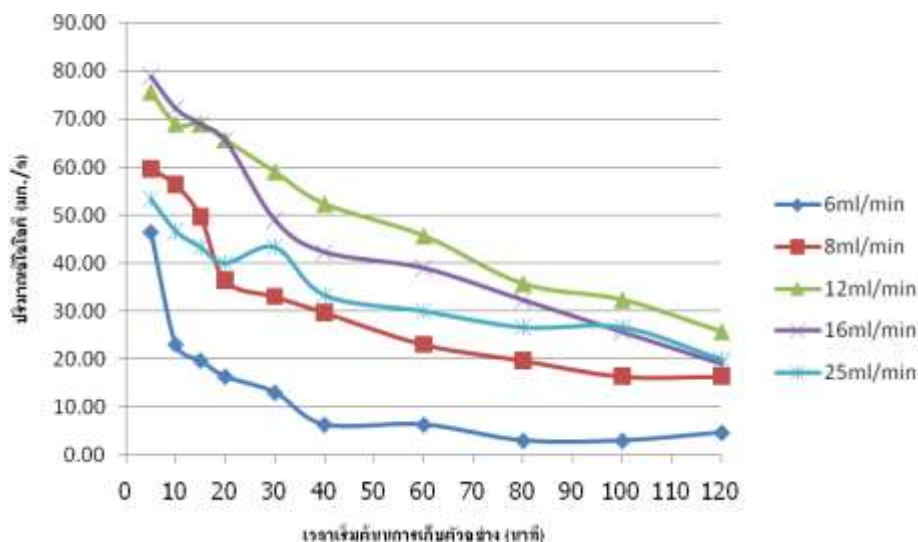
2. ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติ

ความสามารถในการบำบัดซีโอติ พิจารณาได้จากความเข้มข้นซีโอติที่ลดลง โดยสามารถแสดงในรูปของความเข้มข้นซีโอติที่เหลืออยู่ในน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ จากการศึกษพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น อัตราการไหลที่ช้าจะสามารถบำบัดซีโอติได้มากกว่า โดยสามารถบำบัดซีโอติเท่ากับ 95.76, 85.15, 76.67, 82.73, และ 81.82 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 6, 8, 12, 16, และ 25 มิลลิเมตรต่อนาที



ภาพที่ 5-27 ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอติที่อัตราการไหลต่างกันโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

ความสามารถในการกำจัดซีโอดี ที่อัตราการไหล 6, 8, 12, 16 และ 25 ml/min พิจารณาความเข้มข้นซีโอดีที่ลดลง จากการศึกษพบว่าปริมาณซีโอดีลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการไหลช้าจะสามารถกำจัดซีโอดีได้มากกว่า ซึ่งพบว่าอัตราการไหลที่ 6 ml/min สามารถกำจัดซีโอดีได้ดีที่สุด ที่ระยะเวลา 40 นาที และคงที่จนถึง 120 นาที ซึ่งพบว่าปริมาณซีโอดีลดลงที่ 4.67 mg/l ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐาน



ภาพที่ 5-28 ผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลต่อปริมาณซีโอดี

ในการทดลองที่ 2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมแอสิตด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดคือมี pH เริ่มต้นเท่ากับ 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ระยะเวลาในการบำบัด 60 นาที และอัตราการไหล 6 มิลลิลิตรต่อนาที เนื่องจากสภาวะดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีและเหมาะสมที่สุดในการทดลอง

5.4 ศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้า

5.4.1 ศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า

1. ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้า สามารถอธิบายตามกฎของโอห์ม โดยใช้สูตร

$$W = (V \times I \times T) / 1000$$

เมื่อ	W	คือ	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
	V	คือ	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
	I	คือ	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
	T	คือ	ระยะเวลาที่ใช้ไฟฟ้า (ชั่วโมง)

จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร (0.36 แอมแปร์) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 27.9 โวลต์ ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ดังนั้น เมื่อแทนค่าในสูตรจะได้

$$W = \frac{27.9 \times 0.36 \times 2}{1000}$$

$$= 0.020088 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง}$$

ในการบำบัดใช้น้ำเสียปริมาตร 3.5 ลิตร หรือ 0.0035 ลูกบาศก์เมตร

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย } 1 \text{ m}^3 &= \frac{0.020088 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 1 \text{ ลบ.ม.}}{0.0035 \text{ ลบ.ม.}} \\ &= 5.7394 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ในการศึกษาค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดสำหรับการทดลองในครั้งนี้ จะใช้อัตราค่าไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยใช้อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 2 คือกิจการขนาดเล็ก ซึ่งมีรายละเอียดค่าใช้จ่ายดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก

	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)	ค่าบริการ (บาท/เดือน)
2.1.1 แรงดัน 22-33 กิโลโวลต์	2.4649	228.17
2.1.2 แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลต์		40.90
- 150 หน่วยแรก (หน่วยที่ 0-150)	1.8047	
- 250 หน่วยต่อไป (หน่วยที่ 151-400)	2.7781	
- เกิน 400 หน่วยขึ้นไป (หน่วยที่ 401 เป็นต้นไป)	2.9780	

ที่มา : <http://www.eppo.go.th/power/pw-Rate-PEA.html>

เลือกอัตราค่าไฟฟ้า เกิน 400 หน่วยขึ้นไปมาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากถ้านำไปใช้หาค่าไฟฟ้าในการบำบัดน้ำเสียจริง จะได้ทราบค่าไฟฟ้าสูงสุดที่ต้องจ่าย

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด} &= 2.9780 \text{ บาท} \times 5.7394 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.} \\ &= 17 \text{ บาท/ลบ.ม.} \end{aligned}$$

2. ความสิ้นเปลืองของขั้วไฟฟ้า(เหล็ก)

$$\text{น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่หายไป} = A - B$$

$$A = \text{น้ำหนักขั้วไฟฟ้าก่อนการบำบัด}$$

$$B = \text{น้ำหนักขั้วไฟฟ้าหลังการบำบัด}$$

แทนค่าในสูตร จะได้

$$\begin{aligned}
 \text{น้ำหนักของข้าวไฟฟ้าที่หายไป} &= (46.9210 - 46.4348) \\
 \text{ความเข้มข้นน้ำเสีย 400 mg/l} &= 0.4862 \text{ กรัม} \\
 \text{น้ำเสีย 0.0035 m}^3 \text{ เหล็กสลายไป} &= 0.4862 \text{ กรัม} \\
 \text{น้ำเสีย 1 m}^3 \text{ เหล็กสลายไป} &= \frac{0.4862 \text{ กรัม} \times 1 \text{ ลบ.ม.}}{0.0035 \text{ ลบ.ม.}} \\
 &= 138.914 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

เหล็กขนาด 4 x 8 ฟุต หนา 2.0 มิลลิเมตร หนัก 47 กิโลกรัม/แผ่น ราคา 1600 บาท

เหล็ก 1 กิโลกรัม ราคา = 34.043 บาท

$$= 0.034 \text{ บาท/กรัม}$$

เพราะฉะนั้นค่าเหล็ก = $138.914 \text{ g/m}^3 \times 0.034 \text{ บาท/g}$

$$= 4.72 \text{ บาท/m}^3$$

3. ค่ากำจัดกากตะกอน

ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัด ซึ่งมีน้ำเสียปริมาตร 3.5 ลิตร = 5.3 กรัม

น้ำเสีย 1 ลิตร มีปริมาณตะกอนเกิดขึ้น = 1.76 กรัม

$$= 1.76 \text{ กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร}$$

ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรม = 755 บาท/ตัน (ภคพงศ์, 2546)

$$= 0.755 \text{ บาท/กิโลกรัม}$$

เพราะฉะนั้น ค่ากำจัดตะกอน

$$= 0.755 \text{ บาท/กก.} \times 1.76 \text{ กก./ลบ.ม.}$$

$$= 1.32 \text{ บาท/ลบ.ม.}$$

4. ค่าใช้จ่ายทั้งหมด

ค่าใช้จ่ายทั้งหมด = ค่าไฟฟ้า + ค่ากำจัดตะกอน + ค่าแผ่นเหล็ก

$$= 17 + 1.32 + 4.7 \text{ บาท/ลบ.ม.}$$

$$= 23 \text{ บาท/ลบ.ม.}$$

5.4.2 ศึกษาค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า

1. ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางไฟฟ้า สามารถอธิบายตามกฎของโอห์ม โดยใช้สูตร

$$W = (V \times I \times T) / 1000$$

เมื่อ W คือ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)
 V คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)
 T คือ ระยะเวลาที่ใช้ไฟฟ้า (ชั่วโมง)

จากผลการทดลองพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 8 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร (0.24 แอมแปร์) ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 29 โวลต์ ระยะเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมงสามารถให้ประสิทธิภาพการบำบัดได้ดีที่สุด
 ดังนั้น เมื่อแทนค่าในสูตรจะได้

$$\begin{aligned} W &= \frac{29 \times 0.24 \times 2}{1000} \\ &= 0.01392 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ในการบำบัดใช้น้ำเสียปริมาตร 3.5 ลิตร หรือ 0.0035 ลบ.ม.

$$\text{พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย } 1 \text{ m}^3 = \frac{0.01392 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง} \times 1 \text{ ลบ.ม.}}{0.0035 \text{ ลบ.ม.}}$$

$$= 3.9771 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการบำบัด} &= 3.9771 \text{ บาท} \times 2.5851 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ลบ.ม.} \\ &= 10.28 \text{ บาท/ลบ.ม.} \end{aligned}$$

2. ความสิ้นเปลืองของขั้วไฟฟ้า(อะลูมิเนียม)

$$\text{น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่หายไป} = A - B$$

$$A = \text{น้ำหนักขั้วไฟฟ้าก่อนการบำบัด}$$

$$B = \text{น้ำหนักขั้วไฟฟ้าหลังการบำบัด}$$

แทนค่าในสูตร จะได้

$$\text{น้ำหนักของขั้วไฟฟ้าที่หายไป} = 1.1497 - 0.9744$$

$$\text{ความเข้มข้นน้ำเสีย } 400 \text{ mg/l} = 0.1753 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำเสีย } 0.002 \text{ m}^3 \text{ อะลูมิเนียมสลายไป} = 0.1753 \text{ กรัม}$$

$$\text{น้ำเสีย } 1 \text{ m}^3 \text{ อะลูมิเนียมสลายไป} = \frac{0.1753 \text{ กรัม} \times 1 \text{ ลบ.ม.}}{0.0035 \text{ ลบ.ม.}}$$

$$= 50.085 \text{ กรัม}$$

อะลูมิเนียมขนาด 0.2 mm. × 1m. × 2m.หนัก 750 กรัม ราคา 250 บาท

$$\text{อะลูมิเนียม } 1 \text{ กิโลกรัม ราคา} = 333.33 \text{ บาท/กิโลกรัม}$$

$$= 0.33 \text{ บาท/กรัม}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เพราะฉะนั้นค่าอะลูมิเนียม} &= 50.085 \text{ กรัม/ลบ.ม.} \times 0.33 \text{ บาท/กรัม} \\
 &= 16.52 \text{ บาท/ลบ.ม.}
 \end{aligned}$$

3. ค่ากำจัดกากตะกอน

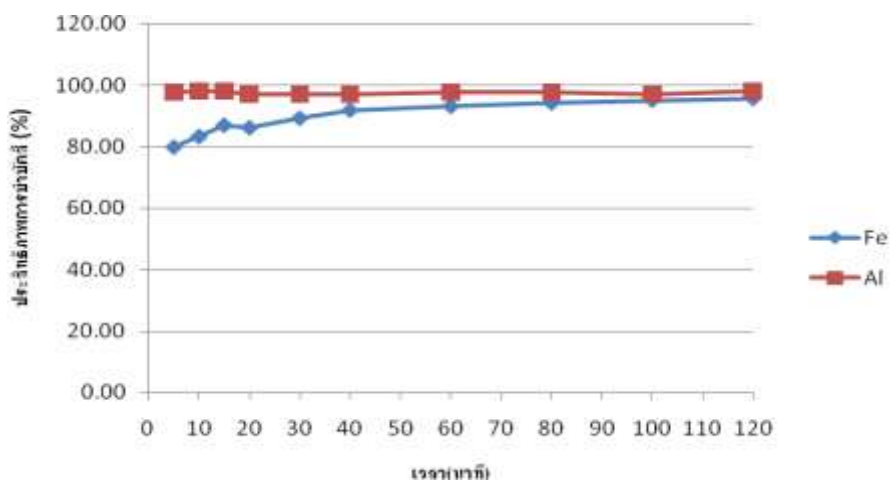
$$\begin{aligned}
 &\text{ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นจากการบำบัด ซึ่งมีน้ำเสียปริมาตร 3.5 ลิตร} = 5.42 \text{ กรัม} \\
 &\text{น้ำเสีย 1 ลิตร มีปริมาณตะกอนเกิดขึ้น} = 1.54 \text{ กรัม} \\
 &= 1.54 \text{ กก./ลูกบาศก์เมตร} \\
 &\text{ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรม} = 755 \text{ บาท/ตัน (ภาคพงศ์, 2546)} \\
 &= 0.755 \text{ บาท/กก.} \\
 &\text{เพราะฉะนั้น ค่ากำจัดตะกอน} = 0.755 \text{ บาท/กก.} \times 1.54 \text{ กก./ลบ.ม.} \\
 &= 1.16 \text{ บาท/ลบ.ม.}
 \end{aligned}$$

4. ค่าใช้จ่ายทั้งหมด

$$\begin{aligned}
 \text{ค่าใช้จ่ายทั้งหมด} &= \text{ค่าไฟฟ้า} + \text{ค่ากำจัดตะกอน} + \text{ค่าแผ่น} \\
 \text{อะลูมิเนียม} &= 10.28 + 1.16 + 16.52 \text{ บาท/ลบ.ม.} \\
 &= 28 \text{ บาท/ลบ.ม.}
 \end{aligned}$$

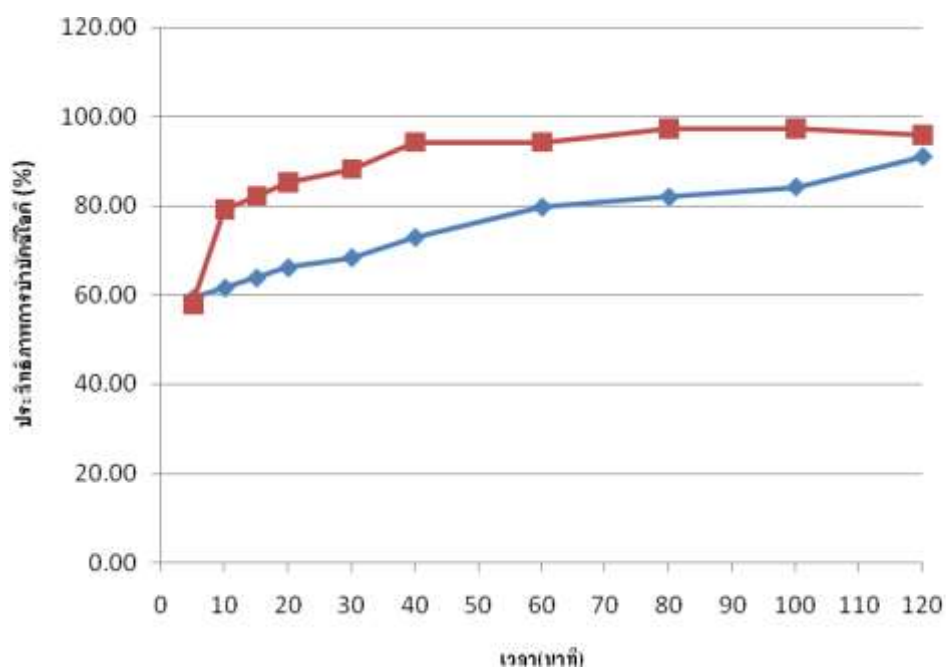
5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดขั้วอิเล็กโทรดเหล็กกับอะลูมิเนียม

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของขั้วอิเล็กโทรดเหล็กกับอะลูมิเนียม พบว่าขั้วอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมสามารถบำบัดสีได้ดีกว่าที่ 98% และประสิทธิภาพการบำบัดสีโอดีที่ 95% ค่าใช้จ่ายในการบำบัดอยู่ที่ 28 บาท ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับขั้วอิเล็กโทรดเหล็กพบว่า ขั้วอิเล็กโทรดเหล็กสามารถบำบัดสีได้ที่ 95% และบำบัดสีโอดีได้ที่ 91% ค่าใช้จ่ายในการบำบัดที่ 23 บาท ซึ่งพบว่าขั้วอิเล็กโทรดอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีกว่าขั้วอิเล็กโทรดเหล็ก แต่มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าเล็กน้อย



ภาพที่5-29 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดสีของเหล็กกับอะลูมิเนียม

พบว่าอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพบำบัดสีได้ดีกว่า ที่ pH 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 8 mA/cm² และอัตราการไหลคงที่ 6mL/min



ภาพที่ 5-30 แสดงการเปรียบเทียบการบำบัดสีโอดีของเหล็กกับอะลูมิเนียม

พบว่าอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพบำบัดสีโอดีได้ดีกว่า ที่ pH 6 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าคงที่ 8 mA/cm² และอัตราการไหลคงที่ 6mL/min จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมย้อมไหมด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้เหล็กและอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าพบว่าสภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการบำบัดตามพารามิเตอร์ต่างๆสามารถสรุปผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 5-3

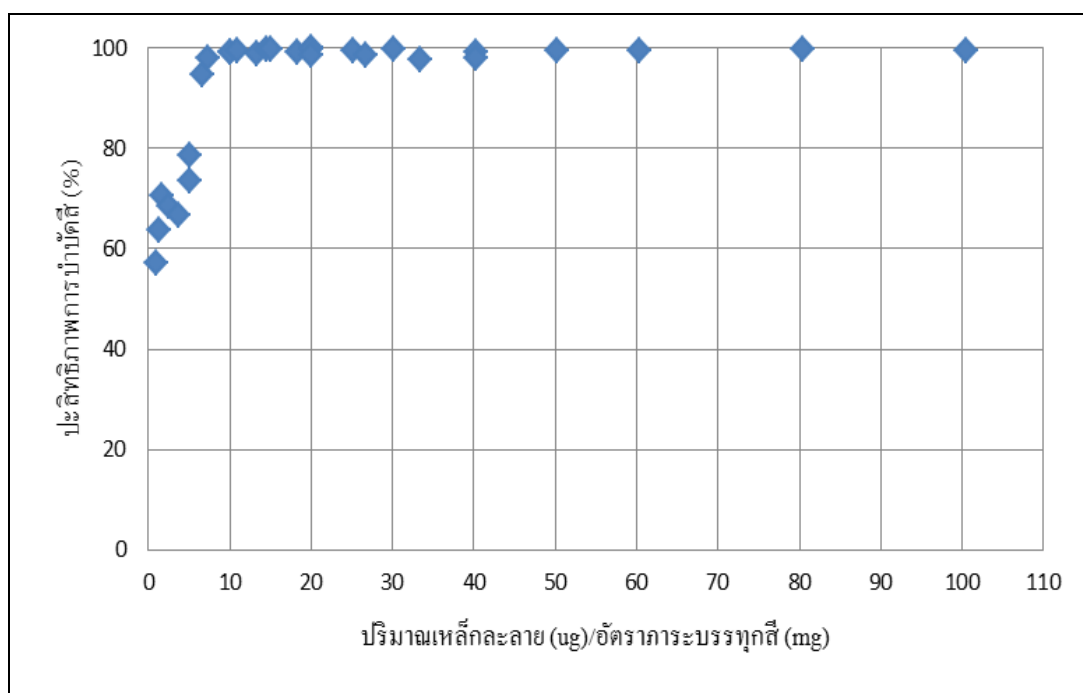
ตารางที่ 5-3 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมแอสิตด้วยกระบวนการตกตะกอนทางไฟฟ้า

พารามิเตอร์	Fe	Al
pH เริ่มต้น	6	6
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (mA/cm ²)	12	8
อัตราการไหล (mL/min)	8	6
ระยะเวลาในการบำบัด (นาที่)	60	60
ร้อยละการบำบัดสี (%)	95.67	98.00
ร้อยละการบำบัดซีโอดี (%)	91.14	95.75
ค่าไฟฟ้า (บาท/น้ำเสีย 1 m ³)	17	10.28
ค่าก่อกำจัดตะกอน (บาท/น้ำเสีย 1 m ³)	1.32	1.16
ค่าขั้วไฟฟ้า (บาท/น้ำเสีย 1 m ³)	4.72	16.5
ค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท/น้ำเสีย 1 m ³)	23	28

5.6 การศึกษาปัจจัยที่มีผลการพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาเบื้องต้นพบว่าอิเล็กโทรดเป็นเหล็กมีความเหมาะสมที่ใช้การบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหม ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัย พบว่า ปัจจัยที่มีผลทำให้เกิดเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ คือ ปัจจัยปริมาณเหล็กแตกตัวออกมาตามกฎของฟาราเดย์ต่อปริมาณภาระบรรทุกสี

จากการศึกษาพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็ก ซึ่งปริมาณเหล็กจะแปรผันตามปริมาณของกระแสไฟฟ้าให้กับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีต่อปริมาณภาระบรรทุกสี พบว่า สัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณเหล็กต่อสีที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดเพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มเส้นตรง โดยพบว่ากรณีที่ปริมาณเหล็กมากเกินไปคือมากกว่า 10 ไมโครกรัมต่อสี 1 กรัม สามารถบำบัดสีได้สี ในส่วนที่น้อยกว่า 10 ไมโครกรัม พบว่าความชันของสมการเส้นตรงเท่ากับ 5 แสดงดังภาพ 5-31 ซึ่งในการทดลองโดยถึงปฏิกรณ์ขนาดอื่น เบื้องต้นพบว่า ตัวแปรสำคัญและมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดคือปริมาณเหล็กละลายต่ออัตราภาระบรรทุกของสีเช่นกัน แต่ขนาดถึงปฏิกรณ์ หรือ รูปร่างที่แตกต่างกันจะมีความชันของสมการไม่เท่ากัน



ภาพที่ 5-31 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการบำบัดที่ปริมาณหลักละลายต่อกระบรทุกสี

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

1 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมแอสดด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าคือที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 5, 6, 7, 8, และ 9 พีเอชเริ่มต้นที่ 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด ส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 4, 8 และ 12 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 12 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด และอัตราการไหล 6, 8, 12, 16 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลที่ 8 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด โดยใช้ระยะเวลาในการบำบัด 60 นาที และสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมแอสดด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าคือที่ pH เริ่มต้นเท่ากับ 5, 6, 7, 8, และ 9 พีเอชเริ่มต้นที่ 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดดี ส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 1, 2, 4, 6 และ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 8 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุดและอัตราการไหล 6, 8, 12, 16 และ 25 มิลลิลิตรต่อนาที อัตราการไหลที่ 6 มิลลิลิตรต่อนาที มีประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด

2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมแอสดด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้าในสภาวะที่เหมาะสมสามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 95.67 บำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 91.14 และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมแอสดด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าเคมีโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าในสภาวะที่เหมาะสมสามารถบำบัดสีได้ร้อยละ 98 บำบัดซีโอดีได้ร้อยละ 95.75

3 ค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมโดยการใช้เหล็กเป็นขั้วไฟฟ้า มีค่าใช้จ่ายทั้งหมดเท่ากับ 23 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร โดยแยกเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 17 บาท ค่าบำบัดและกำจัดตะกอน 1.32 บาทและค่าขั้วไฟฟ้า 4.72 บาท และค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการบำบัดน้ำเสียโดยใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า มีค่าใช้จ่ายทั้งหมดเท่ากับ 28 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร โดยแยกเป็นค่าไฟฟ้าเท่ากับ 10.28 บาท ค่าบำบัดและกำจัดตะกอน 1.16 บาทและค่าขั้วไฟฟ้า 16.5 บาท

4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมไหมด้วยวิธีตกตะกอนทางไฟฟ้าโดยใช้เหล็กกับอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพบำบัดได้ดีกว่า แต่ขั้วไฟฟ้าชนิดเหล็กแม้จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่าแต่เมื่อถึงระยะเวลาสมควรจะมีประสิทธิภาพการบำบัดน้อยกว่าแต่ไม่ได้น้อยกว่าจนแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ทั้งนี้ในการศึกษาครั้งต่อไปจึงเลือกใช้ขั้วไฟฟ้าชนิดเหล็กในการดำเนินการทดลองต่อไป เนื่องจากประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เหล็กมีค่าใช้จ่ายถูกกว่า นอกจากนี้ในส่วนของงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปยังภาคอุตสาหกรรม และ อุตสาหกรรมชุมชน โดยมุ่งไปยังโรงย้อมผ้าขนาดเล็กหรือ โรงย้อมผ้าในครัวเรือนซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ทั้งในเมือง และชนบท การหาขั้วไฟฟ้าชนิดเหล็กหาได้ง่ายกว่าขั้วไฟฟ้าชนิดอะลูมิเนียม